doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210107001

ZTA 陶瓷颗粒表面 Ni-TiB, 镀层的制备及工艺优化 *

贺 涵¹ 蒋业华¹ 汝娟坚² 华一新²
(1.昆明理工大学材料科学与工程学院 昆明 650093;
2.昆明理工大学冶金与能源工程学院 昆明 650093)

摘要:为了解决氧化锆增韧氧化铝(ZTA)陶瓷颗粒增强铁基复合材料制备过程中,ZTA陶瓷颗粒与铁基体润湿性差的问题,在ZTA陶瓷颗粒表面镀覆Ni-TiB2镀层。通过化学镀镍及电镀Ni-TiB2两步法,先在ZTA陶瓷颗粒表面化学镀镍得到具有导电性的ZTA@Ni颗粒,再在ZTA@Ni颗粒表面电镀均匀的Ni-TiB2复合镀层。采用XRD对ZTA、ZTA@Ni和ZTA@Ni和ZTA@Ni-TiB2颗粒进行物相分析;使用数码相机和SEM分别对ZTA、ZTA@Ni和ZTA@Ni和ZTA@Ni-TiB2颗粒进行宏观及微观形貌观察;并利用EDS分析镀层中各个元素的质量百分比。分别研究电镀液中TiB2粉末浓度、氯化胆碱-乙二醇(ChCl-EG)浓度及沉积电压3种因素对Ni-TiB2复合镀层的成分及表面形貌的影响。结果表明,在1.8 V的沉积电压下,TiB2粉末掺杂浓度为6g/L,ChCl-EG的浓度为9g/L时,Ni-TiB2复合镀层平整均匀,无孔洞产生,镀层中的TiB2质量百分数可以达到58.22%~64.79%。

关键词: ZTA 陶瓷颗粒; 化学镀; 电镀; Ni-TiB₂ 复合镀层; 低共熔溶剂; 共沉积 中图分类号: TQ153

Preparation and Process Optimization of Ni-TiB₂ Coating on ZTA Particles

HE Han¹ JIANG Yehua¹ RU Juanjian² HUA Yixin² (1. School of Material Science and Engineering,
Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. School of Metallurgical and Energy Engineering,
Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor wettability between the zirconia toughened alumina (ZTA) particles and the iron matrix during the preparation of ZTA particles reinforced iron matrix composite, the surface of ZTA particles is plated with Ni-TiB₂ coating. The Ni-TiB₂ coating is prepared by the two-step method of electroless nickel plating and Ni-TiB₂ electroplating. Firstly, the nickel coating is electroless plated on the surface of ZTA particles to obtain conductive ZTA@ Ni particles, and then the uniform Ni-TiB₂ composite coating is electroplated on the surface of ZTA@ Ni particles. The phases of ZTA, ZTA@ Ni and ZTA@ Ni-TiB₂ particles were analyzed by X-ray diffraction (XRD). In addition, the macro and micro morphologies of ZTA, ZTA@ Ni and ZTA@ Ni-TiB₂ coating are observed by digital camera and scanning electron microscope (SEM). Moreover, the element contents in Ni-TiB₂ coating are investigated by energy disperse spectroscopy (EDS). The effects of TiB₂ powder concentration, choline chloride glycol (ChCl-EG) concentration and deposition voltage in the electroplating bath on the composition and surface morphology of Ni-TiB₂ composite coating are studied, respectively. When the TiB₂ powder doping concentration is 6 g/L, the ChCl-EG concentration is 9 g/L and the deposition voltage is 1.8 V, the flat and uniform coating without pores is obtained, and the weight percentage of TiB₂ in the coating can reach 58. 22%-64. 79%.

