

复合电刷镀技术研究进展

周仕勇, 沈承金

(中国矿业大学材料学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 复合电刷镀是在镀液中加入纳米颗粒, 通过纳米颗粒与金属共沉积, 获得更高的硬度、耐磨性、减摩性、耐蚀性和润湿性等优异的特性, 在工业上有着广泛的应用前景。在过去的十多年里复合电刷镀得到了极大的发展, 对于电刷镀工艺和性能表征研究较为深入, 但对镀层形成机理的研究却远远滞后于工艺和性能的研究。本文在综合大量研究工作的基础上, 详细介绍了国内外关于复合电刷镀机理研究的概况, 同时展望了今后复合电刷镀机理研究的发展趋势。

关键词: 复合电刷镀; 机理; 应用; 研究进展

Advances in Composite Brush Plating Technology

Zhou Shiyong, Shen Chengjing

(school of material science and technology, CUMT, Jiangsu XuZhou 221116)

Abstract: Composite brush plating has higher hardness, wear resistance, friction reduction, corrosion resistance and excellent wetting properties, etc, by adding nano particles into the plating solution, nano-particles and by co-deposition of metal; therefore, it has a wide range of applications in industry. In the past decade composite brush plating had a tremendous growth, then it was focused on the brush plating process and characterization in-depth, but the formation mechanism of coatings research has lagged far behind the research process and performance. Based on the comprehensive work on the basis of extensive research, the profile of the domestic and composite brush plating on the mechanism is depicted, while prospecting about the future electric brush mechanism of its development trend.

Keywords: Composite brush plating; mechanism; Research; applications

0 引言

电刷镀技术具有镀液体系多、镀层种类多、设备轻便、工艺灵活、镀覆速度快、镀层质量好、应用广泛的优点, 近年来得到了快速的发展。目前, 刷镀技术也已经从传统的维修领域扩展到表面强化、表面防护和表面装饰等功能性领域^[2-3], 成为再制造行业的一个重要分支。

复合电刷镀是通过阴极还原的基质金属(形成均匀相)和不溶性的固体颗粒(不连续地分散在基体金属中)在基体上共沉积形成。基体金属与不溶性固体颗粒之间的相界面基本上是清晰的, 几乎不发生相互扩散, 但却具备基体金属与不溶性固体颗粒的综合性能^[6]。纳米复合电刷镀^[1,3]是在镀液中加入纳米颗粒, 纳米颗粒的应用, 可获得比普通复合电刷镀层更高的硬度、耐磨性、减摩性、耐蚀性和润湿性等优异的特性, 使复合电刷镀层的功能性得到了更大的提高。研究表明^[4], 纳米复合镀不仅可以提供复合电刷镀层的功能特性还能有效地抑制基体镀层晶粒的长大, 细化晶粒。

到目前为止, 复合电刷镀层已经有了很大的发展, 复合电刷镀层采用的基质金属已从单一金属向多元化合金方向发展, 复合第二相从无机物发展到了有机物, 被镀工件的基体材料也由金属发展到塑料、玻璃甚至木材, 而且获得复合电刷镀层的工艺和方法也在不断的得到

作者简介: 周仕勇, (1986-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 表面工程, 电刷镀和腐蚀与防护
通信联系人: 沈承金, 男, (1964-), 教授, 博士, 主要研究方向: 材料表面工程及金属腐蚀与防护. E-mail: cjshenxz@263.net

完善^[6]。

然而, 现存的复合电刷镀共沉积理论针对性强, 不具有普遍适用性, 沉积机理尚难全面、准确地反映各种镀层的沉积过程。复合刷镀层的动力学过程及其对镀层生长情况的影响尚难以定量描述, 纳米颗粒与基质金属的共沉积过程尚不清楚, 镀层组织与性能的关系等还有待进一步研究, 电刷镀复合电刷镀层的共沉积机理、沉积过程有待研究和探索。

