

专论

316L 与 2205 不锈钢的腐蚀行为研究现状

刘佐嘉

(北京科技大学, 北京 100083)

摘要: 本文综述了研究 316L 奥氏体不锈钢与 2205 双相不锈钢的化学与电化学方法, 进一步探索 316L 不锈钢与 2205 不锈钢的腐蚀敏感性。并且探讨了 316L 不锈钢与 2205 不锈钢的应用和发展以及应用与发展中遇到的腐蚀问题。大量研究表明, 在相同条件下 2205 不锈钢的耐蚀性要比 316L 不锈钢好得多, 2205 双相不锈钢以其优良的耐蚀性能在某些低温环境下取代单一相的 316L 奥氏体不锈钢是完全可能的。

关键词: 316L 奥氏体不锈钢; 2205 双相不锈钢; 腐蚀类型; 研究方法; 耐蚀性

中图分类号: TG174.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-748X(2010)02-0149-05

Research Status of Corrosion Behavior of 316LSS and 2205DSS

LIU Zuo-jia

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The chemical and electrochemical methods for studying 316L austenite stainless steel and 2205 duplex stainless steel are summarized and the corrosion sensibility are explored. The application, development and the corrosion problems during application and development of 316L and 2205 stainless steels are discussed. The corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel is more excellent than 316L austenite stainless steel under the same conditions. Due to the eminent corrosion resistance of 2205 stainless steel, using 2205 stainless steel to replace single phase 316L stainless steel at some low temperatures is possible.

Key words: 316L austenite stainless steel; 2205 duplex stainless steel; corrosion type; research method; corrosion resistance

0 引言

双相不锈钢的抗点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀及腐蚀疲劳性能明显优于普通的奥氏体不锈钢, 可以与高合金奥氏体不锈钢媲美。另外, 双相不锈钢屈服强度可达 400~550 MPa, 是普通不锈钢的两倍, 因此可以节约用材, 降低设备制造成本。双相不锈钢由于其特殊的优点, 广泛应用于石油化工设备、海水与废水处理设备、输油输气管线、造纸机械等工业领域, 近年来也被研究用于桥梁承重结构领域。但是双相不锈钢仍有高铬铁素体不锈钢的各种脆性倾向, 不宜用在高于 300 °C 的工作条件下。因而在某些介质环境苛刻的低温环境下双相不锈钢可能会逐渐取代 316L 奥氏体不锈钢, 并成为新型黑色材料的热点^[1]。为了研究双相不锈钢取代 316L 奥氏体

不锈钢的可行性, 国内外进行了大量的研究。

有许多研究表明, 在相同条件下 2205 双相钢的腐蚀敏感性比 316L 奥氏体钢低, 原因有多方面。由于双相不锈钢具有 $\alpha+\gamma$ 相的两相组织结构, 因而其性能便兼有奥氏体不锈钢与铁素体不锈钢的特点。与奥氏体不锈钢相比, 其强度较高, 特别是屈服强度显著提高, 因此耐晶间腐蚀、耐应力腐蚀、耐腐蚀疲劳等性能都有明显改善。

1 腐蚀类型

1.1 应力腐蚀开裂(SCC)

一般认为发生 SCC 需要具备三个基本条件, 一是敏感材料; 二是需对材料施加一定的拉伸应力; 最后还需把材料放在特定介质中^[2]。应用恒载荷方法, 在 45% MgCl₂ 沸腾溶液中测定不锈钢的断裂时间 t_F 与应力/拉伸强度(σ/σ_b)的关系, 结果表明 2205 不锈钢的抗 SCC 能力远超过 316L 不锈钢^[3],

