

镀液循环流量对封闭循环电沉积 Ni-SiC 复合镀层的影响

李浪, 谢发勤, 吴向清, 宋嘉蕾

(西北工业大学 民航学院, 西安 710072)

摘要: **目的** 研究封闭式镀液循环装置中不同镀液循环流量对 Ni-SiC 复合镀层的影响规律, 优化镀液循环流量参数。**方法** 以 Q235 管状工件为待镀基体, 以添加 SiC 颗粒的改良瓦特镀液为母液, 在自主研发的封闭式镀液循环电镀装置中以 0.3、0.5、0.7 m³/h 的镀液循环流量于管件内壁制备 Ni-SiC 复合镀层, 通过 SEM 检测、XRD 测试、硬度测试和摩擦磨损性能测试等手段, 对各 Ni-SiC 复合镀层宏观形貌、厚度、成分、结构、硬度和耐磨性进行分析研究。**结果** 在 0.5 m³/h 流量条件下, 镀层厚度为 32.98 μm, SiC 颗粒含量为 15.37%, 镀层晶粒尺寸和硬度分别为 10.84 nm 和 704HK_{0.245}, 该条件下制备的 Ni-SiC 复合镀层具有最佳耐磨性, 摩擦系数为 0.41, 体积磨损率仅 2.83×10⁻⁵ mm³/Nm。**结论** 在不同镀液循环流量参数下, 采用该封闭式循环电镀装置, 均可制得均匀完整的 Ni-SiC 复合镀层。随镀液循环流量的升高, 镀层厚度和 SiC 颗粒体含量均降低, 镀层颜色金属光泽增强, 镀层晶粒尺寸先减小、后增大, 镀层硬度则先升高、后降低。

关键词: 复合电镀; 镀液循环; 镀液流量; Ni-SiC

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)08-0087-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.08.015

Effect of Circulating Flow of Plating Bath on Ni-SiC Composite Coating in Closed and Bath Recyclable Electroplating Device

LI Lang, XIE Fa-qin, WU Xiang-qing, SONG Jia-lei

(School of Civil Aviation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: This study is aimed to analyze the effects of different circular-flow velocities of plating solutions, which is based on the Ni-SiC composite coating in a self-designed and closed electrolyte-circulating plating apparatus and optimize circular-flow parameters. The Q235 tubular workpiece is seeded as the plated substrate and the plating solution has been solved by modified Watt bath containing SiC particles in this article. Ni-SiC composite coatings were prepared by circulating flow with

收稿日期: 2021-05-25; 修订日期: 2021-06-11

Received: 2021-05-25; Revised: 2021-06-11

基金项目: 太仓市大院大所创新引领专项计划 (TC2018DYDS27)

Fund: Taicang City Grand Institute Innovation Leading Special Plan (TC2018DYDS27)

作者简介: 李浪 (1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电镀和复合电镀。

Biography: LI Lang (1992—), Male, Doctor, Research focus: electroplating and composite electroplating.

通讯作者: 谢发勤 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为凝固技术与新材料制备、材料表面改性等。

Corresponding author: XIE Fa-qin (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: solidification technology, preparation of new materials and surface modification.

引文格式: 李浪, 谢发勤, 吴向清, 等. 镀液循环流量对封闭循环电沉积 Ni-SiC 复合镀层的影响[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 087-093.
LI Lang, XIE Fa-qin, WU Xiang-qing, et al. Effect of circulating flow of plating bath on Ni-SiC composite coating in closed and bath recyclable electroplating device[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 087-093.

three different rates (0.3 m³/h, 0.5 m³/h and 0.7 m³/h) on the internal wall of the tube in the mentioned electroplating device. Additionally, the macro-microscopic morphology, thickness, composition, structure, hardness and wear resistance of each Ni-SiC composite coating were measured and the results indicated that uniform and complete Ni-SiC composite coatings could be generated under the mentioned circulation flow. The color of the coating is affected by the SiC content, which reflects that the higher the SiC content, the weaker the metallic luster of the coating. With the circulating flow rate increases, the plating solution, the coating's thickness and volume content of SiC particles were going to decrease. At first, the grain size of the coating decreases and then raised up, while the hardness showed oppositely. At the flow rate of 0.5 m³/h, the coating thickness, SiC particle content, grain size and hardness are 32.98 μm, 15.37%, 10.84 nm and 704HK_{0.245}, respectively. Furthermore, the Ni-SiC composite coating prepared under this condition has the best wear resistance with a friction coefficient of 0.41 and a volume wear rate of only 2.83×10⁻⁵ mm³/Nm. The circulating flow rate of the plating solution has a significant effect on the Ni-SiC composite coating. When the circulating flow rate of the plating solution is 0.5 m³/h, the Ni-SiC composite coating obtained the best comprehensive performance.