Keywords: ZTA particles; electroless plating; electroplating; Ni-TiB₂ composite coatings; deep eutectic solvent; co-deposition

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51571103)。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51571103). 20210101 收到初稿, 20210405 收到修改稿

0 前言

近些年来,陶瓷增强金属基复合材料因其良好 的耐磨性和抗疲劳性能已广泛用于矿物加工和水泥 制造等众多领域^[1-3]。相比于氧化铝,氧化锆增韧 氧化铝(ZTA)陶瓷具有更好的断裂韧性,常被用作铁 基体的增强材料^[46]。但是 ZTA 陶瓷颗粒与铁基体 的润湿性较差^[7-8],使高温下的液态金属无法均匀包 覆 ZTA 陶瓷颗粒,且在不良界面反应的共同作用下, 严重影响基体-陶瓷颗粒的界面强度^[9-10],甚至在界 面处出现孔洞等缺陷。使材料在使用过程中发生陶 瓷颗粒脱落的现象,降低复合材料的使用寿命。

通过对陶瓷颗粒表面进行金属化可以有效地解 决上述问题[11-14]。其中,化学镀因其操作简单且施 镀温度低,可以直接在活化后的非导电表面进行镀 覆已经得到普遍应用[15-16]。然而,由于催化活性和 还原能力的影响,化学镀仅可以制备镍基和铜基等合 金镀层[17-18],并且镀层中对铁基体有益的元素较少。 而电镀可以镀覆的金属及合金种类更多,但要求镀覆 的基体必须具有良好的导电性。因此,将化学镀和电 镀进行结合,首先利用化学镀在陶瓷颗粒表面镀覆一 层金属,再对化学镀覆的陶瓷颗粒进行电镀,可以使 陶瓷这类非导体镀覆的种类大大增加。近些年有研 究表明[19-20],不易熔于高温金属的镀层,可以有效地 保持陶瓷增强体在复合材料中的分散均匀性。而复 合镀层不仅可以满足这一要求,且可以通过共沉积的 方法简单制备[21-23],该方法是在电镀液中加入陶瓷粉 末,在电镀过程中使陶瓷粉末嵌入正在生长的镀层 中,形成复合材料镀层。而在镀覆过程中,常会出现 金属晶粒过大,镀层厚度不均等问题。添加剂的加入 可以有效改善镀层质量,而低共熔溶剂(DES)作为一 种具有低熔点,良好电导率和水化学惰性的绿色环保 溶剂,近年来在镀层制备研究中得到广泛应用^[2426]。

文中针对 ZTA 陶瓷颗粒与铁基体之间润湿性 较差的问题,先将 ZTA 化学镀得到 ZTA@Ni 颗粒, 再在 ChCl-EG DES 作为添加剂的 TiB₂ 悬浮镍镀液 中电镀制备 ZTA@Ni-TiB₂。系统地研究了 TiB₂ 粉 末浓度、ChCl-EG 浓度及沉积电压 3 种因素对 Ni-TiB₂ 复合镀层的成分及表面形貌的影响。并对 TiB₂ 与 Ni 共沉积原理进行了分析。

1 试验准备

1.1 试验材料

ZTA 陶瓷颗粒(颗粒牌号: ZA40), 平均粒径

2.2~2.8 mm (圣戈班(Saint Gobain)集团生产);
TiB₂ 粉体,平均粒径 5~10 μm (上海水田材料科技 有限公司);乙二醇(西陇化工股份有限公司,
98%);其他所有药品纯度均>99%,购自上海阿拉丁 生化科技股份有限公司。

将干燥(T=343 K,t=12 h)后的氯化胆碱和乙 二醇按照摩尔比(ChCl:EG=1:2)进行混合,放置于 油浴锅中,在343 K 恒温,搅拌速率400 r/min 的条 件下搅拌24 h,得到无色透明的氯化胆碱-乙二醇 低共熔溶剂(ChCl-EG)。最后真空干燥,密封备用。

1.2 试验步骤

ZTA@ Ni-TiB₂ 的制备分为 4 个步骤:除油、表面预处理、化学镀镍、电镀 Ni-TiB₂。工艺流程如图 1 所示。



Fig. 1 Process diagram of ZTA@ Ni-TiB $_2$

1.2.1 ZTA 陶瓷颗粒的清洗及表面预处理

首先将 ZTA 陶瓷颗粒用丙酮清洗去除表面油 污。然后采用 Ni(Ac)₂ 活化法^[8] 对 ZTA 陶瓷颗粒 进行表面预处理(即活化与粗化),比例如下:Ni (Ac)₂:NaH₂PO₂:H₂O:C₂H₆O:ZTA = 5:6:4:30: 90 g,温度控制在 458 K,保温 25 min。

