

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.06.012

激光熔覆 FeCoCrNiMo 高熵涂层耐磨与耐蚀性能

任 婧¹, 张效宾²

(1. 临汾职业技术学院 机电工程学院, 山西 临汾 041000; 2. 临汾职业技术学院 机电系, 山西 临汾 041000)

摘要: 优化基于激光熔覆技术制备的 FeCoCrNiMo 合金涂层的耐腐蚀性能, 以提高其在新能源汽车应用中的耐久性和可靠性。研究中的涂层拟用于新能源汽车的发动机和壳体表面, 旨在通过提高这些关键部件的耐腐蚀性能来提升整车的使用寿命和稳定性。采用激光熔覆技术制备 FeCoCrNiMo 合金涂层, 并通过调整激光功率、涂层粉末比例等工艺参数, 系统研究涂层的表面形貌、微观结构、硬度及其腐蚀行为。研究表明, 在激光功率方面, 随着功率从 1 kW 增至 3 kW, 涂层表面粗糙度降低, 孔隙和裂纹显著减少, 表面硬度从 540 HV_{0.2} 提升至 670 HV_{0.2}。3 kW 功率下, 涂层氧化膜增厚最为显著, 形成了更厚且均匀的 NiO 和 Cr₂O₃ 保护层, 有效延缓了腐蚀进程。碳化钨粉末的添加显著提高了涂层硬度, 从 570 HV_{0.2} 增至 705 HV_{0.2}, 且增强了涂层的耐腐蚀性。特别是含 15%WC 粉末的 D 组在 3 kW 激光功率下表现出最佳的耐腐蚀性, 在 72 h 腐蚀后的氧化层增厚幅度最小, 仅为 10.1%, 且具有良好的稳定性。12 h 和 72 h 腐蚀后的氧化层厚度分别为(126±4)和(139±9) μm。激光熔覆制备的 FeCoCrNiMo 涂层经过优化后, 具有显著的耐腐蚀性能。通过调节激光功率和 WC 粉末比例, 涂层的表面质量、硬度和结构稳定性得到了有效提升, 尤其是高功率和适量 WC 粉末的协同作用进一步优化了涂层的抗腐蚀性能。优化后的涂层能够显著延长新能源汽车部件的使用寿命, 具有较好的应用前景。

关键词: 激光熔覆; FeCoCrNiMo 合金; 涂层; 腐蚀性能; 新能源汽车

中图分类号: TQ153; TG174.46

文献标志码: A

Wear and corrosion resistance of FeCoCrNiMo high entropy coating by laser cladding

REN Jing¹, ZHANG Xiaobin²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Linfen Vocational and Technical College, Linfen 041000, China; 2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Linfen Vocational and Technical College, Linfen 041000, China)

Abstract: Optimize the corrosion resistance of FeCoCrNiMo alloy coatings prepared based on laser cladding technology to improve their durability and reliability in new energy vehicle applications. The coating under study is intended for use on the engine and housing surfaces of new energy vehicles, with the aim of improving the corrosion resistance of these key components to enhance the overall service life and stability of the vehicle. FeCoCrNiMo alloy coatings were prepared using laser cladding technology, and the surface morphology, microstructure, hardness, and corrosion behavior of the coatings were systematically studied by adjusting process parameters such as laser power and coating powder ratio. Research has shown that in terms of laser power, as the power increases from 1 kW to 3 kW, the surface roughness of the coating decreases, pores and cracks significantly decrease, and the surface hardness increases from 540 HV_{0.2} to 670 HV_{0.2}. At a power of 3 kW, the coating oxide

收稿日期: 2025-06-24 修回日期: 2025-07-29

作者简介: 任婧(1982—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为新能源汽车, e-mail: renjing22@163.com

通信作者: 张效宾(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为金属基复合材料及成型技术, e-mail: zhangxb15@mails.jlu.edu.cn

基金项目: 吉林省自然科学基金(YDZJ202301ZYTS252)

引用信息: 任婧, 张效宾. 激光熔覆 FeCoCrNiMo 高熵涂层耐磨与耐蚀性能[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(6): 96-104.

REN Jing, ZHANG Xiaobin. Wear and corrosion resistance of FeCoCrNiMo high entropy coating by laser cladding [J]. Plating and Finishing, 2026, 48(6): 96-104.

film thickens the most significantly, forming a thicker and more uniform NiO and Cr₂O₃ protective layer, effectively delaying the corrosion process. The addition of WC powder significantly increased the hardness of the coating, from 570 HV_{0.2} to 705 HV_{0.2}, and enhanced the corrosion resistance of the coating. Especially the D group containing 15% WC powder showed the best corrosion resistance at a laser power of 3 kW, with the smallest increase in oxide layer thickness after 72 h of corrosion, only 10.1%, and good stability. The thickness of the oxide layer after 12 h and 72 h of corrosion is (126±4) μm and (139±9) μm, respectively. The FeCoCrNiMo coating prepared by laser cladding has significant corrosion resistance after optimization. By adjusting the laser power and WC powder ratio, the surface quality, hardness, and structural stability of the coating have been effectively improved, especially the synergistic effect of high power and appropriate WC powder has further optimized the corrosion resistance of the coating. The optimized coating can significantly extend the service life of new energy vehicle components and has good application prospects.

