

电刷镀在表面工程中应用的研究进展

任艳萍¹, 邓红华¹, 黄方遒¹, 许乔瑜²

(1. 广州民航职业技术学院, 广州 510403; 2. 华南理工大学, 广州 510641)

摘要: 综述了电刷镀技术在材料表面防腐、耐磨及维修领域的应用。介绍了电刷镀耐蚀、耐磨镀层的新工艺及其性能, 包括纳米晶合金电刷镀层、纳米复合电刷镀层、双纳米复合电刷镀层以及电刷镀复合转化膜层的研究现状。最后指出了今后电刷镀技术研究应用的方向。

关键词: 电刷镀; 纳米复合镀层; 复合转化膜层; 表面工程

中图分类号: TQ153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2013)06-0083-05

Research Progress of Brush Plating Technology in Surface Engineering

REN Yan-ping¹, DENG Hong-hua¹, HUANG Fang-qiu¹, XU Qiao-yu²

(1. Guangzhou Civil Aviation College, Guangzhou 510403, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

ABSTRACT: Current research progress of brush plating technology in the anti-corrosion, anti-wear and repair of material surface was reviewed. The process and performance of brush plating coating for anti-corrosion and anti-wear were introduced. The study status of nanocrystalline alloy coating, nano-composite coating, dual nano-composite coating and composite conversion coating by brush plating was described, and the future directions for research and application of brush plating technology were proposed.

KEY WORDS: brush plating technology; nano-composite coating; composite conversion coating; surface engineering

电刷镀是基于电解原理, 在零件表面快速沉积金属而形成镀层的技术。它具有沉积速度快、镀层种类多、工艺简单、镀层性能优良等特点, 随着应用的不断深入, 显示出超越其它金属涂覆技术的许多优势。近年来, 国内外对电刷镀技术的强化机理及表面工程应用方面进行了很多探索, 已从传统的维修工作向表面强化、表面防护、表面装饰方面发展。该技术的关键是电刷镀液的配方^[1], 工艺也已成为国内外研究的重点^[2-8]。为了满足机械、能源、纺织、化工、交通、航空等领域的不同需求, 适用于各种材料的多种配方层出不穷^[9-12]。电刷镀的新配方主要涉及合金镀、非晶态镀层、复合镀层以及纳米复合镀的应用^[13], 除此之外, 还涉及到电刷镀技术与化学转化、离子注入、化学镀、

热喷涂、激光微处理等其它技术的有机融合, 为表面工程带来了广阔的应用前景。

1 电刷镀在表面防腐中的应用

1.1 钢基体表面电刷镀层

对于钢基体而言, 电刷镀非晶态镀层有较高的防腐性能。文献[14]中的研究表明, 未经热处理的非晶态 Ni-P 合金电刷镀层有较好的耐酸碱腐蚀能力。将非晶态镍磷合金电刷镀层与 18-8 不锈钢、Ti 钢浸入 36% 的浓盐酸中进行腐蚀试验, 非晶态 Ni-P 合金电刷镀层的耐蚀性能明显高于不锈钢与 Ti 钢。

近年来, 纳米晶合金电刷镀层在防腐方面显示出

收稿日期: 2013-06-25; 修订日期: 2013-08-13

Received: 2013-06-25; Revised: 2013-08-13

作者简介: 任艳萍(1977—), 女, 陕西咸阳市人, 硕士, 实验师, 主要从事飞机修理与表面技术的教学与科研。

Biography: REN Yan-ping (1977—), Female, from Xianyang, Shaanxi, Master, Experimentalist, Research focus: aircraft repair and surface technology.

很高的优越性。项忠楠^[15]采用可溶性阳极电刷镀的方法制备了纳米晶 Ni-Fe 合金镀层。镀液为氨基磺酸盐体系,主要成分为: $\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 420 g/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 47.5 g/L, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 10 ~ 30 g/L。阳极使用纯度为 99.99% 的镍板,镀液 pH 值为 3.0,并控制可溶性金属阳极电位,实现在阳极上只发生金属溶解的氧化反应。制备的 Ni-Fe 合金镀层具有典型的纳米晶结构,且为单相(γ -Fe, Ni)面心立方固溶体结构,随着含 Fe 量的增加,镀层的晶粒尺寸减小,硬度增加。合金元素 Fe 在 Ni-Fe 合金镀层中起到固溶强化和细化晶粒的作用。所制备的纳米晶 Ni-13.49% Fe 合金镀层组织结构均匀致密,晶界处没有明显的孔洞或缺陷,晶界及三叉晶界处的原子错配度小,过渡均匀,其在 3.5% NaCl 溶液中的耐蚀性优于纳米晶 Ni 镀层。

