

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.01.004

# 电厂冷却水管化学镀 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层及其防垢耐蚀性能

李鹏飞<sup>1\*</sup>, 颜武岳<sup>2</sup>

(1. 内蒙古机电职业技术学院, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 浦湘生物能源股份有限公司, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** 在电厂冷却水管常用的 20# 钢表面化学镀 Ni-Co-P 镀层, 并以沉积速率作为指标, 通过单因素实验得到化学镀 Ni-Co-P 镀层较优的溶液成分和工艺条件。在此基础上, 通过向溶液中添加 PTFE 制备出 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层, 进一步研究了 PTFE 浓度对 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层防垢耐蚀性能的影响。结果表明, 随着 PTFE 浓度增加, Ni-Co-P/PTFE 复合镀层的生垢速率和平均腐蚀速率都呈先减小后增大的趋势, 与 PTFE 质量分数先升高后下降有关联性。PTFE 浓度为 25 mL/L 时, Ni-Co-P/PTFE 复合镀层的生垢速率和平均腐蚀速率均最小, 依次为  $1.66 \times 10^{-2}$  g/(m<sup>2</sup>·h) 和  $1.85 \times 10^{-5}$  g/(cm<sup>2</sup>·h)。该复合镀层经 24 h 生垢实验后表面的污垢呈稀疏分布, 覆盖面积小, 经 84 h 浸泡实验后表面的蚀坑相对较小, 表现出较好的防垢耐蚀性能。

**关键词:** Ni-Co-P/PTFE 复合镀层; 化学镀; 防垢性能; 生垢速率; 耐蚀性能; 平均腐蚀速率

中图分类号: TQ153.2

文献标识码: A

## Electroless Plating of Ni-Co-P/PTFE Composite Coating on Power Plant Cooling Water Pipe and Its Anti-fouling Performance and Corrosion Resistance

LI Pengfei<sup>1\*</sup>, YAN Wuyue<sup>2</sup>

(1. Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Hohhot 010070, China; 2. Puxiang Bioenergy Co., Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:** Ni-Co-P coating was prepared by electroless plating on the surface of 20# steel commonly used in power plant cooling water pipes. The deposition rate was taken as the index, and the optimal solution component and process conditions for electroless plating of Ni-Co-P coating were obtained by single factor experiment. On this basis, Ni-Co-P/PTFE composite coating was prepared by adding PTFE in the solution and the influence of PTFE concentration on the anti-fouling performance and corrosion resistance of Ni-Co-P/PTFE composite coating was further studied. The results showed that with the increase of PTFE concentration, the fouling rate and average corrosion rate of Ni-Co-P/PTFE composite coating both decreased first and then increased, which was related to the variation tendency of the mass fraction

收稿日期: 2020-08-07

修回日期: 2020-08-30

通信作者: 李鹏飞, email: teacher\_li801@163.com

基金项目: 内蒙古自治区教育厅项目(NJZY18273)

of PTFE. When PTFE concentration was 25 mL/L, the Ni-Co-P/PTFE composite coating with the minimum fouling rate and average corrosion rate, which was  $1.66 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  and  $1.85 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$  respectively. The fouling on surface of the composite coating was sparse and the coverage area was small after 24 hours of scaling experiment, and the erosion pits on surface of the composite coating was relatively small after 84 h immersion experiment, showing better anti-fouling and corrosion resistance performance.

**Keywords:** Ni-Co-P/PTFE composite coating; electroless plating; anti-fouling performance; fouling rate; corrosion resistance; average corrosion rate

电厂冷却水管生垢的问题受到越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>。污垢沉积在冷却水管表面会造成锈蚀,降低冷却效率的同时也将缩短冷却水管的使用寿命<sup>[3-6]</sup>。为此,减缓污垢沉积具有重要意义,已成为防止冷却水管锈蚀同时保证冷却效率的关键。研究发现,材料的表面特性对污垢沉积有很大影响,通过降低表面能可以减缓污垢沉积。近年来,低表面能涂层因表现出较好的防垢耐蚀性能,引起越来越多研究者的关注,相继研究了 Ni-P 镀层、Ni-W-P 镀层、Ni-Cu-P 镀层、Ni-Sn-P 镀层等镍基二元和多元合金镀层的防垢耐蚀性能<sup>[7-10]</sup>。但是关于镍基多元合金复合镀层的防垢耐蚀性能,目前研究较少。鉴于此种情况,有必要继续开展这方面的研究,目的是获得具有更好防垢耐蚀性能的镍基多元合金复合镀层,并推动该镀层在更多的行业中应用。

