等离子喷涂镍基合金涂层及其性能研究

肖毅成[1,2]，秦　松[1,2]，李　勇[1,2]，杨佳霖[1,2]，周　奥[1,2]，周建桥[1,2]，
鞠　霖[1,2]，张　著[1,2]，刘东华[1,2]
（1. 湖南省冶金材料研究院有限公司，湖南 长沙　410014；
2. 湖南省先进涂层工程技术研究中心，湖南 长沙　410014）

[摘　要]为了研究 Ni60A 涂层在特定场景下的应用潜力，降低 Ni60A 涂层的制造成本，采用大气等离子喷涂技术在低碳钢表面制备了 Ni60A 涂层，并借助金相显微镜、数码硬度计、扫描电镜、微机控制电子万能试验机研究了喷涂电流的变化（475~725 A）对涂层微观组织与力学性能的影响。结果表明：喷涂电流的变化对涂层微观结构与力学性能的影响较为明显。当喷涂电流过低时喷涂功率低，导致离子焰流温度降低，无法得到充分的熔化，撞击至基体表面的动能有限，无法完全铺展开，使涂层致密程度与性能变差；当涂层电流过高时，喷涂功率升高，离子焰流温度的温度增加，粒子撞击至基体表面的动能升高，粉末粒子来不及完全铺展或填充孔隙便被后续粒子覆盖，造成涂层沉积率升高但致密度与性能下降。当涂层电流为 600 A 时，制备出的涂层分布均匀，内部孔洞较少，涂层与基体之间拥有良好的结合，具有较高的致密程度与良好的力学性能，其硬度为 623.30 $HV_{0.3}$，结合强度为 61.67 MPa。

[关键词]等离子喷涂；喷涂电流；Ni60A 涂片；力学性能
[中图分类号] TG174.44　　[文献标识码] A　　doi：10.26935/j.issn.2097-5317.2026.0022
[文章编号] 2097-5317(2026)04-0032-06

Study on Plasma-Sprayed Nickel-Based Alloy Coatings and Properties

XIAO Yicheng[1,2], QIN Song[1,2], LI Yong[1,2], YANG Jialin[1,2], ZHOU Ao[1,2], ZHOU Jianqiao[1,2], JU Lin[1,2], ZHANG Zhu[1,2], LIU Donghua[1,2]
(1. Hunan Metallurgica Materials Research Institute Co., Ltd., Changsha 410014, China;
2. Hunan Advanced Coating Engineering Technology Research Center, Changsha 410014, China)

Abstract: In order to investigate the application potential of Ni60A coatings in specific scenarios and to reduce their manufacturing cost, Ni60A coatings were deposited on low-carbon steel substrates by atmospheric plasma spraying (APS) in this work. The effects of varying spraying current (from 475 A to 725 A) on the microstructure and mechanical properties of the coatings

收稿日期：2026-04-26
Received：2026-04-26
基金项目：湖南省冶金材料研究院有限公司自主科技项目(HNYCY2026-03)
Funding：Independent Technology Project of Hunan Metallurgical Materials Research Institute Co., Ltd. (HNYCY2026-03)
通信作者：肖毅成(2000-)，工程师，主要研究方向为先进涂层技术，E-mail：1170635448@qq.com
Corresponding Author：XIAO Yicheng(2000-), Engineer, Research Focus: Advanced Coating Technology, E-mail：1170635448@qq.com

were examined by means of optical microscopy, a digital hardness tester, scanning electron microscopy (SEM), and a computer-controlled electronic universal testing machine. The results indicated that the spraying current exerted a notable influence on the coating microstructure and mechanical properties. When the spraying current was too low, the spraying power decreased, leading to a reduction in the plasma jet temperature; as a consequence, the in-flight particles were not fully melted, and their kinetic energy upon impacting the substrate surface was insufficient for complete flattening and spreading, which deteriorated the coating densification and performance. When the spraying current was excessively high, the spraying power increased, raising the plasma jet temperature and the kinetic energy of the particles upon impact; however, the powder particles were covered by subsequent particles before they could fully spread or fill the pores, resulting in an increased deposition efficiency but reduced density and degraded mechanical properties. At a spraying current of 600 A, the prepared coating exhibited a uniform distribution, fewer internal pores, good bonding between the coating and the substrate, a high degree of densification, and satisfactory mechanical properties, with a microhardness of 623.30 $HV_{0.3}$ and a bonding strength of 61.67 MPa.

