

AL-6XN 超级不锈钢的材料特性及其应用

合肥通用机械研究所

张委佗

摘 要

本文简要地介绍了 AL-6XN 超级奥氏体不锈钢的材料特性及在国内外石油化工、海水淡化、海洋工程、烟气脱硫工程、食品工业、造纸工业等各种工业环境中的应用实例。该合金为高 Mo 含 N 奥氏体不锈钢, 具有优良的成型性能及焊接性能, 近三年中, 已迅速应用于中国化工企业及烟气脱硫工程中。

关键词: AL-6XN 超级不锈钢, 力学性能, 许用应力, 点腐蚀, 晶间腐蚀, 应力腐蚀, 应用范围

前 言

AL-6XN 超级不锈钢[®]是美国 Allegheny Ludlum 公司开发的一种高 Mo 含 N 奥氏体不锈钢, 已有三十年工业应用历史, 在世界各地广泛应用于海洋工程、海水淡化、烟气脱硫、石油化工、食品工业、造纸工业等各工业领域。AL-6XN 不锈钢是设计用于耐海水腐蚀的超级不锈钢, 高 Cr, Mo, Ni 含 N 的合金元素配比使其在各种含氯离子的酸性腐蚀环境中具有良好的抗点腐蚀, 缝隙腐蚀, 晶间腐蚀, 应力腐蚀的能力。该合金具有良好的力学性能, 焊接性能, 易于在现场进行设备制造与安装。AL-6XN 不锈钢具有各种形式的产品, 例如: 管、薄板、带、棒、厚板、锻件等变形产品。同时, 还可提供泵、阀、管件、法兰等各种铸件、锻件产品。

AL-6XN 的材料特性

AL-6XN (UNS N08367) 合金的化学成份列于表 1。

表 1 AL-6XN 的典型化学成份

化学元素 牌号	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Fe
AL-6XN 典型成份	0.02	0.40	0.02	0.001	0.40	20.5	24.0	6.2	0.22	0.2	基
UNS N08367	≤0.03	≤2.00	≤0.04	≤0.03	≤1.00	20.0/22.0	23.50/25.50	6.00/7.00	0.18/0.25	≤0.75	基

AL-6XN 的力学性能列于表 2。

表 2 AL-6XN 及其他不锈钢的力学性能

力学性能 牌 号	抗拉强度 σ_b (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	δ (%)	硬 度
AL-6XN 典型 力学性能	744	365	47	HBR 88
UNS N08367	≥ 690	≥ 310	≥ 30	HB ≤ 240
904L	≥ 490	≥ 1220	≥ 35	/
316L	≥ 485	≥ 170	≥ 40	≤ 96

从表 1 及表 2 所列数据可看出, AL-6XN Cr、Ni、Mo 三种合金元素的总量已超过 50%, 且钢体纯净度好, C、S、Si、Mn 等有害杂质元素大大低于 ASTM 标准要求, 同时, 该合金的强度指标明显高于 300 系列不锈钢, 屈服强度较 316L 高约 1/3, 其许用应力值也明显高于 904L 和 316L 不锈钢。

表 3 各种不锈钢 ASME 标准许用设计应力值 (MPa)

商品牌号	38°C	93°C	149°C	204°C	260°C	316°C
AL-6XN	187.0	180.8	164.2	151.5	141.5	133.9
904L	140.8	115.2	104.2	95.2	87.6	82.1
316L	115.2	98.0	87.6	80.7	75.2	71.8

AL-6XN 的耐蚀特性

各种耐蚀合金的大部分破坏是由于点腐蚀, 缝隙腐蚀, 晶间腐蚀和应力腐蚀造成的。AL-6XN 具有较 300 系列不锈钢更为优良的抗点腐蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀及均匀腐蚀的能力。

点腐蚀:

耐蚀合金的抗点腐蚀能力可以用三种点蚀指标来表示, 第一种表明合金抗点腐蚀性能的指标是点蚀当量 (PRE_N), 即通过计算合金成份用点蚀当量 (PRE_N) 来衡量, $PRE_N = \%Cr + 3.3\%Mo + 30\%N$ 。表 4 为不同合金的点蚀当量及常规的点蚀指数和缝隙指数。