1.2.2 ZTA 陶瓷颗粒表面化学镀镍

表1展示了化学镀镍溶液组成及参数。将20g/L活化后的ZTA陶瓷颗粒加入到pH值为10的化学镀镍溶液中,镀液的主要成分是硫酸镍、次亚磷酸钠、硼酸、柠檬酸钠以及氯化胆碱-乙二醇(ChCl-EG)。在338K,150r·min⁻¹的条件下进行化学镀镍,最终得到具有导电性的ZTA@Ni颗粒,以

表1 化学镀镍溶液组成及参数

 Table 1
 Chemical composition of the electroless nickel

 plating bath and operating parameters

Compositions	Experimental conditions
$NiSO_4 \cdot 6H_2O/(g \cdot L^{-1})$	55
$NaH_2PO_2 \cdot H_2O/(g \cdot L^{-1})$	27
$C_6H_5Na_3O_7 \cdot 2H_2O/(g \cdot L^{-1})$	33
$H_3BO_3/(g \cdot L^{-1})$	17
ChCl-EG/ $(g \cdot L^{-1})$	40
ZTA particles/ $(g \cdot L^{-1})$	20
Rotary stirring/ $(r \cdot min^{-1})$	150
Temperature/K	338
pH	10

1.2.3 ZTA@ Ni 陶瓷颗粒表面电镀 Ni-TiB,

表 2 和图 2 分别展示了电镀液组成和参数以 及电镀设备示意图。镍板作为阳极材料,而 ZTA @ Ni 颗粒作为阴极,将颗粒放入不锈钢网中,一方 面可以起到增强导电性的作用,另一方面很好的 将陶瓷颗粒固定,极间距为 3 cm。镀液的主要成 分是硫酸镍、硼酸、TiB₂ 以及氯化胆碱 – 乙二醇 (ChCl-EG)。将镀液搅拌并超声振荡 5 h,使 TiB₂ 悬浮在溶液中。

表 2 电镀 Ni/TiB₂ 溶液组成及参数

 Table 2
 Chemical composition of the electroplate Ni/TiB₂

 plating bath and operating parameters

Compositions	Experimental conditions
$\rm NiSO_4 \cdot 6H_2O/(g \cdot L^{-1})$	190
$H_3BO_3/(g \cdot L^{-1})$	20
$TiB_2/(g \cdot L^{-1})$	2~10
ChCl-EG/($g \cdot L^{-1}$)	6~12
ZTA@ Ni/($g \cdot L^{-1}$)	10
Rotary stirring/ $(r \cdot min^{-1})$	400
Deposition voltage/V	1.6~2.0
Temperature/K	323
Stainless Cathode ZTA@Ni Silicone oil U 2 由链结器元音图	
图 2 电镀装置	冒示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electroplating setup

1.3 试样的表征

采用 XRD(Bruker D8,德国)以 Cu-Kα 靶为激 发源,以 10°min⁻¹ 的扫描速率在 2 θ = 20~90°的范 围内对 ZTA、ZTA@ Ni 和 ZTA@ Ni-TiB₂ 颗粒进行 物相分析;并使用数码相机(Nikon COOLPIX P6000)和 SEM(VEGA3 TESCAN,瑞士)分别对 ZTA、ZTA@ Ni 和 ZTA@ Ni-TiB₂ 颗粒进行宏观及 微观形貌分析。

2 结果与讨论

2.1 Ni-TiB₂ 镀层形貌及物相分析

图 3 展示了 ZTA、ZTA@ Ni 和 ZTA@ Ni-TiB, 颗 粒的宏观及微观形貌。从宏观来看,如图 3a~3c 所 示,未镀覆的 ZTA 陶瓷颗粒呈灰白色;经过化学镀 镍后,ZTA 陶瓷颗粒表面被镍镀层均匀包覆,因此 ZTA@Ni颗粒呈银灰色,并带有金属光泽;而经过电 镀 Ni-TiB, 复合镀层后, 受 TiB, 粉末颜色所影响, ZTA@Ni-TiB₂颗粒呈棕黄色。从微观来看,ZTA 陶瓷颗粒表面较为光滑,有些许的凹坑和凹痕。 经过化学镀镍后,表面被大小为1 µm 左右的球状 Ni 颗粒均匀包裹。从截面也可以看出, Ni 镀层均 匀包覆在 ZTA 陶瓷颗粒的表面,可以使原本不导 电的 ZTA 颗粒具有导电性。再在 ZTA@ Ni 的表面 上进行电镀 Ni-TiB₂ 复合镀层,经过电镀后的表面 如图 3c'所示。ZTA@ Ni 的表面被 TiB2 粉体和 Ni 均匀包裹,从截面图 3c''及图 4 中 Ni-TiB, 镀层各 个元素分布的线扫描结果中可以看出,TiB2嵌入 Ni 镀层。

