

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170903003

喷射参数对 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层结构及耐磨性的影响

李恒征^{1,2}, 康敏^{1,3}, 张银¹, 牛晓飞², 刘从虎², 金美付^{1,3}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 宿州学院机电学院, 安徽宿州 234000; 3. 南京农业大学江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

摘要: 采用喷射电沉积的方法在不同喷射电压和喷射速度参数下制备了 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层, 并利用扫描电镜、能谱仪、X 射线衍射仪、显微硬度计及摩擦磨损仪等分别对镀层的表面形貌、晶相结构、显微硬度和摩擦因数进行了表征和分析。结果表明: Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层中各元素分布均匀, 除喷射速度为 0.5 m/s 的样本外, 镀层表面无明显纳米颗粒团簇现象; Ni-Co-BN(h) 镀层为晶态结构, 晶粒细小, Ni(111) 和 Co(111) 为其主要生长面, Ni 原子与 Co 原子间形成了单一的 α 相固溶体; 喷射电压和喷射速度参数对 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的表面形貌、显微硬度和自润滑性能等均有影响, 且过低的喷射速度直接影响到镀层的使用寿命; 当喷射电压为 18 V, 喷射速度为 1.5 m/s 时, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的硬度最高, 摩擦因数最低, 镀层表现出较好的减摩和自润滑性能。

关键词: Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层; 喷射电沉积; 显微结构; 显微硬度; 耐磨性

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)02-0103-10

Influences of Jet Parameters on Structure and Wear Resistance of Ni-Co-BN(h) Nanocomposite Coatings

LI Heng-zheng^{1,2}, KANG Min^{1,3}, ZHANG Yin¹, NIU Xiao-fei², LIU Cong-hu², JIN Mei-fu^{1,3}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, Anhui; 3. Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031)

Abstract: Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings were fabricated by jet electrodeposition at different jet voltages and speeds. The surface morphology, crystal structure, microhardness and friction coefficient of the coatings were investigated and analyzed by SEM, EDS, XRD, a microhardness tester and a friction abrasion tester, respectively. The results show that each element in the Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings is distributed uniformly. Except for the sample fabricated at 0.5 m/s, there is no serious nanoparticles cluster phenomena on the coatings surface. The new coatings are crystalline structures with a finer grain size. Ni (111) and Co (111) are the main growth plate and a single phase (α) solid solution is transformed between Ni and Co. The parameters of jet voltage and speed both have influence on the surface morphology, microhardness and self-lubricating properties of Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings. If the jet speed is too low, the service life of the coatings will be reduced significantly. When the parameters are at 1.5 m/s and 18 V, the Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings have the highest microhardness, the lowest friction coefficient and better self-lubricating properties.

Keywords: Ni-Co-BN(h) nanocomposite coating; jet electrodeposition; microstructure; microhardness; wear resistance

收稿日期: 2017-09-03; 修回日期: 2018-02-28

网络出版日期: 2018-03-13 11:50; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180313.1150.004.html>

通讯作者: 康敏 (1965—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 电化学加工技术; E-mail: kangmin@njau.edu.cn

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目 (KJ2017A438); 安徽省教育厅自然科学基金项目 (KJ2016A775)

Fund: Supported by Key Project of Natural Science Research in University of Anhui Province (KJ2017A438) and Natural Science Research Fund of Anhui Provincial Department of Education (KJ2016A775)

引文格式: 李恒征, 康敏, 张银, 等. 喷射参数对 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层结构及耐磨性的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 103-112.

LI H Z, KANG M, ZHANG Y, et al. Influences of jet parameters on structure and wear resistance of Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 103-112.

0 引言

零部件的磨损和腐蚀破坏是工业生产中常见的失效形式之一,如何较大幅度地提高零部件的表面性能一直是表面工程领域相关学者们不遗余力的研究目标^[1-3]。Ni-Co 合金镀层不仅在耐磨耐腐蚀等方面表现优异,而且还具有较好的磁力特性,因此在现代工业中得到了广泛的应用^[4-5]。目前,电化学沉积技术是 Ni-Co 合金镀层的主要制备方法之一,其具有沉积过程可控,镀层厚度均匀,结构致密等优点^[6-7]。有关电化学沉积 Ni-Co 合金镀层性能的研究吸引了不少学者,尤其是 Ni-Co 合金与纳米颗粒共沉积的工艺参数对镀层性能的影响的探讨更是备受关注。JIANG Y C 等^[8]研究表明脉冲频率和占空比能够影响到脉冲电沉积 Ni-Co-ZrO₂ 纳米复合镀层的性能。KARSLIOGLU R 等^[9]研究表明反向脉冲电沉积能够改善和提高 Ni-Co-CNT 纳米复合镀层的性能。WANG Y X 等^[10]研究表明采用溶胶增强工艺可以优化和提高 Ni-Co-TiO₂ 纳米复合镀层显微结构和力学性能。张峻巍等^[11]认为适当的超声波功率对提高电沉积 Ni-Co-Al₂O₃ 镀层性能有所帮助。王立平等^[12]对 Ni-Co/纳米金刚石复合镀层的微观结构和显微硬度进行了研究,并分析了电流密度和镀液 pH 值对抗磨损性能的影响。孙万昌等^[13]研究了镀液中 ZrO₂ 含量对 Ni-Co-ZrO₂ 纳米复合镀层显微硬度和耐磨性的影响,结果表明过高的 ZrO₂ 不利于 Ni-Co-ZrO₂ 镀层性能的提升。

喷射电沉积是以喷嘴为阳极,工件为阴极,镀液从阳极喷嘴喷射到工件表面,在电场的作用下实现电沉积的过程。相比于传统的工件浸没式的电沉积方法,喷射电沉积可以允许更高的过电位和电流密度,镀层沉积速率更快^[14-17],结合数控技术后还可以获得一定形状尺寸精度的镀层,具有较好的应用前景。王猛等^[18]采用喷射电沉积的方法制备了 Co-Cr₃C₂ 复合镀层,并对电流密度,纳米颗粒用量,镀液流量和喷枪的移动速度等参数进行了研究和分析。王颖^[19-21]等利用喷射电沉积的方法在发动机气缸壁表面制备了 Ni-P 合金镀层,并对发动机气缸的表面性能和制备工艺进行了研究。为了研究喷嘴结构对喷射电沉积的影响,王颖^[22]等借助 COMSOL 软件对喷射电沉积的