为了便于实验研究和分析,笔者采用电厂冷却水管常用的 20# 钢片作基体,首先在钢片表面化学镀 Ni-Co-P 镀层,然后在优化的溶液配方和工艺条件的基础上,通过向溶液中添加 PTFE 制备出 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层,并进一步研究 PTFE 浓度对 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层防垢耐蚀性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验方法

20# 钢片依次经除锈、除油、酸洗和水洗处理后,浸入表 1 所示的溶液中化学镀 Ni-Co-P 镀层。溶液温度控制在 75~95 ℃,温度波动幅度不超过 0.5 ℃,pH 值为 8.0~10.0,施镀时间为 1 h。

以 Ni-Co-P 镀层的沉积速率作为指标,通过单因素实验对沉积速率影响较大的因素进行优化,得到较优的溶液配方和工艺条件。镀后的钢片依次经清洗、干燥处理,紧接着使用相关的仪器和方法进行测试。

表 1 化学镀 Ni-Co-P 镀层的溶液成分

Tab.1 Solution component for electroless plating of Ni-Co-P coating

溶液成分	质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
硫酸镍	18
硫酸钴	15
次磷酸钠	10~26
柠檬酸钠	45~65
丁二酸	3~18
硫酸铵	65

### 1.2 测试方法

#### 1.2.1 Ni-Co-P 镀层的沉积速率

使用 GL124i-1SCN 型精密电子天平称重,根据公式(1)计算得到 Ni-Co-P 镀层的沉积速率。

$$v = \frac{m}{\rho S t} \times 10^4 \quad (1)$$

式中: $v$  为沉积速率,  $\mu\text{m}/\text{h}$ ;  $m$  为 Ni-Co-P 镀层的质量,  $\text{g}$ ;  $\rho$  为 Ni-Co-P 镀层的密度,取  $7.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ ;  $S$  为钢片表面积,  $\text{cm}^2$ ;  $t$  为施镀时间,  $\text{h}$ 。

#### 1.2.2 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层的防垢性能

以生垢速率(根据公式(2)计算得到)作为评价 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层防垢性能的指标。在由氯化钙、氯化镁、氯化钠和碳酸氢钠配制而成的模拟硬水中进行生垢实验,硬水温度为 25 ℃保持不变,实验周期为 24 h。

$$D = \frac{m_1 - m_2}{S \cdot h} \quad (2)$$

式中: $D$  为生垢速率,  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $m_1$ 、 $m_2$  分别为镀后生垢的钢片质量、镀后未生垢的钢片质量,  $\text{g}$ ;  $S$  为钢片表面积,  $\text{m}^2$ ;  $h$  为模拟生垢实验周期,  $\text{h}$ 。

#### 1.2.3 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层的表面形貌

使用 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜观察未生垢及生垢的 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层表面形貌。

### 1.2.4 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层的耐蚀性能

在 3.5% 氯化钠溶液中进行浸泡实验,溶液温度为 25 ℃ 保持不变,实验周期为 84 h。以平均腐蚀速率(根据公式(3)计算得到)作为评价 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层耐蚀性能的指标。

$$v = \frac{m}{At} \quad (3)$$

式中: $v$  为平均腐蚀速率,  $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ ;  $m$  为 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层的质量,  $\text{g}$ ;  $A$  为 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层的表面积,  $\text{cm}^2$ ;  $t$  为浸泡时间,  $\text{h}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Ni-Co-P 镀层沉积速率的影响因素优化