1 复合刷镀的共沉积机理

一般认为, 复合电刷镀过程中固体颗粒与电极的作用过程有三种机理^[5]: 吸附机理、力学机理和电化学机理。

1962 年 Whithers 第一个试图解释微粒复合电沉积现象, 提出了表面带有正电荷的微粒, 在电泳的作用下向阴极移动并与金属离子共沉积, 即电泳吸理。1964 年 Martin 和 Williams 提出当颗粒接触到阴极表面时, 外力作用迫使其停留下来, 从而被正在生长的金属捕获, 即力学机理。在力学机理中, 搅拌强度和颗粒与电极表面的撞击频率在共沉积过程中起主导作用; 1967 年 Brandes 和 Goldthorpe 提出了与机械捕捉理论不同的看法, 认为存在某些能将微粒足够长时间附在阴极上的吸引力, 以便与生长着的金属层共沉积, 这类吸引力可能是一种静电力, 即吸附机理, 吸附过程主要由存在于颗粒与阴极间的范德华力控制; 后来 Guglielmi 将电泳和吸附机制结合起来, 发展了电化学机理。因此, 带电荷的颗粒在电场力的作用下形成的电泳迁移被认为是颗粒进入镀层表面的关键因素。

复合电沉积机理模型主要有 Guglielmi 模型、MTM 模型、运动轨迹模型, 还有 Valdes 模型, Hwang 共沉积模型, Yeh 模型^[5]等, 但都有一定的局限性。其中比较有代表性的是 Guglielmi 模型和运动轨迹模型。

Guglielmi 模型^[5]建立在电化学理论的基础上, 认为复合电刷镀过程经过弱吸附和强吸附过程。表面携带着离子与溶剂分子膜的微粒吸附在电极表面, 这是粒子的弱吸附, 粒子的弱吸附量比较大, 只有小部分弱吸附的微粒可以脱去所吸附的离子和溶剂化膜, 与阴极表面直接接触形成不可逆的电化学吸附, 即强吸附步骤, 这也是整个过程的速度控制步骤。处于强吸附的粒子被沉积的金属原子所包埋并嵌入镀层。此理论以电化学原理为出发点, 更有利于揭示复合电刷镀的实质, 但此理论对于粒径稍大的微粒 ($1\mu\text{m}$ 以上) 并不适用。

运动轨迹模型^[10]则是从共沉积沉积过程中微粒所受各种力的角度来建立的模型。Fransaer 等人运用轨线方程分析微粒在液体流动场中的运动, 借助数字运算求出微粒冲击电极的速度, 若微粒冲击电极表面时受到的法向力大于切向力, 它可滞留于电极表面被金属包埋。法向力和切向力的相对大小决定了微粒滞留在电极表面的概率。此模型在公式的推导过程中设定的限制条件较多, 难以适用于其他体系, 此外该模型对外电场的作用考虑颇少, 在应用中的普遍性也因此受到了限制。

从目前的研究成果可以推测纳米复合电刷镀沉积过程大致如下^[5]:

①镀液中的纳米颗粒和金属离子在镀笔的流体力学作用下, 被传输到阴极表面附近的流体边界层;

②金属离子和纳米颗粒在电场和扩散作用下穿过扩散层到达电极表面;

③金属离子在阴极表面吸附、获得电子、表面扩散并到达晶格生长点、嵌入金属晶格; 与此同时, 纳米颗粒在阴极表面通过静电吸附或特性吸附或机械滞留作用停留, 当包埋到一定比例时 (一般 2/3), 纳米颗粒被永久嵌入金属生长层, 形成纳米复合刷镀层。

④金属离子及纳米颗粒均不断沉积, 镀笔相对运动对进入复合电刷镀层的纳米颗粒粒径

有一定的选择效应,对纳米颗粒在复合电刷镀层中的位置有一定的均匀分布效应。

必须指出的是,以上几种机理研究共沉积过程的角度不同,各有侧重。因此,某种理论只能对共沉积过程中的某些现象给予较好的解释。目前,还没有可以普遍适用于各种复合体系的共沉积理论。