纳米复合电刷镀层也代表了金属表面防腐的一个新方向。王芹芹^[16]通过电刷镀在 Q235 钢上制备出 Ni-TiO₂ 纳米复合镀层。她将纳米 TiO₂ 粒子按 5, 10, 15 g/L 分别加入到快速镍刷镀液中,并加入微量表面活性剂,配制好的复合镀液先恒温磁力搅拌 30 min,再用超声波振荡 30 min,且在使用过程中一直搅拌。电刷镀以石墨作为阳极,工件为阴极。与纯 Ni 镀层相比, Ni-TiO₂ 纳米复合镀层晶粒更加细小,空隙率更低,采用阳离子表面活性剂分散镀液后所得的镀层效果更为显著。复合镀液中纳米 TiO₂ 质量浓度为 10 g/L 时,复合镀层的耐腐蚀性能最优。随着复合镀液中纳米颗粒含量的增加,镀层形核率增加,所得镀层晶粒细小,耐腐蚀性能提高;但超过一定量时,纳米颗粒团聚严重,对镀层结晶产生不利的影响,如镀层不均匀、孔隙率较大等,镀层的耐腐蚀性能反而降低。

在不锈钢的电刷镀防护方面, TANG 等利用电刷镀工艺在 316L 不锈钢上制备了结合力和耐蚀性良好的钯膜^[17-18]。电刷镀液主要组成为: $\text{Pd}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2$ 12 ~ 20 g/L, NH_4Cl 50 ~ 75 g/L, NH_4HPO_4 60 ~ 80 g/L, $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 40 ~ 60 mL/L。经电净、活化后刷镀,阳极镀液由泵自动输送。钯膜 XPS 分析表明,膜层中的钯为金属态。电刷镀钯膜试样在沸腾的 20% 硫酸溶液和含 0.005 mol/L 溴离子的甲酸+乙酸混合溶液中均显示了非常好的耐蚀性能。钯膜试样的腐蚀速率比不锈钢试样下降了 2 个数量级。

在钢基体表面电刷镀层方面,大多为 Ni 基、Fe 基等镀层,进而发展了电刷镀纳米晶合金镀层、纳米复合镀层,镀层的耐蚀性、均匀性等综合性能有了进一步提高。此外,在钢基上电刷镀获得金属膜层,也是电刷镀技术的新应用。

1.2 铝合金基体表面电刷镀膜层

对于铝合金构件,为了提高其耐蚀性能,通常采用化学转化的方法在表面获得一层转化膜层^[19-22]。TANG^[23]研究了 2024-T3 合金表面电刷镀稀土铈盐转化膜层的工艺和耐腐蚀性能。其镀液的主要成分为 20 ~ 60 g/L $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 0.1 ~ 0.3 g/L NaF, 镀液温度为 20 °C, pH 为 3 ~ 4。试样经电净、清洗、活化后刷镀,刷镀时间 180 s, 电压 6 ~ 7 V。所得膜层经过 120 h 盐雾腐蚀才出现点蚀,盐雾腐蚀 500 h 后出现 1 cm² 的腐蚀面积。而未刷镀稀土铈盐膜的铝合金经中性盐雾腐蚀 24 h 后,就出现严重的点蚀。在 EIS 耐蚀试验中, R_p 随着稀土硝酸铈盐刷镀液 pH 值的增大而增大, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 质量浓度为 60 g/L, pH 值为 7.0 时, R_p 为 $1.0 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。镀层的 XPS 和 EDS 分析可知,硝酸铈盐膜层的主要成分为 Ce(III) 和 Ce(IV) 氧化物。耐蚀性随着镀液 pH 增大而增大,随着铈盐浓度的增加而减小。这是因为随 pH 增大,镀层的微裂纹宽度和密度减小,表现为耐蚀性能增强;而随铈盐浓度的增加,镀层的片状结构也增多,镀层密度和与基体的附着力恶化,因此耐蚀性减小。

