

## 蒸发器管束用钢管的耐蚀性研究

张清廉<sup>1</sup>, 达尔文 D A<sup>2</sup>, 王孝兵<sup>1</sup>

(1. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900; 2. 澳超级换热器有限公司, 澳大利亚 布里斯班 4000)

**摘要:** 碳钢在拜耳法氧化铝工艺中耐蚀性不足, 通过添加 Cr、Cu 等元素研发低合金耐蚀钢。基于显微组织、机械性能、耐蚀性能等的综合评估和分析表明, 有别于 A179 碳钢的球化态改善耐硫酸腐蚀性, BGNDMA 和 BGAABC 低合金钢合金化实现耐蚀性, 热轧态耐蚀性等效热处理态, 其组织仍均为碳钢常规的铁素体+珠光体。相比于 20G 和 A179 碳钢, 在 60 °C 6% 和 10.3% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中, BGNDMA 和 BGAABC 低合金钢耐蚀性至少提高 4 倍以上。在 125 °C, 20% NaOH 溶液中总体腐蚀率 < 1.0 mm/a, BGAABC 则 < 0.1 mm/a, 均未发生碱脆。

**关键词:** 热轧; 蒸发器管束用钢管; 低合金钢; 耐蚀性

**中图分类号:** TG142.79 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2020)06-0012-06

## Study on Corrosion Resistance of Steel Tube for Evaporator Pipe Bundle

ZHANG Qinglian<sup>1</sup>, DARWIN D A<sup>2</sup>, Wang Xiaobing<sup>1</sup>

(1. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China, 2. Aushex Pty. Ltd., Brisbane 4000, Australia)

**Abstract:** Since the corrosion resistance of carbon steel is insufficient in Bayer alumina process, the low alloy steel for corrosion resistance is developed by adding Cr, Cu and other elements. The comprehensive evaluation and analysis of micro-structure, mechanical property and corrosion resistance are carried out. The results show as follows: for improving corrosion resistance in dilute sulfuric acid, BGNDMA and BGAABC are low alloy steel, which corrosion resistance of hot rolled state is equivalent to that of heat treatment state, unlike spheroidized A179 carbon steel. The micro-structures of BGNDMA and BGAABC are still ferrite & pearlite like carbon steel. The corrosion resistance of BGNDMA and BGAABC in dilute sulfuric acid is at least four times higher than that of carbon steels such as 20G and A179 in 6% & 10.3% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution at 60 °C. BGNDMA and BGAABC can completely replace 20G and A179 carbon steels in dilute sulfuric acid corrosion environment such as alumina industry. Corrosion rates of evaluated low alloy steels are lower than 1.0 mm/a in 20% NaOH solution at 125 °C, while BGAABC is lower than 0.1 mm/a, and no alkali fragile occurs.

**Key words:** hot rolling; steel tube for evaporator pipe bundle; low alloy steel; corrosion resistance

耐酸性是决定拜耳法氧化铝工艺蒸发器管束用管使用寿命长短的关键, 直接影响了氧化铝产线的成本和效率。长期以来, 因酸洗除垢引起泄漏而导致管束使用寿命短是一个世界性难题。借助电化学及表面技术, 中国原创了耐硫酸露点腐蚀用的 09CrCuSb(俗称 ND)低合金钢, 因具有优异的耐蚀性而在省煤器等工业锅炉上得到广泛应用<sup>[1-15]</sup>。然

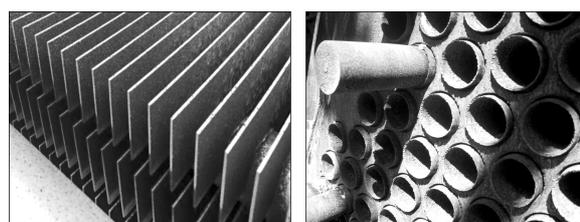
而, 由于各生产商在成分、表面质量等方面的控制偏差, 以及传统 ND 钢适用温度下限等众多原因, 传统 ND 钢的寿命与 20G 相比并没有明显提高<sup>[7]</sup>。