#### 2.1.1 次磷酸钠质量浓度对沉积速率的影响

柠檬酸钠质量浓度为 45 g/L、丁二酸质量浓度为 12 g/L、温度为 90 ℃、pH 值为 9.0 时,不同次磷酸钠质量浓度下 Ni-Co-P 镀层的沉积速率如图 1 所示。从图 1 中看出,次磷酸钠质量浓度为 10 g/L 时,沉积速率较小,约为 7.19  $\mu\text{m}/\text{h}$ 。随着次磷酸钠质量浓度从 10 g/L 增加到 22 g/L,沉积速率呈明显增大的趋势,最大值达到 10.16  $\mu\text{m}/\text{h}$ 。在化学镀溶液体系中,次磷酸钠用作还原剂,其作用是将镍离子还原成金属镍。根据氧化还原反应基本原理可知,溶液中次磷酸根离子质量浓度的增加可以提高还原反应电位,进而促进化学镀反应进行<sup>[11]</sup>。

但当次磷酸钠质量浓度超过一定限度,容易造成浓差极化使还原反应电位降低,抑制后续的化学镀反应,从而表现出沉积速率达到最大值后转而呈减小的趋势。综合分析,次磷酸钠质量浓度为 22 g/L 最佳。

#### 2.1.2 柠檬酸钠质量浓度对沉积速率的影响

次磷酸钠质量浓度为 22 g/L、丁二酸质量浓度为 12 g/L、温度为 90 ℃、pH 值为 9.0 时,不同柠檬酸钠质量浓度下 Ni-Co-P 镀层的沉积速率如图 2 所示。从图 2 中看出,柠檬酸钠质量浓度为 45 g/L 时,沉积速率达到 10.16  $\mu\text{m}/\text{h}$ 。随着柠檬酸钠质量浓度从 45 g/L 增加至 65 g/L,沉积速率呈减小的趋势,相应地从 10.16  $\mu\text{m}/\text{h}$  减小到 7.8  $\mu\text{m}/\text{h}$ 。

在碱性化学镀溶液体系中,柠檬酸钠用作络合剂。理论上,柠檬酸钠质量浓度较低时,与金属离子的络合能力弱,溶液中游离金属离子的质量浓度较高,因此沉积速率较大。随着柠檬酸钠质量浓度

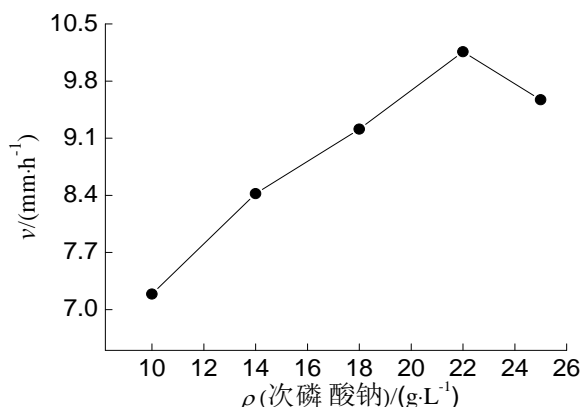


图1 不同次磷酸钠质量浓度下 Ni-Co-P 镀层沉积速率  
Fig.1 Deposition rate of Ni-Co-P coating with different mass concentration of sodium hypophosphite

增加,柠檬酸钠与金属离子的络合能力增强,使得溶液中游离金属离子的质量浓度降低,沉积速率随之减小<sup>[12]</sup>。综合分析,柠檬酸钠质量浓度为 45 g/L 最佳。

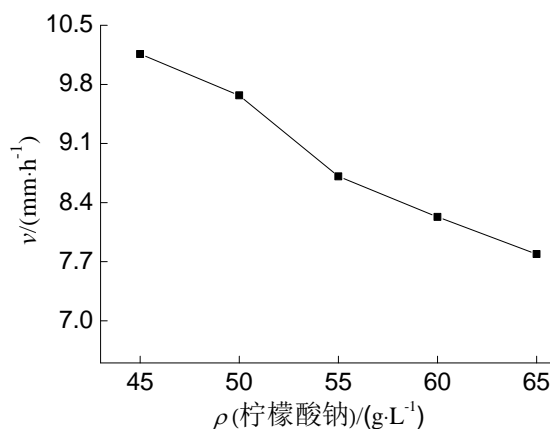


图2 不同柠檬酸钠质量浓度下 Ni-Co-P 镀层沉积速率  
Fig.2 Deposition rate of Ni-Co-P coating with different mass concentration of sodium citrate