Key words: atmospheric plasma spraying; spraying current; Ni60; mechanical properties

0 前 言

镍基合金涂层作为一种高性能的涂层,具有耐磨、耐蚀、耐高温等特点,被应用于工业领域的表面强化和修复,如火箭发动机叶片,涡轮部件、齿轮等[1,2]。随着航空航天、能源动力及矿山冶炼等领域对机械零部件在极端工况下的可靠性要求日益严苛,通过先进喷涂技术制备镍基涂层已成为提升关键部件性能的核心技术之一[3,4]。

Ni60 基合金涂层具有优异的冶金结合能力与工艺适应性,为了提高 Ni 基的力学性能,人们通常将陶瓷硬质相与 Ni60 结合组成复合涂层。崔乘鑫等[5]通过激光熔覆技术在 317L 不锈钢表面制备了 Ni60-WC 涂层,其平均显微硬度值为 851.60 HV。常倾城等[6]通过激光熔覆技术在 H13 钢表面制备了 NbC-Ni60 涂层,其显微硬度在 NbC 质量分数为 30%时达到最大,为 848 HV。滕达等[7]通过超音速喷涂研究 B_4C-60Ni 对 WC-B_4C-Ni 涂层耐磨性能的影响,研究发现:当 B_4C-60Ni 的质量分数为 10%时,WC-B_4C-Ni 的显微硬度达到最大值,为 1 228 $HV_{0.3}$。马朝阳等[8]通过等离子堆焊制备了 Ni60-WC 涂层,其表面显微硬度最大值超过 2 000 $HV_{0.3}$。

随着 WC 粉末原料价格的日益增长,制备 Ni60-WC 涂层的成本增加,并且其他硬质陶瓷粉末的价格也随 WC 原料价格的增长而波动。为了降低制备 Ni60 基涂层的成本,许多研究者开始优化工艺,研究工艺对 Ni60 基涂层性能的影响。罗汝恺等[9]研究等离子转移弧电流对 Ni60 熔覆层性能的影响发现:当转移弧电流为 100~110 A 时,熔覆层的硬度最高,为 825.5 HV。杨秀从等[10]使用超音速等离子喷涂通过正交试验对 Ni60A 涂层的 4 个主要喷涂工艺参数(喷涂电压、喷涂电流、氩气流量和喷涂距离)进行优化设计,研究发现当喷涂电压 170 V,喷涂电流 370 A,氩气流量 110 L/min,喷涂距离 110 mm 时,制得性能最优的 Ni60A 涂层,其孔隙率为 1.05%,显微硬度为 1 086 $HV_{0.2}$。尽管纯 Ni60A 涂层的硬度不及 Ni60-WC复合涂层,但其原材料成本显著更低,且无需添加硬质陶瓷相,制备工艺更为简便,可有效规避因 WC 粉末价格波动带来的成本风险。因此,在对耐磨性要求不苛刻的一般工况条件下,纯 Ni60A 涂层是一种经济、实用的工程选择。本研究正是基于这一需求,研究纯 Ni60A 涂层在特定场景下的应用潜力,从而为降低高性能涂层制备成本提供参考。

目前大多数研究工艺对 Ni60 基涂层性能的影响所使用的技术为激光熔覆、超音速等离子喷涂等,关于大气等离子喷涂工艺对 Ni60A 涂层性能影响的研究较少。因此本工作通过大气等离子喷涂在低碳钢表面制备 Ni60A 涂层,研究喷涂电流对 Ni60A 涂层的微观结构与力学性能的影响,为获得性能优异、结构致密的 Ni60A 涂层提供实验依据。