表4 不同合金的点腐蚀和缝隙腐蚀指数

合金	合金元素含量 (Wt%)			PRE _N	CCCT ¹	CPT ²	CPT ³
	Cr	Mo	N		°C	°C	°C
304	18	—	0.06	19.8	<-2.5	—	—
316	16.5	2.1	0.05	24.9	<-2.5	15	—
317	18.5	3.1	0.06	30.5	1.7	19	25
904L	20.5	4.5	0.05	36.9	20	40	45
AL-6XN	20.5	6.2	0.22	47.6	43	80	78

- *注：1、按 ASTM G-48B 试验方法所得数据；
 2、按 ASTM G-48A 试验方法所得数据；
 3、试验在 4%NaCl+1%Fe₂(SO₄)₃+0.001MHCl 中进行。

根据表4中所有指数的排队表明 AL-6XN 具有较好的抗点腐蚀及缝隙腐蚀的能力。

第二种表明耐蚀合金抗点腐蚀能力的是“点蚀电位”。在标准的氯化物溶液中使用电化学方法测得点蚀电位。点蚀电位表明合金对局部腐蚀的相对敏感性。电位较正的合金较难产生点腐蚀，图1为不同合金在 3.5%NaCl 溶液中的点蚀电位。

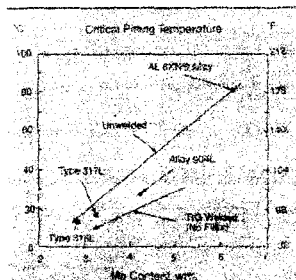


图1 不同合金在 3.5%NaCl 溶液中的点蚀电位

第三种测定耐蚀合金抗点腐蚀能力的指标为“临界点蚀温度 CPT”。图2和图3分别在 6%FeCl₃ 和在 4%NaCl+1%Fe₂(SO₄)₃+0.001MHCl 中测得的 CPT 值。

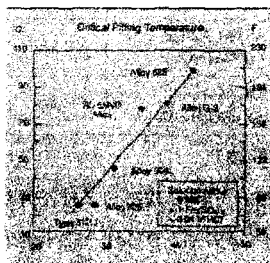
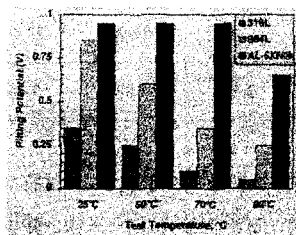


图2 在 FeCl₃ 溶液中测得的临界点蚀温度 图3 在 NaCl+1%Fe₂(SO₄)₃ 混合液中测得的临界点蚀温度

从图2、图3中可看出, AL-6XN的临界点蚀温度高于317L、904L及825合金。

缝隙腐蚀

缝隙腐蚀往往发生在金属间的垫圈下以及接头处的沉淀物下,其产生的条件低于点腐蚀,隐蔽性则高于点腐蚀,因此缝隙腐蚀的危险性远大于敞开在表面上的点腐蚀。在6%的三氯化铁溶液中,首先观察到缝隙腐蚀的温度称为“临界缝隙腐蚀温度 CCCT”。表4为各种合金在6%FeCl₃溶液中的临界缝隙腐蚀温度。显然,AL-6XN合金具有较高的抗缝隙腐蚀能力。

表5 各种合金在6%FeCl₃溶液中的临界缝隙温度

合金牌号	316L	825 合金	317L	904L	2205 双相钢	E-B26-1	G 合金	625 合金	AL- 6XN	合金 276
温度℃	-3	-3	2	15	20	21	30	38	43	55

晶间腐蚀

晶间腐蚀是由于对耐蚀合金采取了不恰当的焊接、热处理或热加工造成碳化铬及金属间相(如 σ 相)在晶界沉淀而产生的一种局部腐蚀,AL-6XN的碳含量在0.02%左右,碳化物不易析出,但仍有因金属间相析出而产生晶间腐蚀的危险。表6为不同合金按ASTM晶间腐蚀标准试验方法试验所得试验数据。

表6 不同合金晶间腐蚀试验数据

ASTM 标准试验方法	腐蚀率 (mm/y)				
	316L	317L	904L	AL-6XN	合金 276
ASTM G28-A (Fe(SO ₄) ₂ -H ₂ SO ₄)	0.656	0.523	0.357	0.390	6.66
ASTM A262C (65%HNO ₃)	0.562	0.496	0.387	0.666	22.86
ASTM A262C (Cu-CuSO ₄ -H ₂ SO ₄)	2.69	2.51	2.33	1.88	7.00

