

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.08.03

铝基铜涂层的管约束电爆喷射沉积方法及其特性

栗勃森¹, 朱 亮^{1*}, 任继炜¹, 安俊锦², 周 辉¹

1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050
2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050

摘要: 铜、铝物理性能差异较大, 且铝基体表面易形成致密氧化膜, 导致传统喷涂技术制备的铝基铜涂层结合强度低、易开裂。采用自主研发的管约束连续丝电爆喷射沉积装置制备铝基铜涂层, 该方法可有效去除铝基体表面氧化层, 改善涂层结合强度。研究结果显示, 当初始充电电压11 kV、电容储量6.66 μF 、电极间距60 mm、铜丝丝径0.3 mm、喷射距离30 mm时, 能有效清除铝基体表面氧化膜; 在其他参数不变的情况下, 将初始充电电压调整为9.5 kV, 制备的铜涂层致密、均匀、平整度好, 与基体形成典型的冶金结合界面, 涂层粗糙度 $R_a=0.9 \mu\text{m}$ 、 $S_a=1.9 \mu\text{m}$, 达到微米级。弯曲试验表明铜涂层与基体结合效果良好, 对铝基铜涂层截面的EBSD分析证实, 电爆喷射沉积法制备的铜涂层对基体表面具有细晶强化作用, 且铜涂层的耐蚀性与导电性均优于铝基体。该方法为铝基铜涂层材料的制备提供了新思路。

关键词: 电爆喷射沉积; 管约束; 铝基铜涂层; 冶金结合; 性能优化

中图分类号: TG146 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)08-0038-09

Cross-sectional Properties and Bonding Characteristics of Copper Coatings Deposited by Electroburst Jetting on Aluminum Surfaces

LI Bosen¹, ZHU Liang^{1*}, REN Jiwei¹, AN Junjin², ZHOU Hui¹

1. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China
2. College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Abstract: The physical properties of copper and aluminum differ significantly. Due to the dense oxide film that easily forms on the surface of the aluminum substrate, the bonding strength of aluminum-based copper coatings prepared by traditional spraying techniques is low and they are prone to cracking. By using a self-developed continuous wire electric explosion deposition device with tube constraints, an aluminum-based copper coating is prepared. This method can effectively remove the oxide layer on the surface of the aluminum substrate and improve the bonding strength of the coating. Research results show that when the initial charging voltage is 11 kV, the capacitance is 6.66 μF , the electrode spacing is 60 mm, the copper wire diameter is 0.3 mm, and the spraying distance is 30 mm, the oxide film on the surface of the aluminum substrate can be effectively removed. When other parameters remain unchanged and the initial charging voltage is adjusted to 9.5 kV, the prepared copper coating is dense, uniform, and smooth, forming a typical metallurgical bonding interface with the substrate. The coating roughness $R_a=0.9 \mu\text{m}$ and $S_a=1.9 \mu\text{m}$ achieve micron levels. Bending tests indicate that the bonding effect between the copper coating and the substrate is good. EBSD analysis of the cross-section of the aluminum-based copper coating confirms that the copper coating prepared by the electric explosion deposition method has a fine-grain strengthening effect on the substrate surface, and the corrosion resistance and conductivity of the copper coating are superior to those of the aluminum substrate. This method provides a new approach for the preparation of aluminum-based copper coating materials.

Keywords: electroexplosion spray deposition; tube confinement; aluminum based copper coating; metallurgical bonding;

收稿日期: 2024-05-16 修回日期: 2025-01-19

基金项目: 甘肃省教育厅高等学校产业支撑计划项目(2023CYZC-22); 甘肃省科技重大专项(22ZD6GA008); 甘肃省在站博士后专项(23JRRA762)

作者简介: 栗勃森(1998—), 男, 硕士, 主要从事电爆喷射沉积方面的研究。

通讯作者: 朱 亮(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事电爆喷射沉积及超窄间隙焊接的研究。E-mail: zhul@lut.edu.cn。

performance optimization

引用格式:栗勃森,朱亮,任继炜,等. 铝基铜涂层的管约束电爆喷射沉积方法及其特性[J]. 电焊机,2025,55(8):38–46.

Citation:LI Bosen, ZHU Liang, REN Jiwei, et al. Cross-sectional Properties and Bonding Characteristics of Copper Coatings Deposited by Electro-burst Jetting on Aluminum Surfaces[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(8): 38–46.

