

# 电化学方法制备金属基复合材料研究进展\*

王周成,倪永金,唐毅

(厦门大学化学化工学院材料科学与工程系,厦门 361005)

**摘要** 金属基复合材料具有高比强度、高比模量、高硬度、耐高温等一系列优点,在现代航空、航天及武器装备等领域具有广阔的应用前景。综述了近年来电化学方法制备金属基复合材料的研究进展,具体介绍了电化学渗浸、连续分步电沉积和复合电沉积 3 种不同的电化学工艺过程。

**关键词** 金属基复合材料 电化学渗浸 连续分步电沉积 复合电沉积

**中图分类号**: T G139

## Research Progress in the Fabrication of Metal Matrix Composites by Electrochemical Methods

WANG Zhoucheng, NI Yongjin, TANG Yi

(Department of Material Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

**Abstract** Metal matrix composites have excellent properties including high specific strength, modulus, hardness and heat resistance and have broad application prospect in the production of modern aircraft and weapon. This article reviews the recent research progress in the fabrication of metal matrix composites by electrochemical methods. Three kinds of methods including electrochemical infiltration, continuous stepped electrodeposition and coelectrodeposition are introduced in detail.

**Key words** metal matrix composite, electrochemical infiltration, continuous stepped electrodeposition, co-electrodeposition

### 0 引言

金属基复合材料问世至今已有 30 余年,它具有优良的综合性能,包括高比强度、高比模量、高硬度等优异的力学性能和耐高温性能,在现代航空、航天及武器装备等领域具有广阔的应用前景。然而,尽管金属基复合材料在航天飞机以及其他一些尖端技术中已经获得应用,但用量很小。近年来,虽然努力在民用领域寻找应用,但终因成本偏高而缺乏与金属等其他材料竞争的优势,因此扩大金属基复合材料的应用在于寻找低成本的制备方法<sup>[1]</sup>。金属基复合材料常用的传统制备方法主要有两种<sup>[2]</sup>,即铸造法和粉末冶金法。制备工艺往往需要高温、高压条件,是制造成本较高的主要原因;另外,在这种条件下,容易引发过量界面反应,产生界面脆性层<sup>[3]</sup>,同时使纤维强度弱化<sup>[4]</sup>,恶化复合材料的力学性能。

电化学方法制备金属基复合材料,是利用电沉积的原理形成金属基体,它具有如下优点<sup>[5]</sup>: 在较低温度( $<100$ )下进行,大大降低了生产成本,可避免界面反应引起的界面脆性层的形成和纤维强度的弱化;设备简单,易于对工艺参数进行精确控制,以得到所要求的制品;对于连续纤维增强金属基复合材料,易于精确控制纤维间距、体积分数,所得复合材料纤维与基体界面结合良好。因此,该法近年来备受关注,成为金属基复合材料制备方法中研究最多的方法之一。

综合近年来的相关文献,用电化学方法制备金属基复合材

料主要采用以下 3 种工艺过程: 电化学渗浸; 连续分步电沉积结合热压处理; 复合电沉积。本文综述了近年来该领域的研究进展。

### 1 电化学渗浸技术

电化学渗浸制备金属基复合材料,所用的增强相一般为纤维或晶须。该技术是先构筑增强体的框架,如将纤维集束或编织成毡,然后浸入镀液中,镀液渗入到框架内部,随着电沉积的进行,金属基体逐渐在框架中形成。

早期研究表明,电化学渗浸方法制备纤维增强金属基复合材料存在一些问题<sup>[4]</sup>。制得的复合材料致密度较低,存在较多残留孔隙;纤维表面沉积不均匀,出现所谓“结饼现象”<sup>[6]</sup>,即纤维束的外层沉积较厚的金属,而束丝中间的纤维却沉积不上,使复合材料的性能不能充分发挥出来;在沉积过程中基体容易掺入杂质,影响复合材料的性能。这些问题限制了电化学方法在纤维增强金属基复合材料制备中的应用。近年来,通过诸多工艺上的改进,在一定程度上解决了上述问题,取得了新的进展。