KEY WORDS: composite electroplating; circulation; bath flow rate; Ni-SiC

电镀是最常用的材料表面强化工艺之一。电镀铬因其高硬度,良好的耐蚀性、耐磨性和抗高温氧化性能以及低廉的生产成本而广泛应用于航空航天、军工电子、交运机械等领域^[1]。但该工艺污染严重,废液处理难度大,成本高,同时含六价铬离子的酸雾对人体有着巨大伤害,属一类最高级别致癌物^[2-3]。因此各国相继出台相关法令以限制和禁止该技术的使用^[4-5],绿色代铬工艺的研究和发展则日益受到重视。在诸多代铬工艺中,Ni-SiC复合电镀技术因镀层性能优良,可匹敌甚至优于铬镀层而备受重视。加之相对于纯金属镀层和大部分合金镀层,Ni-SiC复合镀层因SiC颗粒的存在,对降低总质量有利,这符合航空航天和交通运输等领域轻量化的发展理念与要求^[6-7]。因此,国内外学者进行了大量研究,这些研究主要包括镀液成分、施镀温度、阴极电流密度、搅拌方式、搅拌速度等因素对复合镀层宏观形貌、组织结构和性能的影响。如 Najder 等^[8]研究了不同尺寸 Ni-SiC 复合镀层的影响,发现亚微米和微米颗粒对提高镀层硬度和耐磨性有利,纳米颗粒对提高镀层耐蚀性有利。Jiang Wei 等^[9]发现,外加磁场可减少 Ni-SiC 复合镀层缺陷,并提高耐蚀性。吴向清等^[10]在铝合金表面制备了 Ni-SiC 复合镀层,对镀态和热处理后的镀层形貌、结构以及耐磨性、耐蚀性进行了研究,发现镀层磨损量为铬镀层的 31%,经 300 °C×2 h 热处理可提高镀层的综合性能。Kan Hong-min 等^[11]研究了添加剂 SDS 和 CTAB 对 Ni-SiC 复合镀层的影响,指出 SDS 可促进 SiC 颗粒的均匀分散,但对颗粒共沉积量无明显影响,CTAB 则可明显增加 SiC 颗粒在镀层中的共沉积含量。Arash Yazdani 等^[12]研究了不同 Ni 和 SiC 质量占比镀液对复合镀层的影响,在 $w_{Ni} : w_{SiC} = 2 : 1$ 时,所制得镀层性能最佳,同时指出镀液中电荷组成对复合镀层质量有重要影响。Harun Gul 等^[13]研究了 CTAB 含量对 Ni-SiC 复合镀层的影响规律,并得出最佳添加量为 0.3 g/L。王琳等^[14]研究了不同

电沉积方式对 Ni-SiC 复合镀层的影响,脉冲电源可制得性能更加优异的复合镀层。这些相关研究极大地促进了 Ni-SiC 复合镀技术的发展与应用。

目前,敞开式浸镀工艺仍是国内工程机械企业普遍采用的电镀生产方式。该工艺操作简单,维护方便,但在生产过程中会产生酸雾、蒸汽等,并直接排放,既污染作业环境,也危害生产者健康安全。镀液因蒸(挥)发和外界杂质沉降污染,镀液稳定性、使用寿命和镀层质量均受到影响。在对气缸等中空件面进行施镀时,需对非工作面密封保护,影响生产效率,增加了生产成本。

随社会发展,环保节能、绿色可持续发展理念日益受到各界重视,高效节能、绿色环保成为电镀和电镀设备发展的必然方向。基于此背景,文中将使用自主设计的新型封闭式镀液循环电镀装置于 Q235 管件内壁进行 Ni-SiC 复合镀层的制备。相较于传统全浸镀工艺,该装置具备如下特点:作业过程除挂取件外,均在密封条件下进行,可有效防止镀液的蒸/挥发以及外界杂质的沉降污染,同时可保护作业环境和人员健康;对于中空件内腔进行镀覆时,无需对非工作面进行密封处理;复合镀液受搅拌装置和加压后镀液流动的双重搅拌作用,可有效降低 SiC 颗粒的团聚,提高颗粒在镀液中的分布均匀性。

文中通过研究新型封闭式镀液循环电镀装置中,镀液循环流量对 Ni-SiC 复合镀层微观形貌、成分、硬度和耐磨性能等的影响规律,确定了最佳循环流量。研究结果不但为 Ni-SiC 复合电镀技术的产业化提供了参考,而且可以推进新型绿色环保电镀装置的生产应用。

1 实验

1.1 实验装置

自制的封闭式镀液可循环电镀装置如图 1 所示。

该装置的三维效果如图 1a 所示，装置主要由储液槽、循环管路、控制箱和电镀系统构成。电镀系统结构和镀液流向如图 1b 所示，Q235 阴极管件、镍阳极和上下工装经锁夹密封固定，构成镀腔，镀液由系统底部进水口流入，从顶部出水口流出。装置中镀液循环流动路径如图 1c 所示，箭头方向即为镀液循环流动方向。该装置整机的工作原理为：Ni-SiC 复合镀液在空