#### 2.1.3 丁二酸质量浓度对沉积速率的影响

次磷酸钠质量浓度为 22 g/L、柠檬酸钠质量浓度为 45 g/L、温度为 90 ℃、pH 值为 9.0 时,不同丁二酸质量浓度下 Ni-Co-P 镀层的沉积速率如图 3 所示。从图 3 中看出,丁二酸质量浓度为 3 g/L 时,沉积速率约为 8.64  $\mu\text{m}/\text{h}$ 。随着丁二酸质量浓度从 3 g/L 增加到 12 g/L,沉积速率呈明显增大的趋势,最大值达到 10.16  $\mu\text{m}/\text{h}$ 。

在化学镀溶液体系中,丁二酸既可以用作络合剂,也可以用作加速剂。当丁二酸质量浓度在一定

的范围内有利于次磷酸根离子脱氢,使镍离子的还原加快,进而促进化学镀反应进行。但随着丁二酸质量浓度从12 g/L继续增加到18 g/L,沉积速率转而呈减小的趋势。这表明当丁二酸质量浓度超过一定限度会抑制化学镀反应进行。综合分析,丁二酸质量浓度为12 g/L最佳。

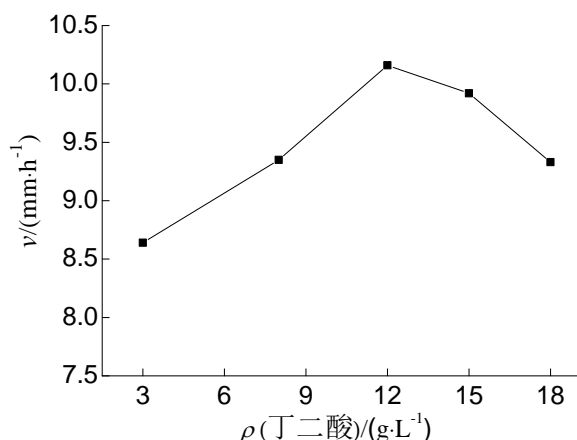


图3 不同丁二酸质量浓度下Ni-Co-P镀层的沉积速率

Fig.3 Deposition rate of Ni-Co-P coating with different mass concentration of succinic acid

#### 2.1.4 温度对沉积速率的影响

次磷酸钠质量浓度为22 g/L、柠檬酸钠质量浓度为45 g/L、丁二酸质量浓度为12 g/L、pH值为9.0时,不同温度下Ni-Co-P镀层的沉积速率如图4所示。从图4中看出,随着温度从75 ℃升高到95 ℃,沉积速率呈明显增大的趋势,相应地从7.42 μm/h增大到约11 μm/h。这表明温度升高可以促进化学镀反应进行,其原因是温度升高为氧化还原反应提供了足够的能量,使镍离子的还原加快。但化学镀溶液体系是一个热力学不稳定体系,为了保证溶液的稳定性以延长使用周期,溶液温度不宜太高,以85~90 ℃最合适。

#### 2.1.5 pH值对沉积速率的影响

次磷酸钠质量浓度为22 g/L、柠檬酸钠质量浓度为45 g/L、丁二酸质量浓度为12 g/L、温度为90 ℃时,不同pH值下Ni-Co-P镀层的沉积速率如图5所示。从图5中看出,随着pH值从8.0升高到10.0,沉积速率呈明显增大的趋势。根据Ni-Co-P镀层沉积原理,随着pH值升高,次磷酸根离子更容易发生催化脱氢反应,可以在一定程度上促进金属离子的还原。另外,pH值升高会改变金属离子络合形式,提