美国 Stevens 技术研究所的 T. J. Lee 等<sup>[7]</sup>采用电化学渗浸法,合成了 SiC 晶须增强 Ni 基复合材料。通过化学气相沉积法(CVD)在一个石墨衬底上生长出 SiC 晶须“网垫”,然后把这个生长晶须的石墨衬底用作阴极放在电解槽中进行电沉积,采用标准瓦特型 Ni 镀液,镀液渗入到“网垫”内,Ni 沉积于晶须表

\*国家自然科学基金资助项目(20573086)

王周成:男,1963 年生,博士,副教授,主要从事材料电化学研究 Tel:0592-2183904 E-mail:zcwang@xmu.edu.cn

面,形成复合材料。这样获得的含30vol% SiC晶须的复合材料硬度可提高3倍,耐磨性可提高5倍。进一步对电沉积工艺进行改进研究,发现空气搅拌可以有效地提高电解质的传质速率,从而促进致密化过程;其次,采用脉冲电流进行电沉积可大大降低复合材料的孔隙率;另外,晶须经过Sn/Pd表面处理后有利于电解液的渗入,同时使基体均匀地生长于晶须表面,提高致密度。

罗学涛等<sup>[8,9]</sup>将纤维编织成毡,将碱性Cu镀液与甲醛以一定比例配制成电解液,辅以磁力搅拌,采用直流电沉积,分别制备玻璃纤维(预先进行化学镀银,使其表面金属化)、碳纤维及铜纤维增强Cu基复合材料。研究表明,复合材料截面上仅能观察到少量孤立的孔洞,材料比较致密,致密度分别达到98%、97%和95%。3种复合材料的拉伸强度仅略低于经热处理致密化的同种复合材料。由电沉积过程的原理可知,电解液的分散能力以及搅拌作用影响着材料的致密化过程,同时预制体的纤维体积分数和纤维种类对致密化速率也有明显影响。进一步优化电沉积工艺,有望促进致密化过程,使强度进一步提高。因此,在特定的条件下,直接电化学浸渗技术可以制得致密、性能优良的纤维增强金属基复合材料。

## 2 连续分步电沉积结合热压处理技术

电化学渗浸所得复合材料通常残留孔隙较多,而且沉积过程中容易出现纤维表面沉积不均匀的“结饼现象”,为解决该问题,出现了连续分步电沉积技术。这种技术主要应用于连续纤维增强金属基复合材料的制备,将纤维连续地通过若干个镀槽,纤维在行进的过程中,金属同时沉积到纤维表面,最后卷绕而成多孔预制体,经热压处理最终致密化。

王玉林等<sup>[6]</sup>采用连续三步电沉积结合真空热压扩散的工艺制备碳纤维/Cu基复合材料。纤维连续地经过各级镀槽,各级电镀槽内的镀液成分和工艺参数可独自调整。第一步预沉积,采用无氰碱性络合物镀液,该镀液对碳纤维具有良好的润湿性,碳纤维束进入镀液后很快分散,每根纤维都能被溶液浸渍,通过调整工艺参数可提高阴极极化,促进大量析氢,进一步冲散纤维,为铜离子传质打开通道;另外,碱性溶液的电流效率较低,有利于铜离子向丝束中间传质;此外,金属结晶晶粒细小,致密度较高,对纤维表面的附着力强,保证一定的界面结合强度。第二步加厚沉积和第三步成型沉积均选用酸性硫酸铜镀液,采用大电流放电,提高沉积效率。所得的预制体经过后续的热压处理,获得致密、性能优良的复合材料。研究表明,在适当的工艺参数下,金属基体在纤维表面均匀地沉积,可避免“结饼现象”的发生;热处理是最终使复合材料致密化的关键环节,其工艺参数对复合材料的性能有重要影响。