Keywords: laser cladding; FeCoCrNiMo alloy; coating; corrosion performance; new energy vehicles

随着新能源汽车的快速发展,汽车行业对材料的要求日益提高,尤其是在耐腐蚀性方面。腐蚀不仅会影响汽车的外观,还会危及其安全性和使用寿命。因此,研究具有优异耐腐蚀性能的涂层材料已成为一个关键问题。

FeCoCrNiMo合金中含有如Ni、Cr、Mo等耐蚀元素。其中,Mo的氧化物能够有效阻挡Cl⁻引起的点蚀^[1],而Cr和Ni则能够形成致密的氧化膜,进一步增强其抗腐蚀能力^[2-3]。因此,FeCoCrNiMo合金以其优异的耐高温、耐磨损及耐腐蚀性能,逐渐成为理想的涂层材料选择。激光熔覆是一种利用高功率密度激光束对材料表面进行无接触加热熔化的技术,熔覆材料在快速冷却后形成具有不同性能和组织的熔覆层,从而实现表面改性^[4-5]。因此,激光熔覆技术因其具有高能量密度、较小的热影响区和强大的涂层结合力,在涂层制备领域得到了广泛应用^[6]。刘伟等^[7]发现,激光熔覆技术中,不同激光功率对涂层成形质量和力学性能有显著影响,而不同功率下制备的熔覆涂层能够与基体形成良好的冶金结合。蒋赛男等^[8]进一步研究发现,在不同激光功率下,涂层呈现单一的面心立方(Face Centered Cubic, FCC)结构,当激光功率为2.6 kW时表现出了更为卓越的电化学腐蚀性能。Lim等^[9]研究了金属合金激光熔覆技术在防护涂层和增材制造中的研究进展,并验证了激光熔覆在保护涂层领域中的有效性。

因此,在这一背景下,通过优化激光熔覆工艺参数,提升FeCoCrNiMo合金涂层的耐腐蚀性,以期实现更优异的抗腐蚀性能和可靠性,满足新能源汽车对材料的高要求。

1 实验

1.1 材料及方法

1.1.1 实验材料

实验采用激光熔覆法制备FeCoCrNiMo高熵合金熔覆层,基体选用尺寸为500 mm×500 mm×100 mm的Cr12MoV钢。该钢材具有优良的耐磨性和较高的强度,适合作为激光熔覆的基底。熔覆粉末选择了纯度为99.5%的FeCoNiCrMo合金粉末和纯度为91.5 wt.%的WC粉末。

1.1.2 涂层制备

研究首先采用球磨机将FeCoCrNiMo熔覆粉末与WC粉末按4种预定比例混合,以确保粉末的均匀性和良好分散性。A组:100% FeCoCrNiMo HEA+0% WC; B组:90% FeCoCrNiMo HEA+10% WC; C组:80% FeCoCrNiMo HEA+20% WC; D组:70% FeCoCrNiMo HEA+30% WC。混合后的粉末置于150 ℃高温烘箱中干燥2 h以去除水分。待冷却至室温后,再次使用球磨机以200 r/min的转速对粉末进行研磨2 h。研磨后的粉末随后放入真空干燥箱中,于120 ℃下进一步干燥2 h。接着,将处理后的涂层粉末置于激光熔覆设备中进行涂层制备。激光器熔覆过程在氧浓度严格控制在30 μL/L以下的环境中进行。主要工艺参数如下:熔覆长度100 mm,离焦量350 mm,激光功率在1~3 kW内根据不同实验需求调整,保护气流量15 L/min,光斑直径4 mm。FeCoNiCrMo合金粉末的粒径范围为45~75 μm。为了提高高熵合金涂层的性能,特别是提高其耐磨性和耐腐蚀性,研究中使用了碳化钨(Tungsten Carbide, WC)粉末作为涂层的增强相。WC粉末的粒径在30~144 μm。

激光熔覆完成后,使用线切割机将涂层切割成尺寸为10 mm×10 mm×10 mm的立方体样品。随后,依次使用300、600至3000目的砂纸对涂层表面进行逐级打磨。最后,采用金刚石抛光膏进行抛光,直至表面达到镜面效果。经酒精冲洗、吹干后,样品用脱脂棉包裹并置于干燥器中保存待用。

1.1.3 实验器材

研究主要使用了DLA50250-3000激光熔覆设备进行实验,具体的实验器材如表1所示。

表1 实验器材

Tab.1 Experimental equipment

仪器名称	型号
激光熔覆设备	DLA50250-3000
球磨机	QM-3SP4
粉末粒度分析仪	Mastersizer 3000
电化学腐蚀测试仪	CS350H/CS350
金相显微镜	Axio Imager A1m
扫描电子显微镜(SEM)	JSM-IT500HR
X射线衍射仪(XRD)	D8 ADVANCE
真空干燥箱	DZF-6050
高温烘箱	DHG-9053A
维氏硬度计	HV-5Z
复摩擦磨损测试仪	UMT-TriboLab

1.2 材料表征

为了全面评估FeCoCrNiMo高熵合金熔覆层的微观结构和性能,研究利用金相显微镜观察涂层的微观组织形貌。使用扫描电子显微镜观察涂层的表面形态,同时利用X射线衍射仪分析涂层的物相结构。

1.3 涂层性能测试

1.3.1 硬度性能测试

研究采用标准的维氏硬度测试方法利用HV-5Z维氏硬度计对涂层进行硬度测试。硬度测试在涂层的不同部位进行,每个测试点之间间隔0.1 mm,以确保测试数据的代表性和准确性。实验载荷为5 kg,加载时间为10 s,每个区域进行多次测量后取其平均值。

1.3.2 耐磨性能测试

研究将涂层样品放入UMT-TriboLab复摩擦磨损测试仪进行耐磨性能测试,测试过程中摩擦副在涂层表面往复运动,测试持续30 min。实验载荷为5 N,磨损测试仪的摩擦速度设置为0.1 m/s。摩擦副

的材质为GCr15轴承钢,几何形状为球形,直径为10 mm,硬度为60 HRC。磨损率的计算公式^[10-11]如式(1)所示。

$$K = \frac{V}{F \cdot d} \quad (1)$$

式中: K 表示磨损率,单位为 $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; V 表示磨损体积,单位为 mm^3 ; F 表示载荷,单位为N; d 表示磨损距离,单位为m。