收稿日期: 2009-09-10

联系人: 刘佐嘉, lzandj@yahoo.com.cn

如图1所示。

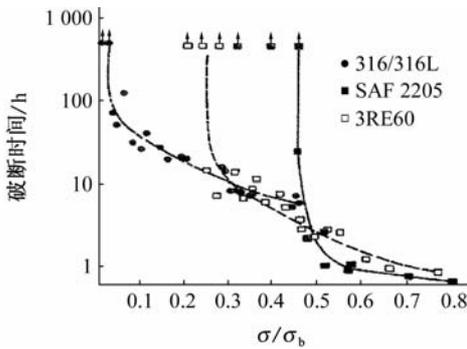


图1 在通气的45% MgCl₂、150℃溶液中的恒载荷SCC试验结果

由表1也可对比一定条件下316与2205钢的抗应力腐蚀能力^[4]。

表1 导致裂纹的临界应力

合金	200℃时的临界屈服强度,MPa
316	<10
2205	40

Wen-Ta Tsai等人研究了2205双相钢与316奥氏体不锈钢在NaCl溶液中的应力腐蚀开裂行为^[5],如图2、3和4。

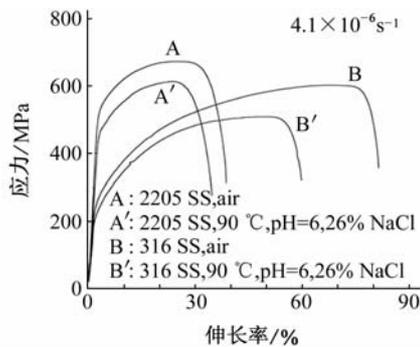
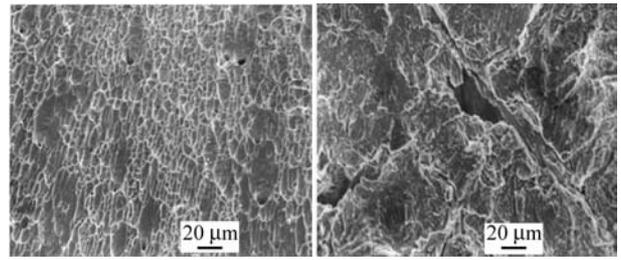


图2 316L奥氏体不锈钢与2205双相钢在空气与90℃ pH 6.0的26% NaCl溶液中的拉伸应力曲线

从图2可见,在空拉实验测试中2205双相钢有更高的应力屈服强度,而316不锈钢却有更好的韧性,但在90℃下pH为6.0的26% NaCl溶液中这两种钢的强度和韧性均下降。2205双相钢的抗拉伸性能主要随着溶液温度的改变而改变,而316不

表3 两种不锈钢NaCl溶液浸泡腐蚀试验结果

材料	试验时间/h	点蚀			缝隙腐蚀			发生几率/%
		平均腐蚀速率/g/m ² ·h	平均点蚀深度/mm	最大点蚀深度/mm	平均腐蚀速率/g/m ² ·h	平均侵蚀深度/mm	最大侵蚀深度/mm	
316	24	29.49	1.34	1.60	23.68	0.86	1.09	100
2205	12	4.68	—	—	6.39	0.34	0.51	15



(a) 2205双相钢 (b) 316奥氏体不锈钢

图3 90℃ pH 6.0的26% NaCl溶液中SCC试验后的腐蚀开裂形貌

锈钢的抗拉伸性能既与温度有关,还受Cl⁻浓度的影响。从图3的腐蚀形貌可见,在试验温度下2205钢的表面出现凹坑,表明应力腐蚀开裂多发生在溶液中Cl⁻集中的地方。而对于316L不锈钢而言,在其表面出现了穿晶开裂,比2205的应力腐蚀开裂更为严重。试验结果很明显的揭示了双相钢的抗应力腐蚀开裂性能比奥氏体不锈钢要好。

1.2 局部腐蚀

罗永赞等人通过将试样放入各种溶液中浸泡,以一定周期为浸泡时间,然后由失重或增重方法计算出材料的腐蚀速率,从而来评价材料的腐蚀敏感性。试验是采用φ11.3 mm×6 mm圆柱试样,经硝酸钝化,环氧树脂镶嵌,暴露1 cm²的试验面积,在30℃充分除氧的3.5% NaCl溶液中,对316L奥氏体不锈钢和2205双相不锈钢进行浸泡腐蚀试验。缝隙腐蚀电化学试样采用一个特制的夹具,使试验面上构成20个小缝隙。其它试验条件和操作步骤均不变。试验材料的化学成分和试验结果如表2和表3^[6]。

表2 试验材料的化学成分(质量分数,%)

材料	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
316L	0.014	0.60	0.80	0.0073	0.013	17.14	12.58	2.28
2205	0.029	0.59	1.2	0.0043	0.029	22.57	4.63	2.62