拜耳法氧化铝工艺环境呈碱性, 易结垢堵塞。调研可知, 国外每周需用 40~60 °C 的 10.3% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 酸洗除垢, 尽管添加缓蚀剂, 但因酸洗造成管束发生点蚀穿孔、均匀腐蚀等而失效, 失效管数量较少时常采取如图 1 所示的封堵泄漏管, 降低有效产能而维持运行。国外规范和钢厂等均倡导管束采用球化态 A179, 且要求夹杂物 ≤ 5 μm。国外常用规格

张清廉(1971-), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事金属材料、腐蚀与防护、表面技术等的工作。

为  $\Phi 38.1 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm} \times 7\ 315 \text{ mm}$ ，设计寿命约为 5 年，即从 2.4 mm 腐蚀减薄至 0.8 mm 后更换。特殊情况如穿孔泄漏即时更换。国内常规用 20G，寿命短至约 2 年，即使采用 2205 双相不锈钢也有短至约 3 年的泄漏失效案例。另外，由文献[16]可知，即使消除应力热处理，碳钢或低合金钢也不能用在较高浓度和温度的 NaOH 溶液中，应采用奥氏体不锈钢或 Ni 基合金<sup>[16]</sup>。由石油化工规范<sup>[17-18]</sup>可知，在 125 °C 20% NaOH 等高温碱性环境下，只能用 Ni 基合金，即此规范要求从碳钢直接升级到 Ni 基合金，连奥氏体不锈钢都被排除在外。奥氏体不锈钢尤其是 Ni 基合金价格远高于碳钢，是氧化铝行业难以承受的，因而为避免碱脆，目前只能采用偏低的工艺温度。因此，提高工艺温度是拜耳法氧化铝生产工艺的共性现实需求，开发经济性的耐碱脆合金钢材质是非常迫切的。

按照客户需求，在研发中颠覆了以往国外氧化铝行业采用球化、纯净化等措施提高碳钢耐酸性的理念，突破国际规范，历时 1 年时间研发出了以 BGNDMA(耐混酸及混酸露点腐蚀)为代表的系列拜耳法氧化铝用防腐新材料，在实现耐酸性的前提



(a) 09CrCuSb 钢 (b) 球化态 A179

图 1 设备腐蚀形貌

下，有的还具有优异的耐碱性尤其是耐碱脆性，更满足拜耳法氧化铝工艺的酸-碱交替的腐蚀环境，尤其是高温浓碱工艺。

## 1 实验材料

### 1.1 化学成分

Cu、Sb、Cr 等是耐硫酸露点腐蚀钢的主要有效元素，但 Sb 是环保明令禁止的有害元素。因此，对 09CrCuSb 钢的成分进行调整。BGNDMA 等材质化学成分见表 1，为便于对照，A179 和 20G 也列入其中。系列新材质总体上是利用 Cu、Ni、Cr 等元素的耦合作用提高耐硫酸腐蚀性或耐酸-碱交替腐蚀性。

表 1 BGNDMA 等材质的化学成分(质量分数)

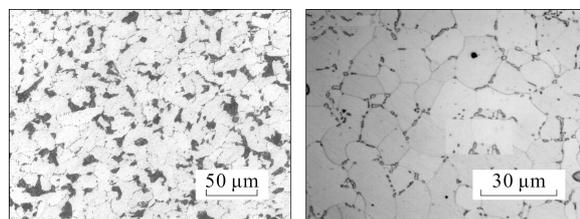
项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
A179	0.06~0.18	-	0.27~0.63	≤0.035	≤0.035	-	-	-
20G	0.17~0.23	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.025	≤0.015	-	-	-
BG20GMA	0.17~0.23	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.025	≤0.015	-	≤0.45	≤0.30
BGNDMA	≤0.15	0.20~0.50	0.30~0.65	≤0.030	≤0.030	≤1.10	≤0.55	≤0.65
BGAABC	≤0.12	0.20~0.50	0.30~0.65	≤0.020	≤0.020	≤1.00	≤0.45	≤0.65

### 1.2 显微组织

表 1 所示的 BGNDMA 等材质的成分体系决定了其热轧、退火、正火等状态的常规组织均为铁素体+珠光体，可视为双相组织。以 BGNDMA 钢为例，其热轧态组织如图 2(a)所示，晶粒度约为 7~9 级。A179 为球化态组织(图 2b)，少量微小颗粒状碳化物分散在晶界上，可视为单相铁素体组织。BGNDMA 材质采用控轧控冷保证了组织细化，而 A179 钢球化需高温长久保温，晶粒长大。

