

# HF<sub>4</sub> 对 1Cr18Ni9Ti 腐蚀行为的影响及除垢性能

罗源军<sup>1</sup>, 罗源兵<sup>2</sup>, 张付宝<sup>1</sup>, 刘波<sup>1</sup>, 吕太勇<sup>1</sup>

(1. 中昊晨光化工研究院有限公司, 四川 富顺 643201;

2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 目的 研究 HF<sub>4</sub> (氟硼酸) 对 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢腐蚀行为的影响规律, 为工业酸洗除垢提供腐蚀方面的依据。方法 采用旋转挂片法、金相显微镜与扫描电子显微镜观察等手段研究 HF<sub>4</sub> 对 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢腐蚀行为的影响, 并对其除垢性能进行评价。结果 HF<sub>4</sub> 的水解产物 HF 溶解了 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢表面的钝化膜, 造成金属表面发生剧烈腐蚀。金相与 SEM 照片及能谱分析显示, HF<sub>4</sub> 对金属表面的破坏以不均匀的全面腐蚀为主, 具有非常明显的点蚀特征。旋转挂片法实验表明, 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢腐蚀速率随着时间的延长而逐渐降低, 并趋于稳定; 升高温度与增加流速都会使腐蚀速率加快, 不同的是流速对腐蚀速率的影响表现出了明显的线性关系。除垢试验显示, HF<sub>4</sub> 对碳酸盐水垢有较好的去除效果, 除垢率可以达到 97% 以上。结论 选用 HF<sub>4</sub> 去除水垢时, 只有严格控制好清洗工艺参数, 才能降低其对基材的腐蚀的影响, 延长设备的使用寿命。

**关键词:** 氟硼酸; 1Cr18Ni9Ti 不锈钢; 腐蚀行为; 表面形貌; 除垢性能

**中图分类号:** TG172.6+ **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)12-0180-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.029

## Effect of Fluoboric Acid on Corrosion Behaviours of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel and Its Scale-removing Performance

LUO Yuan-jun<sup>1</sup>, LUO Yuan-bing<sup>2</sup>, ZHANG Fu-bao<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, LYU Tai-yong<sup>1</sup>

(1. Zhonghao Chenguang Research Institute of Chemical Industry, Fushun 643201, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To investigate the influence rules of fluoboric acid (HF<sub>4</sub>) on corrosion behaviors of 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel, and provide corrosion evidences for the industrial acid descaling. **Methods** The effect of fluoboric acid on corrosion behaviours of 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel was studied by means of rotary weight-loss test and metallographic microscope and scanning electron microscope observation. Meanwhile, its performance of scale-removing was also evaluated. **Results** Hydrofluoric acid, hydrolysate of fluoboric acid, dissolved the passive film on the stainless steel surface and caused serious corrosion on the metal surface. The results by means of metallographic microscope, SEM and EDS showed that the destructive form of metal was mainly unevenly distributed general corrosion, with evident pitting characteristics. The corrosion rate of metal tended to reduce and stabilize with immersion time. Besides, the increase of temperature and flow rate would accelerate corrosion velocity. But there was a significantly linear relationship between flow rate and corrosion velocity. Scale remov-

收稿日期: 2016-07-28; 修订日期: 2016-08-14

Received: 2016-07-28; Revised: 2016-08-14

作者简介: 罗源军 (1986—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事精细化工等方面的研究。

**Biography:** LUO Yuan-jun (1986—), Male, Master of engineering, Engineer, Research focus: fine chemicals.

al experiments showed that a good removal of carbonate scale could be obtained by fluoboric acid, and the scale removal rate could reach more than 97%. **Conclusion** When fluoboric acid is selected to remove scale, only strictly controlling technical parameters could reduce the bad corrosion to the metal substrate and prolong the service life of equipment.

