

射线检测
基础讲座

第一讲 射线照相检验技术的基础

郑世才

(新立机器厂, 北京 100039)

BASES OF RADIOGRAPHY

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 射线分类和射线衰减规律

1.1 概述

射线按其产生和特点常分为二类: 电磁辐射和粒子辐射。

虽然 X 射线、γ 射线产生的机制不同, 能量也可以不同, 但它们的量子都是光子(光子), 都是电磁辐射。而 α 粒子、电子、中子和质子等都是粒子辐射。

电磁辐射通过光量子与物质相互作用。光量子不带电, 在与物质相互作用过程中, 光量子的能量转移给物质原子的电子或转化为其它粒子。在与物质原子的一次碰撞中, 损失其大部分能量或全部能量。在穿过物质时, 其强度按指数规律减弱。对一定能区的电磁辐射, 与物质的相互作用主要有光电效应、康普顿效应、电子对效应和瑞利散射。

粒子辐射与物质的相互作用与粒子的特性密切相关。例如, 带电粒子与物质的相互作用主要有与核外电子发生非弹性碰撞、与原子核发生非弹性碰撞、与原子核发生弹性碰撞和与核外电子发生弹性碰撞。这些作用都是带电粒子与库仑场的作用, 它们引起电离、激发、散射和各种形式的辐射损失。在带电粒子与物质的相互作用中, 主要是通过物质原子的核外电子的多次非弹性碰撞逐渐损失能量, 在一次碰撞中所转移的能量很小。因此, 一定能量的带电粒子在物质中有确定的射程。

显然, 电磁辐射和粒子辐射具有明显区别。以下射线照相检验技术的讨论中, 如果未作特殊说明均指 X、γ 射线。

1.2 射线衰减规律

当 X 射线、γ 射线(电磁辐射)射入物体后, 将与物质发生复杂的相互作用, 射线被散射和吸收, 使从

物体透射的射线强度低于入射射线强度, 这称为射线强度发生了衰减。

射线穿透物体时其强度的衰减与吸收体(射线入射的物体)的性质、厚度及射线光量子的能量相关。实验表明, 对于一束射线, 在均匀媒质中, 在无限小的厚度范围 dx 内, 强度的衰减量 dI 正比于入射射线强度和穿透物体的厚度 x 。这种关系可以写为

$$dI = -I\mu dx \quad (1-1)$$

对此式进行积分, 得到射线衰减的基本规律, 即

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1-2)$$

式中 I ——透射线强度

I_0 ——无吸收体时的入射线强度

μ ——物体的线衰减系数, cm^{-1}

在实际射线探伤中, 一般都是宽束射线情况, 这时透射射线强度应为一次射线和散射射线强度之和, 透射的一次射线一般记为 I_D , 透射的散射线一般记为 I_S , 这样有

$$I = I_D + I_S$$

关于散射线常引入散射比, 记为 n , 则有

$$n = \frac{I_S}{I_D}$$

由于不同能量的射线, 穿过同样厚度的物体时所产生的衰减并不相同, 这使连续谱射线的衰减规律变得复杂。因此, 在讨论连续谱射线的衰减规律时, 常引入等效能量或等效波长(平均波长), 采用这个能量或波长对连续谱射线的衰减规律进行近似的分析、计算。这样有

$$I = I_D + I_S = (1 + n)I_0 e^{-\mu x} \quad (1-3)$$

式中 μ ——等效能量的线衰减系数

在理论研究中, 也常引入积累因子 B , 即

$$B = 1 + \frac{I_S}{I_D} = 1 + n$$

这样, 又有

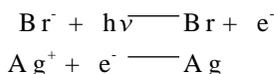
$$I = B I_0 e^{-\mu x}$$

对宽束连续谱射线严格地处理将比较复杂, 但只要认为式中的线衰减系数 μ 是对应于射线等效波长的线衰减系数, 那么就可以近似应用于宽束连续谱射线的情况。

2 射线照相效应

2.1 射线照相效应的过程和特点

感光乳剂中的溴化银晶体受到射线照射后, 与光照射的情况类似, 溴化银晶体点阵中将释放电子。这些电子可以在乳剂中移动, 在感光中心处被俘获, 与银离子中和形成银原子。上述过程可以写成



感光中心是感光乳剂制作过程中, 在卤化银晶体的角、棱边等处形成的中性银原子或硫化银等聚集处。按照能带理论, 当溴化银点阵中嵌入了银、硫化银等杂质质点时, 由于它们的导带位置比溴化银的导带稍低, 并可能在溴化银的禁带中产生新的能级。因此, 在射线照射激发下, 进入溴化银导带的电子, 可以自发地转移至银或硫化银的导带, 即被感光中心俘获。这就是潜影形成的第一阶段——电子传导阶段。

感光中心俘获电子以后带负电荷, 对溴化银点阵格间的银离子 (Ag^+) 具有吸引作用, 使银离子向感光中心移动, 与电子中和形成银原子 (Ag^0), 扩大了感光中心的尺寸。这是潜影形成的第二阶段——离子调节阶段。电子阶段和离子阶段都是可逆的, 在感光过程中上述过程不断重复, 直至曝光结束。这样产生的银原子团称为显影中心 (潜影中心), 显影中心的总和就是潜影。

这就是射线照相效应的基本过程。

射线与可见光相比, 一个基本差别是射线光量子的能量远大于可见光, 感光乳剂在射线照射下, 每吸收一个射线光量子就能够产生多个银原子, 而可见光的量子产率约为 1。在表 1-1 中列出了这方面的一些研究结果。因此, 一个射线光量子能使一个或多个卤化银颗粒显影, 这称为“一次撞击”本领。这导致射线照相效应与可见光照相效应的明显不同是射线照相效应不存在曝光量阈值, 可见光照相效应存在曝光量阈值; 射线照相效应 (直接对射线曝光) 不存在互易律失效, 可见光照相效应在低照度和高照度时都存在互易律失效。

2.2 显影

表 1-1 部分波长的量子产率

波长/ $\times 10^{-8}\text{cm}$	量子产率	波长/ $\times 10^{-8}\text{cm}$	量子产率
0.24	920	3.658	0.93
0.63	363	4.047	0.92
1.09	210	4.936	0.96
1.54	148		

对于由一般的照相过程得到的影象, 需要进行显影和定影才能得到固定的影象。

显影本质上是一个氧化还原过程。显影从显影中心开始, 首先显影剂 (还原剂) 放出电子, 自身氧化。然后, 溴化银晶体中的银离子 (氧化剂) 接受电子, 还原为银原子。实际过程大体是, 溴化银晶体首先吸附溴离子, 形成负电层。在负电层外吸附钾正离子, 又形成一正电层。这样, 在溴化银晶体表面和溶液之间形成具有一定静电位的双电层。在显影过程中, 显影剂必须穿过双电层, 吸附到溴化银晶体表面, 才能开始显影过程。电极理论认为, 溴化银晶体表面的显影中心, 由于是银的微斑, 因此吸附溴离子少, 其双电层薄弱, 这样, 带负电的显影剂容易吸附在显影中心。银微斑具有良好的导电性, 电子通过银微斑从显影剂进入溴化银晶体, 与银离子中和形成银原子。上述过程可概括为三个基本步骤, 即显影剂吸附到已感光的溴化银晶体表面; 显影剂释放电子, 电子转移到显影中心; 电子与溴化银晶体中的银离子结合成银原子, 沉积在显影中心。为了满足显影的条件, 必须控制显影液的 pH 值和溴离子浓度。

显影过程的三个特点是:

(1) 诱导期 从显影开始至显现初象, 对于正常的显影过程需经过 30~40s。诱导期的长短与照射量和显影剂的特点相关。

(2) 自动催化 显影过程生成的银原子具有促进显影过程的能力, 即显影过程一旦开始, 将显现加速进行的特点。

(3) 放大作用 显影过程得到的银原子数远多于曝光产生的银原子, 其比约为 $10^9 \sim 10^{10}$ 。

为产生超加和作用, 显影液一般用两种显影剂配合作为新的显影剂, 对苯二酚与米吐尔作为显影剂的显影液称为 M-Q 显影液, 对苯二酚与菲尼酮作为显影剂的显影液称为 P-Q 显影液。与 M-Q 显影液相比, P-Q 显影液的显影能力更强, 不易氧化, 对温度不敏感, 对溴离子敏感差, 得到的影象对比度更高, 颗粒更细。表 1-2 列出了显影液各成分的作用与特点。

2.3 定影

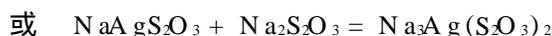
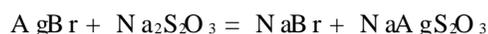
显影之后在乳剂层还有相当数量的卤化银未被

表 1-2 显影液各组分的作用与特点

组 分	常用化学药品	作 用	特 点
显影剂	米吐尔	与卤化银发生氧化还原反应,使感光的卤化银还原为金属银	作用快,反差小,易氧化,对温度不敏感
	对苯二酚		作用慢,反差大,氧化慢,对温度敏感
	菲尼酮		强超加和性,不易氧化,对温度不敏感
保护剂	无水亚硫酸钠	优先与氧化合,防止显影剂氧化,稳定显影剂性能	
加速剂	无水碳酸钠	中和显影产生的氢离子,控制显影液的碱性,保证显影剂离解作用	逐步离解,稳定性好
	氢氧化钠		快速离解,失效快,强腐蚀性
抑制剂	溴化钾	吸附在卤化银颗粒上,排斥显影剂负离子,减少未曝光卤化银的显影	
溶 剂	水	溶解药品	

还原为原子银,定影过程的基本作用是将保留在乳剂层中未感光的卤化银从乳剂层中溶解掉,并使显影形成的影象固定下来。在定影过程中定影剂硫代硫酸钠与卤化银发生化学反应,生成溶于水的银的络合物,但对已还原的金属银不发生溶解作用。

定影过程一般可分为两个(或三个)阶段,即



第一阶段硫代硫酸钠与卤化银反应,生成不溶于水的硫代硫酸银钠,但底片可呈现为透明状。在第二阶段硫代硫酸钠与生成的不溶于水的硫代硫酸银钠继续反应,生成可溶于水的硫代硫酸三银钠。此时定影过程完成。第二阶段反应时,定影液中必须有足够的定影剂硫代硫酸钠。

目前在工业中应用的一般都是酸性定影液,其各组分的作用见表 1-3。

完成定影所需要的时间与定影液中硫代硫酸钠浓度、定影液老化程度及定影温度都相关。胶片从停显液移入定影液开始至未感光部分呈现透明所需的时间常称为“定透时间”(或“通透时间”),如果定影时间短于定透时间,射线照片将呈现灰白雾状,影象明显不清晰。定影时间超过定透时间,胶片未感光部分也已呈现透明状态,但不能简单地认为定影过程已经完成。定影过程中硫代硫酸钠与卤化银的反应要经过多个阶段,中间阶段生成的银的络合物是无色但稍溶于水的物质,因此,在胶片未感光的部分已呈现透明时,很可能这些反应生成物并未转移至定影液中,定影过程也未进行完毕。实验研究指出,定影时间应为定透时间的 2 倍。如果定影液过分老化,使定影时间过长,可导致定影过程产生的硫代硫酸银(钠)粘附在明胶上,水洗难以去除,最终分解、变

表 1-3 定影液各组分的作用与特点

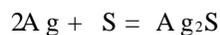
组分	常用化学药品	作用与特点
定影剂	硫代硫酸钠	溶解未感光的卤化银,固定银影象。溶解能力适中,在酸性溶液中稳定,价格较低
酸性剂	冰醋酸	保持定影液酸度,延长定影液的保存期;中和显影液带入的碱性,防止二色性灰雾。 pH = 4
	硼酸	
保护剂	亚硫酸钠	优先与 H ⁺ 化合,控制定影液的酸度,减少硫酸根分解(产生硫沉淀),定影液的酸度一般控制在 pH = 4~5
坚膜剂	硫酸铝钾	防止乳剂膜吸水膨胀变软, pH = 4~5 时效果好
溶 剂	水	溶解药品

注: pH 值即溶液的酸碱度,定义为 $pH = - \lg[H^+]$, $[H^+]$ 为溶液的氢离子浓度,单位是克离子/升。纯水的氢离子浓度为 10^{-7} , 所以其 pH = 7, 酸的 pH < 7, 碱的 pH > 7。

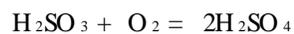
色,破坏底片质量。定影后在胶片表面和内部都吸附着硫代硫酸钠和银的络合物,如因水洗不足,它们留在射线底片里,银的络合物会很快分解,硫代硫酸钠会缓慢地与空气中的水分、二氧化碳进行反应,最终产生棕黄色的硫化银,导致射线底片上出现黄斑。所涉及的一些主要反应如下



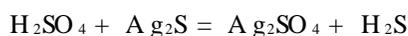
(硫代硫酸分解生成亚硫酸和硫)



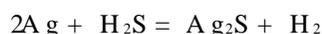
(生成硫化银,呈棕黄色)



(亚硫酸与氧反应生成硫酸)



(硫酸与硫化银反应生成白色硫酸银和硫化氢)



(硫化银呈棕黄色)

3 影象质量

影象质量的基本因素可从金属阶梯的透照结果得到说明。当透照一金属阶梯时, 阶梯交界处的影象如图 1-1 所示。理想的影象应如图 1-1a 所示, 实际影象应如图 1-1b 所示。如果对射线底片上的影象黑度用测微光度计沿某阶梯厚度变化方向进行扫描测量, 将得到如图 1-1c 所示的黑度分布图, 可见黑度分布具有细致的不规则起伏变化。图中的 ΔD , U 和 σ 就是影象质量的三个基本因素, 即对比度(衬度)、不清晰度和颗粒度(或噪声)。

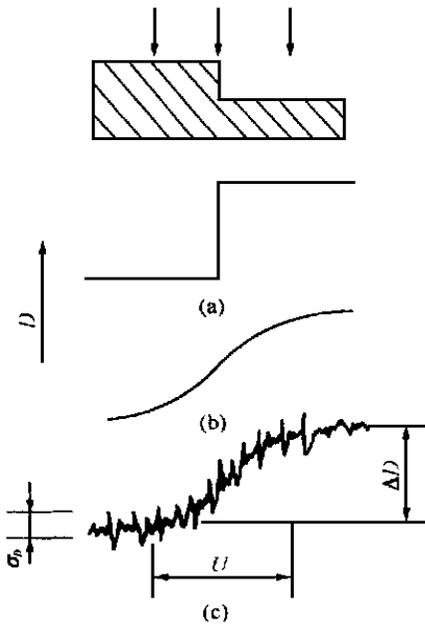


图 1-1 金属阶梯影象的黑度分布

影象对比度定义为射线底片上两个区域的黑度差, 一般记为 ΔD 。对射线底片上的影象, 对比度常指细节影象黑度与背景黑度之差。影象不清晰是射线底片上细节影象边界扩展的宽度(半影宽), 对工业射线照相, 主要的不清晰度有几何不清晰度 U_g 和固有不清度 U_i , 此外还有屏不清度 U_s 和运动不清度 U_m 。几何不清晰度是由于射线源总有一定的尺寸, 以致细节影象具有一定半影宽度。固有不清度是由于入射到胶片的射线, 在乳剂层中激发出的次级电子的散射产生的, 它的大小决定于次级电子在乳剂层中能量损失的过程, 因此固有不清度决定于射线的能量。射线照相总的不清度 U_t 由以上各种不清度综合构成, 对于常规射线照相, 只考虑几何不清度和固有不清度。

微观上, 影象由金属银颗粒组成。这些颗粒呈现

不均匀的分布, 颗粒之间存在不等的空隙。在一定的放大倍数下, 眼睛可以看到影象黑度的不均匀性, 这就是影象的颗粒性。颗粒性的客观量度称为颗粒度。影象的颗粒度不等于胶片感光剂卤化银的颗粒大小。实际上, X 射线胶片卤化银颗粒的尺寸很小, 一般 $1\mu\text{m}$, 这样小的尺寸在放大 20 倍时也不容易识别。颗粒度是卤化银微粒的尺寸及其在乳剂中分布的随机性和射线光子被吸收的随机性的反映。颗粒度除了与胶片本身的性质相关外, 还与射线能量和曝光量相关, 也与显影条件和显影过程相关。在较低能量的射线和较大的曝光量下透照, 可以得到较小的颗粒度, 反之, 将增大颗粒度。显影条件与胶片特性不符合, 显影过程不足或过度, 也将引起颗粒度增大。颗粒度限制了影象能够记录的细节的最小尺寸。

有关的主要公式有:

(1) 射线照相对比度

$$\Delta D = - \frac{0.434\mu G \Delta T}{1+n} \quad (1-4)$$

式中 G ——胶片特性曲线在某一黑度处的梯度

$$G = \frac{dD}{d \lg E}$$

此公式可如下导出:

胶片特性曲线的函数关系式有

$$\begin{aligned} D &= G \lg H + C \\ D &= G \lg H + C \end{aligned} \quad (1-5)$$

式中 $H = I t$

$$H = I t$$

由于 $\Delta T \ll T$, 所以近似有

$$G = G$$

故 $\Delta D = G (\lg H - \lg H)$

$$\Delta D = G \lg \frac{L}{I}$$

从近似关系式

$$e^x = 1 + x \quad (|x| \ll 1)$$

得

$$e^{\frac{\Delta I}{I}} = 1 + \frac{\Delta I}{I} = \frac{L}{I}$$

所以

$$\begin{aligned} \Delta D &= G \lg e^{\frac{\Delta I}{I}} \\ \Delta D &= G \frac{\Delta I}{I} \lg e \end{aligned} \quad (1-6)$$

又有

$$\frac{\Delta I}{I} = - \frac{\mu \Delta T}{1+n}$$

代入式(1-6), 则得到对比度的公式, 即式(1-4)。

(2) 不清晰度

$$U_g = \frac{\phi T}{F - T} \quad (1-7)$$

式中 ϕ ——焦点或射源尺寸

F ——焦点或射源至胶片距离

T ——试件厚度(假定试件底面紧贴胶片)

$$U_i^2 = U_g^2 + U_i^2 \quad (1-8)$$

有时也采用下面的关系式

$$U_i^3 = U_g^3 + U_i^3 \quad (1-9)$$

研究指出, 如果细节影象的宽度尺寸小于射线照相总的不清晰度, 那么不清晰度将引起影象对比度降低。近似认为不清晰度曲线为直线时可得到

$$C = C_0 \frac{w_0}{U} \quad (w_0 < U) \quad (1-10)$$

式中 C ——不清晰度为 U 时影象的对比度

C_0 ——不清晰度为 0 时影象的对比度

w_0 ——细节影象(在 $U_g = 0$ 时)的宽度

这个关系适用于各种不清晰度。

4 细节影象的可识别性

按照射线照相技术的一般理论, 为了识别射线底片上一个细节的影象, 这个细节影象的对比度 ΔD 必须满足两个条件:

$$(1) \quad |\Delta D| \geq \Delta D_{\min}$$

$$(2) \quad |\Delta D| \geq (3 \sim 5) \sigma$$

式中 ΔD_{\min} ——识别细节影象所需的最小黑度差 (日本称为识别界限对比度)

σ ——射线照片黑度不均匀性的标准差

第一个条件是从眼睛的视觉特性提出的。识别一个细节影象所需的最小黑度差 ΔD_{\min} , 决定于眼睛的视觉特性及关于细节影象的形状、尺寸。例如, 在适当的照明条件下, 识别一些细节影象所需的最小黑度差为

细长丝状影象 $\Delta D_{\min} = 0.006$

细小点状影象 $\Delta D_{\min} = 0.008$

较大点状影象 $\Delta D_{\min} = 0.006$

第二个条件是从统计理论的信噪比概念提出的, 即信号必须高于噪声 3~5 倍, 才能从背景噪声中识别出信号。 σ 是以影象黑度的标准差表示的影象颗粒度, 一般可简单地认为是塞尔文颗粒度。

研讨射线底片上各种细节影象的可识别性, 即其对比度 ΔD 与射线照相技术因素及本身形状、尺寸的关系时, 均有如下近似假定:

(1) 缺陷尺寸相对于工件厚度很小, 有缺陷与无缺陷处的散射比一样。

(2) 射线底片上细节影象的宽度等于细节本身的宽度与不清晰度之和。

(3) 细节影象的可识别性决定于细节影象的黑度峰值与背景黑度之差。

(4) 射线照相影象的黑度分布可以用形状因子修正为矩形分布。

(5) 影象的颗粒度对影象可识别性的影响可以忽略。

对丝型细节

$$\frac{\pi d^2}{4F(U+d)} = - \frac{2.3\Delta D(1+n)}{\mu G} \quad (1-11)$$

对柱孔细节

$$\frac{hd^2}{F(2U+d)^2} = - \frac{2.3\Delta D(1+n)}{\mu G} \quad (1-12)$$

对球孔细节

$$\frac{2d^3}{3F(2U+d)^2} = - \frac{2.3\Delta D(1+n)}{\mu G} \quad (1-13)$$

对矩形缝细节

$$\frac{l \cdot w}{F(l \cdot \sin\theta + w \cos\theta + U)} = - \frac{2.3\Delta D(1+n)}{\mu G} \quad (1-14)$$

式中 d ——丝、柱孔、球孔的直径

h ——柱孔所在阶梯的板厚

l ——矩形缝长度

w ——矩形缝宽度

θ ——矩形缝长度方向与射线束所成的角度

以上各式右边均可用对比灵敏度或厚度灵敏度 Δx 表示, 且 ΔD 应为 ΔD_{\min} , 即

$$\Delta x = - \frac{2.3\Delta D_{\min}(1+n)}{\mu G}$$

裂纹参数示意图见图 1-2。

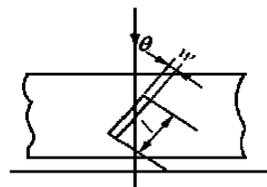


图 1-2 裂纹的三个参数

形状因子 F 的值如下:

对丝 $d > U$ 时, $F = 1$; 其余 $F = 2/\pi$

对柱孔 $d/2 < U_t$ 时, $F = 1$; $d/2 > U_t$ 时, $F = 0.48$;

对矩形缝 $w/U_t > 0.6$ 时, $F = 1$; $w/U_t < 0.6$ 时, $F = 0.5w/U_t + 0.67$ 。

5 自然缺陷检验灵敏度

射线照相检验的缺陷, 按缺陷的特点可粗略分为四类:

(1) 点状缺陷(如气孔等) 这类缺陷的基本形状为球形, 体积小, 不形成特定的延伸方向。

(2) 面状缺陷(如裂纹、未熔合、未焊透和冷隔等) 这类缺陷的基本特点是断面上宽度很小, 具有很大的深宽比, 一般具有特定的延伸方向。

(3) 条状缺陷(如条状夹渣和条状气孔等) 这类缺陷的断面近似为圆形, 具有一定的长度。

(4) 体积状缺陷(如缩孔、大夹杂物和大气孔等) 这类缺陷具有较大的体积, 可认为无特定的延伸方向。

缺陷检验灵敏度是指在一定的射线照相技术下可识别的缺陷最小尺寸。影响缺陷检验灵敏度的因素包括射线照相技术、缺陷本身的性质、缺陷的形状和尺寸、工件特性(几何形状等)及缺陷在工件中的位置。对上述四类缺陷可分别用不同细节的可识别性公式估计其缺陷检验灵敏度。

关于射线照相技术对缺陷, 特别是对裂纹的检验能力曾进行了大量理论和试验研究, 得到的主要结果有:

若 $\theta = 0^\circ; W < U_t$, 则

$$lw = - \frac{2.3F\Delta D(1+n)}{\mu G} U_t$$

最大可检验的裂纹角度

$$\sin(\theta_{\max}) = \frac{3w}{2\Delta T} - \frac{U_t}{l}$$

裂纹缺陷检验灵敏度与丝型象质计灵敏度的关系

$$lw = \frac{0.8d^2}{1 + \frac{d}{U}}$$

日本的一些研究者从试验中概括出下面的关系

$$lw = K\theta d^3$$

$K\theta$ 与角度 θ 的关系见图 1-3。英国国家标准 BS 7257—1989 在其附录 E 中给出了下列关系:

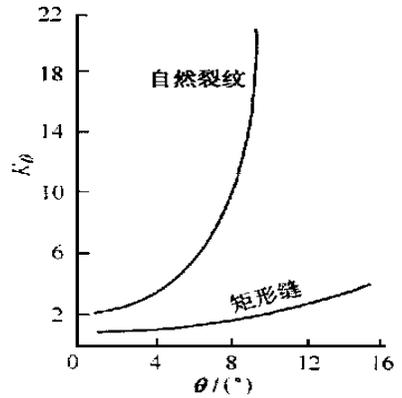


图 1-3 $K\theta$ 与角度 θ 的关系

(1) 气孔可检出直径 d 与阶梯孔象质计灵敏度 S_h 的关系

$$d = \frac{3}{2} S_h \cdot T$$

式中 T —— 工件厚度

(2) 夹渣可检出尺寸 d 与阶梯孔象质计灵敏度 S_h 的关系(工件厚度 T 较小时)

$$d = 3S_h \cdot T$$

(3) 平面状缺陷可检出尺寸与射线技术、对比度、不清晰度等存在着复杂的关系。

收稿日期: 1999-08-10

(上接第 16 页)

surface inspection Steel Times International, 1998, 22 (3): 30

5 David G Park, Martin P Levoi, Haneghem A I van Practical application of on-line hot strip inspection system at hoogovens Iron and Steel Engineer, 1995, 72 (7): 40- 43

6 Bindra A. Speedier ADCs pickup more bits and samples Electronic Design, 1999, 47(2): 66- 74

7 钟玉琢, 乔秉新, 李树青. 机器人视觉技术 北京: 国防工业出版社, 1994

8 张大鹏. 模式识别与图象处理并行计算机系统设计. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998

9 Keinosuke Fukunaga, Raymond R Hayes Effect of sample size in classifier design IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1989, 11(8): 873- 885

收稿日期: 1999-08-17

(上接第 27 页)

5 JIS G0565- 1974 钢铁材料的磁粉探伤试验方法和缺陷磁痕的等级分类

6 , , 1966, 2(5): 50- 65

7 仲维畅. 磁偶极子与磁粉探伤 无损检测, 1990, 12(3): 66 - 70

8 王先冲. 电磁场理论与应用 北京: 科学出版社, 1986

9 Zhong Weichang. Magnetic particle inspection —— a new theory. The British Journal of Nondestructive Testing, 1993, 35(2): 68- 74

10 仲维畅. 磁化场方向影响磁粉显现缺陷的理论 无损检测, 1995, 17(5): 138- 143

11 仲维畅, 殷璇, 傅国耀. 磁偶极子磁场的等强度线 无损检测, 21(3): 124- 125

12 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学 北京: 高等教育出版社, 1978

收稿日期: 1996-09-02

射线检测
基础讲座

第二讲 射线照相检验基本技术

郑世才

(新立机器厂, 北京 100039)

BASIC RADIOGRAPHIC TECHNIQUES

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 透照布置与有效透照区

射线照相的基本透照布置如图 2-1 所示。考虑透照布置的基本原则是使射线照相能更有效地对缺陷进行检验。在具体进行透照布置时主要应考虑射线源、工件和胶片的相对位置。应使透照厚度尽可能小, 缺陷更靠近胶片。射线中心束的方向, 尽可能

能使射线中心束的方向沿着危害性缺陷延伸方向。

有效透照区(L_3)。中心射线束在一般情况下应指向有效透照区的中心。有效透照区主要是控制一次透照中透照厚度变化的范围, 这个变化范围必须限制在一定的限度之内, 以使有效透照区在射线底片上形成的影象满足以下要求, 即(a) 黑度处于规定的黑度范围。(b) 射线照相灵敏度符合规定的要求。

透照厚度是指透照时射线穿过工件的行程。显然, 在透照区内不同的位置其透照厚度不同。在一次透照范围内, 如果不同点的透照厚度相差过大, 将造成射线底片上不同点的黑度相差过大, 这必然导致不同点影象质量明显不同, 以致难以确定射线底片的射线照相灵敏度, 因此必须控制一次透照范围。

在选定透照布置后也就确定了射线照相的几何不清晰度、透照厚度比、有效透照区和影象的放大倍数。按照相似关系容易得到几何不清晰度 U_g 的计算式为

$$U_g = \frac{\phi}{f} = \frac{\phi_2}{L_1}$$

式中 ϕ ——焦点或射源尺寸, mm

L_1 ——焦点或射源至工件表面距离, mm

L_2 ——工件表面至胶片距离, mm

透照厚度比

$$K = \frac{T}{T} \tag{2-1}$$

有效透照区

$$L_3 = 2L_1 \tan \theta \tag{2-2}$$

影象宽度(图 2-1b)

$$W = W_0 + U_g \tag{2-3}$$

式中 W_0 ——几何不清晰度为 0 时影象的宽度
影象的放大倍数 M 为

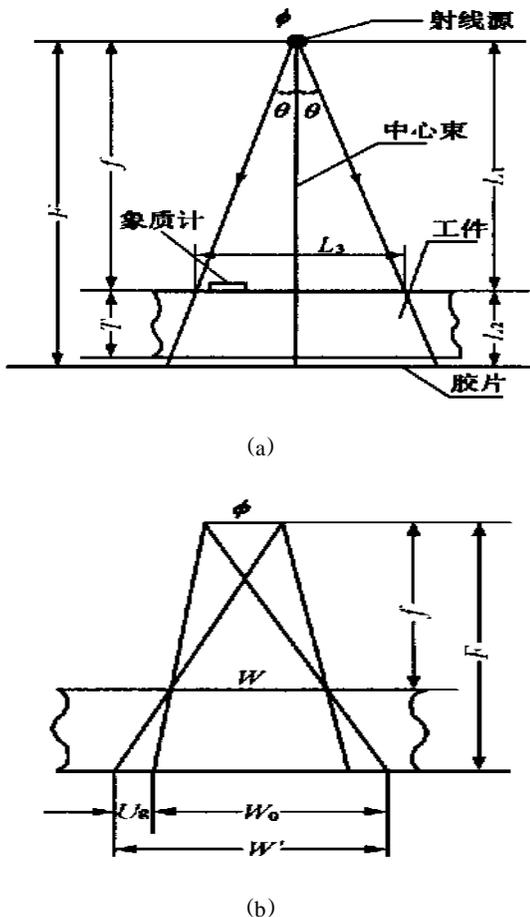


图 2-1 射线照相的基本透照布置

$$M = \frac{W}{W} = \frac{E}{f} + \frac{U_s}{W} \quad (2-4)$$

有时记

$$M_0 = \frac{E}{f} \quad (2-5)$$

故

$$M = M_0 + \frac{U_s}{W} \quad (2-6)$$

实际常控制的一些参数是透照厚度比和裂纹检验角等。对平板工件有效透照区的规定主要有三种,即规定透照厚度比、照射角(或横向裂纹检验角)或有效透照区与焦距的关系。表 2-1 列出了常见的三种具体规定。

表 2-1 平板工件有效透照区的一些规定

技术级别	f/L_3	透照厚度比 K	照射角 $\theta/(\circ)$
A 级	2	1.03	14
B 级	3	1.01	9

2 基本透照参数

射线能量、焦距和曝光量是三个基本透照参数,这三个基本透照参数与影象质量的三个基本因素(即对比度、不清晰度和颗粒度)密切相关。对比度基本公式给出了它们之间的主要关系

$$\Delta D = - \frac{0.434 \mu G \Delta T}{1+n}$$

以下丝型细节的可识别性公式给出了细节影象可识别性与基本透照参数的典型关系

$$\frac{\pi d^2}{4F(U+d)} = - \frac{2.3 \Delta D (1+n)}{\mu G}$$

基本透照参数选取的原则可概括如下:

(1) 射线能量 按透照厚度选取射线能量,对低能(400kV 以下)X 射线,所选取的透照电压不应超过按厚度规定的最高透照电压。

(2) 焦距 所选取的最小焦距必须满足射线照相相对几何不清晰度的规定,实际使用的焦距应符合有效透照区的要求。

(3) 曝光量 应不小于规定的推荐值。

对不同透照厚度,其透照电压可按下列经验式计算

$$V = A + BT$$

此式适用于中速胶片的检验,曝光量约 20mA·min。透照电压系数见表 2-2。

美国材料试验学会标准 ASTM E94-93 认为,100~500kV 的 X 射线,对能量达其 2.5~10 倍射线的半值层透照可得到满意的结果。表 2-3 是其给出的不同射线能量的钢的半值层。

表 2-2 透照电压系数值 kV

材料	A		B	
	0mm < T	5mm T	0mm < T	5mm T
	< 5mm	< 50mm	< 5mm	< 50mm
钢	40	80	10	5
铝	20	40	5	1.5

T——透照厚度,mm

表 2-3 ASTM E94-93 给出的钢的半值层

射线能量 kV	半值层 HVL mm	射线能量 MV	半值层 HVL mm
120	2.5	1	14.5
150	3.6	2 ²⁾	20.3
200	5.1	4	25.4
250	6.4	6	29.2
400 ¹⁾	8.9	10	31.8

注: 1) ¹⁹²Ir 2) ⁶⁰Co

确定最小焦距 F_{min} 经常使用诺模图。诺模图是一种计算用的列线图,确定最小焦距的三线诺模图是利用梯形上底与下底之和等于两倍中线的几何关系画出的三线计算图。用该图可以直接查出给定条件下的最小焦距($F_{min} = L_1 + L_2$)。制作诺模图时需解决三个问题,即三线的左右相对位置、三线的上下相对位置和三线的刻度尺单位长度。下面以 $f/\phi = 15T^{2/3}$ 为例说明。

首先对此式取对数,得

$$\lg f - \lg \phi = \lg 15 + \frac{2}{3} \lg T$$

将此式整理成下式

$$\frac{1}{2} (2 \lg f) = (\lg 15 + \lg \phi + \frac{2}{3} \lg T)$$

按此式可以确定

(1) f 线位于梯形中间; ϕ 线和 T 线为上下底,可任意等距离地分置于 f 线的两侧。

(2) 从式中看到, f , ϕ 和 T 对数前的系数分别为 1/2, 1 和 2/3, 因此,三线对数刻度尺的单位长度比为

$$\phi \text{ 线 } : f \text{ 线 } : T \text{ 线 } = 1 : \frac{1}{2} : \frac{2}{3}$$

例如 ϕ 线取 1~10mm 的长度为 134mm, 则 f 线取 $134 \times 1/2 = 67\text{mm}$, T 线取 $134 \times 2/3 = 89.3\text{mm}$, 按上述长度分别画出 ϕ_f 和 T 线的对数刻度。

(3) 为确定三线的上下相对位置,先适当固定两线的位置(如 ϕ 线和 f 线),然后取其一组值(例 $\phi = 2\text{mm}$, $f = 100\text{mm}$)代入原式计算出 $T = 6.1\text{mm}$, 按此值移动 T 线,使上值三点位于一条直线上。

这样就完成了所需的诺模图。图 2-2 就是按上述程序作出的诺模图。

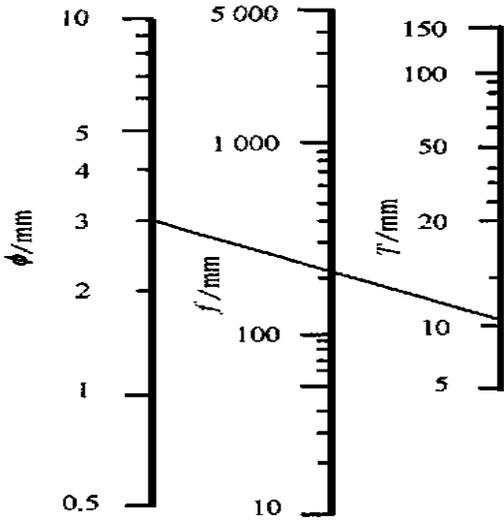


图 2-2 计算最小焦距 F_{min} 的诺模图 ($f/\phi = 15T^{2/3}$)

关于曝光量英国标准对低能 (400kV 以下) X 射线规定的推荐值为 15, 20 和 30 mA · m in。

3 曝光曲线

实际射线照相中常采用曝光曲线确定透照参数, 从曝光曲线给出的关系可方便地确定透照某种材料、一定厚度的工件, 满足规定的质量要求 (特别是达到一定黑度) 应选用的射线能量、焦距和曝光量等。曝光曲线是在一定条件下绘制的透照参数 (射线能量、焦距和曝光量) 与透照厚度之间的关系曲线。给定的曝光曲线只适于在给定条件下使用, 如果实际照相条件与曲线绘制条件不一致, 则必须对从曝光时间得到的数据进行修正, 或重新制作曝光曲线。

理论上常用的 X 射线照相曝光曲线是以透照电压为参数给出一定焦距下曝光量对数与透照厚度之间的关系。该类曝光曲线的函数关系为

$$\lg E = kT + C \quad (2-8)$$

导出此式的条件主要为 射线应近似单色化, 否则线衰减系数不能以常数处理。互易律不能失效。

实际射线照相的条件不同于曝光曲线制作条件时, 必须对从曝光曲线得到的透照参数进行修正, 现分四种情况进行讨论。

(1) 焦距不同时的修正 一般可简单地按平方反比定律修正, 即按照曝光因子进行计算修正。

(2) 黑度不同时的修正 这时应使用射线胶片的特性曲线进行修正。从胶片特性曲线查出对应于曝光曲线采用的射线底片黑度 D_0 与射线照相时射

线底片采用的黑度 D 的曝光量之比, 将曝光曲线上得到的曝光量乘以这个比, 即得到黑度改变后应选用的曝光量。由于胶片的感光度与射线能量相关, 即对不同能量的射线产生同一黑度所需的曝光量不同, 而胶片特性曲线仅仅是按照标准规定的能量制作的关系曲线, 因此, 将它应用到不同能量的射线时将存在误差。因而, 这是一种近似修正方法。

(3) 胶片不同时的修正 修正时必须有两种胶片的特性曲线。先从胶片特性曲线查出为得到黑度 D_0 不同胶片应采用的曝光量, 然后求出它们的曝光量之比, 最后将曝光曲线上求得的曝光量乘以这个比值, 即得到换用胶片时应采用的曝光量。与黑度修正相同, 该修正也存在近似性。

(4) 材料不同时的修正 这时可借助于材料的射线照相等效系数进行修正。材料的射线照相等效系数是指不同材料对射线吸收的等效性, 由于材料对射线的吸收不仅与材料本身的性质相关, 而且也与射线能量相关, 因此, 不同能量的射线, 其等效系数并不完全相同。使用材料的射线照相等效系数时, 首先应确定对被检工件应采用的射线能量 (透照电压), 然后从材料的射线照相等效系数表中确定等效系数, 进而得出等效厚度。

射线照相的厚度宽容度是指在一次透照中, 可以透照的厚度差范围。它可以从曝光曲线的函数关系和胶片特性曲线的函数关系导出, 即

$$\begin{aligned} \lg E &= kT + C \\ D &= G \lg H + C \\ \Delta T &= \frac{\Delta D}{G \cdot k} \end{aligned} \quad (2-9)$$

式中 ΔT 和 ΔD 均为绝对值。可见, 若射线底片允许的黑度差范围为 ΔD , 则可透照的厚度差范围 ΔT 与胶片特性曲线的梯度和曝光曲线的斜率有关。图 2-3 显示了曝光曲线斜率与射线照相厚度宽容度的关系。由于不同胶片的感光特性曲线不同, 其射线照相厚度宽容度也不同。

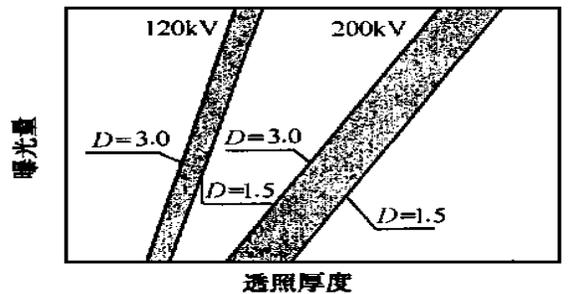


图 2-3 不同透照电压的射线照相厚度宽容度

4 缺陷深度测定

评定工件的质量不仅需要确定缺陷的性质和大小,而且需要知道其在工件中的位置。对于缺陷返修,准确定位尤其重要。在射线照相中,由于射线底片直接给出的是缺陷在透照平面上的位置,所以缺陷位置测定主要是确定其深度位置。

缺陷深度测定可以通过二次射线照相实现。最简单、最容易实现的二次射线照相方法是,在互相垂直的两个方向进行二次射线照相,从得到的两张射线底片可以直接测量缺陷的位置。但是,对于许多工件,由于其结构的几何特点,常常不能采用上述方法,而只能用其它的二次射线照相方法来确定缺陷位置,即平移二次射线照相法和旋转二次射线照相法。平移二次射线照相法是在完成第一次射线照相后,射线源与被透照工件进行一平行的相对移动,然后再完成第二次射线照相,用所得到的两张射线底片确定缺陷位置。旋转二次射线照相法是在完成第一次射线照相后,射线源相对于被透照工件旋转一个角度,再完成第二次射线照相,从得到的两张射线底片确定缺陷位置。图 2-4 是平移二次射线照相法(单标记近似法)的示意图,按图所示有

$$\frac{BC}{W} = \frac{h}{f+h}$$

因为 $BC = MC - MB$

$$\text{又} \quad \frac{MC}{M_2X_2} = \frac{f}{F} \quad \frac{MB}{M_1X_1} = \frac{f}{F}$$

所以

$$BC = \frac{(M_2X_2 - M_1X_1)f}{F}$$

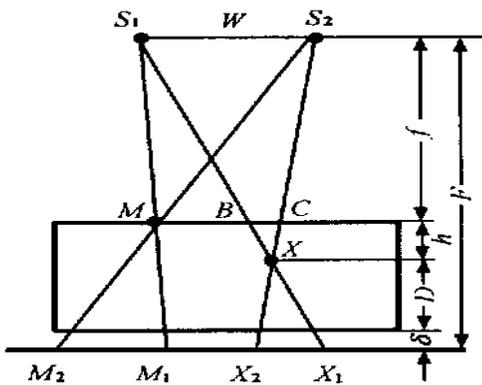


图 2-4 平移二次射线照相定位法(单标记近似法)

- X —— 工件中的缺陷位置 h —— 缺陷至工件表面距离
- D —— 缺陷至工件底面距离 S_1, S_2 —— 第一、二次射线照相的射源位置
- W —— 两次射线照相中射线源平移距离 M —— 工件表面的铅制标记位置

$$\text{记} \quad \Delta = |M_2X_2 - M_1X_1|$$

$$\text{则} \quad \frac{f \cdot \Delta}{F \cdot W} = \frac{h}{f+h}$$

最后得到

$$h = \frac{f \cdot \Delta}{WF - f \cdot \Delta} \quad (2-10)$$

由于 Δ 取的是绝对值,所以此式对图中两种情况都适用。从式(2-10)可以看到,只要从得到的两张射线底片上测量出第一次射线照相的标记影象与缺陷影象间的距离 M_1X_1 和第二次射线照相的标记影象与缺陷影象间的距离 M_2X_2 ,并测量出 W, f 和 F ,则可按式(2-10)计算缺陷至工件表面的距离。

也可以采用作图法确定缺陷位置,其适用于各种二次射线照相中缺陷的定位。只要图画得准确,同样可得到满意的结果。此外,还可采用双标记法,也可不用标记。

未焊透深度测定是一个典型的缺陷深度测定问题。它除可以采用上述二次透照法外,还可采用黑度计算法和试块对比法。未焊透缺陷,按其特点可采用矩形缝模拟。矩形缝细节在射线底片上的对比度 ΔD 公式,在 $\theta = 0^\circ; W \gg U$ 时可简化为

$$\Delta D = - \frac{0.434\mu G \cdot l}{(1+n)}$$

此式可作为未焊透深度测定方法的基本原理,它与以下射线照相对比度的基本公式实际上相同

$$\Delta D = - \frac{0.434\mu G \cdot \Delta T}{(1+n)}$$

可见,为了从黑度差 ΔD 给出未焊透深度,必须给出黑度差 ΔD 与未焊透深度关系式中的系数项 $\frac{0.434\mu G}{(1+n)}$ 之值。由于它不能从理论上简单地给出,所以需采用对比试块,从已知的厚度差 ΔT 在与工件同样透照条件下得到的黑度差 ΔD 加以确定,这是对比试块的基本作用。

应指出的是,在导出此式的过程中,需假定胶片特性曲线的梯度值相同。因此,上述计算式适用于 ΔD 较小的情况。常规的黑度测量仪难以进行上述测量。采用上述方法时,一般应配备图象扫描仪,将底片图象转换为数字化的灰度图象,然后实现上述测量。

5 射线照相检验工艺编制

完整的射线照相检验工艺包括从产品准备到资料存档整个过程的规定,其中主要的技术内容是透照布置、透照参数和透照辅助措施,其它部分常可形成通用的规定内容。这些规定一般编制成图表,称为

表 2-4 射线照相检验工艺卡

产 品	名 称		材 料		图 号		编 号				
	技术条件				RT 标准						
设备 器材	射 线 源		焦 点 尺 寸		增 感 屏						
	胶 片		象 质 计		底 片 黑 度						
暗 室 处 理		方 法:		暗室操作规程:							
工件草图与透照部位编号				透照布置示意图							
				(1) 源外片内法 (2) 源内片外法 a. 周向曝光法 b. 偏心法 (3) 双壁单影法 (4) 双壁双影法							
检 验 部 位			透 照 数 据								
名 称	厚 度	编 号	胶 片	前 屏	后 屏	滤 波	遮 蔽	背 屏	kV	FFD	<i>E</i>
备 注									编制: _____ 审核: _____ 批准: _____		
更改记录:											

射线照相检验工艺卡,其参考格式如表 2-4 所示,其主要内容有工件的原始数据、有关技术文件编号、设备与器材、透照布置与标记、透照参数、工件示意图以及编制、审核和批准签名。

编制射线照相检验工艺,应依据有关产品的法规、规程、质量标准或技术文件,确定射线照相检验的部位、比例和应采用的射线照相技术标准及技术级别。编制射线照相检验工艺的核心内容是,分析产品的特点,按照射线照相技术标准的规定,利用已有的技术数据、资料确定透照布置、透照参数和应采取的辅助措施,保证所得到的射线底片质量符合射线照相技术标准的规定。

射线照相检验工艺卡编制步骤一般为:

(1) 准备 熟悉、理解有关产品的法规、规程、质量标准或技术文件及射线照相标准,按有关规定确定产品的检验部位、比例和射线照相技术、级别。

(2) 规定射线照相技术 分析工件特点,根据工件特点、射线照相技术数据(如曝光曲线及胶片特性曲线等)或必要的试验数据,确定应选用的透照布

置、射线照相设备器材、透照参数和透照辅助措施等。在确定射线照相技术时,必须满足标准对底片黑度和灵敏度的有关规定。

(3) 验证 必要时,应对所规定射线照相技术进行一定的试验验证。

(4) 编制文件 编写射线照相检验工艺卡书面文件,一般即编制出射线照相检验工艺卡。

(5) 审批 对编制出的射线照相检验工艺卡完成审核、批准手续,形成正式的射线照相检验工艺卡文件。

射线照相检验工艺卡应由具有一定技术资格的人员编制和审核,并应经有关领导批准。射线照相检验工作必须依据相应的射线照相检验工艺卡进行。对制订的射线照相检验工艺卡,不同人员负有其相应的责任。在执行过程中,由于技术的发展、工作条件的改变和发现的问题等,射线照相检验工艺卡应及时修改。

收稿日期: 1999-08-10

射线检测
基础讲座

第三讲 典型工件的射线照相技术

郑世才

(新立机器厂, 北京 100039)

PRACTICE OF RADIOGRAPHIC TESTING FOR TYPICAL SPECIMENS

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 变截面工件透照技术

变截面工件射线照相常采用的技术主要有双(多)胶片技术、适当提高透照电压(X射线)和补偿方法等。双胶片技术是在同一暗盒中放置两张感光度不同或相同的胶片同时透照,感光度不同的胶片的选取应按胶片特性曲线进行。适当提高透照电压进行透照时,技术上需要处理的问题是如何确定透照电压,或者说,对截面厚度变化的工件如何确定透照厚度。

美国 ASTM 标准要求底片黑度同时满足下列要求:

$$D = (D_0 - 0.15D_0) \sim (D_0 + 0.30D_0)$$

即 $D = 0.85D_0 \sim 1.3D_0$

且对 X 射线

$$1.8 \leq D \leq 4.0$$

或对 Y 射线

$$2.0 \leq D \leq 4.0$$

式中 D_0 ——象质计所在处的黑度

按这样的规定,从胶片感光特性曲线和曝光曲线的函数关系,可对厚度为 $T_1 \sim T_2$ 的变截面工件,导出确定透照电压的透照厚度 T_A 。

$$T_A = \frac{1}{3}(T_1 + 2T_2) = T_1 + \frac{2}{3}(T_2 - T_1) \quad (3-1)$$

如果记 $k_0 = T_A/T_1, k_m = T_2/T_1$

则可得 $k_0 = \frac{2}{3}k_m + \frac{1}{3}$ (3-2)