从表3可见,316L钢在3.5% NaCl溶液中发生点蚀和缝隙腐蚀的平均腐蚀速率和腐蚀深度均比2205钢大,因此可判断2205不锈钢在相同介质中的抗腐蚀性比316L钢更优异。Zuo Yu等人^[7]还研

究了各种阴离子对316L不锈钢在NaCl溶液体系中的影响,发现四种阴离子 PO_4^{3-} 、 CrO_4^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 对316L的腐蚀影响顺序为 $\text{PO}_4^{3-} > \text{CrO}_4^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$,也即此体系下的316L钢的点蚀电位随着阴离子腐蚀强度的减小而增大。

2 主要研究方法

2.1 电化学交流阻抗

有研究表明,在相同介质中,经电化学表面处理(钝化)的不锈钢试样比未经处理的试样耐蚀。这可以从阻抗谱图(EIS)来分析,如图4、图5^[8]。

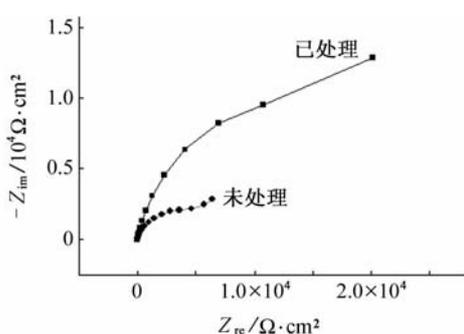


图4 316L不锈钢在1% NaCl溶液中的交流阻抗谱图

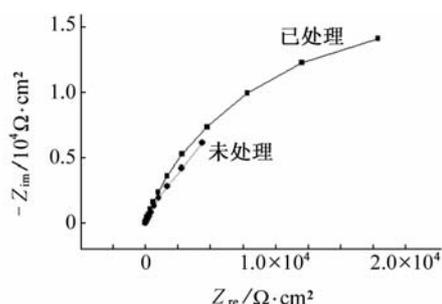


图5 2205不锈钢在1% NaCl溶液中的交流阻抗谱图

EIS结果表明,经过电化学表面处理的不锈钢钝化膜结构更为均匀致密,膜层厚度增加,钝化膜表面粗糙度降低。因此316L与2205不锈钢表面经过电化学处理后,能够减少表面物理缺陷,可显著提高这两种不锈钢的耐蚀性。另一方面,在此介质中2205钢处理前后所测得的阻抗频谱相近,而316L相差较远,说明在同种介质中2205钢的腐蚀敏感性变化较之316L钢稳定。

2.2 极化曲线

不锈钢之所以具有优良的耐腐蚀性能,主要归功于其表面能形成一层具有保护性的钝化膜从而隔绝了基体与腐蚀介质的进一步接触,使基体得到了保护。然而,一旦这层钝化膜遭到破坏,而又缺乏自钝化的条件或能力,不锈钢就会发生腐蚀^[9]。阳极

极化曲线可以较为清晰的表示出不锈钢材料在不同介质中的钝化性能和抗点蚀能力,图6为316L与2205钢在醋酸溶液中所测得的极化曲线^[10]。

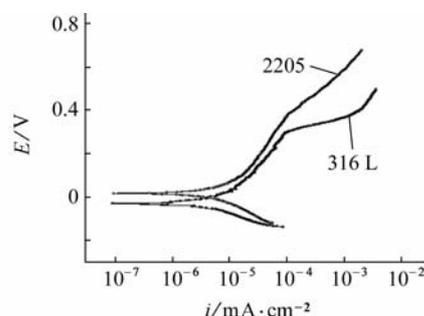


图6 316L和2205不锈钢在醋酸溶液中的极化曲线

由图6可见,316L不锈钢的点蚀击穿电位为298 mV,2205不锈钢的点蚀击穿电位为390 mV,这表明在醋酸溶液中2205钢的点蚀电位高于316L钢,则在同种介质中2205钢的抗点蚀能力要比316L钢强。

2.3 莫特-肖特基曲线

一般而言,当膜与溶液接触时,半导体膜与溶液分别带相反的电荷,半导体膜的过剩电荷分布在空间电荷层内,在空间电荷层显示耗尽层时,空间电荷电容(C)与电位(V)可以用Mott-Schottky理论来进行描述^[11]。Mott-Schottky的分析公式如下^[12]:

p型半导体:

$$\frac{1}{C_x^2} = \frac{2}{\epsilon\epsilon_0 e N_A A^2} (V - V_{FB} - \frac{kT}{e})$$

n型半导体:

$$\frac{1}{C_x^2} = \frac{2}{\epsilon\epsilon_0 e N_D A^2} (V - V_{FB} - \frac{kT}{e})$$