为增强膜层与铝基的结合力, HAN^[24]在 TANG^[23]的基础上进一步研究了在 2024-T3 铝合金上电刷镀纳米 TiO₂-稀土铈盐复合膜层。其刷镀工艺参数与文献[23]中的相同,不同的是电刷镀液在加入纳米 TiO₂ 时,需要机械搅拌 1 h,在电刷镀前,该悬浮液至少超声搅拌 0.5 h。电化学极化测试得出,含 2% 纳米 TiO₂ 的复合电刷镀膜层的腐蚀电流密度最小,其值为 $6.29 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$, 纯铈盐电刷镀膜层腐蚀电流密度值为 $148.0 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$, 前者的 R_p 为 $113.0 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 大于后者的 R_p ($1.8 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$)。总之,在加入纳米 TiO₂ 后,膜层 Ce(III) 氧化物增多,裂纹较少,孔隙率较小,耐蚀性能大大提高,膜层与 Al 基体的粘着力也显著增加。

电刷镀技术在铝合金基体上的应用研究进展表明,用电刷镀技术代替常规化学转化膜技术在铝合金基体上获得转化膜层,拓宽了电刷镀技术的应用范围。其区别于常规化学转化膜工艺的特别之处在于,可在镀液中加入纳米粒子,获得纳米复合膜层,使铝合金的防护性能得到明显提高。

2 耐磨电刷镀层的应用

2.1 耐磨纳米复合电刷镀层

在耐磨应用研究方面,合金电刷镀层在替代镀铬方面有很大的优势。HUI 研究了 Ni-Fe-W-S 合金电刷

镀层的耐磨性能^[25],结果表明,在高负荷、无润滑的条件下,该合金镀层的耐磨性能远大于电沉积的铬镀层。这是由于摩擦产生的过热,使得镀层磨损区域产生组织相变和沉积硬化,特别是镀层 W 元素的迁移降低了合金镀层的层错能并抑制了疲劳裂纹的产生。

纳米颗粒对复合镀层的性能提高有积极作用,特别是 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 SiC 、 TiO_2 等纳米陶瓷颗粒可明显提高复合镀层的耐磨性能和硬度。陈晓文^[26]采用可溶性镍阳极电刷镀方法,分别在铜片上制备了 Ni-P 纳米晶镀层和 Ni-P-SiC 复合镀层。其镍磷镀液主要成分为: $\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2$ 450 ~ 500 g/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 44 g/L, H_3PO_4 5 ~ 65 g/L。在此基础上加入纳米 SiC 颗粒。研究结果表明,纳米 SiC 的加入没有改变镀层的纳米晶结构,但起到了细晶强化和弥散强化作用,提高了镀层硬度和耐磨性能。YANG^[27]比较了 1045 号钢的纯镍电刷镀层、镍基纳米 Al_2O_3 复合电刷镀层以及镍基 SiC- Al_2O_3 双纳米电刷镀层。结果表明,双纳米 SiC- Al_2O_3 电刷镀层的硬度最高,而纯镍电刷镀层硬度最低;三种镀层中,镍基 SiC- Al_2O_3 双纳米电刷镀层组织光滑,致密,耐磨性能是镍基纳米 Al_2O_3 复合电刷镀层的 1.7 倍,是纯镍电刷镀层的 2.3 倍。双纳米成分的添加,大大提高了复合电刷镀层的耐磨性能。

在固体耐磨层方面,MA 等人^[28]采用电刷镀技术制备了钢构件的镍基 Ni/MoS₂-C 双纳米复合镀层,并研究了其耐磨性能。镍基镀液的主要成分为 264 g/L $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ +23 g/L 柠檬酸氨+氨水,并加入 30 g/L 纳米 MoS₂ 粒子和 25 g/L 纳米 C 粒子,使用机械和化学的方法使得纳米粒子均匀分散。制备的镀层中,纳米粒子均匀分布,纳米 MoS₂ 与纳米 C 粒子显示出良好的协同效应。纳米 C 粒子提高了复合镀层的耐潮湿腐蚀能力,减少了残余应力,提高了镀层的机械性能。在经过长时间的耐潮湿大气、高真空、氧气原子腐蚀环境以及紫外线照射环境试验后,摩擦系数保持为 0.1。该双纳米复合电刷镀层由于纳米 C 粒子的加入,显示出优良的耐磨润滑特性和良好的恶劣环境适应性,特别是在固体耐磨润滑领域有较好的应用前景。

