

# 热浸铝镀层在氯化铵环境中的腐蚀行为研究

徐秀清<sup>1</sup>, 杜小英<sup>2</sup>, 索涛<sup>2</sup>, 盛刚<sup>3</sup>, 来维亚<sup>1</sup>

(1. 中国石油集团石油管工程技术研究院 石油管材及装备材料服役行为与结构安全  
国家重点实验室, 西安 710077; 2. 中国石油长庆石化公司, 陕西 咸阳 712042;  
3. 兰州石化公司研究院, 兰州 730060)

**摘要:** **目的** 研究改进工艺热浸铝后的炼化加氢换热器管束在不同氯化铵环境下的耐腐蚀性能, 并对其耐蚀机理进行分析。**方法** 采用改进的热浸铝工艺对 20# 钢、15CrMo 钢和 321 不锈钢进行表面处理, 利用光学显微镜、X 射线衍射仪、扫描电镜和能谱仪对镀层厚度、组织和成分进行分析, 采用氯化铵垢下腐蚀实验和高温高压釜模拟工况实验评价热浸铝镀层的耐氯化铵腐蚀性能。**结果** 20# 钢、15CrMo 钢和 321 不锈钢热浸铝层无表面缺陷, 热浸镀铝层厚度均  $\geq 0.080$  mm, 镀层结构主要由纯 Al 层、Fe-Al 合金层以及少量的  $Al_2O_3$  组成。在潮湿氯化铵条件下, 20# 钢和 15CrMo 钢的腐蚀速率均随着温度的升高而明显增大, 80 °C 时的腐蚀速率分别达到 21.6 mm/a 和 19.9 mm/a; 321 不锈钢有明显点蚀现象。热浸镀铝后, 在相同介质中放置一个月, 发现三种试样没有腐蚀现象出现。高温高压釜模拟工况实验后, 热浸铝镀层表面同样也没有腐蚀现象发生。**结论** 采用改进工艺获得的 20# 钢、15CrMo 钢和 321 不锈钢换热器管束热浸铝镀层质量符合国家标准要求, 潮湿氯化铵垢下腐蚀实验和高温高压釜模拟工况实验结果证实, 热浸铝镀层在氯化铵服役环境下具有良好的防腐性能。

**关键词:** 热浸镀; 铝镀层; 换热器; 氯化铵; 腐蚀行为

**中图分类号:** TG174.443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0016-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.003

## Corrosion Behavior of Hot-dipped Aluminum Coating in Ammonium Chloride Environment

XU Xiu-qing<sup>1</sup>, DU Xiao-ying<sup>2</sup>, SUO Tao<sup>2</sup>, SHENG Gang<sup>3</sup>, LAI Wei-ya<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Performance and Structural Safety for Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, R&D Center of TGRI, CNPC, Xi'an 710077, China; 2.PetroChina Changqing Petrochemical Company, Xianyang 712042, China; 3.Research Institute of Lanzhou Petrochemical Company, Lanzhou 730060, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the corrosion resistance of hydrofining heat exchangers tubes after improved hot-dipping aluminum treatment in different ammonium chloride environments, and analyze the corrosion resistance mechanism. 20# steel, 15CrMo steel and 321 stainless steel were treated by improved hot-dipping aluminum technology. The thickness, structure and

收稿日期: 2019-03-20; 修订日期: 2019-04-22

Received: 2019-03-20; Revised: 2019-04-22

基金项目: 中石油科学研究与技术开发项目 (2017D-2307); 陕西省重点研发项目 (2017KJXX-04); 陕西省重点研发项目 (2018ZDXM-GY-171)

**Fund:** Supported by Petro China Scientific Research and Technology Development Project (2017D-2307), Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2017KJXX-04), Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2018ZDXM-GY-171)

**作者简介:** 徐秀清 (1981—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为炼化装置的腐蚀与防护。邮箱: xuxiuqing@cnpc.com.cn

**Biography:** XU Xiu-qing (1981—), Female, Doctor, Senior engineer, Research focus: corrosion and protection for refining units. E-mail: xuxiuqing@cnpc.com.cn