1 试 验

1.1 样品制备

选用 100 mm×100 mm×3 mm 的低碳钢作为基材,喷涂粉末选用 Ni60A 粉末(粒径为 15~45 μm、纯度为 99.9%、球形粉末)。

1.2 结构表征与性能测试

制备涂层前,使用射吸式喷枪对基体表面进行喷砂处理,增加基体材料表面粗糙度。实验采用大气等离子喷涂系统在基材表面完成涂层的制备,具体工艺参数如表 1 所示。将样品切成 10 mm×10 mm×3 mm 的方块,采用 GX51 金相显微镜观察涂层的横截面厚度与微观结构。采用数显维氏硬度计对涂层的硬度进行测试,同一小样测 3 个点位取平均值。将样品切

成 ϕ30 mm 的小样,通过 HITACHISU-3500N 型扫描电子显微镜(SEM)进行形貌观察。涂层的结合强度在 ETM205D 微机控制电子万能试验机上进行测试,检测依据为 GB/T 8642-2002。

表 1　等离子喷涂系统工艺参数

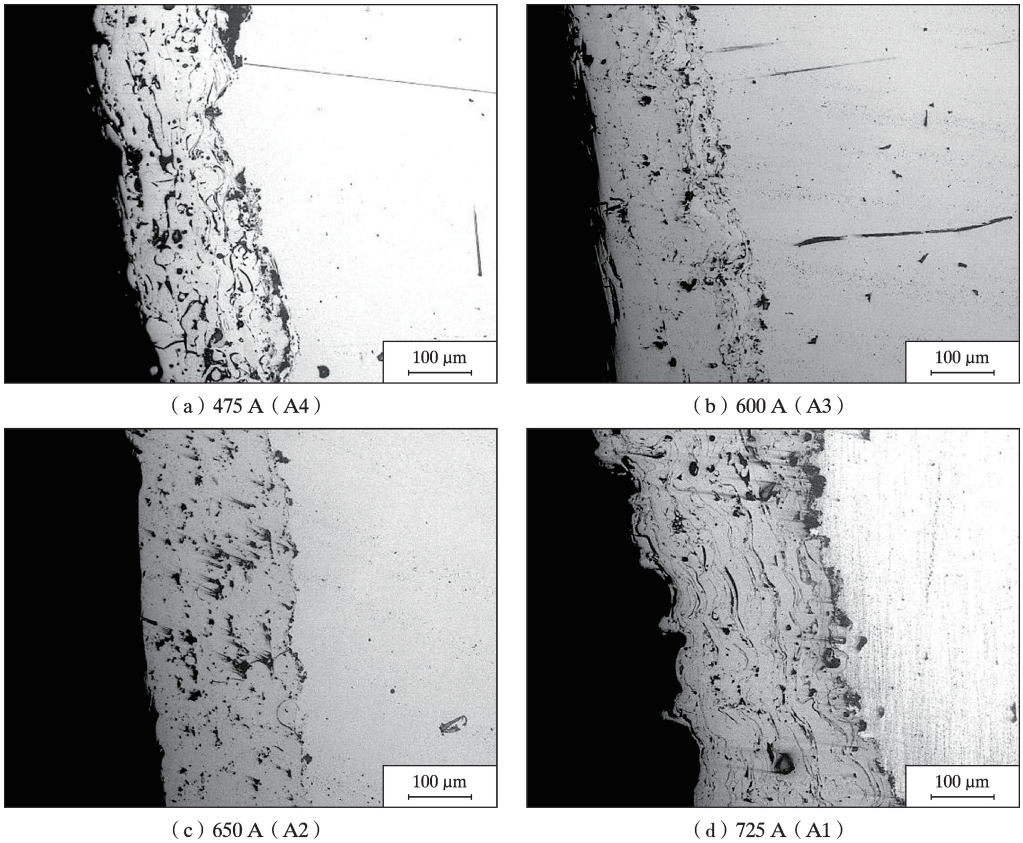
Table 1　Process parameters of plasma spraying system