阳极喷嘴结构做了设计研究。陈超^[23]等利用 CFD 软件对喷嘴流场进行了仿真和试验。张欣颖^[24]等采用建立响应面的方法分析了喷射电沉积的制备工艺对 Ni-P 合金镀层沉积速度、显微硬度和表面粗糙度的影响。但目前采用喷射电沉积的方法制备 Ni-Co 合金镀层的相关研究相对较少,尤其是采用喷射电沉积制备 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层方面的研究更是罕见报导。

文中采用喷射电沉积的方法在不同喷射电压和喷射速度的参数下制备了 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层,分析了喷射电压和喷射速度对 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层耐磨性能的影响,为进一步推动喷射电沉积技术的发展和應用提供了一定的技术基础。

1 试验材料与方法

1.1 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的制备

试验以高纯度镍板为阳极喷嘴,喷嘴喷孔为 10 mm×1 mm 的矩形,工件连接阴极,工件材料为 45 钢,尺寸为 7 mm×8 mm×30 mm。试验中所用药品的纯度等级均为分析纯,基础镀液配制完成后静置 24 h。试验中所使用的 BN(h) 纳米颗粒的尺寸为 100 nm。试验时先将 BN(h) 纳米颗粒放入适量去离子水中超声波分散 5 min 并静置润湿 24 h,然后将润湿后的纳米颗粒悬浮液再次进行超声波分散,分散时间为 20 min。最后将分散后的纳米颗粒悬浮液加入配置好的基础镀液中,并利用 NaOH 和 HCl 将所得溶液 pH 值调节至 4.3。各溶液的配方及用量如表 1 所示。配制好的 Ni-Co-BN(h) 镀液放入恒温水浴箱中进行加热保温,保温温度为 60 ℃。

工件的预处理及镀层制备流程为:清洗工件表面涂覆的防锈油脂→工件打磨抛光→1#电静液去油污(工件接负极,镍板接正极,通电时间为 20 s,通电电流为 1 A)→2#活化液活化(工件接正极,镍板接负极,通电时间为 30 s,通电电流为 0.5 A)→3#活化液活化(工件接正极,镍板接负极,通电时间为 20 s,通电电流为 1 A)→工件表面喷射电沉积 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层(镀液温度为 60 ℃,喷射间隙为 1.6 mm,喷射时间为 20 min,喷嘴相对工件往复运动速度为 135 mm/s)。

表 1 试验所用溶液的组成

Table 1 Composition of the solution used in the experiment

Solution	Composition
1# Electro-hydrostatic / (g·L ⁻¹)	25.0 NaOH+21.7 Na ₂ CO ₃ +50.0 Na ₃ PO ₄ +2.4 NaCl
2# Activate fluid / (g·L ⁻¹)	25.0 hydrochloric acid+140.1 NaCl
3# Activate fluid / (g·L ⁻¹)	141.2 Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ ·2H ₂ O+94.2 H ₃ C ₆ H ₅ O ₇ ·H ₂ O+3.0 NiCl ₂ ·6H ₂ O
Plating solution / (g·L ⁻¹)	200.0 NiSO ₄ ·6H ₂ O+5.0 CoSO ₄ ·7H ₂ O+50.0 NiCl ₂ ·6H ₂ O+30.0 H ₃ BO ₃ + 0.05 sodium dodecyl sulfate+0.002 sulfourea+5.0 BN(h) nanoparticles

1.2 样品表征

采用 S-4800 扫描电镜 (HITACHI) 和 XFlash Detector 5030(BRUKER) 能谱仪对 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的显微形貌和成分组成进行表征。采用荷兰帕纳科公司 X’Pert Power X 射线衍射仪测定镀层的晶相结构。X 射线衍射仪测定参数为 Cu 靶, 射线波长 $\lambda=0.154\ 06\ \text{\AA}$, 加速电压 40 kV, 外加电流 40 mA, 扫描速率 0.33°/min, 扫描角度 10°~90°。采用 HVS-1000 数显显微硬度计 (莱州华银) 测定镀层的显微硬度, 测试负载 50 g, 加载

时间 15 s, 硬度结果取 5 次测定数据的平均值。测定镀层摩擦因数所用仪器为 CFT-1 型材料表面性能综合测定仪 (兰州中科凯华科技)。对摩件是直径为 4 mm 的 GCr15 合金球, 摩擦负载 320 g, 摩擦时间 20 min, 往复摩擦行程 8 mm, 结果取 3 次试验的平均值。