composition of coatings were analyzed by optical microscopy, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The corrosion resistance in ammonium chloride of hot-dipped aluminum coating was evaluated by corrosion test under wet ammonium chloride and simulated service condition test of high temperature and high pressure autoclave. The obtained hot-dipped aluminum coatings on 20 # steel, 15CrMo steel and 321 stainless steel had no surface defects, and the thickness were all over 0.080 mm. The coating structure was mainly composed of pure Al layer, Fe-Al alloy layer and a small amount of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Under the condition of wet ammonium chloride, the corrosion rates of 20# steel and 15CrMo steel increased obviously with the increasing temperature. The corrosion rates reached 21.6 mm/a and 19.9 mm/a respectively at 80 °C. For 321 stainless steel, the pitting corrosion was obvious. After hot-dipped aluminum treatment, the surface of three samples had no corrosion found in the same medium for one month, and the hot-dipped aluminum coatings after simulated conditions in high temperature and high pressure autoclave did not have corrosion, either. The quality of hot-dipped aluminum coating of 20# steel, 15CrMo steel and 321 stainless steel hydrofining heat exchangers tubes by improved technology meets the national standards. These results of corrosion test under wet ammonium chloride and simulated service condition test of high temperature and high pressure autoclave confirm that the hot-dipped aluminum coating has good anti-corrosion performance in the service environment of ammonium chloride.

**KEY WORDS:** hot-dip; aluminum coating; heat exchanger; ammonium chloride; corrosion behavior

在炼化企业中, 换热器占总投资的 20%, 占设备总量的 40%。然而, 由于换热设备是在高温、高压、高流速和强腐蚀介质的工况环境下运行, 腐蚀十分严重, 因此换热设备的损坏率远高于其他设备<sup>[1-3]</sup>。目前, 国内外通常采用两种方式来延长其使用寿命: 一种是采用更耐蚀的材料<sup>[4-7]</sup>; 另外一种是对换热器表面进行保护<sup>[8-10]</sup>。现在广泛采用的材质升级方法固然可以增强防腐性能, 但投资过大, 往往只能适用于某些特定的工况环境。而已发展的几种表面防护技术, 如镍磷镀层技术、防腐涂层, 也仍存在许多不足<sup>[11-12]</sup>: 镍磷镀层存在孔隙率问题, 且其主要用于耐  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{HCl}$  腐蚀以及高温环烷酸和硫腐蚀; 防腐涂层多是非金属涂层, 主要用于油品储罐及水冷器的防腐。上述技术的局限性限制了换热器的使用范围。

热浸镀铝技术是将钢制品置入一定温度的熔盐液体中, 使钢基表面充分活化和净化后迅速提出, 并置入熔融铝液中浸渍适当时间, 使钢基体形成复合的合金化合层。铁铝合金层是极硬的高熔点金属化合物, 具有极高的耐高温氧化性和耐磨性, 且纯铝层有优良的耐腐蚀性, 所以经热浸镀铝技术处理的产品具有防腐、耐高温、抗磨损的特殊性能, 且造价比较低, 已被广泛应用于石油化工、冶金机械、船舶汽车、电力通讯等各个行业中<sup>[13-16]</sup>。实验和实践表明, 在含硫及硫化氢的环境中, 浸铝钢材耐蚀性是未镀铝钢的 20 倍; 在硫化氢和氰化氢环境中, 浸铝钢材基本不腐蚀, 而未浸铝钢材腐蚀深度可达 100  $\mu\text{m}$ ; 在硫化氢和二氧化碳的介质中, 浸铝钢材一年内基本无变化, 而未浸铝钢材腐蚀深度达 2.5 mm。在炼化领域中, 已有部分炼化企业采用换热器管束热浸镀铝防腐处理技术来延长换热器的使用寿命<sup>[3]</sup>, 但大多用于常减压设备的水相换热器。由于炼化加氢装置中换热器长期面临高温高压、氯化铵腐蚀介质环境, 最短服役

三个月即发生腐蚀穿孔, 严重影响了炼化企业的安全长周期运行。

本文采用改进的热浸铝工艺对炼化加氢换热器的常用材质——20#钢、15CrMo 钢和 321 不锈钢进行了整管热浸铝, 研究热浸铝镀层在氯化铵腐蚀介质环境中的腐蚀特性和耐蚀机理, 研究结果对保障炼化加氢装置的安全长周期运行具有重要意义。

## 1 实验

### 1.1 实验材料及热浸铝工艺

采用的换热器管束基材材质为 20#钢、15CrMo 以及 321 不锈钢, 其化学成分见表 1, 热浸铝管束尺寸为  $\phi 25 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 。改进的热浸铝工艺具体为:

1) 换热器管束的前处理。包括丙酮除油, 25% 的稀硫酸除油除锈处理。

2) 对前处理的换热器管束进行助镀处理。采用的助镀剂为 40%NaCl+40%KCl+10%KF+10%NaF, 助镀剂溶液温度为 90 °C, 助镀处理时间为 5~10 min。

3) 对助镀后的换热器管束进行预热处理。将换热器置于 180 °C 预热炉中缓慢加热 2 h 至 300 °C、

4) 换热器的盐浴处理。盐浴的配方组成为: 40% NaCl、30% KCl、20%  $\text{NaAlF}_6$ 、8%  $\text{AlF}_3$ 、2%  $\text{CaCl}_2$  以及 2%  $\text{MgF}_2$ 。盐浴处理温度为 650~700 °C, 盐浴处理时间为 1~2 h。

5) 换热器进行热浸镀铝处理。浸铝在铝锅中进行, 铝为 A00 工业纯铝, 热熔铝温度为 690~720 °C, 浸镀时间为 20~30 min。

6) 对热浸镀铝后的换热器进行保温和缓冷处理。保温在保温电炉内进行, 温度为 680 °C, 保温 3 h, 然后缓冷, 缓冷速度约为 100 °C/h, 直至冷却至室温。

表 1 换热器管束基材的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of heat-exchange tube substrates

Materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
20# steel	0.09~0.12	0.20~0.26	0.44	≤0.02	≤0.01	≤0.05	≤0.01	≤0.01
15CrMo	0.12~0.18	0.17~0.37	0.4~0.7	≤0.035	≤0.035	0.8~1.10	≤0.3	0.4~0.55
321 stainless steel	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	17.0~19.0	9.0~12.0	

wt%

## 1.2 表征及测试方法

### 1.2.1 热浸铝层形貌及成分分析

依照 GB/T 18592—2001, 目视观察换热器管束热浸镀铝层颜色、表面缺陷等。浸蚀剂为 4%硝酸+96%乙醇溶液, 采用 MEF3A 金相显微镜观察不同基材的换热器管束热浸镀铝层的形貌和厚度。采用 INCA-350 扫描电子显微电镜 (SEM) 观察热浸铝层表面及断面形貌, EDS 分析镀层成分组成。用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析表面腐蚀产物的相结构, 测试条件如下: 所用射线为 Cu 靶 K $\alpha$  线 ( $\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$ ), 管电压为 40 kV, 管电流为 40 mA, 扫描速率为 6 ( $^{\circ}$ )/min, 采用连续扫描的方法。

### 1.2.2 氯化铵腐蚀实验

在室温 (25  $^{\circ}\text{C}$ )、50、80  $^{\circ}\text{C}$  下进行潮湿氯化铵垢下腐蚀实验, 采用 HH-5 型油浴加热。腐蚀介质为潮湿氯化铵介质, 其  $\text{NH}_4\text{Cl}:\text{H}_2\text{O}=10:3$  (质量比), 静态, 常压, 实验周期 30 天。实验后观察试样的壁厚减薄情况。

模拟某石化公司柴油加氢装置反应产物/低分油换热器 E102 的服役工况, 进行高温高压釜模拟工况实验, 采用实验温度为 200  $^{\circ}\text{C}$ , 压力为 7 MPa, 介质流速为 2 m/s, 腐蚀介质中  $\text{NH}_4^+$  含量为 5000 mg/L,  $\text{Cl}^-$  含量以及  $\text{S}^{2-}$  含量分别为 70 mg/L 和 5000 mg/L, 实验周期 7 天。实验后分析实样的腐蚀情况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 热浸铝层形貌及成分分析

图 1 为 20#钢、15CrMo 和 321 不锈钢热浸镀铝

处理后的宏观形貌, 根据 GB/T 18592—2001 目视检查, 发现管束表面的热浸镀铝层色泽光亮、连续完整, 无熔渣、漏镀、剥落等表面缺陷。

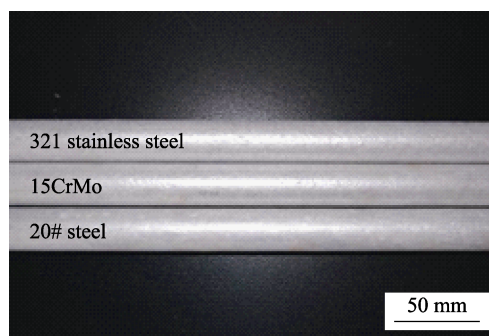


图 1 不同基材热浸镀铝处理后的宏观形貌  
Fig.1 Macro morphology of different substrates after hot-dipped aluminum treatment