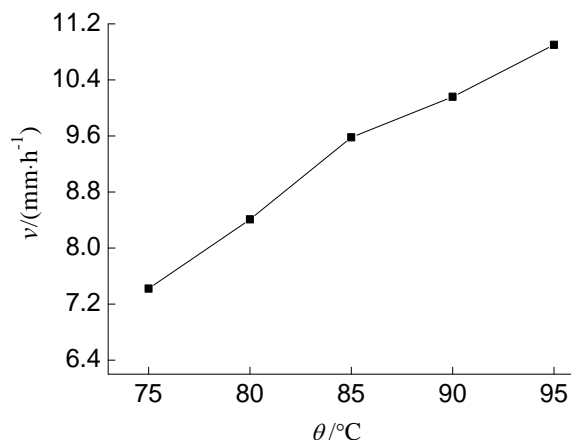


图4 不同温度下Ni-Co-P镀层的沉积速率

Fig.4 Deposition rate of Ni-Co-P coating at different temperature

高了金属离子的还原能力,进而使沉积速率增大。

但为了保证溶液的稳定性以延长使用周期,pH值不宜太高,否则容易引发溶液自发分解,势必抑制化学镀反应进行。综合分析,pH值为9.0~9.5最佳。

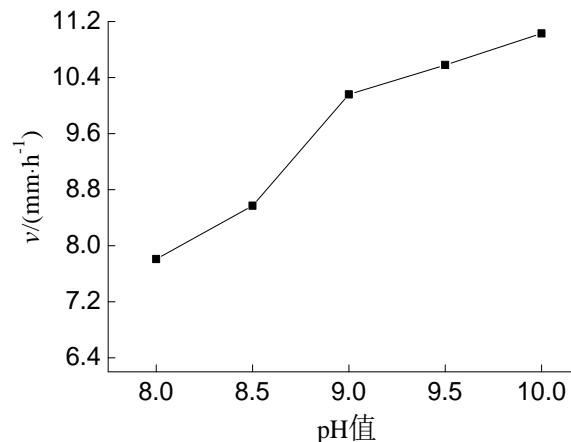


图5 不同pH值下Ni-Co-P镀层的沉积速率

Fig.5 Deposition rate of Ni-Co-P coating at different pH value

## 2.2 Ni-Co-P/PTFE复合镀层的制备

综合以上分析,较优的溶液组成和工艺条件为:硫酸镍18 g/L、硫酸钴15 g/L、次磷酸钠22 g/L、柠檬酸钠45 g/L、丁二酸12 g/L、硫酸铵65 g/L,温度90 ℃、pH值9.0、施镀时间1 h。通过向溶液中加入不同浓度的PTFE和适量表面活性剂,制备出六种Ni-Co-P/PTFE复合镀层,依次命名为复合镀层A、复



合镀层B、复合镀层C、复合镀层D、复合镀层E以及复合镀层F。

图6为PTFE浓度对Ni-Co-P/PTFE复合镀层中PTFE质量分数的影响。从图6中看出,随着PTFE浓度从8 mL/L增加到25 mL/L,PTFE质量分数呈升高的趋势,例如,复合镀层A中PTFE质量分数约为1.81%,而复合镀层D中PTFE质量分数达到3.28%。其原因是PTFE浓度增加使镀液中处于分散状态的PTFE增多,单位时间内越来越多的PTFE被俘获进入Ni-Co-P镀层中。但当PTFE浓度超过25 mL/L后,PTFE质量分数转而呈下降的趋势。其原因是PTFE浓度过高导致溶液粘稠,阻碍了镍离子和次磷酸根离子扩散,从而使通过共沉积进入Ni-Co-P镀层中PTFE减少,所以复合镀层中PTFE质量分数下降。

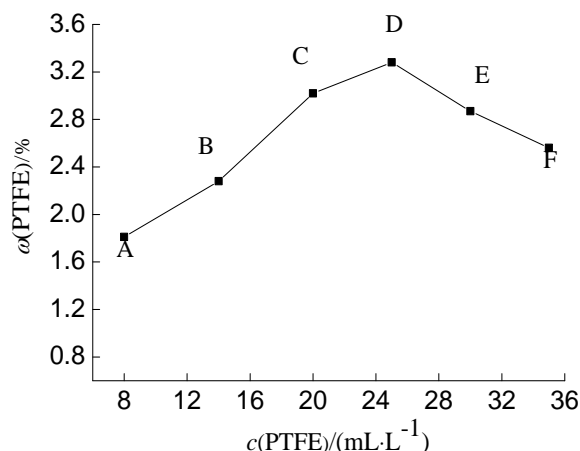


图6 PTFE浓度对Ni-Co-P/PTFE复合镀层中PTFE质量分数的影响

Fig.6 Effect of PTFE concentration on mass fraction of PTFE in Ni-Co-P/PTFE composite coating

