

# 电化学氧化法再生不锈钢着色老化液的研究

王玥, 满瑞林, 赵鹏飞, 胡俊利

(中南大学 化学化工学院, 长沙 410083)

**[摘要]** 通过循环伏安法测定了 Pb 及 Pb-PbO<sub>2</sub> 电极在 1.0 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 介质中, Cr<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 发生电化学氧化的相关参数, 选择 Pb-PbO<sub>2</sub> 电极为阳极, 采用双室隔膜电解槽进行电化学氧化再生不锈钢着色老化液, 确定了操作工艺条件如下: 阴极支持液为 5% 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液, 阳极电流密度为 5 A/dm<sup>2</sup>。恒电流电解 7.5 h, 三价铬转化率为 25.97%, 电流效率为 68.45%。经过电化学氧化法再生后, 老化液中的 Cr<sup>6+</sup> 即恢复至效用范围, 用于着色不锈钢片能达到与新配制的着色液一致的效果。

**[关键词]** 电化学氧化; 老化液; 循环伏安; 不锈钢着色

**[中图分类号]** TG177

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2012)05-0114-05

## Study on Regeneration of Ageing Liquid for Stainless Steel Coloring by Electrochemical Oxidation

WANG Yue, MAN Rui-lin, ZHAO Peng-fei, HU Jun-li

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**[Abstract]** Electrochemical parameters of Cr<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> on Pb and Pb-PbO<sub>2</sub> electrode in 1.0 mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> were measured by cyclic voltammetry, respectively. Dual-chamber diaphragm cell, with Pb-PbO<sub>2</sub> electrode as the anode, was used to electrochemical oxidation. The optimum conditions of electro-oxidation process were listed as following: 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as cathode liquid, 5 A/dm<sup>2</sup> anode current density, 7.5 h constant current electrolysis. The conversion of Cr<sup>3+</sup> was 25.97%, and current efficiency was 68.45%. After being treated, the content of Cr<sup>6+</sup> in ageing liquid was recovered to the effective range. The effect of colored stainless steels treated in the regenerated liquid was consistent with those treated in freshly prepared coloring liquid.

**[Key words]** electrochemical oxidation; ageing liquid; cyclic voltammetry; stainless steel coloring

彩色不锈钢是不锈钢深加工产品, 具有优良的装饰性、耐腐蚀性和耐磨性能, 市场前景广阔<sup>[1-2]</sup>。INCO 酸性化学着色工艺是目前最常用的着色工艺<sup>[3-4]</sup>, 其着色液的主要成分为铬酐、硫酸等。着色过程中<sup>[5]</sup>, 不锈钢金属 M(Cr, Fe, Ni 等) 在阳极放出电子变成金属离子, 溶液中的六价铬在阴极区接受电子变成三价铬, 当溶液中金属离子的浓度超过一定值, 则水解形成氧化物沉积在不锈钢表面着色。

为控制彩色不锈钢着色质量, 必须控制溶液中六价铬和三价铬的比例在一定范围内<sup>[6-7]</sup>。随着着色的进行, 三价铬浓度会逐渐升高, 六价铬的浓度会逐渐降低, 当超过一定范围, 就会导致着色溶液老化而失效。在一定老化范围内, 不锈钢着色老化液可以通过补加有效成分的办法使着色能力恢复, 但当超过一定程度

时, 溶液中大量累积的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 也会对着色产生影响, 且不容忽视<sup>[8]</sup>。因此, 研究不锈钢着色溶液的再生方法具有非常重要的意义<sup>[9-10]</sup>。

## 1 实验

### 1.1 Pb-PbO<sub>2</sub> 电极的制备

取纯铅板(GB 1470—79, 0.5 mm), 剪成 6.0 cm × 6.7 cm 大小, 用细砂纸打磨去除表面氧化物, 然后置于 5% (全文涉及 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中溶质含量的百分数均为质量分数) 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中作为阴极, 在 0.5 A/dm<sup>2</sup> 的电流下电解 3~5 min, 以进一步去除表面氧化物。之后将其置于 20% 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 电解液中作阳极, 另一纯铅板作阴极, 在 50 °C 和空气搅拌的条件下, 控