**KEY WORDS:** fluoboric acid; 1Cr18Ni9Ti austenitic stainless steel; corrosion behaviors; surface topography; scale-removing performance

不锈钢换热器是化工企业使用较为普遍的设备之一,但在长期的运行过程中存在严重的污垢沉积。原因在于冷却水进行换热后,发生了蒸发浓缩过程,盐类物质因产生瞬时过饱和或者自身分解,产生一层难溶的沉积物,形成坚硬的水垢附着在换热片表面上,并且在设备的运行过程中继续产生二次、三次等水垢,使换热器的换热效率大幅度降低。另外也导致流动阻力的增大,结果造成能源的浪费。在去除垢层的方法中,以化学清洗最为方便,一般采用酸碱或络合剂对沉积的垢层进行渗透、剥离及溶解。其中酸可以溶解不锈钢基体上表面的氧化层,起到破坏金属与垢层之间结合的作用,从而使附着于氧化物表面的那层水垢也渐渐被剥离和脱落。

近年来以  $\text{HBF}_4$  为主的酸化体系用于金属表面氧化物、硅酸盐膜的清洁和腐蚀剂受到越来越多的重视,但不锈钢换热器换热表面水垢的酸洗过程中,工艺参数对基材腐蚀行为的影响及变化规律的研究开展还不是太多<sup>[1-3]</sup>。基于上述原因,文中从清洗工艺角度较系统地分析了  $\text{HBF}_4$  对基材腐蚀行为的影响规律,并对  $\text{HBF}_4$  的除垢能力进行了探讨,目的是提供重要的腐蚀数据,为以后工业酸洗提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 旋转挂片法

试样基材为换热器生产制造过程中常见的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,尺寸为  $50\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ,用金相砂纸逐级打磨至表面光亮为止,清水洗净后用棉纱蘸少量丙酮除油并吹干。实验时,将测定尺寸及质量后的试片放入质量分数为 10%  $\text{HBF}_4$  溶液中进行旋转挂片试验<sup>[4-5]</sup>,用水浴锅加热保温,并用恒速搅拌器控制  $\text{HBF}_4$  溶液的流动情况,利用式(1)将角速度换算成介质流速。在浸泡了指定时间

后取出不锈钢试样,刷去腐蚀产物,放入装有丙酮的烧杯中,超声波洗净,吹干称量。通过式(2)计算每次试验的深度腐蚀速率,每次试验放入 3 个平行样取平均值<sup>[6]</sup>。

$$v = \frac{2\pi R}{60} \omega \quad (1)$$

式中:  $v$  为流速,  $\text{m/s}$ ;  $\omega$  为角速度,  $\text{r/min}$ ;  $R$  为半径,  $\text{m}$ 。

$$V_p = 1000(W_0 - W_1) / (\rho S t) \quad (2)$$

式中:  $W_0$ ,  $W_1$  分别为腐蚀前及腐蚀后的质量,  $\text{g}$ ;  $\rho$  为金属密度,  $\text{g/cm}^3$ ;  $S$  为表面积,  $\text{m}^2$ ;  $t$  为浸泡时间,  $\text{h}$ 。

### 1.2 腐蚀形貌观察

将尺寸为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  规格的方片逐级打磨至 1000<sup>#</sup>,并用丙酮除油,然后浸入装有 500 mL 清洗液的锥形瓶中。对一定条件下腐蚀后的试样,用超声去除表面附着的腐蚀产物,用金相显微镜在  $200\times$  下观察试样的宏观腐蚀形貌。随后用扫描电子显微镜观察试样的微观腐蚀形貌,并采用仪器配带的 EDX 能谱仪对表面的成分进行测量。试验仪器分别为日本 Nikon(尼康)公司的 EPIPHOT200 型金相显微镜和捷克 TESCAN 公司的 VEGA 3 Easy-Probe 型扫描电子显微镜。

### 1.3 除垢性能测试

根据文献[7]及文献[8],设计两种人工水垢:一种为碳酸盐水垢,配方(质量分数)为  $\text{CaCO}_3$  85%,  $\text{CaSO}_4$  5%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  5%,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  5%;另一种为硅酸盐水垢,配方(质量分数)为  $\text{CaO}$  30%,  $\text{MgO}$  5%,  $\text{SiO}_2$  40%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  25%。按拟定配方准确称量,放入烧杯中,加入蒸馏水并用搅拌器调和均匀,然后过滤干燥,并将其放入研钵内,用钵杵研磨均匀。对每一种水垢先用分析天平准确称取 5 g 左右的垢样,放入 250 mL 温度为  $30\text{ }^\circ\text{C}$  的  $\text{HBF}_4$  中,6 h 后先过滤,后干燥剩余的垢样,用电子分析天