### 2.3 Ni-Co-P/PTFE复合镀层的防垢性能

图7为PTFE质量分数与Ni-Co-P/PTFE复合镀层生垢速率的关系。从图7中看出,随着PTFE质量分数从1.81%升高到3.28%,生垢速率呈明显减小的趋势,例如:复合镀层A的生垢速率为 $4.05 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,而复合镀层D的生垢速率仅为 $1.66 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。其原因是PTFE具有化学惰性和很低的表面能<sup>[13]</sup>,Ni-Co-P/PTFE复合镀层中PTFE质量分数越高,其表面能必然越低,可以有效阻止了污垢在复合镀层表面附着沉积,从而使生垢速率减

小,增强了Ni-Co-P/PTFE复合镀层的防垢性能。

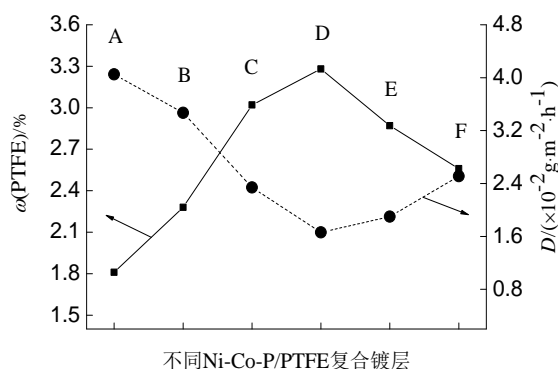


图7 PTFE质量分数与Ni-Co-P/PTFE复合镀层生垢速率的关系

Fig.7 Relationship between the mass fraction of PTFE and fouling rate of Ni-Co-P/PTFE composite coating

图8为未生垢及生垢后的复合镀层表面形貌。从图8(a)和图8(c)中看出,未生垢的复合镀层A、复合镀层D表面除了胞状凸起物外,其它区域较为平整光滑。从图8(b)和图8(d)中看出,生垢的复合镀层A表面的污垢呈集中分布,覆盖面积较大,而生垢的复合镀层D表面的污垢呈稀疏分布,覆盖面积小。污垢覆盖面积可以反映复合镀层的防垢性能,通常情况下,污垢覆盖面积越小意味着复合镀层的防垢性能越强。图7与图8的结果相吻合,表明复合镀层D的防垢性能强于复合镀层A。

### 2.4 Ni-Co-P/PTFE复合镀层的耐蚀性能

图9为PTFE质量分数与Ni-Co-P/PTFE复合镀层平均腐蚀速率的关系。从图9中看出,随着PTFE质量分数从1.81%升高到3.28%,平均腐蚀速率呈先减小后增大的趋势。PTFE具有优良的耐蚀性能,被包裹在复合镀层中可以阻挡氯化钠溶液向复合镀层内部渗透,从而起到减缓腐蚀的作用。PTFE质量分数升高可以使PTFE在复合镀层中弥散分布,从而有效阻挡氯化钠溶液的渗透,因此复合镀层平均腐蚀速率呈减小的趋势。相反,PTFE质量分数降低会导致PTFE在复合镀层中分布稀疏,对氯化钠溶液的阻挡作用减弱,因此复合镀层平均腐蚀速率呈增大的趋势。

图10为复合镀层A和D浸泡实验前后的表面形貌。从图10(a)和图10(c)中看出,浸泡实验前,复合镀层A和D表面除了胞状凸起物外,其它区域较为平整光滑。从图10(b)和图10(d)中看出,浸