气泵驱动下，从储液槽进入循环管路；经循环管路从镀腔底部进水口流入，并充满镀腔；最后经镀腔顶部管道回流至储液槽，并进行下一轮内循环；Ni-SiC 复合镀层的沉积在密封镀腔中实现，除挂件外，整机均于封闭状态下运行。储液槽中搅拌装置的存在以及复合镀液的循环流动，均可抑制 SiC 颗粒的团聚和沉降，进而有效提高 SiC 颗粒在镀液中的均匀分散。

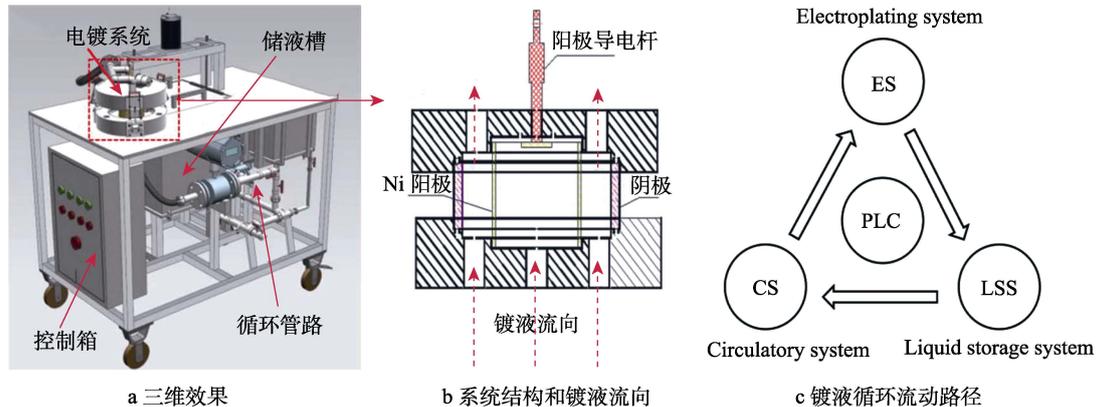


图 1 Ni-SiC 复合电镀装置

Fig.1 Schematic diagram of Ni-SiC composite electroplating apparatus: a) 3D effect; b) system structure and bath flow direction; c) bath circulation flow path

1.2 方法

实验材料与处理：实验选用 $\phi 84 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的 Q235 钢管件为待镀件，镀前按超声清洗—碱洗—强酸洗—活化流程进行前处理。阳极为 $\phi 89 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的高纯镍管，镀前使用 400 目砂纸打磨，并用去离子水冲洗。SiC 颗粒由潍坊凯华生产，其粒度为 W5，微粒中位径 D_{50} 为 $4.5 \mu\text{m}$ 。在配制镀液前，按碱洗除油—酸洗除杂—去离子水清洗—干燥流程进行预处理。预处理后，SiC 颗粒的微观形貌如图 2 所示。

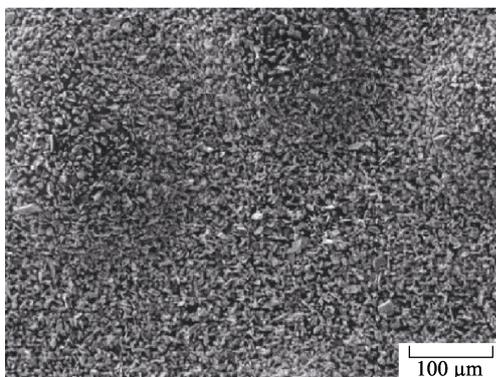


图 2 SiC 颗粒微观形貌
Fig.2 Micro-morphology of SiC particles

镀液配方与工艺参数：镀液配方见表 1，镀覆时间为 30 min，其他实验参数见表 2。

镀层分析与测试：使用 VEGA II XMU 扫描电子显微镜进行表面和截面微观形貌观测；使用 ImageJ

进行 SiC 颗粒体积含量分析；使用 X'Pert Pro 型 X 射线衍射仪进行分析，扫描范围为 $10^\circ \sim 90^\circ$ ，扫描速度为 $0.8 (\text{^\circ}/\text{min})$ ；使用 HV1000 显微硬度计进行硬度测量，载荷为 0.245 N，保载 20 s，测试选取 7 个点，去除极大极小取均值；使用 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机进行磨损试验，对磨球为 $\phi 6 \text{ mm}$ Al_2O_3 球，载荷为 10 N，频率为 4 Hz，实验时长为 30 min。

表 1 Ni-SiC 复合镀液成分
Tab.1 Composition of Ni-SiC composite plating solution

组分	NiSO ₄	NiCl ₂	H ₃ BO ₃	糖精钠	改性剂	SiC
质量浓度/ (g·L ⁻¹)	400	15	35	2.5	0.3	20

表 2 实验参数
Tab.2 Experimental parameters

因素	阴极电流 密度/(A·dm ⁻²)	镀液循环 流量/(m ³ ·h ⁻¹)	施镀温度 /°C
参数	6	0.3/0.5/0.7	50

2 结果与讨论

2.1 对镀层宏/微观形貌的影响

不同镀液循环流量下所制得 Ni-SiC 复合镀层宏观及表面和截面微观形貌如图 3 和图 4 所示。根据图 3 可以看出，在不同镀液循环流量下，镀层表面均未见烧焦、鼓泡、起皮和开裂等缺陷。随着复合镀液循环流量的增大，Ni-SiC 复合镀层颜色由暗变亮，金属