由此,可确定变截面工件的透照参数。

一次可透照的厚度 $T_1 \sim T_2$ 范围与透照电压相关。对应不同的透照电压具有不同的射线照相厚度

宽容度

$$\Delta T = \frac{\Delta D}{Gk}$$

式中 G ——胶片感光特性曲线的梯度

k ——曝光曲线($\lg E-T$)的斜率

可见,对允许的黑度差 ΔD ,采用不同的透照电压将得到不同的透照厚度差范围 ΔT 。

2 环焊缝透照技术

直径较大的环焊缝可以采用不同的透照方法进行透照,概括起来透照布置可分为

(1) 内透法 中心周向透照, 偏心透照(又分焦距小于外半径和焦距大于外半径的方法)。

(2) 外透法 源在外单壁透照方法(单壁单影), 源在外双壁透照方法(双壁单影)。

由于中心周向透照布置时透照厚度比始终是1,所得底片黑度均匀,灵敏度均匀,且整圈焊缝一次完成检验,因此,对环焊缝透照时,只要有可能应优先采用中心周向透照布置。

环焊缝透照需要确立的基本关系是,透照厚度比、横向裂纹检验角、有效透照长度等与焦距和射线半照射角等的关系,按图 3-1 几何和三角关系容易得到所需要的各种关系式。透照厚度比的关系式为

$$K = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{2T}{D}\right)^2 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}}{2 \frac{T}{D}} \quad (3-3)$$

透照厚度比与横向裂纹检验角 β 的关系如下

$$\cos \beta = \frac{1 + \frac{(K^2 - 1)T}{D}}{K} \quad (3-4)$$

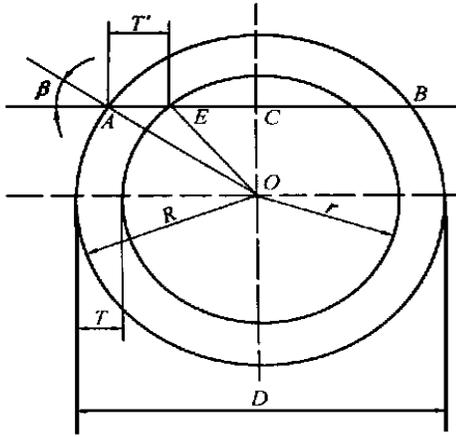


图 3-1 环焊缝的透照厚度比与横向裂纹检验角

各种透照布置的有效透照长度、透照厚度比、横向裂纹检验角、半照射角和焦距的关系见表 3-1。可见，它们之间的关系除了与环焊缝的参数相关外，还互相依从。

表 3-1 环焊缝的透照厚度比、横向裂纹检验角、半照射角和焦距关系

透照布置	$\cos\beta$	$\sin\theta$	L	N
单壁外透	$1 + (K^2 - 1) \frac{T}{D}$	$\frac{\sin\beta}{2f/D + 1}$	$\frac{\pi D (\beta - \theta)}{180^\circ}$	—
双壁外透	$\frac{K}{D} \frac{T}{D} \ll 1$	$\frac{\sin\beta}{2F/D - 1}$	$\frac{\pi D (\beta + \theta)}{180^\circ}$	$\frac{\pi D}{L}$
$F > R$				
偏心内透	$\frac{1}{K}$	$\frac{\sin\beta}{1 - 2F/D}$	$\frac{\pi D (\theta - \beta)}{180^\circ}$	—
$F < R$				

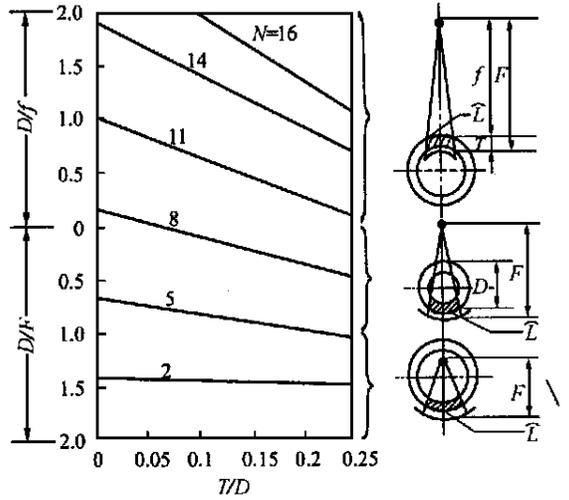
实际工作中按下面顺序确定有效透照长度、半照射角和焦距。

- (1) 依据 T/D 和 K 计算出横向裂纹检验角 β
- (2) 按产品特点选定 F 或 f ，用得出的 β 值计算出照射角 θ
- (3) 用 β θ 之值，计算出透照次数和有效透照长度。

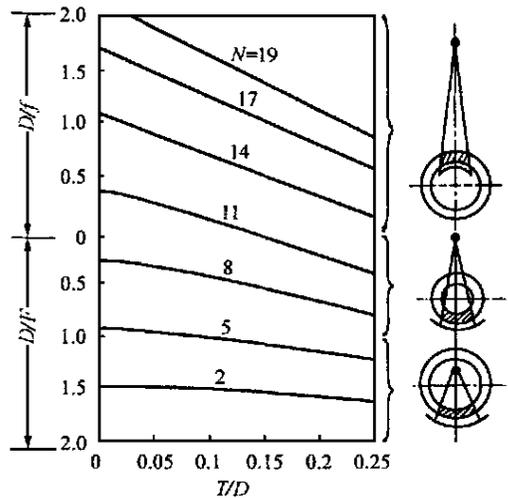
从上面的讨论可以看到，环焊缝透照时确定有效透照长度可以转化为确定透照次数，即在选定焦距后确定一圈焊缝需要的最少透照次数。对于一个具体的产品，与焊缝所需要的最少透照次数相关的因素可概括为：壁厚与直径之比 T/D 。直径与透照距离或与焦距之比 D/T 或 D/F 。射线照相标准规定的透照厚度比 K 。

按照前面的公式可以计算最少透照次数，但在实际工作中，经常是预先对于不同的透照厚度比，画出不同的透照次数与 T/D 、 D/f 或 D/F 的关系曲

线，对一个具体产品只需计算出它的 T/D 、 D/f 或 D/F ，则可从曲线图中迅速查到所需要的最少透照次数 N 。图 3-2 是 $K = 1.10$ 和 $K = 1.06$ 时的图例。



(a) $K = 1.10$



(b) $K = 1.06$

图 3-2 环焊缝的最少透照次数 N 的示意图

3 小直径管对接焊缝透照技术

3.1 概述

一般标准中通常定义管外径 89mm 的管为小直径管，也有的标准称管外径 76mm 的管为小直径管。对小直径管对接焊缝，其透照布置主要是椭圆成象透照布置和垂直透照布置。

在小直径管对接焊缝射线照相中所选用的焦距都远大于小直径管的直径，因此可近似地认为射线束平行入射。在这种简化下，对于垂直管轴截面的透

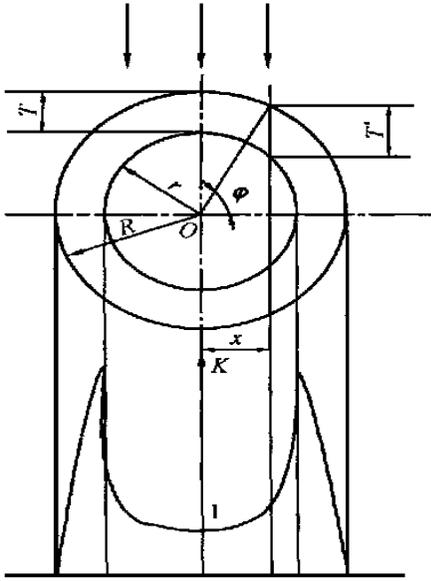


图 3-3 小直径管对接焊缝的透照厚度

照厚度可按照图 3-3 所示进行讨论。其离开圆心不同距离处的透照厚度与圆心处透照厚度的比,也就是透照厚度比,记为 K , x/R 表示离开圆心的相对距离,对 $x < r$ 区显然与一般大直径管环焊缝相同,即与式(3-3)相同。

对 $x > r$ 区则有

$$K = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}}{2 \frac{T}{D}} \quad (3-5)$$

上面的两个关系式给出了透照厚度比随所研究点(透照点)与圆心的相对距离变化的一般规律。从图 3-3 可以看到,对于一定的 T/D , K 随 x/R 的增大逐渐增大,在 $x/R = r/R$ 点透照厚度比达到最大值,以后随 x/R 的增大迅速减小。透照区内透照厚度的上述变化规律,形成了小直径管对接焊缝射线照相技术的基本特点。

3.2 透照次数与透照电压

目前小直径管对接焊缝透照的主要规定如下:

- (1) 椭圆成象透照适用范围: $D \leq 90\text{mm}$, 焊缝宽度 $w \leq D/4, T \leq 8\text{mm}$ 。
- (2) 椭圆成象透照次数: $T/D \leq 0.12$, 相隔 90° 透照 2 次; $T/D > 0.12$, 相隔 60° 透照 3 次。
- (3) 椭圆影象开口宽度: 应近似于焊缝宽度。
- (4) 垂直透照: 不符椭圆成象透照条件时,相隔 60° 进行 3 次垂直透照。

椭圆成象的透照次数是小直径管对接焊缝椭圆成象透照技术规定的重要参数之一,此规定是为了

保证全部焊缝区尽可能得到有效的检验。从透照厚度比的计算式可以得到不同透照次数对应的最大透照厚度比(表 3-2)。

表 3-2 小直径管对接焊缝透照次数与最大透照厚度比

T/D	K_m		T/D	K_m	
	$N = 2$	$N = 3$		$N = 2$	$N = 3$
0.02	1.44	1.16	0.12	1.78	1.22
0.04	1.48	1.17	0.146.4	2.38	1.25
0.06	1.53	1.18	0.20	—	1.33
0.08	1.58	1.19	0.25	—	1.73
0.10	1.66	1.21			

由于 $N = 2, T/D \leq 0.12$ 时, $K_m = 1.78; N = 3, T/D \leq 0.25$ 时, $K_m = 1.73$, 可见,对小直径管对接焊缝椭圆成象透照的上述规定,实质上是把椭圆成象透照的透照厚度比控制在一定的范围内。这就是标准规定有关透照次数的原因。

小直径管对接焊缝射线照相检验需要考虑的是透照电压如何确定。解决上述问题的基本思路应是,在规定的透照厚度范围内确定一个透照厚度,依据这个透照厚度并考虑所需透照的厚度范围确定射线能量,即透照电压。这也就是通常所说的适当提高透照电压的含意。变截面工件射线照相检验技术的处理可作为参考。

例如,对 $\phi 4\text{mm} \times 5.5\text{mm}$ 的小管焊缝,设余高为 2mm , 则应有

$$T_1 = 2 \times 5.5 + 2 = 13\text{mm}$$

二次透照时

$$K_0 = 2 \times \frac{1.67}{3} + 0.33 = 1.44$$

$$T_A = T_1 \cdot K_0 = 18.7\text{mm}$$

$$\text{kV} = 80 + 5T_A (\text{mm})$$

计算得到的透照电压为 174kV 。这与实际采用的,可得到较好结果的透照电压 170kV 基本上一致。

3.3 椭圆成象透照的有效透照长度估计

如图 3-4 所示,设在底片上椭圆成象透照的有效透照区为 PQ 弧和 ST 弧,下面估计它们的长度和占焊缝总长的比例。

任一椭圆都可以用下面的参数方程描述

$$x = a \cos t$$

$$y = b \sin t$$

式中 a ——椭圆的半长轴长度,即椭圆的大圆半径
 b ——椭圆的半短轴长度,即椭圆的小圆半径
 t ——引入的参数

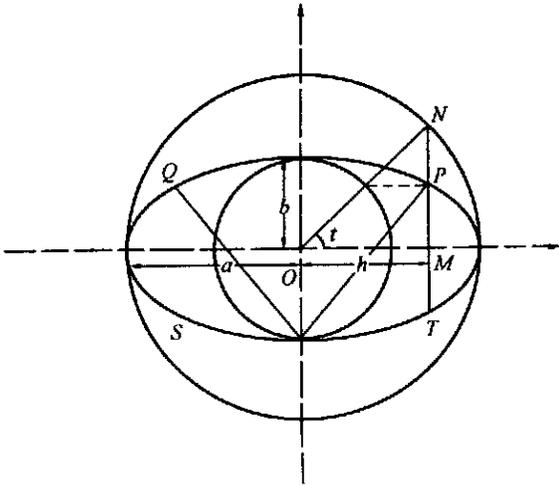


图 3-4 椭圆成象透照的有效透照长度

估计这参数时, 过 P 点作椭圆长轴(即 x 轴)的垂线, 交大圆于 N, 交椭圆长轴于 M。则

记
则

$$t = \angle NOM$$

$$OM = h$$

$$h = a \cdot \cos t$$

$$t = \cos^{-1} \frac{h}{a}$$

记有效透照长度为 L, 即 $L = PQ + ST$, 由于

$$PQ = \pi a \left\{ 1 - \frac{t}{90^\circ} \right\}$$

$$ST = \pi a \left\{ 1 - \frac{t}{90^\circ} \right\}$$

所以

$$L = 2\pi a \left\{ 1 - \frac{t}{90^\circ} \right\}$$

记一次有效检验率为 η 则

$$\eta = \frac{L}{2\pi a} = 1 - \frac{t}{90^\circ}$$

即只要从底片上确定有效透照区的端点, 则从其和椭圆的半长轴可确定相应的参数 t, 进而给出有效透照区长度和一次有效检验率。表 3-3 给出了一些计算结果。

如果认为椭圆两侧的有效透照区长度可能不同, 也只需按式(2-26)分别计算每侧的参数 t, 然后再分别计算 PQ 和 ST。

表 3-3 椭圆成象有效检验率

h/a	t/(°)	η %	h/a	t/(°)	η %
0.50	60.0	33.3	0.80	36.8	59.0
0.60	53.1	40.9	0.85	31.8	64.7
0.70	45.6	49.4	0.90	25.8	71.3
0.75	41.4	54.0	0.95	18.2	79.8

4 T 形接头的射线照相检验技术

T 形接头的射线照相问题, 基本上也属于变截面射线照相。技术问题主要是透照方向的选取, 其次是如何确定透照电压。

按照接头的坡口形式, T 形接头的透照方向基本选用两种, 即 30° 或 45°; 见图 3-5。采用不同透照方向时透照厚度不同:

30° 时透照厚度为

$$T_A = 1.1(T_1 + T_2)$$

45° 时透照厚度为

$$T_A = 1.4(T_1 + T_2)$$

实际上在确定透照方向时, 还应考虑对重要缺陷的可检性问题。按上述透照厚度可确定透照电压。对于形状规则的 T 形接头, 也可采用补偿块, 使透照区厚度变化比较均匀。

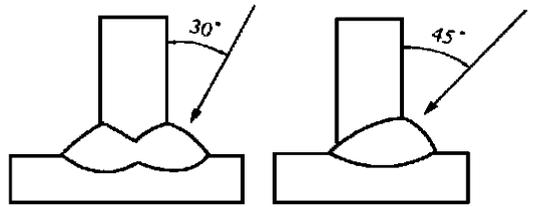


图 3-5 T 形接头射线照相的透照方向

一些管座角接头可视为 T 形接头, 其射线照相可按上述基本技术进行。需要进一步考虑的是透照次数。经常采用的透照布置如下:

(1) 中心射线束以与支管成 30° 左右的角度(或较小角度)指向肩部焊缝区。

(2) 中心射线束以与支管成 30° 左右的角度(或较小角度)指向腹部焊缝区。

对上述两种透照布置, 在讨论小直径管对接接头的近似假设下可以得到透照厚度比的变化均服从小直径管对接接头的结论。从肩部透照时, 可能的最大透照区应认为是从肩部向两侧延伸至腹部所形成的近似半圆区。透照区内任一点的透照厚度比, 应为主管圆周截面上一点的透照厚度比。最大透照厚度比位于腹部的点。从腹部透照时, 可能的最大透照区应认为是从腹部向两侧延伸至肩部所形成的近似半圆区。虽然这时透照区内的点位于主管轴向上不同位置, 但实际上是位于主管圆周上的不同点, 因而透照区内任一点的透照厚度比, 仍为主管圆周截面上某一点的透照厚度比。此透照厚度比遵循小直径管对接接头的结论, 最大透照厚度比位于肩部点。

实际透照厚度比将略高于上述讨论给出的值。

从上面的讨论可看出, 管 T 形接头从任何方位透照时, 其透照厚度比均可按小直径管对接接头焊缝的情况分析。此外, 对管 T 形接头其最大透照厚度比, 将直接与主管管径之比相关, 也与主管壁厚与主管管径比相关。当支管管径与主管管径之比不大时, 无论从肩部透照或从腹部透照, 在焊缝半圆周的透照区内, 最大透照厚度比均不会超出对接接头关于二次透照的规定。即在多数情况下, 管 T 形接头焊缝可进行二次透照。

透照电压可依变截面工件射线照相工艺确定。

5 大厚度工件高能 X 射线照相检验技术

5.1 高能 X 射线源

对大厚度金属工件进行射线照相检验时, 为了得到较高的射线照相灵敏度, 一般应采用高能 X 射线照相检验技术。在工业射线照相中一般采用加速器产生更高能量的射线, 利用加速器加速带电粒子, 通过轫致辐射产生高能 X 射线。

按照带电粒子在加速过程中的运动轨迹和加速原理, 加速器可以分为四类, 表 3-4 是加速器简单分类表。在工业射线照相检验中应用的加速器主要有电子直线加速器、电子感应加速器、电子回旋加速器。电子感应加速器是涡旋电场回旋加速器, 电子回旋加速器是一种高频电场回旋加速器, 电子直线加速器是一种直线加速器。在工业射线照相检验中使用的范得格拉夫高压发生器和谐振变压器高压发生装置属于高压加速器。

电子直线加速器采用电磁场加速电子, 按所采用的电磁场形式把电子直线加速器分为行波电子直线加速器和驻波电子直线加速器。行波电子直线加速器利用波导管中的行波电磁场加速电子, 电子以一定初速注入加速管, 与行波电场同步, 从电磁场中

获得能量, 加速到所需能量。驻波电子直线加速器利用谐振腔中的驻波电磁场加速电子, 在谐振腔中存在较强的轴向电场分量, 不断供给电子能量, 使电子加速。为了使电子不断加速, 必须保持电子运动与加速场的同步。电子感应加速器利用导向磁场约束电子, 使电子作回旋运动, 利用电磁感应产生的涡旋电场加速电子, 电子沿圆形轨道运动, 进行加速。当加速结束时电子脱离圆形轨道, 撞击在靶上, 产生 X 射线。电子回旋加速器利用导向磁场, 使电子沿具有公切点的逐渐加大的圆运动, 多次通过高频或超高频电场不断加速。当电子被加速到所需能量时, 从圆周轨道将电子引出, 撞击在靶上产生高能 X 射线。

5.2 补偿器、增感屏、屏蔽板

在 高能 X 射线机中, 电子的速度接近光速, 所产生的高能 X 射线, 主要在电子速度方向辐射。这样, 在辐射场的横断面上, 辐射强度很不均匀。束中心的强度比偏离中心处的强度高出很多, 图 3-6 是典型的辐射强度分布。这种情况随射线能量的提高而更加显著, 它限制了高能射线可使用的辐照场。为了使射线束具有较大的比较均匀的辐照场, 经常采用补偿器。补偿器一般用铝制作, 在射线束中心区其厚度大, 随着角度加大厚度逐渐减小, 因不同厚度对射线的吸收不同, 得到具有较大均匀区的辐照场。

在 高能范围, 射线量子与物质的作用主要是康普顿散射和电子对效应。在 $0.2 \sim 10\text{MeV}$ 能量范围, 对钢、铝等金属材料, 康普顿散射是主要的相互作用过程。此外, 由于相互作用过程所产生的次级粒子具有很高的能量, 它们将进一步引起散射。射线束辐照的任何物体, 都会产生很强的散射线, 控制散射线是高能射线照相技术的一个极重要部分。为了控制散射线, 对高能射线照相需强调的是注意使用准直器、增感屏和屏蔽板。

表 3-4 加速器简单分类表

类 型	加 速 原 理	可加速粒子
高压加速器	带电粒子通过高压电势差	电子, 质子, 重离子等
涡旋电场回旋加速器	粒子在电磁感应产生的涡旋电场中回旋运动	电子
高频电场回旋加速器	导向磁场使粒子回旋运动多次通过高频电场	电子, 质子, 重离子等
直线加速器	带电粒子沿直线在微波电场中运动	电子, 质子等

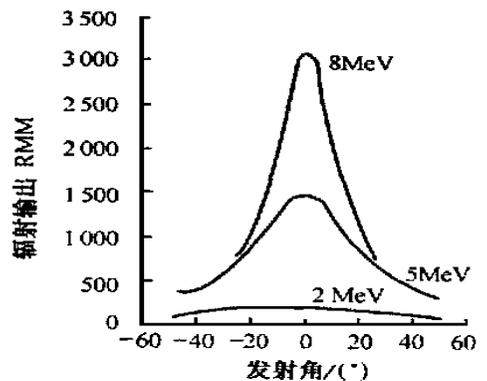


图 3-6 高能 X 射线辐照场强度的分布

准直器用铅、钨等制作, 限制出射的射线束范围, 使其只照射需要照射的部位。描述高能X射线

表 3-5 部分材料高能宽束半值层值¹⁾ cm

材料种类	射线能量/M eV						
	1	2	4	6	8	10	16
钨	0.55	0.90	1.15	1.20	1.20	1.20	1.15
铅	0.75	1.25	1.60	1.70	1.70	1.70	1.65
钢	1.60	2.00	2.50	2.80	3.00	3.00	3.30
铝	3.90	5.40	7.50	8.90	9.60	10.00	11.00
固体推进剂	6.10	8.40	11.60	13.80	14.90	16.50	20.40
混凝土	4.50	6.20	8.60	10.20	11.00	11.50	12.70

注: 1) 表中数值是用胶片法测出的, 由于实际材料特性及散射控制等因素影响, 会有一定误差。

表 3-6 推荐的增感屏和屏蔽板厚度(铅)

能量 MeV	透照厚度 cm	前屏	后屏	屏蔽板
		厚度 mm	厚度 mm	厚度 mm
1~ 4	低散射, $T < 10$	0.25	0.25	—
	高散射, $T > 10$	0.51	0.25	0.76
6~ 10	低散射, $T < 12.7$	0.51	0.25	—
	高散射, $T > 12.7$	0.76	0.25	0.76
12~ 25	低散射, $T < 15.25$	0.76	0.25	—
	高散射, $T > 15.25$	1.27	0.25	0.76

线质最有用的参数是半值层值HVL。铅、钨等材料的宽束半值层见表 3-5。

铅箔增感屏既有增感作用, 又有吸收散射射线的作用。推荐使用的铅增感屏厚度见表 3-6, 前铅屏增感作用与其厚度的关系见图 3-7。

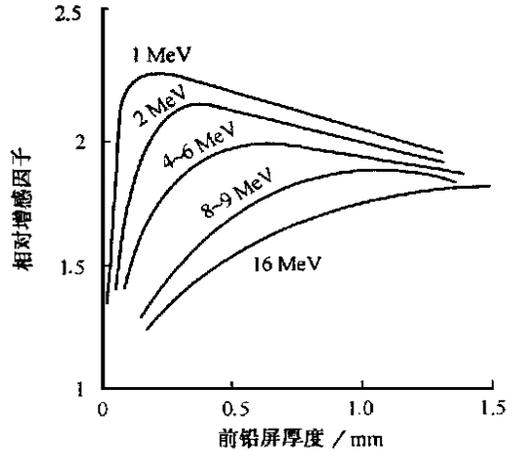


图 3-7 前增感屏的增感作用

5.3 高能 X 射线照相曝光曲线

高能 X 射线照相的曝光曲线一般如图 3-8 所示, 可达到的射线照相灵敏度如图 3-9 所示。采用高 (下转第 133 页)

(上接第 124 页)

录分析的硬件和软件已相当先进和完善。更重要的是 MAE 与传统声发射本质的不同是 MAE 基于宽带声发射信号, 物理概念清晰, 信号解释明确, 缺陷信号特征明显, 即使是对本文介绍的一些复杂结构在复杂试验环境中, 也能有效地提取和识别裂纹信号及其特征。当然, MAE 同样也在不断发展完善, 在实际应用中也还离不开经验的积累。因此, 建议针对某一新的具体应用对象, 在检测前先制作典型试样, 模拟裂纹缺陷和加载条件进行试验, 确定和识别信号特征、噪声及其噪声源、参数设置等。特别是有些现场噪声(如电磁干扰), 通过采取一些简单的措施就能明显得到改善。

参 考 文 献

- Goman Michael R. Plate wave acoustic emission. Journal of the Acoustic Society of America, 90(1): 358
- Zola Steve. Source location in thin plates using cross correlation: [Doctoral Dissertation]. USA: Naval Postgraduate School, University of Denver, 1991
- Prosser William H. The propagation characteristics of the plate modes of acoustic emission waves in thin

aluminum plates and thin graphite/epoxy composite plates and tubes NASA Technical Memorandum 104187

- Goman MR. Determining fatigue crack growth in aircraft by monitoring acoustic emission. Naval Research News, 1992, 24- 27
- Searle Ian R, Zola Steve. Identification of broadband acoustic emission signals. Proceedings of Smart Structures and Materials 1996 Conference,
- Prosser WH, Jackson KE, Kellas S et al. Advanced waveform based acoustic emission detection of matrix crack in composites. Materials Evaluation, 1995, 53(9): 1052- 1058
- McBride SL, MacLachlan JW. Acoustic emission due to crack growth, crack face rubbing and structural noise in the CC-130 hercules aircraft. Journal of Acoustic Emission, 1984, 3(1)
- McBride SL, Pollard, MacPhail JD et al. Acoustic emission detection of crack presence and crack advance during flight. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Thompson Donald O, Chimenti Dale E, eds. Plenum Press, 1989. 1819- 1825

收稿日期: 1999-07-05

求出 a 和 b 值, 从而得出另一个回归公式

$$\delta = \frac{4.175}{\sqrt{f}} - 1.97 \quad (6)$$

使用探头 1 探测得出的公式误差如下:

偏差平方和

$$q = \sum_{i=1}^n [\delta_i - \delta]^2 = 0.000081$$

式中 δ —— 涡流强度衰减为 37% 的渗透厚度理论计算值

n —— 测试次数

$$n = 10$$

平均标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{q}{n}} = 0.0028$$

最大误差

$$\mu_{\max} = \max |\delta_i - \delta| = 0.055$$

最小误差

$$\mu_{\min} = \min |\delta_i - \delta| = 0.008$$

误差平均值

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n |\delta_i - \delta|}{n} = 0.007$$

使用探头 2 探测得出的公式误差如下:

偏差平方和

$$q = \sum_{i=1}^n [\delta_i - \delta]^2 = 0.0036$$

平均标准偏差

$$\sigma = \sqrt{\frac{q}{n}} = 0.019$$

最大误差

$$\mu_{\max} = \max |\delta_i - \delta| = 0.16$$

最小误差

$$\mu_{\min} = \min |\delta_i - \delta| = 0.005$$

误差平均值

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n |\delta_i - \delta|}{n} = 0.006$$

通过两种不同型号的低频探头对铝合金近表面裂纹的测试及模拟公式的推导结果分析, 理论计算值与实验值吻合很好, 误差极小。

5 实际应用

目前, 低频涡流检测技术在航空领域已广泛使用, 如 TY-154M 型飞机 14 框 27-32 长桁条, 在飞机重着落后受损, 其桁条厚度 4mm, 机身蒙皮与桁条之间涂有一层薄薄的密封胶, 为了通过蒙皮检查桁条是否存在裂纹, 我们采用了低频涡流检测技术, 提高检测效率, 保证检测质量, 制作了相应结构的模拟试块并选用探头 1, 将 $\delta = 2$ 代入公式 (5), 计算出工作频率 $f = 1.66\text{kHz}$, 取 $f = 1.70\text{kHz}$ 可有效地检查出模拟试块上的裂纹。

又如, 飞机蒙皮因气候潮湿, 蒙皮内侧局部腐蚀造成厚度减小, 强度降低, 同样采用低频涡流检测技术, 制作相应结构的模拟试块, 可有效地检查蒙皮内侧的局部腐蚀。

6 结束语

实验证明, 使用放置式低频反射探头检查工件近表面缺陷是可行的, 涡流的渗透深度与工作频率的平方根成反比。实验中根据缺陷在工件中的埋藏深度, 选用适当的检测线圈, 作出相应的渗透深度与工作频率曲线, 并对曲线进行一元线性回归分析, 得出相应的经验公式, 对实际工作中确定最佳工作频率具有一定的作用。

收稿日期: 1999-09-09

(上接第 130 页)

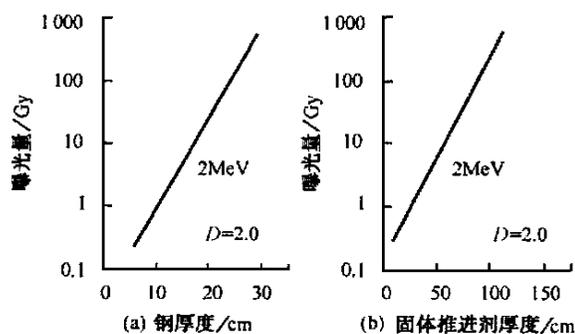


图 3-8 典型的直线加速器的曝光曲线

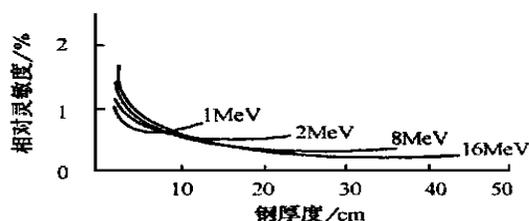


图 3-9 钢的高能射线照相灵敏度

能 X 射线, 一次可对较大的厚度范围进行透照, 在这个厚度范围内, 可以得到要求的射线照相灵敏度。

收稿日期: 1999-12-16

射线检测
基础讲座

第四讲 评片技术(I)

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

INTERPRETATION OF RADIOGRAPHS (I)

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

正确识别射线照片上的影象、判断影象所代表的缺陷性质的基础之一是具有一定的材料和工艺方面的知识,从而掌握主要的缺陷类型、形态及产生规律,没有这方面的知识很难正确识别缺陷影象。本讲简要介绍材料和工艺方面的有关知识,它应是进一步学习的索引。

1 金属材料的组织结构与性能

1.1 金属材料的组织结构

固态金属通常为多晶体结构,即由许多不同方向的小晶体组成。这些小晶体呈不规则的颗粒状,称为晶粒,晶粒之间的交界面称为晶界。晶体内原子在空间呈有规则的周期排列,晶界处原子呈无序排列(图4-1)。描述晶体中原子空间排列方式的空间格架称为晶格,金属中最常见的晶格有三种,即体心立方晶格(图4-2a):室温下的铁、铬、钨、钼、钒和铌等。面心立方晶格(图4-2b):室温下的铜、镍、金、银和铝等。密排六方晶格(图4-2c):室温下的钴、镁、锌、镉和钛等。

图4-2是不同晶格的几何模型。具有不同晶格的金属,其强度、塑性、硬度、韧性和热处理合金化效果及其它物理和化学性能等明显不同。

晶体结构是在金属从液态转变为固态的凝固过

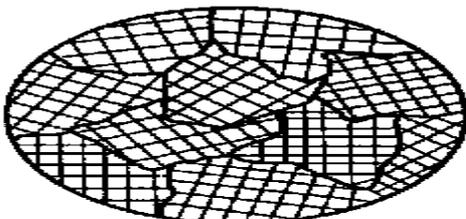


图4-1 多晶体的晶粒与晶界示意图

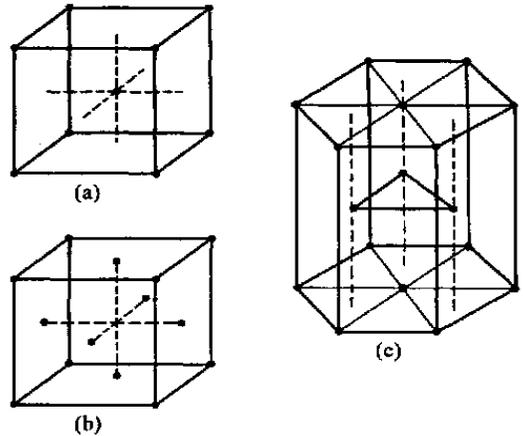


图4-2 金属常见的晶格

程中形成的,这个过程称为金属的结晶过程。金属的结晶过程主要分三个阶段,当液体趋近凝固温度时,在一些部位形成晶核,即微小体积内出现规则排列的原子集团(极细小的晶体);在继续凝固的过程中,晶核长大同时形成新的晶核;每个晶核不断长大,直到彼此接触,最后形成金属的晶体结构。

许多金属在一定温度下可改变晶体结构,即发生晶格改变。合金中具有同一化学成分、同一聚集态并以界面互相分开的各个均匀组成部分称为“相”。晶粒、晶界及相的总体分布受合金成分、热加工、冷作和热处理影响,也明显受焊接影响。

工业上使用的金属材料绝大部分是合金,即由两种以上的金属或金属与非金属元素组成,合金可具有纯金属达不到的许多优异性能。合金的相结构大致可分为固溶体和化合物两大类型,此外还有两种晶体的机械混合物。固溶体是一种晶格和组织结构均匀的固态相。保持晶格不变的元素称为溶剂,其它元素称为溶质。按溶质原子在溶剂晶格中所占的

位置, 固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。当合金元素的原子在尺寸和化学性质上与原始未合金化的金属原子相近时, 形成置换固溶体, 溶质原子部分占据了溶剂原子的晶格结点。当合金元素的原子小于基体元素的原子时, 形成间隙固溶体, 溶质原子溶入溶剂原子晶格的间隙之中。化合物的晶格与形成的各元素的晶格不同, 它不能单独构成合金, 只能分布在固溶体中或纯金属的基体组织中。机械混合物中各组元保持各自的晶格和性能。

1.2 金属材料的性能

金属材料的性能主要包括物理性能、化学性能、力学性能和工艺性能。

1.2.1 物理性能与化学性能

物理性能主要包括密度、熔点、热膨胀性、导电性和磁性。化学性能是金属材料与其它物质发生化学反应的特性, 在工业应用中应特别注意的是抗蚀性和抗氧化性。

1.2.2 力学性能

力学性能是材料受外力作用时抵抗变形和断裂的性能, 它主要包括强度、塑性、硬度、韧性和疲劳强度极限。

强度是金属材料在外力作用下抵抗变形和断裂的最大能力。材料的拉伸试验曲线具体描述了材料这方面的性能(图4-3)。图4-3中曲线 OE 段为金属材料处于弹性变形阶段, 即去除外力试样可恢复原样; ES 段为金属材料除弹性变形外还有塑性变形; SD 段为载荷不增加但仍继续变形, 该现象称为“屈服”, 试样开始产生明显塑性变形; DB 段为继续加载, 试样出现显著塑性变形; BK 段为在 B 点载荷达到极大值, 此后的变形局限于试样变细部分, 直到断裂。最常用的性能是抗拉强度和屈服强度, 抗拉强度表示材料在外力作用下抵抗断裂的最大应力, 屈服强度指材料在外力作用下开始出现屈服时的应力。

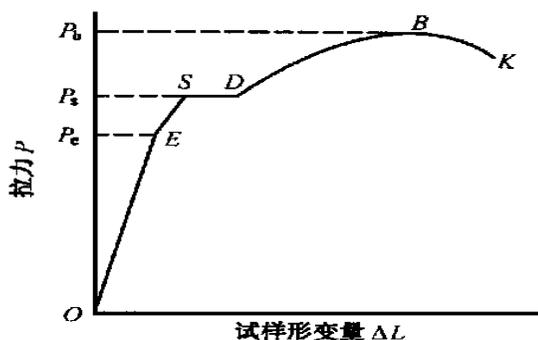


图 4-3 材料的拉伸试验曲线

P_s ——屈服点拉力(载荷) P_e ——弹性极限

P_b ——材料断裂的最大拉力(载荷), N

塑性是材料在外力作用下产生永久变形但不破坏的性质, 通常以拉伸试验的断面收缩率和伸长率表示。硬度是材料抵抗其它物体压入表面的能力。韧性是材料在冲击载荷作用下抵抗断裂的能力。疲劳强度极限是材料抵抗长期交变应力破坏的能力。

1.2.3 工艺性能

工艺性能是材料适应各种加工的特性, 主要是切削性、锻造性、铸造性和焊接性。

铸造性主要包括流动性、收缩性和偏析性。流动性是液态金属填充铸型的能力, 收缩性是合金在凝固和冷却过程中体积和尺寸变化的特性, 偏析性是铸件中化学成分不均匀的现象。

焊接性是材料对焊接加工的适应性, 即在一定的焊接工艺条件下获得优质焊接接头的能力, 它包括在一定的冶金过程中的物理化学变化对焊缝金属性能和产生缺陷的影响。在一定的焊接热环境下对焊接接头热影响区组织、性能及产生缺陷的影响。在一定焊接条件下得到性能优良焊接接头的能力。焊后热处理对消除残余应力、改善焊接接头的力学性能具有重要作用。焊接性试验主要是焊接裂纹敏感性试验和焊接接头使用性能试验。

2 常用金属材料的分类与主要性能

2.1 钢

2.1.1 钢的分类

钢简单地可分为碳钢和合金钢。

碳钢是含碳量约为 0.02% ~ 2.06% 的铁碳合金。碳钢按其含碳量分为低碳钢、中碳钢和高碳钢三类。低碳钢的含碳量约为 0.08% ~ 0.25%, 中碳钢含碳量约为 0.25% ~ 0.7%, 高碳钢含碳量约为 0.7% ~ 1.4%。

合金钢是铁、碳及其它合金元素构成的合金。合金钢按含合金元素量分为低合金钢、中合金钢和高合金钢三类。低合金钢的合金元素总含量 $< 2.5\%$, 中合金钢的合金元素总含量为 $2.5\% \sim 10\%$, 高合金钢的合金元素总含量 $> 10\%$ 。合金钢按用途常分为结构钢、工具钢和特殊性能钢, 特殊性能钢主要有不锈钢、耐磨钢、超高强度钢和高温合金等。高温合金是在高温(600 以上)下具有一定力学性能和抗氧化、抗腐蚀性能的合金, 按基体材料可分为镍基、铁基和钴基高温合金。以下是部分钢的牌号:

碳素结构钢: 10, 15, 20, 20A, 25, 35, 45

合金结构钢: 10MnA, 20Cr, 12CrNi3A, 40Cr, 30CrMnSiA, 38CrMoA

不锈钢: 1Cr13, 1Cr18Ni9, 1Cr18Ni9Ti, 2Cr13,

4Cr13

碳素工具钢: T7A, T8A

合金工具钢: CrMn, CrWMn, 3Cr2W8V, Cr12MoV

高温合金: GH30, GH33, GH34, GH3030

碳素结构钢和合金结构钢均以牌号中的前面两位数字表示含碳量的万分数。工具钢和一些特殊性能钢则以牌号中的前面一位数字表示含碳量的千分数,当含碳量 1% 时,则前面无数字。牌号中各元素符号后面的数字是其含量的百分数,元素符号后面无数字的表示其含量不足 1.5%。牌号中的“A”表示优质,如 30CrMnSiA 是优质合金结构钢,含碳量约为 0.30%,铬、锰、硅的含量约为 1%; 1Cr18Ni9Ti 是不锈钢,含碳量约为 0.1%,铬含量约为 18%,镍含量约为 9%,钛含量约为 1%。某些钢采用了特殊符号,如碳素工具钢前面加“T”;高温合金用了拼音符号等。显然,不同钢种对含碳量表示法的规定不同。含碳量超过 5% 的合金几乎不可能制成。

碳对碳钢的金相组织和力学性能起主要作用。锰和硅是脱氧元素,锰还可与硫生成硫化锰,消除硫的热脆性。硫和磷是有害杂质,硫易造成热脆,磷易造成冷脆,并降低塑性和韧性,但磷可提高抗大气腐蚀性。在低合金钢中,对钢的显微组织和力学性能起主要作用的是碳,碳起强化作用,合金元素起固溶强化作用,提高力学性能,不同的合金元素作用不同。高合金钢加入合金元素的目的是为了获得特殊的使用性能,如耐磨性、耐腐蚀性和热强性能等。不锈钢中的铬是提高其抗腐蚀性的主要元素(不锈钢的含铬量至少为 12%),镍一方面可提高抗腐蚀性,另一方面可使钢在室温下具有奥氏体组织。

2.1.2 铁碳合金的基本组织结构

铁的熔点为 1534。铁在 910 以下为体心立方晶格,称为 α 铁 (α -Fe); 在 910~1390 之间,为面心立方晶格,称为 γ 铁 (γ -Fe); 在 1390~1534 之间,为体心立方晶格,称为 δ 铁 (δ -Fe)。铁与碳、氮、氢形成间隙固溶体,铁的溶碳能力取决于其晶格中的原子间隙。铁碳合金的基本组织结构有铁素体 F、奥氏体 A、渗碳体 Fe_3C 和珠光体 P 等。铁素体的塑性和韧性好,但强度和硬度低。奥氏体晶粒呈多面体形,塑性高、强度不大、没有磁性。渗碳体的塑性和韧性很低,硬度高、脆性大。珠光体的强度较高,硬度适中,具有一定塑性。

铁碳合金状态图表示在平衡状态下不同含碳量的铁碳合金在不同温度下所处的状态、晶体结构和显微组织特征。含碳量 > 5% 的铁碳合金很脆,没有

实用价值,因此,通常的铁碳合金状态图实际是 $Fe-Fe_3C$ 部分的状态图。铁碳合金状态图对于钢铁材料的应用以及热处理工艺和热加工工艺的制定具有十分重要的意义,根据该图可以分析不同含碳量的铁碳合金的结晶过程以及不同温度下的状态和相组成,从而选择合理的热处理温度和热加工温度等。

2.1.3 钢的焊接性

不同的钢采用不同的焊接方法时焊接性可能不同。结构钢常用的是碳素结构钢和合金结构钢,用于焊接的碳素结构钢通常是低碳钢,它的焊接性能优良;合金结构钢主要是低合金钢,其焊接性依赖于碳和合金元素的含量,含量低的较易焊接,含量高的较难焊接,有较大的冷裂性。不锈钢的组织类型有铁素体、奥氏体及马氏体等多种,铁素体不锈钢焊接易出现晶粒粗大、塑性降低;奥氏体不锈钢具有较优良的焊接性能;马氏体不锈钢有淬火倾向。大多数焊接方法都可用于不锈钢。大多数高温合金焊接时都有热裂倾向,高温合金的化学成分、组织结构、冶金质量和焊件拘束度等都对热裂纹形成有较大影响。

2.2 铝合金

2.2.1 铝合金分类

铝合金按化学成分和制造工艺分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。

变形铝合金分为防锈铝(如 LF21)、硬铝(如 LY12)、超硬铝(如 LC9)和锻铝(如 LD10)等。铸造铝合金分为铝硅系(如 ZL104)、铝铜系(如 ZL201)、铝镁系(如 ZL301)和铝锌系(如 ZL402)等。

加入铝合金的合金元素可分为三类,即重要组元,如硅、铜、镁、锌等,它们可大大改变铝的力学性能和物理性能。次要组元,如锰、镍、铬、银等,它们可改善重要元素的不利影响,减小铁等杂质的有害作用,提高铝的性能。变质、细化组元,如钛、锆、钽、硼、钠、铍、磷等,它们可细化晶粒,使合金性能显著提高。

铁是铝合金中较多的杂质,它与铝化合成 Al_3Fe ,其质硬而脆,降低铝的塑性和耐蚀性。

2.2.2 铸造铝合金的铸造性能

铸造铝合金的铸造性能是熔点低(约 660)、流动性好。液态铝合金与氧作用,形成氧化膜 (Al_2O_3),氧化膜的熔点很高(约 2050),密度大于铝 ($3.5 \sim 4g/cm^3$),致密吸水,易形成氧化夹渣,液态铝合金与水气反应,释放氢气,形成针孔。

铝硅系铸铝容易产生针孔,但铸造性能好,热裂和缩松倾向小;铝铜系铸铝凝固时收缩大,热裂和缩松倾向大;铝镁系铸铝熔铸工艺性能差,热裂和缩松

倾向大; 铝锌系铸铝的铸造性能较差。

2.2.3 铝合金的焊接性

铝合金的熔点低、热容量大、易氧化, 造成焊接困难。氧化膜易形成夹渣, 阻碍金属熔合和焊接的正常进行。液态铝合金可吸收大量氢气, 在凝固点附近溶解度大大下降, 约降低至 $1/20$, 氢气析出形成气孔。铝合金的热膨胀性大、收缩率高, 易产生焊接应力和变形, 造成热裂纹。热影响区组织变化, 使铝合金强度和塑性降低。

2.3 钛合金、镁合金和铜合金

2.3.1 钛合金

钛金属的密度小($4.54\text{g}/\text{cm}^3$)、比强度高、耐腐蚀、耐热。在钛中加入 Al, Sn, Mo, Si, Fe, V 等元素将构成钛合金。

钛的化学性质非常活泼, 与氧、氮亲和力强, 在 400 以上就与空气中的氧、氮、氢、碳发生反应, 高于 600 反应剧烈。氮、氧、碳可使焊缝强度增高、塑性下降, 氢对焊缝强度和塑性影响不明显, 但使冲击韧性下降, 并引起冷裂纹。氢和氧也是引起气孔的主要原因。合金元素能提高钛合金焊缝的强度和硬度, 但降低塑性, 强化作用的次序为 Fe, Mn, Cr, Co, Mo, W, Cu 等。钛合金的焊接接头未氧化时为银白色, 氧化后依氧化程度不同可为(浅)黄色、紫色、深蓝色、灰色或米灰色。对焊接接头要求不同, 允许的氧化程度也不同。

2.3.2 镁合金

镁合金按化学成分和制造工艺分变形镁合金和铸造镁合金两大类。

变形镁合金主要分三个系 Mg-Mn 系(如 MB8)、Mg-Al-Zn 系(如 MB2 和 MB3)和 Mg-Zn-Zr 系(如 MB15, MB22 和 MB25)。

铸造镁合金主要有 Mg-Zn-Zr 系(如 ZM1 和 ZM2 等)和 Mg-Al-Zn 系(如 ZM5 等)。

镁比铝更容易氧化, 与氧、氮化合剧烈, 导热性差, 氧化膜熔点很高(~ 2800)、比重大($3.2\sim 3.7\text{g}/\text{cm}^3$)。焊接时, 因氧化膜难熔而难于熔合, 熔合线区易产生过烧倾向, 热影响区晶粒粗大, 焊缝区易出现气孔和夹渣。由于与氧反应有燃烧倾向, 熔焊时必须用氩气等保护。镁合金在熔炼时与氧、水、氮等将发生反应, 镁液遇氧将剧烈燃烧, 可引起汽化及爆炸, 必须采取防护措施。

2.3.3 铜合金

工业纯铜常称为紫铜, 加入合金元素构成铜合金, 铜合金主要有黄铜和青铜。黄铜是铜锌合金, 它提高了铜的强度、硬度和耐腐蚀性, 黄铜可进行冷、

热加工。青铜是铜与锡、铝、硅、铅和铍等的合金, 具有耐磨和耐腐蚀等特性。

铜合金焊接时的主要问题是可产生热裂纹、气孔和变形。裂纹可出现在焊缝、熔合线及热影响区, 气孔多分布在焊缝中心和熔合线。熔铸时, 反应中析出的氧气和氢气可形成气孔。由于收缩大, 易产生疏松和热裂。加入的合金元素易生成难熔的 Al_2O_3 和 SiO_2 等夹杂物。

3 金属加工工艺简介

下面简要介绍常用的金属加工工艺, 除此之外, 工业中还使用一些特种金属加工工艺, 如电火花加工、电解加工、激光加工、超声波加工等, 它们直接利用电能、化学能、电化学能、声能和光能等实现加工。

3.1 铸造工艺

铸造是通过熔炼金属或其合金, 制造铸型, 并将金属熔液浇入铸型, 在金属熔液凝固后获得一定形状和性能工件的工艺过程, 它是工件成形的基本方法之一, 是所有冶金方法中最直接成型的方法, 其广泛应用于各种各样的产品。铸件的质量, 除了直接与铸造合金相关外, 主要与铸型与浇注系统设计、合金熔炼、铸造操作有关, 它们共同影响液态合金的性质和充型能力以及铸件的凝固过程。铸造方法有砂型铸造、金属型铸造、压铸、熔模铸造和离心铸造等多种。砂型铸造是最常用的铸造方法, 其它统称为特种铸造方法。