样品编号	A1	A2	A3	A4
喷涂设备	LBP-100	LBP-100	LBP-100	LBP-100
喷涂距离/mm	150	150	150	150
氩气流量/(L·min^{-1})	40	40	40	40
氢气流量/(L·min^{-1})	6	6	6	6
送粉器转盘转速/(r·min^{-1})	4.0	4.0	4.0	4.0
送粉器流量/(L·min^{-1})	4.0	4.0	4.0	4.0
电压/V	72	72	72	72
电流/A	725	650	600	475

2　结果与讨论

2.1　微观结构

图 1 为采用不同喷涂电流制备的 Ni60A 涂层的横截面金相形貌。本次实验等离子喷涂设备的工作电压是通过氩气流量控制的,因此在喷涂过程中主要观察工作电流的变化对涂层微观结构与性能的影响。通过图 1a、1b 可以发现,当喷涂电流从 475 A 提升至 600 A 时,涂层内部的孔洞变少,致密程度增加,涂层分布均匀,并且涂层孔隙数量也大幅度减低;继续提升喷涂电流至 650~725 A,如图 1c、1d 所示,发现涂层的孔隙数量增加,并且 A1 与 A2 样品的涂层均匀性要低于 A3 样品,内部的孔隙也要多于 A3。



(a) 475 A (A4)　(b) 600 A (A3)

(c) 650 A (A2)　(d) 725 A (A1)

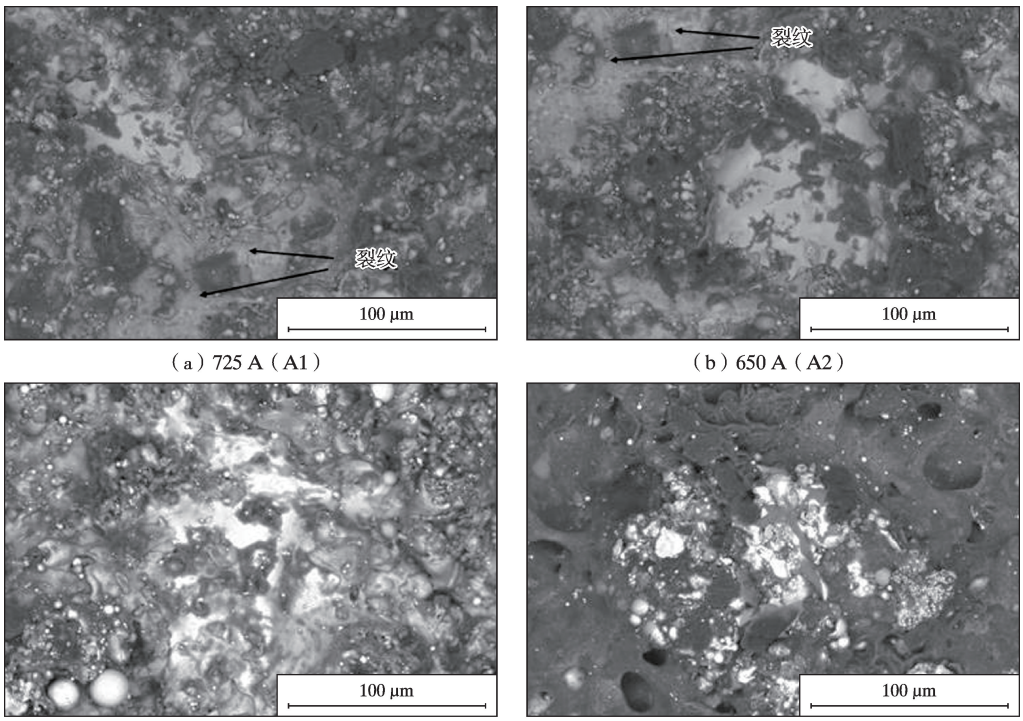
图 1　不同喷涂电流制备的 Ni60A 涂层横截面金相形貌

Fig. 1　Cross-sectional metallographic images of Ni60A coatings prepared under different spraying currents

