

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.03.003

# PTFE 浓度对电厂冷却水管 Ni-Mo-P/PTFE 复合镀层形貌和防垢性能的影响

李鹏飞\*, 张海涛

(内蒙古机电职业技术学院, 内蒙古 呼和浩特 010070)

**摘要:** 采用单因素实验法研究 PTFE 浓度对电厂冷却水管常用的 20# 钢表面 Ni-Mo-P/PTFE 镀层的形貌和防垢性能的影响。结果表明, 不同 PTFE 浓度下复合镀层的形貌特征既存在相似之处也存在差异。在 5~20 mL/L 的范围内随着 PTFE 浓度增加, 复合镀层平整度提高, 生垢速率减小, 主要归因于复合镀层中 PTFE 质量分数逐渐升高。但当 PTFE 浓度超过 20 mL/L, 随着 PTFE 浓度继续增加, 复合镀层平整度和防垢性能有所下降。PTFE 浓度为 20 mL/L 时, 该复合镀层表面较为平整, PTFE 质量分数达到 3.19%, 具有相对较好的防垢性能。

**关键词:** 形貌; 防垢性能; Ni-Mo-P/PTFE 复合镀层; PTFE 浓度

**中图分类号:** TQ153.2      **文献标识码:** A

## Effect of PTFE Concentration on Morphology and Anti-Fouling Property of Ni-Mo-P/PTFE Coating on Surface of Power Plant Cooling Water Pipe

LI Pengfei\*, ZHANG Haitao

(Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Hohhot 010070, China)

**Abstract:** The influence of PTFE concentration on the morphology and anti-fouling property of Ni-Mo-P/PTFE coating on surface of 20# steel commonly used in power plant cooling water pipe was studied by single factor experiment. The results showed that there were similarities as well as differences between the morphology characteristics of composite coatings under different PTFE concentration. With the increase of PTFE concentration in the range of 5–20 mL/L, the flatness of composite coatings increased and the fouling rate decreased, which was mainly due to the increase of mass fraction of PTFE in composite coatings. However, when the concentration of PTFE exceeded 20 mL/L, the flatness and anti-fouling property of the composite coatings decreased with the increase of PTFE concentration. When the concentration of PTFE is 20 mL/L, the surface of the composite coating is relatively smooth, and the PTFE mass fraction reaches 3.19%, which has relatively good anti-fouling performance.

**Keywords:** morphology; anti-fouling property; Ni-Mo-P/PTFE composite coating; PTFE concentration

以 Ni-P 镀层、Ni-Mo-P 镀层为代表的镍基合金镀层及以 Ni-P/PTFE 复合镀层为代表的镍磷二元合金复合镀层, 因具有较低的表面能, 已被用作低表

面能涂层来减缓金属材料表面生垢<sup>[1-4]</sup>。随着对镍基合金镀层及镍磷二元合金复合镀层的防垢性能提出越来越高的要求, 学者们开始致力于三元乃至多

收稿日期: 2020-08-09

修回日期: 2020-09-12

通信作者: 李鹏飞, teacher\_li801@163.com

基金项目: 内蒙古自治区教育厅项目(NJZY18273)

元合金复合镀层的防垢性能研究。

陈衡阳等<sup>[5]</sup>研究了 Ni-Cu-P/PTFE 复合镀层的防垢性能,并探讨了复合镀层表面污垢的沉积量与复合镀层的表面能及粗糙度之间的关系。陈帅帅等<sup>[6]</sup>研究了 Ni-W-P/PTFE 复合镀层的防垢性能,并通过建立模型对复合镀层表面污垢的沉积量进行了预测。杨梓健等<sup>[7]</sup>研究了 Ni-Mo-P/PTFE 复合镀层的防垢性能,通过向溶液中添加硫酸铈以期提高复合镀层的防垢性能,并重点考察了硫酸铈质量浓度对复合镀层结垢率的影响。