平准确称量除垢前后垢样的质量。按式(3)及式(4)计算相应的除垢效率,每次做3个平行试验,取平均值作为实验结果<sup>[7-8]</sup>。

$$\eta = \left( \frac{M_0 - M_1}{M_0} \right) \times 100\% \quad (3)$$

$$M_1 = A_1 - A_0 \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为除垢效率, %;  $A_0$  为空白滤纸的质量, g;  $A_1$  为滤纸及溶解水垢后的总质量, g;  $M_0$ ,  $M_1$  分别为水垢初始质量及剩余质量, g。

## 2 分析与讨论

### 2.1 工艺参数对腐蚀速率的影响

时间、温度及流速等工艺参数对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢深度腐蚀速率的影响如图 1(条件: 30 °C, 静止)、图 2(条件: 12 h, 静止)及图 3(条件: 30 °C, 12 h)所示。

从图 1 可知, 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在浸入  $\text{HBF}_4$  后不久, 腐蚀速率迅速增大。在浸泡 6 h 以后, 腐

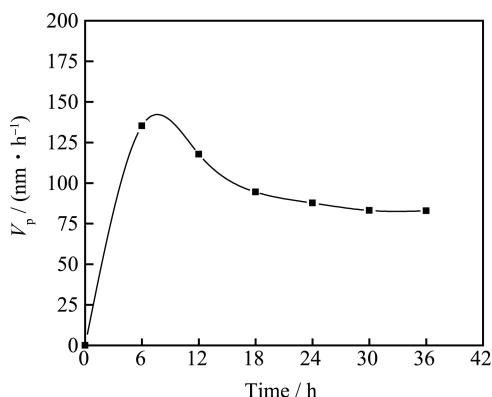


图 1 不锈钢在  $\text{HBF}_4$  溶液中的深度腐蚀速率-时间曲线  
Fig.1 Depth corrosion rate VS time for stainless steel immersed in fluoboric acid solution

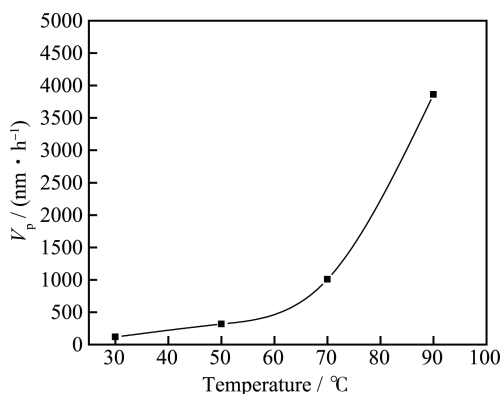


图 2 不锈钢在  $\text{HBF}_4$  溶液中的深度腐蚀速率-温度曲线  
Fig.2 Depth corrosion rate VS temperature for stainless steel immersed in fluoboric acid solution

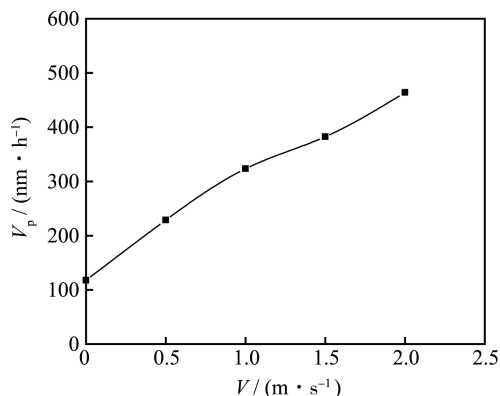


图 3 不锈钢在  $\text{HBF}_4$  溶液中的深度腐蚀速率-流速曲线  
Fig.3 Depth corrosion rate VS flow rate for stainless steel immersed in fluoboric acid solution

蚀速率开始降低, 随后在 80 nm/h 左右上下浮动, 并趋于稳定。图 2, 图 3 都表明温度与流速的增加会导致 1Cr18Ni9Ti 不锈钢腐蚀速率的迅速变大, 不同的是流速对腐蚀速率的影响呈现出明显的线性关系。由于  $\text{HBF}_4$  水解是一个多级电离过程, 具体水解反应式为:



水解生成的 HF 进一步与金属进行快速反应, 其中反应(5)为速度的控制步骤。随着时间的延长, 不锈钢腐蚀速率开始较快, 后期逐渐降低, 并趋于恒定。原因在于  $\text{HBF}_4$  是一种强酸, 在浸泡开始时, 溶液中已经水解产生了数量较多的  $\text{H}^+$ , 因此, 金属在开始浸泡时, 腐蚀速率急剧增大。在浸泡一段时间后, 由于金属不断腐蚀  $\text{H}^+$  被大量消耗, 而水解过程中逐渐产生浓度较高的硼酸, 进一步抑制其水解过程。同时  $\text{HBF}_4$  一级水解反应渐渐达到平衡状态, 水解过程中生成的 HF 浓度渐渐趋于恒定, 导致其腐蚀速率也逐渐降低并趋于恒定。温度升高导致 1Cr18Ni9Ti 不锈钢腐蚀速率急剧增大的原因在于, 作为控制步骤的  $\text{HBF}_4$  一级水解反应过程的平衡常数, 其对温度的变化比较敏感, 并且随温度的升高而急剧增大, 导致溶液中产生大量的水解产物 HF, 使腐蚀过程加剧。另外, 腐蚀速率随流速的增加成线性关系增大的原因在于,  $\text{HBF}_4$  水解产物 HF 在反应刚开始就迅速溶解不锈钢表面的钝化膜, 引起了钝化膜的局部破坏, 同时流速的增加有利于去极化剂的输送和金属离子离开不锈钢表面, 从而导致腐蚀过程迅速加剧<sup>[9-13]</sup>。

2.2 表面腐蚀形貌的变化

采用金相显微镜和扫描电子显微镜对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在 HBF<sub>4</sub> 中(30 ℃)浸泡不同时间后的宏观腐蚀形貌和微观腐蚀形貌进行了观察，结果如图 4、图 5 所示，浸泡不同时间后不锈钢表面的能谱分析结果见表 1。

由图 4、图 5 可以看出，在没有腐蚀时，在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢表面能看见比较清晰的划痕，整

个表面十分光亮而平整。浸泡 12 h 后，不锈钢开始出现明显的点蚀特征，表面开始出现不规则且较深的沟槽，开始变的粗糙。24 h 后，金相照片显示，腐蚀程度进一步加剧，原先的沟槽已经消失，取而代之的是较深的腐蚀坑及带有尖锐棱边的凸起，且形状极不规则，整个表面的起伏变化较大，SEM 照片也进一步证实了表面出现了大小分布不均的凸起和凹陷，并有大量腐蚀麻坑的出现，整个形貌较为复杂。36 h 后，除了出现了几个较大的蚀孔外，