对于等离子喷涂而言,喷涂电流是其最为关键的工艺参数之一。喷涂电流的增加与减少,直接影响到等离子弧的总功率,从而对喷涂过程中粉末颗粒的状态、等离子焰流与沉积造成直接影响[11]。在喷涂过程中,由于 A4 样品的喷涂电流较低,等离子弧温度也随着降低,其粉末颗粒熔化不充分,存在大量未熔或半熔的球形颗粒。它们在撞击时无法充分铺展,内部每层涂层之间结合较差,导致其涂层内部存在大量的孔隙,使样品的致密程度降低。涂层的沉积效率也与喷涂电流有关,当涂层电流增加时,粉末颗粒加热更充分、熔化更完全,提升了颗粒撞击基体时的扁平化效果,从而提高了单位时间内涂层的沉积效率,增大

了涂层厚度[12]。这也是 A4 样品的平均厚度低于 A3 样品的原因。对于涂层而言,并不是喷涂电流越高,所制备的涂层性能越好。更高的电流意味着等离子电弧的温度更高,而电流过高会引起元素烧损或产生不利的相变,冷却时收缩应力增大,削弱了层间结合能力[13]。除此以外,更高的电流也意味着粉末粒子所获得的动能更大,单位时间内沉积的粒子数量增加,使涂层的厚度变厚。但是当粒子撞击至涂层表面还未完全铺展或填充孔隙,后续的粒子便撞击而来,从而造成涂层变厚而致密程度下降的现象[14]。

图 2 为不同喷涂电流制备的 Ni60A 涂层的表面扫描电镜形貌。,当喷涂电流分别为 650 A 和 725 A 时,能够发现图 2a,2b 中,涂层的表面出现裂纹。等离子喷涂的焰流温度极高,熔融粒子撞击基体后会迅速冷却。涂层的喷涂电流提升会使涂层的喷涂功率增加,会导致内部层与层之间、涂层与低碳钢基体之间产生巨大的热应力,当应力超过基体本身的强度极限时,就会开裂形成裂纹[15]。当涂层喷涂电流为 475 A 时,由于喷涂电流过小,导致喷涂功率过低,等离子火焰温度不足,部分粉末粒子无法被彻底熔化。这些半熔态粒子在撞击基体时,流动性极差,无法变形为扁平状,如图 2d 所示,涂层表面出现球形状颗粒。



(a) 725 A (A1)　(b) 650 A (A2)

(c) 600 A (A3)　(d) 475 A (A4)

图 2　不同喷涂电流制备的 Ni60A 涂层扫描电镜形貌

Fig. 2　SEM images of Ni60A coatings prepared under different spraying currents

2.2　显微硬度

图 3 为采用不同喷涂电流制备的 Ni60A 涂层的显微硬度。从图 3 可以看出,A1 样品的平均显微硬度为 494.60 $HV_{0.3}$;A2 样品的平均显微硬度为 600.57 $HV_{0.3}$;A3 样品的平均显微硬度为 623.30 $HV_{0.3}$;A4 样品的平均显微硬度为 283.97 $HV_{0.3}$。结合涂层的金相与厚度分析,涂层的喷涂电流适当提高时,等离子弧温度增加,粉末颗粒熔化更充分,在撞击至基体表面时能够更好铺展,填充孔隙,增加涂层显微硬度[16]。但是喷涂电流过高时,虽然涂层厚度得到增加,但是由于致密程度的降低,样品的显微硬度也随之降低。

2.3　结合强度

图 4 为采用不同喷涂电流制备的 Ni60A 涂层的结合强度数据。从图 4 中能够发现,A1 样品的平均结合强度为 55.33 MPa;A2 样品的平均结合强度为 57.67 MPa;A3 样品的平均结合强度为 61.67 MPa;A4 样品的平均结合强度为 43.00 MPa。喷涂电流为 600 A 时,A3 样品的致密程度最好,颗粒之间的结合紧密,涂层与基体之间形成良好的结合,因此 A3 样品的结合强度最高;当喷涂电流为 475 A 时,由于 A4 样品的致密性差,内部气孔多,且在基体与涂层的连接处出现大量的孔隙,因此其结合强度最低。由于随着喷