1.3.3 耐腐蚀性能测试

研究使用NaCl和KCl的50%混合溶液作为腐蚀剂。将涂层样品完全浸入腐蚀剂中,并在约25 °C常温下进行腐蚀试验。测试分别在12、24和72 h的不同时间段取出样品,稍微清除试样表面附着的腐蚀试剂,并将样品在大气中冷却至室温。接着,肉眼直接观察涂层表面是否出现明显的腐蚀迹象,如锈蚀、脱落、气泡等。并使用金相显微镜对涂层的断面进行观察,检查是否有腐蚀渗透、剥离现象。

选择NaCl和KCl的50%混合溶液作为腐蚀介质的依据是其能够模拟在实际环境中常见的电化学腐蚀情况。这种溶液在常温下能够有效地加速腐蚀过程,便于在较短时间内观察到涂层材料的耐腐蚀性能。此外,NaCl和KCl混合溶液的使用能够提供一个具有代表性的腐蚀环境,适用于评估涂层在含盐环境中的防护性能。

2 结果与分析

2.1 材料表征结果

不同激光功率喷涂下A组的涂层组织对比如图1所示。从图1(a)中可以看出,激光功率在1 kW涂层的表面粗糙,孔隙度较高,说明熔化不充分。从图1(b)的2 kW条件下,涂层的表面较为平整,存在局部不均匀的现象,但孔隙减少表明熔化程度提升。从图1(c)中可以看出,在3 kW下涂层的表面更加光滑,孔隙和裂纹显著减少表明熔化均匀。说明随着激光功率的增加,涂层的表面质量得到改善。

1 kW条件下,涂层表面粗糙且孔隙度较高,熔化不完全,质量较差;在2 kW条件下,表面较为平整,熔化程度有所提升;而在3 kW条件下,涂层表面光滑,孔隙和裂纹显著减少,熔化均匀性最佳,致密性大幅提高。这表明高功率激光能提供更多能量,促进涂层的均匀熔化,进而提高涂层的硬度和耐腐蚀性,这与杜彦斌等^[12]的研究结果相符,后者也指出高激光功率能够使材料充分熔融并密实。

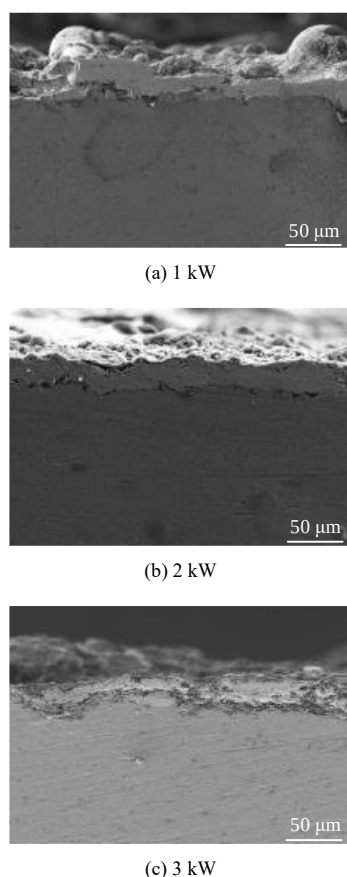


图 1 不同激光功率喷涂下的涂层组织对比

Fig.1 Comparison of coating microstructure under different laser power spraying

研究将激光功率固定在3 kW,对比了涂层表面形态在不同粉末比例下表现出的不同特征如图2所示。从图2(a)中的A组涂层可以看出,涂层组织较为均匀,整体表面呈现出良好的致密性,但在局部区域存在一些微裂纹。图2(b)中的B组涂层表面比A组更加光滑,整体呈现较好的均匀性,但在涂层表面观察到些许小颗粒。在图2(c)中,C组涂层表现出较好的致密性,但涂层中存在颗粒堆积现象,这可能是由于WC含量较高,在激光熔化过程中形成的微小颗粒集结所致。图2(d)中的D组涂层颗粒堆积现象更为显著,导致涂层表面较为粗糙,且存在微裂纹。说明WC粉末的添加显著提高了涂层的硬度和耐腐蚀性,尤其是在高WC比例的D组涂层中。随着WC粉末含量增加,涂层硬度逐渐增大,且高含量的WC有助于形成稳定且均匀的氧化膜。然而,Wc粉末的加入也增加了摩擦因数和磨损率,尤其是D组,涂层表面出现颗粒堆积,导致粗糙度增加。孟易辰和庆松等^[13-14]的研究表明,硬质颗粒有助于提高涂层硬度,但同时也使摩擦阻力增加,造成较高的摩擦

因数和磨损率。

不同粉末比例的涂层XRD谱图如图3所示。从图3中可以看出,4组涂层样品的XRD谱图都在 2θ 角度 44.5° 、 51.5° 和 75° 处显示出FeCoCrNiMo合金的FCC晶体结构特征峰。而B组、C组和D组在 2θ 角度 31.5° 、 36.5° 和 42° 等位置出现了WC晶体结构特征峰。且随着WC粉末比例的增高,Wc的衍射峰逐渐变得更加显著。可以看出,Wc粉末的加入显著影响了涂层的相组成。

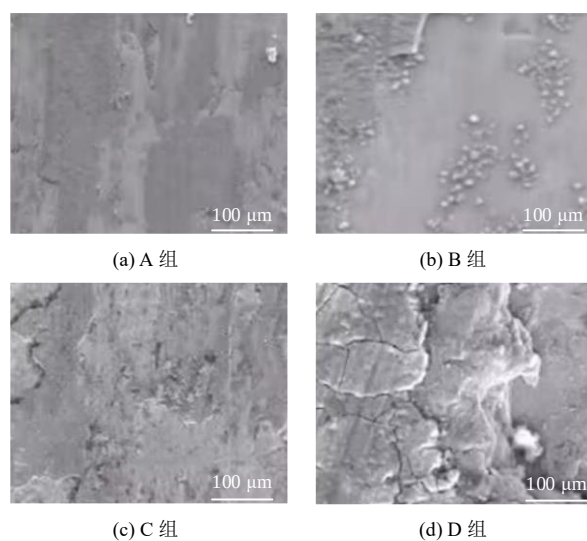


图 2 不同涂层粉末比例的微观组织形貌对比

Fig.2 Comparison of microstructure morphologies of coating with different powder ratios