3.1.1 砂型铸造

砂型铸造工艺主要环节为制作铸件的木模和砂型、合金准备与熔炼、浇注、落砂清理。砂型铸造的浇注系统一般包括浇口杯、直浇道、横浇道、内浇口和冒口。浇注系统的作用有使合金液连续、均匀、平稳地流入并充满型腔。阻挡熔渣、砂粒、气体或杂质进入型腔。调节铸件冷却凝固顺序, 补给冷却收缩所需的金属液。

3.1.2 离心铸造

离心铸造是将金属液浇入高速旋转的铸型中, 在离心力的作用下使金属液充型、冷却、凝固而获得铸件的方法。其主要优点是铸件结晶致密、力学性能好。省去了冒口, 提高了工艺成品率。铸造圆筒形铸件时可以不上型芯。缺点是内表面尺寸不够准确, 易产生偏析。

3.1.3 熔模铸造

熔模铸造是一种精密铸造方法, 又称失蜡铸造。这种方法用易熔材料制成熔模, 在熔模外面包上造型材料, 硬化结壳后熔出熔模得到铸型, 然后浇注得

到铸件。熔模铸造的基本工艺过程是, 制造母模和压型、制造蜡模、结壳、浇注。熔模铸造所得铸件精确度高、粗糙度低, 可铸成任何复杂形状的铸件。但熔模铸造工艺过程复杂、周期长、成本高, 不适宜加工大型铸件。

3.2 焊接工艺

焊接从微观上看是材料通过原子或分子间的结合和扩散形成永久性联接的工艺过程。为了达到焊接目的, 焊接工艺采用两种手段, 即对被焊接金属施加压力和热量。焊接方法按焊接过程特点分为熔焊、压力焊和钎焊三大类, 也有从压力焊中又分出电阻焊的分类。

熔焊简单说是被焊接金属在热源作用下被加热, 母材金属局部熔化, 熔化的金属、熔渣、气相之间进行一系列化学冶金反应, 伴随着热源移开, 熔化的金属开始结晶, 从液态转变为固态, 形成焊缝。熔焊的焊接过程要经历加热、熔化、冶金反应、结晶、固态相变和形成接头这些阶段。由熔化的母材金属和添加金属(如焊条, 或无添加金属)在母材金属上形成的具有一定形状的液态金属称为熔池。焊接热过程的基本特点是加热温度高、速度快、高温停留时间短、冷却速度极快, 这造成了焊接加热过程的局部性和不均匀性, 由此产生了复杂的焊接应力和变形。焊接化学冶金过程是金属在焊接条件下的再熔炼过程, 与普通化学冶金过程相比, 其特点是反应时间极短、反应速度极快, 在高温下进行, 它直接影响焊缝金属的成分、组织、性能和产生的缺陷。焊接结晶包括两个过程, 第一是熔池金属凝固结晶过程, 第二是固态焊缝金属冷却至室温所发生的一系列组织转变过程。一般情况下, 焊缝中的晶体主要是柱状晶。

熔焊可采用无坡口对接、V形坡口对接、卷边接、T形接、角接、搭接和锁底接等多种接头形式, 常用形式是对接、T接、角接和搭接接头, 所形成的焊接接头(图4-4)包括焊缝区、熔合区和热影响区。焊缝区是由焊条金属和母材金属熔化而发生化学反应后形成的焊缝金属; 熔合区是焊缝区外侧至母材部分熔化的区域; 热影响区是母材部分熔化区和母材

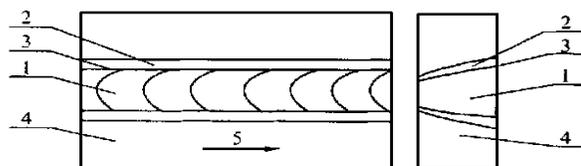


图 4-4 熔焊接头结构

1. 焊缝 2 热影响区 3 熔合区
4 母材 5 热源移动方向

发生固相组织变化的区域。

3.2.1 电弧焊

电弧焊利用电极和工件间造成电弧产生热量, 把焊条与工件焊接区熔化形成焊接接头。在航空航天工业中常用的是气体保护电弧焊, 即采用气体机械地将熔化金属与空气隔开, 使熔化的金属避免氧化和氮化, 常用的气体是氩气和二氧化碳。气体保护电弧焊的优点是电弧热量集中、熔池小、结晶快、无熔渣、焊接质量好。氩弧焊按所用电极分为非熔化极和熔化极氩弧焊两种, 非熔化极氩弧焊即钨极氩弧焊, 熔化极氩弧焊采用焊丝作电极进行焊接。

3.2.2 电阻焊

电阻焊是将焊件组合后通过电极施加压力, 利用电流通过接头的接触面及邻近区域产生的电阻热进行焊接的方法。电阻焊生产率高、劳动条件好、工件变形小, 易实现机械化和自动化。点焊是电阻焊常用的方法, 其工艺参数包括焊接电流、通电时间、电极接触面积、电极压力、搭接宽度、焊点最小间距和装配间隙等, 这些工艺参数都会影响焊接质量。

3.2.3 钎焊

钎焊用比母材熔点低的金属材料作为钎料, 将焊件和钎料加热到高于钎料熔点而低于母材熔点的温度, 液态钎料润湿母材, 填充接头间隙并与母材原子相互扩散, 实现焊接。钎焊的优点是加热温度低, 因此对母材组织和性能影响小; 缺点是接头强度低、耐热能力较差, 钎焊时要求较高的装配精度。钎焊工艺主要包括表面预处理、装配和固定、涂止焊剂、加热和焊后清洗。

3.2.4 电子束焊

电子束焊是航空航天工业常用的熔焊方法。电子束焊采用高电压加速装置, 形成高能量的电子束, 聚焦后轰击工件焊接区, 电子动能转化为热能熔化金属, 实现焊接。电子束焊可分为真空电子束焊和非真空电子束焊, 真空度对电子束焊的焊缝形状和熔深具有明显影响。电子束焊, 尤其是高真空电子束焊具有很多优点, 即热源能量密度大、焊接速度快、参数易于准确控制、工艺适应性强。热影响区小、焊件基本不变形、焊缝物理性能好, 适于高精度要求工件的焊接。焊缝深宽比可达 40:1, 从 0.1~160mm 厚的板材均可一次焊透。可焊接各种金属材料、形状复杂的工件和小型工件, 也可焊接陶瓷、石英及非金属与金属的接头。电子束焊需要精确的工装, 为了得到良好的焊接接头, 必须准确装配和进行严格的预处理。

3.3 压力加工与切削加工

压力加工是在外力作用下,使金属坯料(加热或不加热)发生塑性变形而得到所需尺寸和形状的毛坯或零件的工艺方法,主要有锻造、轧制、挤压、冲压和拔(拉)制等。压力加工可以使金属铸锭的粗大组织得到细化,提高致密性,从而提高金属的力学性能。此外,压力加工易于使复杂零件成形,有利于提高生产率。

锻造是应用非常普遍的一种压力加工方法,它是对加热的金属进行锻打、加压,使之在热态下发生塑性变形,以获得所需尺寸、改善组织、消除缺陷、提高性能。锻造在热态下进行是为了提高塑性和减小变形抗力。温度选择应适当(一般应在单相组织区温度),温度过高会引起晶粒粗大甚至过烧;温度过低变形困难,会产生加工硬化而导致锻造开裂。

在压力加工过程中,有些金属铸锭中的冶金缺陷(疏松、粗晶和微裂纹等)在压力加工过程中将得到改善,但大部分缺陷在压力加工过程中,将沿金属变形流向延伸或扩展,成为面积型缺陷。另外,由于工艺或操作不当,压力加工过程中也会产生新的缺陷,常见的缺陷有冷作硬化、过热、过烧和开裂,也可能产生白点、折叠、发纹和条带状组织等,它们都会改变金属的力学性能。

冷作硬化是金属在常温或低温下承受外力作用发生变形,在表层或近表层会产生硬化组织,使金属的强度和硬度提高,但塑性和韧性下降,也会影响其它性能。过热是压力加工过程中加热温度过高或在较高温度下停留时间过长等产生的,它将导致金属晶粒粗大,使力学性能降低。过烧是金属在压力加工过程中加热温度过高产生的,除导致金属晶粒粗大外,在晶界上将发生氧化和低熔点成分熔化现象,破坏晶粒间的结合力,使金属丧失塑性,在继续变形时将开裂。开裂是压力加工过程中由于加热速度、变形速度和压力加工后冷却速度过快以及原材料的缺陷等所导致的裂纹。

切削加工是通过刀具压入切削层,在刀具的挤压作用下,切削层发生弹性变形和塑性变形,直至开裂,形成层片,实现对材料和工件加工的工艺方法,主要有车削、钻削、镗削、刨削、拉削、铣削和磨削等。在切削加工中,表层金属经过反复多次变形和摩擦,将使金属表面硬度提高。硬化层常伴有残余应力和表面裂纹。

3.4 热处理

金属在固态下通过一定方式的加热、保温和冷却处理,其性能和组织得到改善(变)的工艺方法称为热处理,其方法主要有退火(Th)、正火(Z)、淬火

(C)、表面淬火、回火(H)、化学热处理及时效,实际应用中常把淬火+高温回火称为调质处理(T)。

退火是将金属加热到一定温度,保温一段时间,然后缓慢冷却的过程。退火的目的是消除内应力,使显微组织均匀化,以改善金属的力学性能(如降低硬度,提高塑性和韧性等)。

正火是将金属加热到一定温度,保温一段时间,然后置于空气中自然(吹风)冷却的过程。正火是一种特殊的退火,可使金属得到较好的综合力学性能。

淬火是将金属加热到一定温度,保温一段时间,然后快速冷却的过程。淬火之后,一般都要及时进行回火处理或时效处理。对钢淬火可显著提高金属的强度、硬度和耐磨性,但将产生较大的内应力,使脆性增大。

回火是将金属重新加热到临界温度以下的某一温度,保温一段时间,然后在空气或油中冷却的过程。回火的目的是降低淬火引起的脆性和消除内应力,稳定几何尺寸,获得所需的力学性能。

化学热处理是把金属置于化学介质中加热,使化学元素渗入金属表层,改变金属表层的组织和性能。化学热处理有渗碳、氮化和碳氮共渗等。时效是将金属置于室温或较高温度下一定时间,以稳定组织,改善力学性能。时效有人工时效和自然时效。

热处理的常见缺陷有钢的氧化和脱碳、过热与过烧、变形与开裂等。

钢热处理加热的目的是使组织转变为奥氏体,并使其均匀化。在完成向奥氏体转变并均匀化后,如继续加热,将发生奥氏体晶粒长大现象。在加热、保温之后,改变冷却条件,使过冷奥氏体在一定温度下转变,获得不同的组织和性能。

铝合金的热处理基本上是退火和淬火时效。退火是软化处理,通过退火获得稳定的组织或稳定的工艺塑性。淬火时效是强化处理,利用时效硬化提高合金的强度性能。所谓时效硬化是铝合金刚淬火后强度和硬度并不立即提高,但塑性较高,放置一段时间后,强度和硬度显著提高,但塑性明显降低的现象。铝合金热处理还具有可“回归现象”,即对自然时效后的铝合金进行短时间的加热(230~250℃,几秒至数分钟),然后快速冷却到室温,合金可重新变软,恢复到新淬火状态。并不是所有铝合金都能进行热处理强化,LF系变形铝合金和Al-Si系铸铝就不可进行热处理强化。

4 复合材料简介

复合材料是由两种以上不同化学性质或不同组

织结构的材料,以微观或宏观形式组合而成的,它一般由韧性好但强度和模量低的基体以及强度和模量高但脆性大的增强剂组成。与其它材料相比,其主要特点在于其性能的复合效果和性能的可设计性。

复合材料有不同的分类方法,按基体材料可分为树脂基、金属基、陶瓷基和特种复合材料等。也可按增强材料或复合效果分类,增强材料按物理形态分为纤维和粒子增强材料。纤维增强材料主要有尼龙、聚酯、玻璃纤维、不锈钢丝、石墨纤维、硼纤维和碳化硅纤维等,它们决定了复合材料的强度和弹性模量等主要力学性能;粒子增强材料主要有碳黑、碳酸钙和玻璃微珠等,它们对复合材料的作用是增加强度、弹性模量和功能复合,即给予复合材料特有的物理性能。复合材料的主要特性是比强度和比模量高,优于金属材料。抗疲劳性能好。大多数金属的疲劳破坏极限是其抗拉强度的40%~50%,碳纤维树脂复合材料可达70%~80%。减振性能好。纤维增强材料构件在超载并有少量纤维断裂时,会重新迅速分配在未破坏的纤维上。耐热性能好。金属基复合材料在很高温度下,其强度和弹性模量不变或稍有下降。成形工艺简单,材料结构具有可设计性。

复合材料除力学性能复合外,还有电性能与力学性能、光学性能与力学性能、热性能与力学性能等的复合,形成特种性能的复合材料,如烧蚀材料、导

电复合材料、固体自润滑复合材料、耐磨复合材料、光学功能复合材料、阻燃及自熄性复合材料等。

复合材料构件的成形工艺直接关系到成形后的性能。成形方法按工艺设备的特点可分为挤压铸造法、真空热压法、模压法、粉末烧结法和气相沉积法等;按增强剂的特点和布置方法可分为缠绕法、铺层法、喷射法、搅拌法和悬浮-熔融法等。

由于复合材料各组分性能的差异很大,成形后再加工很困难,所以复合材料构件(尤其是纤维增强复合材料)一般采用一次成形,随后不再进行机械加工。复合材料构件的无损检测是在制造过程中或成形后进行。不同成形工艺产生的缺陷也不同,常见缺陷有分层、界面脱离、纤维断裂、空隙、裂纹和增强剂分布不均匀等。

复合材料这一新型工程材料具有优良的物理和力学性能,已广泛应用在各工业部门。航空、航天的飞行器要求高比强度、高比模量和耐高温材料,广泛采用复合材料,如固体火箭发动机壳体和尾喷管喉部等采用了碳纤维增强树脂基复合材料。飞机的机身、机翼等也大量使用复合材料。复合材料与普通材料不同,给无损检测领域带来许多新的研究课题。

(待续)

收稿日期: 1999-12-16

(上接第 178 页)

强度射源对材质为 20g 的 $\phi 1\text{mm} \times 5\text{mm}$ 管子进行试验,试验选用附录 A 中的 II 型象质计,在底片影象上实测其线径有效长度,除以管子的影象长度,得出有效检出范围,结果见附表。

从附表数据可见,在射源强度一定的情况下,焦距 < 400mm 时,管子的有效检出范围和底片质量明显降低;在焦距一定而射源强度较小时,有效检出范围和底片质量有所提高。

2.4 其它措施

由于施工现场环境条件复杂,锅炉四管排列密集,为防散射,除进行背面散射防护外,在侧面另加铅板防护。

3 小结

(1) 在小径管射线探伤中,射源强度应 < $1.11 \times 10^{13}\text{Bq}$ 。

(2) 一般情况下焦距应 > 400mm,因为焦距缩短,有效检出范围明显下降。

附表

射源强度 $\times 10^{13}\text{Bq}$	焦距 mm	底片黑度			有效检出范围 %	底片质量
		边缘	中心	边缘		
1.48	700	1.50	2.2	1.45	83	清晰
	500	1.50	2.5	1.50	79	清晰
	450	1.60	2.8	1.60	75	较清晰
	400	1.50	2.9	1.40	56	模糊
	300	1.80	3.3	1.70	30	严重模糊
	250	2.30	3.6	2.40	15	严重模糊
0.74	700	1.40	2.5	1.34	86	清晰
	500	1.42	2.5	1.40	83	清晰
	450	1.40	2.7	1.50	78	清晰
	400	1.50	2.9	1.50	73	较清晰
	300	1.70	3.2	1.60	35	模糊
	250	2.30	3.5	2.60	21	严重模糊

(3) 实际探伤中应作好探伤对象周围的散射防护,以提高底片质量。

收稿日期: 1999-11-30

第五讲 评片技术(II)

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

INTERPRETATION OF RADIOGRAPHS (II)

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 缺陷识别概述

正确地识别射线照片上的影象,判断影象所代表的缺陷性质的基础是:

- (1) 具有一定的材料和工艺方面的知识,掌握缺陷的可能形式和发生规律。
- (2) 识别影象和判断缺陷性质的丰富经验。
- (3) 必须了解射线照相过程,特别是透照的具体布置,以分析影象的形成和变化特点。

总之,对工件的材料、工艺知识掌握得越多,对工件射线照相过程了解得越清楚,具有的经验越丰富,就越容易正确地识别射线照片上的缺陷影象。

在上述基础上,可根据影象的几何形状、黑度分布及位置对射线照片上的影象进行分析和判断。

不同性质的缺陷具有不同的几何形状和空间分布特点,例如,气孔一般呈球形,裂纹多为宽度很小且有变化的缝隙等。由于射线照片上缺陷的影象是缺陷的几何形状按照一定规律在平面上投影形成的图形,因此,射线照片上缺陷影象的形状与缺陷的几何形状及射线的照射方向密切相关。影象的几何形状常常是判断缺陷性质的最重要依据。判断一个影象是否是缺陷,缺陷的性质是什么,一般首先从影象的形状作出初步判断,然后,再从其他方面进行进一步的分析和论证。

影象的几何形状应当从三方面进行分析,即单个或局部影象的基本形状、多个或整体影象的分布情况、影象轮廓线的特点。

不同性质的缺陷,其影象的几何形状在上述三方面可能产生差异。应注意的是,对于不同的透照布置(特别是不同的照射方向),同一缺陷在射线照片上形成的影象的几何形状将发生变化。例如,球形可

能变成椭圆形;裂纹可能呈现为鲜明的细线,也可能呈现为模糊的片状影象等。

影象的黑度分布是判断影象性质的另一个重要依据。不同性质的缺陷内在性质不同:气孔可认为内部含气体,夹杂物是不同于工件本体材料的物质等。这种不同性质缺陷对射线的吸收不同,形成的缺陷影象黑度也就不同。

在分析影象黑度特点时应考虑影象黑度相对于工件本体黑度的高低。影象自身各部分黑度的分布特点。在缺陷具有相同或相近的几何形状时,黑度分布的特点是判断影象性质的重要依据。

缺陷影象在射线照片上的位置,也就是缺陷在工件中位置的反映,这是判断影象缺陷性质的另一个依据。缺陷在工件中出现的位置常具有一定的规律,因此影象所在位置也与缺陷性质相关。某些性质的缺陷只能出现在工件的特定位置,对这类性质的缺陷,影象的位置就是识别缺陷的重要依据。例如,焊缝中的根部未焊透一般只能出现在焊缝的中心线上,铸件中的缩孔常出现在壁厚变化较大的部位等。

实际识别射线照片上影象的缺陷性质,要从上述三方面进行综合考虑,作出判断。

2 铸件常见缺陷的识别

铸件中常见的内部缺陷可分为四类,即孔洞类缺陷,如气孔、针孔、缩孔、缩松和疏松。裂纹类缺陷,如冷裂纹、热裂纹、白点和冷隔。夹杂类缺陷,如夹杂物、夹渣(渣孔)和砂眼。成分类缺陷,如偏析。

2.1 缩孔、缩松和疏松(显微缩松)

铸件在冷却和凝固过程中,合金将发生液态收缩和固态收缩,由于铸件设计的特点、铸型设计所存

在的不足和浇注操作不当等,造成补缩不足,在铸件中产生孔洞。集中的大孔洞称为缩孔,分散而细小的孔洞称为缩松,在缓慢凝固区出现的很细小的孔洞区称为疏松,也称为显微缩松。缩孔、缩松和疏松使铸件受力的有效截面减少,实际强度降低,同时还引起应力集中,使铸件从这些部位开始损坏。

缩孔、缩松和疏松在射线照片上呈现的形态常见的是下面五种:

(1) 收缩孔洞(图 5-1) 在射线照片上它呈现为形状不规则、黑度比背景高出较多的暗斑影象,其分布没有确定的方向,面积较大,轮廓一般清晰。缩孔经常出现在铸件最后凝固的区域和铸件厚度相差较大的部位。



图 5-1 收缩孔洞

(2) 纤维状缩孔(图 5-2) 在射线照片上它呈现为树枝状黑度较大的影象,影象具有主干、主枝和次枝等形貌,整个影象都显示较大的黑度,特别是主干和主枝。由于其形状的特殊性,这种缺陷影象容易识别。

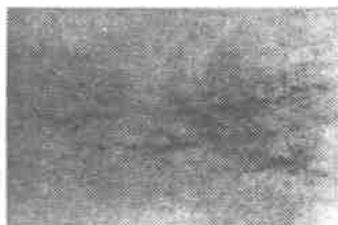


图 5-2 纤维状缩孔

(3) 海绵状缩松(图 5-3) 它由相互连结的小孔洞系构成,在射线照片上呈现为云雾状影象,正如天空中的云和空气中的雾,整个影象有的地方黑度大些,有的地方黑度小些,黑度自然过渡,没有明显的分界,也没有明显的边界轮廓,但它总有一定的面积分布。

(4) 层状疏松(图 5-4) 在镁合金中,细小的孔洞系常形成层状分布,在射线照片上呈现为条纹状影象,条纹的黑度不大,总是多条同时出现,并具有整体相同的走向。

(5) 分散状疏松(图 5-5) 它是细小、连接的孔

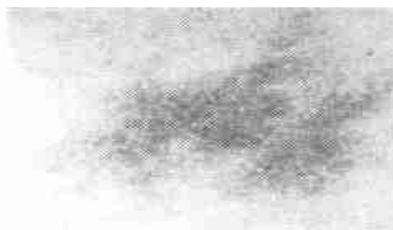


图 5-3 海绵状缩松

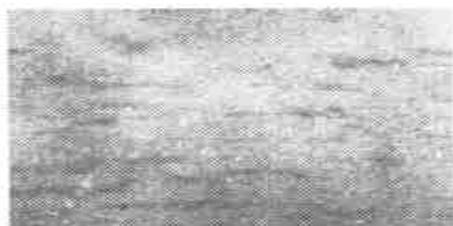


图 5-4 层状疏松



图 5-5 分散状疏松

洞,常集中分布在铸件的某个范围内,在射线照片上呈现的影象为小长条状的网纹影象。

(6) 一般疏松(显微缩松) 它是细小、分立的孔洞,分布在铸件的整个厚度范围内,在射线照片上呈现的影象与铸件厚度有关。对薄的截面,可显示为细的网纹影象;对厚的截面,由于孔洞的相互重叠,将显示为模糊的暗斑。它也可分布在铸件的中心区,显示为模糊的团状暗斑,常称为中心疏松。

2.2 气孔

气孔是铸件中最常见的缺陷之一,在铸件的废品中,由气孔造成的约占 1/3。气孔是气体在铸件中形成的孔洞。它的存在破坏了铸件金属的连续性,减少了承载截面,造成了局部应力集中,降低了铸件的性能,特别是降低铸件的冲击韧度和疲劳强度。

按照产生原因,气孔可分为三类,即侵入气孔、析出气孔和反应气孔。

侵入气孔是在浇注的过程中,铸型和型芯由于急剧加热挥发出的气体和粘接剂等有机物燃烧产生的气体和型腔中未逸出的气体等进入到金属熔液中形成的气孔。侵入气孔的体积一般较大,多分布在铸件上表面附近。

析出气孔是溶解在金属熔液中的气体,在冷却

和凝固过程中, 由于温度降低或外界压力降低, 使溶解度降低, 而从金属熔液中析出, 这些析出的气体由于受到型芯的阻挡, 或因金属熔液温度降低粘度增大而难以上浮排出, 便被留在铸件内形成气孔。析出气孔多为分散的小圆孔。

反应气孔是金属熔液与铸型或金属熔液中的某些元素之间发生化学反应产生的气体所造成的气孔。它一般均匀分布, 主要集中在铸件皮下。

气孔在射线照片上常见的形态主要有两种:

(1) 气孔(图 5-6) 在射线照片上呈现为孤立的或成群的圆形、椭圆形和梨形的暗斑, 轮廓光滑, 影象鲜明, 整个影象黑度较大, 无明显变化。较大的气孔很容易识别。

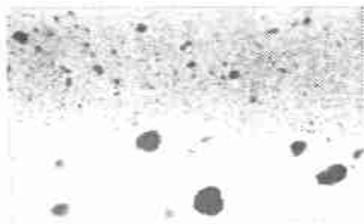


图 5-6 铸件中的气孔

(2) 针孔(图 5-7) 针孔是铸件中比较均匀散布的细小气孔, 它或者出现在整个铸件, 或者集中出现在铸件的某个区域。在射线照片上它呈现为均匀散布的暗点状影象, 在铸件截面厚度较小时, 影象清晰; 在截面厚度较大时, 影象模糊, 这时候由于气孔在厚度方向上的迭加, 影象可转化为尖点状(苍蝇脚状)或近于圆点状。如果厚度大, 影象将变成模糊的云片状形貌。



图 5-7 针孔

2.3 裂纹

裂纹是危险性的缺陷, 它使铸件的强度大大降低, 在使用中裂纹可能不断扩展, 造成铸件破坏。铸件在凝固末期和常温的冷却过程中, 其收缩可能受到两个方面的阻碍, 一是铸件本身由于具有一定的结构, 各部分冷却不同, 因此各部分的收缩将相互制约(常称为热阻碍); 二是铸型、型芯及铸件自身的厚度、长度和形状具有一定的可退让性, 也会阻碍铸件

的收缩(常称为机械阻碍)。这些阻碍作用将导致在铸件中产生应力, 引起开裂。铸件中出现的裂纹可分为两类: 热裂纹和冷裂纹, 它们的产生原因和特点不同, 在射线照片上影象也具有不同的特征。

(1) 热裂纹(图 5-8) 简单地说, 热裂纹是高温液态金属凝固时, 由于收缩应力超过了金属当时的强度或变形超过了金属的塑性产生的裂纹。它主要出现在铸件的拐角处、截面厚度突变处、最后凝固处。在射线照片上它呈现为不规则的黑线状影象, 常是中间宽两端细, 末端多为尖状。黑线常为波折状, 有时可形成分叉。



图 5-8 热裂纹

(2) 冷裂纹(图 5-9) 冷裂纹是铸件在较低温度下, 由于铸造应力超过了合金的强度极限而产生的裂纹。它主要出现在铸件收缩中处于拉伸的部位和应力集中的部位。大型或构造复杂的铸件容易产生冷裂纹, 冷裂纹也常称为应力裂纹。在射线照片上它典型的影象是微弯、平滑的直线状黑线, 尾端细尖, 与热裂纹的影象具有明显的区别。

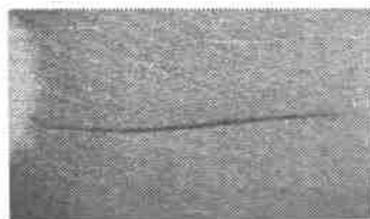


图 5-9 冷裂纹

2.4 夹杂物

夹杂物缺陷是铸件中含有的成分与基本成分不同的各种金属性异物和非金属性异物。

金属性异物称为金属夹杂物, 它主要来源于金属熔液与炉衬和工具等接触过程中发生的各种物理和化学反应的产物, 此外也来源于人为因素, 如混料等。非金属异物称为非金属夹杂物, 它来源于金属熔液内部反应的产物和熔炼过程中形成和分离出来的浮渣、熔剂残渣、脱落的铸型材料等。非金属夹杂物常是氧化物、硫化物、碳化物和硅酸盐等, 但主要是氧化物。这些夹杂物多集中于铸件的某个部位, 如铸

件的上表面和内浇口附近等,在射线照片上常见的有三种形态:

(1) 金属夹杂物 常见的金属夹杂物主要是混杂在铸件金属溶液中的其他种类金属块,因此它具有一定的几何形状,视其与铸件金属相比密度的大小、原子序数的高低,它的影象可能显现为比背景黑度低或高的黑度,影象常具有片状形象,整个影象的黑度比较一致。

(2) 夹渣(图 5-10) 经常出现的夹渣是炉渣和氧化物等,它们化学成分复杂,形状极不规则,它们大多集中在铸件的某个部位,以比较密集或分散的状态出现。在射线照片上,其影象的基本形貌是在一定范围内分布的小颗粒状黑斑。颗粒的大小不同,形状不同,常显现为小片状影象,影象的轮廓比较清楚,影象的黑度与背景黑度相差较大。



图 5-10 铸件中的夹渣

(3) 砂眼 砂眼是充塞型砂的孔洞,它是由于铸型受到冲刷,致使型砂脱落并残留在铸件中造成的缺陷。在射线照片上其整体影象的形状可能极不规则,但影象黑度具有颗粒状特征,特别在影象边缘区,这种特征更明显。

2.5 冷隔(图 5-11)

在铸件中金属流汇合处,如果金属熔液熔合不完善或金属熔液不连续,那么在铸件中将产生穿透或未穿透的缝隙,这就是冷隔缺陷。产生冷隔的原因主要是金属熔液温度低、铸型表面或冷铁激冷过度、充型速度不正确、浇注系统不合理等。冷隔缺陷主要出现在铸件远离浇口的宽大表面处和薄壁处。由于冷隔缺陷所形成的缝隙常具有圆角,因此在射线照片上常呈现为宽度比较均匀,缺少变化,且平滑的条状黑线影象。线条的宽度显得比较大,黑度在宽度方

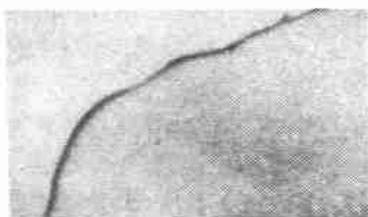


图 5-11 冷隔

向似也存在变化。

2.6 偏析

铸件凝固后出现的化学成分不均匀性称为偏析,即在局部区域某种合金成分过多或过少。

偏析可分一般偏析、局部偏析和带状偏析三种。

一般偏析集中在很小的局部,形成大量的很小区域的偏析,在射线照片上呈现絮状形貌的影象。带状偏析是不同合金成分以层状交替分布在铸件中,它主要发生在离心铸造过程中。一般偏析和带状偏析在一般情况下都被认为不是缺陷。

局部偏析(或称为集中偏析)是缩孔或热裂纹的整体或局部被低熔点的合金成分填充,所以它们也分别被称为收缩偏析和热裂偏析。在射线照片上其影象呈现为黑度远小于背景黑度的裂纹状形态,所以很容易识别,也常称为白裂纹(图 5-12)。有些收缩偏析,同时会含有夹渣。

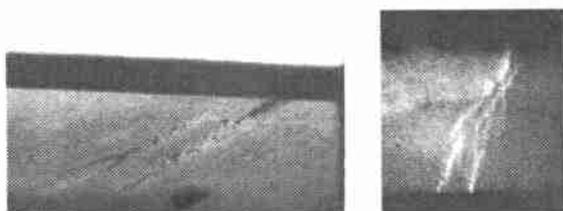


图 5-12 收缩偏析

3 焊接常见缺陷的识别

焊接过程中产生的缺陷主要有六类,即 熔合不良:未焊透、未熔合。 裂纹:热裂纹、冷裂纹。 孔洞:气孔、缩孔。 夹杂物:夹渣、夹钨。 成形不良:咬边、烧穿和焊瘤等。 其它缺陷。而射线照相检验主要检测的是前五类。

3.1 熔合不良

在焊接过程中,如果焊接规范(电压、电流、预热等)不适当,或焊接操作不正确,将影响所形成的熔池形状、大小和温度等,造成焊接缺陷。焊接电流过大或过小、焊速过快、焊条角度不正确、坡口不适当、清理不干净等都可能造成熔合不良。

熔合不良缺陷分未焊透和未熔合两类。它们对焊缝都是危害性缺陷。

3.1.1 未焊透(图 5-13)

未焊透是接头根部未完全熔透现象,即坡口根部母材金属局部未被熔化。由于它出现在坡口根部,因此常称为根部未焊透。在射线照片上未焊透是容易识别的缺陷。由于坡口存在直的机械加工边,而且坡口直边又位于焊缝中心,所以未焊透在射线照片

上一般呈现为笔直的黑线影象, 并处于焊缝影象的中心。实际看到的未焊透缺陷影象还可能是断续的黑线、变宽的黑线条、偏离焊缝中心线的黑线等, 或伴随其他形态影象的线状影象。

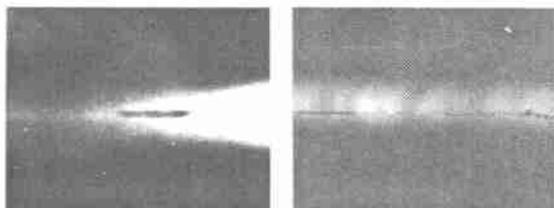


图 5-13 未焊透

3.1.2 未熔合(图 5-14)

未熔合是焊道(焊缝金属)与母材金属之间或焊道与焊道之间局部未熔化成为一体的现象。按照它出现的位置, 常分为根部未熔合、坡口未熔合和层间未熔合三种。根部未熔合是指坡口根部处发生的焊缝金属与母材金属未熔化成一体的缺陷, 坡口未熔合是指坡口侧壁处发生的焊缝金属与母材金属未熔化成一体的缺陷, 层间未熔合是多层焊时各层焊缝金属之间未熔化成一体的缺陷。

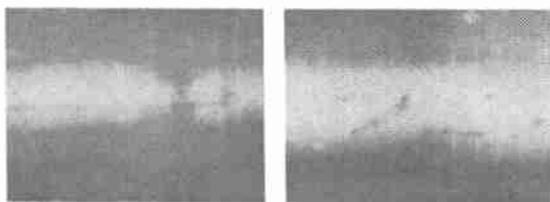


图 5-14 未熔合

在射线照片上未熔合影象的形态与射线束的方向相关。一般情况下它呈现为模糊的宽线条状影象, 线条沿焊缝方向延伸, 位置与未熔合的位置相关。影象的黑度与背景的黑度差比较小, 有时影象的一侧呈现直边状。未熔合影象出现的位置和影象的形状与条状夹渣类似, 但未熔合影象的黑度比条状夹渣影象的黑度要低得多, 而且轮廓也模糊。

未熔合是射线照相容易漏检的缺陷, 特别是层间未熔合, 在评片时应注意识别这种缺陷。

3.2 裂纹(图 5-15)

裂纹是危害严重的焊接缺陷, 也是焊缝中常见的缺陷。焊接过程中产生的裂纹是多种多样的, 可分布在焊缝的各个部位。按照裂纹产生的原因裂纹可以分为热裂纹、冷裂纹、再热裂纹、层状撕裂和应力腐蚀裂纹五类。

热裂纹是在高温下由拉应力作用产生的裂纹。由于焊接过程是一个局部不均匀加热和冷却的过

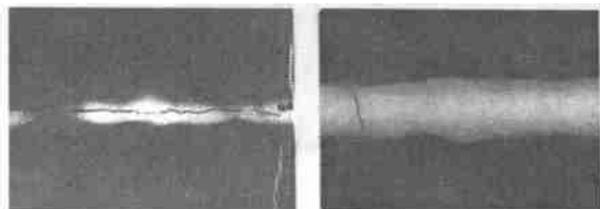


图 5-15 焊接裂纹

程, 因此必然产生拉应力, 在拉应力的作用下, 焊缝的薄弱处发生开裂。热裂纹的主要形态是焊缝纵向裂纹、焊缝横向裂纹、弧坑裂纹和焊缝根部裂纹。冷裂纹是在焊后较低的温度下产生的裂纹, 它与焊接金属的成分和特性以及氢的作用和拘束应力密切相关。冷裂纹经常出现的形态是焊道下裂纹、焊趾裂纹及焊缝根部裂纹。再热裂纹是焊后进行消除应力的热处理过程产生的裂纹, 它一般出现在热影响区和熔合线附近。层状撕裂是由于母材金属中原有的夹杂物在焊接应力作用下导致的开裂, 它总是出现在热影响区或母材金属中。应力腐蚀裂纹是某些材料在某些介质中, 由于拉应力的作用所产生的延迟裂纹, 它是腐蚀介质和拉应力共同作用产生的, 主要从表面向深度方向发展。

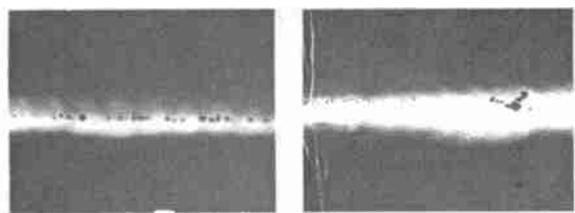
在射线照片上, 裂纹影象的基本形态呈现为黑线, 影象的黑度可能较大, 也可能较小, 容易与其他缺陷的影象区别。常见的裂纹影象有纵向裂纹、横向裂纹、星状裂纹(辐射状裂纹、枝状裂纹)和弧坑裂纹等。线状影象一般连续延伸, 但也可能中间发生中断, 中断经常是渐渐过渡的; 影象可能近似直线状, 也可能为波折状。这些特点由裂纹的性质决定, 也与射线照相时射线束的方向相关。

由于裂纹属于窄缝性缺陷, 所以当射线束与它的扩展面成较大角度时, 裂纹的影象将变得很模糊, 甚至在射线照片上不能形成具有一定对比度的裂纹影象, 这点在识别缺陷的影象时应引起注意。

3.3 气孔(图 5-16)

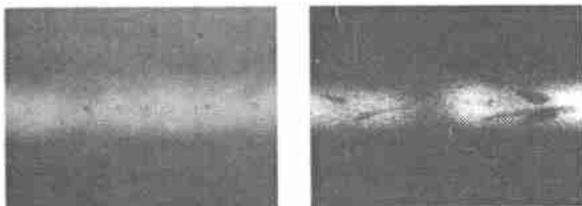
气孔是焊缝中常见的缺陷, 它是熔池结晶过程中未能逸出而残留在焊缝金属中的气体形成的空洞。在焊接过程中焊接区内充满了大量气体, 这些气体来源于焊接材料在加热时分解、燃烧所析出的气体; 电弧区内的空气; 焊条、母材表面吸附的水分及污染物受热析出的气体; 以及高温下气体溶解度降低析出的气体等。气孔的形成过程是, 熔池内发生气体析出, 析出的气体聚集形成气泡, 气泡长大到一定程度后开始上浮, 上浮中受到熔池金属的阻碍不能逸出, 被留在焊缝金属中形成气孔。

焊缝中形成气孔的气体主要是氢气、一氧化碳



(a)

(b)



(c)

(d)

图 5-16 焊接气孔

和氮气。

在射线照片上气孔呈现为黑度大于背景黑度的斑点状影象, 黑度一般都较大, 影象清晰, 容易识别。影象的形状可能是圆形、椭圆形或长圆形(梨形)。常见的主要分布形态有孤立气孔、密集气孔、链状气孔和虫孔四种。虫孔主要是一氧化碳形成的气孔, 它是一氧化碳气体从焊缝内部上浮排出过程中, 熔池结晶造成气孔拉长, 并沿结晶方向分布, 形成状如小虫, 成人字形规则排列的气孔。细小的密集气孔一般难与细小密集的夹渣区别。

3.4 夹杂物

焊缝中残留的各种非熔焊金属以外的物质称为夹杂物。夹杂物分夹渣、非金属夹杂物和金属夹杂物三类。夹渣是焊后残留在焊缝内的熔渣, 非金属夹杂物是焊接过程中产生的各种非金属杂质, 如氧化物、氮化物和硫化物等。金属夹杂物主要是夹铜和夹钨。夹渣和非金属夹杂物一般都简单地统称为夹渣。

焊缝中产生夹渣的主要原因是焊接电流小, 或焊接速度快, 使杂质不能与液态金属分开并浮出。在多层焊时, 如果前一层的熔渣清理不彻底, 焊接操作又未能将其完全浮出, 也会在焊缝形成夹渣。夹钨主要是焊接操作不当使钨极进入熔池, 或焊接电流过大, 导致钨极熔化, 落入熔池形成了钨夹杂。

夹渣(图 5-17)在射线照片上常见的影象主要有点状夹渣、密集夹渣和条状夹渣三种形态。其影象的主要特点是形状不规则、边缘不整齐、黑度较大而均匀。点状夹渣呈现小点形态, 密集夹渣呈现密集小点形态, 条状夹渣呈现长条状、具有一定宽度的暗线形态, 线的延伸方向一般与焊缝走向相同。

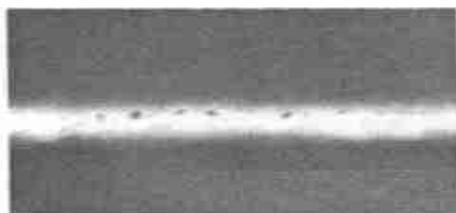


图 5-17 夹渣

由于钨的原子序数很高, 密度很大, 所以在射线照片上夹钨的影象总是呈现为黑度远低于背景黑度的影象, 常常为透明状态(图 5-18)。夹钨的影象主要有孤立点状和密集点状两种形态。



图 5-18 夹钨

3.5 成形不良

由于焊接规范不当或焊接操作不良, 可以造成焊缝成形不良缺陷。常见的主要成形不良缺陷有咬边、烧穿和焊瘤。此外还有一些其他成形不良缺陷, 如收缩沟和塌陷等。

3.5.1 咬边

咬边是在母材金属上沿焊趾产生的沟槽, 产生咬边的原因主要是焊接电流过大、电弧过长和焊条角度不正确等。咬边是一种危险的缺陷, 它减少了母材金属的有效截面, 造成应力集中, 容易引起裂纹。在射线照片上它的影象类似于夹渣, 但它一定出现在焊缝区两侧, 因此容易识别。

3.5.2 烧穿

烧穿是由于熔化深度超出母材金属厚度, 熔化金属自坡口背面流出, 形成穿孔缺陷。产生这种缺陷的原因主要是焊接电流过大、焊接速度过慢和坡口间隙过大。在射线照片上它的影象呈现为低黑度的圆环或椭圆环及中心高黑度的暗斑形貌, 中心暗斑是由于滴落金属熔液后形成的孔洞造成的, 低黑度的环则是过多的熔化金属造成较大的焊缝背面下沉形成的影象。

3.5.3 焊瘤

焊瘤是熔化的金属流到焊缝外或流到未熔化的母材金属上形成的金属瘤, 产生焊瘤的主要原因是操作不熟练。焊瘤在射线照片上呈现为具有圆滑轮廓的较大的低黑度斑点影象, 它可能出现在焊缝区

内(焊瘤在焊缝背面),但经常是出现在焊缝两侧区。

4 衍射斑纹和静电斑纹

4.1 衍射斑纹

衍射斑纹主要出现在轻合金(如铝合金)、不锈钢的铸件和焊件的射线照片上,特别当工件的厚度较小时更容易出现。研究证明,这些斑纹影象是铸件或焊件金属凝固组织的晶体结构对 X 射线的衍射形成的,因此称它们为衍射斑纹。射线照片上常出现的衍射斑纹主要有线状衍射斑纹、羽毛状衍射斑纹和斑点状衍射斑纹三类。

线状衍射斑纹主要出现在焊缝的射线照片上,其典型形态如图 5-19 所示。它的基本特征是,在焊缝的中心线附近出现一条暗线,其影象类似于根部未焊透,但与根部未焊透的影象相比,这个影象不够清晰,也不够直。此外,其一侧常伴随有白线,或人字形斑纹。线状衍射斑纹也可呈现出其他形态特点如为一条白线、两条暗线等。这种衍射斑纹常出现在不锈钢和轻合金的焊缝射线照片上,应注意避免把它错误地判断为根部未焊透或裂纹。另一方面,对焊缝中确实存在的裂纹和未焊透,也不能误判为线状衍射斑纹。

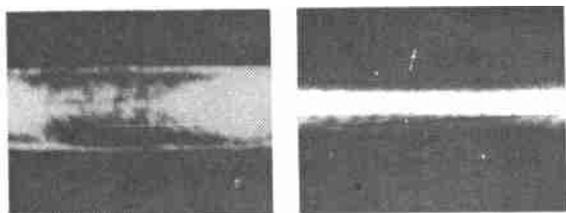


图 5-19 线状衍射斑纹

羽毛状衍射斑纹是不锈钢和轻合金焊缝的射线照片上常出现的另一种衍射斑纹,这种衍射斑纹也称为“人字形骨架”(或称为“八字形”)斑纹。羽毛状衍射斑纹的基本特征是,斑纹为从焊缝中心附近向焊缝母材方向(两侧或一侧)延伸的暗线条纹,总体形成羽毛状影象。由于它整体形态的特点,很容易与其他缺陷的影象相区别。图 5-20 是羽毛状衍射斑纹的影象。

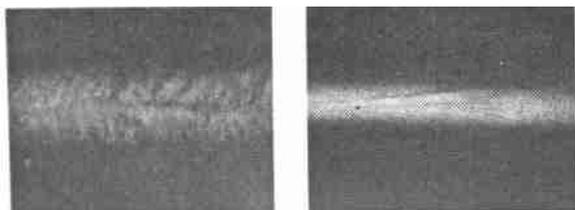


图 5-20 羽毛状衍射斑纹

斑点状衍射斑纹主要出现在轻合金铸件和不锈钢铸件的射线照片上,斑点的形状不规则,分布也无规律,因此,可能与夹渣和疏松相混淆。但一般斑点影象的边缘比较模糊。在焊缝的射线照片上也可以看到斑点状衍射斑纹。

4.2 静电斑纹

在天气干燥时,如果切装胶片时造成静电闪光,在射线照片上有时会出现静电斑纹影象。静电斑纹影象常见的主要是树枝状和冠状影象,此外还有连续斑点状影象。树枝状静电斑纹与树枝形貌非常相似,其影象可能粗大,也可能细小,可能单支存在,也可能成排存在。冠状静电斑纹呈现为从一斑点辐射出细直或弯曲短线形貌。连续斑点状静电斑纹为在一条线上顺序分布的斑点,斑点尺寸从大到小。无评片经验的人员,可能将静电斑纹影象误判为裂纹或气孔。图 5-21 为静电斑纹影象的示例。

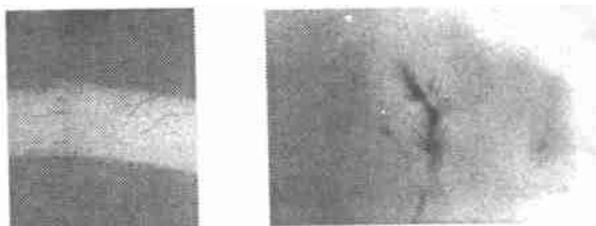


图 5-21 静电斑纹影象

5 质量评定

5.1 技术条件关于内部质量规定的理解

技术条件(质量验收标准)关于内部质量的规定,一般包括下面三方面的内容:

5.1.1 缺陷类型

质量验收标准对缺陷一般都按照缺陷对工件结构性能的影响,进行重新归纳、分类,规定了质量分级时采用的缺陷类型。例如,在焊接结构中,带圆角的缺陷(如气孔、点状夹渣等)因减少了承载截面积使强度下降;细长的夹渣和类似的缺陷因产生应力集中使强度下降;裂纹及类似缺陷因产生强烈的应力集中而使强度下降。这样按照缺陷性质本属于同一性质的缺陷,这时可能属于不同类型的缺陷,而本不是不同性质的缺陷,这时可能归属于同一类型。例如,在 GB 3323-87 标准中,列出了圆形缺陷,它包括气孔,也包括点状夹渣。这种缺陷重新分类,是质量验收标准的基本规定之一,它是质量级别评定的基础,在应用质量验收标准时,首先应理解和掌握质量验收标准有关这方面的规定。有的质量验收标准明确地列出了这方面的规定,有的则以其他方式列

出这方面的规定, 这时需要质量评定人员从有关规定中分析、归纳出缺陷类型的规定。

5.1.2 缺陷数据测定方法

质量评定必然涉及缺陷的尺寸、数量等具体数据, 质量验收标准关于质量级别评定第二方面的重要规定是, 如何按照射线照片上显示的影象测定缺陷的有关数据。如果没有这方面的具体的规定, 对同一射线照片上的同一缺陷影象, 不同的人员可能得到完全不同的数据。特别是当影象边界模糊时, 判断数据的差异可能很大, 甚至会涉及是否判废的问题。此外, 还规定了如何将测定的缺陷数据转换为缺陷质量级别评定的数据。不同的质量验收标准规定的测定方法不同, 必须理解和掌握所应用质量验收标准的具体规定。

5.1.3 质量分级的具体规定

质量分级的规定包括质量验收标准对质量级别的设立和各质量级别的具体要求。关于各质量级别的具体要求一般包括下面四方面:

