

# 影响材料拉伸试验强度的若干技术因素

文/徐飞鸿（长沙理工大学桥梁与结构工程学院）

**【摘要】** 本文总结了试验温度效应、加载速率效应、试验条件及试样工艺效应、偏心效应和试验刚度对材料拉伸试验强度的影响。从应力分析和变形能的角度对影响材料拉伸试验强度的主要技术因素进行了力学分析,给出了获取试验准确数据的若干建议。

**【关键词】** 拉伸试验 屈服强度 抗拉强度

屈服强度  $\sigma_s$ 、抗拉强度  $\sigma_b$ 等参数是金属材料最富代表性的力学性能指标,是工程设计、机械制造的主要依据,这类力学性能指标的分析和研究对于从事基础理论研究和分析工程事故具有非常重要的意义。

试验测试是获取材料的强度等力学性能指标的可靠方法。例如可拉伸、压缩、弯曲试验的方法等等。其中,拉伸试验方法是检验材料力学性能的一种最重要、最有效和最常用方法。但是,要准确地测得材料的拉伸性能,应有技术先进、功能齐全、质量可靠的试验机,同时还必须正确掌握试验方法,排除各种不利的因素,否则处理不当,就会引入很大的误差。本文探讨试验机技术状态、试验条件和测试技术等相关的技术因素对材料拉伸试验强度的影响。

## 1 影响材料拉伸试验强度的因素

金属材料的屈服强度  $\sigma_s$ 是材料塑性变形开始时单位面积上所需的最低载荷,它标志着金属材料对于起始微量塑性变形的抗力。 $\sigma_s$ 值对不同的金属材料表现的敏感程度不同,例如退火低碳钢、不锈钢出现锯齿状平台,而高碳钢仅出现明显的拐点。大多数的合金钢、高温合金、铝合金、镁合金、铸铁等则无明显的屈服现象。为了表示不同金属材料对微量塑性变形的抗力和比较试验结果,规定塑性变形为某标准长度(试样标距)的0.2%时的应力,用  $\sigma_{0.2}$ 表示,称为条件屈服强度;抗拉强度  $\sigma_b$ 则反映了材料抵抗大塑性变形和断裂破坏的能力。材料的强度是材料本身固有的属性,但度量材料强度的指标如  $\sigma_s$ 和  $\sigma_b$ 等指标受诸多技术因素影响,实质上即为材料的“试验强度”,主要涉及到试验机技术状态、试验条件和测试技术,包括试验温度、加载速度、应力状态、介质环境、试验刚度、试验机示值超差、测试方法等。本文基于长期的强度测试实践和已有的研究成果,将其归纳为拉伸试验强度的试验温度效应、加载速率效应、试验条件及试样工艺效应、偏心效应和试验刚度效应。现分述如下:

**1.1 温度效应** 随着试验温度的升高,金属材料的  $\sigma_s$  ( $\sigma_{0.2}$ )显著降低。例如低碳钢材料,随着试验温度升高,其屈服强度  $\sigma_s$ 相应降低且屈服平台的长度逐渐缩短,直至某一温度屈服平台消失,  $\sigma_s$ 不复存在;由于温度升高使材料的晶界由硬、脆转变为软、弱,使其抗力降低,因此,材料的  $\sigma_b$ 在宏观上也随试验温度的变化而改变。

**1.2 加载速率效应** 材料的屈服点随加载速率的增大而提高;室温条件下,拉伸速度对强度较高的

金属材料的  $\sigma_b$  无影响，而对强度较低的、塑性好的金属材料有微小的影响。拉伸时加载速率增大， $\sigma_b$  有增高的趋势。在高温下，拉伸加载速率对  $\sigma_b$  有显著的影响。

**1.3 试验条件及试样工艺效应** 金属材料处于有害的介质环境时，试样的屈服点降低。试样的表面粗糙度对屈服点也有影响，特别是对塑性较差的金属材料有较大的影响，有使屈服点降低的趋势。

**1.4 偏心效应** 由于试验机的加载轴线与试样的几何中心不一致，所以严格的轴向荷载（图 1 (a)）是很难获得的，这就造成了试验机偏心加载、产生弯曲而引入测试误差。考虑同轴度的影响，试样受拉变形的简化力学模型如图 1 (b) 所示。其中，几何同轴度为  $e$ 、力的同轴度为  $\alpha$ 。