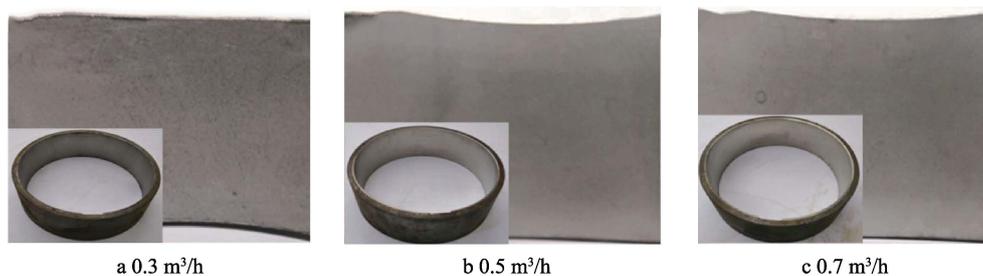


图3 不同镀液流量下镀层宏观形貌

Fig.3 Macro-morphology of composite coatings prepared under different bath circulating rate

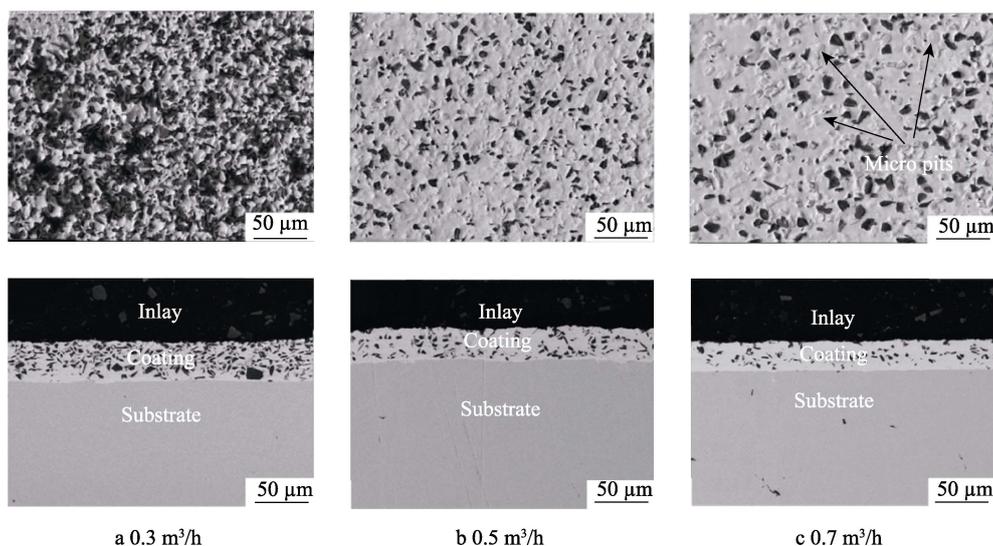


图4 不同镀液流量下镀层微观观形貌

Fig.4 Morphology of composite coatings prepared under different bath circulating rate

光泽加强。根据图 3a 可以看出, 当镀液循环流量为 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 复合镀层表面粗糙, 有大量凸起颗粒物存在。由图 3b、c 可以看出, 随镀液流量的增大, 复合镀层表面凸起颗粒消失, 表面粗糙度降低。

根据图 4 可以看出, 在不同循环流量下, 镀层微观结构完整, 与基体结合良好, 在结合界面和镀层内部, 均未见开裂和微裂纹, 镀层中无结瘤等不良组织。根据图 4a 可以看出, 当镀液循环流量为 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 镀层表面有大量黑色 SiC 颗粒和团聚组织。结合图 3 可推断, 该大量凸起颗粒为 SiC 团聚所致。此后, 随镀液循环流量的增大, 镀层中 SiC 颗粒的含量降低, 团聚消失。因此可推断, 镀层颜色变化是因为 SiC 含量的变化, SiC 含量越高, 镀层颜色越暗, 金属光泽越弱; SiC 含量越低, 镀层颜色越亮, 金属光泽越强。

2.2 对镀层 SiC 含量和厚度的影响

各镀液循环流量下, Ni-SiC 复合镀层厚度和 SiC 颗粒的含量如图 5 所示。由图 5 可知, 随镀液循环流量增大, 镀层中 SiC 颗粒体积含量和镀层厚度均降低。这是因为当阴极电流密度和施镀温度一定时, 镀液黏度、阴极极化强度以及阴极表面对 SiC 颗粒和 Ni^{2+} 的吸附能力一定, 此时 Ni^{2+} 和 SiC 颗粒向阴极移

