



镍基复合镀层研究的最新进展

顾云飞, 魏守强, 邵忠财

(沈阳理工大学环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

[摘要] 与许多金属或合金镀层相比较, 复合镀层具有耐磨性好、抗高温氧化性能好和电接触好等优点, 其中, 镍基复合镀层是研究最早、应用最广泛的复合镀层之一。综述了镍基复合镀层的沉积机理以及不同镍基复合镀层研究的最新进展, 主要包括耐蚀和防护-装饰复合镀层、耐磨减摩复合镀层、抗高温氧化复合镀层、催化功能复合镀层等, 并概述了其在不同工业中的应用。

[关键词] 镍基; 复合镀层; 共沉积

[中图分类号] TQ153.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2008)04-0057-03

Recent Progress in the Research on Nickel-base Composite Coatings

GU Yun-fei, WEI Shou-qiang, SHAO Zhong-cai

(Environmental and Chemical Engineering College of Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

[Abstract] Comparing with many metals or alloy coatings, the composite coatings have much performance, such as the good wear resistance, the anti-high-temperature oxidation performance and the good electric contact and so on. And the nickel-base composite coating is one of the most early researched and most widespread applied composite coatings. Recent progress in the research on nickel-base composite coatings prepared by electroplating technology was reviewed. These composite coatings include corrosion resistance and protection-decoration compound coating, wear-resisting and reducing friction compound coating, anti-high-temperature oxidation compound coating, catalyzing function compound coating. The deposition mechanism and application of nickel-base compound coating were summarized

[Key words] Nickel-base; Compound coating; Altogether deposits

0 引言

复合镀层是利用金属电沉积法将一种或数种不溶性的固体微粒均匀夹杂在金属镀层中而形成的特殊镀层^[1]。复合镀层与许多金属或合金镀层相比, 具有耐磨性好、抗高温氧化性能好和电接触好等优点。自 1920 年德国科学家第 1 次得到复合镀层以来, 至今复合镀层的研究已取得了巨大发展^[2]。本文主要综述以镍为基质金属, 以无机颗粒、有机颗粒、金属粉、各类纤维和晶须等作为共沉积颗粒而得到的复合镀层的最新进展。

1 复合镀层的沉积机理

复合共沉积有 3 种机理, 即吸附机理、电化学机理和力学机理^[3-6]。根据这 3 种机理, 人们建立了不同模型来表征共沉积过程, 其中 Guglielmi 模型^[7]和运动轨迹模型 (MTM)^[8]最具代表性。综合上述机理和模型, 共沉积过程可分为 3 个阶段: 1) 悬浮

镀液中的纳米颗粒由镀液深处向阴极表面附近输送, 主要动力是搅拌形成的动力场; 2) 纳米颗粒粘附于阴极表面, 其动力学因素复杂, 与颗粒、电极基质金属、镀液、添加剂和电镀操作条件等因素有关; 3) 纳米颗粒被阴极上析出的基质金属牢固嵌入。

尽管复合镀层的发展已有很长的历史, 而且随着其工艺的不断完善与纳米新技术的出现, 性能更加优异的纳米复合镀层也已经开始研究, 但关于复合电沉积机理的研究发展却较慢。目前, 关于第 2 阶段的实质和机理尚无完善的理论解释。有人^[9]认为, 表面呈有效正电荷密度分布的颗粒在电场力等作用下, 到达阴极表面, 并伴随金属离子还原沉积, 经历弱吸附、强吸附和被不断增厚的金属镀层捕获等过程。而且这个过程是一个动态的过程, 因此, 复合镀液中纳米颗粒含量虽大, 但镀层中的纳米颗粒含量并不高。Celis J P 等人^[10]利用统计的方法提出了一个新的复合电沉积数学模型, 推导出了计算镀层中分散相复合量的方法。此外, 对于纳米复合电沉积还有人提出了最优捕获机理^[11]和扩散控制机理^[12]。