与前人的研究主题不同,本文采用单因素实验法研究了 PTFE 浓度对电厂冷却水管常用的 20# 钢表面 Ni-Mo-P/PTFE 复合镀层形貌和防垢性能的影响,旨在筛选出较佳的 PTFE 浓度,进而得到具有较好防垢性能的 Ni-Mo-P/PTFE 复合镀层。

## 1 实验

### 1.1 Ni-Mo-P/PTFE 复合镀层的制备

采用化学镀工艺在 20# 钢表面制备 Ni-Mo-P/PTFE 复合镀层,使用的溶液成分和工艺条件见表 1。当溶液中 PTFE 浓度分别为 5、10、15、20、25 和 30 mL 的条件下,制备六种不同的 Ni-Mo-P/PTFE 复合镀层,依次命名为复合镀层 C1、C2、C3、C4、C5 和 C6。

表 1 化学镀 Ni-Mo-P/PTFE 复合镀层使用的溶液成分和工艺条件

Tab.1 Solution component and process conditions for electroless plating of Ni-Mo-P/PTFE composite coating

溶液成分和工艺条件	数值
$c(\text{硫酸镍})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	26
$c(\text{钼酸钠})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	2.5
$c(\text{次磷酸钠})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	12
$c(\text{柠檬酸钠})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	28
$c(\text{乳酸})/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	10
$c(\text{碘化钾})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	1
$c(\text{十二烷基硫酸钠})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	60
$c(\text{PTFE})/(\text{mL}\cdot\text{L}^{-1})$	5~30
pH	8.6
温度/°C	90

### 1.2 Ni-Mo-P/PTFE 复合镀层测试

#### 1.2.1 复合镀层形貌及复合镀层中 PTFE 质量分数

使用附带有 Oxford Inca 能谱仪的 JSM-6360LV

扫描电子显微镜观察复合镀层形貌,同时测定复合镀层的化学成分,得到各元素的质量分数。根据 F 在 PTFE 中所占的质量百分比,通过换算得到复合镀层中 PTFE 质量分数。

#### 1.2.2 复合镀层的防垢性能

在模拟硬水中进行生垢实验,以生垢速率作为评价复合镀层防垢性能得指标。模拟硬水的成分为:氯化钙 0.75 g/L、氯化钠 2.5 g/L、氯化镁 0.4 g/L、碳酸氢钠 1.6 g/L。模拟硬水搅拌均匀后将镀后的钢片浸入其中,静置 24 h 后取出,浸洗后置于恒温干燥箱中烘干,使用 BSA124S-CW 型电子天平通过称重求差值计算出生垢速率。与此同时,使用能谱仪分析沉积在复合镀层表面的污垢化学成分。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PTFE 浓度对复合镀层中 PTFE 质量分数的影响

图 1 示出 PTFE 浓度对复合镀层中 PTFE 质量分数的影响。由图 1 可知,PTFE 浓度变化对复合镀层中 PTFE 质量分数有一定的影响。随着 PTFE 浓度从 5 mL/L 增加到 20 mL/L,PTFE 质量分数相应地从 1.72% 升高到 3.19%。其原因是溶液中 PTFE 浓度越高,处于悬浮状态的 PTFE 必然越多。因此,单位时间内越来越多的 PTFE 通过搅拌被输送到沉积面,并发生弱吸附。随着 Ni-Mo-P 镀层持续沉积,将吸附的 PTFE 俘获,从而使复合镀层中 PTFE 质量分数随之升高。但当 PTFE 浓度超过 20 mL/L,随着 PTFE 浓度继续增加,PTFE 质量分数下降。这表明 PTFE 浓度并非越高越好,而是存在最优值。PTFE