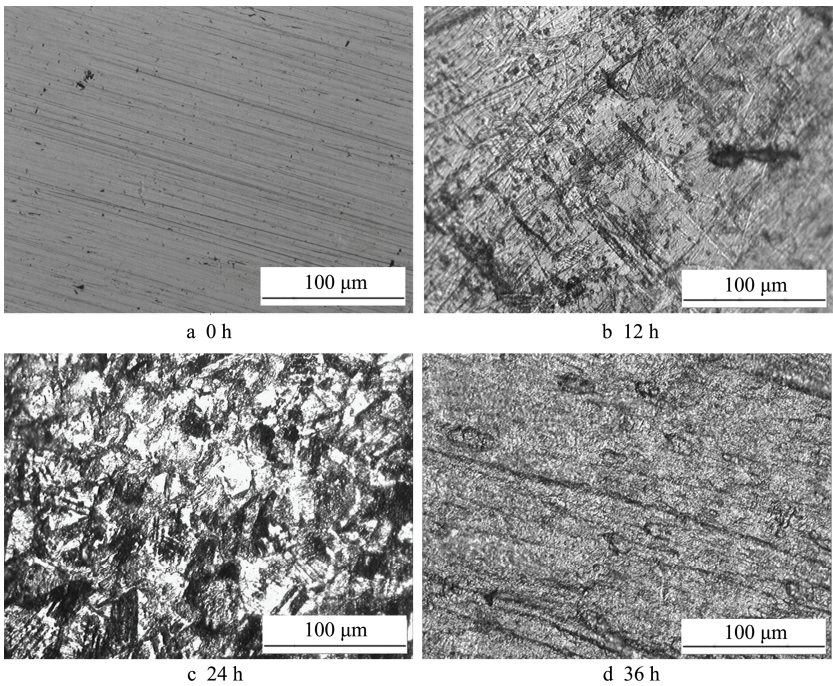


图 4 不锈钢在 HBF<sub>4</sub> 溶液中浸泡不同时间的宏观腐蚀形貌  
Fig.4 Macro-appearance of stainless steel in fluoboric acid solution at different times of immersion

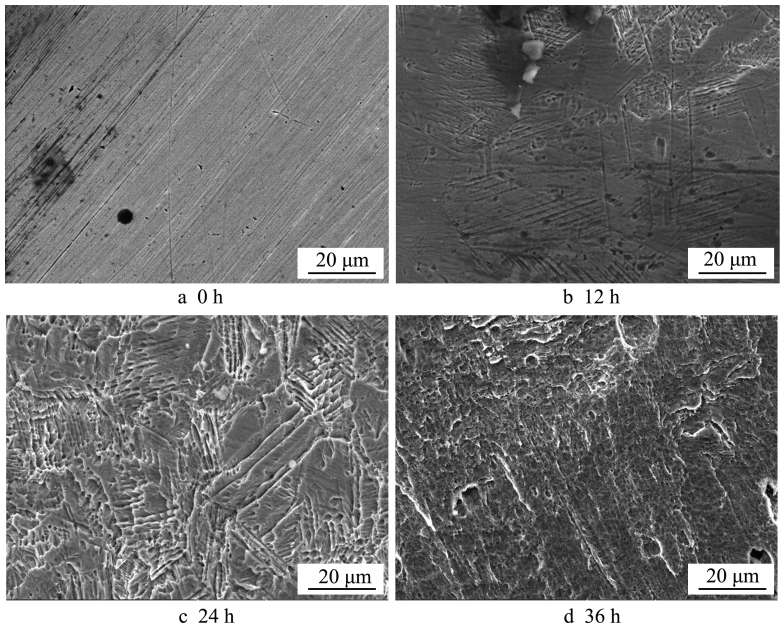


图 5 不锈钢在氟硼酸型清洗剂中浸泡不同时间的微观腐蚀形貌  
Fig.5 Micro-appearance of stainless steel in the fluorine boric acid cleaning agent at different times of immersion

表 1 不锈钢在氟硼酸型清洗剂中浸泡不同时间的表面成分  
Tab.1 Surface composition of stainless steel in the fluorine boric acid cleaning agent at different times of immersion

时间/h	1Cr18Ni9Ti 不锈钢				
	Fe	Cr	Ni	C	O
0	69.93	15.98	8.52	4.19	—
12	68.39	15.68	8.38	5.40	—
24	66.33	15.32	8.08	4.83	1.77
36	69.14	15.98	8.40	3.38	—

整个表面趋于平坦,从整体上看, HBF<sub>4</sub> 对金属的腐蚀可以看作一种不均匀的全面腐蚀,可见 HBF<sub>4</sub> 对不锈钢表面有着非常明显的化学抛光作用。

由表 1 可知,在整个浸泡过程中各时间点, 1Cr18Ni9Ti 不锈钢表面各元素的相对含量变化不显著,表明整个腐蚀以氟硼酸对基体的不均匀的全面腐蚀为主。采用金相显微镜和扫描电子显微镜对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢不同温度下在 HBF<sub>4</sub> 中(时间 12 h)浸泡的宏观腐蚀形貌和微观腐蚀形貌进行了观察,结果如图 6、图 7 所示,能谱分析结果见表 2。