2 镍基复合镀层发展概况

在复合电镀中, 镍基复合镀层是研究最早、应用最广泛的镀层之一。1949 年, 美国的 A Simos 获得的第 1 个复合电镀专利

[收稿日期] 2008-03-03

[HTH][作者简介] 顾云飞 (1983-), 女, 蒙古族, 辽宁阜新人, 硕士, 研究方向为金属的表面处理技术。

就是金刚石-镍复合镀层的共沉积方法,这种方法直到今天还在工业上应用。虽然复合镀层很早就已经开始研究,但是直到20世纪70年代才引起重视并得到广泛和深入的发展。例如,1963年Wither在加利福尼亚耐火材料会议上报告了电沉积Ni-Al₂O₃复合镀层,用于强化金刚坯;1964年美国的Superior电镀公司的A K Wood叙述了在电镀镍溶液中加入氧化物、碳化物或金刚石生产内燃机气缸内壁的技术,这种方法与其它生产方法生产的气缸内壁相比,耐磨性能大为改善。

金属镍与不同的分散相粒子复合,可获得不同功能的复合镀层^[13]。如装饰性复合镀层、耐磨减摩复合镀层、抗高温氧化复合镀层、催化功能的复合镀层等。

2.1 耐蚀、防护-装饰性复合镀层

目前应用最多的耐蚀、防护-装饰性复合镀层是镍封、缎面镍,它们已广泛用于室内装饰、汽车和外装件上。缎面镍是含有高岭土、玻璃粉、滑石粉或BaSO₄、Al₂O₃等的镍基复合镀层,其结晶细致、孔隙少、内应力低、耐蚀性好、外观柔和舒适,很大程度上满足了防护性镀层对耐腐蚀性的要求。

据报道,国内阿波罗机电技术开发公司自主开发出了Ni-Al₂O₃纳米复合镀层。经测定,该镀层的耐蚀性比镍镀层提高2级,厚度仅为常规镀层厚度的一半左右就可以达到国家的耐蚀标准^[14]。Benea L等^[15]研究发现,在镀液中加入粒径约20nm大小的SiC微粒后,形成的Ni-SiC复合镀层的腐蚀电位比镍镀层的腐蚀电位高62mV。这是因为此时在Ni-SiC复合镀层表面形成了具有保护作用的SiO₂、Si(OH)₂等腐蚀产物,从而使其耐蚀性明显提高。此外,王健雄等^[16]对碳纳米管镍基复合镀层的耐腐蚀性进行了初步的研究,结果发现:1)碳纳米管的存在增加了镀层表面的致密度,并缩小了镀层孔隙的尺度,腐蚀液难以浸润镀层内微孔,同时由于化学活性很低的碳纳米管缠绕覆盖于晶粒表面,可将腐蚀介质和晶粒隔离,防止腐蚀的进一步加深;2)当Ni和纳米碳管相接触后,作为阳极的Ni发生了阳极极化并促进Ni的钝化,减少其于介质中的腐蚀,从而对基体金属的保护作用增强。所以用复合电沉积方法制得的碳纳米管镍基复合镀层在20% NaOH溶液和3.5% NaCl溶液中的耐蚀性明显优于同条件下的纯镍。另外,由于纳米SiO₂的弥散强化作用,使Ni-SiO₂纳米复合镀层结构致密,空隙率低等,从而提高了镀层的耐蚀性。

2.2 耐磨、减摩性复合镀层

加强材料表面的耐磨和减摩性能是复合镀层的主要研究领域之一。金属的磨损过程是各种摩擦机理综合发生的一种复杂的机械过程。随着近年来对高温摩擦环境耐久性的要求进一步提高,要有效解决耐磨及耐久性的问题,通常采用表面硬化、强化和减小摩擦因数等方法进行处理。

耐磨减摩复合镀层主要是指在电镀金属镀层时,在镀液中加入硬质相微粒,经过热处理后,镀层基体生成金属间化合物,其硬度大幅度提高。由于硬质微粒和金属间化合物的双重作用,这类复合镀层具有很高的硬度,不仅表现出更高的耐磨、减摩性,而且还表现出优良的耐高温、耐腐蚀和抗氧化等能力。目前,随着复合镀层性能的不断优化,它们被广泛应用于航空、航天、机械、采矿等领域。