应力腐蚀

AL-6XNU型弯曲试样在海盐咸水中的带压试验数据列于表6⁴。该试验溶液是按照ASTM D1141-52标准用海盐制备的,试验溶液含15%海盐,并调整PH值至6.5。该试验环境模拟了反渗透法海水淡化的工艺过程。

表7 AL-6XN 在海盐咸水中的带压试验结果

试验溶液	试验温度 °C	试验时间 小时	试验结果
15%海盐咸水 PH=6.5	175	511	4个U型弯曲试样有2个试样在螺栓垫片下发生了开裂
15%海盐咸水 PH=6.5	150	1000	2个U型弯曲试样均在螺栓垫片下发生了开裂
15%海盐咸水 PH=6.5	120	1008	2个U型弯曲试样均未发生开裂

均匀腐蚀

AL-6XN 在各种溶液中的均匀腐蚀率列于表8。

表8 各种合金在沸腾的试验溶液中的腐蚀率

ASTM G-31 试验溶液 (沸腾)	腐蚀率 (mm/y)				
	316L	317L	904L	AL-6XN	合金 276
20% 醋酸	0.003	0.01	0.02	0.003	0.01
45% 甲酸	0.060	0.47	0.20	0.06	0.07
10% 草酸	1.23	1.14	0.69	0.19	0.28
20% 磷酸	0.02	0.02	0.01	0.006	0.009
10%亚硫酸钠	1.82	1.42	0.23	0.12	0.07
50%氢氧化钠	1.92	0.83	0.24	0.29	0.45
10% 硫酸	16.15	7.58	2.53	1.83	0.35

从表8中可看出, AL-6XN 在沸腾的20%醋酸, 45%甲酸, 20%磷酸中有优良的耐蚀性能, 除在10%硫酸中不可用外, 在其他试验溶液中也有较好的耐蚀性, 在某些情况下具有与合金276相当的耐蚀性。

AL-6XN 在国外海水及酸性氟化物环境中的应用

由于304、316型奥氏体不锈钢在海水环境中易产生点腐蚀, 缝隙腐蚀和应力腐蚀, 因此, Allegheny Ludlum 公司开发了含更高Cr、Mo的不锈钢以耐高Cl⁻浓度咸水或海水腐蚀的AL-6X合金, 1973年, AL-6X首次被制成薄壁管用于制造海水冷凝器, 目前, 这台海水冷凝器仍运行得很好。在七十年代, 有1000万米AL-6X薄壁管用于海水或咸水换热装置中, 使用寿命已接近30年。在八十年代, 含N的AL-6XN替代了AL-6X, 已有超过1000万米的AL-6XN冷凝管正在使用, 这些冷凝管在海水中使用已超过15年, 由于AL-6XN在海水中具有优良的抗点腐蚀, 抗缝隙腐蚀及抗冲刷性能, 因此, 在美洲、欧洲, AL-6XN替代铜合金被大量应用于海洋工程中^④, 如用于海水管道系统, 各种换

热设备，海水飞溅区的支撑结构，海上钻井平台等，如挪威的两座海上钻井平台分别使用了 475 吨和 600 吨 AL-6XN 合金。尽管 AL-6XN 最初是为用海水冷却的电站冷凝器开发的产品，但由于该产品有很好的耐蚀性能、焊接性能、成型性能以及较高的强度，因此，在近三十年中，AL-6XN 合金也被广泛应用于其他各工业部门中。

在海水淡化工程中，AL-6XN 合金被大量应用于反渗透法海水淡化的高压管道、管件及阀门中，在中东地区，如以色列、利比亚、沙特阿拉伯、委内瑞拉、约旦等国采用 AL-6XN 合金建造了数十座海水淡化厂，最长运行时间已达十年。

在造纸工业中^②，在纸浆的酸化及漂白过程中，317L 不锈钢由于酸性氯化物腐蚀产生严重的点腐蚀、缝隙腐蚀及应力腐蚀，现已用 AL-6XN 合金替代 317L 制造漂白系统装置及相关管道。