2 结果与讨论

2.1 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的表面形貌

图 1 为不同喷射参数下的 Ni-Co-BN(h) 纳米

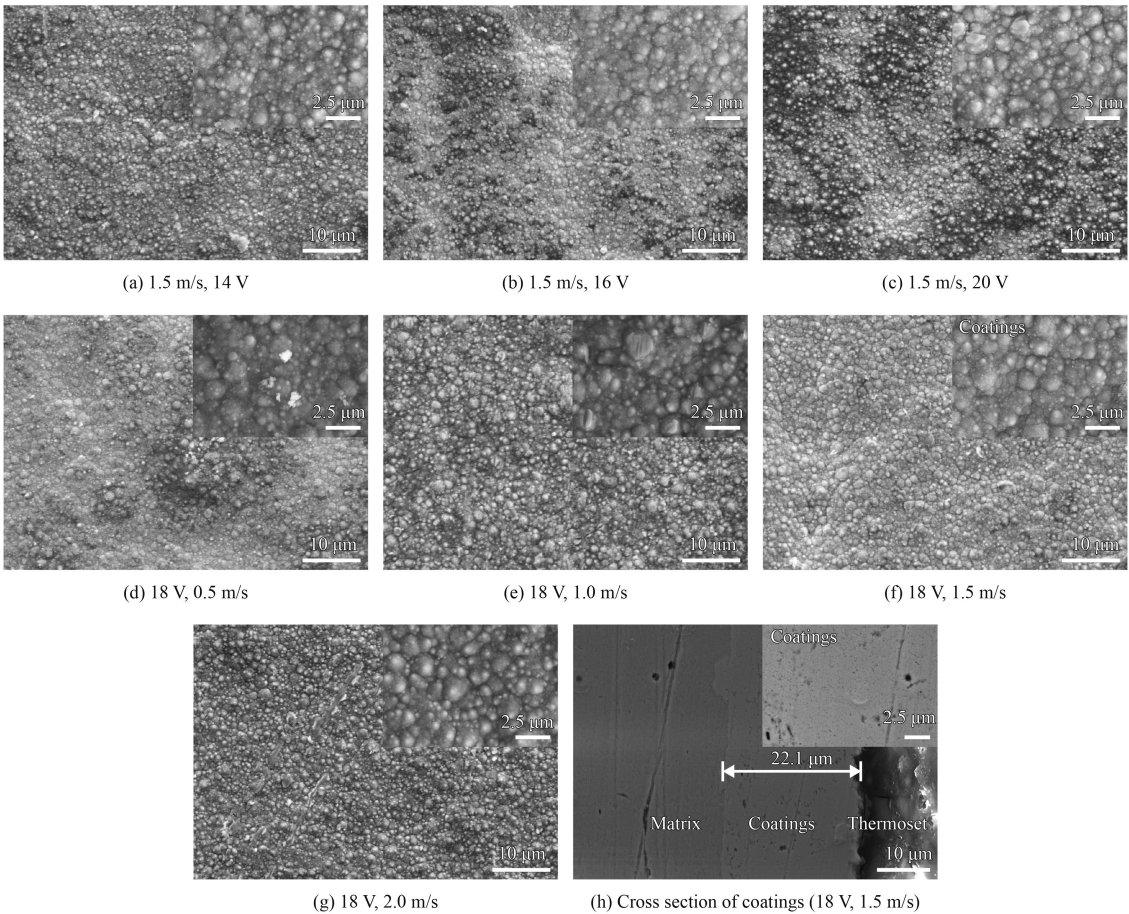


图 1 不同喷射参数下的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层形貌

Fig.1 Morphologies of Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings fabricated at different jet parameters

复合镀层的表面形貌。可以看出,复合镀层表面存在孢状晶粒,镀层结构组织致密连续,无明显裂纹和气孔等缺陷。图 1(h) 是喷射电压为 18 V,喷射速度为 1.5 m/s,喷射沉积时间为 20 min 的样本断面显微形貌。图中镀层与基体结合界限明显,镀层的厚度约为 22 μm 。对比图 1(a)、图 1(b) 和图 1(f) 可知,随着喷射电压在 14~18 V 范围内增大,镀层表面孢状晶粒数量增加,晶粒尺寸变得均匀,镀层表面质量得到提升。对比图 1(c) 和图 1(f) 可知,当喷射电压从 18 V 增加到 20 V 时,镀层表面孢状晶粒数量进一步增大,晶粒变得粗大,尺寸一致性变差,表面质量趋于恶化。这是由于喷射电压的升高,镀层中晶核生成率提高,增大了镀层的沉积效率^[25]。当电压过高时,晶粒成长速度过快,影响了镀层的表面质量。

仅当喷射速度为 0.5 m/s 时, Ni-Co-BN(h) 纳

米复合镀层中存在少量的 BN(h) 纳米团,其余参数下所得的镀层中均无明显的 BN(h) 纳米颗粒团簇现象。这应归功于喷射电沉积时,镀液的循环流动和喷嘴的喷射流场对 BN(h) 纳米颗粒起到的分散作用。对比图 1(d)~(f) 可知,当喷射速度在 0.5~1.5 m/s 范围内增加时,复合镀层中的 BN(h) 纳米颗粒团簇现象消失,镀层表面晶粒数量增加,晶粒尺寸趋于均匀,表面质量获得明显提高。由图 1(f)(g) 可知,当喷射速度从 1.5 m/s 增加到 2.0 m/s 时,镀层晶粒变得更加细小,镀层表面的纳米颗粒复合量出现降低。这是由于随着喷射速度的提高,打破了镀层微局部的浓度不均,有效的促进了晶核的生成,使镀层的沉积速率增加^[26]。当喷射速度过高时,镀液的冲刷作用增强导致晶粒破碎和纳米颗粒的流失。