动主要受到镀液流动的影响, 即扩散传质影响加剧^[15]。当镀液循环流量为 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 镀液流速较慢, 镀液和 SiC 颗粒机械能较低。一方面, SiC 颗粒易被阴极吸附; 另一方面, 镀液对阴极表面冲刷作用较弱, 已吸附于阴极表面的 SiC 颗粒难以在镀液冲刷下脱离阴极表面, 故镀层中 SiC 颗粒体积含量最高。此外, 低流速下体系混乱度低, SiC 颗粒易发生团聚, 故镀层表面出现大量 SiC 团聚组织。之后, 随镀液循环流

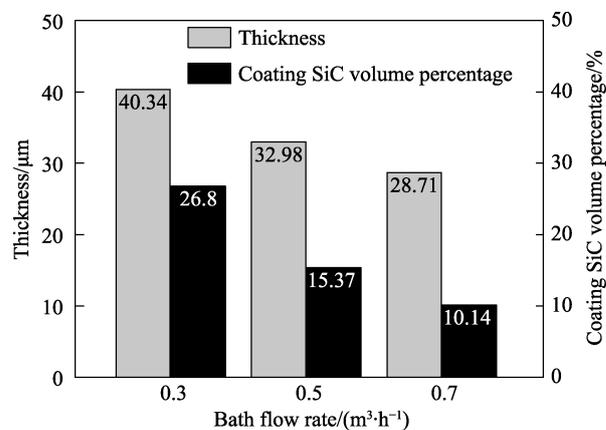


图5 不同镀液流量下镀层厚度与 SiC 含量

Fig.5 Thickness and SiC volume content of composite coatings prepared under different bath circulating rate

量升高, SiC 颗粒机械能增大, 阴极吸附 SiC 颗粒难度增加, 吸附于阴极表面的 SiC 颗粒数量降低。同时, 高速流动的镀液会对阴极表面产生强烈的冲刷效果, 大量吸附不牢或未被镍基质金属包裹的 SiC 颗粒, 在镀液机械冲刷效果下脱离阴极表面^[16]。图 3 中 0.7 m³/h 条件下镀层表面出现大量凹坑, 即为未被镍基质金属包裹牢靠的 SiC 颗粒在高速流动的镀液冲刷下剥离所留。因此随镀液循环流量升高, SiC 颗粒体积含量降低。该规律与 Lee 等^[15]研究结果吻合, 并符合福斯特模型理论, 即镀液流速越快, 作用于阴极表面 SiC 颗粒的作用力越大, 这将降低 SiC 颗粒的复合量。

复合镀层厚度随镀液循环流量的升高而减小, 与陈艳芳等人^[17]的研究结果相符。这是因为复合镀层厚度与整个电镀体系的导电性密切相关, SiC 是半导体, 其电导率远低于 Ni。低镀液循环流量下, 阴极表面将吸附大量的 SiC 颗粒, 因此有效沉积面积减小, 则有效沉积区域内的电流密度增大, 镍的沉积速率加快, 这将缩短裹覆 SiC 颗粒的时间, 促进共沉积进行^[18]。另外, SiC 微粒吸附在阴极表面, 为 Ni 提供了大量非均匀形核的活性位点, 也有利于促进镍和 SiC 颗粒共沉积的进行。因此在镀液循环流量为 0.3 m³/h 时, 镀层厚度最大, 此后依次降低。

2.3 对镀层结构和硬度的影响

不同镀液循环流量下, Ni-SiC 复合镀层的 XRD 衍射图谱见图 6。由图 6 可知, Ni-SiC 复合镀层中只存在 Ni 和 SiC 的衍射峰, 表明在电镀过程中, Ni 和 SiC 未发生化学反应, SiC 颗粒物理裹覆和嵌入在 Ni 基质金属中, 形成复合镀层^[19]。同时, 随镀液循环流量的改变, 各衍射峰位置、宽度以及高度未见明显变化, 说明 Ni-SiC 复合镀层的相组成及结构不因镀液循环流量改变而发生明显变化。

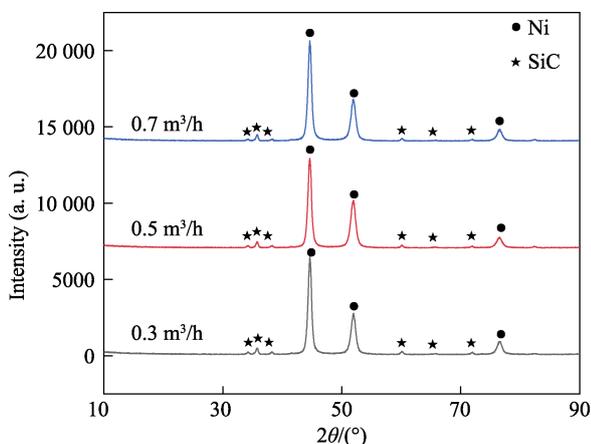


图 6 不同镀液流量下镀层的 XRD 谱

Fig.6 XRD patterns of composite coatings prepared under different bath circulating rate