Al₂O₃纳米颗粒具有很高的硬度,将其加入镀液中,可以使

镀层位错密度提高,从而显著增强镀层的机械性能,而且对于稳定镀层结构非常有效。蒋斌、徐滨士等^[17]制得了具有高硬度的Ni-Al₂O₃复合镀层,其硬度较纯镍镀层可提高50%以上,磨损损失重较纯镍镀层降低60%以上。在镀Ni液中加入SiC纳米粒子得到Ni-SiC复合镀层,由于低浓度SiC(小于2%)能改善材料的延展性,从而使镀层有较强的耐磨性能。程森等^[18]制备了Ni-SiC复合镀层并研究了其摩擦学性能,研究表明Ni-SiC复合镀层的耐磨性能与普通镍镀层相比有较大幅度的提高,在油润滑的条件下磨损体积仅为普通镍镀层的1/8。Garcia I等^[19]在Wats镀液中分别加入SiC与Ni共沉积制备Ni-SiC复合镀层,研究表明,Ni-SiC镀层具有很好的滑动摩擦特性。于爱兵等^[20]研究Ni-Si₃N₄复合镀层的磨损性能,结果表明:在油润滑条件下,复合镀层中的Si₃N₄微粒在支撑载荷的同时,有利于边界润滑膜的形成,避免粘着磨损;同时,由于Si₃N₄微粒本身的结构特征,提高了复合镀层的耐磨性能。薛玉君^[21]对Ni-La₂O₃复合镀层的耐磨性作了研究,可以看出,镍镀层的磨损量大,其耐磨损性能差;复合镀层的耐磨性比镍镀层提高约5倍,显示出优良的耐磨损性能。分析认为,La₂O₃纳米颗粒的加入使镀层的硬度增加,这是由于La₂O₃纳米颗粒的弥散强化作用,不但提高了沉积层的显微硬度,而且使沉积层的抗塑性变形和抑制裂纹扩展能力得到增强,从而减少摩擦面的扩展和剥落,故可避免材料的大量磨损。此外,将纳米碳管加入到镀层中有利于镀层的耐磨、减摩和耐腐蚀等性能。陈小华等^[22]制备出的碳纳米管-镍基复合镀层可以显著改善金属表面的耐磨和减摩性能,扫描电镜结果表明碳纳米管的一端埋于镍基体中,另一端暴露在外,可对基体起到保护作用。由于碳纳米管的超高强度和韧性以及自润滑性能,剥落的碳纳米管覆盖在材料的磨损表面,起到了降低磨损率的作用。除了对上述Al₂O₃、SiC、Si₃N₄、La₂O₃、纳米碳管等复合镀层进行耐磨、减摩的研究外,还可以采用ZrO₂、MoS₂、PTFE、TiC、Cr₃C₂、BN、WC、TiO₂、金刚石、氟化石墨等来制备优良的耐磨减摩复合镀层。

2.3 抗高温氧化复合镀层

抗高温氧化复合镀层要求镀层在高温状态下具有优良的耐磨性或抗氧化性能。在航空航天领域使用的材料需要在冷热交替的环境下工作,并且要求局部能耐800~1000℃的高温氧化,因此对材料抗高温氧化性能有很高的要求,而普通的材料制备工艺无法达到。ZrO₂纳米陶瓷颗粒因其耐高温特性和抗高温氧化性能受到人们的重视。朱荻等^[23]制备了Ni-ZrO₂纳米复合镀层,其抗高温氧化性能明显优于镍镀层。复合镀层表面生成的氧化膜晶粒细小且致密,并且该氧化膜较薄,产生的内应力较小,与基体的粘附性较好,因而表现出较好的抗高温氧化性能。桑付名、成旦红等^[24]对Ni-SiO₂复合镀层进行了高温氧化试验,结果表明,由于Ni-SiO₂复合镀层的表面形成更为完好、稳定的氧化皮,使镀层抗高温氧化性能优于镍镀层。此外,具有耐高温特性和抗高温氧化特性的纳米陶瓷颗粒,如SiC、TiO₂等也被广泛应用于复合镀中,获得了性能更佳的抗高温氧化复合镀层。