式中: C_x 为氧化膜的空间电荷层电容; V 为外加电位; ϵ 为氧化膜的介电常数; ϵ_0 为真空介电率,一般取值为 $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; e 为电子电量,取 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; N_A 和 N_D 分别为电子受主和电子施主浓度; V_{FB} 为平带电位; A 为膜面积, cm^2 ; k 为Boltzmann常数; T 为绝对温度。

图7为316L钢与2205钢在醋酸溶液中的Mott-Schottky曲线^[10]。

从图7可看出,不锈钢的半导体特性随Mott-Schottky关系曲线拟合直线的斜率的变化而变化。在I区316L不锈钢拟合直线的斜率为负值,表明其钝化膜呈p型半导体特征,可以推测316L不锈钢在醋酸中形成的钝化膜主要由 Cr_2O_3 、 FeO 、 NiO 组成。而2205不锈钢在I区的斜率为正值,表明其钝化膜呈n型半导体特征,可以推测2205不锈钢在醋

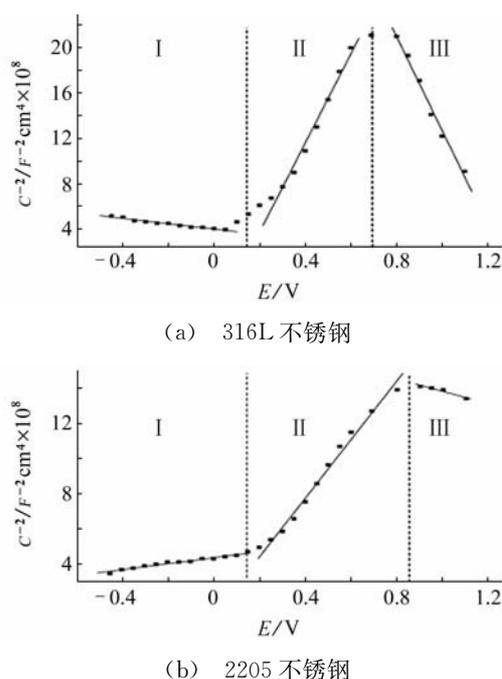


图7 316L和2205不锈钢的Mott-Schottky拟合曲线

酸中形成的钝化膜主要由 Fe_2O_3 、 $\text{CrO}(\text{CrO}_4^{2-})$ 组成。钝化膜表面的氯离子浓度增大,则加快了氯离子向钝化膜内的侵入,点蚀电位下降,腐蚀更易发生。因此钝化膜具有 p 型半导体特征的 316L 不锈钢比钝化膜具有 n 型半导体特征的 2205 不锈钢更容易遭受腐蚀。

3 目前两种不锈钢的研究展望

3.1 316L 奥氏体不锈钢

316L 不锈钢具有良好的抗腐蚀性能,但在海水和其他氯化物以及含硫溶液中则易发生点蚀,使各种工业设备发生穿孔泄露,实际生产中存在很大隐患。316L 奥氏体不锈钢的耐垢下腐蚀性能也不够理想^[12]。在以上情况下通常采取的防护措施是使用适当的缓蚀剂来抑制。316L 奥氏体不锈钢常用于电厂、炼厂、化工厂和造纸厂,并在冷却水系统中得到普遍使用,然而多年来人们就已发现,用于冷却水系统中的 316L 不锈钢由于冷却水中含有氯离子而易发生腐蚀、穿孔、断裂^[13],严重影响管材、热交换器的使用。E. Robert^[14]等指出,一般来说,由于技术的进步,近代的产品会优于过去的产品,但对 300 系列不锈钢耐氯离子腐蚀却并非如此。由于广泛使用氩氧脱碳(AOD),有助于精确控制各种合金元素的含量(Ni、Cr、Mo、C、N、S),现在生产的 316L 合金所含的元素值就非常接近 ASTM 所规定的下限。例如^[15],20 年前 316L 的钼含量接近 2.6%,而