0 引言

铝是一种轻质、经济且导电性良好的材料,铝基铜涂层材料以及铜铝双金属复合材料在电力、电池、通讯和新能源领域具有取代纯铜材料的潜力^[1]。然而,铝基体表面容易形成致密氧化膜,该氧化膜不仅会增大铜铝界面接触电阻,还会显著降低两者结合强度,成为制约铝基铜涂层应用的关键瓶颈。目前,铜涂层制备常用的方法有激光熔覆法、冷喷涂法及等离子辅助冷喷涂法。宁晨红^[2]等采用蓝光激光熔覆技术在316L不锈钢表面成功熔覆纯铜涂层;张龙龙^[3]以氦气为加速气体,使用冷喷涂方法在304不锈钢上制备铜涂层;陈文超^[4]等则利用等离子辅助冷喷涂法在铜基体表面实现了铜涂层的有效沉积。但上述方法均无法在无预处理的铝基体表面直接制备高性能铜涂层,铝基铜涂层的制备目前依然没有较为成熟的方法,这是增材制造技术领域亟需解决的难题。

现有铝表面铜涂层的热喷涂通常使用爆炸喷涂和等离子喷涂等热喷涂方法,但由于铜、铝两种材料在热膨胀系数、延伸率、变形抗力以及熔点等物理性能方面存在较大差异,制备优质铜铝复合材料往往需要复杂的工艺协调及繁琐的制备工序,且难以高效清除铝基体表面氧化层,制约了涂层结合强度的提升。

电爆喷射沉积技术是一种新型的热喷涂技术,其原理是通过脉冲高压作用于金属丝两端,使金属丝在极短时间内导通、熔化、液化及气化,并发生爆炸,转变为气-液混合态高速喷射粒子,高能喷射粒子从喷射窗口高速射出,与基体表面发生碰撞、沉积并形成涂层^[5]。文献^[6]对电爆喷射沉积法的研究现状进行了综述,该方法经历了自由、定向和约束喷涂。兰州理工大学在自动化电爆喷射装置的研发中进行了很多工作,目前,通过以槽作为喷射窗口的槽约束电爆喷射沉积装置已成功制备了高

强度Al涂层^[7]、高性能银基复合涂层^[8]及Ta10W表面Mo涂层^[9]。但由于约束槽对喷射粒子约束效果不足够强,喷射粒子分散且动能不足,无法对铝表面氧化层进行有效的喷射清除,无法得到强度较高的铝基涂层。

基于此,本文采用自主研发的管约束带载丝式连续电爆喷射沉积装置,开展铝基铜涂层的制备试验,系统研究铝基体表面氧化层清除效果及涂层性能,旨在为铝基铜涂层的高效制造提供新途径。

1 管约束带载丝电爆喷射沉积装置

管约束带载丝连续电爆喷射沉积装置的工作原理如图1所示。将铜丝以半包裹的形式嵌入具有消融作用的^[10]超高分子量聚乙烯带中制成载丝带,并将载丝带穿过电爆管,当电路开关闭合后,储能电容C储存的电能以高压脉冲电流形式通过电极作用在铜丝上,促使铜丝在极短时间内熔化、气化形成气-液混合态高能喷射粒子,同时伴随爆炸冲击波的产生^[11];在冲击波驱动及电爆管、喷口的双重约束作用下,气-液混合态高能喷射粒子获得定向动能,直接作用于铝基体表面,实现铝基体表面氧化层的喷射清除以及铝基铜涂层的制备。整个喷射沉积过程由自动控制实现,图2为该管约束带载丝电爆喷射沉积装置实物。

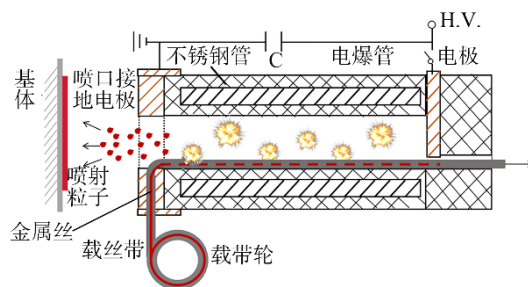


图1 管约束带载丝电爆喷射沉积工作原理

Fig. 1 Working principle of tube-constrained wire-carrying electro-explosive jet deposition

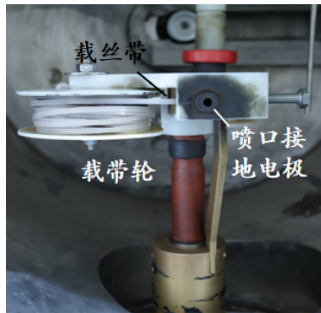


图2 管约束带载丝电爆喷射沉积装置实物

Fig. 2 Tube-constrained wire-carrying electro-explosive jet deposition device

2 工艺试验

2.1 工艺试验参数

电爆喷射沉积试验各参数范围如表1所示,在该范围内,采用控制变量法对各参数进行组合,并在各工艺下进行5A02型铝合金表面氧化层清除及铝基铜涂层的系列电爆喷射工艺试验。