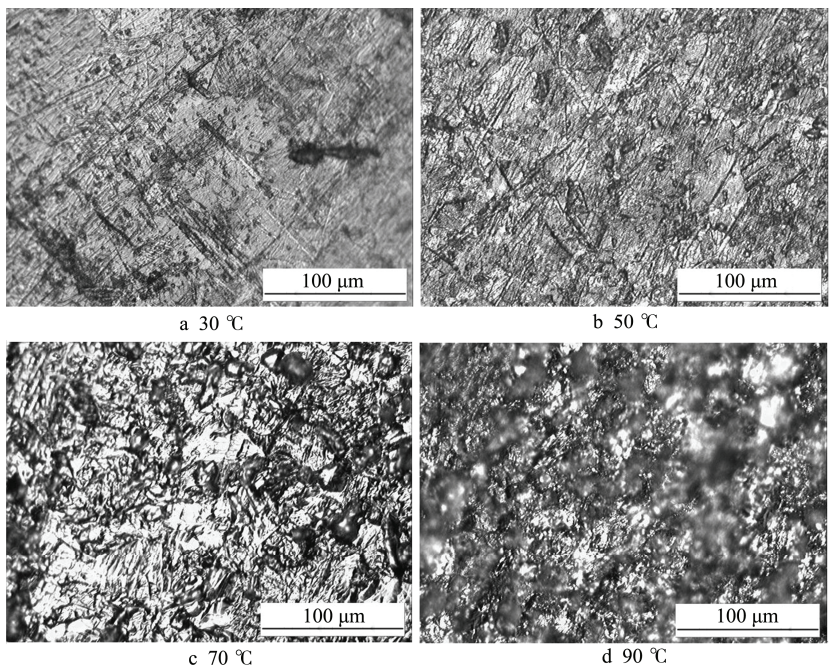


图 6 不锈钢在氟硼酸型清洗剂中浸泡不同温度下的宏观腐蚀形貌

Fig. 6 Macro-appearence of stainless steel in the fluorine boric acid cleaning agent at different temperature of immersion

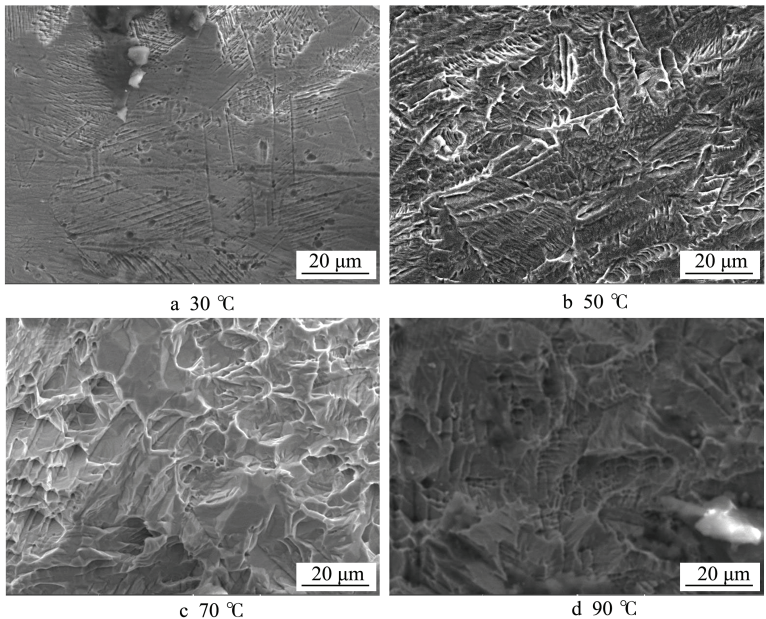


图 7 不锈钢在氟硼酸型清洗剂中浸泡不同温度下的微观腐蚀形貌

Fig.7 Micro-appearence of stainless steel in the fluorine boric acid cleaning agent at different temperature of immersion

由图 6、图 7 可以看出,在整个浸泡过程中(12 h), 温度对腐蚀形貌的影响非常显著, 在 30℃时, 不锈钢表面虽然出现了深浅不一的沟槽, 但是局部区域还是较为平滑, SEM 照片显示, 不锈钢表面开始出现了明显的点蚀, 在 50℃时, 金属表面出现了纵横交错深而窄的腐蚀沟槽, 同时 SEM 照片还表明带有尖劈状的腐蚀深坑。在 70℃和 90℃时, 从金相照片可看出金属表面开始变得凹凸起伏, 温度越高, 起伏的也越厉害。SEM 照片显示, 在 70℃时, 腐蚀沟槽及尖劈状的腐蚀深坑逐渐消失, 出现了体积较大且不规则的凸起和凹陷, 可以发现, 在这些凸起和凹陷的局部区域表面是比较光滑的, 且带有孔径较大的孔洞; 在 90℃时, 在那些凸起和凹陷表面比较光滑的地方重新出现数量众多的沟槽和点蚀<sup>[14—17]</sup>。