(1) 缺陷类型 一般将缺陷分为允许性缺陷和不允许性缺陷, 即规定了各质量级别允许存在的缺陷和不允许存在的缺陷。对不允许存在的缺陷不讨论其尺寸大小和数量等; 对允许存在的缺陷, 则按照缺陷的类型、尺寸、数量和位置等作进一步规定。

(2) 缺陷评定区 对允许性缺陷, 评定质量级别时所规定的评定缺陷允许程度的区域, 一般是一个面积单元或长度单元, 以这个单元中缺陷的数据对质量级别作出评定。

质量验收标准中对评定区的规定包括评定区的尺寸大小和评定区选取的原则。

不同类型缺陷的评定区可能不同, 一般评定区都是选在缺陷最严重的区域。分段透照时, 必须注意将各段连接起来考虑, 才能正确地选定评定区。

(3) 缺陷允许程度 一般都包括允许的缺陷尺寸(在不同位置可能不同)、允许的缺陷数量(在评定区内和整个工件上)、允许的缺陷密集程度(常为缺陷间距和在评定区内允许的最多数目), 有时还会包括缺陷允许的位置, 如缺陷与工件某些特定部位的距离等。

(4) 综合评级(组合缺陷) 规定不同类型缺陷同时出现在评定区时的评级方法。

5.2 质量分级评定的基本步骤

从上面对质量验收标准的分析可以总结出质量分级评定的基本步骤:

(1) 首先考虑缺陷类型, 判断是否存在不允许存在的缺陷, 以便直接确定质量级别。

(2) 对允许存在的缺陷, 首先确定是否存在尺寸超过质量级别规定的情况。

(3) 确定可能的评定区(有时, 不进行具体计算难以确定缺陷最严重的部位), 对可能的评定区按缺陷类型分别进行质量分级。

(4) 考虑应进行的综合评级。

(5) 最后, 根据以上所得到的结果, 来判定质量级别。

(全文完)

收稿日期: 1999-12-16

(上接第 228 页)

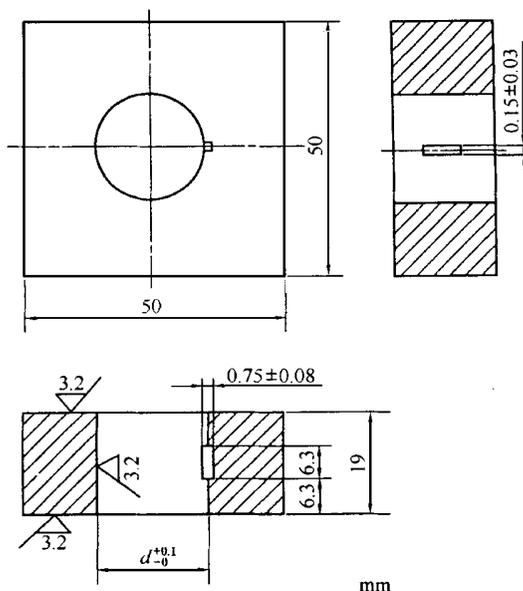


图 A3 孔内表面人工缺陷对比试样
 d ——孔探头直径

附加说明

本标准按照 MH/T0001~ MH/T0003-1997《民航标准编写规定》编写。在编写中, 参照并部分采用了美国军用规范和国外航空器制造厂的有关资料, 结合民航实际, 力求使其具有先进性、科学性、可行性。执行本标准, 可满足民用航空器涡流检验的基本要求。

本标准由中国民用航空总局航空器适航中心提出。
本标准由中国民用航空总局航空器适航司归口管理。
本标准由中国西南航空飞机维修公司负责起草。
本标准主要起草人: 许万忠、王学民、聂有传、施忠良。

收稿日期: 1999-12-15

第六讲 射线照相标准与射线 照相检验质量控制

郑世才

(新立机器厂, 北京 100039)

RADIOGRAPHIC STANDARDS AND QUALITY CONTROL OF RADIOGRAPHIC TESTING

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 射线照相标准概述

目前, 国内外制订的射线检验标准, 按内容可分为射线照相检验技术(或方法)、射线照相检验质量控制、射线照相检验参考底片、射线照相检验的术语和器材等方面的标准。美国材料试验学会(ASTM)关于射线照相方面的标准共计55项(1998年版), 其中参考底片类标准15项、射线照相检验质量控制方法标准1项、射线检验试验方法标准14项、射线检验操作方法标准13项以及射线检验导则标准12项。ASTM是世界上射线检验标准制订得最多的标准体系, 在试验方法标准、操作方法标准和导则标准中, 不仅有常规射线照相标准, 还有实时成像、CT和康普顿散射成像标准。

一般射线照相检验人员需要深入理解和掌握的主要是射线照相检验技术(或方法)标准和射线照相检验质量控制标准。射线照相检验技术(或方法)标准一般包括下列内容:

- (1) 标准的适用范围
- (2) 射线照相检验技术规定
 - (a) 射线胶片的分类和选用
 - (b) 主要透照参数(射线能量、透照焦距和曝光量)的确定
 - (c) 透照布置和辅助措施(如增感和各种控制散射线的措施)要求
 - (d) 射线照相灵敏度要求
 - (e) 暗室处理技术要求
 - (f) 评片技术要求
- (3) 射线照相检验质量控制要求
 - (a) 人员技术资格

- (b) 设备、器材质量和工作环境的要求
- (c) 射线照相技术控制方法
- (d) 射线照相(底片)质量要求
- (e) 技术文件和资料质量要求

射线照相检验技术和射线照相检验质量控制的内容常常是连贯的, 因此, 在射线照相检验技术标准中总是包括主要的质量控制内容。

2 射线照相技术级别

2.1 概述

射线照相检验技术(或方法)标准所规定的核心内容是射线照相技术, 一般包括选用的射线胶片类型、透照参数, 主要是射线能量、透照焦距和曝光量、透照布置和辅助措施(如增感和各种控制散射线的措施)。射线照片影象质量, 主要是底片黑度和射线照相灵敏度。

这些方面的规定限定了所采用的射线照相检验技术, 因而也限定了射线照相检验的结果。理论上, 规定了射线照相技术选用的胶片、透照参数和有关的辅助措施, 就应该限定了能够得到的射线照片质量, 或射线照相检验结果, 但实际上, 由于射线照相过程的复杂性, 一些因素的影响不可能受到严格控制, 因此, 在射线照相技术中, 还必须对底片黑度和象质计灵敏度作出限定性规定。贯穿在射线照相技术规定中的线索是射线照相技术级别。60年代以来, 国内外重要射线照相方法标准已明确提出了射线照相技术级别概念, 如在国际标准化组织(ISO)标准中, 其第4条的标题常为“射线照相技术级别”。现在, 多数射线照相标准将射线照相检验技术分为两个级别, 即A级: 一般灵敏度技术; B级: 高灵敏

度技术。并从上述四个方面对不同级别的射线照相技术作出规定,其中主要是:

(1) 胶片

规定应采用的胶片类型。

(2) 基本透照参数

(a) 射线能量 规定不同能量射线适宜的透照厚度,对常见的 400kV 以下 X 射线规定允许的最高透照电压与透照厚度的关系。

(b) 焦距 规定最小焦距值与透照厚度的关系,或不同厚度、不同技术级别的几何不清晰度。

(c) 曝光量 推荐了应采用的最低曝光量。

(3) 射线照片质量

(a) 黑度 规定射线照片允许的黑度范围。

(b) 射线照相灵敏度 规定相应于不同厚度范围射线照片应达到的射线照相灵敏度。

以上这些可作为理解射线照相检验方法标准的基本线索。表 6-1 是国际标准化组织标准 ISO 5579 关于射线照相技术级别的典型规定。射线照相技术各部分规定的关系如图 6-1。

表 6-1 ISO 5579—85 标准的有关规定(钢)*

技术级别	胶片	透照电压 最高值 v/kV	焦距 最小值	黑度
A	中速中粒	$50T^{0.56}$	$f/d \quad 7.5T^{\frac{2}{3}}$	1.5
B	慢速细粒		$f/d \quad 15T^{\frac{2}{3}}$	2.0

* 象质计灵敏度:按 T 分段,分别规定应识别的最小丝径。
T——待测工件厚度,mm

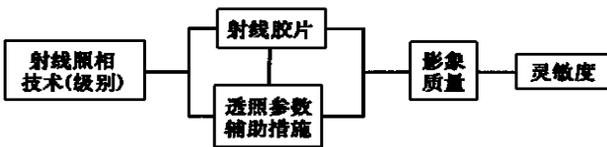


图 6-1 射线照相技术各部分规定的关系

技术级别规定的基础是胶片。

按成像理论,为了在射线照片上识别一个细节,该细节影象的对比度 ΔD 必须满足的条件之一是

$$\Delta D \quad (3 \sim 5) \sigma$$

式中 σ ——影象的颗粒度

σ 是胶片颗粒尺寸、颗粒尺寸大小的随机分布、单位面积中颗粒数的随机性及射线量子吸收的随机性的反映。因此,即使在非常均匀的曝光下,所得到的影象也具有一定的颗粒性。影象的颗粒度主要取决于胶片本身的特性,也与射线能量、曝光量和暗室处理过程有关。影象颗粒度的上述性质说明,对于形成的射线照片的影象质量,胶片自身的特性提

供了可能达到的最高水平,透照中所采用的技术因素,是在这个可能达到的基础上进行控制和调整,以达到所要求的影象质量。不能期望通过控制和调整射线照相的技术因素得到超过胶片特性限定的影象质量,即在适当的透照参数等条件下,较细颗粒的胶片可以得到更好的影象质量。正因为如此,在射线照相标准中对射线照相技术级别首先规定的是应选用的胶片类型。

基本透照参数是技术级别规定中对技术因素的基本规定,它是影象质量的技术保证。显然,射线能量是透照参数中最重要的参数,因为它直接关系到射线的线衰减系数、散射比和射线照相不清晰度等,选取得正确与否,将直接影响射线照片的影象质量。焦距是另一基本透照参数,它直接关系到射线照相的几何不清晰度。约从 70 年代起,英国射线照相标准明确提出,应从确立胶片固有不清晰度与几何不清晰度的关系规定焦距值,即应使基本透照参数能量条件和几何条件相互协调,近年来有文献强调了这种观点。基本透照参数中的曝光量直接关系到射线照片影象的信噪比,也即影象的颗粒度。但是,曝光量却是射线照相技术级别中难以严格规定的透照参数,特别是对 400kV 以下的 X 射线,造成这种情况的原因至少有三个方面: 同一毫安·分(mA·min)时,不同的 X 射线机由于高压发生波形不一,因而产生的 X 射线照射率也不同,即使是同一 X 射线机,在不同的透照电压时产生的 X 射线照射率也不同。随着 X 射线机使用期的加长,其照射率还会不断改变。X 射线管辐射的 X 射线是连续谱,不同谱对射线胶片的感光能力不同。X 射线管辐射的 X 射线的能谱分布,又随着穿透厚度而改变。这些原因使得至今难以对 X 射线的曝光量作出严格的规定。

在技术级别规定中,射线照片质量主要是底片黑度和灵敏度。黑度规定是对底片对比度和影象颗粒度的控制。灵敏度规定明确限定了底片必须达到的显示细节的要求。

技术级别的这些规定,从不同方面为底片影象质量达到一定要求提供了保证,在执行射线照相标准时应严格遵守。

2.2 技术级别规定的变化

不同的射线照相检验标准对技术级别的规定存在一些差异,个别方面可能有很大的差别。

在 30 多 a(年)的时间里,一些规定的内容发生了变化,主要变化如下:

2.2.1 提高了小厚度工件允许的最高透照电压

对 < 400kV 的 X 射线, 有关允许使用的最高透照电压的规定在 30a 中发生了较大变化。最初, 没有比较明确的规定, 普遍认为应采用较低的透照电压, 如英国 BS 4080—1966 标准规定, 如果曝光量 < 4mA · m in, 则说明透照电压过高, ISO 标准的提法是, 透照电压应尽可能低, 在焦距为 760mm, 曝光时间 1m in, 所选用的透照电压应使曝光量 A 级 8mA · m in, B 级 15mA · m in 时得到适宜的黑度值。约从 70 年代起, DN, BS 和 ISO 等标准相继规定了具体的最高透照电压。BS 标准对不同的胶片, 即不同的射线照相技术级别, 规定了不同的最高透照电压值, 而其它标准则未分别作规定。我国标准从 80 年代起采纳了 DN 或 ISO 标准的有关条款, 作了这方面的规定。日本工业标准 (JIS) 至今仍未直接对这方面作出规定。

由于不同类型胶片的感光速度存在明显差别, 所以, 适宜于一种类型胶片的透照电压不一定适宜于另一种类型胶片, 如对 D7 胶片适宜的透照电压对 D4 胶片将显得较低, 或者说, 后者需要过长的曝光时间。因此, 对不同射线照相技术级别规定统一的最高透照电压是存在问题的。英国标准对不同级别技术规定不同最高透照电压, 具有实际意义。

DN 54111—1—1988 标准除了为钢, 还为钛和铝给出了最高透照电压, 并提高了旧版本标准对厚度 < 10mm 钢规定的最高透照电压值, 这个改变反映了实践经验。ISO 标准第 1 版和我国标准对透照厚度 < 10mm 时最高透照电压的规定值, 与实际可允许的值存在一定的距离。一般说, 各标准对 < 400kV 的 X 射线规定的最高透照电压值, 都高于实际采用值, 特别对采用 GIII 类胶片的 A 级技术。

2.2.2 改变了焦距最小值的规定方式

在射线照相标准中, 关于射线照相技术透照参数之一的焦距, 如归结为对几何不清晰度的考虑, 多数标准的规定大体上都经历了三个阶段, 即按技术级别规定允许的最大几何不清晰度值。对技术级别, 按透照厚度分段规定允许的最大几何不清晰度值。对技术级别, 按透照厚度 (连续) 规定允许的最大几何不清晰度值。第一种规定方式对较小的透照厚度, 规定的最大几何不清晰度值偏大; 对较大的透照厚度, 规定的最大几何不清晰度值偏小, 在技术上存在明显的不合理性。第二种规定方式希望克服第一种规定方式存在的不足, 却引入了一种阶跃式的变化。这些阶跃值点存在的合理性很难得到合理解释。第三种规定方式消除了前两种规定方式存在的不足, 间接地将射线照相时的能量与焦距 (几何

条件) 联系起来, 使透照参数在一定程度上构成内在的和谐性。但目前广泛采用的系数值 (对 A 级 7.5 和对 B 级 15), 对钢铁材料可能适宜, 对其它材料, 特别是轻金属材料, 可能并不适宜, 因为在同样透照厚度的情况下, 轻金属材料所需的透照电压 (射线能量) 将远低于钢铁材料。

约从 70 年代起, 英国射线照相标准明确提出, 应从确立胶片固有不清晰度与几何不清晰度的关系规定焦距值。近年来有文献强调了这种观点, 结论是不同级别的射线照相技术, 应按下列关系考虑焦距最小值 (胶片固有不清晰度 U_i)

一般灵敏度技术: $U_g = 2U_i$

较高灵敏度技术: $U_g = U_i$

很高灵敏度技术: $U_g = 0.5U_i$

或者说

A 级技术: $U_g = (1 \sim 2)U_i$

B 级技术: $U_g = (0.5 \sim 1)U_i$

这种关系直接将透照参数的射线能量和焦距联系起来, 构成透照参数自身的和谐性, 它克服了第三种规定方式不适用于各种材料的不足。应用中可能产生的问题是, 对轻金属材料, 当透照厚度较小时可能要求较大的焦距值, 这是应进一步考虑的问题。

约从 80 年代起, 日本工业标准采用了以规定系数 m 的方式规定焦距最小值, 即

$$m = \frac{L_1}{L_2}$$

近年来, 这个系数的具体规定方式, 随着象质计灵敏度规定方式的改变而发生了变化。最初, 按透照厚度分段规定相应的系数值, 稍后, 改用按焦点和应识别丝径关系的形式规定这个系数。

2.2.3 曝光量

如前所述, 曝光量是射线照相技术级别中难以严格规定的透照参数, 特别是对 < 400kV 的 X 射线。60 年代曾提出的曝光量值有

BS 4080—1966: $E = 4\text{mA} \cdot \text{m in}$

ISO 标准: A 级 $E = 8\text{mA} \cdot \text{m in}$

B 级 $E = 15\text{mA} \cdot \text{m in}$

70 年代, 英国标准推荐了下列曝光量值

方法 1 (很高灵敏度技术): $E = 30\text{mA} \cdot \text{m in}$

方法 2 (较高灵敏度技术): $E = 20\text{mA} \cdot \text{m in}$

方法 3 (一般灵敏度技术): $E = 15\text{mA} \cdot \text{m in}$

我国标准多推荐或规定曝光量 $15\text{mA} \cdot \text{m in}$ 。

2.2.4 提高了底片允许黑度的下限值

限定射线照片的黑度范围, 是射线照相技术级别规定中的一项重要规定。60 年代以来, 一直射

线照相技术级别分别规定黑度范围。近年来,一些原来黑度值规定较低的标准,都在提高原规定黑度值,特别是允许的黑度下限值。表 6-2 是我国部分射线照相标准的黑度规定值。黑度值的提高是为了有效控制射线照片对比度和影象颗粒度。

表 6-2 我国部分射线照相标准的黑度规定值

技术级别	JB 928—67	GB 3323—82	GB 3323—87
A (乙)	0.7~1.5	1.2~3.0	1.2~3.5
B (甲)	1.0~2.0	1.2~3.0	1.5~3.5

2.2.5 技术级别规定变化概述

射线照相标准关于射线照相技术级别的规定,在 30 多年的时间里作了多方面的修改,概括起来可认为:

(1) 工业射线胶片初步分为四类, A 级技术最低应选用 G III 类胶片, B 级技术最低应选用 G II 类胶片。对射线胶片的分类,还在进行研究。最初允许使用的荧光增感屏,约从 80 年代起,已被大多数标准严格禁止使用,现在普遍规定使用金属箔增感屏。

(2) 关于透照参数,射线照相标准主要是围绕低能 X 射线,即 40~400kV X 射线规定技术内容。对钢铁、钛和铝等材料已提出了允许的最高透照电压,但还缺少不同射线照相技术级别普遍公认的限定值规定。将能量条件与几何条件联系起来考虑,对钢铁材料提出了实用的最小焦距规定,对其它材料尚需进行较深入的研究。对曝光量已提出了一些推荐值,但它仍然是一个难以严格规定的参数。对 < 40kV 的低能射线照相技术,目前尚无严格规范。

(3) 射线照片质量的两个重要方面,即黑度和象质计灵敏度,已趋向统一。允许的黑度范围下限值基本上是 A 级: 1.7~2.0; B 级: 2.0~2.3。象质计灵敏度广泛采用丝型象质计测定,而且以按透照厚度分段规定应识别丝径的方式规定灵敏度。丝型象质计主要反映的是射线照相的对比度。已从理论和试验上研究了它与其它细节(如柱孔、球孔和矩形缝等)的可识别性关系,即不同象质计灵敏度的关系。

可以说,关于射线照相技术级别的规定已取得了成功的结果,但仍有一些问题需进一步研究。

3 射线照相方法标准的选用

如上所述,限定了所采用的射线照相检验技术,就限定了能够得到的射线照片的质量,也就限定了射线照相检验的结果。因此,为了满足验收技术条件的要求,必须正确选取射线照相方法标准。在工件的

技术条件中一般都会明确规定应采用的射线照相方法标准和射线照相检验技术级别,但也会出现未明确规定的情况,这时应分析工件技术条件中关于内部质量的规定,并以其必须检出的最小缺陷为依据,仔细考虑影响工件质量的关键,确定应采用的射线照相方法标准和射线照相检验技术级别,保证须检出的最小缺陷能够有效检出。

4 射线照相检验质量控制

4.1 概念

质量在不同领域和不同部门具有不同的含义。在一般情况下其抽象为“反映实体满足明确和隐含需要的能力的特性的总和”。这里所说的“实体”被定义为“可单独描述和研究的事物”,它可以是活动或过程、产品、组织、体系或人,以及它们的组合。

射线照相检验是射线照相检验人员利用一定的设施、设备、器材和检验技术得出射线照相检验结论的过程。射线照相检验质量具体体现在射线照片(底片)质量和评定结论的可信性两个方面。没有稳定的过程就没有稳定的质量,为保证射线照相检验结论的正确性和可靠性,必须对射线照相检验进行质量控制。

按质量管理和质量保证系列国家标准,质量管理、质量保证和质量控制不是同一概念。质量管理定义为“确定质量方针、目标和职责,并在质量体系中通过诸如质量策划、质量控制、质量保证和质量改进使其实施的全部管理职能的所有活动”;质量保证定义为“为了提供足够高的表明实体能够满足质量要求的可信度,而在质量体系中实施并根据需要进行证实的全部有计划和有系统的活动”;质量控制定义为“为达到质量要求所采取的作业技术和活动”。图 6-2 是质量体系的构成框图,它清楚地显示了质量管理、质量保证和质量控制与质量体系的关系,从中可以看到,质量管理的职能是负责确定并实施质量方针、目标和职责,它包括了质量控制。质量控制中的“作业技术和活动”的目的是监视产品形成的全过程并排除可能出现的质量问题。

射线照相检验质量控制,就是从人员、检验技术、设备器材和环境条件等方面进行控制,以保证射线照相检验质量。

4.2 射线照相检验人员控制

为保证射线照相检验过程处于稳定的受控状态,从事射线照相检验的人员必须按无损检测人员资格鉴定与认证标准的规定进行培训和考核,取得技术资格证书后才能从事与技术资格相应的工作。

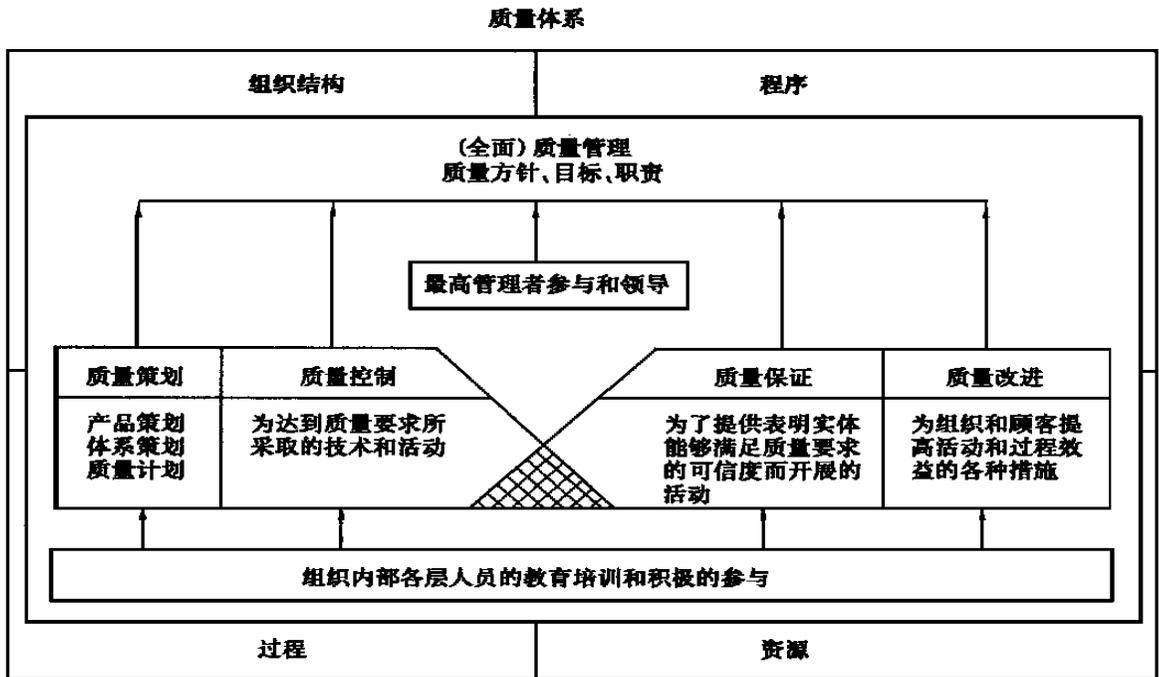


图 6-2 质量体系的构成

为取得技术资格,有关人员必须具备一定的实践经历,并接受有关基础知识、专业知识、相关知识和操作技能的培训,然后通过考核及答辩。

4.3 射线照相检验技术控制

射线照相检验技术控制一般应包括下列方面。

4.3.1 编制射线照相检验操作通用规程

为了使射线照相检验技术处于稳定的控制状态,从事射线照相检验工作的单位应依据工业系统的有关标准编制射线照相检验操作通用规程,该规程对射线照相检验技术的共同环节作出通用性规定,它至少应包括射线照相检验的基本流程与人员职责。曝光曲线的制作、使用与修正规定。射线照相检验工艺(技术)卡编制的规定。透照过程操作的要求。暗室处理操作的要求。评片操作的要求。检验记录与报告签发的规定。技术资料存档的规定。这些内容当然可分别编成一些独立的规程。

4.3.2 射线照相检验工艺(技术)卡

射线照相检验工艺(技术)卡是对具体工件进行射线照相检验的技术依据,通过工艺卡文件可实现对射线照相检验具体技术状态的控制。因此,在对具体工件进行射线照相检验之前,应按射线照相检验操作通用规程的规定和工件技术条件规定的 X 射线照相检验标准的要求,编制射线照相检验工艺(技术)卡。射线照相检验工艺(技术)卡至少应包括以下四方面的内容:

- (1) 工件 名称、材料牌号、透照部位和厚度。
- (2) X 射线照相检验技术 标准、技术级别、透照布置、透照参数、设备与器材。
- (3) 质量要求 底片黑度、底片灵敏度和质量验收标准。
- (4) 签署 编制和审核。

4.3.3 工艺稳定性控制

工艺稳定性控制主要包括曝光曲线的定期修正、射线机性能的定期测定和溶液有效性试验。这些可能包括在通用操作规程中,它们监控着射线检验工艺中一些变化的因素。

4.3.4 新技术、新方法和新配方使用的控制

射线照相检验中采用新技术、新方法和新配方时,需经充分试验验证,并经主管部门批准后方可投入使用。较重大的技术改变,应经必要的试用期和专家评审,才能正式采用。

4.4 设备与器材的控制

控制射线照相检验所用设备和器材质量,是保证射线照相检验质量非常重要的环节。设备器材质量控制须包括六个方面: 所用设备器材应满足采用的射线照相检验标准要求。所用主要设备和器材,如射线机、胶片、观片灯、黑(密)度计、自动洗片机和象质计等,在入厂时应有合格证或有关的合格证明材料。射线机和自动洗片机应建立使用登记制度。X 射线机的辐射强度、辐射角和有效焦点尺寸等主要性能应定期测定。胶片应建立入厂抽

验、使用和保管制度。黑(密)度计应建立定期校验制度。

这样可使射线照相检验中所使用的设备和器材处于有效、受控状态。

4.5 射线照相检验试验室的控制

射线照相检验必须在一定的设施条件和环境下进行,才可能得到符合质量要求的结论。从事射线照相检验基本单位的射线照相检验试验室必须满足一定的条件,才可能进行达到质量要求的射线照相检验工作。射线照相检验试验室的最低控制要求为:

至少应有独立的射线机房、控制室和暗室,一般应有独立的评片室。射线机房的防护设计应符合 GB 8703 或 GB 4792 标准的有关规定,应有适于工作的面积和通风及冷却设备,还应根据工作需要安装必要的吊装设备。暗室温度和湿度应可控制在适当范围,应安装通风设备和安全红灯。采用手工处理时显影处理部分应安装定时及温控装置。评片室的光线、照度和环境噪声应满足评片要求,温度应可控制在适当范围。进行现场射线照相检验时,应有辐射测量计,以便确定辐照安全区。具有所执行射线照相检验标准规定的设备和器材,至少应有 X 射线机、胶片、观片灯、黑(密)度计、象质计、暗室的必要设备、铅标记及必要的工装设备。具有射线照相检验技术 II 级或 III 级资格的人员总数应不少于两名。编制出射线照相检验操作规程、检验记录与报告等,备有执行的射线照相检验标准和有关技术条件等。

收稿日期: 2000-01-28

(上接第 277 页)

评定区,每张底片在各自有效评定区内以对应的焊缝厚度进行评定。当评定第 II 和第 III 次透照的底片时,要与前次底片组对照,以分清缺陷所在的焊层。特别要区分出耐蚀层焊接缺陷,必须保证其它焊层的缺陷不得误判为耐蚀层缺陷,否则将造成不可挽回的质量事故和重大经济损失。

整个焊道焊满后共分四层透照,每一检验部位的一套底片至少有七张,若有超标缺陷,返修复探可达十几张底片。

4 结束语

(1) 同型多胶片多增感方法利用不同厚度铅增感屏与多张胶片的组合与排列,可提高一次透照的厚度宽容度,保证了大厚度差双槽型焊缝的透照质量,从而满足了尿素合成塔环焊缝分层进行射线探伤和分层控制焊接质量的特殊要求。

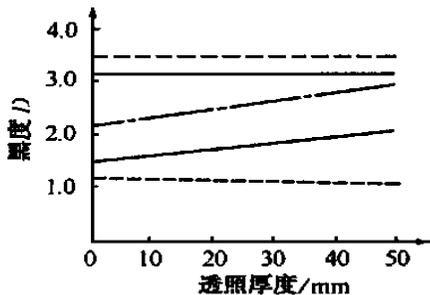
(2) 同型多胶片多增感射线检测技术,在多层包扎厚壁压力容器的焊接质量控制及大厚度差工件的射线检测中具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- 1 美国无损检测学会编,《美国无损检测手册》译审委员会译 美国无损检测手册·射线卷 上海:世界图书出版公司,1992
- 2 日本无损检测协会编,李衍译 射线探伤 B. 北京:机械工业出版社,1988
- 3 刘德镇主编 现代射线检测技术 北京:中国标准出版社,1999

收稿日期: 2000-01-10

(上接第 264 页)



附图 钛合金焊缝 X 射线照相黑度选择范围

- - - 标准规定的黑度范围 ——— 试验确定的黑度范围
 最佳黑度值

足象质指数要求,即不一定能辨别出焊缝中的缺陷。

只有当 X 射线底片黑度缩小在一个比标准规定更窄的范围内时,才能解决这一问题。本文通过试验推出的附图,直观地表明了不同厚度的钛合金焊缝射线照相时可选择黑度范围以及最佳黑度,即黑度 D 应控制在附图中实线所包容的范围内,其黑度愈接近最佳黑度值愈好。这对各种厚度的钛合金焊缝探伤提供了很有实用价值的指南。

参 考 文 献

- 1 日本无损检测协会编,李衍译 射线探伤 B. 北京:机械工业出版社,1988 27, 28, 72, 73, 84

收稿日期: 1999-08-23

第七讲 射线实时成象检验技术

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

REAL-TIME IMAGING RADIOGRAPHY

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 概述

射线实时成象检验技术是随着成象物体的变动图象迅速改变的电子学成象方法,它与胶片射线照相检验技术几乎是同时发展的。

早期的射线实时成象检验系统是X射线荧光检验系统,它采用荧光屏将X射线照相的强度分布转换为可见光图象。50年代左右引入了电视系统,通过电视摄像,在监视器上观察图象。由于存在图象亮度低(仅为 $0.3 \times 10^{-3} \text{cd/m}^2$ 左右)、颗粒粗、对比度梯度低等缺点,荧光屏图象的细节和灵敏度都低于胶片图象,观察这种图象需30min的眼睛暗适应时间,这限制了该技术的实际应用。这种系统主要用于轻合金铸件、薄焊缝和包裹等的检验。50年代初研制了图象增强器,早期图象增强器的亮度增益为1200~1500,而现代图象增强器的亮度增益高达10000以上,并具有良好的分辨力。这样,输出屏上的图象亮度可达 $0.3 \times 10^3 \text{cd/m}^2$,极大地促进了射线实时成象检验技术的工业应用。70年代以后,其它技术的发展导致射线实时成象检验技术也产生了很大改进,主要包括改进图象增强器主屏的材料。研制适应高能(可达10MeV)的图象增强器。

引入数字图象处理技术。应用微(小)焦点X射线机,采用投影放大射线照相技术。这些改进使射线实时成象检验技术取得了明显的进展,在中等厚度范围内,其象质计灵敏度已可接近胶片射线照相的水平。

与图象增强器同时发展的是直接对X射线敏感的X射线电视摄像管。由于它们需要较高的X射线通量,因此该技术只局限于检验低密度的电子组件、印制电路板及类似的应用。低亮度电视摄像管

(LLLTV)、分流直象管、正析摄像管和二次电子传导光导摄像管等的研制以及新的低噪声视频电路的出现,使电视摄像管可用以直接扫描常规的高分辨力荧光屏。近年来研究了数字实时成象检验系统,使用闪烁检测器和荧光-光电倍增器或扇形检测器阵列拾取信号。直接数字化提高了数据的信噪比,并可给出适宜电子成象过程,进行图象增强处理和储存的信息,图象的动态范围可达 $1 \times 10^8:1$ 。这种技术可检验厚度差或密度差很大的物体。

2 射线实时成象检验系统

2.1 射线实时成象检验系统简介

已经研制的射线实时成象检验系统,按射线转换的基本过程可分为两种基本类型,即射线可见光、射线-电子。然后,再经过后续转换过程形成图象信号。

第一类系统采用荧光物质和闪烁晶体,将射线直接转换为可见光。常用的荧光物质是硫化锌镉、硫化钆、溴化镧和硫化锌等;常用的闪烁晶体是碘化钠、碘化铯、锗酸铋、钨酸钙和钨酸镉等。荧光和闪烁是同一物理现象,荧光是指在射线激发停止后,发光持续时间 $< 10^{-8} \text{s}$ 的发光过程;闪烁是指单个高能粒子在荧光体上激发的瞬时闪光脉冲。荧光屏受到颗粒尺寸和分辨力的限制,厚度比较小。与荧光屏相比,闪烁体对射线具有更高的吸收能力,也具有更高的分辨力。表7-1和7-2分别列出了一些荧光物质和闪烁晶体的主要性质。

第二类射线实时成象检验系统利用具有足够能量的射线量子与物质相互作用时释放的光电子,改变半导体或半导体结的电阻,形成相应于辐照射线通量分布的电导,采用扫描电子束可以将其转换为

表 7-1 荧光物质的主要性能

名称	分子式	密度 g/cm ³	峰值发射波长 nm	衰减常数 ns
硫化锌镉	ZnCdS (A g, N i)	4.5	550	85
硫氧化钷	Gd ₂ O ₂ S (Tb)	7.3	544	480 000
溴氧化镧	LaOBr	-	460	-
硫化锌	ZnS (A g, N i)	4.1	450	60

表 7-2 闪烁晶体的主要性能

名称	分子式	密度 g/cm ³	转换效率 ¹⁾ %	衰减常数 ²⁾ μs	余辉(3m s) %
碘化钠	NaI(Tl)	3.67	100	0.23	0.5~5
碘化铯	CsI(Tl)	4.51	45	1.0	0.5~5
锗酸铋	BGO	7.13	8	0.3	0.005
钨酸钙	CaWO ₄	6.12	50	0.5~20	1~5
钨酸镧	LaWO ₄	7.90	65	0.5~20	0.0005

注: 1) 碘化钠将 X 射线转换为光的效率约为 15%, 以它的转换效率为 100% 给出相对转换效率。 2) 信号衰减到最大强度的 37% 所用时间。

视频信号。经常使用的对 X 射线敏感的光电导材料是三硫化二锑、碲化锌镉、硒化钨、氧化钨、硫化钨和硅等。部分材料的主要性能见表 7-3。

表 7-3 光电导材料的主要性能

名称	分子式	灵敏度 μA/lm	暗电流 nA	惰性 ¹⁾ ms	信号电流 μA
氧化铅	PbO	400	< 1	1~2	0.2
硒化钨	CdSe	1500	1	10~20	0.2
三硫化二锑	Sb ₂ S ₃	250	10~20	15~25	0.2
碲化锌镉	ZnCdTe	5000	6	20	0.2

注: 1) 光照后信号出现所需时间。

采用不同的转换过程可以构成不同的射线实时成像检验系统, 表 7-4 比较了主要射线实时成像检验系统的性能。

2.2 工业射线实时成像检验系统

表 7-4 主要射线实时成像检验系统性能比较

系 统	分辨力/L _p · mm ⁻¹	对比灵敏度/%	适宜能量/kV	最佳能量/kV	对 X 射线敏感性	使用寿命/a(年)
荧光屏	4.5	2	25~300	120	低	10
X 射线闪烁晶体	10	1	25~10 ³	200	中	未定
X 射线图象增强器	5	2	5~10 ³	100	高	3
半导体检测器阵列	20	10	20~150	100	中	未定
敏 X 射线光导摄像管	20	5	20~250	75	低	5

图 7-1 是目前在工业中应用的由图象增强器构成的射线实时成像检验系统。

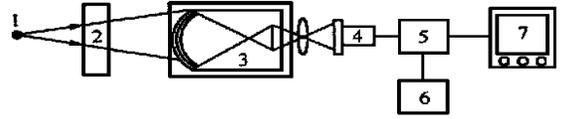


图 7-1 典型工业射线实时成像检验系统

- 1. 射线源 2. 工件与机械驱动系统 3. 图象增强器
- 4. 摄像管 5. 图象处理器 6. 计算机 7. 显示器

与早期的射线实时成像系统比较, 工业射线实时成像检验系统的主要特点是 采用图象增强器代替简单的荧光屏, 实现图象转换。采用微焦点或小焦点射线源, 以投影放大方式进行射线照相。引入图象处理技术, 改进图象质量。

图象增强器是射线实时成像检验系统的核心器件之一, 其基本结构如图 7-2 所示, 它由外壳、射线窗口、输入屏、聚焦电极和输出屏构成。射线窗口由钛板构成, 它既有一定的强度, 又可以减少对射线的吸收。输入屏包括输入转换屏和光电层。输入转换屏不同于简单的荧光屏, 现在它主要采用 CsI 晶体制作, 其发射的可见光处于蓝色和紫外谱范围, 以与光电层的谱灵敏度相匹配; 为了吸收更多的射线, 采用了特殊的设计, 如柱轴沿射线束方向排列的柱状晶体。它吸收入射射线, 将其能量转换为可见光发

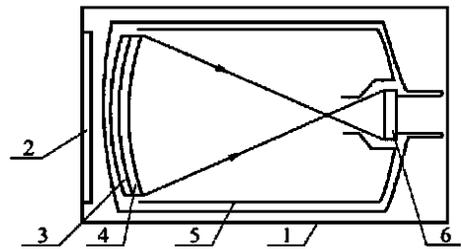


图 7-2 图象增强器结构示意图

- 1. 外壳 2. 射线窗口 3. 输入转换屏
- 4. 光电层 5. 聚焦电极 6. 输出屏

射。光电层将可见光能量转换为电子发射。聚焦电极加有 25~ 30kV 的高压, 加速电子, 并将其聚集到输出屏。输出屏将电子能量转换为可见光发射。在图象增强器中实现从射线 可见光 电子 可见光的转换过程。

经过图象增强器所得到的可见光图象, 其亮度比简单的荧光屏图象可提高约 30~ 10 000 倍。图象增强器动态范围的典型值为 2 000 : 1, 中心分辨力典型值为 40~ 60lp/cm。

图象增强器输出屏上的可见光图象由摄像管拾取, 经 A/D 转换后送入图象处理器进行图象增强处理, 改善图象质量, 处理后的图象送入监视器显示。

3 射线实时成象检验系统的图象和性能

3.1 射线实时成象检验系统的图象

射线实时成象检验系统得到的图象是电视系统的扫描光栅图象, 在显示器上观察到的图象由一系列小图象单元——象素构成, 一幅图象按设定的扫描形式可划分为不同数目的象素。如图象占 512 个扫描行, 每行含有 512 个象素时, 则该图象由 512 × 512 个象素构成。每个象素的亮度可数字化为不同的级别, 如用八位二进制数表示 (8bit), 由于 $2^8 = 256$, 则亮度可分为 256 个级别。象素的多少和亮度级别的数目直接相关于图象可能给出的对比度和清晰度。

对比度是物体对射线衰减的直接结果, 基于射线的衰减规律导出的物体对比度为

$$\frac{\Delta I}{I} = - \frac{\mu \Delta T}{1 + n}$$

式中 I ——射线强度

μ ——射线的线衰减系数

n ——散射比

荧光屏亮度 B 与射线强度 I 的关系一般可写为

$$B = m I$$

式中 B ——荧光屏亮度

m ——比例系数

这样, 相应的亮度对比度为

$$\frac{\Delta B}{B} = - \frac{\mu \Delta T}{1 + n}$$

在显示器上所观察到的图象对比度 C 与亮度对比度的关系为

$$C = \gamma \frac{\Delta B}{B}$$

式中 γ ——实时系统的灰度系数

灰度系数定义为输出屏图象亮度对比度与入射射线强度对比度的比值。实时系统的灰度系数是系统各

个成象单元的综合结果, 近似有 $\gamma = 1.0$ 。

影响图象清晰度的因素主要是几何不清晰度和屏的固有不清晰度。

在射线实时成象检验技术中, 一般采用放大透照布置 (图 7-3)。在成象平面 (图象增强器输入屏) 得到的缺陷图象将产生一定程度的放大, 放大的程度取决于所选射线源至工件距离和射线源至成象平面距离。放大倍数 M 定义为

$$M = \frac{F}{f}$$

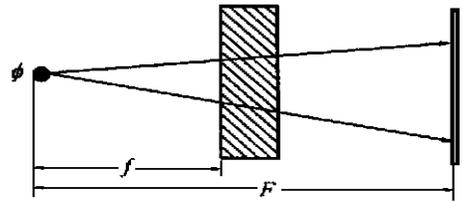


图 7-3 射线实时成象检验的透照布置

由此可导出几何不清晰度 U_g 为

$$U_g = \phi M^{-1} \quad (1)$$

式中 ϕ ——射线源的焦点尺寸

可见, 几何不清晰度除了与焦点尺寸有关外, 还与所选放大倍数有关。荧光屏的固有不清晰度取决于荧光物质的性质和颗粒、荧光屏的厚度和结构, 也与射线能量有关。某一种荧光屏可认为具有固定的不清晰度。总的模糊度由几何不清晰度和屏的固有模糊度决定, 一般写为

$$U_t^3 = U_g^3 + U_s^3$$

如果在工件的移动过程中观测, 则还必须考虑运动不清晰度。

射线实时成象检验系统的图象常可达到较高的对比度, 但不能达到较好的清晰度。

射线实时成象检验系统图象质量的主要指标是空间分辨力 (简称分辨力、分辨率) 和对比灵敏度。它也是射线实时成象检验系统综合性能的主要指标。

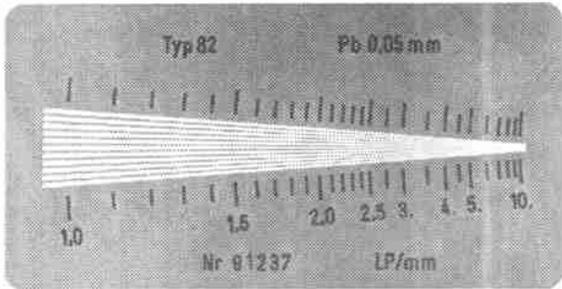
3.2 图象的分辨力

分辨力是分析任何成象方法、成象系统和所得图象时经常使用到的概念, 它表示成象系统所得图象识别细节的能力, 限定了所能揭示的、处于与射线束垂直平面内缺陷的最小尺寸。对射线实时成象检验系统, ASTM E1411 和 E1647 标准规定采用 BS 3971 标准的双丝象质计或线对测试卡, 测定射线实时成象检验系统或其图象的空间分辨力。

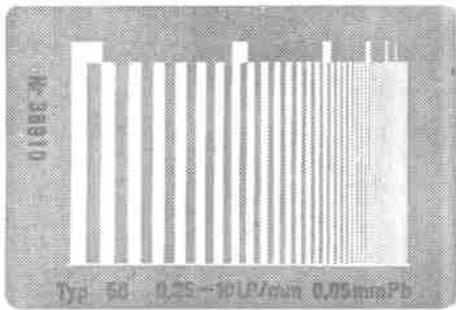
采用线对测试卡测量空间分辨力时, 分辨力值用线对/毫米或线对/厘米表示。线对测试卡的典型

形式如图 7-4 所示, 它由高密度材料(常用铅箔)的栅条和间距形成占空比为 1:1 的线对图样, 密封在低密度材料(常用透明塑料薄板)中构成。塑料厚度约 1mm, 铅箔厚度等于最窄栅条的宽度。所得到的分辨力值表示测定时刚刚不能区分为栅条和空间间隔所对应的线对值。图 7-4a 所示线对测试卡使用方便, 可直接读出分辨力值。图 7-4b 所示线对测试卡应按线对上方的方块标记数出刚刚不能区分线对的顺序位置, 然后查表得到相应的分辨力值, 表 7-5 列出了对应的分辨力值。如测定时刚刚不能区分出的线对的位置是第三标记后的第五线对, 从表 7-5 中查到对应的分辨力值为 1.6lp/mm。

当用 BS 3971 的双丝象质计测定空间分辨力时,



(a)



(b)

图 7-4 线对测试卡的两种形式

表 7-5 Typ 56 线对测试卡的分辨力值 lp/mm

标记号 ¹⁾	标记线对的分辨力值	后续线对的分辨力值
1	0.25	0.275, 0.30, 0.33, 0.36, 0.40, 0.44
2	0.48	0.52, 0.57, 0.63, 0.69, 0.76, 0.83, 0.91
3	1.00	1.1, 1.2, 1.3, 1.45, 1.6, 1.75, 1.9
4	2.10	2.3, 2.5, 2.75, 3.0, 3.3, 3.6
5	4.00	4.4, 4.8, 5.2, 5.7, 6.3, 6.9, 7.6, 8.3, 9.1
6	10.00	9.1, 8.3, 7.6, 6.9, 6.3, 5.7, 5.2

注: 1) 标记为线对测试卡中线对上方的方块, 标记号按图中从左至右顺序为 1, 2, ...。

可用不清晰度表示空间分辨力, 不清晰度等于可识别的最细丝径的两倍。对应的线对值为不清晰度值的倒数。

3.3 图象的对比灵敏度

对比灵敏度限定了所能揭示的沿射线束方向缺陷的最小尺寸, 通常表示为射线束在材料中穿过路径长度的百分数。ASTM E1647 标准规定, 对比灵敏度采用对比灵敏度计测定。

对比灵敏度计如图 7-5 所示, 有关尺寸和适用范围见表 7-6。从图 7-5 可见, 对比灵敏度计上有四个平底方孔, 其深度分别为对比灵敏度计厚度的 1%, 2%, 3% 和 4%。测定时, 由能可靠重复成像的最浅平底方孔确定对比灵敏度值。对其它对比灵敏度测量值, 可使用垫块, 此时对比灵敏度为

$$C = \frac{R}{T + S} \times 100\%$$

式中 T ——对比灵敏度计的厚度

R ——平底方孔深度

S ——垫块厚度

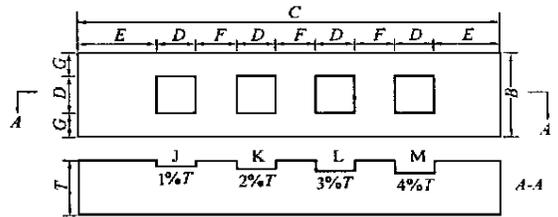


图 7-5 对比灵敏度计

表 7-6 各对比灵敏度计尺寸和适用厚度 mm

编号	B	C	D	E	F, G	适用厚度范围
1	19.05	76.20	6.35	15.88	6.35	38.1
2	38.10	152.40	12.70	31.75	12.70	38.1~76.2
3	57.15	288.60	19.05	47.63	19.05	76.2~152.4
4	76.20	304.80	25.40	63.50	25.40	>152.4

对比灵敏度计的厚度 T 与被检物体厚度之差应在 $\pm 5\%$ 之内, 厚度 T 的偏差应不大于设计厚度的 $\pm 1\%$ 。平底方孔深度的偏差应不大于设计的最浅平底方孔深度的 $\pm 10\%$ 。表 7-6 中关于对比灵敏度计的尺寸偏差, 应保持在 0.25mm 之内。

对比灵敏度计的材料原则上应与被检物体材料相同。在 ASTM E1647 标准中, 按材料对射线的吸收特性, 将常用材料分为八组, 分别给以编号。

当没有适宜的材料制作对比灵敏度计时, 可采用代用材料制作。但代用材料应满足下列要求, 即采用较低能量射线在一张胶片上同时透照代用材料和

被检材料,底片黑度应在 2.0~4.0 范围内,代用材料与被检材料处的黑度差应为被检材料处黑度的 0%~15%。

3.4 射线实时成像检验系统性能的鉴定

随着射线实时成像检验系统工作条件和检验对象的变化,空间分辨力和对比灵敏度将会不同。因此,测定应在尽可能接近实际检验的条件下进行,即射线能量、图象形成条件以及图象处理、显示和观察等都应接近实际检验条件。