2 复合刷镀的共沉积过程

对于纳米颗粒与基质金属共沉积过程的研究,主要有正反馈择优生长机制、分阶段生长机制。

徐龙堂^[7]依据电刷镀层的树冠状多晶单元的典型形貌,提出了正反馈择优生长机制。认为在电刷镀条件下,由于具有较大的阴极电流密度(通常在 $100\sim 300\text{A}\cdot\text{dm}^{-2}$),镀层金属在阴极析出时,具有较高的过电位,此时被还原的金属离子数量很多,电极表面上形成了大量的吸附原子;在镍镀层沉积初期,优先生成的晶核不只为后续镍离子的沉积提供了核心,它还会造成阴极表面微观上的不平度,产生前面提到的尖端荷电作用;随着电场作用相对增强,优先成核处的镀层生长速度进一步加快,而在新形成的阴极表面会由于空间上沉积速率的差异,发生类似的正反馈过程;最终,每个结晶核心在空间中长成树冠状多晶单元。

蒋斌^[8]对电刷镀 $\text{n-Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ 、 $\text{n-SiO}_2/\text{Ni}$ 、 $\text{n-ZrO}_2/\text{Ni}$ 和 $\text{n-TiO}_2/\text{Ni}$ 复合电刷镀层断面组织分别进行研究,提出了电刷镀镀层分阶段生长机制。认为镀层的生长过程可分为三个阶段:

(1) 均匀生长阶段:活化后基体表面的生长点分布均匀,并且阴极表面状态变化不大,整个阴极表面上镀层沉积速度基本相当。(2) 微凸体形成阶段:随着镀层增厚,镀层表面的生长点分布逐渐趋向不均匀,加之镀层中少量微裂纹等,使阴极表面状态出现较大的变化,镀层在阴极表面各部分的沉积速度存在较大的差异,沉积速度较快的部分形成微凸体。(3) 树枝状晶形成阶段:微凸体的形成使镀层出现树枝状生长趋势,树枝状晶形成是尖端放电现象的结果。

两种生长机制与镀层沉积初期关系密切。正反馈择优生长机制的原因在于镍镀层沉积初期,优先生成的晶核造成阴极表面微观上的不平度,产生尖端荷电作用。分阶段生长机制认为镀层沉积初期,活化后基体表面的生长点分布均匀,整个阴极表面上镀层沉积速度基本相当,是均匀生长的原因,可见沉积初期如果是均匀生长,才有可能得到平整致密的复合电刷镀层,否则镀层按正反馈择优生长机制,得到疏松粗糙的镀层组织。

3 复合镀层的研究进展

复合镀层发展到现在,已经发现,在基质金属中加入不同性质的微粒可以形成不同的复合镀层。特别是加入的微粒尺寸为纳米级时,由于纳米颗粒、纳米纤维及纳米管具有量子尺寸效应、小尺寸效应、表面效应和宏观量子隧道效应等微观效应,使得它呈现出了许多独特的物理和化学性质^[1]。将纳米颗粒复合到镀层中,镀层不但保持原有的性质,同时还将呈现出纳米颗粒的特性,使复合镀层呈现出更加优异的综合性能。

目前复合刷镀层的研究还大多仅限于耐磨、耐高温磨损、抗接触疲劳、自润滑等,尤其是耐磨性高温磨损、抗接触疲劳、自润滑等复合刷镀层研究。下面将按照复合电刷镀层的性能来分别介绍各类纳米复合电刷镀层研究进展。

3.1 耐腐蚀、抗高温的复合电刷镀层

大量的研究表明,采用微纳米级颗粒作为增强相可以大大提高 Ni 基复合镀层的力学性

能, 但对镀层的耐腐蚀性的影响仍然存在较大的争论。

郭文才等^[9]采用电刷镀技术, 利用脉冲换向工艺制得 $n\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ 复合镀层, 比较了镍镀层、脉冲复合镀层和脉冲换向复合镀层的耐腐蚀性能, 探讨了腐蚀机理, 发现: 与其它工艺下获得的镀层相比, 具有细小致密的表面形貌、较小的孔隙率和优异的耐腐蚀性能。