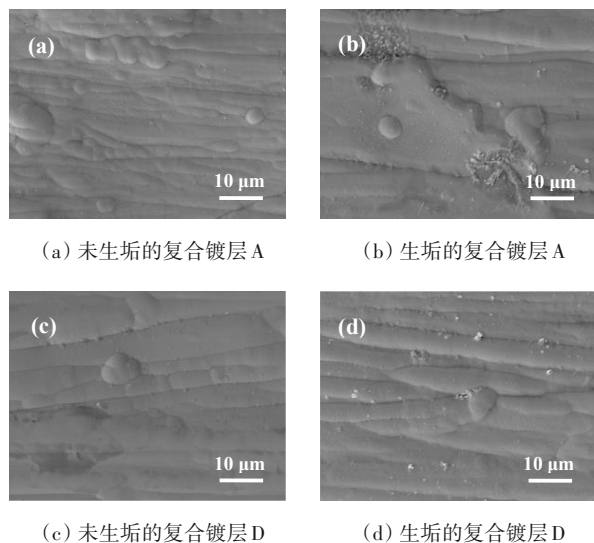


图 8 未生垢及生垢的复合镀层表面形貌

Fig.8 Surface morphology of the composite coating without and with fouling

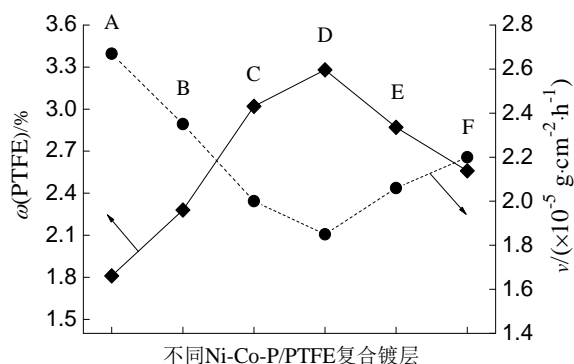


图 9 PTFE 质量分数与 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层平均腐蚀速率的关系

Fig.9 Relationship between the mass fraction of PTFE and average corrosion rate of Ni-Co-P /PTFE composite coating

泡实验后,复合镀层 A 和 D 表面都有随机分布的蚀坑,前者的蚀坑数量较多且尺寸较大,后者的蚀坑相对较小。分析认为,蚀坑形成是由于氯离子渗透造成的点蚀行为。复合镀层 D 中 PTFE 质量分数较高,弥散分布的 PTFE 能有效阻挡氯离子渗透,因此形成的蚀坑相对较小。这与图 9 相吻合,表明复合镀层 D 的耐蚀性能强于复合镀层 A。

综合以上分析可以看出,PTFE 浓度对 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层的防垢耐蚀性能有较大影响,PTFE 浓度增加与复合镀层中 PTFE 质量分数先升高后下

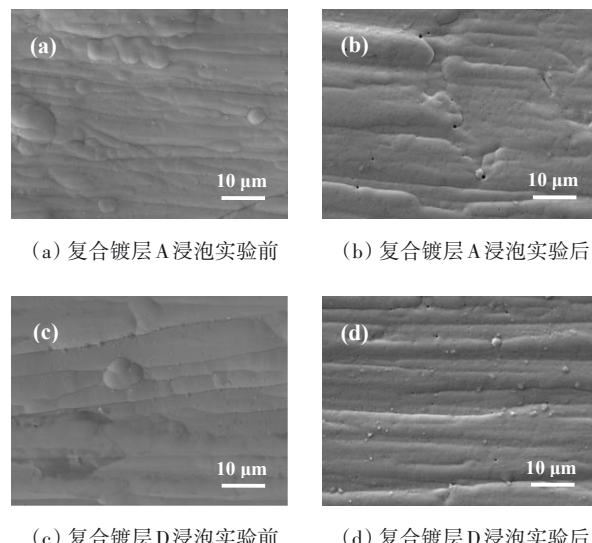


图 10 不同复合镀层浸泡实验前后的表面形貌

Fig.10 Surface morphology of different composite coating before and after immersion experiment

降有关联性,反映出复合镀层的防垢耐蚀性能先逐渐增强后有所下降。PTFE 浓度为 25 mL/L 时, Ni-Co-P/PTFE 复合镀层表现出较好的防垢耐蚀性能。

### 3 结论

(1)通过单因素实验得到在电厂冷却水管常用的 20#钢表面化学镀 Ni-Co-P 镀层较优的溶液成分和工艺条件为:硫酸镍 18 g/L、硫酸钴 15 g/L、次磷酸钠 22 g/L、柠檬酸钠 45 g/L、丁二酸 12 g/L、硫酸铵 65 g/L,温度 90 ℃、pH 值 9.0、施镀时间 1 h。在此基础上,通过向溶液中添加 PTFE 制备出 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层。