在热电厂脱硫系统中，AL-6XN 对冷凝酸、炉气清洗液有很好的耐蚀性，周期寿命费用分析表明，在脱硫系统中的某些腐蚀严重的设备如硫化物吸收容器，喷淋设备等采用 AL-6XN 比采用 316L 不锈钢或哈氏 C-276 更为经济有效。因此，美国印第安纳州热电站脱硫系统的相关装置全部采用了 AL-6XN 合金。在近几年中，韩国的 Hadong 电厂和 Taen 电厂共新建了 11 座 AL-6XN 吸收塔，采用了 2000 多吨 AL-6XN 合金。

在食品工业中，氯化钠是一种常用调料，而次氯化钠则为清洗液中的关键组份。316、317 型不锈钢设备常因高温氯化钠、次氯化钠的腐蚀而损坏，从八十年代开始，AL-6XN 合金替代了 316、317 型不锈钢大量应用于食品工业中，这些食品加工设备包括各种糖浆炼制容器、肉类烹调器、谷物烹调器、啤酒厂的管道等。

在炼油工业中，AL-6XN 被用来制作高达 30 米的原油蒸馏塔及其内件。总之，在近三十年间，AL-6XN 作为一种耐蚀性能介于 18-8 型不锈钢与镍基合金之间，价格又远低于镍基耐蚀合金的耐蚀材料，在国外各个工业领域中得到了越来越广泛的应用。

AL-6XN 在国内化工设备上的应用

合肥通用机械研究所为解决国内某些化工设备因用材不很合理而导致生产设备使用寿命过短的问题，对 AL-6XN 的耐蚀性能，成型性能及焊接性能进行

了系统的试验室试验研究,现场模拟试验及设备制造关键工艺质量控制等多方位工作,已成功地将 AL-6XN 引入中国化工企业,解决了某些化工企业多年来未解决的设备腐蚀问题。在合肥通用机械研究所的努力下,近三年中,已有数批 AL-6XN 耐蚀合金制造成的设备投入生产运行,还有数台设备正在制造过程中,AL-6XN 合金用量已超过 200 吨,此外,尚有数家化工研究所、设计院对 AL-6XN 也显示出很大兴趣,相关工作正在进行。

1、国内某化工厂某关键设备因操作条件苛刻,长期使用搪瓷釜或搪铅釜作为反应容器,平均使用寿命 2-3 年,且经常停产维修。合肥通用机械研究所经过大量的试验室加速试验及模拟试验,确定 AL-6XN 在该工艺条件下具有很好的抗点腐蚀、抗晶间腐蚀、抗应力腐蚀性能,其使用寿命可达 15 年左右。

目前,由合肥通用机械研究所进行设备制造质量控制及监造的数台 AL-6XN 反应器于 2002 年初顺利投入生产运行^[35]。

2、国内某化工厂某关键设备操作条件为 350℃,炉气中含有 F⁻、Cl⁻等卤族离子,316 型不锈钢,22-5 型双相不锈钢在此环境中使用寿命仅数月,AL-6XN 在此工艺环境中显示了较好的抗高温 F⁻、Cl⁻腐蚀的腐蚀能力,现已有一台 AL-6XN 设备投入生产运行。

3、国内某些环保工程公司已将 AL-6XN 选作烟气脱硫装置中制造风门的结构材料,目前已有数台 AL-6XN 风门运至发电厂的烟气脱硫现场。

4、国内某些合资化工企业已采用 AL-6XN 合金制造了各种塔器、换热器、容器等耐蚀设备。

参考文献

- 1、AL-6XN Alloy, Allegheny Ludlum Co.Report
- 2、A.Gamer, "Materials Selection for Bleached Pulp Washers", Pulp & Paper Canada, V01.82.No.12,P.1(1981).
- 3、LA.Franson and M.J.Johnson, "A New Nitrogen-Modified Superanstenitic Alloy for seawater Applications," NACE Corrosion 89 Conference. Paper No.296,1989.
- 4、张委佗,左维民《缩合釜材料选择试验研究总结报告》;
- 5、张委佗,左维民《AL-6XN 缩合釜设备制造技术开发及质量控制总结报告》。

AL—6XN超级不锈钢的材料特性及其应用

作者：[张委佗](#)
作者单位：[合肥通用机械研究所](#)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_5104683.aspx