图 2 为不同基材热浸镀铝处理后的显微形貌。由图可以看出, 20#钢和 15CrMo 钢热浸铝层均由明显的两层组织构成, 321 不锈钢镀层观察不到明显的分层, 测得的不同基材热浸铝镀层厚度见表 2。根据 GB/T 18592—2001 要求, 热浸镀铝层厚度应  $\geq 0.080\ \text{mm}$ , 由表 2 可以看出, 三种基材的热浸铝镀层厚度均达到标准要求。

为进一步分析热浸铝镀层的结构, 对 20#钢、15CrMo 和 321 不锈钢热浸镀铝层的断面进行 SEM 和 EDS 分析, 结果如图 3 和表 3 所示。可以看出, 20#钢、15CrMo 以及 321 不锈钢热浸镀铝层主要由纯 Al 层和 Fe-Al 合金层组成, EDS 显示镀层最外层有少量的 O 存在, 说明镀层表面可能含有少量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。XRD 结果 (图 4) 进一步证实了试样表面镀层主要是由 Al 和少量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成。

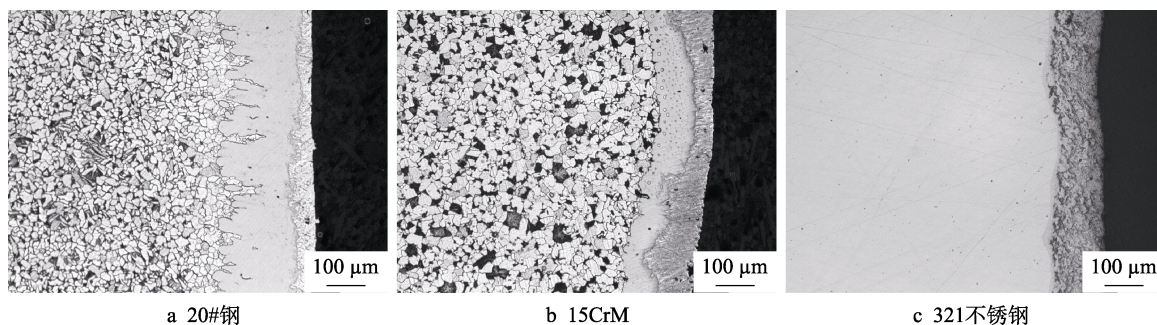
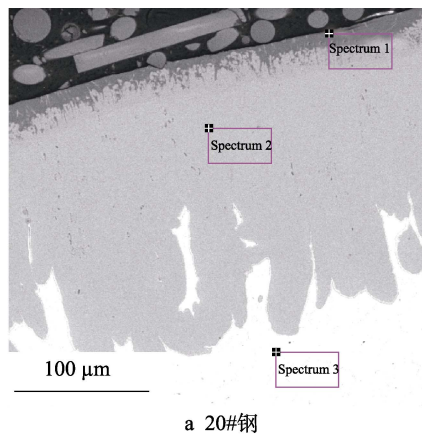


图 2 不同基材换热器管束热浸镀铝层显微形貌

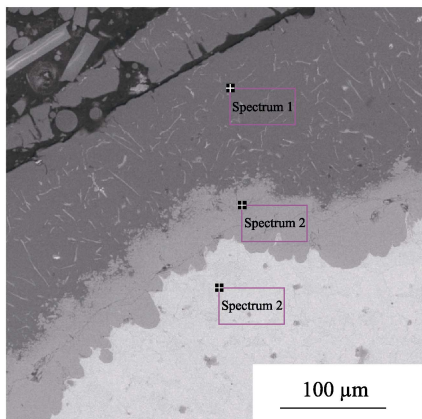
Fig.2 Microstructure of hot-dipped aluminum coating of heat exchanger tubes with different substrates:  
a) 20# steel; b) 15CrMo; c) 321 stainless steel

表 2 不同基材换热器管束热浸镀铝层厚度  
Tab.2 Thickness of hot-dipped aluminum coating of heat exchanger tubes with different substrates