万怡灶等<sup>[10]</sup>系统地研究了热压处理工艺参数(包括热压温度、压力、时间等)、纤维的体积分数及合金元素对复合材料的力学性能的影响。研究表明,在一定纤维体积分数下,采用适当的热处理工艺参数可得到性能优良的复合材料,同时合金元素可以在一定程度上改善复合材料的性能。Z. Zhu等<sup>[11]</sup>采用连续三步电沉积加真空热压扩散的工艺,在一定条件下,制得性能优良的碳纤维/Cu基复合材料。研究表明,当纤维体积分数为35%,热压参数为温度700℃、压力10 MPa、时间10 min时,复合材料的拉伸强度可达680 MPa。另外,王玉林等<sup>[12]</sup>采

用两步连续电沉积加真空热压的工艺制备碳毡/Cu基复合材料,并研究了其导电性及热膨胀系数。研究结果表明,该复合材料仍保持有较高的导电性,在低、中温区通过调整纤维体积分数,可在很宽的范围内( $(3.5 \sim 1.6) \times 10^{-5}$ )改变复合材料的热膨胀系数值。

## 3 复合电沉积技术

复合电沉积是近年来研究较多的电化学方法之一,广泛应用于各种金属基复合材料、复合涂层的制备。复合电沉积制得的金属基复合材料,物理、机械性能良好,具有高的硬度、耐磨性、耐蚀性,低的热膨胀系数和摩擦系数以及梯度功能等,因而该方面的研究十分活跃,进展很快。张欢等<sup>[13]</sup>从应用的角度对近年来复合电沉积的进展情况已作了总结,本文仅对工艺研究进展情况作一些综述。在复合电沉积过程中,镀液中分散相含量、颗粒大小、电流密度、搅拌速度、施镀温度、pH值、添加剂等因素对镀层质量乃至复合材料的性能有重要的影响。

### 3.1 颗粒增强金属基复合材料的复合电沉积

复合电沉积法广泛应用于制备颗粒增强金属基复合材料,其增强相可以是陶瓷颗粒,如SiC<sup>[14~16]</sup>、ZrO<sub>2</sub><sup>[17,18]</sup>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[19]</sup>、MoS<sub>2</sub>等<sup>[20]</sup>;聚合物颗粒,如PTFE、PE等<sup>[21]</sup>;以及金属颗粒,如Ti、Al等<sup>[22]</sup>。

方莉俐等<sup>[23]</sup>对金刚石-金属复合薄膜电沉积的正交实验结果显示,阴极电流密度、搅拌速度、镀液中金刚石含量对沉积物的特性影响较大,pH值、温度影响较不明显,过高或者过低的搅拌速度都不利于金刚石颗粒的共沉积。C. Muller等<sup>[14]</sup>的研究结果也表明,阴极电流密度、镀液中颗粒含量、搅拌速度对沉积层中SiC的复合量有较大影响。J. H. Zhu等<sup>[15]</sup>使用复合电铸技术,制备SiC<sub>p</sub>/Cu基复合材料,研究表明,随着复合材料中SiC复合量的增加,材料的弯曲强度和硬度增加,而热膨胀系数和热传导因子降低。因此,通过控制材料中SiC的含量,可以有效控制复合材料的性能。

将脉冲电流应用于复合电沉积,可改善沉积层的组织形态,并影响复合材料的性能。A. F. Zimmerman等<sup>[16]</sup>采用方波脉冲电流电沉积,制得亚微米级SiC颗粒增强的纳米晶Ni基复合涂层,显微硬度比一般多晶Ni基复合涂层高出2倍。张文峰等<sup>[17]</sup>在研究Ni-ZrO<sub>2</sub>复合电铸层的耐蚀性时发现,脉冲复合电铸层的耐蚀性明显优于相同条件下制备的其他电铸层。F. Hu等<sup>[24]</sup>采用三角形波脉冲电流电沉积,制备SiC颗粒增强Ni基复合涂层,结果表明随平均电流密度增加,Ni晶粒尺寸增大,镀层硬度增加。他们还进一步研究了不同波形脉冲电流作用下的复合电沉积行为<sup>[25]</sup>,对比结果表明,方形波脉冲可产生较高的成核率,形成较小的晶粒,获得较大的SiC复合量。因此,脉冲电流波形在复合电沉积中也是一个重要的工艺参数。