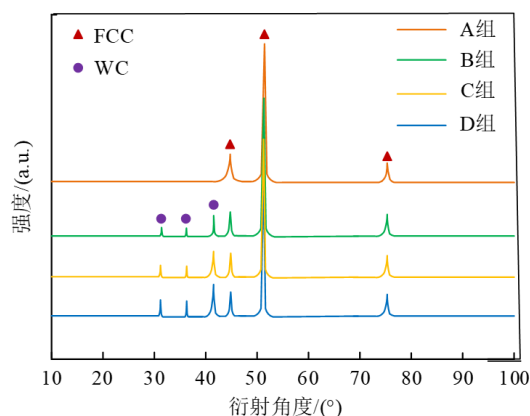


图 3 不同粉末比例的涂层 XRD 谱图

Fig.3 XRD patterns of coating with different powder ratios

2.2 硬度测试结果

不同粉末比例的涂层硬度测试结果如图4所示。从图4(a)中可以看出,随着涂层深度的增加,不同涂层比例的硬度均表现出缓慢降低的趋势,并在深度为1 200 μm 时趋于相同,约为425 $\text{HV}_{0.2}$ 。在涂

层表面即深度为0处, A组、B组、C组和D组的硬度分别约为575、625、650和675 $\text{HV}_{0.2}$ 。从图4(b)中可以看出, A组、B组、C组和D组的平均显微硬度分别为 570 ± 10 、 625 ± 5 、 670 ± 8 和 (705 ± 9) $\text{HV}_{0.2}$ 。综上所述, 随着WC粉末比例的增加, 涂层的硬度逐渐提升, 且在涂层深度较大时, 各组硬度趋于一致。

不同激光功率喷涂下涂层的硬度测试结果如图5所示。从图5(a)中可以看出, 在激光功率为1 kW时, 涂层表面的硬度为540 $\text{HV}_{0.2}$, 且随着涂层深度的增加, 硬度逐渐降低, 在深度为1 200 μm 时达到约420 $\text{HV}_{0.2}$, 降低幅度为22.22%。在激光功率为2 kW时, 涂层表面的硬度提升至600 $\text{HV}_{0.2}$, 硬度变

化曲线显示涂层深度越大, 硬度的下降越为平缓, 最终在1 200 μm 时趋于稳定, 约为430 $\text{HV}_{0.2}$, 降低幅度为28.33%。在激光功率为3 kW时, 涂层表面的硬度进一步提高至670 $\text{HV}_{0.2}$, 随着深度的增加, 硬度下降的幅度较小, 最终在1 200 μm 时达到445 $\text{HV}_{0.2}$, 降低幅度为33.58%。从图5(b)中可以看出, 1、2和3 kW功率下的平均显微硬度分别为 540 ± 12 、 600 ± 9 和 (670 ± 10) $\text{HV}_{0.2}$ 。综上所述, 随着激光功率的增加, 涂层的表面硬度显著提高。此外, 随着深度的增加, 硬度逐渐下降, 且较高功率下的硬度下降幅度较小, 表明较高功率的激光处理有助于提升涂层的整体硬度稳定性。