现在的 316L 的钼含量已低于 2.1%。这些年 316L 降低了超过 2% 的镍和 1.0%~0.5% 的铬。元素量的降低直接影响了 300 系列不锈钢的耐蚀性。

现在还不清楚不锈钢在点蚀过程中以什么形式和什么比例溶解,Stolica^[16]研究了 Fe-Cr 合金点蚀孔内的溶液组成,指出溶液中 Cr 与 Fe 的比例与合金中的成分相同,他推测 Cr^{2+} 溶入溶液,并立即被氧化成 Cr^{3+} 。Leckie 与 Uhlig 认为 Cr^{3+} 是点蚀孔内的主要腐蚀产物。

316L 奥氏体不锈钢在石油、化工等领域的广泛应用关系着国家石油等工业未来的发展,今后 316L 不锈钢的腐蚀防护研究重点将集中于抗点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀开裂、晶间腐蚀、电偶腐蚀等局部腐蚀方面。现今已研发出比普通奥氏体不锈钢更耐蚀的超级奥氏体不锈钢。Kowaka、Nagano 和 Haraga 等人^[17]还研究了某些复相不锈钢的耐腐蚀性能,指出 25Cr-6.5Ni-3Mo-0.3W 等复相钢即使在 200 °C、1000 mg/L Cl^- 的含水气相中也不发生应力腐蚀破裂,表明了复相不锈钢的抗点蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀破裂的性能要比单一相的 316L 不锈钢好。

3.2 2205 双相不锈钢

2205 双相不锈钢是国际上经数十年研究并在 20 世纪 80 年代后期成功投入工业应用的不锈钢精品钢种,它是由奥氏体和铁素体两相组织以约各占 50% 的比例组成,兼备奥氏体不锈钢的优良韧性和良好的加工性、焊接性与铁素体不锈钢较高的强度和耐氯化物腐蚀等性能,并且屈服强度约为奥氏体不锈钢的 2 倍,疲劳强度也优于奥氏体钢,其热膨胀系数近于一般的低碳钢,利于同低碳钢的焊接^[18]。因而广泛应用于石油、化工、合成纤维以及石油提炼和输送等现代工业部门中。

一般来说,316L 奥氏体不锈钢在 130 °C 以上,不发生应力腐蚀开裂的前提是介质中 Cl^- 含量在 10 mg/L 以下,这在工艺生产上很难保证,因此比较便捷的措施就是采用耐应力腐蚀开裂的材料。实践证明,采用 2205 双相不锈钢来取代原使用 316L 不锈钢制造的管式换热器在苯酚水溶液中运行两年无应力腐蚀开裂泄漏^[19]。

2004 年起,随着西气东输的大力开展,2205 不锈钢材料在集输管线、天然气处理厂的内部管道等方面开始进行投用。由于天然气管道大部分采用 2205 双相不锈钢管材,而根据 ASTM G48 标准测定进口 2205 双相不锈钢管材的临界温度为 38 °C,

因此为确保安全,在天然气管道生产及投用过程中应严格把控温度^[20],并在管道生产及使用过程中加强温度与质量相结合的双重监控。

现今采用的2205钢多数出自于国产或瑞典,表4^[21]为它们的成分对比。

**表4 国产2205钢与瑞典2205钢成分比较
(质量分数,%)**

钢种	Cr	Ni	Mo	N	C	Si	Mn	P	S
瑞典2205	22	5.5	3.2	0.18	≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.03	≤0.02
国产2205	21.4	5.6	2.9	/	≤0.018	≤0.34	≤1.2	≤0.018	≤0.024

从表4的化学成分看出,国产2205钢中硫含量超出了瑞典2205钢的最大允许值,其它成分均在误差允许范围内^[21]。这也是国产2205双相不锈钢管比瑞典的SAF2205双相不锈钢管更易发生应力腐蚀开裂的原因之一。

目前双相不锈钢又开发了一些新的钢种,下面介绍几种除了SAF2205以外新研制成功的双相不锈钢^[1]。

(1) SAF2707 为了提高在恶劣腐蚀条件下热交换器的运行性能,延长使用寿命,Sandvik公司设计开发出新型超级双相不锈钢Sandvik SAF2707。该钢种主要用于化学、石化和炼油工业。开发这种钢种主要是为了保证设备可靠性、安全性和使用性能的同时,满足热交换器运行温度更高、运行时间(可使用时间)更长的要求。