ZTA、ZTA@ Ni 和 ZTA@ Ni-TiB₂ 颗粒的 XRD 图谱如图 5 所示。由 XRD 图谱可以进一步分析 ZTA@ Ni-TiB₂ 的制备过程,其中图 5a 是 ZTA 陶瓷 的衍射峰,与 t-ZrO₂(PDF#50-1089)、m-ZrO₂(PDF #78-1807)及 Al₂O₃(PDF#10-0173)的标准衍射 峰相对应。经过化学镀镍后,仅有微弱的 ZrO₂ 和 Al₂O₃ 衍射峰,主峰为 Ni (PDF#04-0850)的衍射 峰,如图 5b 所示。说明 X 射线很难穿透 Ni 镀层, 证明 Ni 镀层具有一定的厚度。再经过电镀 Ni-TiB₂ 复合镀层后,如图 5c 所示,只有 Ni 和 TiB₂ (PDF#35-0741)的衍射峰,ZrO₂ 和 Al₂O₃ 的衍射 峰消失。同时由于 TiB₂ 的存在,Ni 的衍射峰强相 应有所减弱,说明 TiB₂ 与 Ni 在 ZTA@ Ni 表面实现 了共沉积。











Fig. 4 Cross-section morphologies and EDS results of Ni-TiB₂ coating



图 5 ZTA、ZTA@ Ni 和 ZTA@ Ni-TiB₂ 颗粒的 XRD 图谱 Fig. 5 XRD patterns of ZTA, ZTA@ Ni and ZTA@ Ni-TiB2 particles

TiB_2 粉末掺杂浓度对 Ni-TiB_2 复合镀层的影响 2.2

图 6 和图 7 分别显示了当 TiB₂ 粉末掺杂浓度 不同时,ZTA@ Ni-TiB₂ 表面形貌的变化和镀层中 TiB₂及Ni的质量百分比变化。当TiB₂粉含量从 2 g/L 增 加 到 6 g/L 时, 镀 层 中 TiB₂ 含 量 由

21.60%增加到 58.22%;随着 TiB₂ 粉的进一步增加,从 6 g/L 增加到 10 g/L,镀层中 TiB₂ 含量增加的趋势变得缓慢,由 58.22%增加到 65.83%。这主要由于当 TiB₂ 含量为 6 g/L 时,镀层表面已经基本被 TiB₂ 粉所占据,如图 6c 所示。因此当 TiB₂ 粉含量进一步增加时,会导致其在垂直于表面的方向生长,此时新的 TiB,粉沉积在原有 TiB₂上,

一部分 TiB₂ 粉滑落,而另一部分 TiB₂ 粉由于来不 及被 Ni 包裹而形成孔洞。并且过多的 TiB₂ 被吸 附在阴极,会导致其有效表面积的增加,从而使得 阴极极化减少,电流集中在 TiB₂ 的尖角处,极易导 致枝晶生长^[27]。因此当 TiB₂ 含量大于 6 g/L 时, 镀层中 TiB₂ 含量增加不明显,甚至会影响镀层的 质量。



图 6 不同 TiB₂ 粉末掺杂浓度的 ZTA@ Ni-TiB₂ 表面形貌(C_{ChCl-EG} = 9 g/L, 1.8 V)

Fig. 6 Surface morphologies of ZTA@ Ni-TiB₂ with different TiB₂ powder doping concentrations (C_{chcl-EG} = 9 g/L, 1.8 V)