### 1.3 拉伸性能

耐蚀材质优先保证耐蚀性，力学性能满足不低于常规碳钢即可。BGNDMA 材质的机械性能与国内氧化铝行业蒸发器常用的 A179、20G 等碳钢对



(a) 热轧态 BGNDMA (b) 球化态 A179

图 2 不同材质的显微组织

比，如图 3 所示。BGNDMA 屈服强度基本与 20G 等同，略高于 A179，从强度设计的角度 BGNDMA 完全可以替代 20G 和 A179。BGNDMA 抗拉强度下限介于 A179 和 20G 之间。根据抗拉强度与硬度的关联性，从硬度上看 BGNDMA 可以替代 20G 和

A179, 满足管束制造时旋压胀形工艺对硬度的要求, 以利于胀接密封。因此, 从机械性能及其管束可制造性上看, BGNMMA 可完全替代 20G 和 A179 用于氧化铝行业蒸发器。

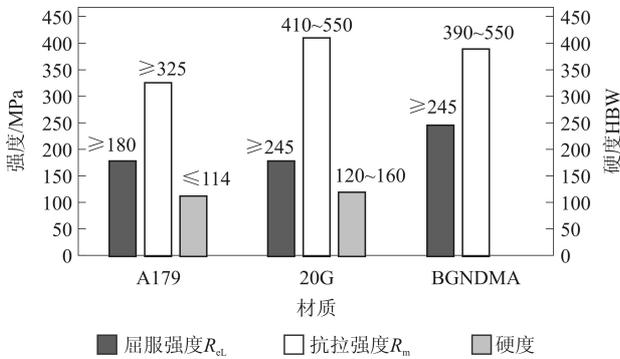


图 3 BGNMMA 等材质的机械性能对比

## 2 实验方法

耐酸性用试样取自无缝管, 先车削去除内外表面, 再截取宽约 10 mm 的管环。耐碱性用试样取自板材, 长度沿轧向, 去除原始表面, 加工成 120 mm×20 mm×2 mm 的板样, 两端对称打  $\Phi 10$  mm 的通孔。相同材质的板与管为同一炉号。试样先用 120 号水砂纸研磨, 然后用超声波+丙酮清洗除净。测量板样的长度、宽度、厚度及孔径和管样的外径、壁厚及宽度等几何尺寸, 每个数据分别在 3 个不同位置测取, 精确到 0.01 mm; 用各平均值计算垂直轧制方向的试样表面积  $S_v$  和总表面积  $S$ , 单位为  $\text{cm}^2$ , 满足  $S > 10 \text{ cm}^2$  和  $S_v/S \leq 50\%$ , 符合 JB/T 7901—1999《金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法》对试样尺寸的要求。再次用超声波+丙酮清洗吹干后称重, 精确到 0.1 mg, 记为  $m_0$ , 单位为 g。把板样弯曲成 U 型, 并用螺栓加载使其两直边平行。为避免电偶腐蚀, U 型样及其与固定螺栓之间用陶瓷环绝缘。试验前需再次把加载后的 U 型试样用超声波+丙酮清洗除净。所有试样置于干燥器内备用。

用恒温水浴槽进行浸泡试验, 温度控制偏差为  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。用稀  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液做耐酸性腐蚀评估, 质量分数为 6% 和 10.3%, 温度为  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据规范<sup>[17-18]</sup>, 耐碱性评估试验条件在必须采用 Ni 基合金的温度和 NaOH 浓度区域内选取, 本实验设定 NaOH 溶液质量分数为 20%, 温度为  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因为 20% 是碳钢即使消除应力热处理也易发生碱脆的温度峰值对应的浓度, 即在所有浓度的 NaOH 溶液中, 碳钢去应力退火后的最高使用温度也仅约为  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