对于一个射线实时成像检验系统,ASTM E1255, E1411, E1416 和 E1734 等标准规定,按其成象质量,系统的性能可用下述方式表示:

$$(1) C-U \text{ 或 } C_{\min}-C_{\max}-U$$

$$(2) C-B \text{ 或 } C_{\min}-C_{\max}-B$$

其中 C ——对比灵敏度, %

U ——不清晰度, mm

C_{\min} ——最小厚度可达对比灵敏度, %

C_{\max} ——最大厚度可达对比灵敏度, %

B ——空间分辨力, L_p/mm

方式(1)第一部分表示能可靠重复成象的最浅平底方孔确定的对比灵敏度值,第二部分是指同时用双丝计测出的空间分辨力值,用不清晰度表示。当测出的对比灵敏度值是代表薄、厚两部分的特性时,应表示为 $C_{\min}-C_{\max}-U$ 。方式(2)与方式(1)的不同是用线对给出了空间分辨力。

为了保证检验结论的可靠性,必须对射线实时成像检验系统的性能进行鉴定,这种鉴定包括初始鉴定和使用中的定期核查。ASTM E1411 标准规定了鉴定的详细要求,主要是系统性能按空间分辨力和对比灵敏度进行鉴定。应对所检物体的最小和最大厚度进行鉴定。应对所使用的不同成象模式、射线源尺寸、成象几何条件和图象处理进行鉴定。未经图象处理的空间分辨力鉴定,应在图象转换器上不附加吸收体,在水平和垂直两个方向用铅箔线对测试卡进行,也应在检验物体位置不附加吸收体进行。未经图象处理的对比灵敏度鉴定,应在检验物体位置进行。全部鉴定测量在静态工作模式下进行。此外,系统性能至少还应使用一种标准化的射线照相象质计进行灵敏度测量,测量应对所检物体的最小和最大厚度以及未经处理和经处理的图象进行。

4 射线实时成像检验技术

4.1 射线实时成像检验技术的一般要求

按照国外一些标准的规定,射线实时成像检验

技术的一般要求主要包括射线实时成像检验系统性能要求和鉴定与监测方法。检验参数,主要是射线源的能量、强度、焦点和成象布置等。动态检验时的扫描面、扫描方位、扫描速度和移动范围等。图象处理参数,如降噪、对比度增强和空间滤波等。图象显示参数,如尺寸、颜色、亮度和对比度等。图象档案要求。检验人员资格。

4.2 射线实时成像检验技术的一些重要要求

射线实时成像检验的主要技术有许多方面与常规射线照相检验技术的考虑和要求相同,如正确选择射线能量(透照电压)和射线方向,严格控制散射射线以及滤波、象质计和标记的使用等。但射线实时成象检验一般都要经历从射线强度分布到可见光图象,从可见光图象到视频信号以及视频信号传送、转换、处理和显示的过程,不同过程对最终图象的质量具有不同程度影响。因此,射线实时成象检验技术也必须作出一些特殊的考虑。

4.2.1 最佳放大倍数

射线实时成象检验一般采用放大透照布置。一方面随着放大倍数的增大几何不清晰度将增大,这将导致整个射线照相不清晰度的增大;另一方面,随着放大倍数的增大,缺陷图象的尺寸也将放大,从识别缺陷图象所要求的对比度的角度,这将有利于细小缺陷图象的识别。这种情况决定了实时射线照相存在最佳放大倍数。设想成象平面处射线照相总的模糊度为工件处射线照相总的模糊度放大 M 倍的象,则最佳放大倍数应使工件处射线照相总的模糊度为最小值,由此,采用微分方法可求出最佳放大倍数 M_0 , 即

$$M_0 = 1 + \left[\frac{U_s}{\phi} \right]^{3/2}$$

式中 U_s ——转换屏的不清晰度

可见,最佳放大倍数由成象平面(荧光屏)的固有模糊度和射线源的尺寸决定。由于荧光屏的固有模糊度较大,所以使用常规焦点的射线源时,不可能采用较大的放大倍数。不同尺寸射线源可选用的放大倍数见表 7-7。

表 7-7 不同尺寸射线源可选用的放大倍数

射线源尺寸/mm	放大倍数 M	射线源尺寸/mm	放大倍数 M
1	1	0.1~0.4	6
0.4~1	2	0.01	100

4.2.2 扫描速度和定位精度

动态检验时除了按规定选取扫描面、扫描方位和移动范围等外,还须正确选取扫描速度,即检验时

工件相对于射线源的移动速度。它直接相关于图象的噪声, 所能采用的扫描速度与射线源强度相关。射线源的强度高时, 图象增强器在单位时间接收的成象量子数多, 图象噪声可降低, 扫描速度可高些。静态检验时, 机械驱动装置必须具有一定的定位精度, 一般要求定位误差 10mm。在连续检验过程中应注意累积的定位偏差, 并作出修正。

4.2.3 图象处理

射线实时成象检验广泛采用了数字图象处理技术, 对图象进行数字化编码处理, 把图象从连续信号转换为离散数字进行图象增强、恢复和重建等, 根据图象质量的一般性质, 选择性地加强图象的某些信息, 抑制另一些信息, 改善图象质量。在射线实时成象检验技术中常用的数字图象增强方法有, 对比度增强、图象平滑(多帧平均法, 常称积分处理或降噪)、图象锐化和伪彩色等。对比度增强是一种简便但十分重要的图象增强技术, 它逐点修改输入图象每一象素的灰度, 扩大图象的灰度范围, 提高图象的对比度。当图象的噪声大时, 采用图象平滑处理, 降低图象的噪声水平, 提高信噪比。图象锐化是采用滤波、微分等处理, 突出图象的轮廓。眼睛可区分的色度达数千种, 但可区分的灰度级仅为 20 多级, 伪彩色处理是把灰度级转换为对应的彩色输出, 从而提高图象的可识别性。

4.2.4 系统性能核查

为了保证检验结果的可靠性和稳定性, 必须对系统的性能进行定期核查, 即对空间分辨力和对比灵敏度进行核查, 同时结合进行象质计灵敏度的核查。最好采用与被检工件类似并具有应检出缺陷的物体, 在实际检验条件下进行检验。核查的间隔应符合有关要求。采用象质计核查时, 象质计的选择、数目和放置应符合有关工业标准的规定。也可使用校验试块、线对卡和阶梯块等进行核查。

4.2.5 可检缺陷的最小尺寸

在射线实时成象检验的放大透照布置中, 当缺陷尺寸 d 小于焦点尺寸 ϕ 时, 在某个放大透照布置下缺陷的实象成为一个点, 这时有

$$\frac{d}{\phi} = \frac{E - f}{f}$$

改写此式, 按上述关系应有

$$M d = U_g$$

一般情况应是

$$M d \geq U_g \quad \text{或} \quad M d \geq U$$

即在射线实时成象检验中, 可观察到的最小缺陷尺寸由不清晰度决定。由上式可得

$$d = \frac{1}{M} \sqrt{\phi(M - 1)^2 + U_g^2}$$

4.3 焊件和铸件的射线实时成象检验技术

ASTM E1416 和 E1734 标准分别对焊件和铸件的射线实时成象检验技术作了规定, 其主要内容可归纳如下:

(1) 基本要求

(a) 从事焊件和铸件射线实时成象检验的人员应经资格鉴定与认证。

(b) 如果合同有要求, 从事焊件和铸件射线实时成象检验的机构应进行资格鉴定与认证。

(c) 应编写出书面的检验程序文件, 按此文件实施检验。

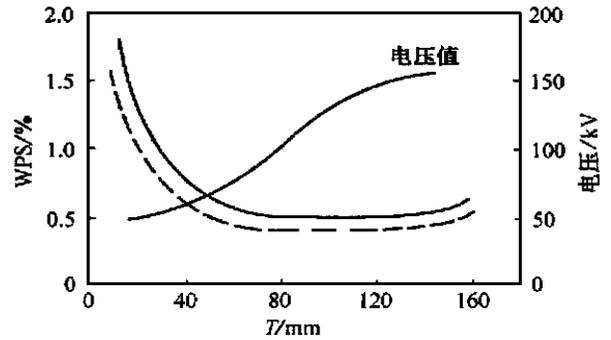
(2) 设备与装置

(a) 射线源的能量适于被检工件的材料和厚度, 稳定性适于图象质量要求。

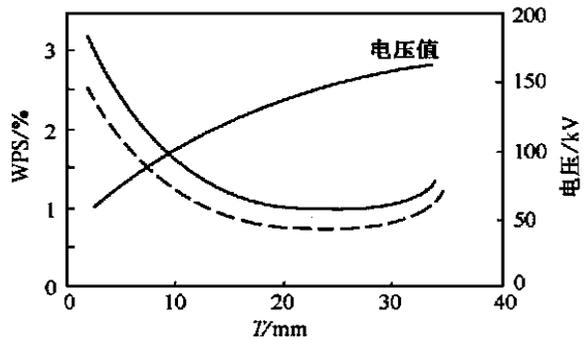
(b) 操作系统适合于被检工件的扫描和检验要求。

(c) 成象、图象处理和图象显示适于图象质量的要求。

(3) 主要技术要求



(a) 铝



(b) 铁

图 7-6 射线实时成象检验系统的灵敏度
——实时结果 —— 32 幅叠加处理结果

(下转第 336 页)

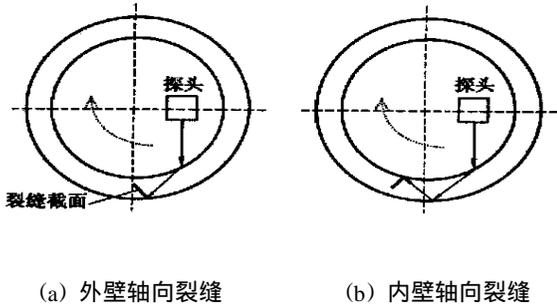


图 8 轴向裂缝检测

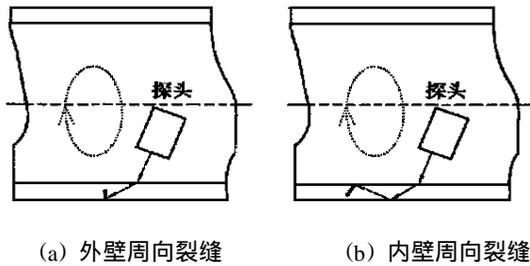


图 9 周向裂缝检测

轴线垂直, 检测时将探头轴线与管子轴线偏转一个角度, 这样超声信号以一定角度入射管壁内表面, 折射后也与裂缝方向垂直(或接近垂直)。同样也可采用直接反射法(图 9a)和二次反射法(图 9b)对外壁和内壁裂缝进行检测。探头绕管子轴线转动, 并沿轴线方向移动, 从而实现扫描式检查。检查结果经处理后可由计算机显示, 并按标准格式打印。

参 考 文 献

- 1 新日本非破坏检查株式会社 火力发电设备の非破坏检查新技术介绍资料 北九州, 日本, 1996
- 2 中国机械工程学会无损检测学会 无损检测概论 北京: 机械工业出版社, 1993
- 3 张俊哲等 无损检测技术及其应用 北京: 科学出版社, 1993

收稿日期: 1998-09-18

(上接第 333 页)

(a) 检验参数规定 射线源的能量与透射方向、成像几何、扫描、图象处理与显示参数。

(b) 辅助措施 射线束的准直与滤波、工件的遮蔽及其它控制散射线措施。

(c) 质量控制 采用象质计(E747, E1025)显示图象质量, 象质计的选择、数目和放置应符合标准的规定。

(d) 标记 图象应有定位标志和识别标志。

(4) 系统性能鉴定与监测

(上接第 309 页)

的检测, 并进行了解剖, 结果表明误差基本上能控制在 5~10mm 范围内。

我们在两个剥离间隙较小, 检测时又想分别标出边界的情况下, 在模拟试块和容器试块上作了一些尝试。在基体侧探测, 探头从剥离中心先向外移动时, 缺陷波明显下降, 底波出现并明显上升, 继续向外移动, 缺陷波没消失却又上升, 这样以底波最高时, 探头中心点左右各 5mm 定为两剥离边界的间隙距离。在堆焊层侧检测, 探头从剥离中心向外移动时, 缺陷波逐渐下降, 在波形尚未消失时(高度约为 10%~20%), 缺陷波又逐渐升高。此时以缺陷波最低时, 探头中心点左右各 5mm 作为两剥离边界的间隙距离。

经与实际解剖结果相比较, 剥离边界间隙在 8~15mm 时, 可以区分。

5 小 结

目前国内热壁加氢反应器越来越多, 制订一个氢剥离的在役检验行业标准是非常必要的。

(1) 合理选择有代表性的部位检测, 如温度、压力波动较大区域(如冷氢段), 内壁制造时返修较多部位, 停车降温时, 温度下降较快、厚度较小的封头处等作为检测重点, 视检测结果决定是否扩检。

(2) 外壁检验时最好在筒体上调节灵敏度, 否则会造成很大误差, 此误差主要是由标准试块与容器筒体晶粒度差异而造成。笔者在检验工作中还发现, 即使同一容器两个节之间也有差异, 这也是造成内、外壁检测结果不一致的主要原因之一。

(3) 为了使检测结果有一个可比性, 应使用同一型号探头、同一测长方法和同一灵敏度调节方法进行再检测。

收稿日期: 1999-12-02

系统的性能在检验前应进行鉴定, 在检验过程中应定期核查。

上述规定与要求可保证焊件和铸件射线实时成像检验结果的可靠性和稳定性。

图 7-6 给出的是射线实时成像检验系统在低电压下的丝型象质计灵敏度(WPS)一例, X 射线机的焦点尺寸为 0.3mm, 使用的是 178mm(7in) 图象增强器, 透照布置的放大倍数为 3。

收稿日期: 2000-01-28

第八讲 中子射线照相检验技术

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

NEUTRON RADIOGRAPHY

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 概述

1920年,英国著名物理学家卢瑟福提出,可能存在一种质量大体与质子相等的中性基本粒子。整个20年代,开文迪许实验室在卢瑟福的领导下,进行了大量寻找这种中性粒子的实验研究。1930年,德国物理学家波特(W. Bothe)和贝开尔(H. Becker)利用天然放射性元素发射的 α 粒子轰击铍、锂等时,发现了一种穿透力很强的辐射,他们认为这种辐射就是 γ 射线。许多人研究了这种辐射,发现把这种辐射认为是 γ 射线将出现不符合能量守恒定律的情况,并且测得在铅中的吸收系数只有 0.22cm^{-1} ,这个值远小于 γ 射线在铅中的吸收系数 0.46cm^{-1} 。多年研究中子问题的J. 查德威克进一步研究了这种辐射,发现这种辐射的电荷很小,可能为0,其质量与质子相近,命名其为中子。中子的发现是人类认识物质微观结构的重要里程碑。自由中子是不稳定的,存在的时间仅为 $10^{-9}\sim 10^{-6}\text{s}$,按 β 衰变理论估计,自由中子的半衰期约为 10.60min 。

早在1946年就有人利用小型加速器中子源研究中子射线照相技术。由于中子强度太弱,没有实用意义,直到1955年,英国J. Thewlis在Harwell中心利用BEPO反应堆,才成功地进行了第一次中子射线照相。60年代中期,由于放射性物质检验的需要,中子射线照相技术得到迅速的发展和应用。目前,在中子射线照相技术中广泛应用的是热中子射线照相技术,这主要是因为:

- (1) 不同元素或同位素的热中子质量吸收系数差异最大。
- (2) 热中子的检测比较容易。
- (3) 容易得到足够强度的热中子源。

与常规X和 γ 射线照相技术相比,中子射线照相技术的特点是:

- (1) 可以检验金属中的某些低原子序数物质。
- (2) 可以对放射性物质进行检验。
- (3) 可以区分同一元素的不同同位素。

中子射线照相技术的主要缺点是中子源价格昂贵,使用时需特别注意中子的安全与防护问题,这限制了中子射线照相技术的应用。中子射线照相技术是常规X和 γ 射线照相技术的补充,对一些特殊问题、特殊领域,如核工业,中子射线照相技术具有特殊的意义。

2 中子与物质的相互作用

中子是基本粒子之一,在本质上它与X射线和 γ 射线不同。X射线、 γ 射线和物质的相互作用,是它们的光量子与物质原子的电子或原子核的相互作用。中子与物质的相互作用是它与物质原子的原子核通过核力的相互作用,中子与电子之间通过磁相互作用,但这种作用远小于中子与原子核的相互作用。中子与原子核间的作用,决定了中子与物质的相互作用。

中子与原子核的作用机制主要包括势散射、复合核和直接作用等。势散射是中子接近原子核时,受到核力场的作用而被散射。中子的部分动能传给原子核,中子改变能量和运动方向,原子核发生反冲。在散射前后中子与原子核系统的动能和动量守恒。复合核是中子被原子核吸收形成复合核,入射中子的动能一部分转化为复合核的动能,其余部分及中子的结合能转化为复合核的激发能。复合核存在的时间很短,约为 $10^{-20}\sim 10^{-16}\text{s}$,但中子穿越原子核仅需 10^{-22}s ,所以,可以认为复合核存在相当长的时

间。复合核可以以不同的方式衰变。直接作用是入射中子与原子核内少数粒子直接发生相互作用, 不经过任何中间态的核反应。概括起来, 中子与原子核的相互作用主要包括弹性散射、非弹性散射、辐射俘获及其它核反应。

弹性散射又称为 (n, n) 反应, 它包括势散射和复合核散射。在这个作用过程中, 中子与原子核发生能量转移, 但整个体系的动能和动量保持守恒。对中能中子, 弹性散射是中子能量损失的主要作用过程。

在非弹性散射中, 入射中子的部分动能转化为原子核的激发能, 核处于激发态, 通过发射一个或多个光子释放激发能回到基态。在每次相互作用中, 中子损失的能量很小。

非弹性散射只有在中子能量高于靶核的第一激发能级时才能发生。重核的第一激发能级约在基态以上 100keV, 轻核的第一激发能级在基态以上约 3 ~ 4MeV, 因此, 快中子与重核相互作用时, 非弹性散射占优势。但经过几次非弹性散射后, 中子能量降到第一激发能级以下, 此后, 将主要发生弹性散射作用过程。

入射中子与原子核形成激发态的复合核, 中子被吸收, 复合核通过发射 γ 光子回到基态, 不发射其他粒子, 这种相互作用过程称为辐射俘获。这个过程也称为 (n, γ) 反应。任何能量的中子几乎都能与靶核发生辐射俘获, 反应截面仅与中子能量相关。反应后粒子内多了一个中子, 因此, 其一般是放射性的。各种核素的热中子俘获截面变化很大, 如元素 ^{135}Xe 为 $2.65 \times 10^{-22} \text{m}^2$, 元素 ^{18}O 为 10^{-32}m^2 。

除了上述作用过程外, 不同能量的中子与原子核还可能发生其他核反应。主要有发射带电粒子的核反应、裂变反应和多粒子发射等。在发射带电粒子的核反应中, 复合核通过发射带电粒子, 如 α 粒子、质子等而发生衰变。在裂变反应中, 重核俘获一个中子后分裂为两个较轻的原子核, 并放出 2~ 3 个中子及 20MeV 的巨大能量。发生这种核反应的条件是复合核的激发能应高于裂变势垒能量。当入射中子的能量足够高时 (大于中子结合能 8~ 10MeV 时), 可以发生复合核发射两个或多个粒子的核反应, 如 (n, 2n)、(n, np) 等多粒子发射过程。

由于这些作用, 造成中子的散射和吸收。

中子按能量常分为冷中子、热中子、慢中子、快中子和相对论中子等。不同能量的中子其主要作用过程不同, 表 8-1 列出了不同能量中子的主要作用。

中子透射物体时, 部分中子被吸收, 部分中子被散射, 透射的中子束强度被减弱, 强度的衰减与 X, γ

表 8-1 中子分类与主要作用

中子分类	中子能量	主要作用过程
冷中子	$< 0.01\text{eV}$ 或 $< 1.6 \times 10^{-21}\text{J}$	
热中子	$0.01 \sim 0.5\text{eV}$ 或 $1.6 \times 10^{-21} \sim 8.0 \times 10^{-20}\text{J}$	辐射俘获
慢中子	$0.5\text{eV} \sim 10\text{keV}$ 或 $8.0 \times 10^{-20} \sim 1.6 \times 10^{-15}\text{J}$	弹性散射, 辐射俘获
快中子	$10\text{keV} \sim 2.0\text{MeV}$ 或 $1.6 \times 10^{-15} \sim 3.2 \times 10^{-12}\text{J}$	弹性散射
相对论中子	$> 2.0\text{MeV}$ 或 $> 3.2 \times 10^{-12}\text{J}$	弹性散射, 非弹性散射

射线服从同一规律——指数衰减规律, 即

$$I = I_0 e^{-\mu_n x}$$

式中 I ——透射中子强度
 I_0 ——入射中子强度
 μ_n ——物质的中子线衰减系数
 x ——物体厚度

3 中子射线照相技术

3.1 中子射线照相技术原理

中子射线照相的基本透照布置如图 8-1 所示。从中子源发出的中子束, 通过准直器照射到被检工件, 检测器记录透射的中子束分布图象。不同物质具有不同的中子衰减系数, 因此透射中子束的分布图象可以形成工件缺陷和杂质等的图象。

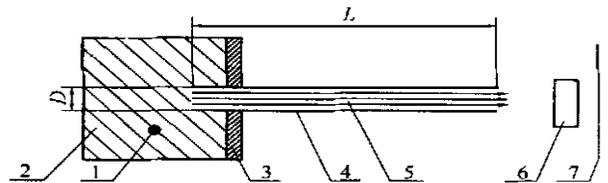


图 8-1 中子射线照相的基本透照布置

- 1. 快中子源 2. 减速剂 3. 中子吸收层
- 4. 准直器 5. 中子束 6. 工件 7. 胶片
- D——中子入射孔径 L——准直器长度

图 8-2 是不同物质对热中子的质量吸收系数。从图中可见, 中子的质量吸收系数随原子序数的变化完全不同于 X 射线和 γ 射线那种连续变化的规律性, 它除了相关于中子的能量外, 与物质的原子序数不存在简单的相关关系, 没有明显的规律性。例如, 氢、硼、锂等轻元素和一些稀土元素等对中子的质量吸收系数很大, 而一些重元素的质量吸收系数却很小, 同一元素的不同同位素的质量吸收系数也不同。产生这种差异的原因是中子主要通过核力与

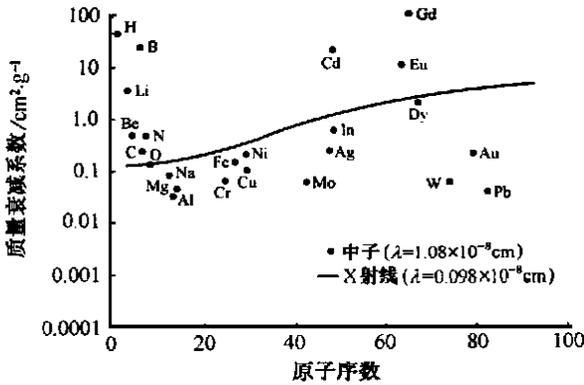


图 8-2 热中子质量衰减系数

原子核相互作用。正是由于这种特点, 产生了中子射线照相不同于 X 射线和 γ 射线的一些特点。

3.2 热中子源

用质子、氘核、 α 粒子、其它带电粒子和 γ 射线轰击原子核, 都可以产生中子。核的裂变过程或原子核的衰变过程也可以产生中子。按中子产生的方法中子源可分为四类, 即同位素中子源、加速器中子源、反应堆中子源和亚临界装置。同位素中子源利用天然放射性物质放出的粒子或 γ 射线轰击靶物质, 或者放射性物质的自发裂变过程产生中子。加速器中子源利用加速器加速带电粒子, 在带电粒子达到较高能量时轰击靶核, 引起发射中子的核反应。反应堆中子源利用中子引起重核裂变, 裂变过程放出更多中子, 即通过可控制链式反应产生中子。

描述中子源的主要指标是强度、能谱和角分布。强度是中子源单位时间发射的中子数, 能谱是发射中子的能量, 常记为 E_0 。角分布是中子源强度随发射角的分布。表 8-2 列出了四类中子源的典型特性, 表 8-3 列出了部分同位素中子源的特性。

中子射线照相所用的热中子是由快中子减速产生的。

当快中子进入物体后, 由于与物质原子核发生弹性散射和非弹性散射, 造成能量损失而被减速。非弹性散射只发生在减速过程开始, 减速主要由弹性散射过程实现, 通过减速使快中子慢化。快中子慢化采用减速剂实现, 通过减速使中子的平均能量达到

表 8-2 中子源特性比较

中子源类型	源强度 $n/cm^2 \cdot s$	能谱	空间分辨率	曝光时间
同位素中子源	$10 \sim 10^4$	多能, 快中子	中	长
加速器中子源	$10^3 \sim 10^6$	单能, 快中子	中	中
反应堆中子源	$10^5 \sim 10^8$	连续, 快中子	高	短
亚临界装置	$10^4 \sim 10^6$	—	较高	中

表 8-3 同位素中子源特性

中子源	反应方式	半衰期	中子平均能量/M eV	中子产额 $n/g \cdot s$
$^{238}\text{Pu} - \text{Be}$	(α, n)	89a	4	4.7×10^7
$^{241}\text{Am} - \text{Be}$	(α, n)	458a	4	1×10^7
$^{241}\text{Am} - ^{242}\text{Cm} - \text{Be}$	(α, n)	163d	4	1.2×10^9
$^{244}\text{Cm} - \text{Be}$	(α, n)	18.1a	4	2.4×10^8
^{252}Cf	自发裂变	2.65a	2.3	3×10^{12}
$^{210}\text{Po} - \text{Be}$	(α, n)	138d	4.3	1.28×10^{10}
$^{124}\text{Sb} - \text{Be}$	(γ, n)	60d	0.024	2.7×10^9

与减速剂原子核的平均动能相同。描述减速剂材料的主要参数是慢化能力和减速比。慢化能力是在减速剂的单位行程内中子能量的对数平均降低量。减速比是慢化能力与宏观吸收截面之比。选择减速剂材料时, 既要考虑它的慢化能力, 又要考虑它的减速比。慢化能力大而减速比小的材料, 由于宏观吸收截面大, 不适宜作减速剂材料。

表 8-4 列出了一些减速剂的减速特性。

表 8-4 减速剂的特性

减速剂	慢化能力/ cm^{-1}	减速比
水与其它含氢物质	1.53	60
重水	0.18	6000~20000
铍	0.16	135
石墨	0.063	175

减速以后从中子源引出的热中子必须经过准直, 形成分布均匀的中子束, 才能作为中子射线照相的中子源, 在中子射线照相时, 为了得到图象, 到达检测器的中子束需要达到下述强度:

一般质量图象: $10^5 n/cm^2$ (快速胶片);

较高质量图象: $10^9 n/cm^2$ (慢速胶片);

实时图象: $10^5 \sim 10^7 n/cm^2$ 。

3.3 中子射线照相几何不清晰度

按图 8-1, 通过选择准直比 L/D , 控制中子射线照相的几何不清晰度。几何不清晰度为

$$U_g = \frac{D}{L} T$$

在实际中子射线照相中, 准直比 L/D 一般选为

一般工件: $L/D > 10$;

薄工件: $L/D = 50 \sim 500$ 。

3.4 中子射线照相转换屏

中子不能直接引起物质电离, 对中子的检测是通过中子与原子核作用产生的带电粒子或 γ 射线检测实现的。在热中子射线照相中, 由于中子本身几

乎不能使胶片感光, 因此必须采用转换屏。转换屏在中子的照射下可以发射 α 、 β 或 γ 射线, 利用这些射线使胶片感光, 记录透射中子分布图象, 完成中子射线照相。

转换屏分为两类, 一类是钷、锂、硼、镉等, 它们在中子照射下瞬时发射射线; 另一类是铷、铯、铊等, 它们受到中子照射时, 可以俘获中子, 形成具有一定寿命的放射性核, 在以后的放射性衰变中放射出 γ 射线。表 8-5 给出了热中子射线照相常用的转换屏性能。

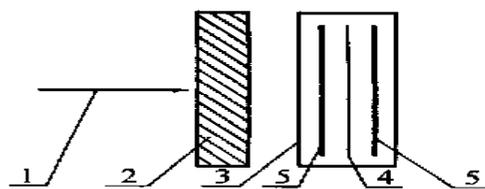
表 8-5 热中子射线照相的转换屏

转换屏	热中子截面 $\times 10^{-26} \text{m}^2$	半衰期	发射 粒子	发射粒子的最大 能量/M eV
钷	9.35	瞬时	α	4.7
硼	38.37	瞬时	α	2.3
镉	200	瞬时	γ	9
钷	580	瞬时	e	0.14
钷	2.400	瞬时	e	0.13
钷	415	瞬时	γ	-
铷	1.44	43s	γ	2.41
铯	1.44	57m in	X	0.02
铯	0.11	4.4m in	γ	0.5
铯	0.45	14s	β	3.3
铯	1.54	54m in	β	0.42
铯	8	2.35h	β	1.29, 0.095
铯	20	1.26m in	β	1.04, 1.108
铯	2.1	46.7h	β	0.8, 0.1
铯	0.44	2.4m in	β	1.64, 0.48
铯	1.10	24.5s	β	2.87
铯	0.03	254d	β	1.5, 0.66
铯	0.988	2.69d	β	0.412

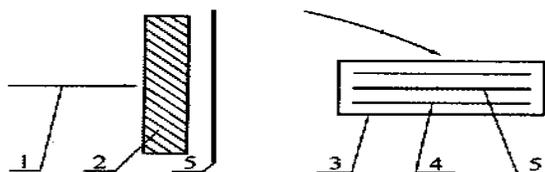
3.5 中子射线照相方法

按照选用的转换屏可把中子射线照相分为两种方法, 即直接曝光法, 选用第一类转换屏(瞬时屏)(图 8-3a); 间接曝光法, 选用第二类转换屏(活化屏)(图 8-3b)。

在直接曝光法中, 胶片与转换屏同时装入暗盒置于中子束中进行透照, 胶片直接记录转换屏在中子照射下所产生的瞬时图象。直接曝光法可以在低通量下进行长时间曝光, 完成射线照相。直接曝光法的缺点是胶片同时将受到从工件及周围物体产生的 γ 射线的照射, 导致图象质量降低。直接曝光法应正确选取转换屏, 经常使用的转换屏是钷转换屏。



(a) 直接曝光法



(b) 间接曝光法

图 8-3 中子射线照相方法

1. 中子束 2. 工件 3. 暗盒 4. 胶片 5. 转换屏

在间接曝光法中, 首先是工件与转换屏在中子束下进行透照, 在转换屏中形成工件的放射性影象; 透照后, 将转换屏移至暗盒中, 置于胶片之上使胶片感光, 形成工件的射线照相影象。由于在转换屏中放射性活度的积累服从指数规律, 因此, 在长时间中子照射下, 转换屏的放射性活度将趋于饱和。所以, 间接曝光法应正确选取曝光时间。间接曝光法经常使用的转换屏是铷转换屏和铯转换屏。这种方法的优点是适合于放射性物体的射线照相。

除了转换屏, 也可以采用闪烁体与胶片组合进行中子射线照相, 常用的闪烁体是锂、硼和硫化锌等。这时可在曝光量为 $10^5 \sim 10^6 \text{n/cm}^2$ 下获得热中子射线照相图象, 图象的空间分辨力可达 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

4 中子射线实时成象技术

热中子射线照相也可以构成中子射线实时成象系统, 系统由中子源、闪烁体、图象增强器、摄像机、图象处理器和显示器组成。在系统中实现下面的成象过程:



在中子强度达到 $10^5 \sim 10^7 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 时, 系统的空间分辨力可达 $0.25 \sim 0.5 \text{mm}$, 可以跟踪移动速度达 3m/min 的检测。

5 其它能量中子的射线照相技术

除了热中子, 也可以采用其它能量中子进行射

线照相。用于热中子的射线照相技术, 通常同样可用于其它能量中子的射线照相。但不同能量中子的射线照相有其独特的特点, 技术上关键的问题是选取适当的中子源和适当的中子检测方法。

例如, 冷中子对于多数物质其中子截面增大, 但对铁、硅、石墨等多晶物质, 由于散射截面大大减小, 所以可看成是透明的, 利用这个特点可以采用冷中子检查这些物质中的杂质。对共振中子, 由于共振中子与物质作用具有共振特性, 因此, 适当选择共振中子能量可以更好地区别某些物质。如钽和钨, 它们的热中子截面相近, 但中子能量为 $4.2 \sim 4.5\text{eV}$ 时, 钨的截面 $< 10^{-26}\text{m}^2$; 钽的截面 $> 10^{-25}\text{m}^2$; 中子能量为 7.4eV 时, 钨的截面 $3 \times 10^{-26}\text{m}^2$, 钽的截面 $< 1.1 \times 10^{-27}\text{m}^2$ 。

可见, 利用这些能量的中子, 可以很好地区分钽和钨。

6 中子射线照相技术的应用

6.1 应用概况

从 60 年代中期以后, 中子射线照相技术以本身具有的特点, 作为与常规 X、 γ 射线照相技术互相补充的射线照相技术进入了工业应用。

中子射线照相主要应用于下面几个方面:

- (1) 高密度材料检测, 如铅、铋、铀等。
- (2) 高密度材料中的低原子序数物质检测。
- (3) 放射性材料检测。
- (4) 同位素区分和原子量相近元素区分等。
- (5) 生物医学应用。

下面是一些典型应用例子。

6.2 应用实例

6.2.1 金属外壳中含氢物质的检测

(上接第 354 页)

$$L_{\text{eff}} = \widehat{L}_3 + 2L_2 \text{tg} \theta = 483 + 2 \times 20 \times \text{tg} 6^\circ = 487\text{mm}$$

4 结论

(1) 由式(1), (2)求得环缝偏心内照法的射线束半辐射角 $\eta_{\text{min}} = 24.62^\circ (K = 1.1)$ 和 $\eta_{\text{min}} = 19.37^\circ (K = 1.06)$ 。用 $\eta = 20^\circ$ 的定向 X 射线机对环缝偏心内照时, 不能用式(1), (2)计算探伤工艺参数。式(1), (2)只适用于周向机对环缝偏心内照时的计算。

(2) 用 $\eta = 20^\circ$ 的定向 X 射线机对环缝内照, 应采用式(3)~(5)计算 100% 透检时的 N , \widehat{L}_3 和 L_{eff} 参

例如, 空心叶片型芯残留物、子弹装药情况, 固体火箭推进剂装填情况以及焊锡丝中助焊剂情况等, 这些问题用 X 射线或 γ 射线是难以检查的, 但用中子射线照相却是很容易的。主要是因为其内部的物质都含有大量的氢元素, 它对中子的吸收远高于金属外壳。图 8-4 是锡焊料的中子射线照相结果, 图中清晰显示了松香芯中的气孔。

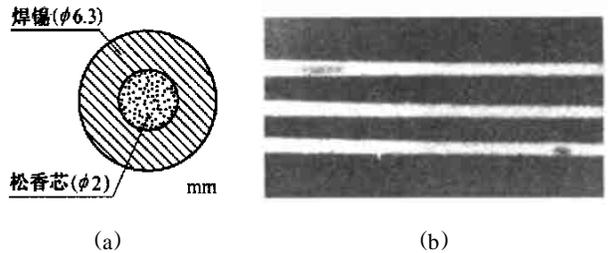


图 8-4 锡焊料的中子射线照片

6.2.2 金属粘结质量与表面腐蚀检测

例如铝蜂窝粘结结构表面蒙皮与蜂窝芯体的粘结情况, 由于粘结剂强烈吸收中子, 因此采用中子射线照相能够很容易检查粘结质量, 而这对于 X 射线和 γ 射线可能是困难的。类似的情况是, 金属表面的腐蚀裂纹, 由于裂纹中常常含有水分、油类等富氢物质, 采用中子射线照相也很容易检查。

6.2.3 核燃料检测

由于核燃料具有放射性, 因此可采用中子射线照相的间接曝光法来实现核燃料的内部结构和尺寸的射线照相检测, 而用其它射线照相方法却是困难的。核燃料的尺寸测定可以采用热中子射线照相和 0.25mm 厚的镅转换屏间接曝光法, 尺寸测量精度可达 0.038mm 。

收稿日期: 2000-01-10

数, 此时的计算结果, 达到国标透照质量等级 B 级的要求。

(3) 要减小透照次数, 提高透照效率, 用 $\eta = 20^\circ$ 的定向 X 射线机对环缝偏心内照时, 无论是 $f > R$ 或 $f < R$, 都可采用增大焦距 f 的办法来达到目的。

参 考 文 献

- 1 胡天明 射线探伤 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1994 172- 180
- 2 全国锅炉压力容器无损检测人员资格鉴定考核委员会编写 射线探伤 北京: 中国劳动出版社, 1989 102- 106

收稿日期: 1999-08-31

射线检测
基础讲座

第九讲 CT技术和康普顿散射 成象检测技术

郑世才
(新立机器厂,北京 100039)

COMPUTED TOMOGRAPHY AND COMPTON SCATTER IMAGING TECHNIQUE

Zheng Shicai
(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 射线CT检测技术

1.1 概述

CT技术,即计算机辅助层析成象技术,与一般的射线照相检测技术存在根本的不同。这种技术是采用一面状射线束透射工件的一个层面,检测器阵列与射线束处于同一平面,通过机械驱动装置对工件形成一定的扫描透射,采集射线束穿过该层面的大量数据,通过计算和变换,得到该层面的相关信息,并重建该层面的图象,实现对这一层面的检测。

CT技术是根据投影数据重建物体的图象,它的数学原理,即拉冬(Radon)变换和逆变换是在1917年由拉冬建立的。但直到1950年才具体应用于射电天文学领域,1971年英国EMI公司研制出世界上第一台医疗射线CT装置,并称为计算机辅助层析成象扫描器(CAT)。70年代末期人们开始致力于工业应用研究,这就要求使用更高能量的射线,使其具有更高的分辨力。70年代末80年代初美国开始了专门的工业CT系统的研制,主要是针对大型固体火箭发动机和小型精密工件的检测。我国从80年代开始进行CT技术和装置的研究。1993年Y射线CT装置研制成功,并在某些方面获得了成功的应用。射线CT技术、胶片射线照相检测技术和射线实时成象检测技术的比较见表9-1。

工业CT技术目前主要应用在下列方面:

(1) 缺陷检测 主要用于检验小型、复杂及精密的铸件和锻件,扫描检测大型固体火箭发动机,这样的CT系统使用电子直线加速器X射线源,能量高达25MeV,可检验直径达3m的大型固体火箭发动机。

(2) 尺寸测量 如精密铸造的飞机发动机叶片

表9-1 三种射线检测技术的特点比较

射线检测技术	射线吸收率/%			空间分辨力 Lp/mm	动态范围 × 10 ²	数字图象 处理能力
	80 keV	420 keV	2 MeV			
胶片照相	5	2	0.5	> 5	2~10	需胶片扫描器
实时成象	20	8	2	2.5	5~20	典型为8bit数据
CT技术	99	95	80	0.2~4.5	10 ⁴	典型为16bit数据

的尺寸测量,误差 0.1mm。

(3) 结构和密度分布检查 在航空工业,CT技术用于检验和评价复合材料和复合结构,评价某些复合件的制造过程,也用于一系列情况下样件的评价。这种检测与评价过程,大大简化了取样破坏分析过程;另外可检查工程陶瓷和粉末冶金产品,特别是高强度、形状复杂的产品,在制造过程中发生的材料或成分变化;也可对组件结构进行检查。

(4) CT-CAD技术 利用CT技术获得的结构和密度信息,为复杂产品的复制和新产品的设计开发进行计算机辅助设计。

1.2 CT技术原理

1.2.1 投影数据与拉冬(Radon)变换

射线CT图象是从不同方向对物体的一个截面透照,记录每一方向的透照数据,每一记录是沿一特定路径对射线衰减的积分,用这样采集到的数据重建物体截面的射线衰减系数分布图象。从数学的角度看,所得到的数据构成了物体截面的一个投影。

如图9-1所示,在物体的截面上定义两个坐标系,即固定坐标系,即x和y轴,与物体相对固

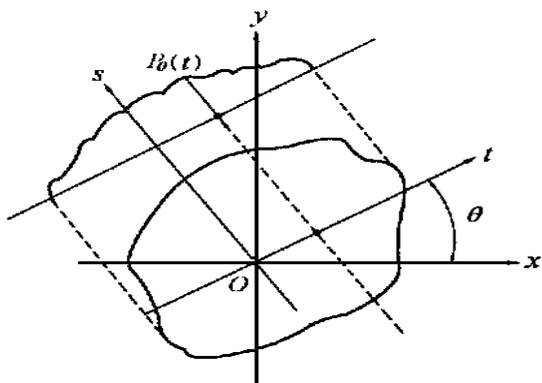


图 9-1 投影数据示意图

定, 称为物体坐标系。投影坐标系, 即 t 和 s 轴, s 方向沿投影方向(射线入射方向), t 轴相对于 x 轴转动 θ 角, 称为投影(空间)坐标系。这个坐标系也可以采用极坐标 t 和 θ

两个坐标系的原点都在转动中心, 投影坐标系相对于固定坐标系转动了 θ 角度, 截面上一点的坐标分别为 (x, y) 和 (t, s) , 它们之间的关系为

$$t = x \cos \theta + y \sin \theta$$

$$s = -x \sin \theta + y \cos \theta$$

对物体某一层面上的一个一般函数 $g(x, y)$, 可作出一个新的函数 $P_{\theta}(t)$, 即

在固定坐标系中

$$P_{\theta}(t) = \int g(x, y) dx dy$$

在投影坐标系中

$$P_{\theta}(t) = \int g(t, s) ds$$

$P_{\theta}(t)$ 称为投影数据, 对 $0 < \theta < \pi$ 可得到一系列投影数据。投影数据 $P_{\theta}(t)$ 在给定投影角 θ 时是 t 的一维函数, 显然也是 t, θ 的二维函数。它将物体空间一点 (x, y) 的数据变换(映射)到投影空间 (t, θ) , 这种变换称为拉冬变换。拉冬变换可将一个二维函数变换为投影数据。投影数据空间的坐标若以极坐标 (t, θ) 表示, 则称为拉冬空间。实际空间的一个线积分路径对应于拉冬空间的一点。

在射线 CT 技术中, 以 μ 表示物体某一层面的射线线衰减系数, 对截面上坐标为 (x, y) 或 (t, s) 的一点应有

$$\mu(x, y) = \mu(t, s)$$

射线穿过该层面坐标为 t (投影坐标系), 沿 s 方向路径的衰减可写为

$$I_{\theta}(t) = I_0 \exp[-\int \mu(t, s) ds]$$

改写上式, 并取自然对数得到

$$\ln \frac{I_0}{I_{\theta}(t)} = \int \mu(t, s) ds$$

显然, 上式表示的是一投影数据。将上式中比的对数记作 $P_{\theta}(t)$, 即

$$P_{\theta}(t) = \ln \frac{I_0}{I_{\theta}(t)} = \int \mu(t, s) ds$$

t 是检测器在投影坐标系中的位置, 对 $0 < \theta < \pi$ 可得到一系列投影数据, 即射线沿截面上某方向路径的衰减的对数可构成一投影数据。射线 CT 技术重建的图象就是层面上线衰减系数的分布。

1.2.2 傅里叶变换与投影中心频谱定理(投影中心切片定理)

函数傅里叶变换是在频域分析一个信号, 它可将任何一个函数展开为三角函数, 即任何一个函数的值都可以用具有一定幅度和频率的一系列三角函数值的和表示。如一个周期为 T 的一维函数 $X(T)$, 其傅里叶变换为

$$X(T) = a_0 + (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

式中 $\omega = \frac{2\pi}{T}$

$$a_n = \frac{2}{T} \int X(T) \cos n\omega t \cdot dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int X(T) \sin n\omega t \cdot dt$$

对于非周期函数, 展开式应用积分表示。由函数可求出其傅里叶变换, 反之, 由函数的傅里叶变换也可求出函数。

目前 CT 图象重建算法基于的是投影中心频谱定理(投影中心切片定理、投影层析定理)。这个定理给出了函数的一维傅里叶变换与二维傅里叶变换的关系, 即投影数据的一维傅里叶变换是物体二维傅里叶变换的一部分。因此, 按照投影中心频谱定理, 只要得到足够的投影数据, 就可以得到物体图象函数的傅里叶变换, 这样, 通过傅里叶逆变换可以重建物体图象的函数。

1.2.3 重建原理的理解

射线 CT 图象是一个数字化的重建图象, 图象由象素矩阵构成, 重建过程包括两个基本阶段, 即将测量得到的沿不同路径穿过物体截面的射线强度转换为投影数据。利用重建算法处理投影数据, 建立物体截面的灰度级数字图象。

对 CT 技术重建原理可作如下简化理解, 如图 9-2 所示, 设一截面由四个单元 X_1, X_2, X_3 和 X_4 构成。按图中所示方向透照, 得到四组数据, 即 Y_1, Y_2, Y_3 和 Y_4 , 这样可得到下列方程组

$$X_1 + X_2 = Y_1$$

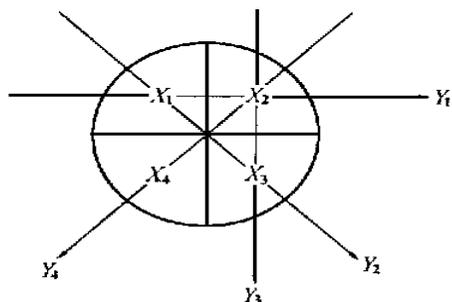


图 9-2 CT 图象的重建原理

$$\begin{aligned} X_1 + X_3 &= Y_2 \\ X_2 + X_3 &= Y_3 \\ X_2 + X_4 &= Y_4 \end{aligned}$$

解此方程组, 得到

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{1}{2} [Y_1 + Y_2 - Y_3] \\ X_2 &= \frac{1}{2} [Y_1 - Y_2 + Y_3] \\ X_3 &= \frac{1}{2} [Y_2 - Y_1 + Y_3] \\ X_4 &= Y_4 - \frac{1}{2} [Y_1 - Y_2 + Y_3] \end{aligned}$$

由 X_1, X_2, X_3 和 X_4 即可重建图象。显然, 对实际的 CT 图象将得到一个庞大的方程组, 因此必须研究解此方程组的方法, 这就是 CT 成像技术所发展的各种重建算法。

CT 成像技术所发展的各种重建算法分为变换方法和迭代方法两种基本类型。变换方法是基于投影数据的反演公式, 与迭代方法比较, 变换方法是快速方法, 并可得到质量良好的图象。变换方法的两个主要类型是滤波-逆投影算法和直接傅里叶算法。在工业 CT 系统中普遍使用的是滤波-逆投影算法。

1.3 CT 图象

1.3.1 图象质量

CT 图象是数字化的重建图象, 图象由像素矩阵构成, 每个像素代表物体层面上一个小体积元, 反映了这个小体积元对射线的衰减特性。

CT 图象质量的主要指标是空间分辨力和对比度灵敏度(密度分辨力)。

空间分辨力表征了 CT 系统对细节成像的能力, 定量地表示了所能区分两个细节的最小间距。影响 CT 系统空间分辨力的主要因素有采集数据过程中射线源移动的线距离、射线源的尺寸、几何放大倍数、检测器孔径和图象重建算法等。此外, 也受到显示系统的限制。

对比度灵敏度表征了 CT 系统对密度变化的识

别能力, 通常定义为图象上可识别的最小物体对比度, 即

$$\text{对比度} = \frac{|\mu_f - \mu_b|}{\mu_b} \times 100\%$$

式中 μ_b ——背景材料的线衰减系数
 μ_f ——细节材料的线衰减系数

如果 $\mu_b < \mu_f$, 则分母取 μ_b 。上述定义假定细节扩展到了整个层面厚度, 如层面厚度为 H , 细节厚度为 h , 则对比度应乘以 h/H 。

影响对比度灵敏度的主要因素是系统噪声, 特别是成像的光子数目。在给定的射线能量下, 光子数目受到源强度、数据采集时间、检测器孔径尺寸、源与检测器的距离和滤波等因素的影响。

空间分辨力和对比度灵敏度可采用不同的方法测定。ASTM E1695-95《CT 系统性能测量方法》规定, CT 系统的空间分辨力和对比度灵敏度从检验由均匀材料制作的圆盘试块的图象确定。空间分辨力从分析圆盘试块图象的明锐度导出, 对比度灵敏度从分析圆盘试块图象中心区的统计噪声导出。圆盘试块的材料、直径、厚度及粗糙度应符合规定。在规定的采集和显示条件下得到圆盘试块的图象后, 空间分辨力可通过计算边界响应函数(ERF)、点扩展函数(PSF)和调制传递函数(MTF)确定, 对比度灵敏度由得到的对比度鉴别力函数(CDF)确定。

