

# Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 镀层的制备及耐腐蚀性能研究

金辉<sup>1,2</sup>, 陈立佳<sup>1</sup>, 王一雍<sup>2</sup>, 王璐<sup>2</sup>

(1.沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870;

2.辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要:** 目的 提高 Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 纳米复合镀层的显微硬度及耐腐蚀性能。方法 利用超声技术, 采用电沉积方法制备 Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 纳米复合镀层。通过正交实验方法, 对 Ni<sup>2+</sup>、Co<sup>2+</sup> 及纳米颗粒共沉积工艺实验进行研究, 以显微维氏硬度作为考察指标, 通过极差分析确定电沉积的最佳工艺条件, 利用极化曲线研究纳米复合镀层在 3.5%NaCl 水溶液中的耐腐蚀性能。通过 XRD 分析纳米复合镀层的相组成, 采用 SEM、EDAX 研究纳米复合镀层的微观形貌和元素组成。结果 通过超声场的超声空化作用, 将纳米稀土 CeO<sub>2</sub> 弥散分布于镀层中, 使镀层晶粒细化, 镀层硬度由 264.34HV 上升到 486.82HV, 同时镀层的耐蚀性能也有所提高, 自腐蚀电流密度由 6.305  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  减小至 2.012  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。结论 由正交实验结果得出, 在超声功率为 160 W 的实验条件下, 制备镀层的最佳工艺条件为: 镀液温度 55  $^{\circ}\text{C}$ , 电流密度 2  $\text{A}/\text{dm}^2$ , 纳米稀土 CeO<sub>2</sub> 加入量 1 g/L, pH 值 5。最佳工艺条件下制备的镀层表面致密均匀, 硬度和耐腐蚀性均有明显提高。

**关键词:** Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 复合镀层; 超声分散; 纳米 CeO<sub>2</sub>; 耐蚀性; 极化曲线; 电化学测试

**中图分类号:** TQ153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)10-0115-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.016

## Preparation and Corrosion Resistance of Ni-Co-CeO<sub>2</sub> Composite Coatings

JIN Hui<sup>1,2</sup>, CHEN Li-jia<sup>1</sup>, WANG Yi-yong<sup>2</sup>, WANG Lu<sup>2</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2.School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve microhardness and corrosion resistance of Ni-Co-CeO<sub>2</sub> nanocomposite coatings. The Ni-Co-CeO<sub>2</sub> nanocomposite coatings were prepared in the method of electrodeposition under ultrasound condition. Codeposition technology experiment involving Ni<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup> and nano particles was studied in the method of orthogonal experiment. With micro Vickers hardness as examining index, optimum technological conditions of electrodeposition were determined based upon range analysis, and corrosion resistance of the Ni-Co-CeO<sub>2</sub> nanocomposite coatings in 3.5wt% NaCl solution was studied based upon potentiodynamic polarization. The surface morphology, microstructure and elementary composition of the nano composite coatings were studied by SEM, XRD and EDAX. Under the effect of ultrasound cavitation, nano rare earth CeO<sub>2</sub> was dispersed in the coatings, the nanocomposite coatings were refined. As a result, microhardness of the coatings increased from 264.34HV to 486.82HV,

收稿日期: 2017-04-24; 修订日期: 2017-07-14

Received: 2017-04-24; Revised: 2017-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61674141); 辽宁省自然科学基金项目科技厅项目 (201602401); 辽宁省自然科学基金项目教育厅项目 (L2015259); 鞍山市科技项目 (20153413)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (61674141), Natural Science Foundation of Liaoning Province Department of Science and Technology (201602401), Natural Science Foundation of Liaoning Province Department of Education (L2015259), the Anshan City Science and the Technology Plan Project (20153413)

作者简介: 金辉 (1982—), 女, 在读博士, 讲师, 主要研究方向为材料表面技术。

**Biography:** JIN Hui (1982—), Female, Doctor graduate, Lecturer, Research focus: material surface technology.

corrosion resistance was improved, and  $J_{\text{corr}}$  value decreased to  $2.012 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  from  $6.305 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Provided with the experimental condition of 160 W ultrasonic power, the optimum technological conditions of coatings preparation are, plating bath temperature of  $55^\circ\text{C}$ , current density of  $2 \text{ A}/\text{dm}^2$ ,  $\text{CeO}_2$  concentration of  $1 \text{ g}/\text{L}$  and pH of 5. The coatings prepared under the optimum technological conditions are uniform and compact, and the microhardness and corrosion resistance are increased significantly.