**[收稿日期]** 2012-04-01; **[修回日期]** 2012-05-02

**[作者简介]** 王玥(1989—), 女, 甘肃人, 硕士生, 主攻金属表面处理及二次资源回收。

**[通信作者]** 满瑞林(1955—), 湖南人, 教授, 主要研究方向为金属表面处理、环境化工等。

制阳极电流密度  $5 \sim 10 \text{ A/dm}^2$  电解 2 h, 使阳极表面生成一层均匀、连续、厚实的棕黑色  $\text{PbO}_2$  膜层, 即制得  $\text{Pb-PbO}_2$  电极<sup>[11-12]</sup>。

## 1.2 电化学氧化

采用自制双室隔膜电解槽(见图 1), 阳极室内注入 500 mL 模拟不锈钢着色老化液(溶液中  $\text{Cr}^{6+}$  为  $0.8796 \text{ mol/L}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  为  $0.4245 \text{ mol/L}$ ), 阴极支持液使用 500 mL 5% 的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液。用上述自制的  $\text{Pb-PbO}_2$  电极和相同面积的铅板分别作作阳、阴极, 在  $5 \text{ A/dm}^2$  的恒定电流密度下电解一定时间后, 即使得老化液中的一部分  $\text{Cr}^{3+}$  氧化成  $\text{Cr}^{6+}$ , 溶液恢复效用。文中主要讨论电解工艺条件对电解效果的影响, 确定较优的操作工艺, 并在较优工艺下, 对真实的不锈钢着色老化液(实验室自制着色液, 经多次着色不锈钢板后失效)进行电化学氧化。

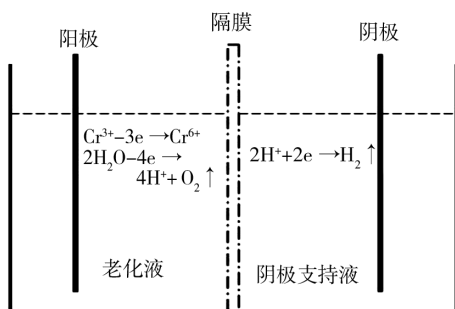


图 1 双室隔膜电解槽

Fig. 1 Dual-chamber diaphragm cell

## 1.3 着色实验

在  $90 \sim 95^\circ\text{C}$  条件下, 用上述电化学氧化再生后的着色液对不锈钢板(牌号为  $0\text{Cr}18\text{Ni}9$ ,  $5 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ )进行着色。同时将电位测量仪的正极接不锈钢片, 负极接饱和甘汞电极(SCE), 测定电位-时间曲线<sup>[13-14]</sup>。记录得到的不锈钢板颜色, 并新配制同浓度的不锈钢着色液, 用其制备彩色不锈钢与再生老化液制备的彩色不锈钢进行比较。

## 1.4 检测及表征

### 1.4.1 电极性能测试

利用 PARSTAT2273 电化学系统测试  $\text{Pb}$  电极、 $\text{Pb-PbO}_2$  电极分别在  $1.0 \text{ mol/L}$  的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中和  $0.25 \text{ mol/L Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 1.0 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$  溶液中的循环伏安曲线。测试采用三电极体系, 工作电极为暴露面积  $1 \text{ cm}^2$  的试样, 辅助电极为铅板, 参比电极为  $\text{Hg/Hg}_2\text{Cl}_2$ (饱和  $\text{KCl}$  溶液)电极<sup>[15]</sup>, 扫描速度为  $10 \text{ mV/s}$ , 扫描范围为  $0 \sim 2.5 \text{ V}$ 。