2.2 高温耐磨电刷镀层

Ni-P 合金电刷镀层具有较高的耐蚀性能和抗疲劳性能,LI^[29]对 Ni-P 合金电刷镀层的高温磨损性能进行了研究。直径 60 mm、厚 3 mm 的 20CrMo 钢基体经打磨、电净、活化、预处理后,进行刷镀。镀液主要成分为 50 g/L $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ +50 g/L Na_3PO_3 ,镀笔移动速度为 0.15 m/s。获得的 Ni-P 合金电刷镀层能有效降低试样在高温(450 ℃)下的摩擦系数,减小高温磨损量。

加入纳米粒子的复合电刷镀层,其抗磨损性能、硬

度和耐腐蚀性能均得到提高。为此,MOLLOY^[30]研究了低碳钢基体上的氨基磺酸镍电刷镀层的耐高温性能。在温度加热到 200 ℃时,镀层表面硬度从 565HV 增大到 600HV。200 ℃之后,镀层硬度降低,但仍具有良好的抗拉伸能力。在耐高温复合电刷镀层研究方面,孙伟等^[31]在镀镍溶液中添加纳米 ZrO_2 ,制得了镍基纳米 ZrO_2 电刷镀复合镀层。镀层中的 ZrO_2 纳米颗粒在高温下能抑制镀层晶粒的长大,在 400 ℃热处理后,镀层的最高硬度达到 900HV,其高温耐磨性是基材的 5 ~ 7 倍。

3 电刷镀在维修领域的应用

电刷镀技术适用于受损零部件的修复,显出了很强的生命力,尤其是在飞机维修方面^[32-33],普遍采用金属电刷镀工艺来修理飞机起落架、航空仪表附件、发动机以及精密轴承配合位的尺寸超差等,电刷镀技术以其方便性、实用性、经济性受到了飞机维修行业的青睐。

对于现代飞机而言,由于铝合金优越的耐腐蚀性能和比强度,铝合金构件得到广泛应用。为解决飞机上硬铝材料零件局部损伤后的修复难题,人们将电刷镀技术应用于飞机铝合金构件的修理中^[34]。马宗耀^[35]利用铝合金硫酸阳极氧化原理,选择了电刷镀阳极氧化技术对飞机铝合金蒙皮进行修复。实践证明,电刷镀阳极氧化后实施喷漆,修复的飞机蒙皮表面防腐和装饰效果令人满意,且这种施工方法操作方便,成本低廉,有着良好的实际应用和推广价值。

电刷镀技术在飞机起落架等不锈钢构件维修中也得到大量的应用^[36-37]。飞机在使用过程中,如果作动筒内壁较低位置被磨损或划伤超过标准配合参数,就会漏油,带来飞行安全隐患。以前,对作动筒内壁低层位置轻微损伤,一般采用抛光或研磨修复,若超过标准配合参数,就会报废处理,带来巨大的经济损失。夏成宝^[38]研究了在 30CrMnSiNi2A 高强度钢表面电刷镀纳米 Al_2O_3 /Ni-Cr 复合镀层,通过降低阴极电极电位,增加阴极极化程度,使形成晶核的速度大于晶粒的成长速度,提高了镀层与基体的结合力,所得镀层的硬度、耐磨损能力均满足使用要求。应用该工艺对某型飞机起落架作动筒磨损的内壁进行修复后,镀层硬度和耐磨性与原件相当,节省了资源成本。

直升机采用的齿轮传动式主减速器,由于齿轮啮合处的扭矩非常大,齿面易受损形成微裂纹。针对这一问题,丁丽丽^[39]提出了喷丸-电刷镀复合修复工艺,修复后的主减速器齿轮具有良好的耐磨性、较高的残