**KEY WORDS:** Ni-Co- $\text{CeO}_2$  composite coating; ultrasonic dispersion; nano  $\text{CeO}_2$ ; corrosion resistance; potentiodynamic polarization; electrochemical test

Ni-Co 复合镀层由于具有比传统镍基镀层更高的比强度、耐磨性、抗高温氧化性及优异的耐腐蚀性能,而被广泛地应用于石油化工的耐腐蚀器件、航空发动机轴承热端、航空舰体外壳、核电站涡轮转盘、内燃机叶片等易氧化与腐蚀的端位材料和冶金工业中的连铸结晶器。稀土元素具有独特的外层电子排布,在国民经济的各个领域都有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。众所周知,纳米粒子与金属共同电沉积可以使复合镀层具有很多优异的性能。

目前,稀土纳米氧化物,如  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeO}_2$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3$  等,由于具有独特的物理化学特性,而被用于复合电沉积过程<sup>[4-6]</sup>。 $\text{CeO}_2$  具有很多优异的特性,将其加入金属镀层中,可以使复合镀层具有优异的摩擦性能、硬度、耐蚀性、高温抗氧化性等<sup>[7-10]</sup>。因此,许多学者致力于纳米  $\text{CeO}_2$  复合镀层的研究,希望可以改善复合镀层的各项性能。例如,Zhang 等人<sup>[11]</sup>通过电沉积不同浓度  $\text{CeO}_2$  与 Ni 的复合镀层,以提高  $800^\circ\text{C}$  下的抗氧化性能,对比纯 Ni 镀层, Ni- $\text{CeO}_2$  镀层的恒温氧化速率明显减小,这是由于共沉积的纳米  $\text{CeO}_2$  粒子阻碍了 Ni 沿晶界扩散。Xiong 等人<sup>[12]</sup>研究了 Ni- $\text{CeO}_2$  镀层的显微硬度和耐磨性,认为  $\text{CeO}_2$  加入到 Ni 镀层中,减小了镀层的晶粒。由于弥散强化作用,  $\text{CeO}_2$  质量浓度为  $10 \text{ g}/\text{L}$  时,镀层的机械性能最优。Kasturibai 等人<sup>[13]</sup>在乙酸镍镀液中制备了  $\text{CeO}_2$  增强 Ni 纳米复合镀层,实验结果表明, Ni- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层的显微硬度值要高于纯 Ni 镀层, Ni- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层在  $3.5\% \text{ NaCl}$  溶液中有更高的耐腐蚀性能。但由于纳米粒子具有较高的比表面积,在镀液中容易发生团聚现象,因此在实验中加入超声场,通过超声空化效应改善纳米粒子的团聚现象,将纳米粒子有效地分散开来。另外,超声波会产生高速微射流,这种高速微射流可以强化溶液搅拌的效果,有利于提高离子的输送能力,有利于电极表面的气泡逸出,可以使扩散层的有效厚度减小,加快电极反应过程<sup>[14-17]</sup>。

本文采用正交实验的方法研究在超声功率为 160 W 的工作条件下,镀液温度、阴极电流密度、纳米  $\text{CeO}_2$  加入量、pH 值四个因素对 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层性能的影响,以显微维氏硬度为考察指标,通过

极差分析确定最佳实验工艺条件,以求制备出表面平整、致密,显微硬度及耐腐蚀性能优良的 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层。