添加表面活性剂对复合电沉积过程也有很大的影响。黄辉等<sup>[26]</sup>对表面活性剂在Ni-SiC复合电沉积中的作用和机理的研究结果表明:阳离子表面活性剂可促进颗粒在镀液中分散,并吸附于颗粒表面,使其带上正电荷,有利于颗粒向阴极移动,促进颗粒与基质金属共沉积,使沉积层中SiC复合量明显增加,硬度增大;非离子表面活性剂可以改变颗粒与基质金属的结合状态,显著提高耐磨性;而阳离子与非离子表面活性剂协同作用能获得粒子复合量高、硬度高、耐磨性能优异的Ni-SiC复合镀层。

M. D. Ger 等<sup>[27,28]</sup>的研究结果也表明,加入表面活性剂CTBA可得到均匀分散的高 SiC 含量的镀液,并对提高 SiC 在沉积层中的复合量有积极的作用,随着表面活性剂浓度的增大,沉积层中 SiC 的复合量增加。

### 3.2 纳米增强相金属基复合材料的复合电沉积

近年来,随着纳米技术和纳米材料的发展,纳米材料被引入作为增强相,如纳米颗粒、纳米晶须、纳米管、纳米纤维等。由于纳米增强相具有的表面效应、体积效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应和一些奇异的光、电、磁等性质,为传统复合电沉积技术带来了新的机遇,可大大改善复合材料的性能,复合电沉积在金属基复合材料制备中得到更加广泛的应用,并越来越受到人们的关注。

薛玉君等<sup>[29]</sup>采用复合电铸工艺,获得了含  $\text{La}_2\text{O}_3$  纳米颗粒的镍基复合电铸层,并对其微观组织及显微硬度进行了分析。研究结果表明,纳米颗粒可使基体金属晶粒细化,随着  $\text{La}_2\text{O}_3$  纳米颗粒共沉积量的增加,复合电铸层表面更加平整,组织也更加细致均匀,基质金属 Ni 的晶粒进一步细化,复合电铸层的显微硬度也随之升高。因此,提高复合电铸层中纳米颗粒的共沉积量,有利于得到具有细晶粒基质金属的复合电铸层,复合电铸可作为获得细晶粒电铸层的有效方法。张文峰等<sup>[19]</sup>的研究结果也表明,镀液中纳米颗粒的悬浮量和阴极电流密度对复合电铸层中纳米颗粒的复合量有着较为明显的影响。纳米颗粒的加入使电铸层的显微组织更加均匀、致密,显微硬度较纯 Ni 镀层有明显提高,同时致密的显微组织也起到了隔离腐蚀介质、有效地阻止腐蚀坑扩大的作用,提高了复合材料的耐蚀性。L. P. Wang 等<sup>[30]</sup>研究了纳米金刚石颗粒对 Ni 基纳米复合涂层的结构及摩擦性能的影响,结果表明,纳米颗粒具有细化晶粒、使显微组织致密化的作用,从而提高了复合涂层的硬度及耐磨性。