通过 Scherre 公式^[9]对各镀液循环流量下复合镀层晶粒尺寸进行估算, 同时测定镀层硬度, 结果如图 7 所示。由图 7 可见, 随镀液循环流量的升高, 镀层晶粒尺寸先减小、后增大, 硬度先增大、后减小。在镀液流量为 0.5 m³/h 时, 镀层获得最小晶粒尺寸和最高硬度值。

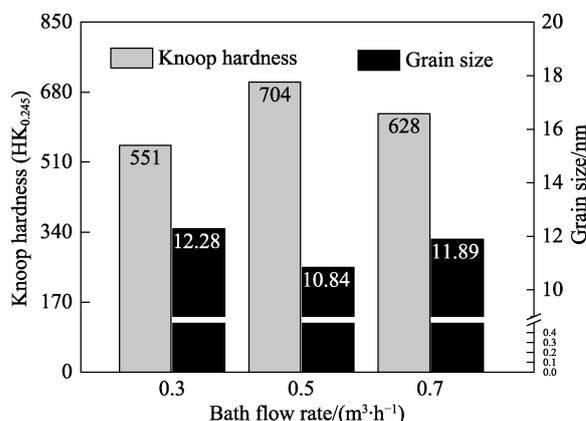


图 7 不同镀液流量下镀层晶粒大小与硬度

Fig.7 Grain size and hardness of composite coatings prepared under different bath circulating rate

镀层晶粒尺寸主要受晶粒形核和生长速度的影响, 当形核速度高于生长速度时, 有利于获得细小晶粒^[20]。诸多研究均表明, 在 Ni-SiC 复合电镀体系中, SiC 颗粒的存在对镀层晶粒尺寸有显著影响^[21-23]。这是因为吸附或嵌入在阴极表面的 SiC 颗粒可为 Ni²⁺ 提供大量非均匀活性位点, 从而促进其形核结晶, 并阻碍晶体生长^[24]。同时, 这些 SiC 颗粒还会减小 Ni 的有效沉积面积, 使有效沉积区域的电流密度增大^[20], 而电流密度增大可促进晶粒形核和生长, 但电流密度超过一定限值时, 扩散传质无法及时补充 SiC 颗粒和 Ni²⁺ 的消耗, 不利于形核进行。因此, 在 0.3 m³/h 条件下, 因有效电流密度过大, 晶粒生长较快, 镀层晶粒尺寸最大; 在 0.5 m³/h 条件下, Ni 的形核速度高于生长速度, 故晶粒尺寸最小。Ni-SiC 复合镀层的硬度则主要受到镀层晶粒尺寸、SiC 颗粒含量与分布状态等的影响。在 0.5 m³/h 条件下, 镀层晶粒尺寸最小, 且 SiC 颗粒含量适中, 分布均匀, 可起到良好的强化效果, 故镀层具有最高硬度; 在 0.3 m³/h 条件下, 镀层中虽 SiC 含量最高, 但其分布不均, 并存在大量团聚, 不利于第二相强化, 加之此时镀层晶粒尺寸最大, 且低镀液流量不利于阴极析氢的解吸附, 故此时复合镀层硬度最低; 0.7 m³/h 条件下, 镀层硬度出现降低的主要原因在于 SiC 含量较低, 弥散强化效果减弱。

2.4 对镀层耐磨性的影响

不同镀液循环流量下, 所制得的 Ni-SiC 复合镀层经球盘摩擦磨损实验后, 磨损系数、磨痕轮廓与体

积磨损率如图8和图9所示。

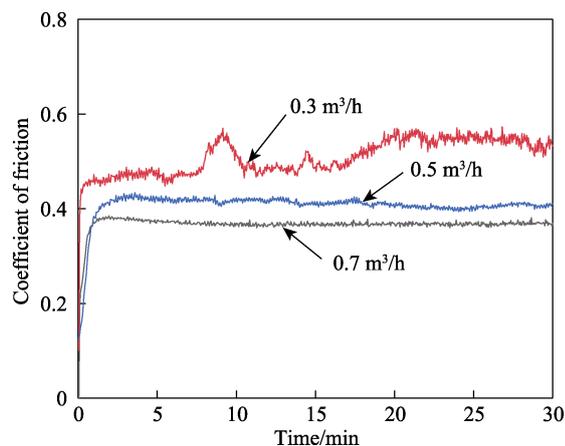


图8 不同镀液流量下镀层的摩擦系数

Fig.8 Friction coefficient of composite coatings prepared under different bath circulating rate