2.4 催化功能复合镀层

为了节约能源,人们开发出了具有电催化功能的复合镀层和具有光催化功能的复合镀层。如天津大学研制出Ni-ZrO₂、

Ni-Al₂O₃、Ni-WC、Ni-MoS₂ 等具有电催化功能的复合镀层^[25-26]。Lwakura Chick 等人也报道了 Ni-LaNi₅ 电极具有高的电催化活性,不同温度下,其交换电流密度是 Ni 电极的 16~60 倍。La-Ni 系列储氢合金电极的析氢催化性能是相对较新的研究领域。自 1981 年 T Kitamura 等人发现这类储氢合金具有较高的析氢催化活性以来,对 La-Ni 系合金析氢性能的研究一直受到人们广泛的关注。此外,利用半导体微粒(TiO₂、CdS、ZnO₂、WCO₃ 等)共沉积可以制得具有光催化活性的复合镀层。TiO₂ 光催化剂在过去的 20 年中,已经被证实是在紫外线照射下是一种非常有效的降解有机污染物的方法。但过去都是用热氧化法制备 TiO₂ 光催化剂,因其温度过高,TiO₂ 与金属的膨胀系数不同,会给金属表面的催化膜带来不良的影响。Zhou W Q 等^[27]通过电沉积方法成功获得了具有光催化活性的 Ni-TiO₂ 纳米复合镀层,并与传统的 Ni-TiO₂ 光催化膜进行了比较,发现前者表现出更高的光催化活性,而且不用经过光催化修复过程。利用复合电沉积技术,可将具有催化活性的固体颗粒(Ti、Ru₂、MoS₂、FeS、稀土金属间化合物等)和 Ni 共沉积,制备出具有催化活性功能的复合镀层。

2.5 其他功能复合镀层

在复合镀液中加入硬度较低、自身具有润滑性能的纳米颗粒,如 MoS₂、PTFE、CaF₂、石墨和 BN 等,它们均能与基质金属共沉积,从而获得自润滑镀层^[28]。因其摩擦因数小,镀层本身的磨损少,特别是在高温、高速作用下,效果非常理想。目前,已具有自润滑性优良的 FGM(如 Ni-BN、Ni-PTFE 等)。具有电接触功能的复合镀层要求具有较高的导电性、耐磨性、耐蚀性及较低的接触电阻,在信息产业迅速发展的今天,纳米复合镀在电接触材料中也大有发展前途,不仅可以节约银、金等贵金属,而且可以提高电接触性能。有研究表明,纳米金刚石作为镀层的重要组成部分,可使电接触材料的寿命提高 2 倍以上。此外,某些半导体微粒,如 TiO₂、US 等形成的镍基复合沉积层是一种具有光电转换效应的复合沉积层^[29],在光的作用下沉积层表面可以获得电压和电流响应,因此,它们在许多领域,如光催化降解水及空气中的污染物、光电化学太阳能电池等方面有着广泛的应用前景。另外,利用电沉积技术还开发出具有夜光功能的复合镀层,例如镍基夜光颜料,这些复合材料具有吸光性、结合力强、耐蚀性好、对环境污染小等特点,可用在装饰、广告、节能等工程上。

3 复合镀层的应用

复合镀层是利用镀层各种优异的物理、机械、化学性能来满足各种实际需要,在生产中应用范围很广。目前,基质金属以镍为主,以 SiC、金刚石、MoS₂、PTFE 等为主的增强相,广泛应用于汽车、机械、化工、纺织等行业,如内燃机汽缸内壁、发动机汽缸内衬、汽车轴瓦、口腔科用的钻头及活塞环等。含 SiC 的复合镀层应用于内燃机的接触面,对于提高耐磨性十分有效。1963 年德国开发了商品名为 Nikasil 的 Ni-SiC 复合镀层,在各种往复发动机中用它作汽缸的内衬。PTFE 复合镀层已用于精密仪器构件、塑料与橡胶件的模具、纺织机械等。Ni-PTFE 复合镀层具

有不粘、抗咬合、干润滑性、低摩擦因数以及良好的耐磨抗腐蚀性等优点,已广泛应用于塑料橡胶模具、铝制汽缸、内燃机汽缸器部件等,特别适用于带有深孔、盲眼的形状复杂零件及精密仪器等。在切削刀具上镀覆耐磨复合镀层是延长其寿命的有效方法之一,用复合电沉积法制备金刚石切削工具在我国得到了较广泛的应用。例如^[30],在普通钻头镀液中加入 10g/L 的金刚石微粉,得到 Ni-金刚石微粉复合镀层,可大大提高钻头胎体的耐磨性。复合镀层在电子工业中也有比较重要的应用,主要是用来制备性能优异的电接触材料,如某些电子元件的接插件、印制板插头及电触头等,以满足其对化学稳定性、导电性、可焊性、抗蚀性和耐磨性的要求。例如^[31],WC、TiC 等碳化物微粒的化学稳定性高,因而其复合镀层的耐蚀性、电接触性好,在各种电子仪器、零部件的滑动接触面上都有应用。此外,镍与磷酸盐形成的镍-磷复合沉积层可以用来制造夜晚易于辨识的交通信号及标志,Ni-UO₂ 复合沉积层可在原子能工业中用作核反应堆燃烧元件,镍与硼或硼的化合物形成的复合沉积层则可用作核反应堆的控制材料。