## 1 试验

### 1.1 镀层制备

采用尺寸为  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的紫铜板作为阴极,尺寸为  $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的镍板(纯度  $\geq 99.5\%$ )作为阳极。电镀前采用丙酮对铜板进行除油处理,然后在  $10\% \text{ HCl}$  溶液中进行活化后,用高纯水洗净。电沉积过程采用的纳米  $\text{CeO}_2$  的粒度为  $20 \text{ nm}$ ,电源为直流电源。实验在超声功率为 160 W 下进行,采用硫酸镍体系镀液,具体镀液配方为:  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   $300 \text{ g}/\text{L}$ ,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   $80 \text{ g}/\text{L}$ ,  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$   $3 \text{ g}/\text{L}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$   $30 \text{ g}/\text{L}$ , 表面活性剂  $0.1 \text{ g}/\text{L}$ 。施镀前,纳米  $\text{CeO}_2$  粒子需在磁力搅拌作用下以  $150 \text{ r}/\text{min}$  的速率分散 1 h。施镀时间为 2 h。

### 1.2 性能测试及组织观察

采用 HVS-1000 型显微维氏硬度仪测量试样的显微维氏硬度。采用  $200 \text{ g}$  负荷,时间保持  $15 \text{ s}$ ,在显微维氏硬度仪上读出硬度值。在每个镀件上取不同区域内 5 个点的硬度值,再求平均值,得出平均显微维氏硬度值。

采用日本电子公司 JSM-6480lv 型的扫描电镜对纳米复合镀层进行表面微观形貌观察。采用美国 EDAX 公司的能谱仪对镀层表面化学成分进行分析。采用荷兰帕纳科公司 X'Pert Powder 型 X 射线衍射分析仪对镀层的物相结构进行分析。

采用荷兰 AutoLab (PGSTAT302 型) 电化学工作站测量纳米复合镀层的 Tafel 曲线,分析纳米复合镀层的耐腐蚀性能。试样腐蚀介质采用  $3.5\% \text{ NaCl}$  溶液,测试采用三电极体系,以饱和氯化银电极为参比电极,铂电极为对电极,纳米复合镀层为工作电极,工作面积约为  $1.00 \text{ cm}^2$ 。所有测试均在室温下完成。极化曲线的扫描电位为  $-1 \sim 0 \text{ V}$ ,扫描速率为  $0.1 \text{ V}/\text{s}$ 。测试后,用计算机软件拟合,求出自腐蚀电位 ( $E_{\text{corr}}$ ) 和自腐蚀电流密度 ( $J_{\text{corr}}$ ) 等电化学参数。

2 结果及分析

2.1 Ni-Co-CeO<sub>2</sub>纳米复合镀层制备工艺优化

采用 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交实验表,在超声功率为 160 W 的实验条件下,选取对纳米复合镀层显微维氏硬度有较大影响的镀液温度 (A)、阴极电流密度 (B)、纳米 CeO<sub>2</sub> 加入量 (C) 和 pH 值 (D) 为四个考察因素,对实验工艺条件进行优选 (见表 1)。表 1 中, K<sub>i</sub>(第 *m* 列)表示第 *m* 列中数字与“*i*”对应的指标值之和。R 代表极差值, R(第 *m* 列)表示第 *m* 列中 K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub>、K<sub>3</sub> 各个平均值中的最大值与最小值之差。以显微维氏硬度为考察指标,经极差分析得出,各因素对镀层显微维氏硬度的影响由大到小依次为 B>D>C>A,即阴极

电流密度为影响最大因素, pH 值、纳米 CeO<sub>2</sub> 加入量的影响依次减弱,镀液温度为影响最小因素。最优工艺为 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>2</sub>D<sub>3</sub>,即镀液温度为 55 ℃,阴极电流密度为 2 A/cm<sup>2</sup>,纳米 CeO<sub>2</sub> 加入量 1 g/L, pH 值为 5。此工艺条件为正交试验中的第 4 组实验,测得纳米复合镀层的硬度为 486.82HV,具有最高的硬度。在超声功率为 160 W 的最优条件下制备不加纳米 CeO<sub>2</sub> 的 Ni-Co 镀层,测得镀层硬度为 264.34HV,最优条件下制备的镀层硬度值(486.82HV)与其相比有较大提高,说明纳米 CeO<sub>2</sub> 的加入提高了镀层硬度。无超声处理时,最优条件下制备的纳米复合镀层的硬度为 310.62HV,与之相比,超声条件下的纳米复合镀层硬度(486.82HV)更高,说明超声场的加入有利于提高纳米复合镀层的显微维氏硬度。