余压应力和硬度,经使用表明,采用该复合工艺能有效地延长齿轮的使用寿命 2 ~ 3 倍,具有良好的经济效益。

4 结语

随着电刷镀工艺不断提高,技术设备不断发展,涌现出应用于各种材料的新配方和新工艺技术,而且操作工艺由原来的手工操作向自动化操作发展,开拓了电刷镀技术的应用领域。同时电刷镀技术也由原来在表面维修工程领域的应用,拓展到表面耐蚀及表面耐磨等表面强化领域。近年来,电刷镀复合技术的出现,特别是纳米晶合金电刷镀层、纳米复合电刷镀层、双纳米复合电刷镀层以及电刷镀复合转化膜层等新工艺的涌现,引领了表面工程发展的新方向和新趋势。在现有研究成果的基础上,加强对电刷镀新工艺、新配方和电刷镀层耐蚀、耐磨、强化等防护机理的研究,优化其综合性能,拓宽其应用范围,使电刷镀技术在材料表面防护方面发挥更大的作用,是今后电刷镀技术研究应用的主要方向。

参考文献

- [1] 胡树兵. 纳米复合电刷镀涂层的研究进展[J]. 航空制造技术, 2010(1): 34—39.
HU Shu-bing. Development of Nano-composite Coating with Brush Electroplating[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(1): 34—39.
- [2] LIU B, DONG S Y, XU B S, et al. Coating Thickness Affects Surface Stress Measurement of Brush Electro-plating Nickel Coating Using Rayleigh Wave Approach[J]. Ultrasonics, 2012, 52: 861—865.
- [3] 包容江, 王瑞丽. 电刷镀表面预处理工艺研究[J]. 表面技术, 2010, 39(3): 78—81.
BAO Rong-jiang, WANG Rui-li. Experimental Research on Surface Pretreatment Process in Electro-brush Plating[J]. Surface Technology, 2010, 39(3): 78—81.
- [4] 周仕勇, 沈承金, 史强, 等. 纳米 TiO_2 -Ni 基镀层的电刷镀沉积行为研究[J]. 功能材料, 2011, 42(增 II): 251—254.
ZHOU Shi-yong, SHEN Cheng-jin, SHI Qiang, et al. Deposition Behavior of Nano- TiO_2 /Ni Composite Coating Using Brush Plating[J]. Function Material, 2011, 42(Suppl, II): 251—254.
- [5] 袁庆龙, 凌文丹, 李平. Ni/ Y_2O_3 纳米复合刷镀层组织及性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(增 2): 603—605.
YUAN Qing-long, LING Wen-dan, LI Ping. Microstructure and Properties of Nickel-base Nano- Y_2O_3 Composite Coating Prepared with Electro-brush Plating[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2012, 41(Suppl, 2): 603—605.
- [6] 张虎, 汪刘应, 刘顾, 等. 镍-碳纳米管复合电刷镀层的制备及其性能[J]. 电镀与涂饰, 2012, 31(11): 32—35.
ZHANG Hu, WANG Liu-ying, LIU Gu, et al. Preparation of Electro-brush Plated Nickel-carbonnanotubes Composite Coating and Its Performance[J]. Electroplating & Finishing, 2012, 31(11): 32—35.
- [7] 李卫红, 周细应, 徐洲, 等. 电刷镀 Ni-PTFE 复合镀层工艺研究[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(1): 27—32.
LI Wei-hong, ZHOU Xi-ying, XU Zhou, et al. Study on Technology of Brush Electroplating Ni-PTFE Composite Coating[J]. Electroplating & Finishing, 2008, 27(1): 27—32.
- [8] 赵盟月, 李颖, 位星, 等. Nano-diamond/Ni 复合电刷镀层的组织形貌的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(2): 63—66.
ZHAO Meng-yue, LI Ying, WEI Xing, et al. Research on Themicrostructure of Brush Electroplated Nickel Based Nano-diamond Composite Coating[J]. Diamond& Abrasives Engineering, 2010, 30(2): 63—66.
- [9] 胡振峰, 汪笑鹤, 吕鏢, 等. 自动化电刷镀技术在发动机缸体再制造中的应用[J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 27—30.
HU Zhen-feng, WANG Xiao-he, LV Biao, et al. Automatic Brush Electroplating Technology Applied to Remanufacturing Cylinder Body of Engine[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(4): 27—30.
- [10] 左禹, 韩忠智, 唐筠磊. 铝合金电刷镀稀土转化膜工艺: 中国, 102031548A[P]. 2011-04-27.
ZUO Yu, HAN Zhong-zhi, TANG Jun-lei. Aluminum Alloy Brush Plating Process of Rare Earth Conversion Film: China, 102031548A[P]. 2011-04-27.
- [11] LI X L, WANG X B, GAO R, et al. Study of Deposition Patterns of Plating Layers in SiC/Cu Composites by Electro-brush Plating[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 10294—10299.
- [12] GNANAMUTHU R M, JO Y N, LEE C W. Brush Electroplated CoSn₂ Alloy Film for Application in Lithium-ion Batteries[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 564: 95—99.
- [13] 胡振峰, 董世运, 汪笑鹤, 等. 面向装备再制造的纳米复合电刷镀技术的新发展[J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 87—90.
HU Zhen-feng, DONG Shi-yun, WANG Xiao-he, et al. New Development of Nanocomposite Electro-brush Plating Technique Facing the Equipment Remanufacturing[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(1): 87—90.
- [14] 王敏. 电刷镀技术在防腐蚀中的应用[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2007(2): 56.
WANG Min. The Application of Brush Plating Technology in