图 2 为喷射电压为 18 V,喷射速度为 1.5 m/s

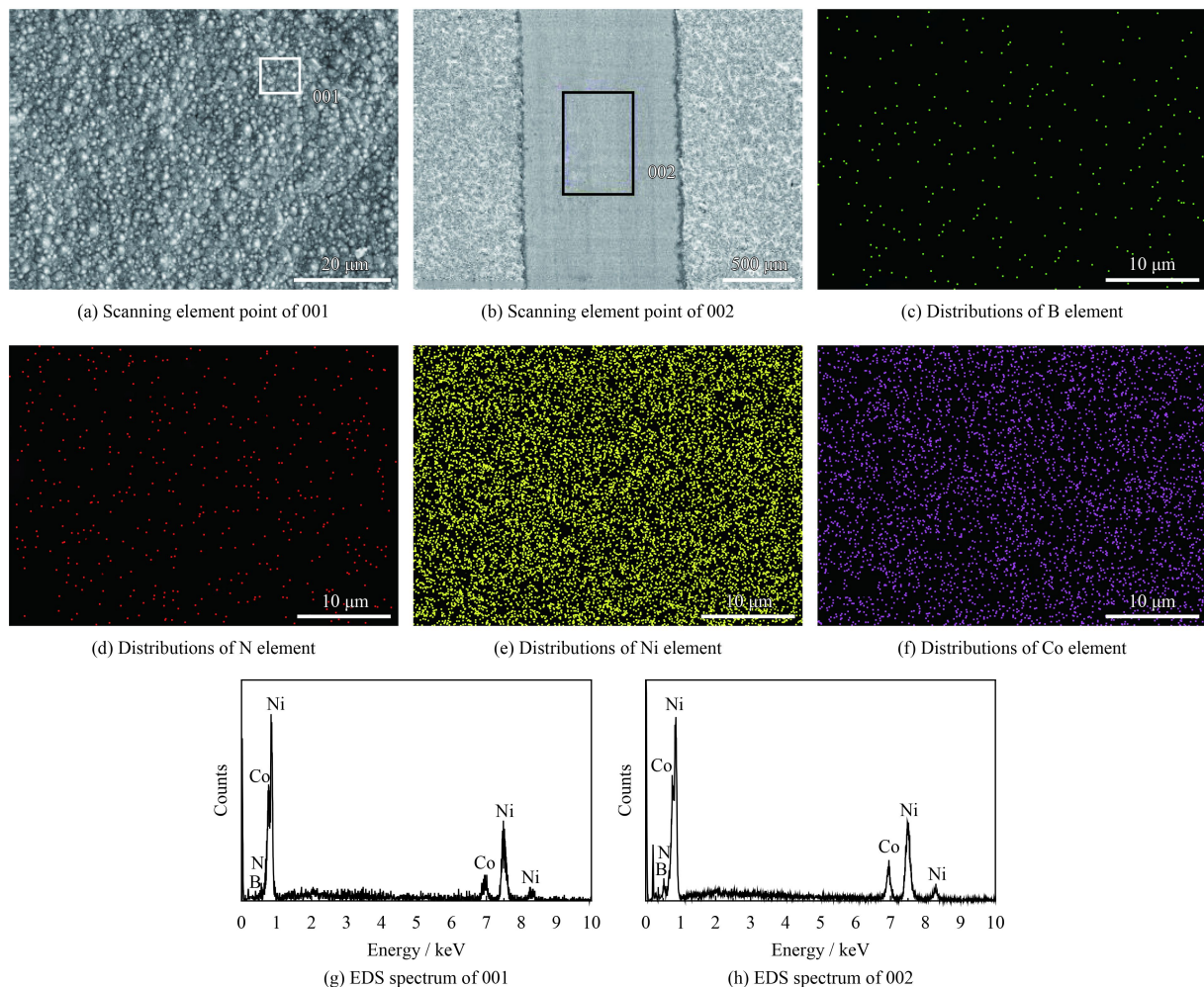


图 2 喷射参数为 18 V, 1.5 m/s 条件下的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的 EDS 能谱

Fig.2 EDS analysis of Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings fabricated at 18 V and 1.5 m/s

参数下的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的 EDS 能谱。根据图中 001 和 002 处的点能谱可知, 所制备的镀层表面与划痕处均含有 Ni、Co、N、B 等元素, 镀层表面和划痕处各元素的原子百分比相近。由图 2(c)~(f) 喷射电压为 18 V, 喷射速度 1.5 m/s 参数下 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的各元素分布图。由图可知, 在喷射电压 18 V, 喷射速度 1.5 m/s 参数下采用喷射电沉积制备的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层中无明显纳米颗粒团簇现象, 进一步说明了所获得的镀层为 Ni、Co、N、B 等各元素均匀分布的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层。

2.2 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的晶相结构

图 3 为不同参数下的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的衍射图谱。由图 3 可知, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的衍射图谱与纯 Ni 衍射图谱相似, 镀层中 Ni 和 Co 元素主要生长晶面为 (111), 其主要存在结构形式为面心立方结构, 对应主衍射峰的 2θ 为 44.598° 。此外, 在 2θ 为 52.161° 和 72.688° 处还存在衍射强度相对较高的 Ni(200) 和

Co(200)、Ni(220) 和 Co(220) 等次生长面。这是由于 Ni 和 Co 原子尺寸相似, 当镀层中 Co 原子的百分比低于 65% 时, Ni 原子和 Co 原子间形成了单一的 α 相固溶体所致^[27-28]。表 2 为喷射电压为 18 V, 喷射速度为 1.5 m/s 时 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层中 Ni 元素的粒径数据。由表 2 和谢乐公式计算得 Ni 元素的平均晶粒尺寸为 42.16 nm。由于镀层中 BN(h) 纳米颗粒含量相对较少, 因此图谱中未表现出明显的衍射峰。

表 2 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层中 Ni 元素的粒径
Table 2 Grain size of Ni element in Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings

Crystal orientation	$2\theta / (^\circ)$	$\theta / (^\circ)$	FWHM	D / nm
Ni(111)	44.598	22.299	0.564	47.306
Ni(200)	52.161	26.081	0.837	32.835
Ni(220)	76.688	38.344	0.679	46.361

2.3 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的显微硬度

图 4 为不同参数下 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层中 N 元素的含量。由图 4 可知, 当喷射电压和喷射速度分别增加时, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层中 N 元素的含量先增大后减少。由于 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层中仅有 BN(h) 纳米颗粒含有 N 元素, 因此, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层中 N 元素的变化说明当喷射电压和喷射速度分别增加时, 对应的镀层中 BN(h) 纳米颗粒的复合量也呈现出先增大后减小的变化趋势。

图 5 为不同喷射参数下的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层的显微硬度。由图 5 可知, 在 BN(h) 纳米颗粒的弥散强化作用下, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的显微硬度均高于 Ni-Co 合金镀层的显微硬度。

由图 5(a) 可知, 在喷射流速为 1.5 m/s 的参数下, 随着喷射电压的不断增加, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层的显微硬度均呈现出先增大后减小的变化趋势。当喷射电压从 14 V 增加到 18 V 时, Ni-Co 合金镀层的显微硬度从 382.3 HV_{0.05} 增加为 503.6 HV_{0.05}, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的显微硬度从 506.6 HV_{0.05} 增加到了 709.3 HV_{0.05}, 当电压从 18 V 变为 20 V 时, 两种类型镀层的显微硬度均略有下降, Ni-Co 合金镀层的显微硬度变为 486.3 HV_{0.05}, Ni-Co-BN(h) 纳

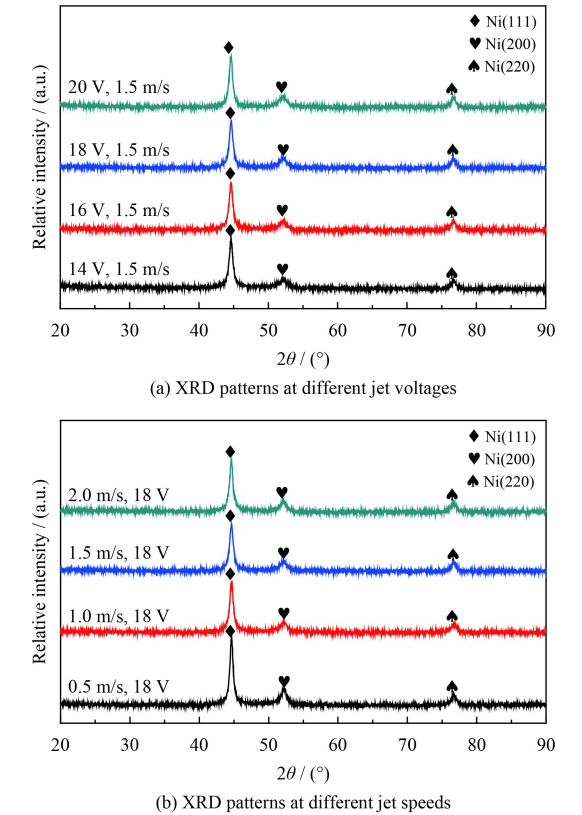


图 3 不同参数下的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings fabricated at different jet parameters