表 1 Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 纳米复合镀层正交试验结果  
Tab.1 Orthogonal experiment results of Ni-Co-CeO<sub>2</sub> nanocomposite coatings

Number	Temperature ( A ) /℃	Current density ( B ) /(A·dm <sup>-2</sup> )	Concentration of CeO <sub>2</sub> ( C ) /(g·L <sup>-1</sup> )	pH ( D )	Hardness(HV)
1	50(1)	2(1)	0.5(1)	3.8(1)	254.30
2	50(1)	3(2)	1(2)	4.2(2)	283.58
3	50(1)	4(3)	1.5(3)	5(3)	245.74
4	55(2)	1(2)	1(2)	5(3)	486.82
5	55(2)	3(2)	1.5(3)	3.8(1)	236.16
6	55(2)	4(3)	0.5(1)	4.2(2)	285.68
7	60(3)	2(1)	1.5(3)	4.2(2)	337.62
8	60(3)	3(2)	0.5(1)	5(3)	292.16
9	60(3)	4(3)	1(2)	3.8(1)	287.84
K <sub>1</sub>	261.21	359.58	277.38	259.43	
K <sub>2</sub>	336.22	270.63	352.75	302.29	
K <sub>3</sub>	305.87	273.09	273.17	341.57	
R	75.01	88.95	79.58	82.14	

注：括号内为对应水平

2.2 Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 纳米复合镀层的微观形貌及成分分析

图 1 为超声条件下制备的 Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 纳米复合镀层的表面微观形貌。由图 1 可以看出,纳米复合镀层表面平整,组织致密。分析表明,在超声场中,超声空化作用使镀层/溶液的界面产生紊微搅动,扰乱了扩散层,改变了界面 Ni<sup>2+</sup>的浓度分布和传质过程,降低了镀液的浓差极化。超声空化作用形成的空化气泡在破灭时会产生巨大的冲击波,从而产生巨大的瞬时压力和高温,这可以促使镀层表面微层产生塑性变形,增加镀层表面的形核中心,提高形核率,有利于镀层的晶粒细化。同时空化作用可以改善纳米稀土 CeO<sub>2</sub> 颗粒的团聚现象,使纳米稀土 CeO<sub>2</sub> 颗粒均匀地分散于镀液中,使单位时间内有更多的纳米稀土 CeO<sub>2</sub> 颗粒迁移至阴极表面,与 Ni、Co 共沉积形成 Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 纳米复合镀层。在超声空化作用下,纳米

稀土 CeO<sub>2</sub> 弥散分布于 Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 纳米复合镀层中,使镀层晶粒细小,呈现球状。

图 2 为超声条件下制备的 Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 纳米复合镀层的能谱图。由图 2 可知,存在 Ce 元素峰,说明

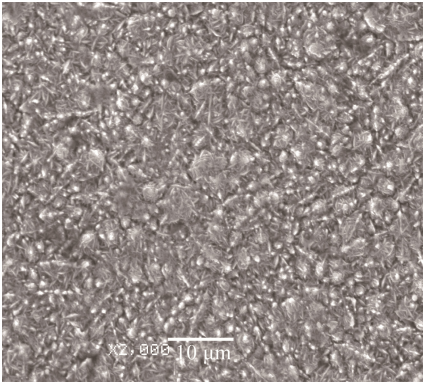


图 1 Ni-Co-CeO<sub>2</sub> 纳米复合镀层的 SEM 图  
Fig.1 Surface morphology (SEM image) of Ni-Co-CeO<sub>2</sub> nanocomposite coatings