表 2 不锈钢在氟硼酸清洗剂中浸泡不同温度下的表面成分  
Tab.2 Surface composition of stainless steel in the fluorine boric acid cleaning agent at different temperatures of immersion

温度/℃	1Cr18Ni9Ti 不锈钢					%
	Fe	Cr	Ni	C	O	
30	68.39	15.68	8.38	5.40	—	
50	62.45	15.44	7.03	4.10	3.29	
70	70.75	16.78	8.45	5.48	—	
90	60.35	15.04	7.12	10.99	3.23	

由表 2 可以看出, 不锈钢各元素的相对含量随温度的变化波动较大, 表明试样表面有明显的局部腐蚀产生, 且腐蚀不均, 造成各处的元素含量不一。

2.3 除垢能力的评价

换热器中的水垢一般指附着在传热面或其他受热面的附着物, 大致分为碳酸盐水垢和硅酸盐水垢两类。其中, 碳酸盐水垢是不锈钢换热器传热面及循环冷却水中的主垢种。将配制好的两种水垢分别进行除垢试验, 并计算相应的除垢率, 结果见表 3。

从表 3 可知, 对于碳酸盐水垢, HBF<sub>4</sub> 平均除垢率为 97.34%, 而对于硅酸盐水垢, 其除垢率只有 79.17%, 表明 HBF<sub>4</sub> 的除垢能力甚好。同时, 在相同条件下, HBF<sub>4</sub> 对碳酸盐水垢的除垢效果要好于硅酸盐水垢。

表 3 HBF<sub>4</sub> 对两种水垢的溶解情况  
Tab.3 Dissolving conditions of the fluorine boric acid toward two kinds of scales

碳酸盐水垢			硅酸盐水垢		
试验次数	除垢率 /%	平均值 /%	试验次数	除垢率 /%	平均值 /%
1	98.38		1	79.58	
2	97.19	97.34	2	79.09	79.17
3	96.45		3	78.86	

3 结语

对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 在 HBF<sub>4</sub> 中浸泡达到一定时间以后, 腐蚀速率趋于稳定并略有下降, 升高温度及增加流速都会使腐蚀速率提高, 其温度对提高腐蚀速率的效果更为明显, 不同的是流速对腐蚀速率的影响呈现出较为明显的线性关系。金相观测显示, HBF<sub>4</sub> 对不锈钢表面腐蚀非常严重, 以不均匀的全面腐蚀为主。除垢试验表明, HBF<sub>4</sub> 对硅酸盐水垢去除效果一般, 而对碳酸盐水垢却有较好的去污效果, 其除垢率可以达到 97%以上。

参考文献

[1] 陈旭俊. 工业清洗剂及清洗技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.  
CHEN Xun-jun. Industrial Cleaning Agents and Cleaning Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Publisher, 2002.

[2] 白敏. 化学法清洗不锈钢板式换热器垢[J]. 大型铸锻件, 1997(2): 35—36  
BAI Min. Chemical Cleaning of Stainless Steel Plate Heat Exchanger Scale[J]. Heavy Casting and Forging, 1997(2): 35—36.

[3] 余存烨. 不锈钢设备及零部件的酸洗钝化技术[J]. 清洗世界, 2004, 20(1): 20—24.  
YU Cun-ye. Technology for Acid Cleaning and Passivation of Stainless Steel Equipment and Parts[J]. Cleaning World, 2004, 20(1): 20—24.

[4] 李江波, 李鸿展, 谢凌, 等. 核设施化学去污技术的研究现状[J]. 铀矿冶, 2010, 29(11): 41—44.  
LI Jiang-bo1, LI Hong-zhan, XIE Ling, et al. Present Situation of Research on Chemical Decontamination of Nuclear Facilities[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2010, 29(11): 41—44.