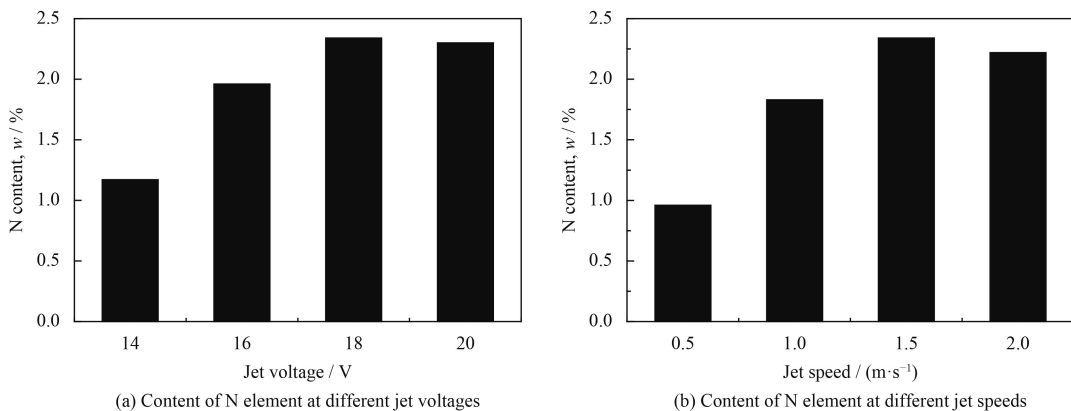


图4 不同参数下 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层中 N 元素的质量分数

Fig.4 Content of N element in Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings at different jet parameters

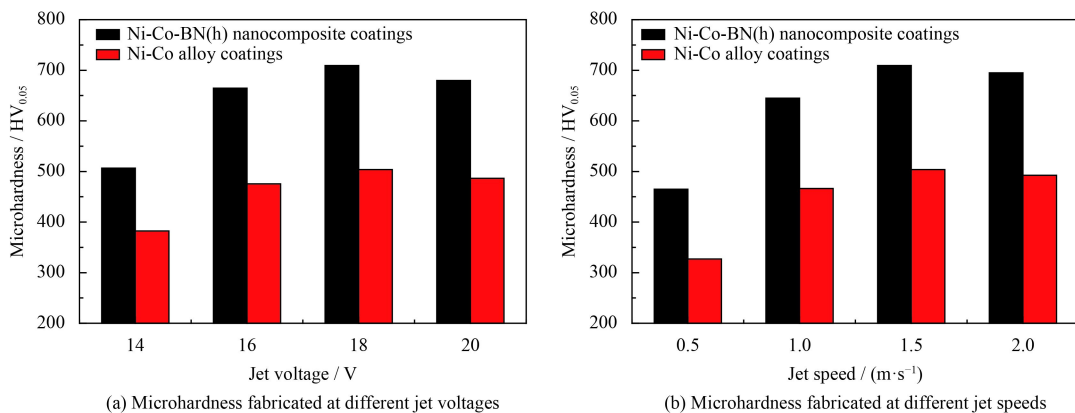


图5 不同喷射参数下的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层的显微硬度

Fig.5 Microhardness of Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings and Ni-Co alloy coatings fabricated at different jet parameters

米复合镀层的显微硬度降落为 679.7 HV_{0.05}。这可能是因为当喷射电压从 14 V 升高到 18 V 时,随着喷射电压的增加,喷射场电位势能升高,离子的传质过程得到增强,使得镀层的电沉积效率提高,晶粒形核率增加,镀层结构组织得到细化,显微硬度得到提升。镀层沉积速度的增大,还能够提高 Ni-Co 合金与 BN(h) 纳米颗粒的共沉积效率,提高镀层中纳米颗粒的复合量,进一步的促进了 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层显微硬度的增加。当电压从 18 V 增加到 20 V 时,在过高的过电位作用下,镀层组织生长过快,晶相组织变得粗大,镀层中孔隙率增加,导致 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层显微硬度的下降^[29]。

图 5(b) 为喷射速度对 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层显微硬度的影响。由图 5(b) 可知,喷射电压为 18 V 时,镀液喷射速度的变化对 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层

的显微硬度均产生了明显的影响。当喷射速度从 0.5 m/s 增大到 1.5 m/s 时, Ni-Co 合金镀层的显微硬度从 326.8 HV_{0.05} 增加为 503.6 HV_{0.05}, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层显微硬度从 465.0 HV_{0.05} 增大到 709.3 HV_{0.05}, 镀层显微硬度变化较为显著。当喷射速度从 1.5 m/s 增大到 2.0 m/s 时, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层显微硬度均出现轻微下降, Ni-Co 合金镀层变为 492.3 HV_{0.05}, Ni-Co-BN(h) 纳米复合显微硬度降为 693.9 HV_{0.05}。这可能是由于在较强的喷射电压作用下,当喷射速度较低时,镀液的喷射紊乱搅拌作用和对纳米颗粒的分散效果较差,沉积面扩散层厚度较低,镀层沉积面金属离子的传质过程受到影响,导致 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层的晶核生成率较低,沉积速度较慢。随着喷射速度的增加,镀液喷射紊乱搅拌作用和对纳米颗粒的分散效果增强,沉积面双电层的浓差极化现象得到

缓解, 镀层的沉积速率提高。当喷射速度为 2.0 m/s 时, 镀层在较高速度镀液的冲刷作用下, 尚未完全结合牢固的部分晶粒和纳米颗粒被镀液冲走, 造成 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层沉积速度下降, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的纳米复合量降低^[20,30]。此外, 由于喷射速度增加, 加大了 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层镀液中纳米颗粒的动能, 使纳米颗粒与 Ni-Co 合金的共沉积变得困难, 进一步降低了 BN(h) 纳米颗粒在 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层中的复合量。上述原因导致 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层的显微硬度在喷射速度为 2.0 m/s 时出现降低。