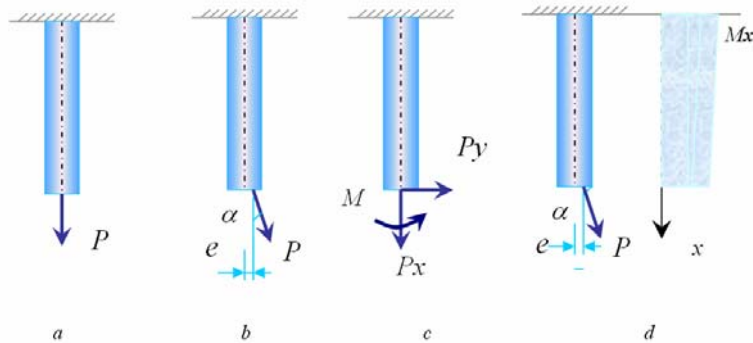


图 1 同轴度的影响

**1.5 试验刚度效应** 在材料的拉伸试验中，试验系统可视为试验机机身、夹具-加载系统和试样三部分构成的“可变形的试验系统”。显然，试验机机身的刚度  $k_m$ 、夹具-加载系统的刚度  $k_s$  和受拉试样的抗拉刚度  $EA$  共同构成了“试验系统”的刚度。所以，试验机的弹性变形、夹具-加载系统的工作状态和试样本身的变形都会对试验产生影响，即试验刚度在一定程度上会影响试样的试验强度指标。在实践中，不同刚度的试验机实测对比结果也反映了试验刚度对材料试验强度的影响。

## 2 分析与讨论

**2.1 试验温度及加载速率的影响** 已有的研究成果表明，试验温度及加载速率对材料拉伸试验强度的影响是非常明显的。如图 2 所示。

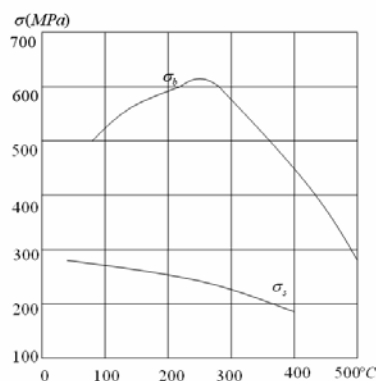


图 2 温度影响

金属材料试验的加载速率对测试结果影响是明显的，特别是在高速加载条件下还会产生升温效应，升温速率与变形应力及变形速率成正比。升温可以引起各种效应。金属材料在拉伸或压缩时，如果形变速度较高，应变较大，可使样品温度升高 50℃，局部更高，这对材料的力学性能将产生重要影响。

**2.2 同轴度的影响** 在理想的情况下，试样受轴向拉伸如图 1 所示，其任一横截面上的应力为

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

其中： $A$ 为试样的横截面积。

考虑到试验机同轴度的影响，设几何同轴度为  $e$ 、力的同轴度为  $\alpha$ ，试样的实际受力情况如图 2 所示，其等效力系如图 1 (c) 所示。显然，

$$\begin{aligned} P_x &= P \cos \alpha \\ P_y &= P \sin \alpha \\ M &= P \bullet e \end{aligned} \quad (2)$$

$P_x$  引起的正应力为

$$\sigma_1 = \frac{P \cos \alpha}{A} \quad (3)$$

$P_y$  引起的最大弯曲应力为

$$\sigma_2 = \frac{P_x \sin \alpha}{W} \quad (4)$$

$M$  引起的最大弯曲应力为

$$\sigma_3 = \frac{Pe}{W} \quad (5)$$

于是各截面上最大正应力发生在试样的边缘，其大小为：

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \frac{P \cos \alpha}{A} + \frac{P_x \sin \alpha}{W} + \frac{Pe}{W} \quad (6)$$