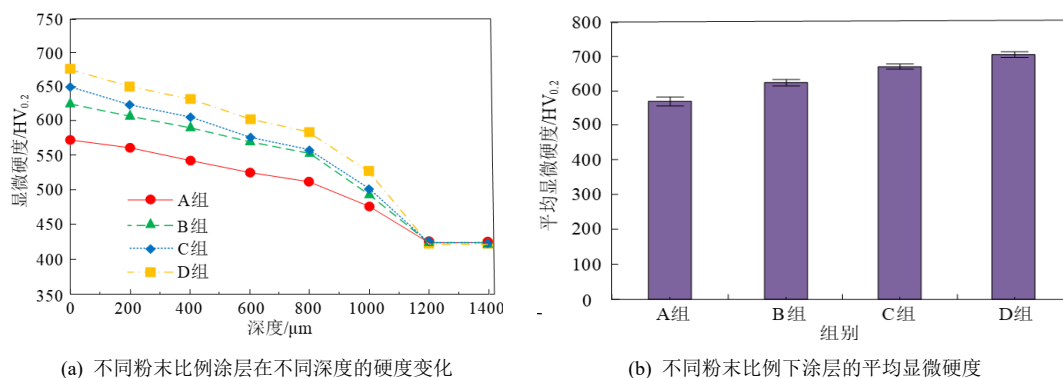


图4 不同粉末比例的涂层硬度测试结果

Fig.4 Hardness test results of coating with different powder ratios

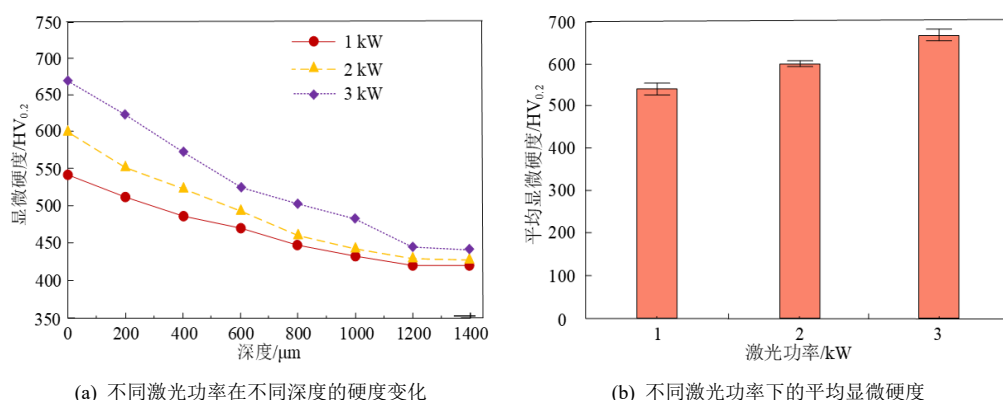


图5 不同激光功率喷涂下涂层的硬度测试结果

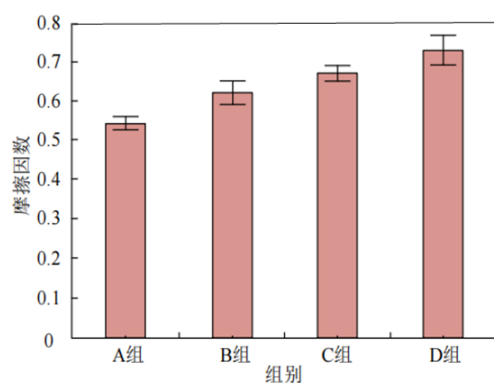
Fig.5 Hardness test results of coatings sprayed with different laser powers

2.3 耐磨性能测试结果

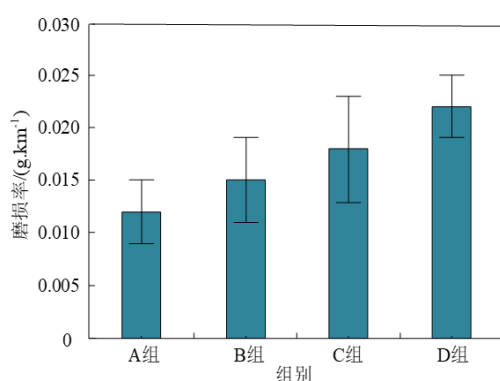
不同粉末比例的涂层耐磨性能测试结果如图6所示。从图6(a)中可以看出, A组、B组、C组和D组的摩擦因数分别为 0.54 ± 0.02 、 0.62 ± 0.03 、 0.67 ± 0.02 和 0.73 ± 0.04 。随着WC粉末比例的增加, 涂层的摩擦因数逐渐增大, 这表明涂层表面的摩擦阻力随WC粉末的比例增加而增大。从图6(b)中可以看出, A组、

B组、C组和D组的磨损率分别为 0.012 ± 0.003 、 0.015 ± 0.004 、 0.018 ± 0.005 和 (0.022 ± 0.003) g/km 。随着涂层中WC粉末比例的增加, 磨损率呈现逐渐增加的趋势。

综上所述, 随着WC粉末比例的增加, 虽然涂层的硬度得到提升, 但其摩擦因数和磨损率也随之增大。



(a) 不同粉末比例的涂层摩擦因数对比



(b) 不同粉末比例的涂层磨损率对比

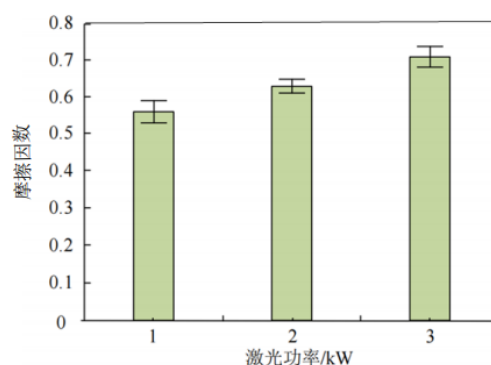
图6 不同粉末比例的涂层耐磨性能测试结果

Fig.6 Test results of wear resistance of coating with different powder ratios

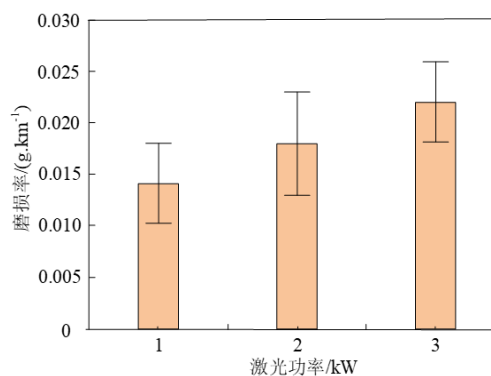
为了验证激光功率对涂层耐磨性能的影响,研究选择了A组涂层进行测试,不同激光功率下A组涂层的耐磨性能测试结果如图7所示。从图7(a)中可以看出,随着激光功率的增加,涂层的摩擦因数逐渐增加。在激光功率为1 kW时,涂层的摩擦因数为 0.56 ± 0.03 。涂层表面的硬度较低,摩擦阻力较小,因此涂层的摩擦因数相对较低。而在激光功率为2和3 kW时,涂层的摩擦因数提升至 0.63 ± 0.02 和 0.71 ± 0.03 。从图7(b)中可以看出,激光功率为1、2和3 kW时,磨损率分别为 0.014 ± 0.004 、 0.018 ± 0.005 和 $(0.022 \pm 0.004) \text{ g/km}$ 。随着激光功率的增加,涂层的磨损率逐渐增大。

综上所述,虽然随着激光功率的增加,涂层的硬度和致密性得到了提高,但也导致了涂层摩擦因数和磨损率的增加。从激光功率与摩擦磨损性能来看,随着激光功率的增加,涂层的摩擦因数和磨损率呈现上升趋势。1 kW条件下,涂层的摩擦因数较低,且磨损率相对较小,这可能是由于较低的功率导致涂层硬度较低,表面摩擦阻力较小。然而,当