(2) YUS DX1 新日本制铁公司研制的这种高强度高耐蚀性双相不锈钢比SUS 316、SUS 317具有更好的耐点蚀和耐缝隙腐蚀性能,它在常温下的屈服强度是SUS 304、SUS 316钢的2倍,耐应力腐蚀能力比SUS 304钢强,焊接性能与常用奥氏体不锈钢相同。

(3) 韩国专利公开的一种双相不锈钢 它具有优越的热塑性、抗高温氧化性、耐腐蚀性和冲击韧性,其主要成分为:22%~27% Cr,5.0%~8.0% Ni,2.0%~5.0% Mo,2.0%~5.0% W,Cu小于2.0%,0.13%~0.30% Ni,适用于海洋设施。

由于价格与产量等原因,在国内应用双相不锈钢的工业生产线中仍以国产2205为主。

4 结语

316L奥氏体不锈钢与2205双相不锈钢相比,

各有优势与不足,在生产过程中,不锈钢的选材应充分考虑各类腐蚀情况的可能性,在研究过程中不断改进研究方法并不断发现新型材料。双相不锈钢以其良好的耐氯化物腐蚀和耐点蚀性能、较高的力学性能等特点,以及较低的制造成本的优势,开始取代目前不耐腐蚀的钢结构件和一些常用的高铬镍不锈钢,因此2205双相不锈钢在某些低温环境下取代316L不锈钢是完全可能的。预期双相不锈钢将会在石油化工、海洋工程、海洋钻井平台、舰船及东南沿海地区用武器装备方面具有重大应用前景。

参考文献:

- [1] 高娃,罗建明,杨建军. 双相不锈钢的研究进展及其应用[J]. 兵器材料科学与工程,2005,28(3):61-63.
- [2] 杨德钧,沈卓身. 金属腐蚀学[M]. 北京:冶金工业出版社,2003:153.
- [3] 吴玖. 双相不锈钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2000:156-157.
- [4] 孙长庆. 超级奥氏体不锈钢的发展、性能与应用(上)[J]. 化工设备设计,1999,36(6):38-43.
- [5] Wen-Ta Tsai, Ming-Shan Chen. Stress corrosion cracking behavior of 2205 duplex stainless steel in concentrated NaCl solution[J]. Corrosion Science,2000,42(3):545-559.
- [6] 罗永赞. 6种不锈钢的化学和电化学腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护,1999,20(7):309-313.
- [7] Zuo Yu,Wang Haitao,Zhe Jingmao,et al. The effects of some anions on metastable pitting of 316L stainless steel[J]. Corrosion Science,2002,44:13-24.
- [8] 林玉华,杜荣归,胡融刚,等. 不锈钢钝化膜耐蚀性与半导体特性的关联研究[J]. 物理化学学报,2005,21(7):740-745.
- [9] 吴剑. 不锈钢的腐蚀破坏与防蚀技术[J]. 腐蚀与防护,1997,18(1):38-42.
- [10] 程学群,李晓刚,杜翠薇. 316L和2205不锈钢在醋酸溶液中钝化膜的生长及其半导体属性的研究[J]. 科学通报,2009,54(1):104-109.
- [11] 李金波,郑茂盛,朱杰武. 304L不锈钢钝化膜半导体性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2006,18(5):348-352.
- [12] 杨伟,龙英实,王凤平. 中海原油对316L不锈钢的腐蚀分析[J]. 石油化工腐蚀与防护,2006,23(6):31-33.
- [13] 齐冬子. 敞开式循环冷却水系统的化学处理[M]. 北京:化学工业出版社,2006:382-384.