纳米晶须、碳纳米管也被用作金属基复合材料的增强相。N. S. Qu 等<sup>[20]</sup>在超声和磁力搅拌下,将  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶须分散于瓦特型 Ni 镀液中,使用脉冲电流进行复合电沉积,制得纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶须增强 Ni 基复合涂层。研究发现, $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶须能够均匀地分散于 Ni 基体中,在适当脉冲参数下,材料显微硬度得到很大提高。X. H. Chen 等<sup>[31,32]</sup>通过复合电沉积制得碳纳米管/Ni 基复合涂层。研究结果表明,沉积层中碳纳米管复合量随镀液中碳纳米管含量、电流密度和搅拌速率的增加而增加,碳纳米管均匀分布于 Ni 涂层中,填充了 Ni 涂层在腐蚀过程中产生的裂缝和空隙,使腐蚀电位正移,抑制了局部腐蚀的发生,提高了涂层的抗蚀性能。

## 4 结语

近年来,尽管电学方法制备纤维增强金属基复合材料存在的一些问题,如残留孔隙,仍没有得到根本的解决,但该领域的研究仍取得一定的进展。首先,直接通过电学渗透技术对电解液组成、添加剂、电流密度等工艺参数进行调整,以及对纤维进行特殊的表面预处理等,获得了致密度较高的复合材料。其次,采用连续分步电沉积技术解决了电沉积过程中的“结饼现象”问题,后续热处理工艺使复合材料最终致密化,在适当的工艺参数下,获得了致密、性能优良的复合材料。今后的研究工作应致力于对现有工艺过程的进一步完善,努力寻找各工艺参数

与复合材料致密度以及性能之间的关系,并进一步开发新的工艺过程,以期克服存在的问题。

采用复合电沉积技术制备颗粒及纳米增强相的金属基复合材料的研究发展迅速。尽管如此,关于复合电沉积机理的研究却远落后于应用方面的研究。复合电沉积的机理不同于传统的单金属的电沉积,在分散相的作用下,沉积动力学发生很大的变化,由于对复合电沉积过程机理认识的不足,在很大程度上限制了该技术的深入发展。进一步的研究工作一方面应集中在制备综合性能更佳、使用范围更广的功能复合镀层以及与新技术的结合;另一方面应加强对复合电沉积机理的研究,以使二者互相促进。

电学方法制备金属基复合材料有显著的优点,该技术正日益受到重视,有望成为降低金属基复合材料制造成本的最佳选择之一。随着工艺的不断改进和研究的不断深入,复合材料的性能将不断提高,应用范围不断扩展。

## 参考文献

- 1 吴人洁. 金属基复合材料的发展现状与应用前景. 航空制造技术, 2001, 3:19
- 2 Kaczmarz J W, Pietrzak K, WoosinAski W. The production and application of metal matrix composite materials. J Mater Proc Techn, 2000, 106:58
- 3 吴人洁. 金属基复合材料的现状与展望. 金属学报, 1997, 33(1):78
- 4 罗学涛, 吴清良, 黄前军, 等. 电学方法制备纤维增强金属基复合材料的初步研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2003, 42(6):746
- 5 万怡灶, 曹阳, 王玉林, 等. 电沉积法制备金属基复合材料的发展动态. 材料导报, 1997, 11(1):64
- 6 王玉林, 刘兆年, 范大楠, 等. 碳/铜复合材料的制备及其对组织性能的影响. 材料工程, 1989, 3:26
- 7 Lee Y J, Sheppard K G, Li Y Q, et al. Synthesis of a nanophase, whisker-reinforced, ceramic/metal composite by electrochemical infiltration. J Mater Sci, 1996, 31(24):6555
- 8 罗学涛, 吴清良, 黄前军, 等. 电学浸渗法制备纤维/铜基复合材料. 复合材料学报, 2003, 20(6):151
- 9 Chen L F, Luo X T, Wu Q L. Electrochemical preparation of fiber-reinforced metallic matrix composites. J Mater Sci Lett, 2003, 22:379
- 10 Wan Y Z, Wang Y L, Luo H L, et al. Effects of fiber volume fraction, hot pressing parameters and alloying elements on tensile strength of carbon fiber reinforced copper matrix composite prepared by continuous three-step electrodeposition. Mater Sci Eng, 2000, A288:26
- 11 Zhu Z, Kuang X, Carotenuto G, et al. Fabrication and properties of carbon fibre-reinforced copper composite by three step electrodeposition. J Mater Sci, 1997, 32:1061
- 12 王玉林, 万怡灶, 曹阳, 等. 碳毡/铜复合材料的制备及其物理性能研究. 材料工程, 1996, 9:14
- 13 张欢, 郭忠诚, 宋日海, 等. 复合电沉积研究的新动向. 电镀与涂饰, 2003, 22(2):29
- 14 Muller C, Sarret M, Benballa M. Ni/SiC composites obtained from an alkaline bath. Surf Coat Techn, 2002, 162:49