2.3 沉积电压对 Ni-TiB₂ 复合镀层的影响

图 8 和图 9 为不同沉积电压下, ZTA@ Ni-TiB₂的表面形貌和镀层中 TiB₂及 Ni 的质量百分比变

化。当沉积电压为 1.8 V 时, 镀层中 TiB, 质量百分 比达到最大值,达到 62.02%,且 TiB2 粉末在镀层表 面分布均匀且密集,如图 8c 所示;从截面来看,如 图 10a 所示, TiB2 粉末被 Ni 紧密地包覆, 形成致密 的镀层。当沉积电压的持续增加时,Ni-TiB₂ 镀层中 TiB₂质量百分比不断下降。这是因为当沉积电压 过小时, Ni²⁺只有极少被还原为 Ni 且还原速率缓 慢,无法及时地将运动到阴极的 TiB₂ 包覆,使 TiB₂ 在阴极沉积较少。而当沉积电压过大时,TiB2同时 在电压及机械搅拌作用下向阴极运动,但 Ni²⁺向阴 极表面移动的速度更快[22],导致其有效浓度增加, 放电反应的电化学速率升高,共沉积镀层中时 Ni 的 含量增加,TiB,含量相应减少。此外,由图 8d 和 e 可以看出,TiB, 沉积的并不均匀, 这是因为在同等 条件下,高电压电流密度过高,易形成高孔隙沉积, 易产生孔洞,如图 10b 所示。

ChCl-EG 浓度对 Ni-TiB₂ 复合镀层的影响 图 11 和图 12 分别显示了当 ChCl-EG 浓度不同



图 8 不同沉积电压下 ZTA@ Ni-TiB₂ 的表面形貌(C_{ChCl-EG} = 9 g/L, C_{TiB2} = 6 g/L)

Fig. 8 Surface morphologies of ZTA@ Ni-TiB₂ under different deposition voltage ($C_{ChCL-EG} = 9 \text{ g/L}, C_{TR2} = 6 \text{ g/L}$)





 $(C_{\text{ChCl-EG}} = 9 \text{ g/L}, C_{\text{TiB2}} = 6 \text{ g/L})$

时,ZTA@Ni-TiB₂ 表面形貌的变化和镀层中TiB₂及 Ni的质量百分比变化。相同电压和TiB₂粉末掺杂 浓度下,当ChCl-EG的浓度为6g/L时,电流为 150mA远小于9g/L时的195mA。因此向阴极运 动的Ni²⁺减小,导致Ni被还原的速率降低,无法及 时地包覆粒径较大的TiB₂粉末,导致镀层中TiB₂ 含量较低,仅有24.48%。而当ChCl-EG的浓度增 加到12g/L时,电流并没有进一步的增加,基本与 9g/L一致,因此TiB₂含量基本没有变化,分别为 62.98%及64.79%。但是当ChCl-EG的浓度为 12g/L时,前期电流的增长速率变慢,当其稳定在 190mA时,需要更长的时间,尽管镀层的表面形貌



(b) Highly porous growth, 1.9-2.0 V

图 10 均匀生长和高孔隙率生长镀层的截面形貌 Fig. 10 Cross-sectional morphologies of uniformly growth and highly porous growth coatings

相似,但其厚度具有明显差别,如图 11b'和 11c' 所示。

2.5 TiB₂ 与 Ni 共沉积原理

第一阶段: 在施加电压及搅拌作用下时, TiB₂ 与 Ni²⁺都向阴极 ZTA@ Ni 的表面运动。而 Ni²⁺运动 速率要更快, 优先接受电子在阴极被还原成 Ni 原 子, TiB₂ 粉体也随之沉积在刚刚被还原的 Ni 原子





Fig. 11 Surface and cross-section morphologies of ZTA@ Ni-TiB₂ with different ChCl-EG concentrations ($C_{\text{TiB}_2} = 6 \text{ g/L}, 1.8 \text{ V}$)







上,此时的 TiB₂ 粉体表面光滑,如图 13a 所示。







第二阶段:当TiB₂粉体一端嵌入Ni原子中,成为阴极的一部分。此时Ni²⁺在TiB₂粉体表面开始还原,如图13b所示。

第三阶段:随着反应的不断进行,Ni²⁺不断被 还原,Ni原子不断包覆 TiB₂ 粉体,并在相邻 TiB₂ 粉体的间隙中沉积,而此时 ChCl-EG 添加剂吸附 在这些更加凸出的位点之上,进而减慢此区域镍 的形核和生长速度,使镍在其他位置加速沉积。 通过不断改变的 ChCl-EG 择优吸附位点和金属镍 的沉积速度,最终得到均匀、致密、平整镀层,如图 13c 所示。