激光功率提升至2 kW和3 kW时,涂层的硬度显著提高,从而导致了摩擦因数和磨损率增加。江迪等^[15]的研究提出,高熵合金涂层的组织与摩擦学性能密切相关。周志勇等^[16]的研究结果也表明,高硬度涂层会导致摩擦因数和磨损率的增加,这是由于表面硬度增大,摩擦阻力随之增强。



(a) 不同激光功率下涂层的摩擦因数对比



(b) 不同激光功率下涂层的磨损率对比

图7 不同激光功率喷涂下涂层的耐磨性能测试结果

Fig.7 Test results of wear resistance of coatings sprayed with different laser powers

为了更好地理解WC含量对涂层耐磨性的影响,研究选择了D组涂层进行详细的微观形貌分析,D组涂层的磨损微观形貌分析如图8所示。从图8可以看出,涂层表面在磨损痕迹的边缘聚集了大量碳化物,形成了较高的脊状结构,表明为磨粒磨损和黏着磨损混合机制。说明这些碳化物在磨损过程中起到了抗磨增强的作用,表面随着WC含量的增加,涂层硬度提高,磨损率显著降低。而基体的磨损区域显示出沿滑动方向有明显的凹槽,伴随着许多碳化物坑、微裂纹和沟槽,呈现出严重磨损的状态,以磨粒磨损机制主导。这些特征表明基体在滑动摩擦过程中发生了显著的材料移除和表面破坏,导致其耐磨性能较涂层差。

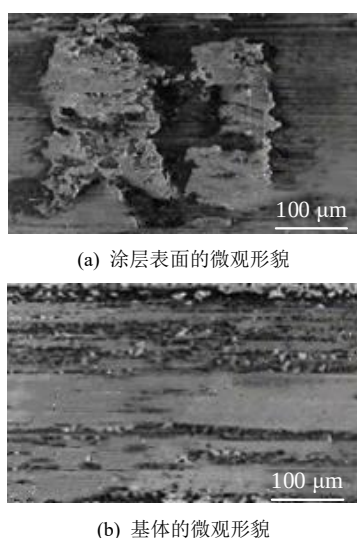


图 8 磨损表面微观形貌分析

Fig.8 Morphology analysis of worn surface

2.4 耐腐蚀性能测试结果

不同粉末比例的涂层耐腐蚀性能测试结果如图9所示。从图9(a)的涂层表面XRD谱图中可以看出, 腐蚀12 h后, 不同粉末组别的涂层表面主要生成了NiO和Cr₂O₃等腐蚀产物的衍射峰。NiO衍射峰的出现表明, 镍元素在腐蚀过程中与氧气反应, 形成了氧化镍层。这层氧化膜的形成能够有效防止进一步的腐蚀。然而, 图谱中同时可见Cr₂O₃的衍射峰, 说明铬元素的氧化产物在涂层表面形成了铬氧化膜。铬氧化膜具有较强的抗腐蚀能力, 能够为涂层提供额外的保护。在不同组别的比较中, B组的NiO和Cr₂O₃衍射峰较A组略显微弱, 表明B组涂层在腐蚀过程中形成的氧化膜厚度和均匀性相对较低, 这可能导致涂层的抗腐蚀能力相对较弱。与B组相比, C组的衍射峰强度较为显著, 表明该组涂层在形成氧化膜时更加均匀, 能够有效延缓腐蚀过程, 从而表现出较好的耐腐蚀性能。D组的衍射峰强度明显增强, 表明该组涂层的氧化镍和铬氧化膜比其他组更加厚实且均匀, 显示出最强的耐腐蚀性能。从图9(b)腐蚀72 h后的结果中可以发现, 涂层表面NiO和Cr₂O₃的衍射峰强度相较于12 h腐蚀有所增强, 表明随着腐蚀时间延长, 氧化镍和铬氧化物的层厚度逐渐增厚。尤其是在D组, 衍射峰强度的增加最为明显, 显示出该组涂层在长时间暴露于腐蚀介质中时, 仍能保持较好的抗腐蚀能力。综上所述, D组涂层在短时间和长时间的腐蚀过程中均表现出最强的耐腐蚀性。此外, 研究表明涂层的氧化膜主要由NiO和Cr₂O₃组成, 这两种氧化物有助于提升耐腐蚀

性。吴文宁的研究同样证实了这两种氧化物在提高耐腐蚀性方面的作用^[17]。

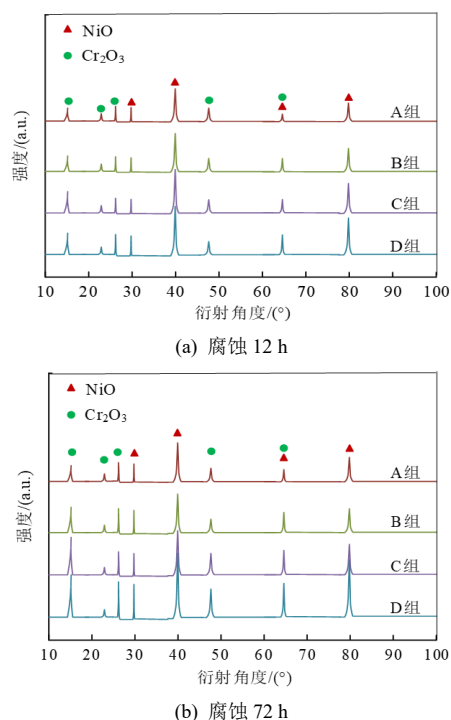


图 9 不同粉末比例的涂层耐腐蚀性能测试结果

Fig.9 Test results of corrosion resistance of coatings with different powder ratios