### 1.4.2 着色老化液成分分析

参照 GB/T 15555.7—1995《固体废物六价铬的测

定 硫酸亚铁铵滴定法》, 测定电解前后阳极液中  $\text{Cr}^{6+}$  及总  $\text{Cr}$  的浓度<sup>[3]</sup>, 计算三价铬转化率及电流效率。

$\text{Cr}^{3+}$  转化率  $r$  的计算式<sup>[16]</sup>为:

$$r = \frac{c_0 - c}{c_0} \quad (1)$$

阳极电流效率( $\eta$ )<sup>[17]</sup>计算式为:

$$\eta = \frac{(c_0 - c)VzF}{JAAt} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $c_0$  为反应前体系中  $\text{Cr}^{3+}$  的初始浓度,  $\text{mol/L}$ ;  $c$  为反应终时体系中  $\text{Cr}^{3+}$  的浓度,  $\text{mol/L}$ ;  $V$  为电解液的体积,  $\text{L}$ ;  $z$  为电极反应式中电子计量系数;  $F$  为法拉第常数;  $J$  为操作电流密度,  $\text{A/m}^2$ ;  $A$  为电极面积,  $\text{m}^2$ ;  $t$  为反应时间,  $\text{s}$ 。

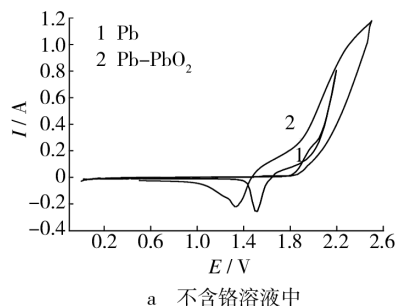
### 1.4.3 着色不锈钢色差表征

采用 HP-200 精密色差仪直接对着色不锈钢表面的着色膜进行色泽和色差分析, 色品坐标以及被测试样与参比样之间的色差值可由仪器直接读出。测量时, 以着色不锈钢板表面中心位置作为标准试样, 任取三个位置测其与标准试样的色差  $\Delta E$ , 再取其平均值。

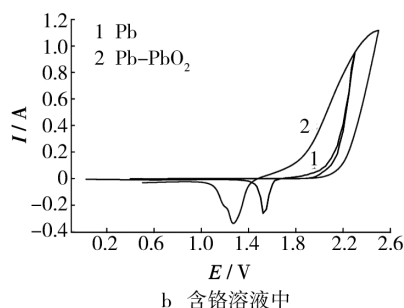
## 2 结果与讨论

### 2.1 阳极的选择

$\text{Pb}$  电极和  $\text{Pb-PbO}_2$  电极的循环伏安曲线如图 2 所示。由图 2a 可以看出, 在  $1.0 \text{ mol/L}$  的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中,  $\text{Pb-PbO}_2$  电极的起始析氧电位比  $\text{Pb}$  电极明显要高, 析氧顺序为  $\text{Pb} < \text{Pb-PbO}_2$ 。由图 2b 可以看出, 在  $0.25 \text{ mol/L Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 1.0 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$  溶液



a 不含铬溶液中



b 含铬溶液中

图 2  $\text{Pb}$  电极及  $\text{Pb-PbO}_2$  电极的循环伏安曲线

Fig. 2 Cyclic voltammety curves of  $\text{Pb}$  and  $\text{Pb-PbO}_2$  electrode

中,Pb-PbO<sub>2</sub> 电极同样具有较高的起始析氧电位和析氧过电位。这表明在 Cr<sup>3+</sup> 电化学氧化的过程中,Pb-PbO<sub>2</sub> 电极能在一定程度上降低析氧副反应的发生,从而提高电化学氧化 Cr<sup>3+</sup> 的电流效率。