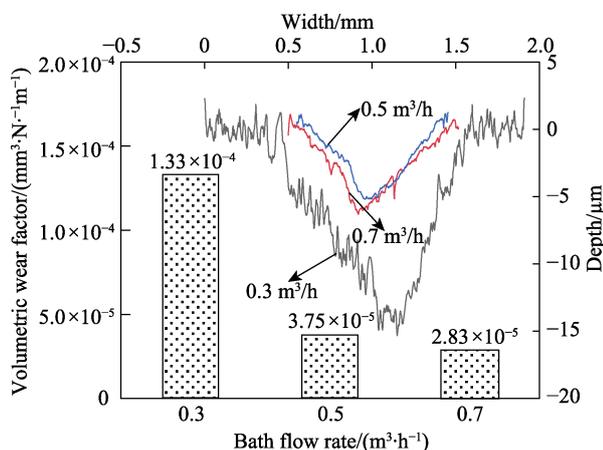


图9 不同镀液流量下镀层的磨痕轮廓与磨损率

Fig.9 Wear scars profile and wear rate of composite coatings prepared under different bath circulating rate

由图8可知,镀层摩擦系数随镀液循环流量的升高而降低,其稳定磨损阶段的摩擦系数分别为0.53、0.41、0.37,其变化趋势与镀层中SiC颗粒含量变化一致。在0.3 m³/h条件下,镀层摩擦系数存在较大波动,原因在于,此时镀层中SiC颗粒含量过高,且存在大量团聚,其表面状态极不均匀,而SiC团聚组织在磨损过程中易发生脱落,这将导致摩擦系数变化。

由图9可知,0.5 m³/h条件下制得的Ni-SiC复合镀层,具有最小的磨痕轮廓和体积磨损率。这是因为此时镀层硬度最高,且拥有较低的摩擦系数。此外,均匀分布的SiC颗粒作为抗磨相,有效阻碍了磨损的发生和扩展。相比之下,0.3 m³/h条件下镀层耐磨性最差。一方面,此时镀层的硬度较低,自身耐磨性较差;另一方面,团聚的SiC颗粒易发生脱落,形成磨粒,加速磨损的发生。0.7 m³/h条件下制得的镀层,虽硬度低于0.5 m³/h条件下所制得的镀层,但其摩擦系数最小,故两条件下制备的镀层耐磨性相当,体积磨损率相差31%。

3 结论

1) 采用该自制的封闭循环电镀装置,可制备均匀完整的Ni-SiC复合镀层,且随镀液循环流量升高,复合镀层表面金属光泽增强,团聚组织消失,平整度增加。

2) Ni-SiC复合镀层厚度和SiC颗粒含量均随镀液循环流量的升高而降低,晶粒尺寸和镀层硬度则先升高、后降低。在0.5 m³/h条件下,镀层具有最小晶粒尺寸(10.84 nm)和最高硬度(704HK_{0.245})。

3) Ni-SiC复合镀层摩擦系数随镀液循环流量的升高而降低。在镀液循环流量为0.5 m³/h条件下,镀层具有最佳耐磨性,体积磨损率为 2.83×10^{-5} mm³/Nm。

参考文献:

- [1] SUN T R, PAMUKCU S, OTTOSEN L M, et al. Electrochemically enhanced reduction of hexavalent chromium in contaminated clay: Kinetics, energy consumption, and application of pulse current[J]. Chemical engineering journal, 2015, 262: 1099-1107.
- [2] 初鑫, 任鑫, 郝胜智, 等. 铝合金表面改性技术的发展现状[J]. 热加工工艺, 2010, 39(20): 123-127.
CHU Xin, REN Xin, HAO Sheng-zhi, et al. Progress state of surface modification technology for Al alloy[J]. Hot working technology, 2010, 39(20): 123-127.
- [3] 陈宝清, 董闯, 黄龙. 真空离子镀替代电镀技术研究进展[J]. 表面工程资讯, 2005, 5(6): 4-5.
CHEN Bao-qing, DONG Chuang, HUANG Long. Research progress of vacuum ion plating as an alternative to electroplating[J]. Information of surface engineering, 2005, 5(6): 4-5.
- [4] 郭振华. WEEE、RoHS及ELV指令对中国内地和香港业界的影响[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(12): 1-5.
GUO Zhen-hua. The influence of WEEE, RoHS and ELV directive on Chinese inland and Hongkong enterprises[J]. Electroplating & finishing, 2006, 25(12): 1-5.
- [5] 吴建丽. 欧盟ROHS和WEEE指令最新进展[J]. 信息技术与标准化, 2005(3): 43-47.
WU Jian-li. The latest progress of European ROHS & WEEE directives[J]. Information technology & standardization, 2005(3): 43-47.
- [6] 陈彦飞, 艾士刚, 何汝杰, 等. C/SiC复合材料波纹点阵结构进气道前缘设计与制备[J]. 装备环境工程, 2020, 17(1): 71-76.
CHEN Yan-fei, AI Shi-gang, HE Ru-jie, et al. Design and preparation of inlet leading edge with corrugated lattice structure of C/SiC composites[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(1): 71-76.
- [7] 冯利军, 程正冲, 李伏. 船用复合材料应用现状及发展[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 51-55.
FENG Li-jun, CHENG Zheng-chong, LI Fu. Application and development of composites for naval ships[J].