4 结 语

从大量文献报道来看,目前对耐蚀和防护-装饰复合镀层、耐磨减摩复合镀层、耐高温复合镀层的研究不仅数量多,而且也较深入。随着研究的不断深入,对电催化、电接触、光活性、梯度功能材料、荧光材料,以及在储能等领域方面也展开了大量的研究工作。虽然取得了一定的研究成果,但还有许多难题需要解决,电沉积机理还需要进一步深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 王为,郭鹤桐. 纳米复合电镀技术[J]. 化学通报,2003,66(3): 178-179
- [2] 李卫东,周运鸿. 电沉积 Ni 基复合层的应用基础研究[D]. 武汉: 武汉大学,2004. 1-13
- [3] Abdel Hamid Z, Omar A. Development of an electrodeposited nickel polymer composite by a zwitterionic surfactant [J]. Surfactants and Detergents, 2003, 27(6): 163-166
- [4] Aruna S T, William Grips V K. Studies on electrodeposited nickel-yttria deposited composite coatings [J]. Apply Electrochem, 2007, 37(4): 991-1 000
- [5] Alain Robin, Fratar R Q. Deposition and characterization of nickel-niobium composite coatings [J]. Apply Electrochem, 2007, 37(3): 805-812
- [6] 沙建萍,杨玉国. 高频脉冲电镀镍基纳米 SiC 复合镀层的研究[D]. 北京:北京交通大学,2007. 1-18
- [7] Kochergin V, Christophersen M. Surface plasmon enhancement of an optical anisotropy in porous silicon/metal composite [J]. Applied Physics B, 2005, 80(2): 81-87
- [8] Hu F, Chan K C, Song S Z, et al. Enhancement of corrosion resistance of electrodeposited Ni-SiC composites by magnetic field [J]. Solid State Electrochem, 2007, 11(3): 745-750

(下转第 72 页)

2 种喷涂选用大小相同的喷嘴帽进行喷涂,喷涂液体为水,通过图 5 可以明显看出,高压无气喷涂的流量比混气喷涂的流量要大很多。由于在燃料电池膜电极制备中要求出液量少,因此混气喷涂更合适,既达到了比较满意的雾化效果,又可以很好地控制流量。

3 结 论

通过对几种喷涂方法的比较,综合各方面的考虑,并且进行了喷涂试验,最终选用混气喷涂来制作燃料电池膜电极涂层。这样可以减少涂料的损失,降低环境污染,控制流量,有效提高了涂料的雾化效果,提高涂层质量。因此混气喷涂可以作为燃料电池膜电极薄膜制备的一种有效方式。

[参 考 文 献]