表 1 给出了在 5 A/dm<sup>2</sup> 的电流密度下,分别采用 Pb 电极和 Pb-PbO<sub>2</sub> 电极对模拟老化液进行电化学氧化 4 h 的实验结果。由表 1 数据可以看出,Pb-PbO<sub>2</sub> 电极对 Cr<sup>3+</sup> 电化学氧化的效果明显优于 Pb 电极。Pb-PbO<sub>2</sub> 电极的三价铬转化率为 35.27%,电流效率为 67.05%,分别为 Pb 电极的大约 2 倍,这说明在相同条件下,Pb-PbO<sub>2</sub> 电极能显著提高三价铬的转化率以及阳极电流效率。

表 1 模拟老化液的电化学氧化实验结果

Tab.1 Electrochemical oxidation experiment of simulated aging liquid

项目	阳极材料	
	Pb 电极	Pb-PbO <sub>2</sub> 电极
三价铬转化率/%	19.71	35.27
电流效率/%	38.19	67.05

## 2.2 电流密度的确定

阳极电流密度增加对电解效率的影响表现在两方面:一方面,阳极电势随之增加,有利于三价铬向六价铬的转化;另一方面,析氧副反应也加剧,一部分电流消耗在副反应上,从而降低了三价铬氧化的电流效率<sup>[18-19]</sup>。因此,需要确定一个较优的电流密度。电流密度对电解效果的影响(阴极液 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液,电解时间 2 h)见图 3。

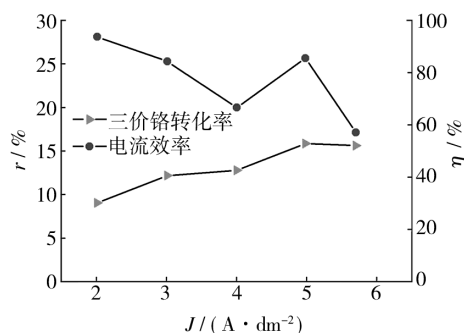


图 3 电流密度对电解效果的影响

Fig. 3 Influence of current density on current efficiency

由图 3 可以看出,当电流密度为 2.0 A/dm<sup>2</sup> 时,电流效率最大,为 93.69%,但此时三价铬转化率只有 9.06%;当电流密度增大时,三价铬转化率逐渐增大,直至基本不变,电流效率呈现不规则的变化,但总体上呈下降趋势。综合考虑,在同时保证较高的三价铬转化率和电流效率的情况下,确定最优的操作电流密度为 5 A/dm<sup>2</sup>。

## 2.3 阴极液浓度的确定

阴极液中的硫酸主要是提供发生阴极反应的 H<sup>+</sup>,其浓度达一定值可以保证电化学过程的进行和维持隔膜两侧渗透压的平衡。阴极液硫酸的浓度对电化学氧化效果的影响(电流密度 5 A/dm<sup>2</sup>,电解时间 2 h)见图 4。

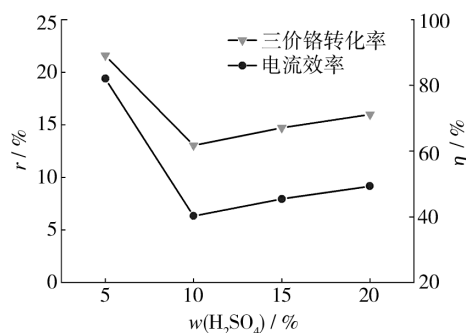


图 4 阴极液浓度对电解效果的影响

Fig. 4 Influence of cathode concentration on current efficiency

从图 4 中可以看出,当阴极液中 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量分数为 5% 时,三价铬转化率和电流效率均最大。阴极液浓度增大,三价铬转化率和电流效率均下降至一个最低点。当阴极液浓度继续增大,三价铬转化率和电流效率基本变化不大。因此,阴极液中 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 质量分数以 5% 为宜。

## 2.4 电解时间的确定

实验中,固定其他因素不变(阴极液为 5% 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液,电流密度 5 A/dm<sup>2</sup>),比较不同电解时间下的三价铬转化率和电流效率,研究电解时间对老化液电化学氧化效果的影响规律,结果如图 5 所示。