每组平行试样各 3 个, 按 JB/T 7901—1999 要求, 单位表面积溶液量  $\geq 20 \text{ mL/cm}^2$ , 每 7 天即 168 h 更换一次溶液。因碱溶液对金属均匀腐蚀轻微, 重点评估是否发生碱脆, 再者耐碱脆评估必须用高温高压釜, 因此耐碱性评估连续持续 168 h, 中间不取出分析; 而耐酸性评估时间间隔取出清洗称重后再重新实验。浸泡后的试样先用铜丝刷初步机械清洗, 然后用超声波+除锈清洗剂(质量分数为 36%~38%的分析纯 HCl 500 mL, 蒸馏水 500 mL, 六次甲基四胺 3.5 g)清洗, 再用铜丝刷清洗, 直至完全去掉表面腐蚀产物。同上, 超声波+丙酮清洗吹干后称重, 记为  $m_1$ 。每个试样均按  $\gamma_H = 10000 \times (m_0 - m_1) / (S \times \tau)$  分别计算腐蚀率,  $\tau$  为实验时间, 单位为 h。舍弃离散度大的个值, 求取每个材质平均值作为失重法腐蚀率  $\gamma_H$ , 单位为  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 也可乘以 1.1 倍, 换算成年腐蚀率  $\gamma_Y$ , 单位为  $\text{mm/y}$ 。

## 3 实验结果

### 3.1 BGNMMA 低合金钢耐硫酸性

国际拜耳法氧化铝厂 1 周酸洗一次, 一次持续 1 h, 5 年设计寿命内则累积酸洗 216 h。 $60 \text{ }^\circ\text{C}$  10.3%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液实验时间累积延长到 312 h, 结果如图 4 所示。严于 GB 150.2—2011《压力容器 第 2 部分: 材料》, 本研究腐蚀率  $\gamma_H \leq 50 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  视为合格。1 号(常规 A179)和 4 号(球化 A179)为不达标, 7 号 BGNMMA 基本达标, 而 3, 5, 6, 8 和 9 号等 BGNMMA 则为优良。所有热轧态试样腐蚀机理都为均匀腐蚀。

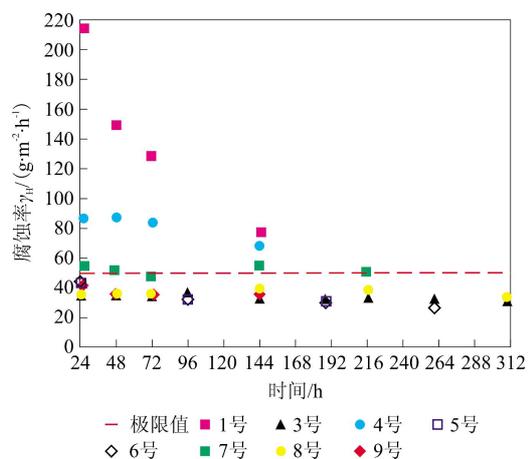


图 4 60 °C 10.3%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中的腐蚀率

工业化产品 A179 和 BGNMMA 的规格分别为  $\Phi 38.1 \text{ mm} \times 2.6 \text{ mm}$  和  $\Phi 57 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ , 前者是国

际常用规格,是球化态的;后者是国内常用规格,且是热轧态的,此评估由达尔文在澳大利亚独立完成。球化态 A179 与热轧态 BGN DMA 在 60 °C 10.3% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中浸泡 15 h, A179 已腐蚀贯穿壁厚,而 BGN DMA 仅略微减薄(图 5)。球化态 A179 与热轧态 BGN DMA 相对耐蚀性如图 6 所示, A179 和 BGN DMA 的失重百分比  $\delta$  分别为 89.5% 和 10.5%, 相比于  $\delta \leq 15\%$  的用户采购技术要求, A179 是不合格的, 而 BGN DMA 则满足要求。按  $\delta$  计, BGN DMA 耐蚀性约为 A179 的 8.5 倍, 而按相对腐蚀率计, 则增大为 11.5 倍, BGN DMA 耐蚀性更突出。究其原因是  $\delta$  未计表面积对腐蚀的影响, 用  $\delta$  评估耐蚀性是不严谨的, 但对于形状及规格完全相同的试样, 表面积差异可忽略不计,  $\delta$  则用来衡量耐蚀性差异。因 A179 实际贯穿时间未知, 权且按最长 15 h 计, A179 所得结果是偏好的, BGN DMA 相对于 A179 耐蚀性提高的倍数则是偏低的, 即 BGN DMA 实际耐蚀性比上述结果还要好。