随着反应不断进行,3个阶段不断循环,Ni-TiB₂ 复合镀层的厚度也不断增加。

3 结论

(1) 将活化后的 ZTA 颗粒化学镀得到具有导电性的 ZTA@ Ni 颗粒,再在 ChCl-EG 作为添加剂的 TiB₂ 悬浮镀液中对 ZTA@ Ni 颗粒进行电镀,两步法 制备 ZTA@ Ni-TiB₂ 颗粒。

(2) 在 1.8 V 的沉积电压下, TiB₂ 粉末掺杂浓 度为 6 g/L, ChCl-EG 的浓度为 9 g/L 时, Ni-TiB₂ 镀 层平整均匀, 无孔洞产生, 镀层中的 TiB₂ 质量百分 数可以达到 58.22%~64.79%。

(3) ChCl-EG 倾向于吸附在 TiB₂ 粉末表面凸 起处,阻止金属镍的持续快速形核和生长,最终生成 包覆层连续、均匀且致密的 Ni-TiB₂ 复合镀层。

参考文献

- [1] ALTINKOK N, DEMIR A, OZSERT I. Processing of Al₂O₃/SiC ceramic cake preforms and their liquid Al metal infiltration [J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2003, 34 (7): 577-582.
- [2] 李祖来,蒋业华,周荣,等.WC/铁基表面复合材料的热疲 劳裂纹形成过程[J].复合材料学报,2008,25(2):21-24.
 LI Z L, JIANG Y H, ZHOU R, et al. Process of thermal fatigue crack formation and expansion of WC/iron matrix surface composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25 (2): 21-24. (in Chinese)
- [3] ROSSO M. Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 175(1-3): 364-375.
- [4] LIU Z, XU R, TAN P, et al. Effects of preform aperture/hole wall ratio on the microstructure and properties of ZTA_p/HCCI matrix honeycomb structure composites [J]. Materials Research Express, 2019, 6(12): 1265d9.
- [5] QIU B, XING S, DONG Q, et al. Comparison of properties and impact abrasive wear performance of ZrO₂-Al₂O₃/Fe composite prepared by pressure casting and infiltration casting process[J]. Tribology International, 2019, 142: 105979.
- [6] SUI Y, ZHOU M, JIANG Y. Characterization of interfacial layer of ZTA ceramic particles reinforced iron matrix composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 741: 1169-1174.
- [7] LEÓN C A, DREW R A L. The influence of nickel coating on the wettability of aluminum on ceramics [J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2002, 33(10): 1429-1432.
- [8] RU J, HE H, JIANG Y, et al. Wettability and interaction mechanism for Ni-modified ZTA particles reinforced iron matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 786: 321-329.
- [9] YANG D, QIU F, ZHAO W, et al. Effects of Ti-coating layer on the distribution of SiC_p in the SiC_p/2014Al composites [J]. Materials & Design, 2015, 87: 1100-1106.
- [10] 曹新建,金剑锋,张跃波,等. 陶瓷颗粒表面镀铜对陶瓷颗 粒增强铁基复合材料性能的影响[J]. 材料研究学报,2015, 29(1): 17-24.
 CAO X J, JIN J F, ZHANG Y B, et al. Electroless copper plating on different types of ceramic particles and its effects on mechanical properties of particulate reinforced iron matrix composites[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29 (1): 17-24. (in Chinese)
- [11] OLGUN U, GÜLFEN M, GÖÇMEZ H, et al. Synthesis and room temperature coating of nano ZrB₂ on copper using mechanical roll-milling [J]. Advanced Powder Technology,

2017, 28(9): 2044-2051.