- Anti-corrosion[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2007(2):56.
- [15] 项忠楠,戴品强,陈闪闪,等. 电刷镀纳米晶镍铁合金镀层腐蚀特性的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(1): 151.
- XIANG Zhong-nan, DAI Pin-qiang, CHEN Shan-shan, et al. Corrosion Characteristic of Nanocrystalline Ni-Fe Alloy Coating Synthesized by Brush Plating[J]. Rare Metal Material and Engineering, 2009, 38(1):151.
- [16] 王芹芹,沈承金,朱振,等. Ni-TiO₂ 基纳米复合电刷镀层微观结构及腐蚀电化学行为[J]. 表面技术, 2012, 41(1): 13—16.
- WANG Qin-qin, SHEN Cheng-jin, ZHU Zhen. Microstructure and Corrosion Electrochemical Behavior of Ni-TiO₂ Nanocomposite Coating Prepared by Electro-brush Plating [J]. Surface Technology, 2012, 41(1):13—16.
- [17] TANG J L, ZUO Y, TANG Y M, et al. The Preparation of Corrosion Resistant Palladium Films on 316L Stainless Steel by Brush Plating [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204:1637—1645.
- [18] TANG J L, ZUO Y, TANG Y M, et al. Composition and Corrosion Resistance of Palladium Film on 316L Stainless Steel by Brush Plating[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22:97—103.
- [19] ZHAO D, SUN J, ZHANG L L, et al. Corrosion Behavior of Rare Earth Cerium Based Conversion Coating on Aluminum Alloy[J]. Rare Earths, 2010, 28(9):371.
- [20] DABALA M, ARMELAO L, BUCHBERGER A, et al. Cerium-based Conversion Layers on Aluminum Alloys[J]. Applied Surface Science, 2001, 172:312—322.
- [21] HU J, ZHAO X H, TANG S W, et al. Corrosion Resistance of Cerium-based Conversion Coatings on Alumina Borate Whisker Reinforced AA6061 Composite[J]. Applied Surface Science, 2007, 253:8879.
- [22] YU X W, CAO C A, YAO Z M, et al. Corrosion Behavior of Rare Earth Metal (REM) Conversion Coatings on Aluminum Alloy LY12 [J]. Material Science and Engineering, 2000, A284:56—63.
- [23] TANG J L, HAN Z Z, ZUO Y, et al. A Corrosion Resistance Cerium Oxide Based Coating on Aluminum Alloy 2024 Prepared by Brush Plating[J]. Applied Surface Science, 2011, 257:2806—2812.
- [24] HAN Z Z, ZUO Y, JU P F, et al. The Preparation and Characteristics of a Rare Earth/nano-TiO₂ Composite Coating on Aluminum Alloy by Brush Plating[J]. Surface Coatings Technology, 2012, 206:3264—3269.
- [25] HUI W H, LIU J J, CHANG Y S, et al. A Study of Wear Resistance of a New Brush-plated Alloy Ni-Fe-W-S [J]. Wear, 1996, 192:165.
- [26] 陈晓文,戴品强,何斌,等. 可溶性阳极电刷镀纳晶 Ni-P-SiC 复合镀层的耐磨损性能[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(12):17—24.
- CHEN Xiao-wen, DAI Pin-qiang, HE Bin, et al. Wear Resistance of Nanocrystalline Ni-P-SiC Composite Coating Produced by Brush Plating Using Soluble Anode[J]. Electroplating & Finishing, 2008, 27(12):17—24.
- [27] YANG H, DONG S Y, XU B S. Microstructure and Properties of Brush Electroplated Nano-SiC-Al₂O₃/Ni Composite Coating [J]. Key Engineering and Materials, 2008, 373/374: 285—288.
- [28] MA G Z, XU B S, WANG H D, et al. Research on the Microstructure and Space Tribology Properties of Electric-brush Plated Ni/MoS₂-C Composite Coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 221:142—149.
- [29] LI Z M, QIAN S Q, WANG W, et al. High-temperature Tribological Properties of Ni-P Alloy Coatings Deposited by Electro-brush Plating[J]. Rare Metals, 2011, 30(6):669.
- [30] MOLLOY D A, MALINOV S, MCNALLY T, et al. Thermal Study of Selectively Plated Nickel Sulfamate Coatings [J]. Progress in Organic Coatings, 2011, 70:330—335.
- [31] 孙伟,张覃轶,黄尚宇. 复合刷镀 Ni-ZrO₂ 工艺与性能研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(4):11—13.
- SUN Wei, ZHANG Qin-yi, HUANG Shang-yu. A Study on the Technology and Property of Brush Plated Nickel-Zirconium Dioxide Composite Coating[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(4):11—13.
- [32] 冯春晓,刘鑫卿,姚武文. 航空液压油泵的电刷镀修复工艺[J]. 航空制造技术, 2002(7):72—74.
- FENG Chun-xiao, LIU Xin-qing, YAO Wu-wen. Restoring Process of the Aviation Hydraulic Oil Pump by Electric Brush Plating [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002(7):72—74.
- [33] 唐义号,熊丽芳,熊哲,等. 电刷镀再制造技术快速修复缺陷零件应用研究[J]. 直升机技术, 2011, 167(2):49—55.
- TANG Yi-hao, XIONG Li-fang, XIONG Zhe, et al. Application Research of Quick Repairing Parts with Defects by Brush Plating Technology [J]. Helicopter Technique, 2011, 167(2):49—55.
- [34] 葛文军,夏成宝,王东峰. 飞机硬铝构件表面划伤的电刷镀快速修复[J]. 材料保护, 2009, 42(8):64—65.
- GE Wen-jun, XIA Cheng-bao, WANG Dong-feng. Rapid Restoration of Scuffed Surface of Aircraft Parts Made of Hard Aluminum by Brush Electroplating [J]. Material Protection, 2009, 42(8):64—65.
- [35] 马宗耀,谢发勤,费敬银,等. 飞机蒙皮表面氧化膜快速电刷阳极氧化修复[J]. 电镀与精饰, 2007, 29(6):38—39.
- MA Zong-yao, XIE Fa-qin, FEI Jing-yin, et al. Rapid Brush Anodizing Repair of Airplane Outer Cover Surface Oxide Film [J]. Plating & Finishing, 2007, 29(6):38—39.