表1 铝表面氧化层清除及铝基铜涂层的电爆喷射沉积试验参数

Table 1 Test parameters for continuous electroburst jet deposition of copper coatings on tube restraints with carrier filaments

初始充电电压 /kV	电容储量 /μF	电极间距 /mm	铜丝丝径 /mm	沉积距离 /mm
8~11	6.66, 8.88	60	0.2, 0.3, 0.4	0~30

2.2 铝表面氧化层的喷射清除

铝表面氧化层的喷射清除效果在一定范围内随能量沉积的增大而提升,能量沉积直接影响喷射粒子的动能,粒子动能越大,对于铝基体表面的碰撞效果越明显,铝表面氧化层的清除效果越好。图3为能量沉积较小时涂层沉积边缘区域的铝表面氧化层的喷射清除效果。由图可知,涂层边缘处的铝表面氧化层喷射清除效果弱于涂层中心区域,在一定范围内,随着能量沉积的增加,铝表面氧化层的喷射清除效果会逐渐提升,最终实现全部清除。

初始充电电压、铜丝丝径以及电容储量是影响能量沉积的关键因素。保持铜丝丝径不变时,铜丝能量沉积随初始充电电压及电容储量的增大而增加,但过高的能量沉积会导致铜丝气化程度高,液态粒子占比较少,反而不利于铝表面氧化层的清除;保持初始充电电压及电容储量不变时,铜丝能

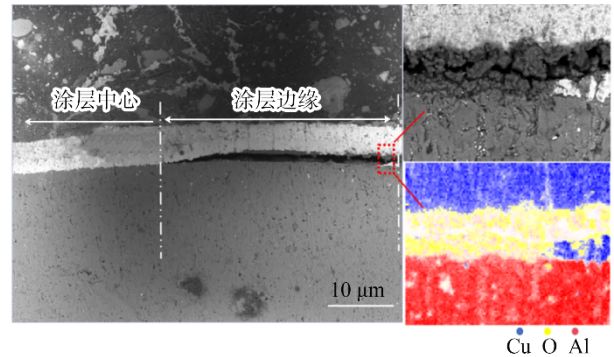


图3 涂层沉积边界区域铝表面氧化层喷射清除效果

Fig. 3 Electroburst jet removal effect of oxide layer on aluminum substrate surface in coating deposition boundary area

量沉积随铜丝丝径增大而减小,铜丝丝径较大时能量沉积较小,使得喷射粒子粒径较大、动能较小,同样影响清除效果。

试验确定的最佳氧化层清除参数为:初始充电电压 11 kV,电容储量 6.66 μF,电极间距 60 mm,铜丝丝径 0.3 mm,喷射距离 30 mm。在此参数下,铝表面氧化层可被完全清除。

2.3 铝基铜涂层的喷射沉积

在完成铝基体表面氧化层的喷射清除后,进行多种参数下铝基铜涂层系列电爆喷射沉积工艺试验。喷射粒子形态对涂层质量起决定性作用:粒径及冲击动能匹配的液态喷射粒子可与已清除氧化层的基体表面有效碰撞并铺展,形成致密涂层;过小的气态粒子易形成纳米铜粉末“黑斑”或悬浮于空气,降低沉积率;而粒径较大的液态喷射粒子与基体碰撞无法完全铺展,最终会以大颗粒的形式进行沉积,易导致涂层粗糙度升高、缺陷增多。

能量沉积是影响喷射粒子形态的关键因素,能量沉积越大,喷射粒子中粒径较小的液态粒子与气态粒子占比越大。小粒径液态粒子与基体发生有效碰撞的概率较大,易形成粗糙度较小的涂层,而气态粒子最终会散布在空气中,影响涂层沉积率。在一定范围内,随着能量沉积的升高,涂层粗糙度变小,同时也可保证较高的沉积率。

试验发现,当初始充电电压为 9.5 kV,电容储量 6.66 μF,电极间距 60 mm,铜丝丝径为 0.3 mm,喷射距离为 30 mm 时,铝基铜涂层表面最为平整均匀,无大颗粒沉积,涂层表面“黑斑”较少,且粗糙度为 $Ra=0.9 \mu\text{m}$, $Sa=1.9 \mu\text{m}$,属微米级^[12],确定该参数为