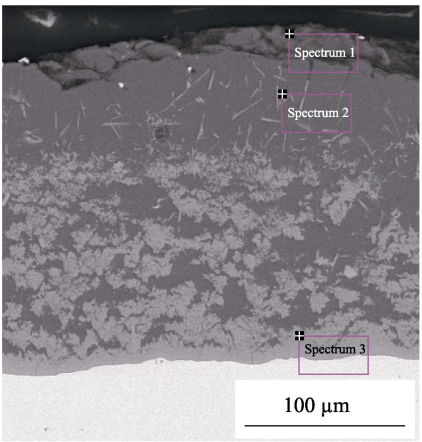
Substrates	Inner layer thickness/ $\mu\text{m}$	Outer layer thickness/ $\mu\text{m}$
20# steel	136	52
15CrMo	96	96
321 stainless steel	134	



a 20#钢



b 15CrMo



c 321不锈钢

图 3 不同基材换热器管束热浸镀铝层 SEM 形貌  
Fig.3 SEM images of hot-dipped aluminum coating of heat exchangers with different substrates:  
a) 20# steel; b) 15CrMo; c) 321 stainless steel

表 3 不同基材换热器管束热浸镀铝层断面 EDS 成分分析  
Tab.3 EDS analysis of hot-dipped aluminum coating of heat exchangers with different substrates

wt. %						
Substrate	Area	C	O	Al	Cr	Fe
20# steel	1	—	2.86	95.49	—	1.65
	2	—	2.82	54.96	—	42.22
	3	2.11	—	—	—	97.89
15CrMo	1	—	3.90	95.71	—	—
	2	3.71	—	54.58	0.52	41.19
	3	2.06	—	—	1.14	96.22
321 stainless steel	1	22.27	5.72	70.97	0.24	0.80
	2	5.65	2.05	90.86	0.43	0.39
	3	3.23	—	62.20	3.49	29.22

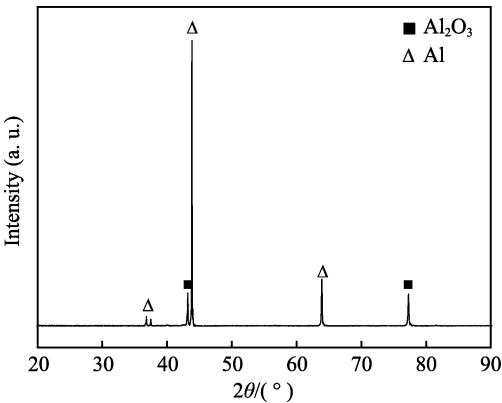


图 4 热浸铝镀层表面 XRD 成分分析  
Fig.4 X-ray diffraction pattern for hot-dipped aluminum coating

2.2 热浸铝镀层耐氯化铵介质腐蚀性能分析

图 5 为不同材质在潮湿氯化铵条件（不同温度）下的腐蚀速率曲线。可以看出，在潮湿氯化铵条件下，20#钢和 15CrMo 钢的腐蚀速率均随着实验温度的升高而明显增大，80 ℃时的腐蚀速率分别达到 21.6 mm/a

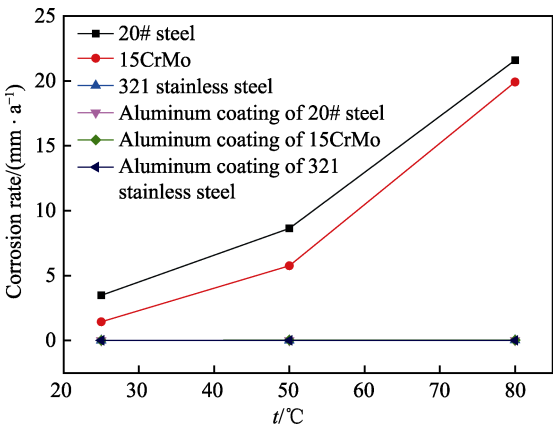


图 5 不同材质在潮湿氯化铵介质中的腐蚀速率曲线  
Fig.5 Corrosion rate curves of different materials in moist ammonium chloride medium



和 19.9 mm/a。即使在室温氯化铵结晶条件下, 20# 钢和 15CrMo 钢的腐蚀速率也达到了 3.84 mm/a 和 1.44 mm/a, 远高于 NACE RP-0775-2005 规定的极严重腐蚀要求。通常换热器管束壁厚为 2.5 mm, 从实验结果来看, 20# 钢和 15CrMo 钢换热器在氯化铵结晶条件下会很快发生腐蚀穿孔。321 不锈钢在潮湿氯化铵条件下的均匀腐蚀速率很低, 壁厚基本没有减薄, 但在实验过程中观察到试样表面有明显的点蚀现象。