CT 系统成像的综合性能可用 CDD (对比度-细节-剂量) 曲线描述(图 9-3)。CDD 曲线是在一定照射剂量下, 图象的百分比对比度与圆柱形细节直径的关系曲线, 它综合了细节可识别性与图象对比度、细节的形状和尺寸以及图象噪声等的关系。图 9-3 为两条类似 CT 系统的 CDD 曲线, 系统 A 是高分

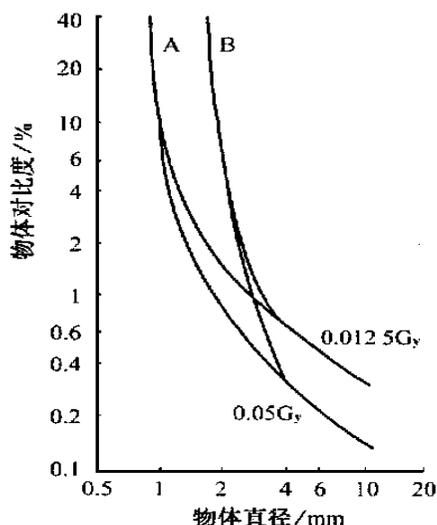


图 9-3 CT 系统的 CDD 曲线

辨力系统, 系统B 是低分辨力系统。由图可见, 对高对比度结构, 揭示细节的能力较少依赖于成象的射线剂量(或图象噪声), 而主要依赖于系统的分辨力。

1.3.2 伪象

伪象是与物体特征不相符的图象。在CT 图象上可能出现伪象, 这些伪象可认为是相关噪声。CT 图象上出现的伪象可粗略分为射线束硬化伪象、部分体积效应伪象、采样数据不足伪象和散射伪象。这些伪象中一类是CT 技术的物理原理和数学处理所固有的, 如部分体积效应伪象(部分体积伪象是一个象素包含的体积内含有不同性质的结构)等; 另一类是CT 系统装置和软件等方面的不足产生的, 如机械偏差、探测器间的串扰及采样不足等。射线束硬化伪象则可能是两者的组合。伪象是一个复杂的问题, 消除伪象需从多方面作出努力, 如检测工艺等。

1.3.3 CT 数

在医用CT 中定义了CT 数, 即

$$CT \text{ 数} = \left(\frac{\mu_T - \mu_w}{\mu_w} \right) \times 1000$$

式中 μ_T —— 人体组织的线衰减系数

μ_w —— 水的线衰减系数

水的CT 数显然为 0, 空气的线衰减系数为 0, 因此其CT 数为- 1 000。

1.4 射线CT 系统

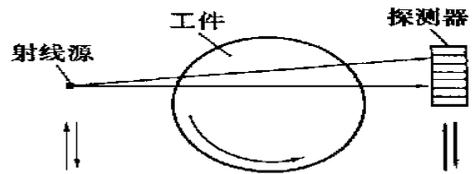
射线CT 系统由射线源、机械扫描系统、探测器与数据采集系统和计算机系统四部分构成, 如图 9-4 所示。

工业射线CT 系统主要采用三种射线源, 即低能 X 射线源、 γ 射线源和高能 X 射线源。理想的射线源应具有高强度的射线束、单一的能量、尺寸很小的焦点以及可以调整的射线源能量, 以适应不同的被检物体。

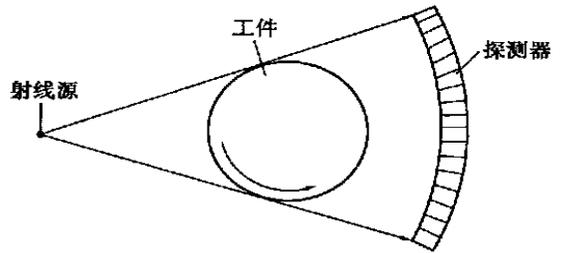
X 射线源具有一定的透照电压范围, 可以产生较高强度的射线束。但 X 射线源产生的是连续谱射

线, 在穿过不同厚度工件后, 射线束将受到不同的硬化。这种情况将引起测量数据的不一致, 导致重建图象的误差。 γ 射线源的主要优点是可以产生高能光子, 并具有特定的能量。主要的缺点是只能产生有限强度的射线, 如果增加射线强度, 必需采用较大尺寸的 γ 射线源, 这将影响系统的空间分辨力, 此外, 其能量取决于所用的 γ 源放射性同位素, 因此射线源的能量不能改变。CT 系统对 X 射线源的要求关键在于 X 射线源的稳定性, 特别是电压的稳定性, 它的变化将引起 X 射线能量的变化, 产生伪象。

CT 系统的扫描方式目前主要有四种, 在工业应用中主要有两种, 即单源、小扇角平移加旋转扫描系统和单源、大扇角单旋转扫描系统(图 9-5)。



(a) 单源、小扇角平移加旋转扫描系统



(b) 单源、大扇角单旋转扫描系统

图 9-5 工业CT 系统的扫描方式

工业CT 系统多采用固态分立探测器, 固体探测器的材料主要有 $CdWO_4$, $CaWO_4$, BGO, CsI (Tl), NaI(Tl) 和塑料闪烁体。对探测器性能的要求主要是尺寸、能量转换效率、信噪比、动态范围、稳定性和响应速度等。

下面以单源、大扇角单旋转扫描系统为例说明CT 系统的工作过程。由射线源发出的射线经前准直器, 形成一薄的扇形射线束, 透过工件的一个层面, 再经后准直器, 到达探测器阵列。在数据采集系统形成一组(投影)数据, 传给计算机系统。在计算机系统控制下, 机械扫描系统旋转一定角度(常为 1°), 进行下一组数据的采集。如此进行下去, 完成对该层面数据的采集。运用这些数据, 计算机系统完成数据处理, 给出该层面的重建图象。

CT 系统最主要的技术性能指标包括:

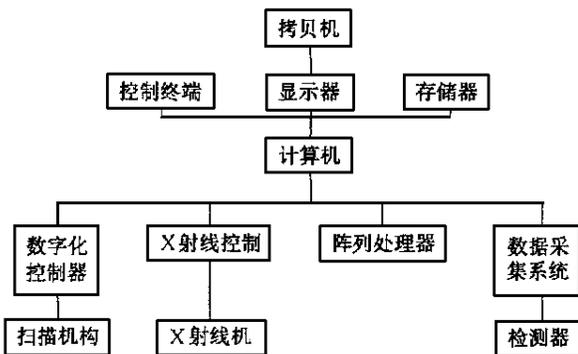


图 9-4 工业CT 系统的基本构成

(1) 扫描方式。

(2) 扫描时间, 即完成一个层面数据采集所需的时间。它与图象矩阵的大小、探测器阵列所含探测器的多少及射线源的辐射强度等直接相关。

(3) 重建时间, 即计算机系统完成一个层面数据处理并给出数字图象所需的时间。它与图象矩阵的大小和重建算法(计算机软件)的性能等密切相关。

(4) 分辨力, 即 CT 系统的空间分辨力和密度分辨力(对比度灵敏度), 它与 CT 系统的信噪比直接相关, CT 系统的密度分辨力一般为 1% ~ 1‰。

(5) 检测范围, 即 CT 系统可检工件的尺寸、厚度等。

目前先进的工业 CT 系统的主要性能为空间分辨力 4~ 5Lp/mm; 密度分辨力 0.1% ~ 0.05%; 扫描时间 30s ~ 30min; 尺寸测定精度 5~ 25 μ m; 扫描层厚度可控制到 20~ 100 μ m; 重建图象矩阵 1024 × 1024 像素; 图象类型为三维; 可检验物体的最大直径可达 360cm, 最大重量可达数吨。

近年来还对下列 CT 系统进行了研究:

(1) 锥形束 CT 技术 采用锥形射线束透射, 面探测器采集数据, 直接重建物体的三维空间图象。目前可做到在数秒内重建一个 256³ 个像素的图象, 像素的体积为 0.3mm³。

(2) 多能量多几何尺寸 CT 装置 目前 CT 装置已有 150kV, 420kV, 2~ 15MeV 能量及⁶⁰Co, 机械结构可适应从小尺寸物体到大型固体火箭发动机。

(3) 现场应用 CT 装置 已有可携带到现场的小型 CT 装置, 用来直接检验树木年轮等。

2 康普顿散射成像检测技术

2.1 概述

康普顿散射成像检验技术采用散射线成像, 射线源与探测器位于物体的同一侧, 其技术上的主要特点是 单侧几何布置, 即射线源与探测器位于物体的同一侧。图象的对比度在理论上可达到 100%。具有层析功能, 并且一次可以得到多个截面的图象。

康普顿散射成像检验技术的局限性主要有:

(1) 由于康普顿散射成像技术采用散射线成像, 因此主要适于低原子序数物质, 近表面区较小厚度范围内缺陷的检验。通常它适宜检验的物体表层区厚度是, 钢约为 3mm, 铝约为 25mm, 塑料和复合材料约为 50mm。

(2) 在应用时必须考虑基体材料和缺陷对射线的散射差别, 检验要求的分辨力和成像时间。

康普顿散射成像检验技术已应用于检验和研究, 如飞机蒙皮的粘结和腐蚀检验, 在固体火箭发动机结构的分层检验中, 已可检出 0.15mm 的分层间隙; 粉末冶金产品在线密度测量, 测量 6.7g/cm³ 左右的密度时, 测量的不确定度可达 1%, 实验证明还可用于密度为 1.7g/cm³ 左右的复合材料密度测量; 用 ϕ 5mm 的小孔进行康普顿散射成像检验可得到铸件截面的缺陷图象。

2.2 康普顿散射成像技术的原理

在康普顿散射作用过程中, 能量为 $h\nu$ 的入射 X 射线的光量子, 与散射物质原子的轨道电子相互碰撞, 入射射线光量子的能量一部分转移给反冲电子, 一部分保留在散射光子中。康普顿散射作用近似与入射光子的能量 E 成反比, 与靶物质的原子序数 Z 成正比。入射光子发生康普顿散射的概率常称为康普顿散射宏观散射截面, 它除了与入射光子的能量和物质的原子序数相关外, 还与物质的原子量和密度相关。由于反冲电子的速度接近光速, 因此, 应采用相对论处理这一过程。由能量守恒定律和动量守恒定律, 可得到散射光量子的能量为

$$E = \frac{E_0}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

式中 E —— 散射光子的能量

E_0 —— 入射光子的能量

$$\alpha = \frac{E_0}{m_0 c^2}$$

m_0 —— 电子的静止质量

c —— 光在真空中的传播速度

散射光子波长的改变 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta)$$

式中 h —— 普朗克常数

代入 h, m_0 和 c 的值, 计算得到

$$\Delta\lambda = 2.426(1 - \cos\theta)$$

可见, 散射光子波长的改变与入射光子的能量无关, 而散射光子的角分布与入射光子的能量密切相关。研究指出, 随着入射光子能量的增大, 散射光子将更趋向于分布在入射光子方向。图 9-6 是散射光子的角分布与入射光子能量的关系。

康普顿散射成像技术的工作原理如图 9-7a 所示。射线照射到工件上, 由于探测器前面有准直器, 所以从工件不同深层产生的散射线将到达不同的探测器, 在某一层中如果不同点存在性质差异, 所产生的散射线将不同(图 9-7b), 探测器测量到的数据也将不同, 从而可对工件中这一层的情况作出判断。

如图 9-7 所示, 从物体中一个小体积元产生, 并

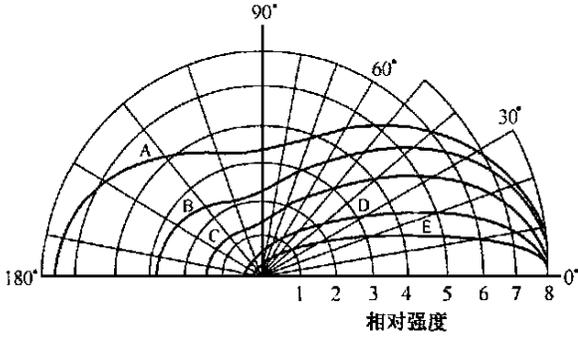


图 9-6 康普顿散射光子的角分布

A——0.05 MeV B——0.2 MeV C——0.5 MeV
D——2.0 MeV E——5 MeV

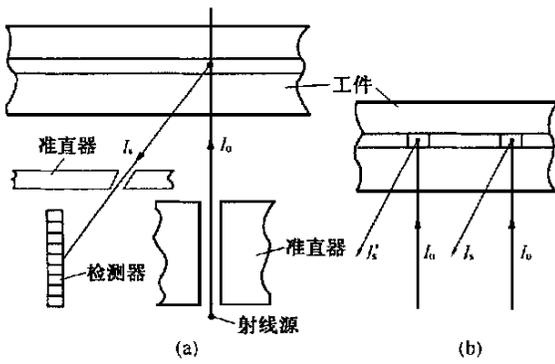


图 9-7 康普顿散射成像原理

到达检测器的散射线强度为

$$I_s = K I_0 w \mu F_P F_S$$

$$I_s = K I_0 w \mu F_P F_S$$

式中 F_P ——入射射线在工件中通过 T 距离产生的衰减

F_S ——散射线到达检测器所产生的衰减

μ ——工件的康普顿散射线衰减系数

μ ——缺陷的康普顿散射线衰减系数

w ——缺陷在射线照射方向的尺寸

K ——比例系数

由上述散射线所形成的缺陷图象的对比度为

$$C = \frac{I_s - I_s}{I_s} = \frac{\mu - \mu}{\mu}$$

可见, 如果 $\mu = 0$, 则可得 $C = 1$, 即缺陷的对比度将达到 100%, 这对于常规射线照相检验技术是很难达到的。显然, 只要改变检测器的设计, 使检测器可以同时分别接收工件不同深度的散射线, 则可以同时形成垂直于射线束方向的层析象影。

由上述康普顿散射成像原理可知, 康普顿散射成像检验技术的关键是一次射线应具有适当的能量和强度, 以便产生足够的散射线。与常规射线照相技术相比, 康普顿散射成像检验技术中, 射线源的能量和焦点尺寸的选择, 都不需要像常规射线照相技术那样严格考虑, 因为它们不会产生那样重要的影响。

2.3 康普顿散射成像系统

康普顿散射成像系统一般由射线源、扫描机构、散射线检测系统、计算机与软件系统、图象显示和数据存储系统以及控制系统组成。

一种典型的扫描机构的设计思路是, 通过缝形光阑形成一扇形射线束, 进一步通过可旋转的具有一系列螺旋形排列的小孔的准直器形成一细射线束, 在准直器旋转过程中, 得到扫描射线束。在整个扫描机构移动中完成对工件的扫描检测。

检测器阵列的材料常选用 BGO (锗酸铋)。

近年来, 国外有的公司已研制了这类设备, 其主要技术指标为, 射线源: 160kV / 19mA; 检测器: 22 个; 分辨力: 面积 0.4mm × 0.4mm, 深度 0.4mm; 扫描面积: 50mm × 100mm; 扫描时间: 1.25 ~ 6.25 min; 图象像素: 250 × 500; 可检厚度: 钢为 5mm, 铝为 20mm, 塑料为 50mm。

收稿日期: 1999-08-10

(上接第 405 页)

10 张淑仪. 激光超声与材料无损评价. 应用声学, 1992, 11 (4): 1- 6
11 Castaings M, Hosten B. The use of electrostatic, ultrasonic, air-coupled transducers to generate and receive Lamb waves in anisotropic, viscoelastic plates. Ultrasonics, 1998, 36(5): 361- 365
12 陈彦华, 李明轩. 利用人工神经网络实现缺陷类型识别. 应用声学, 1998, 17(2): 1- 5

13 Liu Zhenqing, Wei Moan. Fuzzy detection for ultrasonic flaw inspection of highly scattering materials. Chinese Journal of Acoustics, 1997, 16 (4): 332- 338
14 Liu ZQ, Lu MD, Wei MA. Structures noise reduction of ultrasonic signals using artificial neural network adaptive filtering. Ultrasonics, 1997, 35(4): 325- 328

收稿日期: 1999-12-13

第十讲 电子质子射线照相检验 技术与辐射测量技术

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

ELECTRON RADIOGRAPHY, PROTON RADIOGRAPHY AND RADIOMETRY

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 电子射线照相检验技术

1.1 概述

1897年J.J. Thomson发现了电子。

从1858年起,一些科学家在研究真空放电时就发现,在真空管的负极上有一种射线射出,并称其为阴极射线。1879年W. Crookes发现这种射线在磁场中会发生偏转,证明阴极射线是一种带电粒子束。Thomson测定了阴极射线的荷质比,确定阴极射线由带负电的粒子组成,这就是电子。

电子是人类发现的第一个基本粒子,它揭示了原子具有复杂的结构。

大多数物质在X射线照射下将发射电子,电子射线照相技术就是利用这些电子来进行射线照相的技术。电子的穿透能力很低,因此电子射线照相技术主要用于低原子序数、很薄材料的射线照相检验,如纸张上的水迹、纸张的纤维分布、印章痕迹及邮票、油画、纸币等内部结构、组成的分析。也可对厚物体的表面层进行逆射式电子射线照相。

1.2 电子与物质的相互作用

电子通过物质时,可以与物质的原子、原子中的电子及原子核发生复杂的相互作用,作用过程决定于电子的能量及电子与作用粒子的最近距离。主要的作用过程有电离与激发、韧致辐射及弹性散射,此外还有湮没辐射、契伦科夫辐射及核反应等。当作用的最近距离大于原子线度时,库仑力是主要作用力,原子作为整体与电子作用,引起原子的激发或电离;当作用的最近距离等于原子线度时,电子与原子的一个电子作用,导致原子发射具有相当能量的电子和原子电离;当作用的最近距离小于原子线度时,电

子与原子核的电场作用产生辐射,主要是韧致辐射。

当电子与正电子发生相互作用时,电子消失,辐射两个能量为 0.511MeV 的光子,这就是湮没辐射。在透明的介质中,当电子以高于光在该介质中的传播速度运动时,电子的部分能量将以蓝色光的形式辐射出来,这种辐射称为契伦科夫辐射。契伦科夫辐射分布在沿电子运动向前方向的一个角度内。

1.2.1 电离与激发

电子与原子的轨道电子相互作用,将部分能量转移给轨道电子,如果轨道电子获得的动能可以克服原子的束缚,脱离原子的轨道成为自由电子,则此过程称为电离。如果轨道电子获得的能量不足以克服原子的束缚,而仅是从低能级跃迁到高能级,使原子处于激发态,则此过程称为激发。处于激发态的原子不稳定,跃迁至高能级的电子将自发地跃迁回低能级,同时辐射特征X射线,使原子回到基态。

在上述相互作用过程中,电子与轨道电子发生库仑作用而损失能量,这一过程称为电离损失。电离损失通常以单位路径长度上电离损失的平均能量描述,其主要特点是电离损失与电子的速度(能量)成反比。电子速度越小,作用时间越长,转移给轨道电子的能量越多。因此,电子在停止运动前的一段路程上电离损失达到最大值。电离损失与物质的电子密度成正比。

1.2.2 弹性散射

电子与原子核的库仑场相互作用,作用前后体系的动能和动量不变,电子的运动方向发生改变,这种作用过程称为弹性散射。在弹性散射过程中,电子散射到某一角度的几率,与散射物质的原子序数的平方成正比,与电子速度的平方成反比。电子在穿过

一定厚度的物体时都要经历多次散射, 它所产生的净偏转角服从高斯分布。

1.2.3 韧致辐射

高速电子在通过原子核附近时, 与原子核的库仑场发生相互作用, 其部分动能或全部动能将转变为连续谱电磁辐射, 这就是韧致辐射过程。电子在韧致辐射过程中损失的能量称为辐射损失。辐射损失正比于物质的原子序数, 反比于电子质量的平方。

电子初始能量转变为韧致辐射的份额 F 为

$$F = KZE$$

式中 K ——比例系数

$$K = 0.4 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3} (1/M \text{ eV}, \text{ 实验测定})$$

E ——电子初始能量

单能电子束入射到厚靶上时

$$F = 5.8 \times 10^{-4} ZE$$

在单位长度路径上, 辐射损失的平均能量与电离损失的平均能量之比近似为 $ZE/800$ 。可见, 当电子能量较低时, 更重要的是电离损失, 只有在电子能量较高时, 辐射损失才会占有较大的比例。

在一般能量范围 ($E < 10M \text{ eV}$) 内, 电子与物质相互作用造成电子能量损失的主要是电离损失和辐射损失。其它损失相对于这两种损失可忽略不计。

1.2.4 电子在物质中的射程

在电子与物质的相互作用中, 电子的能量不断损失, 因此, 电子在物质中只能穿行一段距离。按规定, 电子沿入射方向从进入物质到被物质吸收所经过的最大直线距离为电子在物质中的射程。射程与电子的初始能量和吸收物质的性质有关。单能电子束在某种物质中, 由于电子不同其能量损失的概率不同, 因此, 电子的射程将分布在很宽的范围内。

1.3 电子射线照相技术

物体受 X 射线照射时, 由于光电效应将释放出电子, 即光电子。当入射光量子的能量较低时, 光电子主要分布在与光量子方向相垂直的方向。随着入射光量子能量的增高, 光电子逐渐集中在光量子入射方向。

按电子产生的方法, 电子射线照相技术分为透射电子射线照相技术和发射电子射线照相技术。

透射电子射线照相技术的基本透照布置如图 10-1 所示。X 射线通过较厚的滤波板后照射到样品上面的铅箔上, 在相互作用中产生的电子穿过样品, 在胶片上形成影象。在此过程中一次射线也穿过样品, 入射到胶片上, 使胶片感光。由于电子的穿透能力低, 所以透射电子射线照相技术只适宜于密度低、

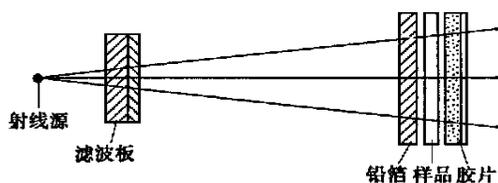


图 10-1 透射电子射线照相示意图

厚度很小的物件的射线照相, 如邮票和纸张等。

从上述过程可见, 电子射线照相技术须解决的问题是减少一次射线对胶片的感光作用, 否则将不可能得到电子射线照相的影象。为此, 在电子射线照相中采取的主要技术措施是:

(1) 采用能量较高的 X 射线, 并严格进行滤波。通常, X 射线的透照电压 $> 250kV$, 经较厚的铜板滤波后, 一次射线产生的感光作用可以忽略。为吸收铜板产生的特征 X 射线和散射线, 通常还需在铜板面向样品侧另加一定厚度的铝滤波板。

(2) 采用单面乳剂的低感光度射线胶片。这种胶片对一次射线的吸收将大大降低。

(3) 胶片的乳剂面应面向样品, 样品与胶片之间应直接接触, 紧密贴合, 以尽量减少电子散射产生的影响, 一般采用真空暗盒。

(4) 覆盖在样品上的铅箔应平整、均匀、表面光洁, 并与样品紧密贴合。

发射电子射线照相的基本透照布置如图 10-2 所示。经严格滤波的 X 射线首先穿过胶片, 然后照射到样品上, 在射线与样品的相互作用过程中产生电子。如果样品不同点的物质不同, 则产生的电子数量和能量也将不同, 其中与一次射线方向相反的那部分电子将入射至胶片, 使胶片感光, 形成影象。

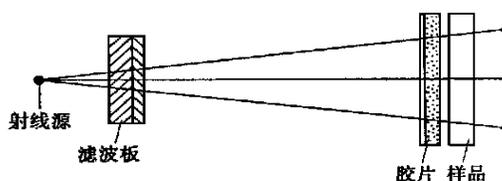


图 10-2 发射电子射线照相示意图

发射电子射线照相技术可用于很薄样品的射线照相, 如检查印刷品, 能无损伤地鉴别印刷油墨的成分(金属颜料或苯胺类有机染料), 也可用于厚样品表面层的射线照相。进行发射电子射线照相时, 也须采用透射电子射线照相技术的主要技术措施。

表 10-1 给出了电子射线照相实例的有关数据。

2 质子射线照相检验技术

表 10-1 电子射线照相实例数据*

物品	照相方法	电压 kV	焦距 mm	电流 mA	曝光时间 t/min	铅箔厚度 μm
树叶	透射	250	700	5	1	25
纸币	透射	250	700	5	1	25
邮票	透射/发射	250	700	5	2	25

* 滤板厚度均为 Cu 1mm, A 1.5mm.

质子, 即氢原子核, 是在发现电子后不久观察到的另一种基本粒子。

质子可列为带电的重粒子, 它与物质相互作用的基本过程与电子相同, 即可与物质的原子、原子的电子及原子核发生复杂的相互作用。其主要作用过程有电离与激发、韧致辐射和弹性散射, 此外还有湮没辐射、契伦科夫辐射和核反应等。能量损失的主要过程是电离损失和辐射损失。当质子的能量 $E < 10\text{MeV}$ 时, 辐射损失远小于电离损失。电离损失的主要特点是它与质子的速度(能量)成反比。因此, 质子在停止运动前的一段路程上电离损失达到最大值。它与物质的电子密度成正比。

在弹性散射过程中, 质子一般不发生明显散射, 小角度散射的概率远大于大角度散射。多次散射所产生的净偏转角服从高斯分布。

质子能量损失过程的特点决定了具有一定能量的质子和电子一样在物质中也具有一定的射程, 这也使质子射线强度的衰减主要出现在其射程的 90% 以后的路程上。质子与物质作用过程的特点, 即小角度散射和强度衰减特点, 形成了质子射线照相检验技术的特点, 即利用质子的小角度散射, 可得到物体内部边界清晰的图象。利用质子射线强度的衰减主要出现在其射程的 90% 以后的路程上的特点, 质子射线照相检验技术与按指数规律衰减的 X 和 γ 射线照相检验技术相比, 可检出更小的厚度差变化。例如, 质子射线照相检验技术可容易地检出 0.05% (甚至 0.003%) 的厚度差, 而 X 射线照相检验技术一般可检出的厚度差为 0.5% ~ 1.0%, 图

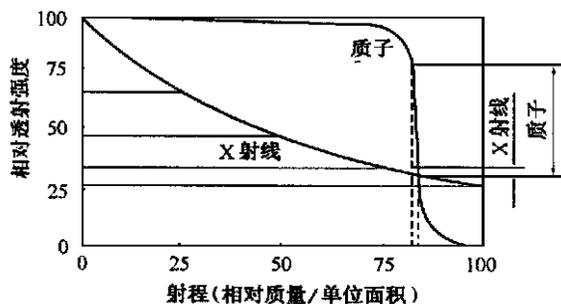


图 10-3 质子透射与 X 射线透射比较

10-3 给出了这种差异的说明。在采用质子射线照相检验技术时, 必须特别注意射线能量的选取, 能量必须与厚度相匹配, 否则难于检出小缺陷。

3 辐射测量技术

3.1 辐射探测器

辐射测量技术是利用射线与物质的相互作用来测量物体厚度、密度或成分等的无损检测技术, 也称非成像射线检测技术。射线源可为 γ 射线(包括 X 射线)、 β 射线和中子等。以下简要介绍有关辐射测量技术的一些基本内容。

辐射探测器可分气体电离探测器、闪烁探测器和半导体探测器三类。

3.1.1 气体电离探测器

射线与物质相互作用可引起电离, 电离的程度与射线能量相关, 也与被电离的物质相关。对空气和大部分气体, 产生一个电子-离子对需要的平均能量约为 34eV。在气体电离室中, 所产生的电离作用还与施加在电离室两极间的电压相关, 其关系如图 10-4 所示。气体电离探测器主要有电离室、正比计数器和盖革计数器三类, 其主要特点见表 10-2。

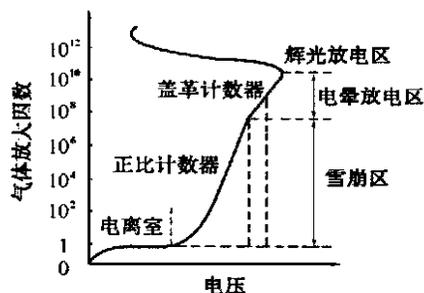


图 10-4 室电压对气体放大因数的影响

表 10-2 气体电离探测器特点比较

类别	工作电压/V	气体放大因数	分辨时间/s
电离室	200	1	—
正比计数器	600~900	$10^3 \sim 10^5$	10^{-6}
盖革计数器	1000~1500	$10^8 \sim 10^9$	2×10^{-4}

3.1.2 闪烁探测器

闪烁探测器由闪烁体和光电倍增管构成, 其基本结构见图 10-5。闪烁体在射线作用下发射可见光, 其光输出经光电倍增管转换为电脉冲, 从而实现辐射的检测。实际应用中一般采用固体闪烁体, 因而具有较高检测效率。常用闪烁体性能见表 10-3。

3.1.3 半导体探测器

半导体探测器可看作类似于气体电离探测器的

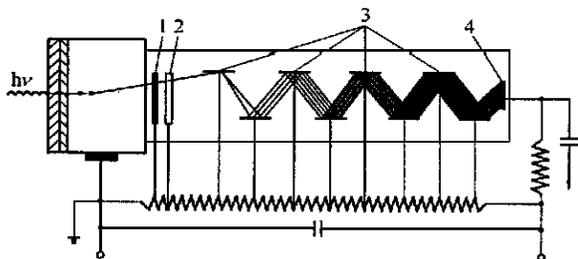


图 10-5 闪烁探测器基本结构

1 光阴极 2 聚焦板 3 倍增电极 4 收集极

表 10-3 常用闪烁体性能

闪烁体	相对发光效率/%	衰减时间/ns	发射波长/nm
NaI(Tl)	230	230	415
CsI(Tl)	95	1 100	540
ZnS(Ag)	300	11 000	450
塑料	40~ 50	2~ 3	390~ 423
蒽晶体	100	30	447

固态探测器。在半导体探测器中,电荷载体是辐射产生的电子-空穴对,在外电场的作用下电子-空穴对移动形成电流,收集电荷可测量射线的能量。

3.2 辐射测厚原理

X 和 γ 射线穿过物体时,由于与物质的相互作用,其强度将按如下规律衰减

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho T}$$

当 β 射线穿过物体的厚度比其射程小很多时,其强度的减弱也近似服从这一指数衰减规律,ρT 常称为

(上接第 441 页)

$$F_m = \frac{1}{\mu_0} B_m^2 S$$

若 $k_0 \ll 1$, 则 $\bar{F} \ll F_m$ 。即是说 \bar{F} 与 F_m 没有一个固定的关系,是随波形和脉冲的宽度而变化的。

还可将式(22)改写为

$$\bar{F} = \frac{1}{\mu_0} k_0 B_m^2 S \quad (23)$$

此式为一般情况下的通用关系式,表明 \bar{F} 是 k_0, B_m 和 S 三个因数的函数。

5 结语

(1) 本文讨论了电磁轭在几种情况下提升力与各影响因素的关系,并分析了其特点,从而提出了增大提升力的途径及其局限性,在实际应用中需特别注意。

(2) 由于磁粉探伤灵敏度与 B 的峰值有关^[3],因此,这里只考虑提升力与 B_m 的关系。由电磁轭提升力的通用关系式(式(23))可知,提升力 \bar{F} 不仅与

质量密度。

用透射法测厚,从上式可得

$$T = \frac{1}{\mu_m \rho} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

测量灵敏度为

$$\frac{\Delta I}{I} = -\mu_m \Delta(\rho T)$$

式中 Δ ——微分差

在散射法测厚中,由射线与物质的相互作用决定,在一定的厚度范围内,出射的散射线强度除了与入射射线的能量、强度和散射物体的原子序数有关外,还与物体的密度和厚度有关。因此,测量散射线强度,就可表征被测物体的密度和厚度。

3.3 常用的辐射测量技术

常用的辐射测量技术有 γ 射线衰减法,用于测量厚度和密度。荧光 X 射线分析,用于成分分析及涂层厚度测量。β 射线背散射法,用于测量涂层厚度。康普顿散射,用于测量厚度和密度。中子衰减和散射,用于测量氢含量和水分。其中 γ 射线衰减法应用最广。

辐射测量可通过测定透射射线、散射射线或激发的辐射强度和能量实现厚度、密度和成分等的测量,它可非接触、快速、准确、连续地进行。应根据测量要求和特点,采用不同的测量方式和探测器。

收稿日期: 2000-01-10

磁感应强度的峰值 B_m 有关,还与铁心截面积 S 及系数 k_0 有关,从而与励磁电流的波形有关。即是说, \bar{F} 不是 B_m 的单值函数,当 S 和 k_0 变化时,相同的 B_m 将会产生不同的 \bar{F} ,或者说,一定的 \bar{F} 并不反映一定的 B_m 。可见,在未限制参量 S 和 k_0 的条件下,用提升力来衡量一个电磁轭产生的 B_m 是困难的。

(3) 在分析提升力的过程中,还反映出了与 B_m 有关的因素,对设计人员来说,如何利用这些相关因素十分重要。如何更有效地反映电磁轭的性能,有待进一步探讨。

参 考 文 献

- 1 林锡忠 关于采用电磁铁“提升力”来反映磁粉探伤灵敏度的讨论 水电部第三届无损检测技术讨论会论文集(八), 1984
- 2 俞大光 电工基础 第2版,北京:高等教育出版社,1964
- 3 林锡忠 无损检测, 1989, 11(12): 333- 335

收稿日期: 1999-11-30

第十一讲 辐射防护

郑世才

(新立机器厂, 北京 100039)

SAFETY PROBLEMS IN RADIOLOGY

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 辐射防护概述

辐射,即通常所称的射线,按它与物质相互作用引起的电离情况可分为(致)电离辐射和非(致)电离辐射两类。任何射线与物质作用,无论是直接作用或间接作用,凡引起物质电离的辐射称为电离辐射,不能引起物质电离的辐射称为非电离辐射。电离辐射中包括直接致电离粒子和间接致电离粒子。直接致电离粒子(如电子、 β 射线、质子、 α 粒子等带电粒子)具有足够的动能,通过碰撞引起物质电离;间接致电离粒子(如中子、光子等非带电粒子)与物质作用时能够释放直接致电离粒子或引起原子核变化。非电离辐射(如红外线、微波等)能量低,不能引起物质电离。

人们很早就认识到电离辐射对人体的危害作用,并注意到安全防护问题,辐射防护就是研究该问题的一个学科。严格说来,辐射防护是原子能科学技术的一个重要分支,它研究的是人类免受或少受电离辐射危害的一门综合性边缘学科。其基本任务是保护从事放射性工作的人员、公众及其后代的健康与安全,保护环境,促进原子能事业的发展。辐射防护研究的主要内容包括辐射剂量学、辐射防护标准、辐射防护技术、辐射防护评价和辐射防护管理等。辐射剂量学研究辐射剂量及辐射剂量的测量。辐射防护标准是实施辐射防护的依据,目前各国都是根据ICRP(国际放射性辐射防护委员会)的建议,结合本国情况制订相应标准。辐射防护评价包括对辐射设备、辐射安全、辐射对环境的污染等的评价。

1977年ICRP发表了第26号出版物,对放射生物学、剂量限制制度和防护标准等辐射防护方面提出了新建议。1978年ICRP发表了第28号出版物,

对第26号出版物的一些条文作了补充和修正。1979年ICRP发表了第30号出版物,论述了对放射性核素年摄入量的限制等问题。我国于1960年首次颁布《放射性工作卫生防护暂行规定》。1974年经修订后,作为国家标准GBJ8-74《放射防护规定》发布。1984年进一步修订,发布了国家标准GB4792-84《放射卫生防护基本标准》。国家环境部门1988年发布了国家标准GB8703-88《辐射防护规定》,1989年发布了国家标准GB11924-89《辐射安全培训规定》。1996年发布了国家标准GB16387-96《放射工作人员的健康标准》。国务院总理于1989年10月24日签署了中华人民共和国国务院第44号令《放射性同位素与射线装置放射防护条例》。1997年6月5日国家卫生部发布第52号令《放射工作人员健康管理规定》(1997年9月1日起执行)。以上这些标准和文件,应作为处理辐射防护问题的依据。

工业射线无损检测在辐射防护方面面对的主要问题是外照射防护。本讲座将针对工业射线无损检测,介绍辐射防护的基本概念和相关内容。

2 辐射量与辐射生物效应

2.1 主要辐射量

现在广泛使用的描述辐射的物理量主要是照射量、吸收剂量和剂量当量。

照射量是描述X射线或 γ 射线使空气产生电离能力的物理量,它不适用于其它辐射,也不适用于其它物质。吸收剂量表示了各种物质吸收电离辐射能量的情况,它适用于任何类型的电离辐射,也适用于任何物质。在研究辐射防护时必须考虑不同辐射的辐射损伤的差别。为此,引入辐射的品质因数,常记为 Q ,它表示吸收能量微观分布对辐射生物效应的影

响; 引入修正因子, 常记为 N , 表示吸收剂量的空间、时间等分布不均匀性对辐射生物效应的影响。剂量当量则定义为吸收剂量与辐射品质因数及修正因子之积, 用于统一评价不同类型的电离辐射对生物体产生的辐射损伤。

照射量、吸收剂量和剂量当量的国际单位制计量单位和我国法定计量单位与以前的专用计量单位的关系见表 11-1。

表 11-1 照射量、吸收剂量和剂量当量的计量单位

辐射量	我国法定计量单位	专用单位	两种单位的关系
照射量	库仑/千克(C/kg)	伦琴(R)	1C/kg= 3.876 × 10 ³ R
吸收剂量	戈瑞(Gy)	拉德(rad)	1Gy= 100rad
剂量当量	希沃特(Sv)	雷姆(rem)	1Sv= 100rem

直接测量吸收剂量是比较困难的, 但可以通过仪器测量照射量来计算被辐照物体的吸收剂量。记辐照场中某点的照射量为 X (C/kg), 该点空气的吸收剂量为 D_a (Gy), 则可得到空气的吸收剂量与照射量的关系为

$$D_a = 33.7X$$

如果照射量的单位为伦琴, 则它们的关系为

$$D_a = 8.69 \times 10^{-3}X$$

因此, 只要知道了辐照场中某点的照射量, 就可以计算该点空气的吸收剂量。在一定的条件(电子平衡)下, 不同物质的吸收剂量之间存在一定的关系, 因此, 可以通过空气的吸收剂量求出其它物体的吸收剂量。实际应用中常直接将这种关系写成物体的吸收剂量与照射量的关系

$$D_m = f \cdot X$$

式中 D_m ——物体的吸收剂量, Gy

X ——物体所在处的照射量, C/kg

f ——换算因子, Gy · kg/C

换算因子的值与射线能量有关, 也与被辐照物体性质有关, 人体的换算因子值可从有关手册查到。

2.2 辐射生物效应

辐射作用于物体时由于电离作用, 将造成生物体的细胞、组织、器官等的损伤, 引起病理反应, 这一现象称为辐射生物效应。辐射对生物体的作用是一个极其复杂的过程, 生物体从吸收辐射能量开始到产生生物效应, 要经历许多不同性质的变化, 一般认为将经历四个阶段的变化, 即 物理变化阶段, 持续约 10^{-16} s, 细胞被电离。 物理—化学变化阶段, 持续约 10^{-6} s, 离子与水分子作用, 形成新产物。 化学变化阶段, 持续约几秒, 反应产物与细胞分子作

用, 可能破坏复杂分子。 生物变化阶段, 持续约几十分钟至几十年, 上述化学变化可能破坏细胞或其功能。

辐射生物效应可表现在受照者本身, 也可以出现在受照者的后代。表现在受照者本身的称为躯体效应, 出现在受照者后代时称为遗传效应。躯体效应按显现的时间早晚又分为近期效应和远期效应。

从辐射防护的观点, 全部辐射生物效应可以分为随机效应和非随机效应两类。

随机效应是效应的发生率不存在剂量阈值的效应。对于正常的低剂量照射情况, 从辐射防护的目的出发, 常假定随机效应的发生率与剂量之间存在线性关系, 即剂量越大随机效应的发生率越大。对随机效应进行定量描述的重要概念是危险度和权重因子。危险度定义为单位剂量当量诱发受照器官或组织恶性疾患的死亡率, 或出现严重遗传疾病的发生率。权重因子定义为各器官或组织的危险度与全身受到均匀照射的危险度之比, 记为 w 。表 11-2 列出了人体各器官和组织的危险度和权重因子。

表 11-2 器官和组织的危险度和权重因子

器官、组织	效 应	危险度/Sv ⁻¹	权重因子 w
生殖腺	二代重大遗传疾病	4×10^{-3}	0.25
乳 腺	乳腺癌	2.5×10^{-3}	0.15
红骨髓	白血病	2×10^{-3}	0.12
肺	肺 癌	2×10^{-3}	0.12
骨	骨 癌	5×10^{-4}	0.03
甲状腺	甲状腺癌	5×10^{-4}	0.03
其它组织	癌	5×10^{-3}	0.30*
全 身	诱发癌症	1×10^{-2}	—
	一代遗传疾病	4×10^{-3}	—

* 选取其它五个接受剂量当量最大的器官或组织, 每个器官或组织的权重因子取为 0.06, 其它器官或组织不计。胃、小肠、大肠上段、大肠下段可作为四个独立器官。

非随机效应是指存在阈值的效应, 这种生物效应只有当剂量超过一定的值之后才发生, 效应的严重程度也与剂量的大小相关。因此, 只要限制剂量当量就可以避免非随机效应的发生。一些器官或组织的非随机效应阈值如表 11-3 所示。

2.3 辐射损伤

辐射损伤就是电离辐射产生的各种生物效应对人体造成的损伤。它可以来自人体之外的辐射照射, 也可以产生于吸入体内的放射性物质的照射。辐射损伤过程主要有急性损伤和慢性损伤两种。

急性损伤是短时间内全身受到大剂量(如数戈

表 11-3 非随机效应的剂量阈值

器官、组织	效 应	单次照射的 剂量阈值	多次照射累积 剂量阈值/Gy
生殖腺	永久性不育	3Gy	—
眼晶状体	晶体混浊	0.5~2.0Sv	> 15
红骨髓	造血机能损伤	1.5Sv	> 20
皮 肤	难以接受的变化	—	> 20

[瑞])照射产生的辐射损伤。典型的急性损伤表现为三个阶段,即 前驱期:受照者出现恶心、呕吐等状况,约持续1~2d。 潜伏期:一切症状消失,可持续数日或数周。 发症期:表现出辐射损伤的各种症状,如呕吐、腹泻、出血、嗜眠及毛发脱落等,严重者导致死亡。

急性损伤主要是中枢神经系统损伤、造血系统损伤和消化系统损伤,也可以造成性腺损伤和皮肤损伤等。由于急性损伤将造成严重后果,所以必须防止短时间大剂量的照射。

慢性损伤是长时间受到超过容许水平的低剂量照射,在受照后数年甚至数十年后出现的辐射生物效应。对慢性损伤目前尚难以判定辐射与损伤之间的因果关系。目前认为慢性损伤主要有白血病、癌症(皮肤癌、甲状腺癌、乳腺癌、肺癌、骨癌等)、再生障碍性贫血和白内障等。

除上述两种情况外,实际存在的另一种情况是慢性小剂量照射,即长时期受到低于最大容许剂量的照射。对于这种照射的辐射生物效应,过去是从高剂量和高剂量率的效应外推进行评估的,近年来的资料表明,低剂量和低剂量率引起的辐射生物效应低于从高剂量和高剂量率外推得出的结果。慢性小剂量照射产生的辐射损伤可能会诱发癌症。一种观点认为,机体对辐射损伤具有修复功能,当辐射损伤较轻时,机体的修复作用将使辐射损伤表现不出症状。关于人的慢性小剂量照射情况的直接经验很少,尚需进一步研究。

辐射损伤与许多因素有关,主要是辐射性质、剂量、剂量率、照射方式、照射部位和范围等。

3 辐射防护原则、剂量限制体系和防护技术

3.1 辐射防护原则

辐射防护的目的是防止发生有害的非随机效应,将随机效应的发生率限制在被认为是可以接受的水平范围之内,从而尽量降低辐射可能造成的危害。为了实现上述防护目的,在辐射防护中应遵循三项原则,即正当化原则、最优化原则和限值化原则。

正当化原则要求,在任何包含电离辐射照射的实践中,应保证这种实践对人群和环境产生的危害小于给其带来的利益,即获得的利益必须超过付出的代价,否则不应进行这种实践。

最优化原则要求,应避免一切不必要的照射,任何伴随电离辐射照射的实践,在符合正当化原则的前提下,应保持在可以合理达到的最低照射水平。

限值化原则要求,在符合正当化原则和最优化原则的前提下所进行的实践中,应保证个人所接受的照射剂量当量不超过规定的相应限值。

3.2 剂量限制体系

按照辐射防护的目的和上述原则,辐射防护标准关于剂量当量的限值规定主要包括 对非随机效应规定了不同器官或组织的最大容许剂量当量限值。对随机效应依据可以接受的水平,以危险度为基础规定全身均匀照射的年剂量当量限和非均匀照射时各器官和组织容许的有效剂量当量限值。

有效剂量当量定义为器官或组织一年接受的剂量当量与该器官或组织的相对危险度权重因子之积。对整个人体在非均匀照射时,年有效剂量当量为

$$H_E = \sum W_T \cdot H_T$$

上述对随机效应非均匀照射的规定则是

$$H_E = H_{E,lim}$$

式中 H_E ——全身一年的有效剂量当量

W_T ——器官或组织的相对危险度权重因子

H_T ——器官或组织一年内接受的剂量当量

$H_{E,lim}$ ——全身均匀照射时的年剂量当量限值

显然,这种规定意味着 $H_{E,lim}$ 仅是一个“可以接受的水平”的限值,并不是保证不发生辐射损伤的限值。因此,在实践中应遵循最优化原则,尽量降低受到的辐射照射。对于工业射线检测人员,辐射防护标准主要是对剂量当量限值、特殊照射、应急照射三方面作出规定。表 11-4 列出了关于剂量当量限值的主要规定。

表 11-4 GB 4792-84 关于剂量当量限值的规定

效应	照射对象 或方式	年剂量当量限值/mSv·a ⁻¹		连续三个月 的剂量当 量限值/mSv
		放射性 职业人员	公众 人员	
非 随机 效应	眼晶状体	150	50	75
	其它单个 器官或组织	500	50	250
随机 效应	全身均匀外照射	50	5	25
	全身非均 匀外照射	$H_T \cdot W_T$	$H_T \cdot W_T$	$H_T \cdot W_T$
		50	5	25

对于一些特殊情况, 有时需要少数人员接受超过年剂量当量限值的照射, 这种情况属于特殊照射。为了制止事故的扩大或进行抢救、抢修, 有些工作人员需要接受超过正常剂量当量限值的照射, 这种照射称为应急照射。对特殊照射和应急照射 GB 4792 - 84 也作出了相应的规定。

对射线检测人员, 应考虑的主要是外照射的辐射防护, 通过防护控制外照射剂量, 使其保持在可以做到合理的最低水平, 不超过国家辐射防护标准规定的剂量当量限值。

3.3 外照射防护方法

对外照射主要从照射时间、照射距离和屏蔽三方面来控制人员所受到的照射剂量。

常用的 X 射线和 γ 射线屏蔽材料是铅和混凝土。图 11-1 和图 11-2 是宽束 X 射线分别在铅和混凝土中的减弱曲线, 图中给出了透射线强度与入射线强度比与所需屏蔽厚度的关系, 从这些曲线可方便地确定所需的屏蔽厚度。

4 辐射防护监测

辐射防护监测是估算和控制公众及放射性工作人员所受辐射剂量的测量工作, 它包括测量纲要制定、测量实施和结果解释。辐射防护监测包括个人监测、场所监测、环境监测、流出物监测和事故监测。

个人监测主要是测量被辐射照射的个人所接受的剂量, 测量工作人员接受的累积剂量, 可避免工作人员受到超剂量的照射, 同时也有助于分析超剂量的原因, 为治疗和研究辐射损伤提供数据。场所监测