Ni-Co 镀层中含有纳米稀土  $\text{CeO}_2$  粒子,即在超声条件下成功制备了 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层。纳米复合镀层的主要组成元素有 Ni、Co、Ce、O,其质量分数分别为 76.48%、4.71%、12.20%、6.61%。

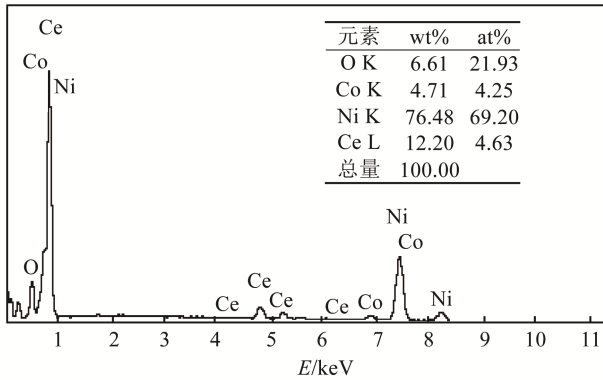


图2 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层的能谱图

Fig.2 EDAX analysis spectrum of the Ni-Co- $\text{CeO}_2$  nanocomposite coatings

图3为超声条件下制备的 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层的 XRD 图,分析表明,在  $2\theta$  为  $43^\circ$ 、 $52^\circ$  附近存在 Ni 的(111)、(200)衍射峰,在  $76^\circ$  附近出现 Co 的(022) 衍射峰,在  $38^\circ$ 、 $51^\circ$ 、 $72^\circ$  附近出现纳米稀土  $\text{CeO}_2$  的特征衍射峰(111)、(220)和(331),证明 Ni-Co 镀层中分布了纳米稀土  $\text{CeO}_2$  粒子,即在超声条件下成功制备了 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层,与前面的分析结果一致。

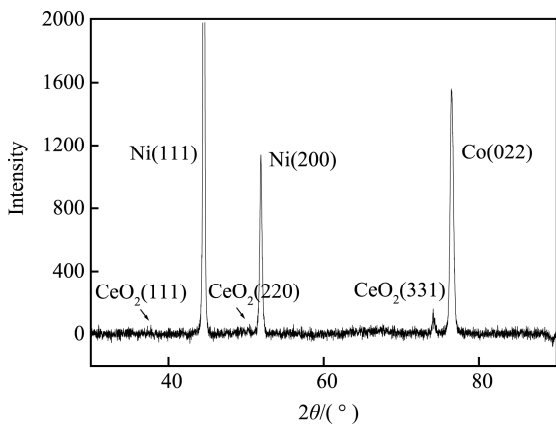


图3 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层的 XRD 图

Fig.3 XRD image of the Ni-Co- $\text{CeO}_2$  nanocomposite coatings

### 2.3 Ni-Co- $\text{CeO}_2$ 纳米复合镀层的耐腐蚀性能

在 3.5%NaCl 溶液中,测得了超声条件下制备的 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  及 Ni-Co 复合镀层的极化曲线(见图4),通过塔菲尔曲线测得了各镀层的自腐蚀电位  $E_{\text{corr}}$ 、自腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$ 、极化电阻  $R_p$ 、塔菲尔斜率  $b_a$  和  $b_c$ (见表2)。对比分析可知, Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层的腐蚀电位 ( $-0.759\text{ V}$ ) 明显负于 Ni-Co 镀层的腐蚀电位 ( $-0.243\text{ V}$ ), Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层的

自腐蚀电流密度 ( $2.012\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) 小于 Ni-Co 复合镀层的自腐蚀电流密度 ( $6.305\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ),说明 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层的耐蚀性能优于 Ni-Co 镀层,纳米稀土  $\text{CeO}_2$  的加入使镀层的耐腐蚀性能有所改善。分析认为,纳米  $\text{CeO}_2$  粒子在提高镀层耐腐蚀性能上起到了很重要的作用,其原因为:(1) 纳米  $\text{CeO}_2$  粒子在镀层中充当惰性物理障碍,可以阻碍腐蚀缺陷的产生和腐蚀缺陷的发展;(2) 纳米  $\text{CeO}_2$  粒子分散在 Ni-Co 镀层中可以形成许多微小的腐蚀电池,这些微小的腐蚀电池促进了阳极极化,因此可以抑制由镀层表面的晶体缺陷和微小孔洞引起的点腐蚀和局部腐蚀的发生,促进镀层表面均匀腐蚀的发生。