(下转第160页)

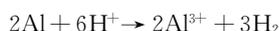
和结合力相对于未处理试样有了很大的提高。转化膜与漆膜的结合力达到了一级,即转化膜与漆膜的结合力合格。但从盐雾试验结果来看,单一转化膜的抗腐蚀能力不很理想。

表3 化学转化膜优化方案试验结果

	转化膜厚度, μm	漆膜厚度 μm	起泡时间, s	与漆膜结合力	盐雾试验
锆酸盐转化膜	2.8	18.5	64	一级	12 h 腐蚀面积约占 55%
未处理样	—	18.5	27	二级	全部腐蚀

2.5 化学转化液成膜机理

化学法转化膜呈微黄色或金黄色。使用含有锆化合物及含氟化合物的化学转化液在铝系基材上形成化学转化膜时,首先发生铝合金的蚀刻反应,反应式如下:



然后发生氟锆盐的水解反应,从而形成锆系化学转化膜层:



氟锆酸钾、环氧乳液为主要成膜物质,成膜过程中,环氧乳液对膜的沉积有一定的胶粘作用,帮助成膜,虽然环氧乳液本身也可以固化成膜但是在试验中体现的效果并不明显,改用水性环氧树脂效果可能会更好。磷酸则用于调节酸度和辅助成膜,用来使金属钝化,二氧化硅是辅助成膜物质。聚乙二醇为分散剂,用来分散溶液中的二氧化硅与环氧乳液。氟化钠则用来提供氟离子帮助反应的进行。

3 结论

(1) 通过单因素试验得出当主盐氟锆酸钾浓度

为 1.0~3.0 g/L 时,随着氟锆酸钾的浓度升高,膜的厚度变厚,耐蚀性变好。当聚乙二醇的浓度为 0.5~2.5 g/L 时,随聚乙二醇的浓度升高,膜的厚度加厚,耐蚀性升高。

(2) 通过正交试验和单因素试验得出化学成膜工艺中四个因素较佳量为:氟锆酸钾 3 g/L,磷酸 1 g/L,聚乙二醇 2.5 g/L,温度 35 °C。化学法转化膜与漆膜的结合力很好,能达到一级。

参考文献:

- [1] 林生岭,谢春生,王俊德,等. Al 及 LY12Al 的表面处理与复合转化膜的耐蚀性能研究[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(4): 142—145.
- [2] 邹洪庆. 铸铝合金锆系非铬化学成膜处理工艺应用[J]. 材料保护, 2001, 34(2): 29—30.
- [3] 罗坤英,余国强,李大旭. 一种在铝及其合金表面上形成转化膜的环保型工艺[P]. CN, 1614090A, 2005, 5, 11.
- [4] Deck P D, Moon M, Sujdak R J, et al. Investigation of fluoacid based conversion coatings on aluminum[J]. Progress in Organic Coatings, 1997, 34(1/4): 39—48.
- [5] Fedrizzi L, Deflorian F, Bonora P L. Corrosion behaviour of fluotitanate pretreated and painted aluminium sheets[J]. Electrochimica Acta, 1997, 42(6): 969—978.
- [6] Smit M A, Hunter J A, Sharman J D B, et al. Effect of organic additives on the performance of titanium-based conversion coatings[J]. Corrosion Science, 2003, 45(9): 1903—1920.
- [7] Paloumpa I, Yfantis A, Hoffmann P, et al. Mechanisms to inhibit corrosion of Al alloys by polymeric conversion coatings[J]. Surface and Coating Technology, 2004, 180/181: 308—312.
- [8] congress on metallic corrosion, 1978: 594.
- [14] Robert E, Hargrave P E. Behavior of 300-series stainless steel heat exchangers in cooling water service[C]//Corrosion 2004, New Orleans, NACE, 2004.
- [15] 鲍其鼎. 氯离子与冷却水系统中不锈钢的腐蚀[J]. 工业水处理, 2007, 27(9): 1—6.
- [16] 徐增华,沈忠良,吴民达,等. 不锈钢在含氯离子介质中的点蚀和缝隙腐蚀[J]. 机械工程材料, 1982(5): 1—6.
- [17] Kowaka M, Nagano M, Haraga M. Corrosion resistance of duplex stainless steels[C]//7th international
- [18] 张淑娟,胡传顺,张娟娟,等. SAF2205 双相钢换热器管弯管工艺研究[J]. 热加工工艺, 2005(10): 44—45.
- [19] 骆素珍,彭建国. 316L 不锈钢换热器的失效原因分析[J]. 宝钢技术, 2007(4): 24—28.
- [20] 宫少涛,李为卫,赵新伟,等. 2205 双相不锈钢临界点蚀温度的测定[J]. 管道技术与设备, 2006(3): 37—39.
- [21] 倪丽华. 2205 不锈钢管裂纹分析[J]. 求新科协科技论文集, 1998, 16(1): 42—46.

(上接第 153 页)