当 20# 钢、15CrMo 和 321 不锈钢热浸铝后, 在潮湿氯化铵介质中放置一个月, 发现三种试样基本没有腐蚀现象出现, 说明热浸铝镀层在氯化铵结晶环境下具有良好的防腐性能。前述研究已经表明, 热浸铝层是由纯铝层和 Fe-Al 合金层组成, EDS 和 XRD 结果也证实纯铝层的表面形成了致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护膜, 这层保护膜可以阻碍腐蚀介质向基体渗铝层内部扩散, 阻止腐蚀反应的发生, 从而起到保护基材的作用。在氯化铵腐蚀介质中,  $\text{Cl}^-$  会破坏  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护膜, 当纯铝层失效时, Fe-Al 合金层表面会继续生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护膜, 同时合金中 Fe 元素的腐蚀产物也可以阻止腐蚀反应的进一步发生, 在 Fe-Al 的双重作用下, 热浸铝层抗  $\text{Cl}^-$  腐蚀的能力大大提高。

加氢装置换热器运行过程中不仅面临氯化铵结晶腐蚀穿孔的风险, 还存在管束内部高温高压及介质的腐蚀。本实验模拟某石化公司柴油加氢装置反应产物/低分油换热器 E102 的服役工况, 对比不同材质热浸铝前后的腐蚀情况, 结果如图 6 所示。20# 钢、15CrMo 钢和 321 不锈钢在实验后, 表面生成一层均匀的腐蚀产物膜, 而经过渗铝处理的试样(图 6 中右侧试样)表面基本无腐蚀产物生成, 试样厚度基本不变, 说明在加氢装置换热器管束的服役环境下, 采用该防护措施能够提高管束的耐腐蚀性, 延长管束的使用寿命。

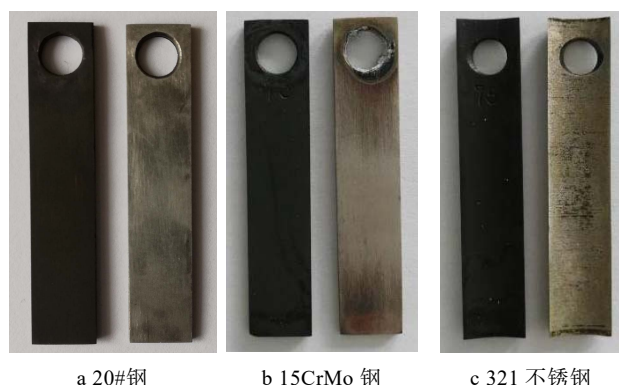


图 6 不同材质模拟工况实验前后的形貌

Fig.6 Morphologies of different materials before and after simulated test: a) 20# steel; b) 15CrMo; c) 321 stainless steel

### 3 结论

本文采用改进的热浸铝工艺对炼化加氢换热器

常用材质 20# 钢、15CrMo 钢和 321 不锈钢进行了整管热浸铝, 对镀层厚度、组织和成分进行了分析, 同时采用氯化铵垢下腐蚀实验和高温高压釜模拟工况实验, 评价热浸铝镀层的耐氯化铵腐蚀性能, 结论如下:

1) 所得热浸铝层无表面缺陷, 镀层厚度满足 GB/T 18592—2001 标准要求, 镀层结构主要由纯 Al 层和 Fe-Al 合金层组成, 镀层表面含有少量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

2) 在潮湿氯化铵介质中放置一个月, 发现热浸铝试样基本没有腐蚀现象出现, 热浸铝镀层在氯化铵结晶环境下具有良好的防腐性能。

3) 高温高压釜模拟工况实验结果证实, 经过渗铝处理的试样表面基本无腐蚀产物生成, 试样厚度基本不变, 说明热浸铝镀层在氯化铵服役环境下具有良好的防腐性能。

4) 热浸铝镀层可以阻碍腐蚀介质向基体渗铝层内部扩散, 阻止腐蚀反应的发生。在氯化铵腐蚀介质中,  $\text{Cl}^-$  会破坏  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护膜, 当纯铝层失效时, Fe-Al 合金层表面会继续生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护膜, 同时合金中 Fe 元素的腐蚀产物也可以阻止腐蚀反应的进一步发生, 在 Fe-Al 的双重作用下, 热浸铝层抗  $\text{Cl}^-$  腐蚀的能力大大提高。