- Equipment environmental engineering, 2017, 14(5): 51-55.
- [8] NAJDER A, NOWAK M, BIGAJ M, et al. Comparison of the properties of nickel coatings reinforced with dispersion SiC particles of micrometric, submicrometric and nanometric size deposited on the 5xxx series aluminium alloy[J]. Archives of metallurgy and materials, 2014, 59(1): 349-353.
- [9] JIANG Wei, SHEN Li-da, QIU Ming-bo, et al. Preparation of Ni-SiC composite coatings by magnetic field-enhanced jet electrodeposition[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 762: 115-124.
- [10] 吴向清, 谢发勤. 铝合金基电沉积 Ni-SiC 复合镀层的结构及耐腐蚀性研究[J]. 表面技术, 2003, 32(2): 23-25.
WU Xiang-qing, XIE Fa-qin. Structure and corrosion resistance of electrodeposited Ni-SiC composite coating for aluminium alloy substrate[J]. Surface technology, 2003, 32(2): 23-25.
- [11] KAN Hong-min, FENG Xiao-jun, WEI Xiao-dong, et al. Effects of surfactants SDS and CTAB on Ni-SiC deposition[J]. Journal of Wuhan university of technology-material sci Ed, 2018, 33(4): 836-842.
- [12] YAZDANI A, ZAKERI A. Fabrication and characterization of Ni-SiC nanocomposite coatings on Al substrates by ball impact deposition method[J]. Metallurgical and materials transactions A, 2017, 48(9): 4180-4192.
- [13] GUL H, UYSAL M, AKBULUT H, et al. A reciprocating wear study on the effect of surfactant concentration and sliding speed in the electro codeposited Ni/SiCp metal matrix composites[J]. Journal of composite materials, 2016, 50(19): 2603-2616.
- [14] 王琳, 路金林, 刘坤, 等. 电沉积方式对 Ni-SiC 纳米复合镀层性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 180-184.
WANG Lin, LU Jin-lin, LIU Kun, et al. Effect of electrodeposition method on properties of Ni-SiC nanocomposite coatings[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 180-184.
- [15] LEE H K, LEE H Y, JEON J M. Codeposition of micro- and nano-sized SiC particles in the nickel matrix composite coatings obtained by electroplating[J]. Surface and coatings technology, 2007, 201(8): 4711-4717.
- [16] CUI Wei, WANG Ke, WANG Kai-yu, et al. Effects of jet rate on microstructure, microhardness, and wear behavior of jet electrodeposited Ni-SiC composites[J]. Ceramics international, 2018, 44(6): 7214-7220.
- [17] 陈艳芳, 吴继龙, 关鹏娜, 等. 搅拌速度对铝合金表面电镀 Ni-SiC 的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(6): 121-123.
CHEN Yan-fang, WU Ji-long, GUAN Peng-na, et al. Influence of stirring speed on plating Ni-SiC on aluminum alloy surface[J]. Hot working technology, 2011, 40(6): 121-123.
- [18] 夏法锋, 吴蒙华, 贾振元, 等. 纳米 Ni-SiC 非晶态复合镀层的制备工艺及性能研究[J]. 功能材料, 2007, 38(1): 127-129.
XIA Fa-feng, WU Meng-hua, JIA Zhen-yuan, et al. Study on preparation and properties of nano Ni-SiC amorphous composite coatings[J]. Journal of functional materials, 2007, 38(1): 127-129.
- [19] ZHOU Y, XIE F Q, WU X Q, et al. A novel plating apparatus for electrodeposition of Ni-SiC composite coatings using circulating-solution co-deposition technique[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 699: 366-377.
- [20] LI Rui-qian, CHU Qing-wei, LIANG Jun. Electrodeposition and characterization of Ni-SiC composite coatings from deep eutectic solvent[J]. RSC advances, 2015, 5(56): 44933-44942.
- [21] ALAR V, ŽMAK I, STOJANOVIĆ I, et al. Abrasion and erosion wear of electrodeposited nickel-silicon carbide nanocomposite coatings[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2017, 48(8): 785-791.
- [22] JIN Pen, SUN Chu-feng, ZHOU Chun-yu, et al. Effect of SiC particle size on structures and properties of Ni-SiC nanocomposites deposited by magnetic pulse electrodeposition technology[J]. Ceramics international, 2019, 45(16): 20155-20164.
- [23] LANZUTTI A, LEKKA M, DE LEITENBURG C, et al. Effect of pulse current on wear behavior of Ni matrix micro- and nano-SiC composite coatings at room and elevated temperature[J]. Tribology international, 2019, 132: 50-61.
- [24] XIA Fa-feng, TIAN Ji-yu, MA Chun-yang, et al. Effect of pulse frequency on microstructural, nanomechanical, and wear properties of electrodeposited Ni-TiN composite coatings[J]. Journal of applied physics, 2014, 116(23): 234302.