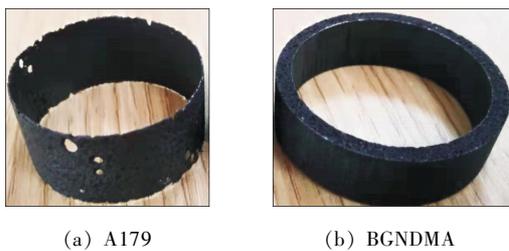


图 5 球化态 A179 与热轧态 BGN DMA 的腐蚀形貌

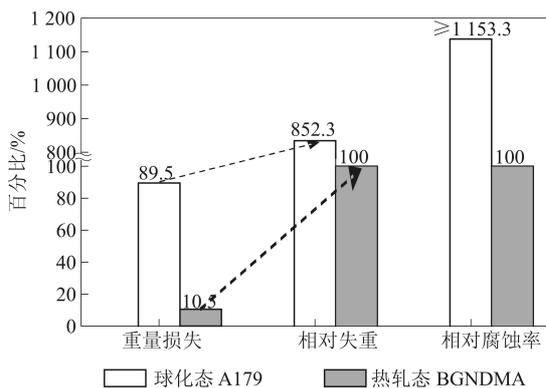


图 6 球化态 A179 与热轧态 BGN DMA 耐蚀性对比

### 3.2 低合金钢耐硫酸性对比

BGN DMA、BG20GMA、BGAABC 与 20G 在 60 °C H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中浸泡 18 h 时的腐蚀形貌如图 7 所示, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液质量分数  $\eta$  分别为 6% 和 10.3%。20G 在 2 个浓度中均严重腐蚀, 而 BGAABC、BG20GMA 和 BGN DMA 则均腐蚀轻微。耐蚀性对比如图 8 所

示, 质量分数从 6% 升高到 10.3%, 硫酸腐蚀性增强, 20G 腐蚀率提高约 1.8 倍, 而 BGAABC 却保持稳定的耐蚀性, 约为 20G 在 10.3% 浓度中的 8.6 倍和在 6% 浓度的 4.9 倍, 稀硫酸浓度越高, 耐蚀性越好。在 10.3% 时, BG20GMA 和 BGN DMA 的耐蚀性分别为 20G 的 1.72 倍和 4.0 倍。因此, 在 60 °C H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中的耐腐蚀性由好到劣的顺序依次为 BGAABC、BGN DMA、BG20GMA 和 20G。

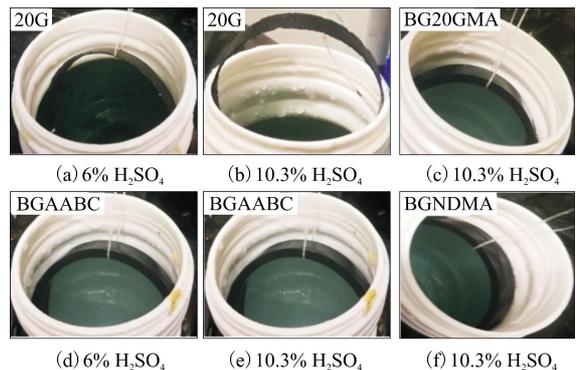


图 7 不同材质在 60 °C H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中浸泡 18 h 的腐蚀形貌

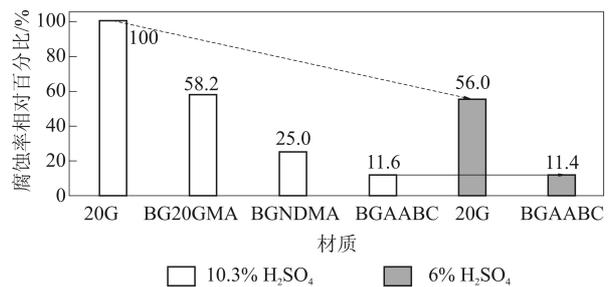


图 8 不同材质在 60 °C H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中耐蚀性对比

### 3.3 低合金钢耐碱性对比

125 °C 20% NaOH 溶液中持续 168 h 的腐蚀形貌如图 9 所示, 从左至右依次为 BGAABC、BG20GMA 和 BGN DMA, 均未碱脆开裂, 因而从耐碱脆性来讲具备取代 Ni 基合金的潜质。耐碱腐蚀率总体上 < 1.0 mm/a 即一般耐蚀级别, 未投放市场的 BGAABC < 0.1 mm/a 更是达到耐蚀级别, 碱液中的腐蚀速率如图 10 所示。