2.4 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的摩擦性能

图 6 为 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的摩擦划痕。由图 6 可知, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的划痕区域较为平整, 并伴有轻微的犁沟, 在摩擦区域的边缘处存在镀层剥落和材料堆积等现象。上述特征符合磨粒磨损的基本形式, 由此可断定工件测定过程中的主要摩擦形式为磨粒磨损, 且

BN(h) 纳米颗粒在摩擦中起到了润滑和抛光的效果。对比图 6(a) 和图 6(b) 的划痕情况, 可以看出二者在划痕宽度方面存在明显差异, 其中 18 V 条件下制备的涂层获得的划痕更窄, 磨损量更小。对比图 6(b)~图 6(d) 可知, 当喷射速度为 0.5 m/s 时镀层摩擦区域出现了明显的带状剥落现象, 镀层与基体的结合力较差, 喷射速度增大后摩擦情况出现好转, 在喷射速度为 1.5 m/s 时镀层磨损量最小。由此可知, 过低的喷射速度将会直接影响到镀层的使用寿命。

图 7 为不同喷射参数下制备的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层的摩擦因数。在 Ni-Co 合金镀层镀液中加入 BN(h) 纳米颗粒后, 所制备的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层与 Ni-Co 合金镀层相比, 其摩擦因数出现了明显降低。这是由于 BN(h) 纳米颗粒在电沉积时能够促进晶核的形成, 改善镀层显微结构。又由于 BN(h) 纳米颗粒具有与石墨类似的层状结构, 较好的自润滑和减摩性能进一步降低了 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的摩擦因数。

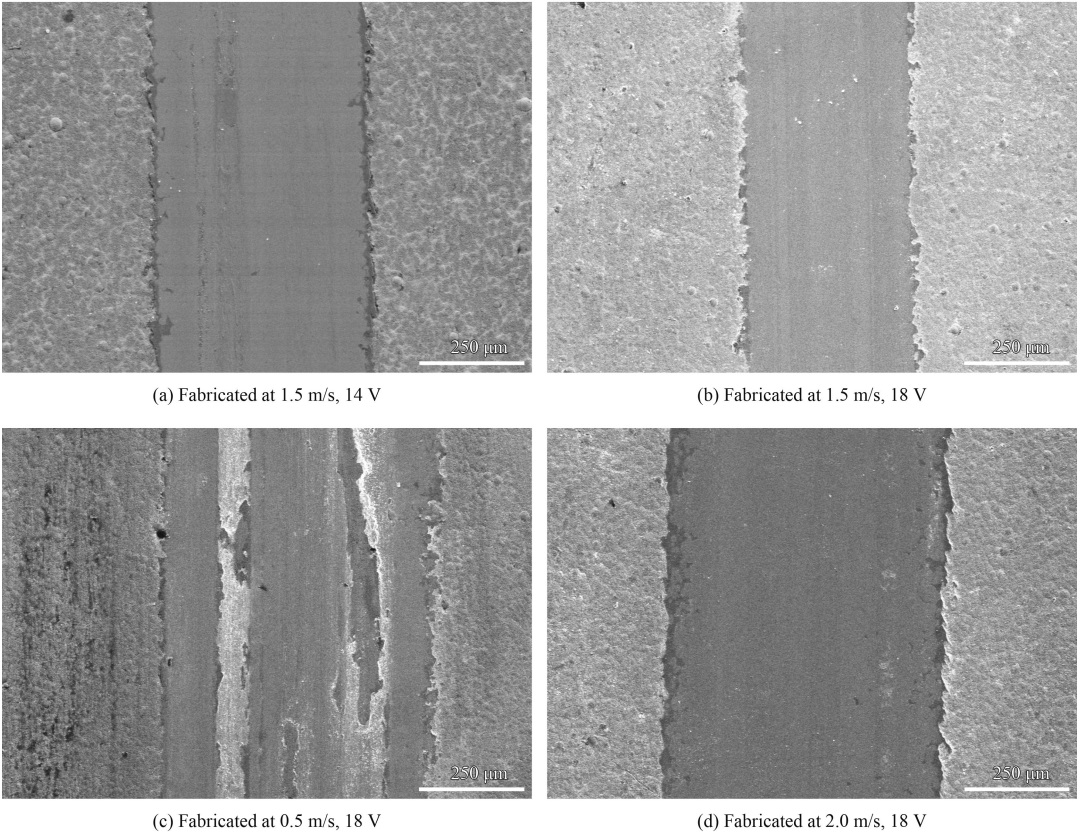


图 6 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的摩擦划痕

Fig.6 Friction scratch of Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings

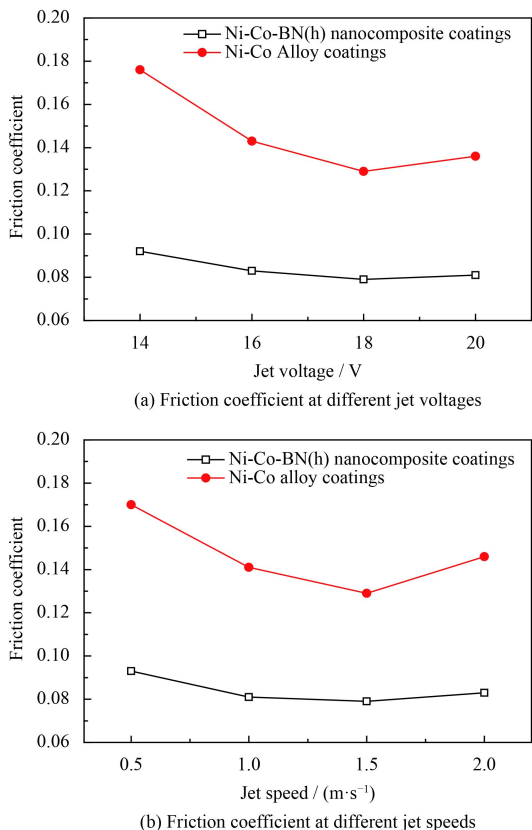


图7 不同喷射参数下制备的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层的摩擦因数

Fig.7 Friction coefficient of Ni-Co-BN(h) nanocomposite coatings and Ni-Co alloy coatings fabricated at different jet parameters