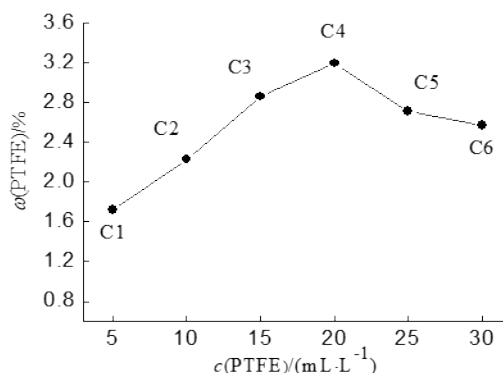


图 1 PTFE 浓度对复合镀层中 PTFE 含量的影响

Fig.1 Effect of PTFE concentration on mass fraction of PTFE in composite coatings

浓度过高时,由于溶液太黏稠会阻碍镍离子和次磷酸根离子自由扩散<sup>[8]</sup>,从而影响PTFE与Ni-Mo-P镀层共沉积,所以复合镀层中PTFE质量分数下降。

## 2.2 PTFE浓度对复合镀层形貌及化学成分的影响

图2显示了不同PTFE浓度下复合镀层的形貌。从图2中看出,不同PTFE浓度下复合镀层的形貌特征存在相似之处,例如:所有的复合镀层表面都有弥散分布的凸起胞状物,且沿着胞状物轮廓有基本呈横向延伸的条纹。不同PTFE浓度下复合镀层的形貌特征同样也存在差异,当PTFE浓度为5 mL/L和10 mL/L时,复合镀层C1和复合镀层C2表面较为粗糙。当PTFE浓度为15 mL/L和20 mL/L时,复合镀层C3和复合镀层C4的平整度与复合镀层C1和复合镀层C2相比明显改善。但当PTFE浓度分别为25 mL/L和30 mL/L时,复合镀层C5和复合镀层C6表面又变得粗糙,平整度有所下降。这表明在一定范围内PTFE浓度增加可以改善复合镀层形貌,原

因可能是PTFE浓度增加促进了结晶形核,增加了形核率,从而提高复合镀层平整度。

所有的复合镀层化学成分都为Ni、Mo、P、F、C和O,这表明PTFE浓度变化不会影响复合镀层的化学成分,但影响了复合镀层中各元素的质量分数,如图3所示。随PTFE浓度从5 mL/L增加到20 mL/L, Ni、P、Mo和F的质量分数总体上都呈现升高的趋势。但当PTFE浓度超过20 mL/L后,随着PTFE浓度继续增加, Ni、P、Mo和F的质量分数都呈现下降的趋势。

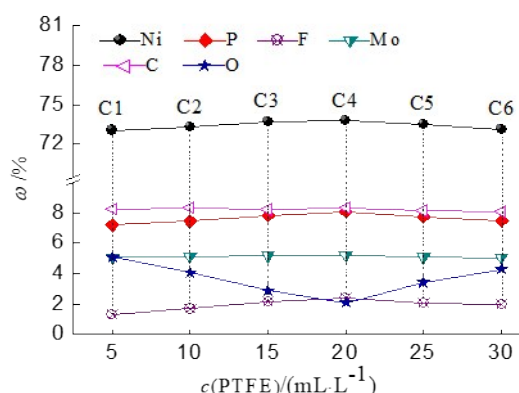


图3 不同PTFE浓度下复合镀层中各元素的质量分数

Fig.3 Mass fraction of each elements composite coatings under different PTFE concentration

PTFE浓度为20 mL/L时,通过面扫描得到复合镀层的能谱图如图4所示。从图4中可以明显地看出Ni、Mo、P、F和C的特征峰,其中Ni的特征峰强度最大,Mo、F和C的特征峰强度都较小,这是由于该复合镀层中Ni的质量分数相对最高,Mo、F和C的质量分数相对较低。