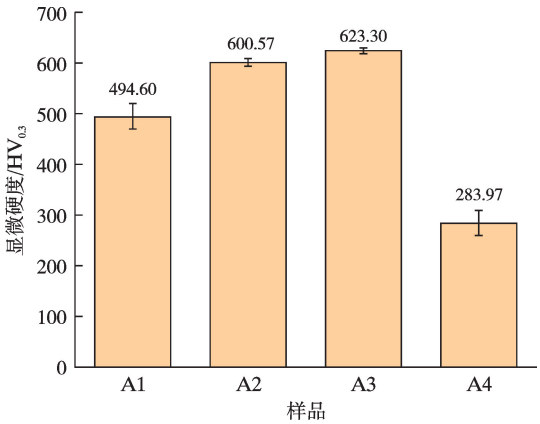


图 3　不同喷涂电流制备的 Ni60A 涂层的显微硬度
Fig. 3　Microhardness of Ni60A coatings prepared with different spraying currents

涂电流的升高,A1 与 A2 样品中涂层与基体之间的孔隙变多,使 A1 与 A2 样品的结合能力变差,结合强度因而降低。

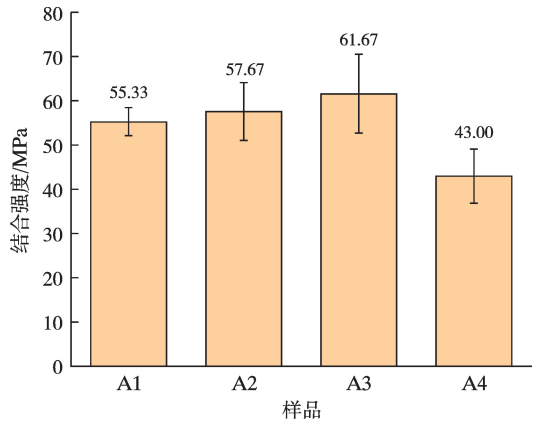


图 4　不同喷涂电流制备的 Ni60A 涂层的结合强度
Fig. 4　Bond strength of Ni60A coatings prepared with different spraying currents

3　结　论

本工作利用大气等离子喷涂技术制备了 Ni60A 涂层,研究了不同喷涂电流对了 Ni60A 涂层力学性能的影响,结果表明:

(1)当 Ni60A 涂层的喷涂电流为 600 A 时,涂层内部的孔洞最少,致密程度最高,涂层内部分布最均匀,力学性能最好。其结合强度为 61.67 MPa,显微硬度为 623.30 $HV_{0.3}$;

(2)过高的喷涂电流会使涂层的等离子弧温度升高,喷涂功率升高,使喷涂过程中粒子的动能变大,粒子撞击至涂层表面还未完全铺展或填充孔隙,后续粒子便撞击而来,导致涂层出现致密程度及性能降低。

[参 考 文 献]

[1] YAO J H, YANG L J, LI B, et al. Characteristics and performance of hard Ni60 alloy coating produced with supersonic laser deposition technique[J]. Materials & Design, 2015, 83(15):26-35.

[2] 段梦凡. Ni60 激光熔覆层制备工艺及摩擦磨损性能研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.
DUAN M F. Research on the Preparation Process and Friction and Wear Properties of Ni60 Laser Cladding Layer [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.

[3] 郑振环,李　强. 热处理对等离子喷涂 Ni60 涂层电化学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(12):183-185.
ZHNG Z H, LI Q. Effect of Heat Treatment on Electrochemical Properties of Plasma-Sprayed Ni60 Coating[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(12):183-185.

[4] 冯旭东,杨　刚,崔琳珠. 热喷涂 Ni60 和 Ni25 涂层组织及性能研究[J]. 大型铸锻件, 2009(2):17-19.
FENG X D, YANG G, CUI L Z. Research on the Microstructure and Properties of Thermally Sprayed Ni60 and Ni25 Coatings [J]. Heavy Castings and Forgings, 2009(2):17-19.