由图 7(a) 可知,随着喷射电压在 14~18 V 范围内不断增加,两种镀层的摩擦因数均不断降低,Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层平均摩擦因数从 0.092 降到了 0.079, Ni-Co 合金镀层的平均摩擦因数从 0.176 降低到 0.129。当喷射电压由 18 V 变为 20 V 时, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的平均摩擦因数出现略微上升,平均摩擦因数增高为 0.081, Ni-Co 合金镀层的平均摩擦因数增大为 0.136。这是由于当电压较低时,随着喷射电压的增大,镀层的沉积速率增加,晶相结构得到优化所致。当电压过大时,过快的沉积速率,降低了镀层的致密性和表面质量,导致两种镀层的摩擦因数的均出现了升高。

由图 7(b) 可知,随着喷射流速的增加, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层的摩擦因数呈现出先降低后升高的变化趋势。当喷射流速从 0.5 m/s 增加到 1.5 m/s 时, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层镀层的平均摩擦因数从 0.093 降低到

0.079, Ni-Co 合金镀层的平均摩擦因数从 0.170 降低到 0.129。当喷射流速从 1.5 m/s 增加到 2.0 m/s 时, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的平均摩擦因数为 0.083, Ni-Co 合金镀层的平均摩擦因数为 0.146。这也许是因为合理的喷射速度,能够提高镀层的沉积速率,改善镀层的显微结构,使镀层获得较好的晶粒尺寸和表面质量。过大或过小的喷射速度不利于镀层的电沉积,能够导致晶粒尺寸一致性较差,表面质量降低。对于 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层,合理的喷射速度还能够镀层中改善纳米颗粒的团簇现象,提高镀层中纳米颗粒的复合量,使镀层获得更低的摩擦因数。

3 结 论

(1) 采用喷射电沉积技术在 45 钢基体上制备了 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层。SEM 测试结果表明,喷射电压和喷射速度的变化能够对镀层的表面形貌产生影响。当喷射电压从 14 V 增加到 18 V 时,镀层表面孢状晶粒数量增加,晶粒尺寸变得均匀,镀层表面质量得到提升;当喷射电压从 18 V 增加到 20 V 时,晶粒变得粗大,尺寸一致性变差,表面质量趋于恶化。当喷射速度为 0.5 m/s 时,镀层表面存在轻微的 BN(h) 纳米颗粒团簇现象,随着喷射速度的增加,纳米颗粒团簇现象得到缓解,晶粒尺寸得到细化。当喷射速度从 1.5 m/s 增加到 2.0 m/s 时,镀层表面晶粒更加细化,镀层表面的 BN(h) 纳米颗粒出现减少。

(2) 采用喷射电沉积技术所制备的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层为晶态结构, Ni(111) 和 Co(111) 为其主要生长面, Ni 原子与 Co 原子间形成了单一的 α 相固溶体。喷射速度为 1.5 m/s , 喷射电压为 18 V 的条件下所得的 Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的 EDS 能谱图表明,镀层表面 BN(h) 纳米颗粒分布均匀,无明显团簇现象。

(3) BN(h) 纳米颗粒的加入对 Ni-Co 合金镀层的显微硬度和摩擦因数均产生了较大的正向影响。当喷射电压和喷射速度发生改变时, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层和 Ni-Co 合金镀层的显微硬度和摩擦因数等均发生改变。随着喷射电压的增加,镀层显微硬度呈现出先增大后减小、摩擦因数呈现出先减小后增大变化趋势;随着喷射速度的增加,镀层的硬度呈现出先增大后减小,摩擦

因数呈现出先减小后增大的变化趋势。当喷射电压为 18 V, 喷射速度为 1.5 m/s 时, Ni-Co-BN(h) 纳米复合镀层的硬度最高, 摩擦因数最低, 镀层表现出良好的减摩和自润滑性能。