(2)PTFE 浓度对 Ni-Co-P/PTFE 复合镀层的防垢耐蚀性能有较大影响。PTFE 浓度增加伴随着生垢速率先减小后增大,与 PTFE 质量分数先升高后下降有关联性,反映出复合镀层的防垢耐蚀性能先逐渐增强后有所下降。

(3)PTFE 浓度为 25 mL/L 时, Ni-Co-P/PTFE 复合镀层的生垢速率和平均腐蚀速率均最小,依次为  $1.66 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $1.85 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ ,该复合镀层表现出较好的防垢耐蚀性能。

### 参考文献

[1] 徐萌. 火电厂凝汽器冷却水管结垢的危害及机器人清

- 洗技术应用[J]. 低碳世界, 2016(30): 61-62.
- Xu M. The harm of scaling of condenser Cooling water pipe in thermal power plant and the application of robot cleaning technology[J]. Low-Carbon World, 2016(30): 61-62 (in Chinese).
- [2] Bosire G O, Ngila J C, Mbugua J M, et al. Predictive complexation models of the impact of natural organic matter and cations on scaling in cooling water pipes: a case study of power generation plants in south africa[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2014(76-78): 35-41.
- [3] 黄元平, 武霖, 徐志明. 电厂换热设备微生物污垢沉积与腐蚀实验[J]. 热力发电, 2015, 44(6): 111-116.
- Huang Y P, Wu L, Xu Z M. Experimental study of microbial fouling and corrosion on heat exchangers surface in power plants[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(6): 111-116 (in Chinese).
- [4] 杨烨, 何骁. LNG工厂停产状态下循环冷却水腐蚀性研究[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(1): 102-106.
- Yang Y, He X. Study on the corrosivity of the recirculating cooling water during shutdown in LNG plant[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2016, 45(1): 102-106 (in Chinese).
- [5] Chidambaram S. Localized pitting corrosion of API 5L grade a pipe used in industrial fire water piping applications[J]. Engineering Failure Analysis, 2018(92): 405-417.
- [6] Huang X N, Pieper K J, Cooper H K, et al. Corrosion of upstream metal plumbing components impact downstream pipe surface deposits and degradation[J]. Chemosphere, 2019(236): 124-139.
- [7] 赵中华, 邢晓凯, 周恒, 等. 表面特性对污垢结垢行为影响研究综述[J]. 石油化工高等学校学报, 2018, 31(2): 89-95.
- Zhao Z H, Xing X K, Zhou H, et al. Review of the effect of surface characteristics on fouling behavior[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2018, 31(2): 89-95 (in Chinese).
- [8] Ren L, Cheng Y H, Feng S Z, et al. Experimental study on corrosion-fouling relationship of Ni-W-P composite coating surface of heat exchanger[J]. Surface Topography Metrology and Properties, 2019, 7(1): 672-683.
- [9] 程延海, 侯庆强, 杨金勇, 等. 钨含量对Ni-W-P镀层抗垢性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(8): 1931-1937.
- Cheng Y H, Hou Q Q, Yang J Y, et al. Effect of tungsten addition on the anti-fouling property of the electroless Ni-W-P deposits[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(8): 1931-1937 (in Chinese).
- [10] 朱宸煜, 许晓静, 王浩, 等. Ni-Sn-P复合镀层的组织结构与抗垢性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(3): 257-262.
- Zhu C Y, Xu X J, Wang H, et al. Microstructure and property of Ni-Sn-P composite coatings on carbon steel Q235[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(3): 257-262 (in Chinese).
- [11] 郭思琴. 化学镀Ni-P镀层特征及性能的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [12] 黄晓梅, 田川, 李阳. 不锈钢化学镀Ni-Mo-P沉积速率的研究[J]. 电镀与环保, 2016, 36(3): 29-32.
- Huang X M, Tian C, Li Y. Study on the deposition rate of electroless Ni-Mo-P plating on stainless steel[J]. Electroplating & Pollution Control, 2016, 36(3): 29-32 (in Chinese).
- [13] Nouri N M, Bakhsh M S, Bagheri R. Robust superhydrophobic surface with polytetrafluoroethylene (PTFE), micro sized aluminum particles and SiO<sub>2</sub> nano-particles[J]. Modares Mechanical Engineering, 2015, 15(11): 26-32.