不同粉末比例的涂层氧化层厚度结果如表2所示。从表2中可以看出, 随着时间的增加, 各组涂层的氧化层厚度普遍增大。A组的氧化层厚度从12 h的(94±11) μm逐渐增加到72 h的(132±18) μm, 增长幅度为40%。B组的氧化层厚度从12 h的(88±10) μm增加到72 h的(116±21) μm, 增长幅度为32%, 增幅相对较小。C组由(100±5) μm增长至(136±12) μm, 增长幅度为35%。D组由(126±4) μm增长至(139±9) μm, 增长幅度为10.1%。综上所述, D组涂层在腐蚀过程

表 2 不同粉末比例的涂层氧化层厚度结果

Tab.2 Thickness results of oxide layer of coatings with different powder ratios

时间/ h	氧化层厚度/μm			
	A 组	B 组	C 组	D 组
12	94±11	88±10	100±5	126±4
24	102±12	92±12	108±6	128±5
36	110±14	98±14	115±7	130±6
48	118±15	104±16	122±8	132±7
60	126±16	110±18	130±10	134±8
72	132±18	116±20	135±12	139±9

中氧化层最厚,表明其受腐蚀程度较大,耐腐蚀性能相对较差。研究发现,随着腐蚀时间的延长,氧化膜厚度逐渐增加,其中D组氧化膜增厚最小,仅为10.1%,表现出最强的抗腐蚀能力。这表明高WC含量的涂层能形成更稳定、均匀的氧化膜,从而增强耐腐蚀性。石锋和肖浩的研究也验证了这一点^[18-19]。

不同激光功率下A组涂层的耐腐蚀性能测试结果如图10所示。从图10(a)的涂层表面XRD谱图中可以看出,在不同激光功率下,腐蚀12 h后涂层表面同样主要生成了NiO和Cr₂O₃等腐蚀产物的衍射峰。在1 kW功率下,NiO和Cr₂O₃的衍射峰强度较弱,表明氧化膜的形成较为薄弱,涂层的抗腐蚀能力较低。在2 kW功率下,涂层表面生成的氧化镍和铬氧化膜衍射峰较1 kW功率下明显增强,显示出氧化膜的厚度有所增加且均匀性有所改善。在3 kW功率下,涂层表面的NiO和Cr₂O₃衍射峰显著增强,强度明显高于1 kW和2 kW功率下的结果,说明涂层在较高功率下形成了较厚且均匀的氧化膜。从图10(b)腐蚀72 h后的结果中可以看出,随着腐蚀时间的延长,涂层表面NiO和Cr₂O₃的衍射峰强度均有所增强,表

明氧化镍和铬氧化物的层厚度逐渐增厚。在1 kW功率下,尽管氧化镍和铬氧化膜逐渐增厚,但其衍射峰强度仍较弱。在2 kW功率下,涂层表面氧化镍和铬氧化膜的衍射峰强度明显增强。在3 kW功率下,涂层表面的NiO和Cr₂O₃衍射峰强度达到最强,说明该功率下涂层形成了最厚且均匀的氧化膜。综上所述,随着激光功率的增加,涂层的氧化膜厚度逐渐增强,表明较高的激光功率下涂层的腐蚀程度更大。

不同激光功率下A组涂层的氧化层厚度结果如表3所示。随着时间的增加,不同激光功率的氧化层厚度普遍增大。1 kW功率下的氧化层厚度随着时间的延长逐渐增厚,但增幅较为平缓,厚度从12 h的(90±8) μm增加到72 h的(122±15) μm,增长幅度为36%。2 kW功率下的氧化层厚度增厚的速度较快,由(95±9) μm增长至(132±17) μm,增长幅度为38%。3 kW功率下氧化层的增厚幅度最显著,由(98±9) μm增长至(140±19) μm,增长幅度达到了42%。综上所述,随着激光功率的增大,涂层的氧化膜厚度随时间的推移呈现出增加的趋势,表明较高的激光功率下涂层的腐蚀程度更大。戚红月等^[20]的研究也表明,加强重点腐蚀区域的抗腐蚀能力可以显著延长材料的使用寿命。

表 3 不同激光功率下的氧化层厚度结果

Tab.3 Thickness results of oxide layer under different laser powers

时间/h	氧化层厚度/μm		
	1 kW	2 kW	3 kW
12	90±8	95±9	98±8
24	104±10	111±11	115±12
36	110±11	118±12	125±13
48	115±12	124±14	128±15
60	120±13	128±15	134±16
72	122±15	132±17	139±19

3 结 论

通过激光熔覆技术在FeCoCrNiMo高熵合金涂层中添加不同比例的WC粉末并优化激光功率,系统性地研究了工艺参数对涂层组织结构及腐蚀行为的影响,得到以下结论:

(1) 激光功率显著改善涂层致密度与显微硬度,3 kW为最优参数。随激光功率从1 kW增至3 kW,涂层表面粗糙度降低,孔隙和裂纹显著减少,熔化

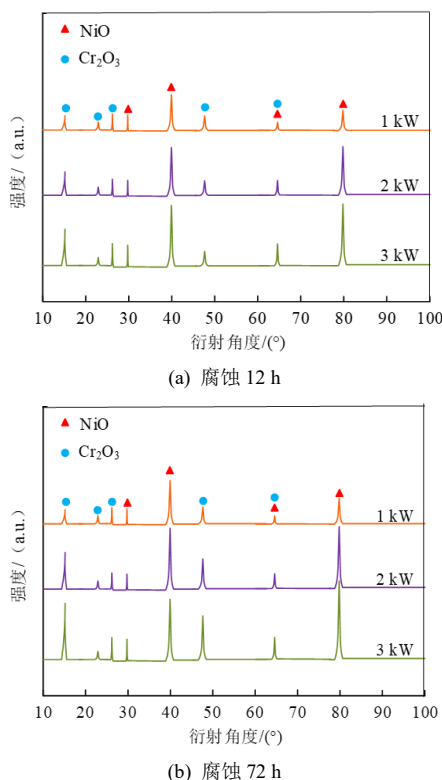


图 10 不同激光功率下的耐腐蚀性能测试结果

Fig.10 Test results of corrosion resistance under different laser powers

均匀性提高。涂层表面硬度从540 HV_{0.2}提升至670 HV_{0.2}，这是由于高功率促进充分熔融和致密化。3 kW功率下氧化膜增厚最显著，形成更厚且均匀的NiO和Cr₂O₃保护层，有效延缓腐蚀进程。