参考文献

- [1] 师昌绪, 徐滨士, 张平, 等. 21 世纪表面工程的发展趋势[J]. 中国表面工程, 2001, 14(1): 6-11.
SHI C X, XU B S, ZHANG P, et al. Development of surface engineering in the 21st century[J]. China Surface Engineering, 2001, 14(1): 6-11 (in Chinese).
- [2] 徐滨士, 谭俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展[J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 5-16.
XU B S, TAN J, CHEN J M. Science and technology development of surface engineering[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(2): 5-16 (in Chinese).
- [3] 涂铭旌, 欧忠文. 表面工程的发展及思考[J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 1-5.
TU S J, OU Z W. Development and consideration of surface engineering[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(5): 1-5 (in Chinese).
- [4] 王国峰, 金华, 张凯锋. 添加剂对电沉积 Ni-Co-Al₂O₃ 复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2011, 28(2): 160-164.
WANG G F, JIN H, ZHANG K F. Effect of additives on mechanical properties of Ni-Co-Al₂O₃ composite fabricated by electrodeposition[J]. Acta Material Composite Sinica, 2011, 28(2): 160-164 (in Chinese).
- [5] 王旭升, 杨贵荣, 宋文明, 等. Ni-Co-WC+G 复合熔覆层的组织与摩擦磨损性能[J]. 材料研究学报, 2017(3): 195-202.
WANG X S, YANG G R, SONG W M, et al. Microstructure and wear resistance composite coatings Ni-Co-WC+G[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017(3): 195-202 (in Chinese).
- [6] 柳军. 电沉积锌镍掺杂硅烷复合膜的耐蚀性能[J]. 材料保护, 2017, 50(2): 1-4, 14.
LIU J. Corrosion resistance of silane composite film doped with zine-nickel particles[J]. Materials Protection, 2017, 50(2): 1-4, 14 (in Chinese).
- [7] ZAMANI M, AMADEH A, LARI BAGHAL S M. Effect of Co content on electrodeposition mechanism and mechanical properties of electrodeposited Ni-Co alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(2): 484-491.
- [8] JIANG Y C, XU Y H, WANG M, et al. Effects of pulse plating parameters on the microstructure and properties of high frequency pulse electrodeposited Ni-Co-ZrO₂ nano-composite coatings[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2017, 28(1): 610-616.
- [9] KARSLIOGLU R, AKBULUT H. Comparison microstructure and sliding wear properties of nickel-cobalt-CNT composite coatings by DC, PC and PRC current electrodeposition[J]. Applied Surface Science, 2015, 353: 615-627.
- [10] WANG Y X, TAY S L, WEI S H, et al. Microstructure and properties of sol-enhanced Ni-Co-TiO₂, nanocomposite coatings on mild steel[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2015, 649: 222-228.
- [11] 张峻巍, 苏建铭, 王一雍, 等. 超声波对 Ni-Co-Al₂O₃ 镀层性能的影响[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2015(4): 59-62.
ZHANG J W, SU J M, WANG Y Y, et al. Effect of ultrasonic on property of Ni-Co-Al₂O₃ coatings[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(4): 59-62 (in Chinese).
- [12] 王立平, 高燕, 薛群基, 等. Ni-Co/纳米金刚石复合镀层抗磨损性能的研究[J]. 中国表面工程, 2005, 18(1): 24-26.
WANG L P, GAO Y, XUE Q J, et al. Study on the Anti-wear Behavior of Ni-Co/Diamond nanocomposite coatings[J]. China Surface Engineering, 2005, 18(1): 24-26 (in Chinese).
- [13] 孙万昌, 余晓林, 侯冠群, 等. ZrO₂ 含量对 Ni-Co-ZrO₂ 复合镀层显微硬度和耐磨性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(6): 1555-1560, 1567.
SUN W C, SHE X L, HOU G Q, et al. Effects of ZrO₂ concentration on the microhardness and abrasive resistance of Ni-Co-ZrO₂ composite coatings[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(6): 1555-1560, 1567 (in Chinese).
- [14] TANG P T. Pulse reversal plating of nickel and nickel alloys for microgalvanics[J]. Electro-chimica Acta, 2001, 47(1-2): 61-66.
- [15] 易笃钢, 沈理达, 朱军, 等. 脉冲摩擦喷射电沉积纳米晶镍的电化学腐蚀行为[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(3): 96-101.
YI D G, SHEN L D, ZHU J, et al. Electrochemical corrosion behavior of nano-crystalline nickel prepared by pulsed friction aided jet electrodeposition[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(3): 96-101 (in Chinese).
- [16] 陈劲松, 黄因慧, 田宗军, 等. 喷射电沉积 Ni-Al₂O₃ 纳米复合镀层的组织及性能[J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(6): 912-915, 929.
CHEN J S, HUANG Y H, TIAN Z J, et al. Structure and properties of jet electro-deposition Ni-Al₂O₃ nanocomposite coatings[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2010, 28(6): 912-915, 929 (in Chinese).
- [17] 刘志东, 王景丽, 陈劲松, 等. 喷射电沉积多孔镍[J]. 材料科学与工程学报, 2008, 26(6): 869-873.
LIU Z D, WANG J L, CHEN J S, et al. Experiment research of preparing porous metal nickel by jet electrodeposition[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2008, 26(6): 869-873 (in Chinese).
- [18] 王猛, 谭俊, 吴迪, 等. 喷射电沉积技术制备 Co-Cr₃C₂ 复合镀层的工艺优化[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 75-85.

- WANG M, TAN J, WU D, et al. Process optimization of preparing Co-Cr₃C₂ composite coatings by jet electrodeposition [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 75-85 (in Chinese).
- [19] 王颖, 康敏, 陈超, 等. 提高发动机气缸电喷镀沉积速度的工艺优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 48-54.
- WANG Y, KANG M, CHEN C, et al. Process parameters optimization of increasing depositing rate for jet electrodeposition of engine cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(19): 48-54 (in Chinese).
- [20] 王颖, 康敏, 傅秀清, 等. 发动机气缸电喷镀镍磷合金镀层及耐腐蚀性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 54-61.
- WANG Y, KANG M, FU X Q, et al. Anti-corrosion properties of Ni-P alloy coated on engine cylinder prepared from jet electrodeposition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 54-61 (in Chinese).
- [21] WANG Y, KANG M, JIN S W, et al. Electrochemical behaviour in process of electrodeposition Ni-P alloy coating[J]. Surface Engineering, 2014, 30(8): 557-561.
- [22] 王颖, 康敏. 基于 COMSOL 的电喷镀阳极喷嘴设计研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(9): 1180-1185.
- WANG Y, KANG M. Research on anode design of jet-electrodeposition based on COMSOL[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(9): 1180-1185 (in Chinese).
- [23] 陈超, 康敏, 王颖, 等. 电喷镀阳极喷嘴的流场仿真与试验[J]. 机械设计与研究, 2014(4): 130-133.
- CHEN C, KANG M, WANG Y, et al. Research on flow simulation and experiment of electric plating with anode nozzle[J]. Machine Design and Research, 2014(4): 130-133 (in Chinese).
- [24] 张欣颖, 康敏, 邵越, 等. 电喷镀镍磷合金镀层的工艺参数优化[J]. 电加工与模具, 2015(4): 42-47.
- ZHANG X Y, KANG M, SHAO Y, et al. Research on flow simulation and experiment of electric plating with anode nozzle[J]. Electromachining & Mould, 2015(4): 42-47 (in Chinese).
- [25] 王颖, 张金源, 康敏. 喷射电沉积镍磷合金沉积速度试验研究[J]. 电加工与模具, 2013(1): 16-18.
- WANG Y, ZHANG J Y, KANG M. Experimental study on the depositing rate of jet electrodeposition Ni-P alloy[J]. Electromachining & Mould, 2013(1): 16-18 (in Chinese).
- [26] 明平美, 朱荻, 胡洋洋, 等. 超声微细电铸试验研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(6): 644-647.
- MING P M, ZHU D, HU Y Y, et al. Experiment research on microelectroforming with ultrasound stirring[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(6): 644-647 (in Chinese).
- [27] LI Y, JIANG H, WANG D, et al. Effects of saccharin and cobalt concentration in electrolytic solution on microhardness of nanocrystalline Ni-Co alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(20): 4952-4956.
- [28] WANG L, GAO Y, LIU H, et al. Effects of bivalent Co ion on the co-deposition of nickel and nanodiamond particles[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 191(1): 1-6.
- [29] 王颖. 喷射电沉积镍磷合金电化学行为及性能研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- WANG Y. Research on electrochemical behaviour and performance of Nickel-Phosphorus alloy obtained by jet electrodeposition[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2014 (in Chinese).
- [30] 赵阳培. 射流电铸快速成型纳米晶铜工艺基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- ZHAO Y P. Fundamental research on rapid prototyping nanocrystalline copper oriented by jet electroforming[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)