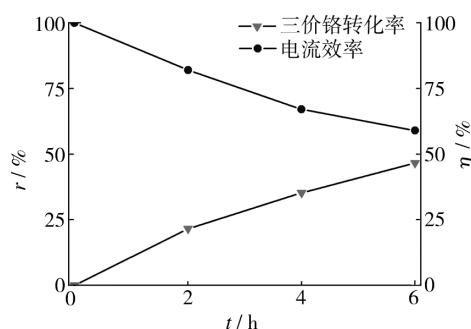


图 5 电解时间对电解效果的影响

Fig. 5 Influence of electrolysis time on current efficiency

实验发现,随着电解时间的延长,三价铬转化率逐渐升高,但是电流效率随之降低。在实际应用中,三价铬转化率往往是最重要的指标,而提高电流效率可以通过优化其他的工艺条件来实现,因此在应用电化学氧化方法再生真实的老化液时,要根据六价铬恢复至效用范围所对应的转化率来确定电解时间。

### 3 老化液的电化学氧化再生

#### 3.1 老化液的电解

在较优工艺条件下,即双室隔膜电解槽中,阳极为 Pb-PbO<sub>2</sub> 电极,阴极支持液为 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液,阳极电流密度 5 A/dm<sup>2</sup>,恒电流电解,对真实老化液(Cr<sup>6+</sup> 1.3903 mol/L, Cr<sup>3+</sup> 1.0070 mol/L)进行电化学氧化。每间隔 1.5 h 在阳极室取样一次,测定阳极液中的六价铬及三价铬浓度,计算三价铬转化率及电流效率,结果如图 6 所示。

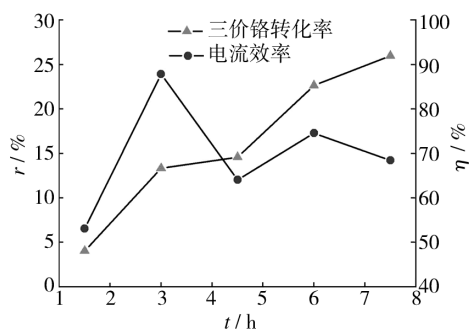


图 6 老化液电解实验结果

Fig. 6 Electrolysis test result of aging liquid

实验发现,随着电解时间的延长,三价铬转化率逐渐增大,电流效率则呈现先升高后降低的趋势。当电解时间为 7.5 h 时,阳极液中 Cr<sup>6+</sup> 浓度升高至 1.6518 mol/L, Cr<sup>3+</sup> 降低至 0.7455 mol/L,溶液浓度已恢复至效用范围,老化液再生为可继续使用的不锈钢着色液。此时,三价铬转化率为 25.97%,电流效率为 68.45%。

取电解前后的阳极液和电解后的阴极液,分别对其中主要元素(Cr, Fe, Ni, Mn)的含量进行分析,结果列于表 2 中。

表 2 阴阳极液主要元素的含量分析

Tab. 2 Content analysis of main elements  
in anode and cathode liquid

名称	稀释 倍数	含量/(mg · L <sup>-1</sup> )			
		Cr	Fe	Ni	Mn
电解后阴极液	100	1.436		0.111	0.008
电解前阳极液	10 000	12.430	0.086	0.197	0.396
电解后阳极液	10 000	12.420	0.086	0.196	0.395

由表 2 可以看出,电解前阳极液中各元素的含量与电解后阳极液和阴极液中元素的总含量是守恒的。在电解过程中,阳极液中的少量 Cr, Ni 和 Mn 扩散到阴极液中,这对阳极着色液的影响微乎其微,因此,即使电解时间很长,老化液中的离子也只损失很少一部分,对其再生后用于着色也基本没有影响或者影响很小。

#### 3.2 再生老化液着色实验

用电化学氧化 7.5 h 后的再生老化液对不锈钢进行着色,并与新配制的同浓度不锈钢着色液(Cr<sup>6+</sup> 为 1.6518 mol/L, Cr<sup>3+</sup> 为 0.7455 mol/L)进行比较,验证其着色效果。