- [12] RU J, JIANG Y, ZHOU R, et al. Preparation of Niencapsulated ZTA particles as precursors to reinforce iron-based composites [J]. Advanced Engineer ing Materials, 2017, 19 (11): 1700268.
- [13] TANG S, GAO Y, LI Y, et al. Preparation and interface investigation of Fe/Al₂O_{3P} composite activated by Ni and Ti⁺
 [J]. Advanced Engineering Materials, 2016, 18: 1913-1920.
- [14] LIU C, YANG Y, LV P, et al. Fabrication of core-shell structured TiC-Fe composite powders by fluidized bed chemical vapor deposition[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(8): 4470-4479.
- [15] 孙跃,万喜伟,姜久兴,等.碳纤维表面化学镀镍前处理工 艺研究[J].中国表面工程,2007,20(5):41-44,49.
 SUN Y, WAN X W, JIANG J X, et al. Study on technique of pretreatment for electroless nickel plating on carbon fiber[J]. China Surface Engineering, 2007, 20(5):41-44,49. (in Chinese)
- [16] 孙华,马洪芳,刘科高,等.前处理工艺对铝基 Ni-P 化学镀层性能的影响[J].化工学报,2010,61(12):3200-3204.
 SUN H, MA H F, LIU K G, et al. Influence of pretreatment on property of electroless plating of Ni-P on aluminum surface[J].
 CIESC Journal, 2010, 61(12): 3200-3204. (in Chinese)
- [17] 刘静,张涛,张曰涛,等. AZ91D 镁合金 Ni-W-P 多层化学 镀层的摩擦磨损及耐腐蚀性能[J]. 中国表面工程,2019, 32(4): 53-62.

LIU J, ZHANG T, ZHANG Y T, et al. Friction, wear and corrosion resistance of multi-layer electroless Ni-W-P coating on AZ91D magnesium alloy[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(4): 53-62. (in Chinese)

- [18] 方东升,孙勇,段永华,等. 芳纶纤维 Ni-P/Ni-Cu-P 双层化学镀的结构与形貌[J]. 化工学报, 2012, 63(12): 4003-4009.
 FANG D S, SUN Y, DUAN Y H, et al. Structure and appearance of double electroless Ni-P/Ni-Cu-P plating of Kevlar fibers[J].
 CIESC Journal, 2012, 63(12): 4003-4009. (in Chinese)
- [19] YANG D, QIU F, ZHAO Q, et al. Excellent compressive strength and ductility of Ti₅Si₃-coated SiC_P/Al2014 composites
 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 698: 1086-1093.
- YANG D, QIU F, ZHAO W, et al. Effects of Ti-coating layer on the distribution of SiC_p in the SiC_p/2014Al composites [J]. Materials & Design, 2015, 87: 1100-1106.
- [21] FRATARI R Q, ROBIN A. Production and character izeation of electrolytic nickel-niobium composite coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(12-13): 4082-4090.
- [22] HASANNAEIMI V, SHAHRABI T, SANJABI S. Fabrication of NiTi layer via co-electrodeposition of nickel and titanium [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 210: 10-14.
- [23] PANEK J, BUDNIOK A. Production and electro chemical characterization of Ni-based composite coatings containing

titanium, vanadium or molybdenum powders [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(14): 6478-6483.

- [24] RU J, HUA Y, XU C, et al. Preparation of porous lead from shape-controlled PbO bulk by in situ electrochemical reduction in ChCl-EG deep eutectic solvent [J]. Applied Surface Science, 2015, 357: 2094-2102.
- [25] ABBOTT A P, BOOTHBY D, CAPPER G, et al. Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: versatile alternatives to ionic liquids[J]. Journal of the American Chemical Society, 2004, 126(29): 9142-9147.
- [26] SEBASTIAN P, GIANNOTTII M I, GOMEZ E, et al. Surface sensitive nickel electrodeposition in deep eutectic solvent [J].
 ACS Applied Energy Materials, 2018, 1(3): 1016-1028.

[27] SRIKOMOL S, JANETAISONG P, BOONYONG MANEERAT Y, et al. Morphology and hardness of electrochemically-codeposited Ti-dispersed Ni-matrix composite coatings [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2014, 59(4): 1287-1292.

E-mail: hehan1008@ foxmail. com

蒋业华,男,1968年出生,教授,博士。主要研究方向为耐磨材料及 复合材料。

E-mail: jiangyehua@ kmust. edu. cn

作者简介: 贺涵,男,1995年出生,博士生。主要研究方向为耐磨材 料及复合材料。