[5] 崔乘鑫,刘　岩,赵　萍,等. 317L 不锈钢表面激光熔覆 Ni60-WC 涂层的组织及性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 48(4):25-31.
CUI C X, LIU Y, ZHAO P, et al. Research on Microstructure and Properties of Laser Cladded Ni60-WC Coating on 317L Stainless Steel Surface[J].Ordnance Material Science and Engineering, 2025, 48(4):25-31.

[6] 常倾城,任利兵,刘　英,等. H13 钢表面激光熔覆 NbC/Ni60 复合涂层组织及高温耐磨损性能[J]. 表面技术, 2024, 53(5):108-114.
CHANG Q C, REN L B, LIU Y, et al. Microstructure and high-temperature wear resistance of NbC/Ni60 composite coating laser cladded on H13 steel surface[J]. Surface Technology, 2024, 53(5):108-114.

[7] 滕　达,高　珊,刘运峰,等. B4C-60Ni 添加量对 WC-B4C-Ni 复合涂层耐磨性能的影响[J]. 表面技术, 2025, 54(1):110-119.
TENG D, GAO S, LIU Y F, et al. Effect of B4C-60Ni addition amount on the wear resistance of WC-B4C-Ni composite coating[J].Surface Technology, 2025, 54(1):110-119.

[8] 马朝阳,汪选国,江欣谕,等. 等离子堆焊双送粉制备 Ni60A/WC 复合涂层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2025, 50(10):271-275.

MA C Y, WANG X G, JIANG X Y, et al. Microstructure and Properties of Ni60A/WC Composite Coating Prepared by Plasma Cladding with Dual Powder Feeding[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(10):271-275.

[9] 罗汝恺, 卢 威, 魏仕勇,等. 等离子转移弧电流对 Ni60 涂层质量的影响[J]. 热处理技术与装备, 2023, 44(3):12-14.
LUO R K, LU W, WEI S Y, et al. Effect of Plasma Transfer Arc Current on the Quality of Ni60 Coating[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2023, 44(3): 12-14.

[10] 杨秀从, 董天顺, 李国禄,等. 超声速等离子喷涂 Ni60A 涂层的滚动接触疲劳寿命[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20):38-43.
YANG X C, DONG T S, LI G L, et al. Rolling Contact Fatigue Life of Supersonic Plasma Sprayed Ni60A Coating [J].Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 38-43.

[11] 齐蕴思. 等离子喷涂对铜基表面 Ni60 涂层性能的影响[J]. 内燃机与配件, 2018(10): 123-124.
QI Y S. Effect of Plasma Spraying on the Properties of Ni60 Coating on Copper Substrate[J].Internal Combustion Engine & Parts, 2018(10): 123-124.

[12] 张 帆, 胡 勇, 梁爱民, 等. 电压及电流对等离子喷涂 Mo 涂层微观组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(2): 84-88.
ZHANG F, HU Y, LIANG A M, et al. Effect of Voltage and Current on the Microstructure and Properties of Plasma-Sprayed Mo Coating[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(2): 84-88.

[13] 乔新义,史 萌,马 林,等. 喷涂参数对内送粉等离子喷枪制备 YSZ 涂层微观结构和性能的影响[J]. 热喷涂技术, 2013, 5(3):15-23.
QIAO X Y, SHI M, MA L, et al. Effect of Spray Parameters on the Microstructure and Propertiesof YSZ Coatings Prepared by an Internal Powder Feeding Plasma Spray Gun[J].Thermal Spray Technology, 2013, 5(3):15-23.

[14] EREMIN E, YUROV V, LAURYANS C , et al. Influence of ION-plasma spraying regimes on the formation and properties of multi-element coatings[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1 441(1):012006.

[15] 黄海博,孙文磊. Ni60 激光熔覆工艺参量对涂层裂纹及厚度的影响[J]. 激光技术, 2021, 45(6):788-793.
HUANG H B, SUN W L. Effect of Laser Cladding Process Parameters on Coating Cracks and Thickness[J]. Laser Technology,2021,45(6):788-793.

[16] LINA R, MARPLE B. Thermal spray coatings engineered from nanostructured ceramic agglomerated powders for structural, thermal barrier and biomedical applications: a review[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(1):40-63.

[编校:魏兆军]