(2) WC粉末添加提升涂层硬度与耐蚀性，但增加摩擦磨损，D组15%含量耐蚀性最优。WC添加使涂层硬度从570 HV_{0.2}增至705 HV_{0.2}，归因于WC硬质相强化。同时，WC比例增加促进更稳定连续的NiO和Cr₂O₃氧化膜形成，D组腐蚀72 h后氧化层厚度仅10.1%增幅最小，表明其氧化膜保护性最佳。但高WC含量也导致摩擦因数和磨损率升高，因硬质颗粒增大表面摩擦阻力。

(3) 耐腐蚀性能与氧化膜稳定性直接相关，高功率与高WC含量协同优化保护效果。耐蚀性取决于表面氧化膜NiO和Cr₂O₃的致密性、均匀性及稳定性。高激光功率和高WC含量均能促进更厚、更均匀的氧化膜形成。D组在3 kW下氧化膜增厚显著且均匀，腐蚀12 h后衍射峰最强，72 h后氧化层厚度达(139±9) μm，实现最优腐蚀防护。氧化膜增长幅度越低，表明其稳定性越强，腐蚀防护效果越持久。

参考文献

- [1] 王凯, 盛颖航, 高鹏, 等. 激光熔覆 FeCoCrNiMn 高熵合金涂层的工艺探索 [J]. 表面技术, 2025, 54(9): 175-188.
- [2] 张泽疆, 李新梅. 激光熔覆 CoCrFeNiSix 高熵合金涂层的耐磨和耐蚀性能[J]. 材料研究学报, 2024, 38(10): 741-750.
- [3] 谢玉莹, 刘思思, 刘金刚, 等. 激光熔覆 NiCoCrTaAl-TiC 复合涂层组织性能及摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2024, 37(5): 253-262.
- [4] 杜新宇, 翟长生, 荣海松, 等. 激光熔覆 FeCoCrNiMoBSi 高熵合金涂层的电化学腐蚀行为[J]. 金属热处理, 2024, 49(8): 261-267.
- [5] 杨鹏宇, 冯光明, 李继强, 等. H13 钢激光熔覆 Fe 基涂层组织与耐蚀性能[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(5): 258-264.
- [6] 张国建, 程西云, 纪秀林, 等. 激光熔覆不同层数 FeCoNiCr_{0.5}Al_{0.2} 高熵合金涂层的组织与性能[J]. 表面技术, 2024, 53(21): 187-197.
- [7] 刘伟, 柯大伟, 闻凯, 等. 激光功率对 Fe-Ni-Ti 熔覆层成形质量与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(5): 157-165.
- [8] 蒋赛男, 解芳, 翟长生, 等. 激光功率对 CrCoFeNiMoSi_{1.2}B_{1.1} 高熵合金激光熔覆涂层微观组织及耐蚀性的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(4): 19-27.
- [9] LIM W Y S, CAO J, SUWARDI A, et al. Recent advances in laser-cladding of metal alloys for protective coating and additive manufacturing [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2022, 36(23): 2482-2504.
- [10] 王智洁, 唐兴颖, 陈积权, 等. 亚/超临界水环境下表面涂层对合金腐蚀防控的研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(9): 78-89.
- [11] 张磊, 魏鑫, 霍嘉翔, 等. TiC 含量对激光熔覆 AlCoCrFeNi 基高熵合金复合涂层抗磨损和耐腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2024, 52(5): 76-83.
- [12] 杜彦斌, 雷鑫, 张文平, 等. 航空用 17-4PH 表面激光熔覆 15-5PH 涂层组织与性能分析[J]. 航空制造技术, 2024, 67(19): 135-142.
- [13] 孟易辰, 褚胤闰, 石岳林, 等. 激光熔覆 CoCrNi 系中高熵合金的摩擦学和电化学性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2025, 54(4): 983-992.
- [14] 庆松, 孙文磊, 张团, 等. 321 不锈钢表面高速激光熔覆 Ni60/WC 涂层微观组织与耐磨性及腐蚀性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(7): 223-233.
- [15] 江迪, 张树玲, 吴苏瑞, 等. 激光熔覆 FeCrCoMn 高熵合金涂层的组织和摩擦学性能[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(11): 1460-1470.
- [16] 周志勇, 曾艺星, 杨金鑫, 等. 储油罐用慢干型高性能防腐聚脲涂层的制备及性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44(4): 121-126.
- [17] 吴文宁, 孙文磊, 杨玉林, 等. WC 含量对激光熔覆 CoCrFeNiTi 高熵合金涂层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(9): 2642-2652.
- [18] 石锋, 魏祥, 陈志国, 等. 超高速激光熔覆 Al₂O₃-316L 涂层工艺优化及耐腐蚀性能研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(2): 178-182.
- [19] 肖浩, 黄剑, 汪鹏, 等. 高速激光熔覆 FeCoCrNiMo 高熵合金涂层微观组织演变及耐蚀性研究[J]. 中国激光, 2025, 52(4): 122-133.
- [20] 戚红月, 董炎军, 张巡蒙, 等. 铅酸电池正极板栅结构的改进[J]. 电池, 2024, 54(5): 693-695.