## 2.3 PTFE浓度对复合镀层防垢性能的影响

图5为PTFE浓度对复合镀层生垢速率的影响。从图5中看出,在5~20 mL/L的范围内随着PTFE浓度增加,生垢速率随之减小,表明复合镀层的防垢性能逐渐提高,这与复合镀层中PTFE质量分数明显升高有密切关系。主要原因在于,低能物质PTFE与Ni-Mo-P镀层共沉积形成的Ni-Mo-P/PTFE复合镀层属于低表面能涂层,难溶性金属盐很难从该复合镀层表面获得足够的能量以晶体形式沉积,即

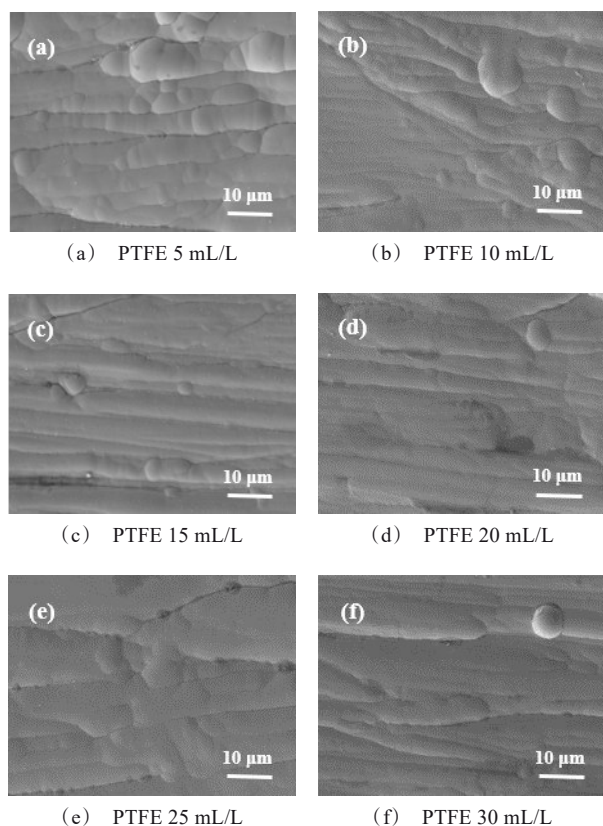


图2 不同PTFE浓度下复合镀层的形貌

Fig.2 Morphology of composite coatings under different PTFE concentration

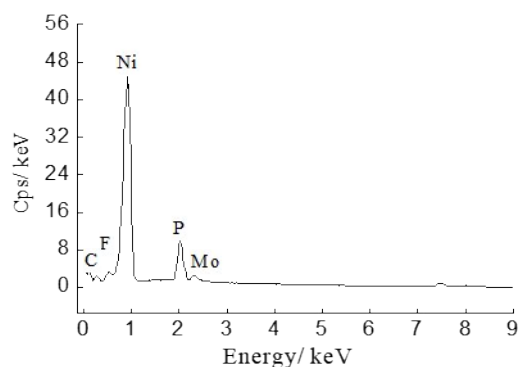


图 4 PTFE 浓度为 20 mL/L 时复合镀层的能谱图  
Fig.4 Energy spectra of the composite coating with PTFE concentration of 20 mL/L

污垢沉积在该复合镀层表面沉积较为困难<sup>[9-11]</sup>。随着复合镀层中 PTFE 质量分数升高,复合镀层表面能逐渐减小,从而减缓了污垢沉积,表现为生垢速率减小。其中,PTFE 浓度为 20 mL/L 时,复合镀层 C4 具有相对较好的防垢性能。

但在 20~30 mL/L 的范围内随着 PTFE 浓度增加,生垢速率随之增大,表明复合镀层的防垢性能呈现下降趋势。这是由于复合镀层中 PTFE 质量分数下降使得复合镀层表面能增大<sup>[12]</sup>,对污垢沉积的阻碍作用减弱。