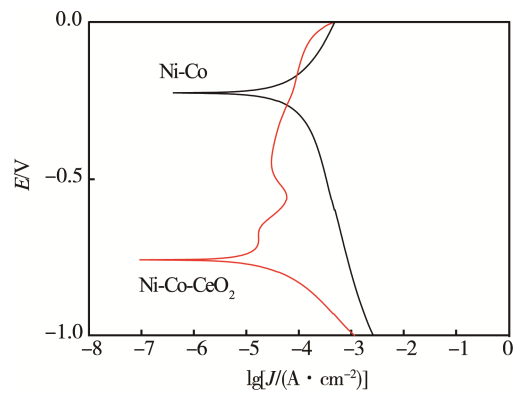


图4 Ni-Co 及 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层的极化曲线

Fig.4 Polarization curves of pure Ni-Co and Ni-Co- $\text{CeO}_2$  nanocomposite coatings

表2 Ni-Co 及 Ni-Co- $\text{CeO}_2$  纳米复合镀层的极化曲线结果  
Tab.2 Derived results from the Polarization curve of the pure Ni-Co and Ni-Co- $\text{CeO}_2$  nanocomposite coatings

Material	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$b_c/(\text{V}\cdot\text{dec}^{-1})$	$b_a/(\text{V}\cdot\text{dec}^{-1})$	$R_p/(\Omega\cdot\text{cm}^{-2})$
Ni-Co	-0.243	6.305	0.025	0.026	52.650
Ni-Co- $\text{CeO}_2$	-0.759	2.012	0.038	0.037	298.300

### 3 结论

1) 通过正交实验优化实验配方,确定超声功率为  $160\text{ W}$  时,实验的最佳工艺条件为:镀液温度  $55\text{ }^\circ\text{C}$ ,电流密度  $2\text{ A}/\text{dm}^2$ ,纳米稀土  $\text{CeO}_2$  加入量  $1\text{ g}/\text{L}$ ,  $\text{pH}=5$ 。其中,对镀层显微维氏硬度影响最大的因素为电流密度。

2) 采用超声纳米复合电镀技术,通过超声场的超声空化效应,改善纳米  $\text{CeO}_2$  粒子的团聚现象,强化溶液的搅拌效果,提高镀液中离子的输送能力,使纳米稀土  $\text{CeO}_2$  弥散分布于镀层中,获得的镀层表面平整,组织致密,晶粒细小且呈现为球状。