图 9 不同材质在 125 °C 20% NaOH 溶液中 168 h 后的腐蚀形貌

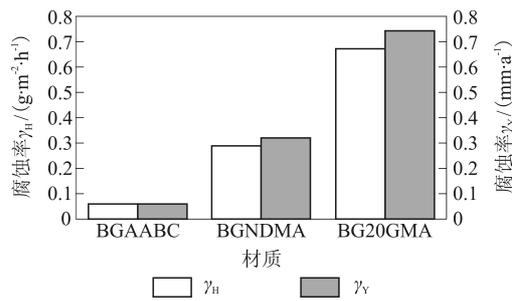


图 10 不同材质在 125 °C 20% NaOH 碱液中的腐蚀速率

#### 4 讨论

从腐蚀机理上看, 硫酸腐蚀分电化学腐蚀和氧化性腐蚀, 因为对应于硫酸在不同温度和浓度下表现为截然不同的还原性和氧化性。不管温度高低, 稀硫酸(浓度  $\eta \leq 65\%$ ) 时以电化学腐蚀为主, 高浓硫酸(浓度  $\eta \geq 85\%$ ) 甚至是发烟硫酸(浓度  $\eta \geq 100\%$ ) 时以氧化性腐蚀为主; 而对于浓硫酸, 高温时为氧化性腐蚀为主, 低温时则是以还原性腐蚀为主。当然硫酸腐蚀性除随温度和浓度而发生变化外, 还受卤素离子、颗粒、流速等其他因素的影响。硫酸表现为氧化性时, 即使碳钢也会因钝化而满足耐蚀性; 但表现为还原性时, 对碳钢等的腐蚀性会随浓度  $\eta$  先升高再降低,  $\eta$  约在 46%~50% 时达峰值。

为提升碳钢的耐稀硫酸腐蚀性, 国外氧化铝行业标准中指定蒸发器管束材质组织必须是图 3 所示的球化态, 从稀硫酸腐蚀行为来看, 有一定的合理性。因为稀硫酸因其还原性势必引起析氢的电化学腐蚀行为, 而球化态的近似单相组织不仅提高了表面的电化学均匀性, 还更有效降低了表面上的球化颗粒与铁素体的面积比, 因前者腐蚀电位略高于后者, 二者易于形成微电池, 前者是微电池阴极, 而后者则是阳极。但是, 球化态总体上是铁素体, 也因此降低了表面的整体电位, 易于整体发生腐蚀。因此, 从微电化学生学上讲, 球化处理有益于改善碳钢耐稀硫酸腐蚀性, 但从整体电位来讲则相反。总之, 虽然球化处理有其合理性的一面, 但是实际效果要看此消彼长的综合平衡水平。必须严格从微观层面控制质量, 生产难以精准控制, 则实物质量的稳定性较差, 这与球化态 A179 在氧化铝行业的实际寿命现状非常吻合——总体上寿命约 2 年, 个别的却能使用 5 年以上, 达到设计寿命。另外, 建议采用实际寿命超 5 年的管材, 在实验室热处理成不同组织状态的试样, 与原始球化态进行耐蚀性对比评估。结果表明所有试样的耐蚀性并无明显区别,

则球化提高碳钢耐硫酸腐蚀性的效果轻微, 颠覆了惯性认知。其次, 工业装备往往是需要焊接的, 即使基体球化效果达到理想耐蚀性, 但焊缝球化是无法在现场实施的。因为球化处理既要长久保温, 还要满足冷却条件才能实现。再者, 球化处理费时费力, 效率低下, 成本高。