再生后的着色液和新配制着色液在着色过程(温度 90~95 °C, 磁力搅拌)中的电位-时间曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出,在初始阶段,再生老化液的电位-时间曲线与新液有较大差别,具体表现为再生老化液的起始电位较高,这说明二者的溶液状态并非完全一致,可以解释为在电化学氧化过程中,还有其它离子发生了反应。着色 3 min 以后,二者的电位-时间曲线基本一致,且具有一致的起始着色点(C 点)<sup>[20]</sup>,再生老化液对应的起始着色点电位值为 1077 mV,新液为 1075 mV。在 C 点之后,二者的电位值在同一时间达到最高点,随后下降并趋于稳定。

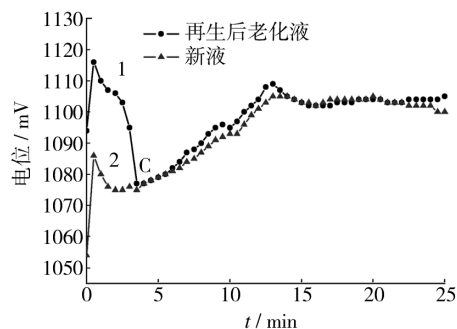


图 7 电位-时间曲线

Fig. 7 Potential-time curve

观察电位-时间曲线发现,起始着色点之后的任一时间,二者的瞬时电位值与起始着色点的差值,即电位差是基本一致的,这表明再生后的着色液与新液可以用相同的电位控制方法来控制着色的终点,也说明了电化学氧化再生不对终点控制产生不利影响。

两种溶液中不锈钢板表面的色膜颜色也呈现一致的变化,随着着色时间延长,依次出现棕、蓝、金黄、玫瑰红、绿、紫罗兰等颜色。颜色与时间及电位差的对应关系如表 3 所示。

表 3 彩色不锈钢表面的颜色与着色时间和电位差的关系

Tab. 2 Variations of colored stainless steel with  
coloring time and potential difference

序号	着色时间 /min	电位差 $E_z$ /mV	不锈钢颜色
1	9	15~16	棕
2	10	18	蓝
3	11	21~23	金黄
4	13	30	玫瑰红
5	15	28	绿
6	19	26~27	紫罗兰



以上讨论表明,再生老化液与新配制着色液的着色效果一致,同时色差仪分析结果显示,在相同的颜色下,着色膜的色差基本一致,不同颜色的色膜,色差稍有变化,且棕色、蓝色、金黄色的着色膜色差较小,玫瑰红色、绿色、紫罗兰色的着色膜色差较大,但均小于0.7<sup>[21]</sup>,表明着色的不锈钢板色差合格。

再生后的老化液使用一段时间后会再次老化的现象,笔者在实验过程中发现,再生老化液和新液的老化基本上是同步的。电化学氧化再生不锈钢着色老化液将在生产中得到广泛的应用,实际操作时,可在着色液老化之前,定期采用电化学氧化法再生,使得着色液一直保持高效的着色能力。

## 4 结论

采用电化学氧化的方法,可以实现不锈钢着色老化液的再生利用。对电化学氧化工艺过程进行研究,得出以下结论。

1) 对于  $\text{Cr}^{3+}$  的电化学氧化,  $\text{Pb-PbO}_2$  阳极能有效降低析氧副反应的发生,具有比  $\text{Pb}$  阳极更优的电催化活性和电化学稳定性。在  $5 \text{ A/dm}^2$  电流密度下电解模拟老化液的实验结果说明,  $\text{Pb-PbO}_2$  电极的三价铬转化率和电流效率分别约为  $\text{Pb}$  电极的 2 倍。