陈闪闪等^[10]人采用浸泡法和电化学方法研究了不同温度低温退火纳米晶 Ni 镀层在 3.5wt.% NaCl 和 5wt.% HCl 溶液中的腐蚀行为。研究发现, 复合镀层由于微粒的嵌入, 使得复合镀层本身与其合金镀层相比较疏松, 孔隙较多; 又由于电沉积过程的不均匀, 较大的应力, 镀层表面产生很多微裂纹, 腐蚀介质会通过这些孔隙或微裂纹进入到基体而发生腐蚀。相反, 复合镀层经过 200°C 热处理, 有利于消除镀层中残留的原子氢, 松弛内应力, 镀层缺陷减少, 从而提高了镀层的耐蚀性。

X. H. Chen^[11]等通过电沉积的方法在碳钢上获得了 CNTs 均匀分布于 Ni 中的复合镀层, 该复合镀层在 3.5% 的 NaCl 溶液中的抗腐蚀能力远远优于纯镍镀层。对于纳米颗粒对复合镀层的抗腐蚀行为的影响, X. H. Chen 则认为, 由于 CNTs 是一种具有良好机械性能和化学稳定性的纳米颗粒, 粒径小, 可以在镀层的缺陷处沉积, 在腐蚀过程中起到了一种物理阻挡的作用, 减缓了复合镀层的腐蚀速度。另一方面, CNTs 的电极电位比 Ni 正, 它们在 Ni 中的弥散分布, 可以使复合镀层的电极电位正移, 因而复合镀层在热力学上受腐蚀的倾向随之下降。

Orlovskaja 研究表明^[12], 当电流密度为 $3\text{A}/\text{dm}^2$ 时, 此时获得的 SiC/Ni 复合电刷镀层在 800°C - 1000°C 具有良好的抗热腐蚀性能, 在 1000°C 下的抗氧化能力远比普通镀镍层强, 其腐蚀量仅为纯镍的 $1/3$ 左右, 因此该复合电刷镀层可用于高温条件下工作的燃气轮机叶片以及高温发动机喷嘴的腐蚀。

3.2 高硬度、高耐磨的复合电刷镀层

电刷镀耐磨纳米复合镀层一般在镍、铜、钴、铬等基质金属中加入硬度较高的 SiC 、 Al_2O_3 、 WC 、金刚石等, 这些粒子具有比基体更高的屈服极限, 耐磨的同时还能起到弥散强化基体的作用。有研究^[13]表明, 当镀液中 WC 的含量达到 $25\text{g}/\text{L}$ 时, 该复合镀层的硬度达到了 918HV 。

谭俊和郭文才等^[14]利用脉冲电刷镀方法制得了 $\text{Ni}/n\text{-SiO}_2$ 复合电刷镀层, 并对镀层进行了表面形貌观察和分析, 测试了镀层的摩擦学性能。与直流条件下快镍镀层和 $\text{Ni}/n\text{-SiO}_2$ 复合电刷镀层相比, 脉冲换向工艺得到的 $\text{Ni}/n\text{-SiO}_2$ 复合电刷镀层, 由于脉冲换向电流的细晶强化和纳米颗粒的弥散强化作用, 使得镀层致密、晶粒尺寸细小、摩擦系数低, 耐磨性能更好。

蒋斌和徐滨士等人^[15]采用电刷镀制备了 $\text{Ni}/n\text{-ZrO}_2$ 纳米复合电刷镀层, 并研究了镀层的接触疲劳特性。结果表明, 复合电刷镀层中的固体颗粒对于镀层晶粒生长具有明显的细化作用, 同时镀层中的多层结构有利于晶体生长时的多次形核, 并阻断了晶粒的合并长大; 含纳米颗粒的复合电刷镀层表面比较细腻, 但镀层脆性较大, 接触疲劳性能不好; 经热处理后, 其接触疲劳性能大大提高。

蒋斌等^[16]利用电刷镀技术制备了纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ 复合镀层, 研究了镀层与 GCr15 摩擦副从室温到 500°C 的微动磨损特性, 并采用扫描电子显微镜观察了磨痕微观形貌。发现镀层的微动运行区域包括部分滑移区、混合区和滑移区; 在微动初期迅速增大的摩擦因数在稳定阶段有所降低; 随着试验温度的上升, 摩擦因数显著降低, 但当试验温度为 500°C 时, 摩擦因