3) 纳米稀土  $\text{CeO}_2$  的加入,阻碍了复合镀层中腐蚀缺陷的产生和腐蚀缺陷的发展。纳米  $\text{CeO}_2$  形成的

微小腐蚀电池促进了阳极极化,抑制了复合镀层中点蚀和局部腐蚀的发生,使镀层的显微维氏硬度及耐腐蚀性能有显著提高。

# 参考文献:

- [1] MAHDAVI S, ALLAHKARAM S R. Composition, Characteristics and Tribological Behavior of Cr, Co-Cr and Co-Cr/TiO<sub>2</sub> Nano-composite Coatings Electrodeposited from Trivalent Chromium Based Baths[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 635: 150-157.
- [2] BENE L, PONTIAUX P, WENGER F. Co-ZrO<sub>2</sub> Electrodeposited Composite Coatings Exhibiting Improved Micro Hardness and Corrosion Behavior in Simulating Body Fluid Solution[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(23/24): 5379-5386.
- [3] 郝亚莉, 杨文忠, 尹晓爽, 等. 表面活性剂对 Ni-P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 15-21.  
HAO Ya-li, YANG Wen-zhong, YIN Xiao-shuang, et al. Effect of Surfactants on the Properties of Electroless Ni-P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings[J]. Surface Technology, 2016, 45(6): 15-21.
- [4] WANG Y X, JU Y, WEI S H, et al. Mechanical Properties and Microstructure of Au-Ni-TiO<sub>2</sub> Nano-composite Coatings[J]. Materials Characterization, 2015, 102: 189-194.
- [5] JUNE GHANI M A, FARZAM M, ZOHDIRAD H. Wear and Corrosion Resistance and Electroplating Characteristics of Electrodeposited Cr-SiC Nano-composite Coatings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 1993-2001.
- [6] SHAKOOR R A, KAHRAMAN R, WAWARE U, et al. Properties of Electrodeposited Ni-B-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings[J]. Materials & Design, 2014, 64: 127-135.
- [7] 敖正红, 薛玉君, 姜韶峰, 等. 电沉积方式对 Ni-ZrO<sub>2</sub> 纳米复合镀层耐腐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 72-76.  
AO Zheng-hong, XUE Yu-jun, JIANG Shao-feng, et al. Effects of Different Electrodeposition Methods on Corrosion Resistance of Ni-ZrO<sub>2</sub> Nanocomposite Coatings[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 72-76.
- [8] SHAKOOR R A, KAHRAMAN R, WAWARE U S, et al. Synthesis and Properties of Electrodeposited Ni-B-CeO<sub>2</sub> Composite Coatings[J]. Materials & Design, 2014, 59: 421-429.
- [9] HUI J, YI Y W, YU T W, et al. Synthesis and Properties of Electrodeposited Ni-CeO<sub>2</sub> Nano-composite Coatings[J]. Rare Metals, 2017(8): 1-6.
- [10] MENG J S, JI Z S. Effect of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CeO<sub>2</sub> Particle Size on High-temperature Oxidation Resistance of Electrodeposited Ni-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CeO<sub>2</sub> Composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(11): 3571-3577.
- [11] XIONG C, WANG Y X, HU B, et al. Microstructure and Properties of Electrodeposited Ni-CeO<sub>2</sub> Coatings[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2016, 11(2): 906.
- [12] ZHANG H J, ZHOU Y B, SUN J F. Preparation and Oxidation Behaviour of Electrodeposited Ni-CeO<sub>2</sub> Nanocomposite Coatings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 2011.
- [13] KASTURIBAI S, KALAIANAN G P. Characterizations of Electrodeposited Ni-CeO<sub>2</sub> Nanocomposite Coatings[J]. Materials Chemistry and Physics, 2014, 147(3): 1042-1048.
- [14] 周言敏, 李建芳. 超声条件下脉冲电镀 Ni-纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层及其显微硬度研究[J]. 表面技术, 2015, 44(5): 53-57.  
ZHOU Yan-min, LI Jian-fang. Research on Microhardness of Ni-nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings Prepared by Pulse Electroplating under Ultrasound Condition[J]. Surface Technology, 2015, 44(5): 53-57.
- [15] CHEN Z, YU Q, LIAO D H, et al. Influence of Nano-CeO<sub>2</sub> on Coating Structure and Properties of Electrodeposited Al/α-PbO<sub>2</sub>/β-PbO<sub>2</sub>[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(5): 1382-1389.
- [16] XUE Y J, LIU H B, LAN M M, et al. Effect of Different Electrodeposition Methods on Oxidation Resistance of Ni-CeO<sub>2</sub> Nanocomposite Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(21/22): 3539-3545.
- [17] 李献会, 薛玉君, 敖正红, 等. 组合超声条件下电沉积 Ni-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米复合镀层的耐腐蚀性能[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 1-4.  
LI Xian-hui, XUE Yu-jun, AO Zheng-hong, et al. Corrosion Resistance of Ni-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposite Coatings Prepared by Electrodeposition in Combination Ultrasonic Field[J]. Surface Technology, 2014, 42(5): 1-4.