(下转第 57 页)

- side-silicon carbide functionally graded composites formed by field-activated synthesis. *J Am Ceram Soc*, 2001, 84(5): 962
- 9 朱文玄, 吴一平, 徐正达, 等. 微波烧结技术及其进展. *材料科学与工程*, 1998, 16(2): 61
- 10 Panneerselvam M, Agrawal A, Rao K J. Microwave sintering of MoSi<sub>2</sub>-SiC composites. *Mater Sci Eng A*, 2003, 356(1-2): 267
- 11 陈朝辉, 张长瑞, 周新贵. 先驱体结构陶瓷. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003. 1
- 12 Wang Hao, Li Xiaodong, Kim Dongpyo. Macroporous SiC-MoSi<sub>2</sub> ceramics from templated hybrid MoCl<sub>5</sub>-polymethylsilane. *Appl Organometallic Chem*, 2005, 19(6): 742
- 13 Lee J I, et al. In situ processing and properties of SiC/MoSi<sub>2</sub> nanocomposites. *J Am Ceram Soc*, 1998, 81(2): 421
- 14 殷声. 燃烧合成. 北京: 冶金工业出版社, 1999. 50
- 15 寇开昌, 杨延清, 艾云龙, 等. MoSi<sub>2</sub>-WSi<sub>2</sub> 复合体系的自蔓延燃烧合成. *稀有金属材料与工程*, 2000, 29(3): 190
- 16 彭可, 易茂中, 冉丽萍. 自蔓延热爆合成 MoSi<sub>2</sub>-WSi<sub>2</sub> 复合粉末. *中国有色金属学报*, 2005, 15(6): 870
- 17 Gao J Y, Jiang W, Wang G. Effect of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the properties of combustion synthesized molybdenum disilicide. *Mater Sci Forum*, 2005, 475-479: 1623
- 18 Jianguang X, et al. Synthesis of pure molybdenum disilicide by the "chemical oven" self-propagating combustion method. *Ceram Int*, 2003, 29(5): 543
- 19 In-Hyuck S, et al. Synthesis of porous MoSi<sub>2</sub> material fabricated by SHS (self-propagating high temperature synthesis) process. *Key Eng Mater*, 2005, 287: 226
- 20 Oh D Y, et al. One step synthesis of dense MoSi<sub>2</sub>-SiC composite by high-frequency induction heated combustion and its mechanical properties. *J Alloys and Compounds*, 2005, 395(1-2): 174
- 21 Peng Chao K, Y Zhong Da. Formation mechanism and nanocrystalline phase transformation of molybdenum disilicide by mechanical alloying. *Nanotechnology*, 2004, 15(7): 851
- 22 马勤, 王翠霞, 薛群基. 钼硅混合粉末在机械合金化过程中的结构演变. *稀有金属材料与工程*, 2003, (3): 170
- 23 Heron A J, Schaffer G B. Mechanical alloying of MoSi<sub>2</sub> with ternary alloying elements. Part 1: Experimental. *Mater Sci Eng A*, 2003, 352(1-2): 105
- 24 Meier S, Heinrich J G. Processing-microstructure-properties relationships of MoSi<sub>2</sub>-SiC composites. *J Eur Ceram Soc*, 2002, 22(13): 2357
- 25 Chakrabarti O, Das P K. Reactive infiltration of Si-Mo alloyed melt into carbonaceous preforms of silicon carbide. *J Am Ceram Soc*, 2000, 83(6): 1548
- 26 张小立, 吕振林, 金志浩. 熔渗反应法制备 MoSi<sub>2</sub>-SiC 复合材料性能的影响因素. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(4): 639
- 27 张小立, 吕振林, 金志浩. 反应熔渗烧结法制备 MoSi<sub>2</sub>/SiC 复合材料. *硅酸盐学报*, 2004, 32(2): 162