式中第一项是按常规方法计算得到的应力，后两项则为同轴度影响产生的弯曲应力的贡献。

$\sigma_{\max}$  沿试样长度方向各截面的最大应力如图 1 (d) 所示。

以圆棒试样为例  $W = \frac{\pi r^3}{4}$ ，仅考虑几何同轴度影响时，则

$$\sigma = \frac{F}{A} \left( 1 + \frac{4e}{r} \right) \quad (7)$$

如果偏心率用百分数表示就是

$$\frac{\sigma_{\max} - \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} \times 100 = 1 + \frac{4e}{r} \quad (8)$$

$\frac{4e}{r}$  的范围通常可达 0.08~0.8，即最大应力要比平均应力大 8%~80%，可见由于偏心引起的附加应力很大，可以引起很大的误差。

此外，对于试样的某个截面，其最大应力发生在表面；对于整根试样，其最大应力发生在根部

的表面。这正是我们在实践中经常看到试样的断裂点发生在试样根部的原因。

### 2.3 试验刚度的影响

设试验机机身的刚度为  $k_m$ ，夹具-加载系统的刚度  $k_s$ ，试验负荷为  $P$ ，则整个试验系统所贮存的弹性变形能  $U$  为：

$$U = U_m + U_s + U_\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{P^2}{k_m} + \frac{1}{2} \frac{P^2}{k_s} + \frac{1}{2} \frac{P^2 l}{EA} \quad (9)$$

式中， $U_m = \frac{1}{2} \frac{P^2}{k_m}$  为机身在试验过程中积蓄的弹性变形能；

$U_s = \frac{1}{2} \frac{P^2}{k_s}$  夹具-加载系统在试验过程中积蓄的弹性变形能；

$U_\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{P^2 l}{EA}$  为试样在试样在拉伸试验过程中所积蓄的弹性应变能，其中  $l$  和  $EA$  分别为为被测试样的长度和抗拉刚度。

可见，在试验过程中，随着荷载  $P$  的增加，试验刚度会逐渐减小。式（9）还说明试验刚度与试验的尺寸有关，不同尺寸的试验在相同的试验机和相同的载荷率下的结果是有差异的；试验材料的弹性模量影响试验的刚度，不同试验机测同一材料的弹性模量也就不完全一致。例如，用 CMT5305 和 CMT5105 微机控制电子万能材料试验机测得某钢材的拉伸弹性模量  $E = 221 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，而用刚度较小的国产某型液压式万能材料试验机测得同一材料的弹性模量  $E = 208 \times 10^5 \text{ MPa}$ ，误差达 6%。

## 3 结论

影响简单拉伸试验结果的因素很多，只有在相同试验条件下的试验结果才有比较意义。而且，在简单拉伸试验中常常会试验温度效应、加载速率效应、试验条件及试样工艺效应、偏心效应和试验刚度效应等因素影响而引入一些附加的应力，使材料的“试验强度”要小于真实存在的强度。因此，只有通过认真分析、研究影响试验结果的因素，才能获得准确的试验数据。

**3.1 遵循规范、仔细操作、认真分析、将各种技术因素对材料试验强度的影响最小化** 例如，在屈服点之前，试验机两夹头的相对速率通常不大于原标距长度的  $8\%/min$ ；仲裁试验时，要求试验机两夹头的相对速率不大于原标距长度的  $2\%/min$  等等。

**3.2 使用符合要求的试样，保证加载的对中度，尽量使用气动或液压夹具，减少偏心效应的影响**

在试验前，要对材料试验机同轴度进行测量，使其保持在规程允许的范围之内，以保证材料拉伸强度受材料试验机同轴度的影响最小。

**3.3 试验刚度随荷载  $P$  的增加而逐渐减小，试验的刚度也与试样的尺寸和材料弹性模量有关** 因此，试验刚度是我们在设计和选用试验机时不容忽视的一个重要问题。

### 参考文献：

- [1] Hull D. Tilting cracks: the evolution of fracture surface topology in brittle solids. Int J Frac. 1993, 62(2):119~138
- [2] Nardone V C, Prewo K M. tensile performance of carbon-reinforced glass. J Mater Sci, 1988. 23(2):168~180
- [3] 刘鸿文. 材料力学. 高等教育出版社, 北京, 1988