数又有所上升；复合电刷镀层的显微硬度随温度升高而显著下降，导致其抗磨损性能降低。复合电刷镀层在室温下的微动损伤主要表现为剥层，而在 200℃ 以上时主要表现为剥层和粘着。

冶银平和周惠娣等^[4]用常规电刷镀技术制备了镍平均晶粒尺寸为 16nm 的 Ni/n-C 纳米管复合电刷镀层，发现镀层的耐磨性和硬度随镀层的平均晶粒尺寸和微结构有着显著的影响，碳纳米管的弥散强化作用导致镀层晶粒细化和结构致密化，从而有效地改善了镀层的力学性能和耐蚀性。

3.3 减磨自润滑镀层

自润滑复合电刷镀层常由自身具有润滑性能的微粒如 MoS₂、氟化石墨、聚四氟乙烯等固体微粒与 Ni、Cu、Ag、Co 等金属或合金共沉积制备。这类复合镀层摩擦系数小，本身磨损少，可减少或防止粘着磨损，作为滑动零部件的表面，特别在高温、高速作用下，自润滑镀层效果非常理想，在轴承、活塞环、发动机内壁、塑料食品模具方面有着广泛的应用前景。

张贤亮等人^[17]开发了一种新型的 Ni/n-MoS₂ 复合刷镀固体润滑镀层，并在有润滑和干摩擦条件下对镀层的摩擦磨损特性进行了全面研究，发现在镀层中 MoS₂ 层状结构，具有良好的固体润滑特性：油润滑条件下，镀层中 MoS₂ 含量在 11% 左右，具有最佳的摩擦系数和抗摩擦力；在干摩擦条件下，镀层中 MoS₂ 含量在 30% 时，最优耐磨性和摩擦系数。

张玉峰^[18]研究指出，将 PTFE 微粒分散于 Ni 合金中，制得含有 PTFE 的复合电刷镀层，PTFE 微粒 加入可显著提高镀层的减摩、耐磨、抗粘着等性能，其中 PTFE 含量为 20-30% 时，摩擦性能达到最优值。

李屏等^[19]以 Ni-Co-P 为基体，分别制得了含有 MoS₂ 和 PTFE 的复合电刷镀层，添加纳米颗粒的复合镀层的硬度均比纯 Ni-Co-P 镀层低，其摩擦系数分别为 Ni-Co-P 镀层的 77% 和 63%，Ni-Co-P-PTFE 的减摩效果优于 Ni-Co-P-MoS₂ 镀层，相应的磨损量也较低；两者经 400℃ 保温 1h 后，镀层硬度会进一步提高，耐磨性得到改善，主要由于 Ni₃P 的析出。

此外，复合电刷镀层还具有一些特殊的功能。如 WC/Ni、ZrO₂/Ni 和 MoS₂/Ni 等复合电刷镀层，作为电极对 H⁺ 还原具有明显的催化活性，可用于工业电解水和隔膜法制烧碱等电解工艺中；WC/Au、TiC/Au 等复合电刷镀层可用于具有滑动面的各种电接触点上；Al₂O₃/Ag、MoS₂/Ag、TiO₂/Ag、BN/Ag 等复合电刷镀层可明显提高电接触点的耐蚀性能和耐磨性能，可用于电器设备中^[5,22]。

4 复合镀层的应用

近年来，纳米技术飞速发展，大大促进了复合电刷镀技术的发展和應用，特别对目前发展的轻量化、智能化和环保化产品具有重要意义^[2]。电刷镀技术应用日益广泛，如轻工业、机械、电子、电机、造船和航空航天等领域。

(1) 化工方面，利用纳米颗粒高比表面积和高活性，可以显著增进催化效率。常用作石油脱硫催化剂、汽车尾气净化剂、煤炭助燃催化剂等。

(2) 电子工业上^[20]，电子功能材料中主要用于纳米磁记录介质、纳米敏感材料和纳米电磁波、光波吸收材料等；微电子加工和纳米电子器件，前者包括纳米掩膜刻蚀、探针直接书写式纳米加工技术等，后者主要是分子器件、量子电子器件、谐振隧穿器件、单电子器件、超导器件、DNA 和量子计算等。