[5] 裴潮. 锡铅镀层无氟硼酸浸亮清洗剂[J]. 表面技术, 1990, 45(4): 44—46.  
PEI Chao. A Non-fluoboric Cleaner of Sn-Pb Coatnig[J]. Surface Technology, 1990, 45(4): 44—46.

- [6] 化学工业部化工机械研究院. 腐蚀与防护手册-腐蚀试验理论·试验及监测[M]. 北京: 化学工业出版社, 1987.  
China Academy of Chemical Machinery Research. Corrosion and Protection Manual: Corrosion Experiment Theory, Test and Monitoring[M]. Beijing: Chemical Industry Publisher, 1987.
- [7] 马云, 宋玉苏. 舰船钛热交换器水垢清洗工艺[J]. 清洗世界, 2007, 23(1): 11—14.  
MA Yun, SONG Yu-su. The Cleaning Technology of Scale Deposit on Water Titanium Cooler Exchanger on Marine[J]. Cleaning World, 2007, 23(1): 11—14.
- [8] 朱新民. 浅谈锅炉硅酸盐水垢的去除方法[J]. 化学工程与装备, 2008(4): 55—56.  
ZHU Xin-min. Introduction to Remove Methods of Boiler Silicate Scale[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2008(4): 55—56.
- [9] NA K H, PYUN S I, PARK J J. Effects of Chloride Ion Addition on the Pickling of Hot-Rolled Steels in Fluoboric Acid Solution[J]. Corrosion: The Journal of Science and Engineering, 2003, 59(2): 146—154.
- [10] MAMEDOV M N. Electroplating of Lead Coatings Containing Small Amount of Tellurium[J]. Protection of Metals, 2002, 38(3): 236—237.
- [11] 董瑞林, 张渊, 丘丹圭, 等. 氟硼酸用于污染不锈钢去污的可行性研究[J]. 辐射与防护, 2002, 22(3): 182—187.  
DONG Rui-lin, ZHANG Yuan, QIU Dan-gui, et al. Feasibility Study on Decontamination of the Contaminated Stainless Steel with  $\text{HBF}_4$  Solution[J]. Radiation Protection, 2002, 22(3): 182—187.
- [12] 张鹏, 罗源军, 王兆华, 等. 不锈钢在氟硼酸清洗剂中的腐蚀行为研究[J]. 清洗世界, 2011, 27(12): 1—5.  
ZHANG Peng, LUO Yuan-jun, WANG Zhao-hua, et al. Corrosion Behavior of Stainless Steel in Fluorine Boric Acid Cleaning Agent[J]. Cleaning World, 2011, 27(12): 1—5.
- [13] 张熙, 陈根强. 氟硼酸的水解及其与硅物质的反应速度[J]. 油田化学, 1989, 6(2): 111—114.  
ZHANG Xi, CHEN Gen-qiang. The Hydrolysis Rate of Fluoboric Acid and Its Reaction with Siliceous Substances[J]. Oilfield Chemistry, 1989, 6(2): 111—114.
- [14] IZQUIERDO J, MARTIN-RUIZ L, FERNANDEZ-PEREZ B M. Imaging Local Surface Reactivity on Stainless Steels 304 and 316 in Acid Chloride Solution Using Scanning Electrochemical Microscopy and the Scanning Vibrating Electrode Technique[J]. Electrochimica Acta, 2014, 134(21): 167—175.
- [15] 张欢, 郭忠诚. Ni-W-P-SiC 脉冲复合镀层的腐蚀形貌研究[J]. 腐蚀与防护, 2005, 26(12): 515—517.  
ZHANG Huan, GUO Zhong-cheng. Corrosion Morphology of Ni-W-P-SiC Pulse Composite Coating[J]. Corrosion & Protection, 2005, 26(12): 515—517.
- [16] 王曰义. 金属的典型腐蚀形貌[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 31—37.  
WANG Yue-yi. Typical Corrosion Appearance of Metals [J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(4): 31—37.
- [17] 张玮, 梁成浩. 金属材料表面腐蚀形貌分形特征提取[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(1): 61—64.  
ZHANG Wei, Liang Cheng-hao. Extracting Fractal Characteristics from Corrosion Surface of Metallic Materials[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(1): 61—64.