基于 09CrCuSb 耐硫酸露点腐蚀钢的原创经验, 综合考虑最终确定合金化方式实现了耐蚀性的明显提升, 如上所述的 BGNDMA、BGAABC 等低合金钢均达到了预期。尽管仍然是铁素体+珠光体的双相组织, 从微电化学生学讲, 表面珠光体与铁素体即微电池阴极与阳极的面积之比要远远大于近似单相铁素体的球化态, 对耐蚀性不利, 但是因添加少量的耐硫酸电化学腐蚀的元素如 Cr、Cu 等, 并使之弥散分布抑制了电化学电极反应, 反而提高了整体耐蚀性。尤其是因为元素 Cu 不仅能抑制电化学电极反应, 降低 Fe 对  $\text{H}^+$  的置换析氢, 还能有益于形成隔绝电化学反应的表面薄膜。其次, 热轧态耐蚀性就已达标, 说明组织对新材质耐蚀性几乎没有影响, 即新材质耐蚀质量稳定可靠, 不仅易于粗放性的工业化生产, 而且不会造成类似于球化态现场焊缝热处理工艺的“瓶颈”制约。再者, 热轧态耐蚀性达标, 可以省略热处理工艺, 降低成本。基于上述耐硫酸性评估结果, BG20GMA、BGNDMA、BGAABC 等完全可以取代 A179、20G 等碳钢用于稀硫酸腐蚀环境。

在符合图 11 所示的温度、浓度等条件的服役环境下<sup>[19]</sup>, 即使不去应力退火, 也不会出现碱脆。其次, 碱脆除受温度、碱性浓度等外部因素影响外, 还受制于应力状态。实践表明, 应力状态低于屈服强度时, 即使具备温度-碱性浓度等条件, 基本上也可以避免碱脆, 这也是进行焊后去应力退火的原因。基于上述耐碱性评估结果, 在必须采用 Ni 基合金的高温碱性区域, BG20GMA、BGNDMA 和 BGAABC 等均未发生碱脆。因此, BG20GMA、BGNDMA、BGAABC 等具备取代 Ni 基合金用于高温碱性环境下的潜质。

#### 5 应用及展望

截至到 2018 年年底, 国内氧化铝投产总产能约为 8 357 万 t, 约占世界产能的 50%, 则全世界仅氧化铝一个行业的蒸发换热器管束对耐硫酸管的需求就是相当可观的, 况且连接管道也面临同样的

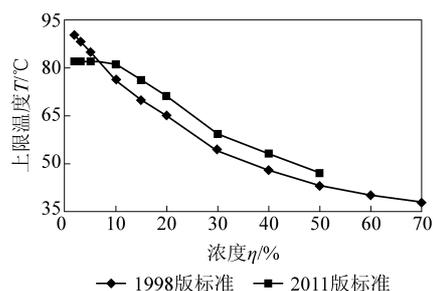


图 11 未消除应力碳钢在烧碱中的适用浓度-温度

腐蚀问题需要采用新材质。其次,当前即使球化态的 A179 年更换率高达约 50%,若升级为耐硫酸酸洗性能优良的如 BGDMA,可有效延长服役寿命。另外,位列世界氧化铝排名前十的国内某公司旗下产线,为更换寿命仅约 3 年而失效的千余支 2205 双相不锈钢管,自停机到重新启用历时近 10 个月,维修时间超整个寿命周期的 20%,不仅大幅增高设备成本,还严重影响了产能。

BGDMA 除可广泛应用于上述类似拜耳法氧化铝工艺的需要间歇式稀硫酸洗的工艺装置及其管道外,也可用于烟气脱硫、烟气净化等工艺装置及其管道等。因为在 50, 60, 70 °C 下的脱硫模拟液(也称死亡绿液,成分为: 11.4%  $H_2SO_4$ , 1.2%  $HCl$ , 1.0%  $FeCl_3$ )以及  $\leq 80$  °C 低温烟气液化形成的  $H_2SO_4$ - $HCl$  混酸腐蚀环境中均为轻微的均匀腐蚀,而同环境下 2205 双相不锈钢则均发生严重的局部腐蚀,如点蚀,缝隙腐蚀等。

## 6 结论

(1) 有别于高纯净化 A179 的所谓近似单相铁素体的球化态改善耐硫酸腐蚀性, BGDMA 等新材质通过添加  $Cr \leq 1.00\%$ 、 $Cu \leq 0.45\%$ 、 $Ni \leq 0.65\%$  等,合金化实现耐蚀性,其组织仍为碳钢常规的铁素体+珠光体,且热轧态耐蚀性等等效热处理态。