(3) 半导体纳米材料方面^[21]，近年来，采用电沉积法已经制备了多种优异特性的半导

体纳米材料,例如:光电热电半导体材料,研究还发现氧族半导体金属化合物具有优良的光敏和热敏特性,在太阳能电池、光电管、光电探测器、热电冷却器、能量转换器上有广泛应用。

(4) 医药卫生和生物领域^[22],纳米电沉积制备的纳米小分子,更有利于人体吸收,提高药物的效应,还利用某些金属纳米金属离子是抗菌体和噬菌体,在健康卫生方面有着广阔的应用前景;纳米生物技术应用主要包括生物芯片、纳米探针、生物荧光标记、分子马达和分子纳米筛等。

(5) 环保方面,满足了人们对抗菌、防腐、除味、净化空气等追求,例如纳米材料用于自洁净涂料、光催化消毒剂及污水垃圾处理上。

(6) 机械工业方面^[23],利用纳米材料膜的高强度、高耐磨性、耐高温性和高耐蚀性等方面的特性。采用纳米电沉积对机械关键零部件进行金属表面纳米粉层处理,在制冷制造领域纳米能够获得特殊的力学性质。

5 电刷镀技术的最新进展

(1) 电刷镀设备的新进展^[25]

全自动的电刷镀电源通过计算机控制系统自动调整镀液添加和相对运动,控制金属离子的还原速度和晶粒的长大过程,使得刷镀层的质量更加可靠;逆变式电刷镀电源的出现,为控制刷镀层的质量和推广该技术提供了有利条件。

(2) 电刷镀镀液的新进展^[26]

现有电刷镀镀液的品种不断增多,在新品的开发方面主要集中在合金镀液、复合镀液及非晶态镀液3种不同类型体系,同时多功能、非晶态的纳米材料复合刷镀层将会应运而生。

(3) 电刷镀工艺的新进展^[27]

电刷镀技术与其它表面工程技术的复合运用,是又一个重要的发展方向。电刷镀技术与激光重熔技术结合,可以提高摩擦副的耐磨性;与热喷涂技术结合,可以提高刷镀层的表面光洁度;与减摩技术结合,可以获得十分明显的减摩效果;与钎焊技术结合,可以解决难钎焊金属表面钎焊问题;与计算机工程结合,可发展为智能电刷镀技术。

另外,弥散复合刷镀技术、脉冲刷镀电源和镜面刷镀技术、摩擦喷射电刷镀技术、脉冲静镀工艺技术等,使得镀层性能不但能适应一般工况条件,而且有承受高温氧化、重载、耐蚀的能力^[5]。

6 结语

1. 复合电刷镀是多参数影响的工艺过程,上述沉积机理和数学模型都有一定的局限性;应综合考虑各种工艺参数的影响,得出具有普适性的模型;纳米复合电刷镀机理研究有待进一步深入探讨。

2. 纳米复合电刷镀技术是采用纳米高新技术改造、提升传统电刷镀技术的一个成功范例。采用纳米电刷镀技术制备的复合镀层比传统金属及其合金镀层表现出更优异的综合性能。

3. 纳米电刷镀可以解决再制造过程中传统电刷镀技术无法解决的难题,是再制造工程的关键技术之一,必将在提高机械零部件的可再制造性及再制造产品的质量方面发挥重要作用。

4. 随着科技的不断进步,电刷镀技术必将不断发展,在轻工业、化工、机械、微电子、

电机、造船和航空航天等领域的应用前景将十分广阔。

[参考文献] (References)