- [1] 衣宝廉. 燃料电池的原理、技术状态与展望[J]. 电池工业, 2003, 8(1): 16-22
- [2] 赵群, 张翔, 李辉. 基于燃料电池技术的新能源发展论述[J]. 机械, 2007, 34(7): 1-5
- [3] 田大栓. 燃料电池的特点与应用前景[J]. 煤气与热力, 2006, 26(12): 31-32
- [4] 石肇元, 田建华, 石劲松, 等. PEMFC 膜电极组成及其性能[J]. 化学工业与工程, 2006, 23(5): 389-392
- [5] 张睿, 王留方, 张卫国, 等. 高压无气喷涂的应用[J]. 涂料工业, 2003, 33(5): 33-35
- [6] 辛巧娟. 高压无气喷涂技术在钢桶行业中的应用[N]. 中国包装报, 2006-06-02(3)
- [7] 汪国平. 船舶涂料与涂装技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998. 198-199
- [8] 王春生. 混气喷涂法的原理及应用[J]. 机械工艺师, 1997, (3): 19-20
- [9] 葛学英, 吴海, 陈高林. 混凝土搅拌车的涂装工艺及设备[J]. 山东交通学院学报, 2007, 15(1): 98-102
- [10] 陈朝阳. 静电空气辅助型无气喷涂[J]. 材料保护, 2004, 37(3): 53-54
- [11] 殷顺湖, 王民权. 超声喷雾法工艺及薄膜性能研究[J]. 功能材料, 1998, 29(4): 402-404
- [12] 黄卫星, 高建民, 陈翠英. 超声雾化的研究现状及在农业工程中的应用[J]. 农机化研究, 2007, (3): 154-158
- [13] Li Jianzhong, Tian Yanwen. Studies of the porosity in electroless nickel deposits on magnesium alloy [J]. Applied Surface Science, 2006, 25(2): 2 839-2 846
- [14] Celis J P, Roos J R, Buelens C. A mathematical model for the electrolytic deposition of particles with a metallic matrix [J]. J Electrochem Soc, 1977, 124(10): 1 508-1 515
- [15] 吕柏林. 耐磨复合镀层的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2007, 29(1): 27-31
- [16] 亓新华, 张玉泉, 荆瑞俊. 高硬度耐腐蚀纳米复合镀层的研究现状[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(7): 330-333
- [17] 刘小兵, 王徐承, 陈煜, 等. 复合电沉积的最新研究动态[J]. 电化学, 2002, 9(2): 117-126
- [18] 彭元芳, 赵国鹏, 刘建平, 等. Ni/ α -Al₂O₃ 纳米复合电镀工艺的研究[J]. 电镀与涂饰, 2006, 26(3): 38-41
- [19] Benea L, Bonora P L, Borello A. Effect of SiC size dimensions on the corrosion wear resistance of the electrodeposited composite Coatings [J]. Materials and Corrosion, 2002, 53(2): 23-29
- [20] Wang Jiangxiong, Cheng Xiaohua, Peng Jinghui. A preliminary investigation of the corrosion resistance of Ni-carbon nanotubes composite coating [J]. Corrosion & Protection, 2002, 23(1): 6-10
- [21] 蒋斌, 徐滨士, 董世运, 等. 纳米复合镀层的研究现状[J]. 材料保护, 2002, 35(6): 1-3
- [22] 程森, 王昆林, 赵高敏. 镍基纳米复合镀层的摩擦学性能[J]. 清华大学学报, 2002, 42(4): 516-519
- [23] Gareia I, Fransaeer J, Celis J P. Electrodeposition and sliding wear resistance of nickel composite coatings containing micron and submicron SiC particles [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 148(2/3): 171-178
- [24] 于爱兵, 韩廷水, 韩鹰, 等. 镍基 Si₃N₄ 复合镀层的摩擦磨损特性[J]. 润滑与密封, 2006, 36(4): 67-69
- [25] 薛玉君, 段明德, 李济顺, 等. 纳米和微米 La₂O₃ 颗粒增强镍基复合镀层的摩擦磨损性能[J]. 中国机械工程, 2006, 17(3): 311-314
- [26] 陈小华, 张刚, 李绍禄, 等. 碳纳米管镍基复合镀层的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2003, 3(1): 996-1 000
- [27] 朱荻, 张文峰. Ni-ZrO₂ 纳米复合电镀层的制备及其耐蚀性研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(5): 325-329
- [28] 桑付名, 成旦红. 镍/纳米二氧化硅纳米复合镀层耐腐蚀性能的研究[J]. 化学工业与工程技术, 2004, 25(1): 6-11
- [29] Ming D G, Hou K H, Wang L M, et al. The friction and wear of Ni-P/PTF composite under water lubrication [J]. Materials Chemistry and Physics, 2002, 77(3): 755-764
- [30] Tan J, Yu T, Xu B, et al. Microstructure and wear resistance of nickel-carbon nanotube composite coating from brush plating technique [J]. Tribology Letters, 2006, 21(2): 107-111
- [31] Zhou W Q, Shan D Y, Han E H. Phosphate conversion coating on die-cast AZ91D and its corrosion resistance [J]. Materials Science Forum, 2004, 48(9): 819-822
- [32] 梁平. 镍基自润滑复合镀层的研究进展[J]. 电镀与环保, 2007, 27(1): 1-5
- [33] 李志林, 刘建军, 关海鹰, 等. Ni 纳米 TiO₂ 复合电镀层的制备与性能研究[J]. 材料保护, 2006, 39(1): 20-24
- [34] 汪新衡, 匡建新. 纳米金刚石粉复合镀层耐磨性能及应用[J]. 润滑与密封, 2006, 20(6): 102-104
- [35] 吴化. 耐磨 Ni-Al₂O₃ 复合镀层组织机理及性能研究[J]. 表面技术, 2004, 33(6): 28-30

表面技术杂志

欢迎赐稿 欢迎刊登广告

电话: 68792193 68793154