(2) 相比于 20G、A179 等碳钢,在 60 °C 6% 和 10.3%  $H_2SO_4$  溶液中, BGDMA 和 BGAABC 新型低合金钢耐稀硫酸腐蚀性至少提高 4 倍以上。

(3) BGDMA 和 BGAABC 等新型系列低合金钢在 125 °C 20%  $NaOH$  溶液内全部未发生碱脆,具备替代 Ni 基合金用于高温浓碱环境下的潜质。

(4) 拜耳法氧化铝用防腐 BGDMA 新材质,不仅耐酸性大幅提高,而且具有优异的耐碱性,填补了国际空白,实现了品质增效。

## 7 参考文献

- [1] 曲裕民, 梁明. 耐低温硫酸露点腐蚀新钢种—ND 钢在济南炼油厂的应用[J]. 石油化工腐蚀与防护, 1994, 11(4): 28-32, 60.
- [2] 张福厚, 李邯生, 刘维颖, 等. ND 钢省煤器及空气预热器[J]. 石油化工设备技术, 1994, 15(2): 24-25.
- [3] 郑文龙, 俞亚鹏. 耐硫酸露点腐蚀钢: 中国, 94111544.5 [P]. 1996-06-05.
- [4] 郑文龙. 新型耐硫酸露点用钢——ND 钢[J]. 机械工程材料, 1996, 20(3): 46.
- [5] 郑文龙, 王荣光, 闵国全, 等. 耐硫酸露点腐蚀用钢 ND 钢性能及使用情况[J]. 石油化工腐蚀与防护, 1997, 14(2): 19-21, 37.
- [6] 周小信. 减轻锅炉低温腐蚀——ND 钢在燃油锅炉空气预热器上的应用[J]. 安徽化工, 1997(3): 8-9.
- [7] 郑文龙, 王荣光, 闵国全. 耐硫酸露点腐蚀 ND 钢在推广应用中的问题[J]. 石油化工腐蚀与防护, 1998, 15(1): 42-45.
- [8] 郑文龙, 张清廉, 朱忠亚, 等. 抗硫腐蚀低合金钢 ND 钢及 08Cr2AlMo 钢的性能及应用[C]//第二届石油石化用材研讨会论文集. 2001.
- [9] 杨世平. 耐蚀新钢种(ND 钢)在我厂的应用[J]. 压力容器, 2001, 18(1): 37-39.
- [10] 陈启胜. 酸露点腐蚀与 ND 钢的应用[J]. 南炼科技, 2001, 8(3): 26-30.
- [11] 朱忠亚. 耐硫酸露点腐蚀无缝钢管用低合金钢——09Cr-CuSb(ND 钢): 中国, 03130825. 2 [P]. 2004-04-21.
- [12] 胡才望, 徐敏, 吴娜, 等. 新型抗低温露点腐蚀用 ND 钢管的开发[J]. 钢管, 2014, 43(5): 29-32.
- [13] 王成建, 刘桂华, 李维, 等. 一种生产耐硫酸露点腐蚀圆钢 09CrCuSb 的方法: 中国, 201510712025. 9 [P]. 2015-12-30.
- [14] 苗丕峰, 钱刚, 刘观猷, 等. 一种改进型 09CrCuSb 耐硫酸露点腐蚀用钢及其制造方法: 中国, 201610499180.1 [P]. 2016-09-14.
- [15] 刘绍宽. 浅谈 ND 钢管的焊接技术[J]. 中国设备工程, 2017(15): 120-121.
- [16] 沈志刚. 钢制容器在氢氧化钠溶液中的使用限制[J]. 科技传播, 2001(11): 118, 112.
- [17] 工业和信息化部. 高硫原油加工装置设备和管道设计选材导则: SH/T 3096—2012[S]. 2012.
- [18] 工业和信息化部. 高酸原油加工装置设备和管道设计选材导则: SH/T 3129—2012[S]. 2012.
- [19] 国家石油和化学工业局. 钢制化工容器材料选用规定: HG/T 20581—2011[S]. 2011.

(收稿日期: 2019-09-26; 修定日期: 2020-11-20)