- [1] 徐滨士.纳米表面工程[M].北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 屠振密, 李宁, 胡会利等.电沉积纳米晶材料技术[M].北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] 蒋斌, 徐滨士.纳米复合电刷镀层的研究现状.材料保护, 2002,35 (2): 1-3.
- [4] 冶银平, 周慧娣, 陈建敏.电刷镀镍/碳纳米管镀层的结构与摩擦性能.稀有金属材料工程, 2006,35 (10): 1643-1646.
- [5] 郭鹤桐, 张三元编.复合镀层[M].天津: 天津大学出版社, 1991.1-13.
- [6] 宾胜武. 刷镀技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 29-39.
- [7] 徐龙堂.电刷镀镍基含纳米粉复合电刷镀层性能、结构和共沉积机理[D].北京: 北京工业大学, 2000.
- [8] 蒋斌, 徐滨士, 董世运, 欧忠文. 电刷镀纳米颗粒复合电刷镀层的组织与沉积过程.表面工程, 2005, 34 (3): 16-17.
- [9] 郭文才, 谭俊, 杨红军. 脉冲换向电刷镀 Ni/n-Al₂O₃ 复合镀层的耐腐蚀性能研究.腐蚀与防护, 2006, 27 (2) .
- [10] 陈闪闪, 戴品强, 郑贞, 洪永志.低温退火对电沉积纳米晶 Ni 镀层耐蚀性的影响.材料科学与工程学报, 2009, 27 (4): 607-609.
- [11] X.H. Chen, C.S. Chen. Corrosion behavior of carbon nanotubes–Ni composite coating. Surface & Coatings Technology, 191(2005):351–356.
- [12] L. Orlovskaja, N.Periene, M.Kurtinaitiene, et.al. Ni–SiC Composite Plated under a Modulated Current [J]. Surface and Coating Technology 1999, (111):234-239.
- [13] 于锦, 李汉, 魏忠鼎, 单颖会 董杨.电刷镀 Ni-P / 纳米 WC 复合镀层工艺及性能研究. 材料保护, 2008(10): 51-53.
- [14] 谭俊, 郭文才, 徐滨士, 杨红军.脉冲换向电刷镀镍基纳米 SiO₂ 复合镀层的耐腐蚀性能研究.腐蚀与防护学报, 2006,26 (4)
- [15] 蒋斌, 徐滨士, 董世运.热处理对 n-ZrO₂ 复合镀层接触疲劳性能影响.金属热处理, 2003,28 (9): 22-25.
- [16] 蒋斌, 徐滨士, 董世运, 欧忠文. 纳米 Al₂O₃/Ni 复合电刷镀层的微动磨损特性[J]. 机械工程材料, 2008, 32(5): 15—18.
- [17] 张贤亮, 刘家俊, 朱宝亮.Ni/ MoS₂ 复合刷镀层的摩擦学特性研究.自然科学进展-国家重点实验室通讯, 1992, (2): 117-123.
- [18] 张玉峰.Ni-W-P/PTFE 电刷镀多元复合材料工艺及性能研究[J].电镀与涂饰, 2001, 20(3):1-3.
- [19] 李屏, 刘锦辉, 付华萌.电刷镀 Ni-Co-P-X 复合镀层力学性能.辽宁工程技术大学学报, 2001, 03.
- [20] Leon.O.A,Staia.M.H,Hintermann.H.E.High temperature wear of an electro less Ni–P–BN Composite Coating[J].Surface and Coating Technology,2003,(163):578-584
- [21] Erb.U, Robertson. Advancing micro system technologies the electroplated nanostructures AESF SUR/FIN Conference,2004& Inter finish 2004 world Congress, USA Chicago, July 1:804-820.
- [22] 刘鹏, 童立翔, 杨绮梦.纳米材料电化学制备及应用.电化学, 2006,12 (2): 119-124.
- [23] 梁志杰, 谢凤宽. 电刷镀技术的应用与发展[J]. 工程机械与维修, 2000, 11: 73-74.
- [24] 胡树兵.纳米复合电刷镀涂层的研究进展.航空制造技术, 2010, 1:33-38.
- [25] 丛刚, 谷建. 电刷镀与其它表面技术复合的应用前景广阔[J]. 电刷镀技术, 1999:109-110.
- [26] 梁志杰, 谢凤宽. 电刷镀技术的应用与发展[J].工程机械与维修, 2000,(11):73-74
- [27] 马世宁. 电刷镀技术的新进展[J]. 表面工程, 1997, 34(1): 1-3.