- 107.
- [9] 张卫东,冯小云,孟秀兰,等. 国外隐身材料研究进展[J]. 宇航材料工艺,2000(3):1—5.
- ZHANG Wei-dong, FENG Xiao-yun, MENG Xiu-lan, et al. Status and Development of Foreign Study on New Stealthy Materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2000(3): 1—5.
- [10] 邵蔚,赵乃勤,师春生,等. 吸波材料用吸收剂的研究及应用现状[J]. 兵器材料科学与工程,2003,26(4):65—68.
- SHAO Wei, ZHAO Nai-qin, SHI Chun-sheng, et al. Current Status of Development and Applications of Absorbers Used in Microwave-absorbing Materials [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(4): 65—68.
- [11] 穆武第,程海峰,唐耿平,等. 添加导电纤维对羰基铁粉吸波性能的影响[J]. 材料科学与工程学报,2005,23(4):557—560.
- MU Wu-di, CHENG Hai-feng, TANG Geng-ping, et al. Effect of Addition of Electrical Conductive Fiber on Radar Absorbing Property of Carbonyl Iron Powder [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005, 23(4): 557—560.
- [12] 周永江,程海峰,陈朝辉,等. 羰基铁粉吸波涂层的优化设计[J]. 材料工程,2006(增刊1):236—242.
- ZHOU Yong-jiang, CHENG Hai-feng, CHEN Zhao-hui, et al. Optimum Design of Microwave Absorbing Coating Containing Carbonyl Iron Powder [J]. Journal of Materials Engineering, 2006(Supplement 1): 236—242.
- [13] TAN Y J, TANG J H, DENG A M, et al. Magnetic Properties and Microwave Absorption Properties of Chlorosulfonated Polyethylene Matrices Containing Graphite and Carbonyl-iron Powder [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013, 326: 41—44.
- [14] 童国秀,官建国,张五一,等. 纳米铁纤维与羰基铁粉共混制备轻质宽带吸波涂层材料[J]. 金属学报,2008,44(8):1001—1005.
- TONG Guo-xiu, GUAN Jian-guo, ZHANG Wu-yi, et al. Preparation of Light Radar Absorbing Materials With Broad Bandwidth by Mixing Iron Nanofibers With Carbonyl Iron Particles [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(8): 1001—1005.
- [15] MAKELA T, PIENIMAA S, TAKA T, et al. Thin Polyaniline Films in EMI Shielding [J]. Synthetic Metals, 1997, 85: 1335—1336.
- [16] ZHANG Z M, WEI Z X, WAN M X. Nanostructures of Polyaniline Doped with Inorganic Acids [J]. Macromolecules, 2002, 35: 5937—5942.
- [17] WONG P T C, CHAMBERS B, ANDERSON A P, et al. Large Area Conducting Polymer Composites and Their Use in Microwave Absorbing Material [J]. Electronics Letters, 1992, 28(17): 1651—1653.
- [18] WOCHNOWSKI C, METEV S. UV-laser-assisted Synthesis of Iodine-doped Electrical Conductive Polythiophene [J]. Applied Surface Science, 2002, 186: 34—39.
- [19] 陈骁,熊忠,陶雪钰,等. 导电聚苯胺的合成及电磁学性能、吸波性能研究[J]. 塑料工业,2005,33(5):5—11.
- CHEN Xiao, XIONG Zhong, TAO Xue-yu, et al. Studies of Synthesis, Electromagnetic Property and Microwave Absorptivity of Polyaniline (PANI) by Different Methods [J]. China Plastics Industry, 2005, 33(5): 5—11.
- [20] TRUONG V T, RIDDELL S Z, MUSCAT R F. Polypyrrole Based Microwave Absorbers [J]. Journal of Materials Science, 1998, 33: 4971—4976.
- [21] 于仁光,乔小晶,张同来,等. 新型雷达波吸收材料研究进展[J]. 兵器材料科学与工程,2004,27(2):63—67.
- YU Ren-guang, QIAO Xiao-jing, ZHANG Tong-lai, et al. Research Progress of Novel Radar Wave Absorbing Materials [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27(2): 63—67.