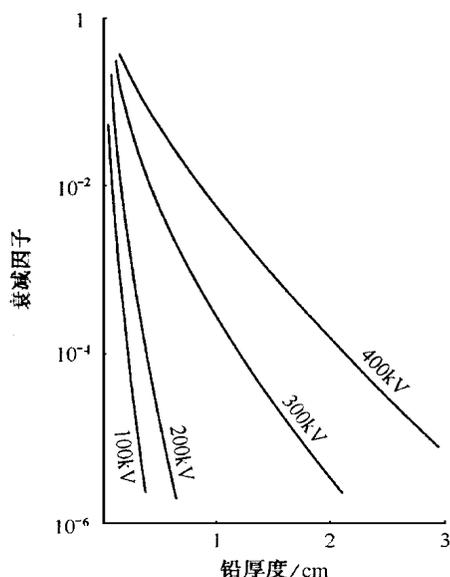


图 11-1 宽束 X 射线在铅中的减弱曲线

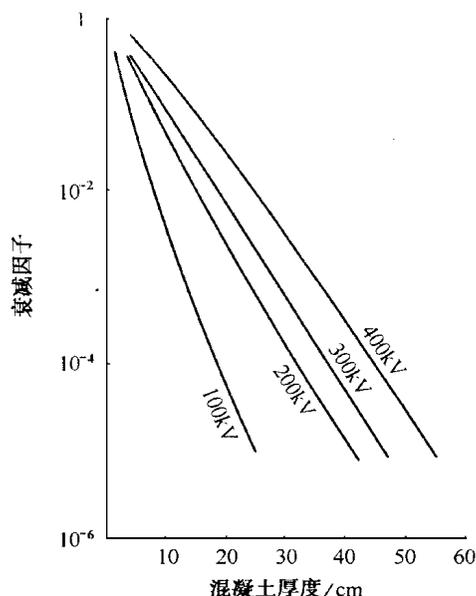


图 11-2 宽束 X 射线在混凝土中的减弱曲线

和环境监测主要是测定工作场所和周围环境的辐射水平, 从而预测工作人员和公众人员可能受到的辐射程度, 也可以为各种辐射防护设计提供准确的数据, 并以此采取正确的防护措施, 确保工作人员和公众人员的安全。流出物监测是对进行放射性工作的单位之排放物进行监测, 测量其排出物中可能含有的放射性核素的活度与总量, 避免其对环境造成污染, 对公众和社会造成危害。事故监测是迅速确定有关数据, 以便采取措施。

对工业射线检测工作来说, 主要是进行个人剂量监测和场所辐射水平监测。

剂量监测方法按原理可分为:

- (1) 电离法 利用辐射对气体的电离作用, 测定产生的电离电流, 从而测出辐射剂量。
- (2) 闪烁法 利用闪烁体在辐射作用时的荧光辐射, 通过光电倍增管测定电流, 以测出辐射剂量。
- (3) 感光法 利用辐射对胶片的感光作用, 测定产生的黑度, 以此测出辐射剂量。
- (4) 固体发光法 利用辐射可引起一些物质发生物理变化, 如热释光、光致发光等测量辐射剂量。
- (5) 化学法 利用辐射可引起一些物质发生化学变化, 如硫酸亚铁的二价铁离子在辐射作用下转变为三价铁离子等测出辐射剂量。
- (6) 热能法 利用辐射在物质中损失的能量转化为热, 使物体温度升高, 然后测出辐射剂量。

不同的方法有不同的特点, 个人剂量监测常用的剂量计特点如表 11-5 所示, 场所剂量监测常用的剂量计是携带式照射量率计和巡测仪。巡测仪主要

表 11-5 常用个人剂量计性能比较

个人剂量剂种类	测量的辐射类型	可测剂量范围/ $\times 10^2\text{Sv}$	能量响应	衰退	重复测读	重复使用
胶片式	β X, γ , 热中子	0.5~15	80keV 以上与能量无关	明显	可以	不可以
光致荧光式	X, γ , 热中子	0.05~ 2×10^3	40keV 以上与能量无关	很小	可以	可以
热释光式	β X, γ , 热中子	$10^2 \sim 10^5$	30keV 左右为 30%	很小	不可以	可以

有电离室、闪烁计数器、盖革计数管和正比计数器剂量仪,它们的特点可参阅第十讲。在选用剂量仪器时考虑的主要因素是仪器灵敏度、量程、能量响应、响应时间和抗干扰能力等。

5 辐射防护管理

5.1 辐射防护管理的一般规定

我国的有关条例和标准,对辐射防护管理作出的一般规定可归纳为下列七个方面。

(1) 国家对放射工作实行许可登记制度,许可证登记证由卫生和公安部门办理。

(2) 伴有辐射照射的实践及设施的新建、扩建、改建和退役必须事先向主管部门和环保部门提交辐射防护报告,经审查批准方可实施。

(3) 设施的选址、设计、运行和退役阶段均应进行辐射防护评价,运行阶段更应定期进行。辐射防护评价包括辐射防护管理、技术措施和人员受照情况,其基本要求是评价是否符合辐射防护最优化原则。

(4) 从事辐射工作的单位应设置独立于生产运行部门的辐射防护和环境保护机构。

(5) 从事辐射工作单位必须建立辐射防护和环境保护岗位责任制。

(6) 从事辐射工作的人员应经过辐射防护的培训和考核,取得合格证方可工作。辐射工作人员应享受劳动保护和相应待遇。

(7) 辐射工作场所应设有电离辐射标志(样式、尺寸见 GB 8703-88)。

5.2 辐射照射控制管理

对工业射线无损检测,按 GB 4792-84 的规定,符合下列条件的单位或场所,称为放射性工作单位或场所:

(1) 操作带有放射性物质的仪器、仪表或产生电离辐射的设备、装置,当不加防护时源的表面处的剂量率 $> 0.04\text{mSv/h}$ 时。工作位置的剂量率 $> 2.5\mu\text{Sv/h}$ 时。间断工作的年有效剂量当量 $> 5\text{mSv}$ 时。

(2) 使用电子加速器和操作产生电子束的装置,电子束的能量 $> 5\text{keV}$,工作位置的剂量当量符合(1)中的规定。

在放射性工作单位或场所,工作人员的工作条件分为三种:

(a) 一年照射的有效剂量当量可能 $> 15\text{mSv}$ 。对该工作条件要有个人剂量监测,对场所要有经常性监测,建立个人受照剂量和场所监测档案。

(b) 一年照射的有效剂量当量不太可能 $> 15\text{mSv}$,但可能 $> 5\text{mSv}$ 。对这种工作条件要有个人剂量监测,对场所要定期监测,建立个人受照剂量档案。

(c) 一年照射的有效剂量当量不太可能 $> 5\text{mSv}$ 。对这种工作条件可根据需要进行监测,并作记录。

GB 8703-88 对此作了稍微不同的规定。

5.3 辐射工作人员的健康管理

GB 8703-88 第 11.3 条规定,“辐射工作人员”是指“其职业岗位伴有辐射照射的工作人员”,也称为“放射工作人员”。从事辐射工作人员的健康水平应符合 GB 16387-96 或 GB 8703-88 标准附录 K 的要求。对辐射工作人员的健康管理,国家卫生部发布的第 52 号令《放射工作人员健康管理规定》作了具体规定,它包括总则、放射工作人员证的管理、个人剂量管理、健康管理、罚则和附则六个章节。

《放射工作人员健康管理规定》规定,放射工作人员上岗实行“放射工作人员证”制度,该证由省级卫生行政部门审核批准颁发。申领该证人员必须具备的基本条件为:

(1) 年满 18 周岁,健康合格。

(2) 遵守辐射防护法规和制度,接受个人剂量监督。

(3) 掌握辐射防护知识和有关法规,经培训考核合格。

(4) 具有高中以上文化水平和相应的专业技术知识和能力。

有关标准和卫生部发布的第 52 号令,对辐射工作人员的健康管理均作出了规定。主要包括常规医学监督和异常受照人员的医学处理。常规医学监督的目的是评价辐射工作人员的健康状况,确保辐射工作人员的健康在开始从业和从业期间都适应工作。定期医学检查一般一年一次,应由授权的医疗

信息

加入 BBS 讨论 发挥你的才智

为促进无损检测事业的发展,交流无损检测知识,河南省无损检测学会 1999 年开通了无损检测界的电子公告板(BBS),旨在为我国无损检测人员提供一种快捷的现代化服务手段,为决策层提供可靠的决策依据。在这里你可以提出自己在实际工作中遇到的难题和需求,也可以发挥自己的专长,为同行出谋划策、排忧解难,你也可以从这里找到国内其它有关无损检测的网址并进入该网,会晤无损检测界的老朋友,也可结识新朋友。

过去,由于我们的重视不够,致使众多业内朋友不知此网址,以至没有发挥其应有作用。也有许多热爱因特网的朋友从不同的媒体了解到了该站点,在那里提出了许多日常工作中遇到的问题,希望有关专家、学者和同行能给予解答和帮助,其中不乏射线、超声等非常实际的应用问题。毋庸置疑,这些问题的解决无论对实际生产还是学术研究都是极有价值的。

我们有许多国内外著名的无损检测专家,也有一大批年轻有为的后起之秀和更多的《无损检测》杂志的读者群,他们大多是有丰富实际经验的无损检

测工作者,如果都加入 BBS 讨论交流,将对我国无损检测事业的发展有巨大的推动作用。

BBS 既是技术交流的园地,也是专家学者发挥才智的杏坛。既是新生力量学习的好地方,也是有成就者进一步提高自己和帮助别人的好去处。它将团结我国的无损检测界的科技工作者,为我们的无损检测事业作出更大的贡献。

国外在这方面的工作开展得如火如荼,我们也要乘因特网这班快车,把我们的无损检测事业搞得更兴旺发达。

BBS 网址: <http://www.ndt.com.cn/bbs/bbsindex.html> 或 <http://www.ChinaNDT.com/bbs/bbsindex.html>

同时,我们还开通了电子邮件列表,有兴趣的朋友也可在这里找到,方法是在 <http://www.ndt.com.cn/Products/x-ray/x-ray.htm> 左边的 MAIL LISTING 的目录处点一下即可。

如欲函询,请与河南省无损检测学会秘书处联系,地址:郑州兴华南街 5 号 中南无损检测仪器厂,邮编:450052。(吴成南、冉启芳、赵洪桥)

机构承担,医学监督记录保存时间应不少于其停止辐射工作后 30a(年)。对甲种工作条件下的辐射工作人员,必须进行常规医学监督。

5.4 辐射事故管理

辐射事故按性质分为五类,即超剂量照射事故、表面污染事故、丢失放射性物质事故、超临界事故和放射性物质泄漏事故;按危害程度分为三级,即一般事故、较大事故和重大事故。

辐射工作单位应建立事故报告制度和管理制度,不论发生何种辐射事故,均应及时填报事故报告表。重大事故在其发生后 24h 内应上报主管部门和监督部门。辐射工作单位应建立全面、系统和完整事故档案。

5.5 放射性物质管理

关于放射性物质的管理,国务院第 44 号令作出的规定要点如下:

(1) 放射性同位素不得与易燃、易爆、腐蚀性物品一同存放。存放场所必须有防火、防盗、防泄漏措施,专人负责保管。

(2) 贮存、领取、使用和归还放射性同位素必须进行登记、检查,账物必须相符。

(3) 从事放射性同位素的订购、销售、转让、调拨和借用的单位或个人,必须有许可登记证,并只限于在许可登记证的范围内活动,并向同级卫生和公安部门备案。

(4) 放射性废水、废气和固体废物排放,必须先向所在省、自治区、直辖市的环保部门递交环境影响报告,经批准后到所在县以上卫生行政部门申请办理许可证,并向公安部门登记。

(5) 托运、承运和自行运输放射性同位素或装过放射性同位素的空容器,必须按国家有关运输规定进行包装和剂量检测,经县以上运输和卫生行政部门检查后方可运输。

(6) 生产的装有放射性同位素的设备、射线装置和辐射防护器材,必须符合辐射防护规定。

收稿日期:1999-08-10

射线检测
基础讲座

第十二讲 射线照相检验中的计算问题

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

CALCULATION IN RADIOGRAPHY

Zheng Shicai

(Xinli Machinery Plant, Beijing)

1 概述

在射线照相检验的培训教材中,所设计的计算问题大致可归纳为以下几类:

(1) 基本理论和概念计算 包括射线衰减规律计算、放射性衰变规律计算和求散射比(综合性题)的计算。

(2) 曝光量计算 包括由曝光因子直接求曝光量或曝光时间、由曝光因子结合胶片感光特性曲线求曝光量或曝光时间、由曝光因子结合放射性衰变规律求曝光量或曝光时间和由曝光量波动结合胶片感光特性曲线作曝光量或曝光时间修正。

(3) 影象质量问题计算 包括求黑度、灵敏度、对比度、缺陷尺寸以及影象对比度比的计算。

(4) 胶片感光特性曲线与曝光曲线结合计算 包括求增感系数、胶片感光特性曲线的梯度、感光速度和阶梯透照的厚度与黑度的计算。

(5) 透照布置计算 包括求几何不清晰度、焦距最小值、100%透检时最少拍片张数或一次透照有效长度以及椭圆成象的平移距离和有效检验长度的计算。

(6) 辐射防护简单计算 包括求外照射的防护距离、时间和屏蔽厚度以及简单辐射防护设计中的屏蔽厚度的计算。

2 例题

显然,III级人员应能进行综合性计算,下面给出一些例题。

【例1】用X射线机透照一铸件,焦距为500mm,管电流5mA,曝光时间4min,底片黑度1.0。现改用750mm的焦距,管电流15mA,为使底

片黑度达到1.5,求这时曝光时间应为多少?(胶片特性曲线上黑度1.0对应的 $\lg H = 1.8$,黑度1.5对应的 $\lg H = 2.1$)

解:记 $D_0 = 1.0$, $i_0 = 5\text{mA}$, $t_0 = 4\text{min}$, $F_0 = 500\text{mm}$, $\lg H_0 = 1.8$, $D = 1.5$, $i = 15\text{mA}$, $F = 750\text{mm}$, $\lg H = 2.1$ 。设 t 为改变透照条件后的曝光时间。

因为 $\lg H - \lg H_0 = 2.1 - 1.8 = 0.3$

所以
$$\frac{H}{H_0} = 10^{0.3} = 2$$

故
$$\frac{i \cdot t}{F^2} = \frac{i_0 \cdot t_0}{F_0^2} \times 2$$

所以
$$t = \frac{2i_0 t_0 F^2}{i F_0^2} = 6\text{min}$$

【例2】用 ^{192}Ir γ 射线源透照1.2m直径的环焊缝,曝光时间为24min,若在透照1.2m直径的容器焊缝后30d再透照直径为1.5m的容器焊缝,问应选用多长的曝光时间?

解:记 A_0 为源的初始放射性活度, A 为30d后源的放射性活度, $R_0 = 1.2/2\text{m}$, $R = 1.5/2\text{m}$, $t_0 = 24\text{min}$, $\Delta t = 30\text{d}$, T 为源的半衰期, $T = 74\text{d}$ 。设 n 是30d所相应的半衰期个数, t 为30d后透照容器焊缝所需的曝光时间。

由
$$\frac{A \cdot t}{R^2} = \frac{A_0 \cdot t_0}{R_0^2}$$

得
$$t = \frac{A_0 \cdot t_0 \cdot R^2}{A \cdot R_0^2}$$

因
$$A = \left(\frac{1}{2}\right)^n \cdot A_0$$

又
$$\Delta t = n \cdot T$$

故
$$n = \frac{30}{74} = 0.405$$

$$A = \left(\frac{1}{2}\right)^{0.405} \cdot A_0 = 0.755A_0$$

所以

$$t = \frac{24 \times 1.5^2 A_0}{1.2^2 \times 0.755A_0} = 49.7 \text{ min}$$

也可利用射线指数衰减律求解。

【例 3】用 X 射线透照工件, 无增感时曝光 12min 得底片黑度为 2.0, 增感时曝光 2min 得底片黑度为 1.5, 胶片特性曲线在黑度为 1.2~3.8 范围内的平均梯度为 3.5, 求增感屏在黑度为 1.5 时的增感系数。

解: 记增感系数为 k , 透照时管电流为 i , 无增感时的曝光时间为 t 。

$$\text{因为 } D = G \lg H + C$$

在相同的透照电压和焦距下有

$$H = mE \quad (m \text{ 为一比例系数})$$

$$\text{所以有 } 2.0 = 3.5 \lg(m \times 12 \times i) + C$$

$$1.5 = 3.5 \lg(m \cdot i \cdot t) + C$$

$$\text{可得 } 0.5 = 3.5 \lg \frac{12}{t}$$

$$t = \frac{12}{10^{(0.5/3.5)}} = 8.6 \text{ min}$$

$$\text{所以 } k = \frac{8.6}{2} = 4.3$$

【例 4】用 X 射线透照两块厚度分别为 $T_1 = 15\text{mm}$, $T_2 = 18\text{mm}$ 的板, 若射线的线衰减系数不随透照厚度改变, T_1 厚度板的散射比为 1.4, 两厚度板的曝光量比为 2.4, 射线的半值层为 1.5mm, 求两厚度板散射线强度比。

解: 记射线的半值层 $H = 1.5\text{mm}$, 两种厚度板的散射比分别为 n_1 和 n_2 , 曝光量分别为 E_1 和 E_2 , 入射线强度都为 I_0 , 透射线强度分别为 I_1 和 I_2 , 透射的一次射线强度分别为 I_{D1} 和 I_{D2} , 透射的散射线强度分别为 I_{S1} 和 I_{S2} 。

$$\text{因为 } \begin{cases} I_1 = I_{D1} + I_{S1} = I_{S1} \left(1 + \frac{1}{n_1}\right) \\ I_2 = I_{D2} + I_{S2} = I_{S2} \left(1 + \frac{1}{n_2}\right) \end{cases}$$

$$\text{所以 } \frac{I_{S1}}{I_{S2}} = \frac{I_1(1+n_2)n_1}{I_2(1+n_1)n_2}$$

$$\text{又 } E_1 = i_1 t \quad E_2 = i_2 t$$

而曝光量又与射线强度成正比, 所以

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_1}{I_2} = 2.4$$

$$\text{从 } I_1 = I_{D1} + I_{S1}, \quad I_2 = I_{D2} + I_{S2}$$

$$\text{得 } I_1 = I_0 e^{-\mu T_1} (1 + n_1), \quad I_2 = I_0 e^{-\mu T_2} (1 + n_2)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1+n_1}{1+n_2} e^{-\mu(T_1-T_2)}$$

$$\text{又 } \mu = \frac{\ln 2}{H}$$

$$\text{故 } \frac{1+n_2}{1+n_1} = \frac{I_2}{I_1} e^{-\mu(T_1-T_2)} = 1.67$$

$$\text{所以 } n_2 = 3$$

$$\frac{I_{S1}}{I_{S2}} = 1.86$$

【例 5】用一定射线进行透照, 底片上最小可识别 0.4mm 直径的丝 (其对比度 $\Delta D_{\min} = 0.02$), 如射线透照的参数不变, 只加强了对散射线的控制, 这时底片上最小可识别 0.2mm 直径的丝 (其 $\Delta D_{\min} = 0.03$), 求这时底片上 0.4mm 直径的丝的对比度为原对比度的几倍?

解: 记原底片上 $d_1 = 0.4\text{mm}$ 时的对比度为 ΔD_1 , 即 $\Delta D_{\min 1} = \Delta D_1 = 0.02$, 后来的底片上 $d_1 = 0.4\text{mm}$ 时的对比度为 ΔD_2 , $d_2 = 0.2\text{mm}$ 时的对比度为 $\Delta D_{\min 2} = 0.03$, n_1 和 n_2 分别为两次透照的散射比, G 为射线胶片的梯度值。

$$\text{因为 } \Delta D_1 = - \frac{0.434 \mu G d_1}{1+n_1}$$

$$\Delta D_2 = - \frac{0.434 \mu G d_1}{1+n_2}$$

$$\text{所以 } \frac{\Delta D_2}{\Delta D_1} = \frac{1+n_1}{1+n_2}$$

$$\text{又 } \Delta D_{\min 1} = - \frac{0.434 \mu G d_1}{1+n_1}$$

$$\Delta D_{\min 2} = - \frac{0.434 \mu G d_2}{1+n_2}$$

$$\text{得 } \frac{\Delta D_{\min 2}}{\Delta D_{\min 1}} = \frac{(1+n_1)d_2}{(1+n_2)d_1}$$

$$\text{故 } \frac{\Delta D_2}{\Delta D_1} = \frac{1+n_1}{1+n_2} = \frac{\Delta D_{\min 2} d_1}{\Delta D_{\min 1} d_2} = 3$$

【例 6】环焊缝的外径为 600mm , 壁厚为 16mm , 采用射线源在外部的单壁法透照, 若焦距为 1000mm , 控制透照厚度比 k 为 1.1, 求一次透照的有效长度。

解: 记横向裂纹检验角为 β , 半照射角为 θ , 射线源至焊缝的距离为 f , 一次透照的有效长度为 L 。

因为壁厚 T 与外径 D 之比 $T/D = 16/600 = 0.027$ 很小, 所以近似有

$$\cos \beta = \frac{1}{k}$$

$$\text{得 } \beta = 24.6^\circ$$

$$\text{因为 } \sin \theta = \frac{\sin \beta}{1 + \frac{2f}{D}} = 0.09726$$

所以 $\theta = 5.6^\circ$

而
$$L = \frac{TD(\beta - \theta)}{180}$$

最后得到 $L = 199\text{mm}$

【例 7】X 射线机的曝光曲线示于图 12-1, 胶片的感光特性曲线示于图 12-2。在此条件下透照阶梯试块(图 12-3), 阶梯试块厚度 $T_B = 12\text{mm}$, $T_A = 10\text{mm}$ 。若透照时底片上 T_B 处的黑度为 2.0, 求底片上 T_A 处的黑度 D_A 为多少?

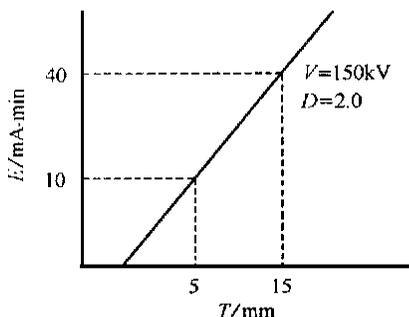


图 12-1 X 射线机的曝光曲线

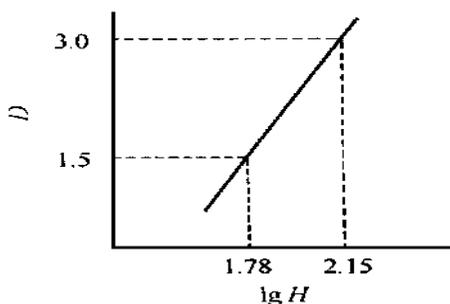


图 12-2 胶片特性曲线

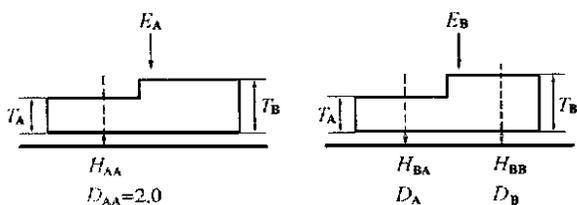


图 12-3 阶梯透照符号标注示意图

解: 记使 T_B 区得到黑度 $D_B = 2.0$ 时的曝光量为 E_B , 使 T_A 区得到黑度 $D_{AA} = 2.0$ 时的曝光量为 E_A , 曝光曲线中对应厚度为 15 和 5mm 的曝光量分别为 E_2 和 E_1 , $E_2 = 40\text{mA} \cdot \text{m} \cdot \text{in}$, $E_1 = 10\text{mA} \cdot \text{m} \cdot \text{in}$, 胶片特性曲线中 $\lg H_3 = 2.15$, $\lg H_{1.5} = 1.78$,

从胶片特性曲线函数关系

$$D = G \lg H + C_1$$

有 $D_B = G \lg H_{BB} + C_1$

$$D_A = G \lg H_{BA} + C_1$$

所以 $D_A = D_B + G(\lg H_{BA} - \lg H_{BB})$

从图 12-2 可知

$$D_3 = G \lg H_3 + C_1$$

$$D_{1.5} = G \lg H_{1.5} + C_1$$

所以 $G = \frac{D_3 - D_{1.5}}{\lg H_3 - \lg H_{1.5}} = 4.05$

对同一胶片如黑度相同时曝光量应相等, 故有

$$H_{BB} = H_{AA}$$

$$\frac{H_{BA}}{H_{BB}} = \frac{H_{BA}}{H_{AA}}$$

在相同的透照电压和焦距下透照, 有

$$H = mE \quad (m \text{ 为一比例系数})$$

所以有 $\frac{H_{BA}}{H_{BB}} = \frac{H_{BA}}{H_{AA}} = \frac{E_B}{E_A}$

即 $\lg H_{BA} - \lg H_{BB} = \lg E_B - \lg E_A$

从曝光曲线函数关系

$$\lg E = kT + C_2$$

有 $\lg E_B = kT_B + C_2$

$$\lg E_A = kT_A + C_2$$

所以 $\lg E_B - \lg E_A = k(T_B - T_A)$

从图 12-1 可知

$$\lg E_2 = kT_2 + C_1$$

$$\lg E_1 = kT_1 + C_1$$

所以

$$k = \frac{\lg E_2 - \lg E_1}{T_2 - T_1} = \frac{\lg 40 - \lg 10}{15 - 5} = 0.0602$$

最后得到

$$D_A = D_B + G(\lg H_{BA} - \lg H_{BB}) =$$

$$D_B + G(\lg E_B - \lg E_A) =$$

$$D_B + Gk(T_B - T_A) =$$

$$2.0 + 4.05 \times 0.0602(12 - 10) = 2.49$$

辐射防护计算是一个比较复杂的问题, 简单的外照射辐射防护计算一般包括: 确定辐照场的照射量数据(确定辐射源的输出数据)。确定应采用的剂量当量限值。按等式关系和衰减规律等计算。下面给出一些例题。

【例 8】辐照场中工作人员所在处的剂量率 $H = 50 \times 10^{-6}\text{Sv/h}$, 按照 GB 4792- 84 标准, 为限制随机效应, 工作人员一周最多可工作多少小时?

解: GB 4792- 84 规定, 为了限制随机效应的发生率, 年剂量当量限值为 50mSv, 每年按照 50 周计算工作时间, 则每周的剂量当量限值应是 1mSv。

记周剂量当量限值 $H_w = 1\text{mSv}$, 每周可工作的小时数为 t 。

因为 $H = 50 \times 10^{-6}\text{Sv/h}$

所以 $t = \frac{H_w}{H} = \frac{1 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-6}} = 20\text{h}$

【例 9】辐照场中距源 2m 处的剂量率是 $90 \times 10^{-6} \text{Sv/h}$, 若工作人员每周工作 25h, 按照 GB 4792-84 标准, 工作人员与源的最小距离应为多少?

解: 记 $H_0 = 90 \times 10^{-6} \text{Sv/h}$, $F_0 = 2\text{m}$, $t = 25\text{h}$, GB 4792-84 规定周剂量当量限值 $H_w = 1\text{mSv}$ 。

设 F 为工作人员至源的最小距离, H 为工作人员在距源最小距离处所接受的照射剂量率。

$$\text{则 } H = \frac{H_w}{t} = \frac{1 \times 10^{-3}}{25} = 40 \times 10^{-6} \text{Sv/h}$$

$$\text{由于 } \frac{H_0}{H} = \frac{F^2}{F_0^2}$$

$$\text{所以 } F = F_0 \sqrt{\frac{H_0}{H}} = 2 \times \sqrt{\frac{90}{40}} = 3\text{m}$$

【例 10】一台最高管电压为 250kV 的 X 射线机在 1m 处曝光量为 $1\text{mA} \cdot \text{min}$ 时产生的剂量是 0.02Sv , 探伤人员使用该机每周工作 5d, 每天开机工作 4h, 使用的管电流为 5mA, 工作点距 X 射线机为 4m, 按照 GB 4792-84 标准的规定, 求防护一次射线所需的混凝土墙的厚度。

解: 记 GB 4792-84 规定的周剂量当量限值 $H_w = 1\text{mSv}$, 探伤人员每周的工作负荷 $W = 5 \times 4 \times 60 \times 5 = 6000\text{mA} \cdot \text{min}$, 混凝土对 250kV X 射线的半值层 $T_0 = 28\text{mm}$, $X_0 = 0.02\text{Sv}$, $F_0 = 1\text{m}$, $F = 4\text{m}$ 。

设 H 为探伤人员每周接受的剂量当量, T 为所需的混凝土防护墙厚度, n 为 T 与 T_0 之间的倍数。

$$\text{由于 } H = \frac{X_0 \cdot W}{F^2} = \frac{0.02 \times 6000}{4^2} = 7.5\text{Sv}$$

$$\text{又因为 } T = n \cdot T_0$$

$$\text{所以 } H = 2^n \cdot H_w$$

$$n = \frac{\lg \frac{H}{H_w}}{\lg 2} = \frac{\lg \frac{7.5}{0.001}}{\lg 2} = 12.87$$

这样得到

$$T = 12.87 \times T_0 = 12.87 \times 28 = 360.4\text{mm}$$

若考虑两倍的安全系数, 应再加一个半值层, 即

$$T = 360.4 + T_0 = 360.4 + 28 = 388.4\text{mm}$$

屏蔽计算也可以按照屏蔽材料的透射比进行, 这时需要有相应的 X 射线在混凝土中的减弱曲线, 可参照本讲座第 11 讲中的图 11-2。例如, 在本题中所需的透射比为

$$K = \frac{H_w}{H} = \frac{1 \times 10^{-3}}{7.5} = 1.3 \times 10^{-4}$$

从图 11-2 中的曲线得到宽束 X 射线所需的混凝土防护墙厚度约为 350mm。

参 考 文 献 (略)

收稿日期: 1999-08-10

(上接第 550 页)

15.5, 判为点渣; 圆形度 < 15.5 , 判为球状气孔, 若不满足则进行(2)。

(2) 等效面积 < 0.1 , 是裂缝, 若不满足则进行(3)。

(3) 等效链码方向象素分布 $N_0 < 0.8$, 判为未焊透, 若不满足则进行(4)。

(4) 再判断长宽比, 若 > 5 , 是未熔合, 若不满足则进行(5)。

(5) 剩下的归为条状夹渣。

图 4 的模式识别结果为球状气孔, 其主要参数为: 面积 2.00mm^2 , 周长 5.47mm , 等效面积 0.37mm^2 , 周长平面积比 14.98 , 长径 1.83mm , 短径 1.49mm , 长宽比 1.22 , 折算点数 2 , 水平等效链码 0.36 , 垂直等效链码 0.21 , 一三等效链码 0.27 , 二四等效链码 0.16 。

4.4 缺陷定级

根据 JB 4730-94, 将缺陷分为四个等级。射线检测人员对条件进行判断, 由计算机自动定级。

5 结论

本文探讨了用数字图象技术进行图象预处理、缺陷自动识别的有关算法。软件在 Windows 98 的中文平台下用 Visual Basic 6.0 语言设计, 使用方便, 实用性强。但是, 缺陷提取速度和类型识别的准确率仍有待提高。

参 考 文 献

- 1 Castleman Kenneth R 著, 朱志刚, 石定机, 林学阁等译 数字图象处理 北京: 电子工业出版社, 1998 146-214
- 2 蔡 靖, 杨晋生, 丁润涛 模糊加权均值滤波器 中国图象图形学报(A 版), 2000, 5(1): 52-55
- 3 龚 坚, 李立源, 陈维南 基于二维直方图 Fisher 线形分割的图象分割方法 模式识别与人工智能, 1997, 10(1): 1-7
- 4 Reddi SS, Rudin SF, Keshavan HR. An optimal multiple threshold scheme for image segmentation. IEEE Trans, 1984, SMC-14(4): 661-665
- 5 Herbert Freeman On the encoding of arbitrary geometric configurations IEEE Trans Electronic Computer, 1961, EC-10: 260-268

收稿日期: 2000-08-07



工业射线检测的辐射防护问题

——介绍我国有关标准的主要规定

郑世才

(航天工业新立机器厂, 北京 100854)

摘要: 将我国有关工业射线检测辐射防护标准的主要规定, 概括成 10 个方面的内容, 简要地介绍有关标准的主要规定, 使从事工业射线检测的人员可以比较全面地了解辐射防护的要求。

关键词: 辐射防护; 射线检验; 射线检测; 探伤

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** C **文章编号:** 1671-4423 (2003) 04-24-09

辐射防护是工业射线检测技术的一个重要方面, 也是涉及社会安全和环境保护的一个重大问题, 它历来受到国际社会和国家有关方面的广泛注意。我国已制定了一系列有关辐射防护的标准。下面列举的是 2002 年国家标准目录中给出的, 与工业射线检测技术有关的辐射防护标准的目录:

- (1). GB 4075-83 密封放射源分级
- (2). GB 4792-84 放射卫生防护基本标准
- (3). GB 4835-84 辐射防护便携式 X、 γ 线监测仪
- (4). GB 5172-85 粒子加速器辐射防护规定
- (5). GB 5294-2001 职业照射个人监测规范 外照射监测
- (6). GB 8703-88 辐射防护规定
- (7). GB 8994-88 辐射防护仪器标准 X、 γ 定度
- (8). GB 9662-88 电离辐射事故干预水平及医学处理原则
- (9). GB 10256-88 放射性活度计
- (10). GB/T 11712-89 用于 X、 γ 线外照射放射防护的剂量转换因子
- (11). GB 11806-89 放射性物质安全运输规定
- (12). GB 11024-89 辐射安全培训规定
- (13). GB 12379-90 环境核辐射监测规定
- (14). GB/T 13161-91 直读式个人 X 和 γ 辐射剂量当量和剂量当量率监测仪
- (15). GB 14323-93 X、 γ 辐射个人报警仪

- (16). GB/T 16135-1995 放射事故个人外照射剂量估计原则
- (17). GB/T 16139-1995 用于中子辐射防护的剂量转换系数
- (18). GB 16355-1996 γ 线衍射仪和荧光分析仪放射卫生防护标准
- (19). GB 16357-1996 工业 X 射线探伤放射卫生防护标准
- (20). GB 16363-1996 X 射线防护材料屏蔽性能及检验方法
- (21). GB 16387-1996 放射工作人员的健康标准
- (22). GB 16757-1997 X 射线防护服
- (23). GB/T 17150-1997 放射卫生监测规范 第 1 部分 工业 X 射线探伤
- (24). GB 18465-2001 工业 γ 射线探伤放射卫生防护要求

除此之外, 在考虑辐射防护问题时必须注意的还有:

- (1) 中华人民共和国国务院令 第 44 号《放射性同位素与射线装置放射防护条例》(1989)
- (2) 中华人民共和国卫生部 1997 年 6 月 5 日的第 52 号部令《放射工作人员健康管理规定》(1997 年 9 月 1 日起执行)

本文将这些标准中与工业射线检测技术日常工作有关的主要规定, 归纳成 10 个方面问题, 介绍主

要的规定内容,希望它对从事射线检测工作的人员了解辐射防护的要求有所帮助。

1 放射工作人员的健康要求

1.1 放射工作人员

放射工作人员,在 GB 8703-88 中简单地规定为“辐射工作人员:其职业岗位伴有辐射(电离辐射)照射的工作人员,也称职业性受照人员或放射工作人员。”在 GB 4792-84 中未作具体的定义,按文中的叙述应是指从事放射工作的人员。标准中对“放射工作单位或场所”作出了规定,与工业射线检测密切的是:

a. “9.2 操作带有放射性物质的仪器、仪表或产生电离辐射的设备或装置,其放射性活度大于封闭性放射源的日最大操作量;或不加任何防护措施其源表面处剂量率高于 0.04 mSv/h;或工作位置的剂量当量率高于 $2.5\mu\text{Sv/h}$;或间断性工作的年有效剂量当量高于 5 mSv。”

b. “9.3 使用电子加速器和操作产生电子束的装置,其电子束的能量大于 5 keV,且工作位置的剂量当量率符合 9.2 条所列的数值。”

1.2 GB 16387-1996 对放射工作人员健康条件的规定

对放射工作人员健康条件,GB16387-1996 的主要规定包括基本要求和特殊要求。

基本要求主要是,从事放射工作人员的身体应具有:正常的呼吸、循环、消化、内分泌、免疫、泌尿生殖系统;正常的皮肤粘膜毛发、物质代谢功能;正常的造血功能;正常的神经系统功能、精神状态和稳定的情绪;正常的视觉、听觉、嗅觉、触觉及语言表达和书写能力;正常的外周血淋巴细胞染色体畸变率和微核率等。

对核电厂放射工作人员、放射性厂矿和内照射的放射性工作人员,还规定了特殊的健康条件要求。

这些规定主要是要保证,放射工作人员在正常、异常和紧急情况下,都能准确无误地、安全地履行其职责。

1.3 GB 8703-88 对放射工作人员健康条件的规定

GB8703-88 在附录 K 中对放射工作人员的健康条件,作了简化的、类似 GB 16387-1996 的规定。

1.4 一些说明

在 GB 16387-1996 中,还专门作出了不应或不宜从事放射工作的健康和其他条件的规定。此外,在国家卫生部 1997 年 6 月 5 日的第 52 号部令《放射工作人员健康管理规定》中规定,从事放射工作的人员,应具有高中以上文化水平和相应的专业技术知识和能力。

2 辐射安全培训的主要规定

GB 11924-89 对辐射安全培训作出了规定,它适用于一切生产、研究和应用放射性物质和其他电离辐射源(或装置)的单位内从事或涉及辐射工作的人员,主要规定如下。

2.1 基本原则和目的

辐射安全培训是整个辐射安全实施计划不可缺少的一部分,一切辐射工作单位都必须对有关人员进行必要的辐射安全培训,并经考核合格后由有资格单位发给相应的培训合格证书。各类人员只有在他们取得必要的安全培训合格证书之后,才允许参加相应级别的辐射工作。

辐射安全培训的目的主要是,了解本岗位工作中的辐射安全问题和潜在危险,树立正确的态度;了解有关安全法规及与本岗位有关的辐射安全规程;了解与掌握减少受照剂量的原理和方法、防护器具的使用方法、操作中避免和减少事故发生的原理和方法、事故紧急处理和减少事故后果的原理及方法等。

2.2 辐射安全培训的主要要求

(1) 辐射安全培训分类

按培训人员分为:职业受照人员、偶然受照人员、领导和技术管理人员、访问人员和应急人员。职业受照人员的培训又可分为:上岗培训、换岗培训和再培训。

(2) 职业受照人员培训要求

对初次参加辐射工作的职业受照人员的上岗培训,应包括辐射防护和安全法规的基础知识及要求,还应包括紧密结合本单位、本岗位具体情况的有关危害因素分析、安全规定、应急要求等。

(3) 培训的组织和实施

各单位行政领导必须把辐射安全教育和培训列为职工教育计划的主要内容之一,并保证为培训提供必要的师资和专项经费和时间。安全培训计划的

制定和实施应由有资格单位负责,或会同职工教育部门共同负责。应对每个工作人员的安全培训情况建立必要的档案,至少保存到该受训人员脱离辐射工作十年以后。

3 辐射防护原则和剂量限值

关于辐射防护原则和剂量限值,GB 4792-84 和 GB 8703-88 作出了基本相同的规定。关于下面的规定内容,可参考文献^[1~7]理解。

3.1 辐射防护原则

辐射防护的目的是防止发生有害的非随机效应,限制随机效应的发生被认为是可以接受的水平范围之内,从而尽量降低辐射可能造成的危害。为了实现上述的防护目的,在辐射防护中应遵循三项原则:(实践)正当化原则、(辐射防护)最优化原则、(个人剂量)限值化原则。

正当化原则要求,在任何包含电离辐射照射的实践中,应保证这种实践对人群和环境产生的危害应小于这种实践给人群和环境带来的利益,即获得的利益必须超过付出的代价,否则不应进行这种实践;

最优化原则要求,应当避免一切不必要的照射,任何伴随电离辐射照射的实践,在符合正当化原则的前提下,应保持在可以合理达到的最低水平照射;

限值化原则要求,在符合正当化原则和最优化原则下所进行的实践中,应保证个人所接受的照射剂量当量不超过规定的相应限值。

辐射防护中所谓的“可以接受的水平”,是把放射性工作的危险度与其他被认为安全标准比较高的职业的危险度相比较提出的。不同的职业都具有一定的危险度,国际上公认的比较安全行业的危险度是 10^{-4} 。放射性工作全身均匀照射时,按照目前辐射防护标准中常规定的年剂量限值:50 mSv,则放射性工作的职业危险度为: 5×10^{-4} 。这个危险度与石油行业(5×10^{-4})、化工行业(3×10^{-4})、冶金行业(3×10^{-4})的危险度是相近的。实际上接近剂量当量限值的人数是很少的,多数人接受的年剂量当量不超过:5 mSv,若按照这个值计算,则危险度为: 5×10^{-5} ,这应是比较低的危险度。

3.2 剂量限制体系

必须注意,标准中关于辐射防护的剂量限制,绝不是单纯的 50mSv/a。

按照辐射防护的目的和上述原则,辐射防护标准关于剂量当量的限值规定主要包括:

a. 对非随机效应

规定了不同器官或组织的最大容许剂量当量限值;

b. 对随机效应

依据可以接受的水平,以危险度为基础规定全身均匀照射的年剂量当量限和非均匀照射时各器官和组织容许的有效剂量当量限值。

对于工业射线检测人员,GB 4792-84 标准主要从剂量当量限值、特殊照射、应急照射三个方面进行了规定。

(1) 剂量当量限值

放射性工作人员的年剂量当量是指,一年工作期间所受到照射的剂量当量(与摄入的放射性核素所产生的待积剂量当量二者之和),但不包括天然本底照射和医疗照射。表 1 列出了有关剂量当量限值的主要规定,其中的符号 H_E 、 H_T 、 W_T 的意义与上面相同。

表 1 GB 4792-84 关于剂量当量限值的的规定

效应	照射对象 或方式	年剂量当量限值(mSv/a)		连续三个月的 剂量当量限值 (职业,mSv)
		放射性工作人员	公众人员	
非随机效应	眼晶体	150	50	75
	其他单个 器官或组织	500	50	250
随机效应	全身均匀 照射	50	5*	25
	全身非均匀 照射	$\sum H_T W_T \leq 50$	$\sum H_T W_T \leq 5$	$\sum H_T W_T \leq 25$

注: *—当长期受到电离辐射照射时,一般年份此值应限定在 1mSv/a

H_T —某器官或组织所受到的年剂量当量。

W_T —某器官或组织的相对危险度因子。

(2) 特殊照射

对于正常工作的一些特殊情况,有时需要少数人员接受超过年剂量当量限值的照射,这种情况属于特殊照射。对这种照射 GB 4792-84 作了如下的规定:

a. 这种照射事先必须经过周密的计划;

b. 计划执行前必须经过单位领导及辐射防护负责人员批准;

c. 所接受的有效剂量当量在一次(照射)事件中不大于 100 mSv,在一生中不大于 250 mSv,并应符合非随机效应的规定;

d. 对接受这种照射的人员应进行医学观察,所

接受的剂量当量及医学观察结果应详细记入健康档案;

e. 孕妇、授乳妇、16~18岁的实习人员不能接受这种照射。

(3) 应急照射

为了制止事故的扩大或进行抢救、抢修,有些工作人员需要接受超过正常剂量当量限值的照射,这种照射称为应急照射。对应急照射国家标准 GB 4792-84 规定,一次事件全身照射的剂量当量一般不应超 250 mSv,并应符合对非随机效应的规定。

对射线检测人员,主要应考虑的是外照射的辐射防护,通过防护控制外照射的剂量,使其保持在可以合理做到的最低水平,不超过国家辐射防护标准规定的剂量当量限值。

4 放射工作场所

4.1 放射工作场所选址

在 GB 8703-88 中单列一章规定放射工作场所选址。

放射工作场所选址时,应考虑该设施的污染源、地理环境、生态、地质、水文、气象条件和人口分布等因素,应同时考虑正常运行和意外事件,并满足剂量当量限值和公众的剂量当量符合可合理达到尽量低的原则。对具体的放射工作场所选址区分为不同类型,主要的规定如下。

a. 开放型放射源工作场所的甲级实验室不得设于城市市区选址。

b. 密封型放射源、X 射线机、加速器等辐照装置可以设于市区,必须有效屏蔽,使周围公众所受照射不超过相应的限值。

c. 核设施选址时首先应考虑事故下放射性物质释放对公众的影响,还必须考虑多方面的因素,厂址应与城市市区保持适当的直线距离,厂址确定时应进行最优化分析,至少有三个候选厂址,综合评价,择优确定等。

4.2 放射工作场所工作条件分类

GB 4792-84 将放射工作场所的工作条件分为三种。

甲种工作条件:一年照射的有效剂量当量有可能超过 15 mSv。要求对于这种工作条件下的工作人员,要进行个人剂量监测,对场所要有经常性监测,建立工作人员受照剂量和场所监测档案。

乙种工作条件:一年照射的有效剂量当量很少可能超过 15 mSv,但有可能超过 5 mSv。要求对于这种工作条件下的工作人员,要进行个人剂量监测,建立工作人员受照剂量档案,对场所要进行定期监测。

丙种工作条件:一年照射的有效剂量当量很少可能超过 5 mSv。对于这种工作条件下的工作场所,可根据需要进行剂量监测,并作记录。

4.3 放射工作场所(工作条件)分区

GB 8703-88 将放射工作场所分为二区。

控制区:在其中连续工作的人员,一年受到的辐射照射可能超过年限值的 3/10 的区域。该区应标以红色。

监督区:在其中连续工作的人员,一年受到的辐射照射一般不超过年限值的 3/10,但可能超过 1/10 的区域。该区应标以橙色。

非限制区:在其中连续工作的人员,一年受到的辐射照射一般不超过年限值的 1/10 的区域。该区应标以绿色。

标准同时规定了放射工作条件分类:

第一类工作条件:在此类工作条件下工作人员的年剂量可能超过个人剂量限值的 3/10。

第二类工作条件:在此类工作条件下工作人员的年剂量不大可能超过个人剂量限制的 3/10。

此外,标准对开放型放射源工作场所也作了分类或分级的规定。

5 外照射的辐射监测

5.1 职业照射个人外照射的辐射监测原则

GB 5294-2001 的主要规定如下。

a. 对任何在控制区工作的、或有时进入控制区照射显著或可能超过 5 mSv/a 的工作人员,应进行外照射的辐射监测。

b. 对在监督区工作的、或偶尔进入工作区预计有效剂量在 1 mSv~5 mSv/a 的人员,应尽可能进行外照射的辐射监测。

c. 对于外照射值可能始终低于法规和标准规定值的人员,可以不进行辐射监测。

d. 所有从事或涉及放射工作的人员,都应接受职业外照射个人监测。

5.2 职业照射个人监测类型和监测量

GB 5294-2001 规定,外照射的辐射监测类型分为

a. 常规监测:确定工作条件是否适于继续操作及在预定场所按预定监测周期进行的一类监测。监测周期一般为一个月,最长不超过2个月。

b. 任务相关监测:对特定操作提供有关操作和管理方面决策的支持数据。

c. 特殊监测:对特殊问题在一个有限期间进行的监测。

监测量为个人剂量当量 $H_p(d)$, d 为人体表面指定点下面的深度(mm)。常用的主要是 $H_p(0.07)$ 和 $H_p(10)$ 。

5.3 职业照射个人外照射的剂量评价

GB 5294-2001 中规定

a. 年受剂量 $< 5\text{mSv}$ 时,只需记录个人监测的剂量结果。

b. 年受剂量 $\geq 5\text{mSv}$ 时,需记录个人监测的剂量结果,还应进一步调查。

c. 年受剂量 $> 20\text{mSv}$ 时,需记录个人监测的剂量结果,还需进一步作出剂量估算、安全评价、查找原因、改进防护措施。

5.4 工业 X 射线探伤辐射防护监测

GB 17150-1997 对 500kV 以下 X 射线探伤装置及探伤作业场所的放射卫生防护监测方法作出了规定,主要规定有下列一些方面。

5.4.1 监测仪器性能要求

- 最小量程: $0 \sim 10 \mu\text{Gy/h}$
- 能量响应: $30 \sim 500 \text{keV}$, 误差 $\pm 30\%$
- 读数响应时间: $< 15\text{s}$

5.4.2 工业 X 射线探伤装置监测

(1) 监测量:辐射在空气中产生的比释动能率。

注:比释动能概念

间接电离粒子与物质相互作用时,传给物质能量的过程分为二步。首先,间接电离粒子把能量转移给带电粒子。然后,带电粒子通过电离、激发等把能量传给物质。比释动能描述的是间接电离粒子与物质相互作用时,在单位质量物质中产生的带电粒子的初始动能的总和。比释动能通常用符号 K 表示,严格的定义是

$$K = \frac{dE_r}{dm}$$

式中 dE_r 一间接电离粒子在该物质体积元内释放出的所有带电粒子的初始动能之和(包括这些带电粒子在韧致辐射过程中放出的能量、在此体积元

内发生的次级过程中产生的任何带电粒子的能量、俄歇电子的能量),单位是焦耳(J)。

dm 一该体积元内物质的质量,单位是千克(kg)。比释动能的国际单位和我国的法定计量单位是戈瑞(Gy)。

间接电离粒子与物质相互作用时,在单位时间内,在单位质量物质中产生的带电粒子的初始动能的总和称为比释动能率。

(2) 监测环境与条件

X 射线管与墙的距离: $> 2 \text{m}$, 且与 X 射线管焦点距离 2m 范围内不应存在散射物体。

X 射线管主束窗口:应用 10 个半值层(铅)的吸收体遮盖。

X 射线管电压和电流:额定值。

测点距离:距 X 射线管焦点 1m 处的比释动能率。

(3) 监测周期

对使用中的 X 射线机规定

a. 便携式 X 射线机:1次/年

b. 固定式 X 射线机:1次/(2~3)年

此外,还规定了生产中的 X 射线机,新产品及转产投产前等的监测周期要求。

(4) 监测结果要求

漏泄比释动能率应符合 GB 16357-1996 的规定(具体值见第6方面)。

5.4.3 工业 X 射线探伤室监测

(1) 环境辐射水平监测

应根据探伤室的特点,对周围的辐射水平进行巡测,找出辐射高水平的位置。

(2) 定点监测

a. 探伤室门外 5cm , 距地 1m 高处、门的左中右 3 点。

b. 探伤室墙外 5cm , 距地 1m 高处墙面,每个墙面至少 2 点。

c. 人员经常活动处。

d. 环境巡测高辐射水平位置。

(3) 周期

正使用的探伤室每年至少一次。

(4) 监测结果要求

a. 工作人员居留处: $\leq 25 \mu\text{Gy/h}$ 。

b. 非工作人员居留处: $< 2.5 \mu\text{Gy/h}$ 。

5.4.4 现场作业场所监测

按 GB 16357—1996 的规定。

6 工业 X 射线探伤的放射卫生防护要求

GB 16357—1996 对工业 X 射线探伤的放射卫生防护作出了规定,它适用于 500 kV 以下 X 射线装置的生产和使用,主要规定可归纳为下列 3 个方面

(1) X 射线机的漏泄辐射空气比释动能率

标准规定,X 射线机在额定工作条件下,距 X 射线管焦点 1m 处的漏泄射线空气比释动能率应符合下面要求:

V(管电压) < 150 kV: 漏泄空气比释动能率 < 1 mGy/h;

V(管电压): 150~200 kV: 漏泄空气比释动能率 < 2.5 mGy/h;

V(管电压) > 200 kV: 漏泄空气比释动能率 < 5 mGy/h.