2) 真实老化液电化学氧化再生的工艺条件如下: 阴极支持液为 5% 的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液,恒电流电解,电流密度为  $5 \text{ A/dm}^2$ 。电解 7.5 h,老化液即再生为可继续使用的不锈钢着色液,此时三价铬转化率为 25.97%,电流效率为 68.45%。

3) 用再生老化液对不锈钢板进行着色,其电位-时间曲线与新配制的着色液在起始着色点后基本一致,不锈钢板表面的色膜颜色也呈现一致的变化。

## [参 考 文 献]

- [1] 巴巴科夫 A A. 不锈钢及其耐腐蚀性[M]. 殷勤译. 北京: 中国工业出版社, 1963.
- [2] TAKAHARI T, OHTSUKA S. Development of Continuous Coloring Method for Stainless Steels[J]. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 1989, 75(6): 918—925.
- [3] 陈天玉. 不锈钢表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [4] 李光武, 张忠诚, 郑淑娟. 不锈钢表面着色工艺研究[J]. 表面技术, 2004, 33(5): 37—39.
- [5] 张述林, 王晓波, 陈世波. 不锈钢着色的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2007, 29(1): 36—39.
- [6] EVANS T E, HART A C, SKEDELL A N. Nature of the Film on Colored Stainless Steel[J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 1973, 51(3): 108—112.
- [7] 张颖, 陶珍东, 马艳芳, 等. 不锈钢着色研究[J]. 腐蚀与防护, 1998, 19(4): 175—177.
- [8] 王海人, 李文维, 屈钧娥, 等.  $\text{Cr}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  的不锈钢着色液老化进程的协同影响[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 29—32.
- [9] 汤芝平, 薛永强, 程作慧, 等.  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$  对不锈钢着色的影响[J]. 材料保护, 2008, 41(9): 24—29.
- [10] 薛永强, 汤芝平, 栾春晖, 等. 不锈钢化学着色老化液的处理方法: 中国, CN 101054666[P]. 2009-06-10.
- [11] 王留成, 徐海升, 赵建宏, 等.  $\text{PbO}_2$  阳极在硫酸铬电解氧化制备重铬酸时的电极行为[J]. 应用化学, 2003, 20(5): 483—486.
- [12] 汤芝平. 循环法制备彩色不锈钢[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- [13] 张红, 王金玉, 戴长松. 不锈钢着色的工艺研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1990(4): 87—94.
- [14] 陈元鼎, 李嘉第, 彭滨, 等. 化学着色过程中彩色不锈钢电位的测定[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 1996, 10(1): 13—15.
- [15] 李克昌, 张恒彬, 曹学静, 等. 不同电极材料和不同金属离子添加剂对  $\text{Cr}^{3+}$  电氧化的影响[J]. 高等学校化学学报, 2004, 25(8): 1533—1536.
- [16] 谢永超, 鲁战光, 杨晓燕, 等.  $\text{Cr}^{3+}$  在  $\text{Pb/PbO}_2$  电极上的电化学氧化[J]. 青岛科技大学学报, 2004, 25(2): 107—111.
- [17] 王雅琼, 陈昌平, 童宏扬, 等.  $\text{Ti/SnO}_2 + \text{Sb}_2\text{O}_3/\text{PbO}_2$  电极在硫酸溶液中  $\text{Cr}^{3+}$  氧化的电化学性能[J]. 过程工程学报, 2003, 3(2): 125—129.
- [18] 王家荣, 郑文刚, 陈新志. 硫酸铬阳极电解氧化过程的研究[J]. 化学世界, 1999(4): 457—460.
- [19] 王雅琼, 周涛林, 许文林. 电解条件对  $\text{Cr}^{3+}$  电化学氧化过程瞬时电流效率的影响研究[J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(6): 824—828.
- [20] 金光, 张学萍, 毕监智. 不锈钢着色工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2004, 26(6): 23—26.
- [21] 温力, 杨军华. 舱内装饰性面板涂层的色差控制[J]. 现代涂料与涂装, 2006(5): 43—44.