### 参考文献:

- [1] 杨胜利. 炼油厂设备的腐蚀与防护[J]. 石化技术, 2015(7): 64-65.  
YANG Sheng-li. Corrosion and protection of oil refinery equipment[J]. Petrochemical industry technology, 2015 (7): 64-65.
- [2] 王磊. 炼厂静设备的腐蚀与防护[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.  
WANG Lei. Corrosion and protection of static equipment in refinery[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [3] 崔正丹. 炼油厂水相换热器碳钢材料的腐蚀与防护措施研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.  
CUI Zheng-dan. Corrosion and anti-corrosion of carbon steel of the aqueous phase heat-exchanger in refineries [D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [4] 李奇峰. 常减压装置塔顶换热器管束腐蚀及选材[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2009, 26(3): 41-42.  
LI Qi-feng. Corrosion of atmospheric-vacuum distillation unit's overhead heat exchanger tube bundles and material selection[J]. Corrosion & protection in petrochemical industry, 2009, 26(3): 41-42.
- [5] 曾勇. 8Mt/a 常减压蒸馏装置冷换设备选材分析[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2006, 23(4): 57-60.  
ZENG Yong. Material selection for the heat exchange equipment of 160 000 BPSD atmospheric-vacuum distillation unit[J]. Corrosion & protection in petrochemical industry, 2006, 23(4): 57-60.

(下转第 84 页)

- 2014, 32(31): 65-70.
- [10] 祁丽莎, 陈明贵, 王小玮, 等. 塔河油田注气井筒氧腐蚀机理研究[J]. 石油工程建设, 2016, 42(6): 70-72.  
QI Li-sha, CHEN Ming-gui, WANG Xiao-wei, et al. Study of oxygen corrosion mechanism in wellbore tube for gas injection in Tahe oilfield[J]. Petroleum engineering construction, 2016, 42(6): 70-72.
- [11] 胡松阳, 毕琳琳, 张艳敏, 等. 电镀钨基合金抽油杆耐腐蚀性能试验研究[J]. 石油机械, 2011, 39(10): 12-15.  
HU Song-yang, BI Lin-lin, ZHANG Yan-min, et al. Experimental study on corrosion resistance of electroplated tungsten alloy sucker rod[J]. China petroleum machinery, 2011, 39(10): 12-15.
- [12] 李春茂, 郭庆荣, 韩民强. 镀钨合金防腐抽油杆[J]. 石油科技论坛, 2017(S1): 128-131.  
LI Chun-mao, GUO Qing-rong, HAN Min-qiang. Tungsten alloy plated sucker rod[J]. Petroleum technology forum, 2017(S1): 128-131.
- [13] 侯铎, 施太和, 曾德智, 等. 电镀钨合金镀层组织及其耐腐蚀性能研究[J]. 材料导报, 2012, 26(5): 12-15.  
HOU Duo, SHI Tai-he, ZENG De-zhi, et al. Coating microstructure characteristics and corrosion resistance of electroplating W alloy[J]. Material review, 2012, 26(5): 12-15.
- [14] 孙福洋, 赵国仙, 郭清超, 等. 镍钨合金镀层对 QT-900 油管耐 CO<sub>2</sub> 腐蚀的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 6-15.  
SUN Fu-yang, ZHAO Guo-xian, GUO Qing-chao, et al. Effect of Ni-W alloy coating on the corrosion resistance of QT-900 coiled tubing[J]. Surface technology, 2014, 43(6): 6-15.
- [15] 裴智超, 熊春明, 叶正荣, 等. 镍钨合金镀层在高含 CO<sub>2</sub> 及低含 H<sub>2</sub>S 环境下腐蚀行为[J]. 石油矿场机械, 2017, 46(4): 47-51.  
QIU Zhi-chao, XIONG Chun-ming, YE Zheng-rong, et al. Corrosion behavior of nickel and tungsten alloy plating in high CO<sub>2</sub> and low H<sub>2</sub>S corrosive environment[J]. Oil field equipment, 2017, 46(4): 47-51.
- [16] 宋中华, 张士诚, 周理志, 等. 钨镍合金镀层油管适用性[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(12): 1256-1259.  
SONG Zhong-hua, ZHANG Shi-Cheng, ZHOU Li-zhi, et al. Applicability of tungsten nickel alloy coated tubing[J]. Corrosion & protection, 2014, 35(12): 1256-1259.
- [17] 雷丹. 钨合金镀层油管在高含 H<sub>2</sub>S 环境下的腐蚀行为研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.  
LEI Dan. Research on corrosion behavior of tungsten-based alloy coating under high H<sub>2</sub>S environment[D]. Xian: Xi'an Shiyou University, 2013.
- [18] 钱进森, 燕铸, 刘建彬, 等. 微量 H<sub>2</sub>S 对油管钢 CO<sub>2</sub> 腐蚀行为的影响[J]. 焊管, 2014, 35(12): 39-45.  
QIAN Jin-sen, YAN Zhu, LIU Jian-bin, et al. Effect of small amount H<sub>2</sub>S on CO<sub>2</sub> corrosion behavior of oil tube steel[J]. Welded pipe and tube, 2014, 35(12): 39-45.