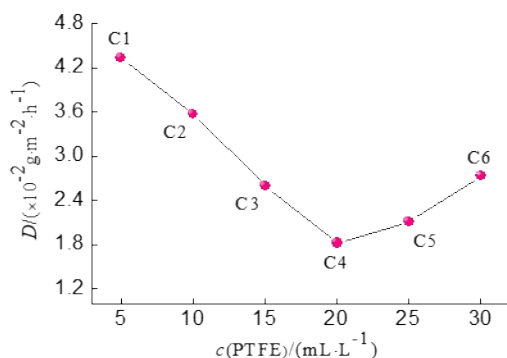


图 5 PTFE 浓度对复合镀层生垢速率的影响  
Fig.5 Effect of PTFE concentration on fouling rate of composite coatings

当复合镀层在模拟硬水中浸 24 h 后,不同复合镀层的表面都检测到 Ni、Mo、P、F、C、O 和 Ca、Mg 等元素。其中, Ni、Mo、P、F 和 C 是复合镀层的特征性元素,而 Ca、Mg 等为沉积在复合镀层表面的污垢主要成分。如图 6 所示,复合镀层 C4 表面 Ca、Mg 和 O 的质量分数均较低,依次为 0.43%、0.35%、4.09%,这

是由于沉积在复合镀层 C4 表面的污垢较少,说明复合镀层 C4 具有相对较好的防垢性能。

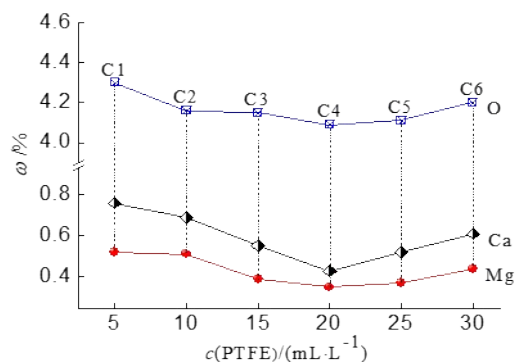


图 6 沉积在不同复合镀层表面的污垢主要成分  
Fig.6 Major composition of fouling deposited on the surface of different composite coatings

图 7 示出复合镀层 C2、C4 和 C6 在模拟硬水中浸泡 24 h 后的形貌。从图 7 可以看出,PTFE 浓度分别为 10 mL/L 和 30 mL/L 时,沉积在复合镀层 C2、复合镀层 C6 表面的污垢较多且较为集中。而 PTFE 浓度为 20 mL/L 时,沉积在复合镀层 C4 表面的污垢较少,呈稀疏分布。进一步比较观察证实,PTFE 浓度为 20 mL/L 时,复合镀层 C4 具有相对较好的防垢性能。

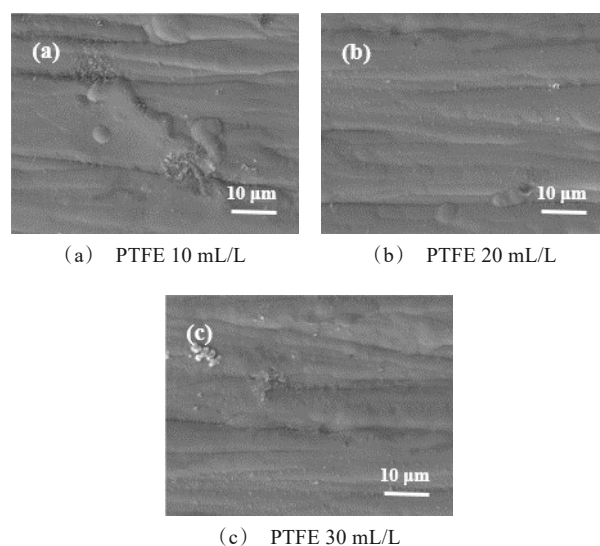


图 7 不同复合镀层在模拟硬水中浸 24 h 后的形貌  
Fig.7 Morphology of different composite coatings immersed in simulated hard water for 24 h