(上接第 87 页)

- [36] 夏丹. 襟翼作动筒活塞的电刷镀修复工艺[J]. 材料保护, 2006, 39(5): 71—72.
- XIA Dan. Restoring Process of the Flap Cylinder Piston by Brush Plating [J]. Material Protection, 2006, 39(5): 71—72.
- [37] 冯春晓,涂明武,张学民,等. 飞机钢表面修复新工艺研究[J]. 新技术新工艺,2009(7):120—122.
- FENG Chun-xiao, TU Ming-wu, ZHANG Xue-min, et al. Research on the New Technology of Aircraft Steel Surface Repair [J]. The New Technology and New Process, 2009(7): 120—122.
- [38] 夏成宝,杨后川,葛文军. 飞机起落架作动筒内壁 $n\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Ni-Cr}$ 复合电刷镀修复 [J]. 材料保护, 2009, 42(7): 57—58.
- XIA Cheng-bao, YANG Hou-chuan, GE Wen-jun. Repair of Worn Zone on the Internal Surface of Cylinder of Landing Gear by Brush Plating $n\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Ni-Cr}$ Composite Coating [J]. Material Protection, 2009, 42(7): 57—58.
- [39] 丁丽丽,胡进,陈名华,等. 直升机齿轮喷丸-电刷镀复合修复工艺研究[J]. 表面技术,2005,34(6):49—50.
- DING Li-li, HU Jin, CHEN Ming-hua, et al. Composite Techniques of Shot-peening and Brush-plating for Renovating Gears on Helicopter [J]. Surface Technology, 2005, 34(6): 49—50.