(上接第 20 页)

- [6] 于海成, 严与辉, 梁向荣, 等. 新型 Ni-Cr 耐蚀合金换热器管板焊接工艺评定及组织研究[J]. 焊接技术, 2018, 47(7): 43-47.  
YU Hai-cheng, YAN Yu-hui, LIANG Xiang-rong, et al. Study on welding process assessment and microstructure of new Ni-Cr corrosion resistant alloy heat exchanger tube-sheet[J]. Welding technology, 2018, 47(7): 43-47.
- [7] JIN B J, LEE J P, PARK M H, et al. A study on forming for plate-type heat exchangers of the Ti material[J]. Procedia engineering, 2017, 174: 171-178.
- [8] 李辉, 刘希武, 蒋兴家, 等. 表面涂层技术在石油炼制领域的应用[J]. 焊接技术, 2018, 47(10): 1-5.  
LI Hui, LIU Xi-wu, JIANG Xing-jia, et al. Application of surface coating technology in petroleum refining[J]. Welding technology, 2018, 47(10): 1-5.
- [9] 王帅. 防腐镀(涂)层管束表面对流凝结换热特性实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
WANG Shuai. Experimental study on convection-condensation heat transfer characteristics of different antiseptic tube surfaces[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [10] XU X Q, MIAO J, BAI Z Q, et al. The corrosion behavior of electroless Ni-P coating in Cl<sup>-</sup>/H<sub>2</sub>S environment[J]. Applied surface science, 2012(22): 8802-8806.
- [11] 朱新亮. 镍磷化学镀技术在换热器管束防腐中的应用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(11): 32.  
ZHU Xin-liang. Application of electroless nickel-phosphorus plating technology in anticorrosion of heat exchanger tube[J]. China petroleum and chemical standard and quality, 2013(11): 32.
- [12] 师红旗, 丁毅, 马立群. 化学镀镍换热器管束腐蚀破裂失效分析[J]. 表面技术, 2009, 38(5): 93-95.  
SHI Hong-qi, DING Yi, MA Li-qun. Failure analysis of corrosion cracking of heat exchanger tubes packing with electroless nickel[J]. Surface technology, 2009, 38(5): 93-95.
- [13] 黄卫东, 张良玉, 曲谦, 等. 热浸铝材料表面电化学氧化工艺研究[J]. 有色矿冶, 2018, 34(1): 37-41.  
HUANG Wei-dong, ZHANG Liang-yu, QU Qian, et al. Study on electrochemical oxidation process of hot dip aluminum material[J]. Non-ferrous mining and metallurgy, 2018, 34(1): 37-41.
- [14] 张桂凯, 李炬, 陈长安. 不锈钢异型件表面阻氚层制备技术的研究进展[J]. 机械工程材料, 2010, 34(4): 5-10.  
ZHANG Gui-kai, LI Ju, CHEN Chang-an. Research progress on preparation technology of tritium penetration barrier on special-shaped pieces of stainless steel[J]. Materials for mechanical engineering, 2010, 34(4): 5-10.
- [15] 夏谦, 伍林伟, 陈俊帆. 渗铝钢与镀锌钢应用于输电线路铁塔的比较研究[J]. 电工技术, 2018(3): 115-117.  
XIA Qian, WU Lin-wei, CHEN Jun-fan. The comparative research on aluminized and galvanized steel in tower of transmission line[J]. Electric engineering, 2018(3): 115-117.
- [16] SUN X F, HUANG Y L, SONG W, et al. Study on thermal-shock-resistance of the composite coating of 20 steel substrate by hot dip aluminum and micro-arc oxidation[J]. Key engineering materials, 2016, 723: 450-453.