### 3 结论

(1) PTFE 浓度对电厂冷却水管常用的 20# 钢表面 Ni-Mo-P/PTFE 镀层的形貌和防垢性能都有一定的影响。不同 PTFE 浓度下复合镀层的形貌特征既存在相似之处也存在差异, 复合镀层的生垢速率以及在模拟硬水中浸 24 h 后的形貌也有所不同。

(2) 在一定的范围内 PTFE 浓度增加可以改善复合镀层形貌, 提高复合镀层平整度, 使复合镀层的生垢速率减小, 防垢性能逐渐提高。当 PTFE 浓度为 20 mL/L 时, 复合镀层表面较为平整, PTFE 质量分数达到 3.19%, 具有相对较好的防垢性能。

### 参考文献

- [1] 徐文芳, 梁平, 张云霞. 热处理对 Ni-P 化学镀层阻垢和耐蚀性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(4): 349-352.  
Xu W F, Liang P, Zhang Y X. Effect of heat treatment on anti-fouling performance and corrosion resistance of Ni-P electroless plated coating[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(4): 349-352(in Chinese).
- [2] Xu Z M, Jiang X, Liu Z D, et al. Experimental investigation of microbial fouling and heat mass transfer characteristics on Ni-P modified surface of heat exchanger[J]. Journal of Thermal Science, 2020, 19: 1-8.
- [3] Lu R, Chen Y H, Yang J Y, et al. Study on heat transfer performance and anti-fouling mechanism of ternary Ni-W-P coating[J]. Applied Sciences, 2020, 10(11): 3905-3925.
- [4] 何旭, 付传起, 王宙, 等. 稀土铈对化学镀复合镀 Ni-P-PTFE 镀层耐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 23-25.  
He X, Fu C Q, Wang Z, et al. Effect of cerium concentration on the anticorrosive property of electroless Ni-P-PTFE composite coating[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 23-25(in Chinese).
- [5] 陈衡阳. Ni-Cu-P-PTFE 防垢镀层制备及性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [6] 陈帅帅. 换热面 Ni-W-P-PTFE 防垢镀层制备及性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [7] 杨梓健, 付传起, 王宙, 等. 稀土铈对 Ni-Mo-P-PTFE 镀层组织结构与防垢性能的影响研究[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 89-93.  
Yang Z J, Fu C Q, Wang Z, et al. Effect of cerium on microstructure and scale inhibition performance of Ni-Mo-P-PTFE coating[J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 89-93(in Chinese).
- [8] 董帅峰, 李伟, 刘平, 等. Ni-P 过渡层沉积时间和 PTFE 浓度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(3): 579-585.  
Dong S F, Li W, Liu P, et al. Effects of Ni-P deposition time and PTFE concentration on Ni-P-PTFE composite coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(3): 579-585(in Chinese).
- [9] 王永真, 陈颖, 何凯龙, 等. 铜基 Ni-P-PTFE 化学复合镀层的阻垢和导热综合性能的研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(1): 20-24.  
Wang Y Z, Chen Y, He K L, et al. Investigation on anti-fouling capacity and thermal conductivity of Ni-P-PTFE composite coating[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(1): 20-24(in Chinese).
- [10] Laura P, Virgilio G, Giovanni P, et al. Synthesis and characterization of electroless Ni-P alloys for anti-wear and anti-fouling coatings[J]. Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials, 2016, 330(2): 329-340.
- [11] Cai Y W, Li S, Cheng Z L, et al. Facile fabrication of super-hydrophobic FAS modified electroless Ni-P coating meshes for rapid water-oil separation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018(540): 224-232.
- [12] 何凯龙, 陈颖, 冯婧, 等. Ni-P-PTFE 化学复合镀层的导热及阻垢性能研究[J]. 材料导报, 2013, 27(2): 121-124.  
He K L, Chen Y, Feng J, et al. Investigation on the thermal conductivity and anti-fouling property of Ni-P-PTFE electroless composite coating[J]. Materials Review, 2013, 27(2): 121-124(in Chinese).