(责任编辑 林 芳)

(上接第 53 页)

- 15 Zhu J H, Liu L, Hu G H, et al. Study on composite electroforming of Cu/SiCp composites. *Mater Lett*, 2004, 58: 1634
- 16 Zimmerman A F, Clark D G, Aust K T, et al. Pulse electrodeposition of Ni/SiC nanocomposite. *Mater Lett*, 2002, 52: 85
- 17 张文峰, 朱荻. Ni/ZrO<sub>2</sub> 纳米复合电铸层耐蚀性的研究. *电镀与环保*, 2005, 25(1): 12
- 18 张文峰, 朱荻. 基于电铸技术的 Ni/ZrO<sub>2</sub> 纳米复合材料制备工艺. *硬度金属热处理*, 2004, 29(8): 4
- 19 Qu N S, Chan K C, Zhu D. Pulse co-electrodeposition of nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> whiskers nickel composite coating. *Scripta Materialia*, 2004, 50: 1131
- 20 Chang Y C, Chang Y Y, Lin C I. Process aspects of the electrolytic codeposition of molybdenum disulfide with nickel. *Electrochimica Acta*, 1998, 43(3-4): 315
- 21 杜克勤, 陈慧光, 李娟, 等. 镍/聚四乙烯复合电沉积机理的研究. *大连铁道学院学报*, 2001, 22(3): 96
- 22 Napyoszek-Bilnik I, Budniok A, Yosiewicz B, et al. Electrodeposition of composite Ni-based coatings with the addition of Ti and Al particles. *Thin Solid Films*, 2005, 474: 146
- 23 方莉俐, 张兵临, 姚宁. 金刚石/金属复合薄膜的电沉积规律. *金刚石与磨料磨具工程*, 2005, 1: 36
- 24 Hu F, Chan K C. Deposition behaviour and morphology of Ni/SiC electro-composites under triangular waveform. *Appl Surf Sci*, 2005, 243: 251
- 25 Hu F, Chan K C. Electrocodeposition behavior of Ni/SiC composite under different shaped waveforms. *Appl Surf Sci*, 2004, 233: 163
- 26 黄辉, 林志成. 表面活性剂在 Ni/SiC 复合电镀中的作用及机理. *材料保护*, 1997, 30(1): 14
- 27 Ger M D. Electrochemical deposition of Ni/SiC composites in the presence of surfactants. *Mater Chem Phys*, 2004, 87: 67
- 28 Hou K H, Ger M D, Wang L M, et al. The wear behaviour of electrocodeposited Ni/SiC composites. *Wear*, 2002, 253: 994
- 29 薛玉君, 朱荻, 赵飞. 镍/氧化镧纳米颗粒复合电铸的研究. *机械科学与技术*, 2004, 23(12): 1410
- 30 Wang L P, Gao Y, Xue Q J, et al. Effects of nano-diamond particles on the structure and tribological property of Ni-matrix nanocomposite coatings. *Mater Sci Eng*, 2005, A390: 313
- 31 Chen X H, Cheng F Q, Li S L, et al. Electrodeposited nickel composites containing carbon nanotubes. *Surf Coat Technol*, 2002, 155: 274
- 32 Chen X H, Chen C C, Xiao H N, et al. Corrosion behavior of carbon nanotubes/Ni composite coating. *Surf Coat Technol*, 2005, 191: 351

(责任编辑 何 欣)