测试时,X 射线机窗口的最大有用线束截面应用 10 个半值层厚度的吸收材料屏蔽,测试应在以焦点为球心、半径 1m 的球面上测量,测定值应是 100cm² 面积的平均值,误差应小于 30%

(2) 探伤作业场所的辐射防护要求

探伤室的辐射防护要求应符合 GB 4792 的要求。

现场作业场所应划分为控制区和管理区,它们的辐射防护要求如下:

a. 控制区:空气比释动能率在 40μGy/h 以上区域,边界应设“禁止进入 X 射线区”警告标志,作业人员应在控制区边界外操作,否则应采取防护措施。

b. 管理区:控制区边界外空气比释动能率在 4μGy/h 以上区域,边界应设“无关人员禁止入内”警告标志,必要时设专人警戒。管理区边界附近不应有经常停留的公众人员。

(3) 辐射防护监测

主要规定是,现场作业应进行个人剂量监测,探伤室建成应进行验收监测,现场探伤应进行场所剂量监测,验证控制区和管理区。

7 工业 γ 射线探伤的放射卫生防护要求

GB 16357—1996 对工业 γ 射线探伤的放射卫生防护作出了规定,主要规定有 5 个方面,即源容器

周围的空气比释动能率、固定式探伤放射防护要求、移动式探伤放射防护要求、放射源的安全要求、放射防护监测。一些主要规定如下。

(1) 源容器周围的空气比释动能率

具体规定见表 2。

表 2 γ 射线源容器周围的空气比释动能率(mGy/h)

源容器类别	容器外表面	距容器外表面	
		50mm 处	1m 处
手提式	2	0.5	0.02
移动式	2	1	0.05
固定式	2	1	0.10

(2) 移动式探伤放射防护要求

a. 工作场所应划分为控制区和监督区。

b. 控制区边界外的空气比释动能率应低于 40 μGy/h,边界应悬挂“禁止进入放射性工作场所”标牌,未经许可人员不得进入该范围边界等。

c. 监督区在控制区外,其边界的空气比释动能率应不大于 2.5 μGy/h,边界应有“当心,电离辐射!”标牌,公众人员不得进入该区。

d. 作业时应保证作业人员的受照剂量低于年剂量限值。

(3) 放射防护监测

a. 个人剂量监测:连续五年平均剂量当量应 ≤ 20mSv;任何一年剂量当量应 ≤ 50 mSv;眼晶体的剂量当量应 ≤ 150 mSv/a;四肢皮肤等的剂量当量应 ≤ 500 mSv/a。

b. γ 射线机固有防护监测:放射性主管部门每年应对装置的安全装置性能检测一次;放射性主管部门每年应对装置的泄漏辐射检测一次。

c. 作业场所防护监测:固定式探伤,每天工作前应对安全、联锁装置等的性能进行检查,作业后应对源的回位进行检查,每年应对操作场所和探伤室临近区域的辐射水平进行测量;移动式探伤,每次作业前应检查探伤机和控制区,控制区内应确保无任何人员,作业场所启用时,应测定控制区边界的辐射水平。还有一些其他的规定。

8 放射性物质管理

关于放射性物质的管理,国务院第 44 号令作出的规定的主要点如下。

(1) 放射性同位素不得与易燃、易爆、腐蚀性物品一同存放。存放场所必须有防火、防盗、防泄漏措施,专人负责保管。

(2)贮存、领取、使用、归还放射性同位素必须进行登记、检查、帐物相符。

(3)从事放射性同位素的订购、销售、转让、调拨和借用的单位或个人,必须有许可登记证,并只限于在许可登记证的范围内活动,并向同级卫生和公安部门备案。

(4)放射性废水、废气和固体废物排放,必须先向所在省、自治区、直辖市的环保部门递交环境影响报告,经批准后到所在县以上卫生行政部门申请办理许可证,并向公安部门登记。

(5)托运、承运和自行运输放射性同位素或装过放射性同位素的空容器,必须按国家有关运输规定进行包装和剂量检测,经县以上运输和卫生行政部门检查后方可运输。

(6)生产的装有放射性同位素的设备、射线装置和放射防护器材,必须符合放射防护规定。

9 辐射事故

9.1 辐射事故分类

GB 8703-88规定,辐射事故按性质分为五类:超剂量照射事故、表面污染事故、丢失放射性物质事故、超临界事故和放射性物质泄漏事故。按影响范围分为二类:管辖区内事故(影响在辐射工作单位直接管辖的除生活区外的区域)、管辖区外事故。事故按危害程度分为三级:一般事故、较大事故和重大事故。

超剂量照射事故的分级如表3所示,丢失放射性物质事故的分级如表4所示。

表3 超剂量照射事故分级的主要规定

受照射人员与部位	剂量当量, Sv/a			
	一般事故	较大事故	重大事故	
辐射工作人员	全身或器官(有效剂量当量)	>0.05	>0.25	>1
	眼晶体	>0.15	>0.75	>3
公众人员	皮肤	>0.5	>3	>6
	全身或器官(有效剂量当量)	>0.01	>0.05	>0.1
工作人员和公众	全身或器官(有效剂量当量),人.Sv	>0.10	>0.5	>2

注:三人以上同时受照射时,一般事故应视为较大事故,较大事故应视为重大事故。

表4 丢失放射性物质事故分级的主要规定

放射性物质状态	放射性活度, Bq		
	一般事故	较大事故	重大事故
非密封型	$>5 \times 10^4$	$>5 \times 10^6$	$>5 \times 10^8$
密封型	$>5 \times 10^5$	$>5 \times 10^7$	$>5 \times 10^9$

注:表中值适用于丢失在管辖区内,丢失在管辖区外时值应降低10倍。如在丢失之日起10日内收回,较大事故和重大事故的级别可降低一级。

9.2 辐射事故管理

GB8703-88规定,辐射工作单位必须贯彻预防为主方针,坚持生产必须安全的原则。可能发生事故的单位,必须制定事故应急计划。辐射工作单位还应建立事故报告制度和管理制度。辐射工作单位不论发生何种辐射事故,均应及时填报事故报告表。重大事故在事故发生后24h内应上报主管部门和监管部门。辐射工作单位应建立全面、系统和完整的事故档案。

10 一些资料

10.1 辐射防护管理的一般规定

我国的有关条例和标准,对辐射防护管理作出的一般规定可归纳为下列七个方面。

(1)国家对放射工作实行许可登记制度,许可登记证由卫生,公安部门办理。

(2)伴有辐射照射的实践及设施的新建、扩建、改建、退役必须事先向主管部门和环保部门提交辐射防护报告,经审查批准方可实施。

(3)在设施的选址、设计、运行、退役阶段均应进行辐射防护评价,运行阶段应定期进行。辐射防护评价包括辐射防护管理,技术措施和人员受照情况。辐射防护评价的基本要求是评价是否符合辐射防护的最优化原则。

(4)从事辐射工作的单位应设置独立于生产运行部门的辐射防护和环境保护机构。

(5)辐射工作单位必须建立辐射防护和环境保护岗位责任制。

(6)从事辐射工作的人员应经过辐射防护的培训和考核,取得合格证方可工作。辐射工作人员应享受劳动保护和相应待遇。

(7)辐射工作场所应设有电离辐射标志(一种三叶形标志,样式、尺寸见GB 8703-88)。

国家卫生部发布的第52号部令,对辐射工作人员的健康管理均作出了详细的规定。

10.2 屏蔽材料的半值层厚度

附表1和附表2是国家标准中给出的对X射线和 γ 射线常用屏蔽材料的半厚度值。在国家标准GB 18465-2001中还给出了 γ 射线入射到部分材料中的衰减度曲线和确定控制区的曲线。

附表1 (GB 17150-1997)宽束 X 射线的近似半厚度(cm)

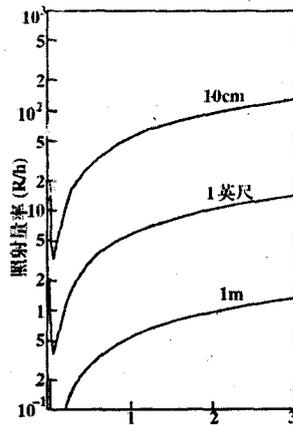
管电压(kV)	铅	混凝土	管电压(kV)	铅	混凝土
50	0.005	0.4	250	0.086	2.8
75	0.015	—	300	0.17	3.0
100	0.025	1.6	400	0.25	3.0
150	0.029	2.2	500	0.31	3.6
200	0.042	2.6			

附表2 常用γ射线源的半值层厚度(GB 18465 2001)(mm)

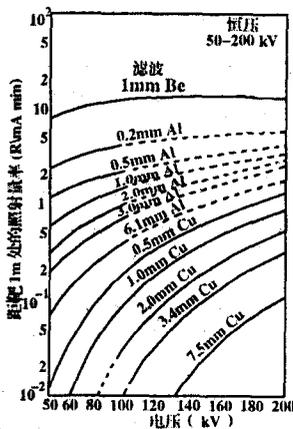
屏蔽材料	⁶⁰ Co	¹⁹² Ir	¹⁶⁹ Yb	¹⁷⁰ Tm
铅	70	50	27	20
混凝土	70	50	27	—
钢	24	14	9	5
铅	13	3	0.8	0.6
钨	10	2.5	—	0.09
铀	6	2.3	—	0.035

10.3 国外辐射防护手册给出的资料

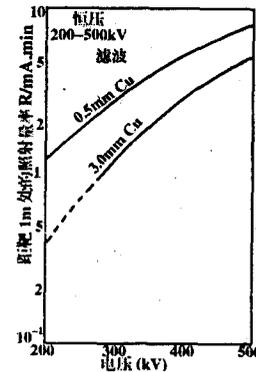
附图1~12是国外辐射防护手册^[6]给出的有关 X 射线机输出额、γ 射线源的照射率,一些材料对 X 射线和 γ 射线的透射因子(衰减因子)。散射因子等的资料,可供考虑辐射防护问题时参考和使用。



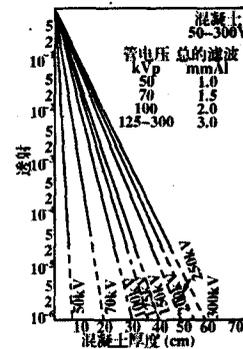
附图1 活度为1Ci,每次衰变发射一个光子的点状γ射线源的照射量率



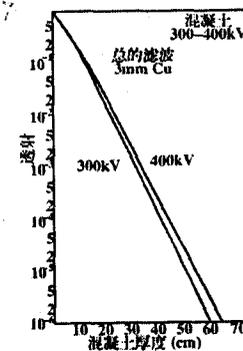
附图2 恒压 X 射线管(50~200kV)的输出,对半波高压发生器输出约为图中值的1/3~1/2



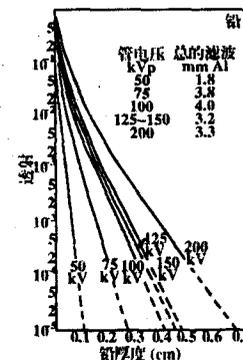
附图3 恒压 X 射线管(200~500kV)的输出,对脉冲高压发生器输出约为图中值的2/3



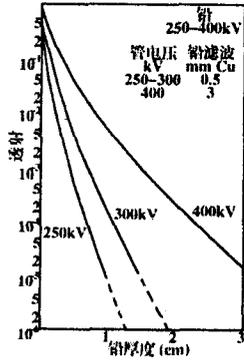
附图4 宽束 X 射线(脉冲高压)在混凝土中的透射曲线,如果需要也可用于恒压 X 射线



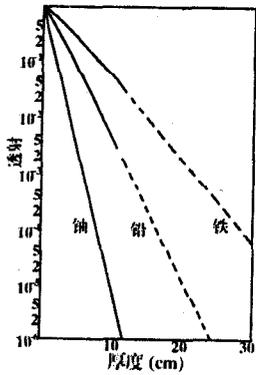
附图5 宽束 X 射线(恒压,300~400kV)在混凝土中的透射曲线



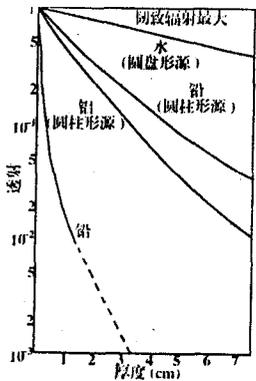
附图6 宽束 X 射线(脉冲50~200kV)在铅中的透射曲线



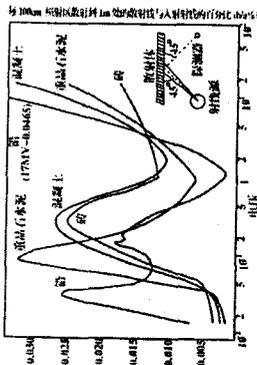
附图7 恒定电压(250~400kV)X射线在铅中的透射曲线



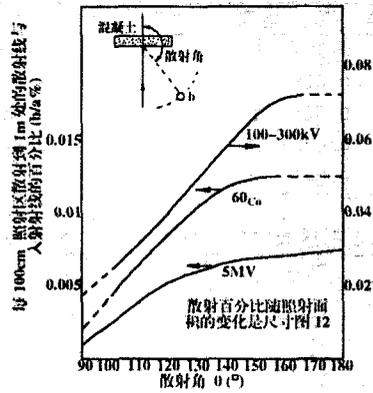
附图8 ⁶⁰Co 宽能γ射线在铁、铅、铀中的透射曲线



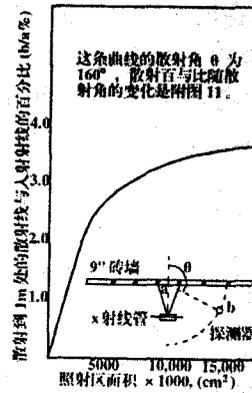
附图9 ¹⁷⁰Tm 宽能γ射线在铁、铝、铅中的透射曲线



附图10 对不同屏蔽材料, 散射百分比随能量的变化



附图11 X、γ射线垂直入射时的背散射



附图12 X射线(100~300kV)散射百分比随照射面积的变化

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会无损检测学会等编. 射线检测(第2版). 机械工业出版社, 1994
- [2] M. 姆拉杰诺维奇著. 王选廷等译. 放射性同位素和辐射物理学导论. 原子能出版社, 1986
- [3] 卢玉楷等. 放射性核素概论. 科学出版社, 1987
- [4] K. R. Kase. 辐射剂量学的概念. 徐巧译. 计量出版社, 1983
- [5] 李星洪. 辐射防护基础. 原子能出版社, 1982
- [6] 李德平, 潘自强主编. 辐射防护手册. 原子能出版社, 1987
- [7] (日)江藤秀雄. 辐射防护. 崔朝辉译. 原子能出版社, 1986
- [8] A Panel of the Radioactive Substances Advisory Committee. , Handbook of Radiological Protection, London, Her Majesty's Stationery Office 1971

读者信箱

工业射线照相的辐射防护标准 ——答读者问

郑世才
(新立机器厂,北京 100039)

RADIOLOGICAL PROTECTION STANDARDS FOR INDUSTRIAL RADIOGRAPHY

ZHENG Shi-cai

(Xinli Machinery Plant, Beijing 100039, China)

中图分类号:TG115.28

文献标识码:B

文章编号:1000-6656(2003)11-0600-02

问:关于工业射线照相检验的辐射防护我国制订了哪些标准?对 X 和 射线照相检验的辐射防护有些什么规定?(张玉明)

1 我国有关辐射防护的标准目录

我国已制订了一系列有关辐射防护的标准,2002 年国家标准目录中给出的与工业射线检测有关的辐射防护标准目录可分为如下四个部分。

1.1 辐射防护总规定标准目录

GB 4792—1984 放射卫生防护基本标准

GB 8703—1988 辐射防护规定

1.2 辐射防护管理标准目录

GB 5294—2001 职业照射个人监测规范 外照射监测

GB 9662—1988 电离辐射事故干预水平及医学处理原则

GB/T 11712—1989 用于 X、线外照射放射防护的剂量转换因子

GB 11806—1989 放射性物质安全运输规定

GB 11924—1989 辐射安全培训规定

GB 12379—1990 环境核辐射监测规定

GB/T 16135—1995 放射事故个人外照射剂量估计原则

GB/T 16139—1995 用于中子辐射防护的剂量转换系数

GB 16363—1996 X 射线防护材料屏蔽性能

及检验方法

GB 16387—1996 放射工作人员的健康标准

GB/T 17150—1997 放射卫生监测规范 第 1 部分 工业 X 射线探伤

1.3 具体情况的辐射防护标准目录

GB 5172—1985 粒子加速器辐射防护规定

GB 16355—1996 X 线衍射仪和荧光分析仪放射卫生防护标准

GB 16357—1996 工业 X 射线探伤放射卫生防护标准

GB 18465—2001 工业 射线探伤放射卫生防护要求

1.4 辐射防护器材等标准目录

GB 4075—1983 密封放射源分级

GB 4835—1984 辐射防护携带式 X、线监测仪

GB 8994—1988 辐射防护仪器校准 X、定

GB 10256—1988 放射性活度计

GB/T 13161—1991 直读式个人 X 和 辐射剂量当量和剂量当量率监测仪

GB 14323—1993 X、辐射个人报警仪

GB 16757—1997 X 射线防护服

除此之外,在考虑辐射防护问题时还必须执行中华人民共和国国务院第 44 号令《放射性同位素与射线装置放射防护条例》(1989)和中华人民共和国卫生部第 52 号令《放射工作人员健康管理规定》(1997)。

收稿日期:2002-09-16

2 X射线探伤的放射卫生防护要求

GB 16357—1996对工业X射线探伤的放射卫生防护作出了规定,适用于500kV以下X射线装置的生产和使用,主要可归纳为如下三个方面。

2.1 X射线机的漏泄辐射空气比释动能率

间接电离粒子与物质相互作用时,传给物质能量的过程分为两步。首先,间接电离粒子把能量转移给带电粒子;然后,带电粒子通过电离和激发等把能量传给物质。比释动能描述的是间接电离粒子与物质相互作用时,在单位质量物质中产生的带电粒子的初始动能总和。比释动能通常用符号 K 表示,严格的定义是

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

式中 dE_{tr} ——间接电离粒子在该物质体积元内释放出的所有带电粒子的初始动能之和(包括带电粒子在韧致辐射过程中放出的能量、在此体积元内发生的次级过程中产生的任何带电粒子的能量和俄歇电子的能量) J

间接电离粒子与物质相互作用时,在单位时间和单位质量物质中产生的带电粒子的初始动能的总和称为比释动能率。

标准规定,X射线机在额定工作条件下,距X射线管焦点1m处的漏泄射线空气比释动能率应符合的要求是,管电压 $V < 150kV$ 时,漏泄空气比释动能率 $< 1mGy/h$; $V = 150 \sim 200kV$ 时,漏泄空气比释动能率 $< 2.5mGy/h$; $V > 200kV$ 时,漏泄空气比释动能率 $< 5mGy/h$ 。

测试时,X射线机窗口的最大有用线束截面应用10个半值层的吸收材料屏蔽,在以焦点为球心,半径1m的球面上进行测试,测定值为 $100cm^2$ 面积上的平均值,误差 $< 30\%$ 。

2.2 探伤作业场所的辐射防护要求

探伤室的辐射防护应符合GB 4792的要求。

现场作业场所应分为控制区和管理区,其辐射防护要求为:

(1) 控制区 对于空气比释动能率 $> 40\mu Gy/h$ 的区域,应在其边界设“禁止进入X射线区”警告标志,作业人员应在控制区边界外操作,否则应采取防护措施。

(2) 管理区 控制区边界外空气比释动能率

$> 4\mu Gy/h$ 的区域,边界应设“无关人员禁止入内”警告标志,必要时设专人警戒。管理区边界附近不应有经常驻留的公众人员。

2.3 辐射防护监测

主要规定是,现场作业应进行个人剂量监测和场所剂量监测,验证控制区和管理区,探伤室建成后应进行验收监测。

3 射线探伤的放射卫生防护要求

GB 18465—2001对工业射线探伤的放射卫生防护主要有五个方面的规定,即源容器周围的空气比释动能率、固定式探伤放射防护、移动式探伤放射防护、放射源的安全要求和放射防护监测。以下为一些主要规定。

3.1 源容器周围的空气比释动能率

射线源容器周围的空气比释动能率见表1。

表1 射线源容器周围空气比释动能率 mGy/h

源容器类别	容器外表面	距容器外表面	距容器外表面
		50mm处	1m处
手提式	2	0.5	0.02
移动式	2	1	0.05
固定式	2	1	0.10

3.2 移动式探伤放射防护要求

(1) 工作场所应划分为控制区和监督区。

(2) 控制区边界外的空气比释动能率应 $< 40\mu Gy/h$,边界应悬挂“禁止进入放射性工作场所”标牌,未经许可人员不得进入该范围边界等。

(3) 监督区在控制区外,其边界的空气比释动能率应 $< 2.5\mu Gy/h$,边界应有“当心,电离辐射!”标牌,公众人员不得进入该区。

(4) 作业时应保证作业人员的受照剂量低于年剂量限值。

3.3 放射防护监测

(1) 个人剂量监测 连续5a(年)平均剂量当量应 $< 20mSv$;任何一年剂量当量应 $< 50mSv$;眼晶体的剂量当量应 $< 150mSv/a$;四肢皮肤等的剂量当量应 $< 500mSv/a$ 。

(2) 射线机固有防护监测 放射性主管部门每年应对装置的安全性能检测一次;放射性主管部门每年应对装置的泄漏辐射检测一次。

(3) 作业场所防护监测 固定式探伤时,每天工作前应检查安全、联锁装置等的性能,作业后应检

国外无损检测文献索引

INDEX FOR NONDESTRUCTIVE TESTING INFORMATION ABROAD

中图分类号: TG15.28 文献标识码: D 文章编号: 1000-6656(2003)11-0602-01

残余应力测量及其在预报发动机底盘低周疲劳极限寿命中的应用

Sharon Vukelich, Stan Berkley, Stephan Russ, et al. Materials Evaluation, 2002, 60(7): 884 - 889.

用 Jaeger 视力表检测视觉分辨力

SL Weatherly. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 928 - 929.

无损检测——浪费还是得益

FH Dijkstra, JA de Raad. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 932 - 940.

大学无损检测课程的自学和企业式教学

Esam MA Hussein. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 959 - 961.

无损检测实验室——获 2001 年美国无损检测学会资助基金奖

Philip Mc New. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 962 - 963.

无损检测讲稿模板——获 2001 年美国无损检测学会资助基金奖

John C Duke. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 964.

美国东南社区大学的无损检测技术培训和教育

Randy Walbridge. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 965 - 966.

哈钦森 (Hutchinson) 学院的早期无损检测教学

George L Pherigo. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 967 - 969.

铁磁性材料脉冲磁场无损处理工艺的效果评估

CCH Lo, DC Jiles, M Mina, et al. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 971 - 975.

立式贮罐腐蚀的声发射在役检测方法

Dai Guang, Li Wei, Zhang Ying, et al. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 976 - 978.

用微探针测量沉淀硬化处理后特高强度钢剩磁的可行性研究

Janez Grum, Martin Zupancič. Materials Evaluation, 2002, 60(8): 979 - 983.

导波检测的优化

Thomas R Hay, Joseph L Rose. Materials Evaluation, 2002, 60(10): 1239 - 1244.

纤维增强聚合物桥面状态的红外热成像监控

Marybeth Miceli, John C Duke Jr, Mike Horne. Materials Evaluation, 2002, 60(10): 1245 - 1252.

终端开口同轴探头和金属表面裂纹相互作用的瞬时模拟法方案

Narisi Wang, Reza Zoughi. Materials Evaluation, 2002, 60(10): 1253 - 1258.

符 艳译 马铭刚校

收稿日期: 2003-07-10

查源的回位, 每年应测量操作场所和探伤室临近区域的辐射水平; 移动式探伤时, 每次作业前应检查探伤机和控制区, 控制区内应确保无任何人员, 作业场所启用时, 应测定控制区边界的辐射水平。其它规定请查阅有关标准。

表 2 宽束 X 射线的近似半值层

管电压 kV	半值层/cm		管电压 kV	半值层/cm	
	铅	混凝土		铅	混凝土
50	0.005	0.4	250	0.086	2.8
75	0.015	—	300	0.17	3.0
100	0.025	1.6	400	0.25	3.0
150	0.029	2.2	500	0.31	3.6
200	0.042	2.6			

表 3 常用 射线源的半值层 mm

屏蔽材料	^{60}Co	^{137}Cs	^{60}Ni	^{192}Ir
铝	70	50	27	20
混凝土	70	50	27	—
钢	24	14	9	5
铅	13	3	0.8	0.6
钨	10	2.5	—	0.09
铀	6	2.3	—	0.035

4 屏蔽材料的半值层

表 2 和表 3 分别是 GB 17150—1997 和 GB 18465—2001 给出的 X 射线和 γ 射线常用屏蔽材料的半值层。GB 18465 标准还给出了 γ 射线入射到部分材料中的衰减度曲线和确定控制区的曲线。

综 述

我国射线检测技术近年的发展

郑世才

(新立机器厂,北京 100039)

摘 要: 简要介绍我国工业射线检测技术自 20 世纪 90 年代以来的最新发展概况,包括射线照相检验技术理论、工艺和器材,非胶片射线照相技术,实时成像检验技术,射线层析成像技术,康普顿散射成像技术以及标准化等方面的发展。

关键词: 射线照相检验;实时成像;射线层析检验;非胶片射线检验;射线检测设备;标准;综述

中图分类号: TG15.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6656(2004)04-0163-04

AN OVERVIEW OF THE LATEST ADVANCEMENT OF RADIOLOGY IN CHINA

ZHENG Shi-cai

(Xinli Machinery Plant, Beijing 100039, China)

Abstract: The latest development of industrial radiology in China was outlined, including the aspects of the theory, technology and equipment of radiology, computed radiography(CR), real-time imaging radiography, computed tomography(CT), Compton scattering imaging and the standardization of radiology.

Key words: Radiography; Real-time imaging; Computed tomography; Computed radiology; Radiological equipment; Standard; Survey

射线检测技术,从最初的单纯胶片射线照相检验,经 100 多年的发展,今天已成为以先进的数字技术为特征,包括射线照相检验、射线实时成像检验和射线层析检测等多种技术的无损检测手段。由于具有可自我监控检测工作质量和检测技术正确性的特性,已成为重要和广泛应用的无损检测技术。

无损检测学会成立以后,由于从事射线检测技术研究、应用和射线检测设备研制、生产人员的努力,我国射线检测技术也在迅速发展和提高,在各个工业部门,射线检测技术与其它无损检测技术一起,为保证产品质量发挥着独特的作用。下面简要介绍我国射线检测技术近年来的发展概况。

1 常规射线照相检验技术理论

20 世纪 80 年代以来,我国射线检测技术工作者引入了欧美和日本射线检测技术的研究成果^[1,2],并进行了消化性的研究和吸收,逐步形成了适合我国的、科学的理论系统。以无损检测学会

级教材^[3]、锅炉压力容器系统教材^[4]和航空航天系统内部, 级合一培训教材《射线检测技术》为代表的最新版培训教材,基于对射线照相检验技术基本理论和技术的理解和多年实际检验工作经验的总结等,构建了我国射线照相检验技术的理论系统。该系统的一个重要方面是,将射线照相影像质量作为重要内容单列一章,并以它为检验技术的理论基础。该理论系统对提高射线照相检验技术水平具有明确的指导作用。

从 80 年代后期,我国的一些射线检测工作者对国外有关标准给予了很多的注意。一方面,翻译了一些有影响的国外标准,另一方面,从射线照相检验技术的一般理论对标准的规定进行了分析研究,明确提出了射线照相检验技术标准有关技术规定的核心线索(图 1)。它不仅给出了射线照相检验技术的基本方面,而且揭示了各方面的基本关系。这对于理解、应用和修订标准显然都具有意义。

2 常规射线照相检验工艺

各工业部门的射线照相检验人员,广泛讨论了

收稿日期:2003-09-30

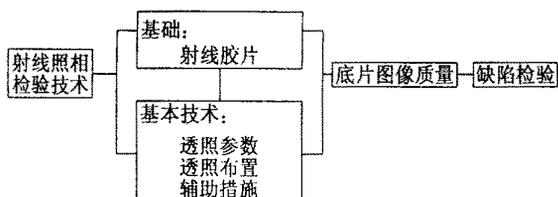


图 1

各种工件和产品的射线照相检验工艺问题,确立了一些基本关系。较突出的是小直径管对接焊缝射线照相检验工艺,这也是我国多年关注的问题。

90年代,射线检测工作者所做的进一步工作^[5~7]主要有,全面引入国外标准有关直径、壁厚、焊缝宽度、透照方式和透照次数的规定;对这些规定从一般理论上进行了讨论,并进行了试验验证,给出了椭圆成像一次有效透照长度的近似估计方法。这些工作使小直径管对接焊缝的射线照相检验有了完整的工艺,揭示了我国有关标准存在的不足和问题。

3 缺陷自动识别^[8~10]

近年来,随着计算机技术、图像处理技术和模式识别技术的发展,缺陷自动识别技术一直受到一些研究机构的关注,已有一些熔焊缺陷自动识别研究结果,如北方交通大学等提出了提高缺陷识别率的新课题,哈尔滨工业大学国家焊接重点实验室完成了电阻点焊缺陷的自动识别评定研究。该方面的研究可能还要经历一段时间才能得到工业应用成果。

4 射线检测器材

在常规射线照相检验技术的器材方面,国内近年来多集中在研制管道爬行器和减轻便携式X射线机的重量方面。我国的X射线机生产厂,如沈阳探伤机厂、中南无损检测仪器厂和大连通海公司等为减轻便携式X射线机的重量做了许多工作^[11],已取得了明显进展。我国已研制出系列管道爬行器,现正向体积小、重量轻和数字成像的方向努力^[12]。

海门探伤机厂等研制了⁷⁵Se源射线探伤机。⁷⁵Se是近年倍受关注的一种射线源,已列入国外重要标准,给出其适用的厚度范围,即A级10~40mm(钢),B级14~40mm(钢)。我国的一些应用证明,在该厚度范围内得到的底片质量优于其它射线源,接近X射线照相。

浙江缙云像质计厂生产的像质计已出口美国,为满足航空航天工业需求,现正研制直径<0.1mm的丝型像质计,这也是我国今后标准的要求。

5 CR技术

CR(Computed Radiography; Computed Radiology)技术是近年正在迅速发展的数字射线照相技术中一种新的非胶片射线照相技术。该技术是基于某些荧光发射物质具有保留潜在图像信息的能力,这些荧光物质在较高能带俘获的电子形成光激发射荧光中心,在激光激发下,光激发射荧光中心的电子将返回它们初始能级,并以发射可见光的形式输出能量。这种光发射与原来接收的射线剂量成比例。这样,当激光束扫描储存荧光成像板时,就可得到射线照相图像。已有文献报道,CR技术已成功应用在一些重要方面。我国射线检测工作者对该技术给予了充分的重视。除公开介绍该技术外,还将该项技术列入锅炉压力容器高级人员复试培训和考试内容。北京邹展鹿城无损检测器材公司组织了CR技术座谈会,并进行了应用试验。江苏立达机电(昆山)有限公司已引入了美国PPTI公司的CR技术成像板。期望它尽快成为可替代胶片的射线照相检验技术。

6 射线实时成像检验技术

射线实时成像检验技术几乎与胶片射线照相技术同时发展。早期主要是荧光屏实时成像检验系统,目前应用的射线实时成像检验系统有多种,主要是图像增强器、成像板和线阵列射线实时成像检验系统等。成像板和线阵列射线实时成像检验系统是近年发展起来的数字实时成像检验系统,它们使用基于非晶硅的闪烁检测器和荧光-光电倍增器制成的成像板或线阵列拾取信号。这种实时成像检验系统的主要特点是,同时具有很高的分辨力和很大的动态范围,可检验厚度差或密度差很大的物体。

我国一些工业部门从70年代开始引入图像增强器射线实时成像检验系统,目前主要应用于轮胎、铸造汽车轮毂、蒸汽锅炉过热器、省煤器及水冷壁系统的小管径对接焊缝检验。广东粤海钢瓶厂等对液化气钢瓶对接焊缝的图像增强器射线实时成像检验与胶片射线照相检验作了大量对比和总结,形成了气瓶对接焊缝的图像增强器射线实时成像检验技术,并制订了相应的国家标准^[13]。北京机械工业自动化所研制了高能射线实时成像检验系统,可用于大厚度工件的检验。其它工业部门在其适应范围也开展了图像增强器射线实时成像技术的应用。

我国的部分高等院校,如华北工学院、清华大学

和北方交通大学等对数字图像处理技术也进行了研究^[14~16],取得了一些成果。学会射线专业委员会为推进射线实时成像检验技术的应用和发展,组织撰写了射线实时成像检验技术专题讲座^[17~22],介绍射线实时成像检验技术的理论、技术和设备。

近年来,我国电子工业部门引入了多台微焦点射线实时成像检验系统,主要是图像增强器射线实时成像系统,用于检验电子元器件和印制板的锡焊点。这种系统一般都具有层析功能。清华大学还开展了层析方法的研究^[23]。

线阵列射线实时成像检验技术是值得注意的数字化实时成像检验技术,图2是采用线阵列射线实时成像系统检验厚度为45mm的铝合金铸件上一长度为10mm,最大深度为6mm的自然裂纹和铜偏析的图像,直观上它与



图2

胶片射线照相得到的图像无明显差别。兰州三磊电子公司开发了线阵列射线实时成像检验系统,该系统已在我国航空航天工业应用于实际产品的检验。该公司还研制了适用于管道焊缝检验的线阵列射线实时成像系统,对于改进管道焊缝的射线检验具有重要意义。

清华大学同方核技术股份有限公司、清华大学工程物理系和电子部第12研究所等单位研制了适用于海关检验的、以“同方威视”命名的大型集装箱检查系统^[24],用加速器作射线源,用大型阵列探测器采集数据。我国海关口岸已装备多台这种设备,对大型集装箱实现快速检查,查获了大批走私物品,取得了良好经济和社会效益。图3是检查图像。

清华大学核研院研制了⁶⁰Co数字式集装箱检验系统,发明的高灵敏度阵列探测器、低噪声前端电路和图像处理技术使系统的检测性能可与加速器集装箱检查系统相比。1997年样机问世,现已装备部分

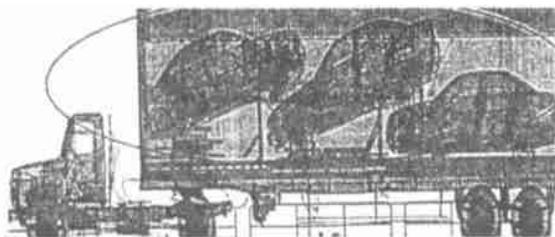


图3

海关,并受到国际市场的关注^[25]。

射线实时成像检验技术能否代替胶片射线照相检验技术,是近年射线工作者和有关方面十分关注的问题。在最近的航天系统无损检测技术交流会上,研究人员从射线照相检验技术的基本理论出发,分析了射线照相检验技术标准的规定和射线实时成像技术,提出了评价射线实时成像检验技术与射线照相检验技术对缺陷检验能力的等价性指标,给出了评定等价性的方法^[26]。显然,这对射线实时成像检验技术今后的应用具有意义。

7 射线 CT 技术

80年代我国已开展了CT(计算机层析成像)技术的理论和试验研究工作。90年代初重庆大学ICT中心、中科院高能所和东北大学等先后成功研制了射线CT装置。为打破某国家对我国高能CT的封锁和禁运,我国一些研究单位已在研究高能CT装置,并研制出X射线工业CT装置。为适应现场检验需要,苏州兰博集团研制了现场用CT装置。该装置采用少量的探测器、特殊的重建算法和小而弱的射线源,并已成功用于管道腐蚀的现场检验。

90年代中期以来,我国一些单位先后从俄罗斯、美国等国家引进了X射线工业CT装置,开展了CT技术的试验和应用研究,已成功用于产品的缺陷检验、尺寸测定和结构分析等,在精密铸件和焊接件检验及反馈工程等方面已取得了应用成果。

为推动我国CT技术的进展,学会射线专业委员会组织有关专家撰写了专题讲座^[27~32],介绍CT技术的理论、设备和应用技术,受到读者的欢迎。

8 康普顿散射成像检测技术

除了射线CT技术,康普顿散射成像也是一种层析检测技术。实际上微焦点实时成像和扫描源射线实时成像也都可以得到层析图像。

目前我国仅有少数单位研究康普顿散射成像检测技术。

1994年,航天工业部门采用普通X射线机,以胶片作为接收探测器,完成了康普顿散射成像检测试验。图4是当时成功得到的由印制板、铝板和钢板所制试件的康普顿散射成像的清晰层析图。1996年苏州兰博集团研制出了CBS-型康普顿散射成像检测装置。近年来,我国航天工业部门用从国外引进的或国内协作研制的康普顿散射成像检测装置

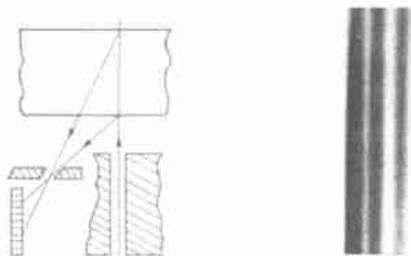


图 4

开展了试验和应用研究。在最近召开的航天无损检测技术交流会上,有的单位介绍了他们在特殊结构或特种材料检测中的应用情况。

9 标准化工作

80年代后期以来,我国射线照相检验方面的标准基本完备,先后制订了方法(技术)、质量控制及器材等方面的标准,也制订了一系列工业部门的标准,为射线照相检验工作的开展提供了标准基础。但至今仍缺少其它射线检测技术方面的标准,特别是实时成像检验方面的标准。

90年代后期,国外对射线照相检验标准作了重要修改,我国对国外新标准进行了翻译、介绍。近两三年修订的射线照相检验标准,广泛吸收了国外相关标准的重要修改内容,典型的是 GB 1187A—2001版和 GB 3323 修订版(待发布)。这些新版标准在射线照相检验技术级别的划分、胶片选用、允许的最高透照电压、一次透照区规定、底片黑度和灵敏度(特别是 < 6mm 厚度范围的规定)等方面,普遍接受了国外标准(特别是 ISO 5579:1998 和 EN 1435:1997)近年的规定。此外,我国目前正在制订射线实时成像检测技术和射线 CT 技术的国家军用标准,其主要技术内容广泛参考了近年国外主要标准的规定,对这些技术的应用和发展必将起到一定的推动作用。

我国近年关于辐射防护又制订或修订了一些新的标准,与射线检测关系密切的有 GB 5294—2001《职业照射个人监测规范 外照射监测》, GB/T 16135—1995《放射事故个人外照射剂量估计原则》, GB/T 16139—1995《用于中子辐射防护的剂量转换系数》, GB 16357—1996《工业 X 射线探伤放射卫生防护标准》, GB 16363—1996《X 射线防护材料屏蔽性能及检验方法》, GB 16387—1996《放射工作人员的健康标准》, GB 16757—1997《X 射线防护服》, GB/T 17150—1997《放射卫生监测规范 第 1 部分工业

X 射线探伤》以及 GB 18465—2001《工业 射线探伤放射卫生防护要求》。这些标准中,多数是具体化的规定,对实际射线检测工作的辐射防护具有明确的指导意义。

10 结束语

以上简略介绍了近年来我国射线检测技术发展的概况,仅是一个基本、概括的情况,限于个人的水平和了解的情况,肯定还有一些重要的内容未能涉及,企望读者补正。

参考文献:

- [1] 日本无损检测学会编,李 衍译.射线探伤 A,B[M].北京:机械工业出版社,1988.
- [2] 郑世才编译.射线照相探伤的理论和技术[J].无损探伤,1988,(5,6):38-46.
- [3] 无损检测学会编.射线检测[M].第3版.北京:机械工业出版社,2003.
- [4] 强天鹏主编.射线检测[M].昆明:云南科技出版社,2001.
- [5] 郑世才.射线照相技术级别规定的评述[J].无损检测,1998,20(9):254-256.
- [6] 李 衍.欧洲射线检测新标准评述[J].无损检测,2000,22(10):466-469.
- [7] 周迪生.小口径管对接焊缝 X 射线检验的像质指数及一次透照有效范围[J].无损检测,1996,18(11):311-314.
- [8] 李绍臣,王佩红.工业 X 射线底片数字化存储管理系统[J].无损检测,2000,22(5):212-214.
- [9] 巴晓艳,滕永平.焊缝缺陷的计算机模式识别方法的研究[A].全国射线检测技术及加速器检测设备和应用技术交流会论文集[C].郑州:2001.50-54.
- [10] 何 怡,杨永才.焊缝底片计算机辅助识别的研究[J].无损检测,2001,23(12):548-550.
- [11] 朱文钰.便携式 X 射线机发展之趋势及应注意的问题[J].无损检测,2002,24(8):349-351.
- [12] 孟庆荣,贾继莹,等.X 射线管道爬行器的研制过程及发展方向[J].无损探伤,2002,(6):29-30.
- [13] GB 17925—1999,气瓶对接焊缝 X 射线实时成像检测[S].
- [14] 任大海,孙长库,等.射线实时成像中图像拼接技术的研究[J].无损检测,1999,21(11):481-483.
- [15] 桂志国,韩 焱,等.射线图像自动配准技术[J].无损检测,2002,24(10):415-417.
- [16] 刘金汇,安继刚,等.集装箱检测图像识别技术研究[J].无损检测,2002,24(12):519-521.

2004 大连国际分析计量测试、无损检测展览会

2004 大连国际分析计量测试、无损检测展览会将于 2004 年 6 月 16~18 日在大连星海会展中心举行。展会由大连市无损检测学会和辽宁省分析测试学会主办,辽宁省无损检测学会、黑龙江省分析检测学会和吉林省分析检测学会协办,大连华展展览服务有限公司承办。

东北地区是中国的重工基地,分析计量测试、无损检测仪器暨设备市场需求量大。当前,国家正在实施振兴东北老工业基地的投入,这为国内外分析计量测试、无损检测设备生产厂家及经销商带来了新的市场机遇,该展览会将为行业内新技术、新产品进入东北市场提供一个难得的平台。

大连是我国北方的开放城市,是中国的重化工业基地,机械、石油、化工、电力、冶金和造船等重工业蜚声海内外,拥有上万家三资企业。由于其优越的地理位置、良好的投资环境,大连市成为东北地区经济发展最快的城市,是国家振兴东北老工业基地的重点城市。中央为振兴东北首期 100 个投资项目,大连占 17 个,投资额 133 亿元人民币(沈阳市投资项目 9 个,总投资 10 亿元,吉林和黑龙江两省的投资总额为 170 亿元),仅大连石化一个项目投资就达 90 多亿。作为展览中心城市,大连的展览会可以

辐射到东北地区及环渤海地区,我们相信,在强大的市场需求带动下,通过组委会的精心组织,该展览会一定会给参展企业带来不菲的收益。

展品范围:

(1) 分析测试领域 分析仪器设备、电子及光学显微镜、光学分析仪器、电化学分析仪器、X 射线分析仪器、光谱仪、色谱仪、质谱仪、频谱仪、波谱仪、微区分析仪、热分析仪、表面分析仪、元素分析仪、成分分析仪、过程分析仪及各种计量仪器等。

(2) 行业应用领域 环境分析监测仪(水质、气体、噪声和振动测试仪、污染监测系统等)、石油化工业仪器、电子通讯维修测试、纺织化纤、建筑建材等行业用仪器。

(3) 质量控制领域 工业现场总线、物性测试仪、工业过程质量控制、在线检测设备及材料测试与鉴定等。

(4) 无损检测领域 超声检测、涡流检测、磁粉检测、渗透检测、射线检测及其它检测仪器与设备。

大连华展展览服务有限公司地址:大连市西岗区同仁街 50 号万达公寓 10-4 号;邮编:116011;联系人:于富顺;电话:0411-3787420,3787490;传真:0411-3787420,3787490。

- [17] 郑世才. 射线实时成像检验技术 第一讲 射线实时成像检验技术发展概况[J]. 无损检测, 1996, 18(7): 202.
- [18] 刘建春. 射线实时成像检验技术 第二讲 工业射线实时成像检验系统[J]. 无损检测, 1996, 18(8): 232.
- [19] 刘建春, 吴东流. 射线实时成像检验技术 第三讲 射线实时成像图像质量与图像处理技术[J]. 无损检测, 1996, 18(9): 267.
- [20] 李 衍. 射线实时成像检验技术 第四讲 X 射线实时成像的原理和特性[J]. 无损检测, 1996, 18(10): 290.
- [21] 李 衍. 射线实时成像检验技术 第五讲 射线实时成像探伤方法要领[J]. 无损检测, 1996, 18(11): 324.
- [22] 郑世才. 射线实时成像检验技术 第六讲 分辨率[J]. 无损检测, 1996, 18(12): 349.
- [23] 李 政, 康克军, 等. 微焦点 X 射线分层成像无损检测方法[J]. 无损检测, 2002, 24(5): 185 - 187.
- [24] 张化一, 等. 海关大型集装箱检查系统[A]. 全国射线检测技术及加速器检测设备和应用技术交流会论文集[C]. 郑州: 2001. 76 - 108.
- [25] 安继刚, 等. ^{60}Co 集装箱检测设备系列研究与应用[A]. 全国射线检测技术及加速器检测设备和应用技术交流会论文集[C]. 郑州: 2001. 61 - 75.
- [26] 郑世才. 射线实时成像检验技术与射线照相检验技术的等价性讨论[J]. 无损检测, 2003, 25(10): 500 - 503.
- [27] 郭志平, 董宇峰, 张朝宗. 工业 CT 技术 第一讲 工业 CT 技术发展概况[J]. 无损检测, 1996, 18(1): 27.
- [28] 先 武, 李时光. 工业 CT 技术 第二讲 工业 CT 的基本原理与性能[J]. 无损检测, 1996, 18(2): 57.
- [29] 倪培君, 王存龙, 李旭东. 工业 CT 技术 第三讲 工业 CT 系统的结构及配置[J]. 无损检测, 1996, 18(3): 84.
- [30] 李时光, 先 武. 工业 CT 技术 第四讲 工业 CT 图像重建原理[J]. 无损检测, 1996, 18(4): 111.
- [31] 倪培君, 李旭东. 工业 CT 技术 第五讲 工业 CT 的图像质量[J]. 无损检测, 1996, 18(5): 142.
- [32] 倪培君, 李旭东, 彭建中. 工业 CT 技术 第六讲 工业 CT 在无损检测中的应用[J]. 无损检测, 1996, 18(6): 173.