铝表面铜涂层制备最佳工艺参数。图4a为铝基铜涂层表面形貌,图4b为铝基铜涂层表面粗糙度。

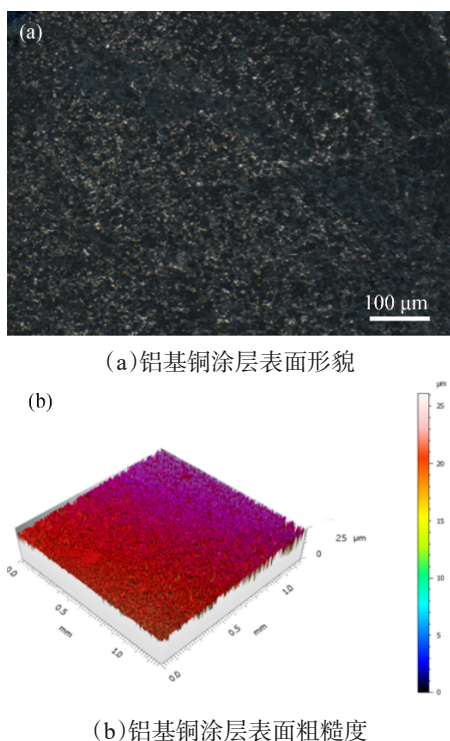


图4 铝基铜涂层表面形貌及表面粗糙度

Fig. 4 Surface morphology and surface roughness of aluminum-based copper coatings

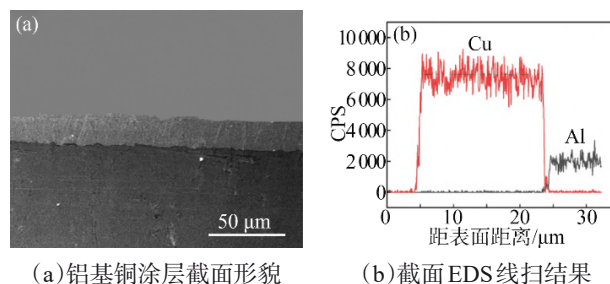
3 铝基铜涂层特性

3.1 铝基铜涂层结合特性

涂层表面质量及与基体的结合性能是衡量涂层是否具有应用价值的重要指标。图5为最佳工艺参数下进行铝表面氧化层喷射清除与铝基铜涂层制备后样品截面形貌及截面EDS线扫结果。由图5a可知,铜涂层厚度均匀(约25 μm),涂层致密,无裂纹、气孔等缺陷,且与喷射清除时所沉积铜涂层形成无明显界面的连续结合。图5b的EDS线扫结果进一步证实,喷射沉积的铜涂层与氧化膜喷射清除作业时形成的铜涂层结合良好,属典型的冶金结合界面。

图6为铝基铜涂层截面EDS面扫结果,由图可知,铜涂层内部未出现裂纹及气孔等缺陷,无杂质存在,涂层内元素分布均匀,致密性好。

结合铜涂层表面形貌、铜涂层与铜涂层结合情



(a) 铝基铜涂层截面形貌 (b) 截面EDS线扫结果

图5 铝基铜涂层截面形貌及截面EDS线扫结果

Fig. 5 Cross-sectional morphology and EDS line scan results of aluminum-based copper coating

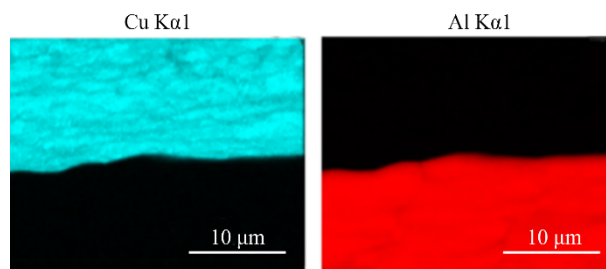


图6 铝基铜涂层截面EDS面扫结果

Fig. 6 EDS results of aluminum-based copper coating cross-section

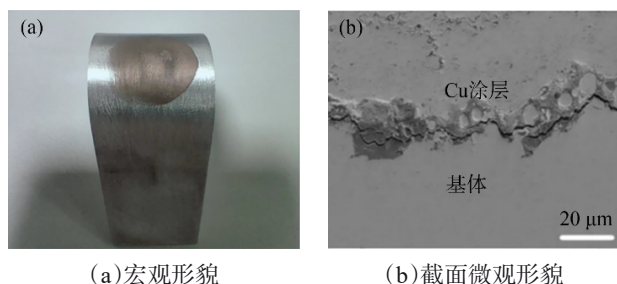
况以及铜涂层与铝基体的结合情况,在最佳工艺参数下进行铝表面氧化层电爆喷射清除及铝基铜涂层的电爆喷射沉积后,铝基铜涂层表面情况及与基体结合情况都满足基本要求。

3.2 铜涂层三点弯曲试验

采用万能试验机(型号1COD)对最佳工艺参数下制备的10个铝基铜涂层试样进行三点弯曲试验。试验样品为铝基铜涂层复合试样,尺寸为100 mm×20 mm×2 mm;万能试验机设定跨距50 mm,加载速率5 mm/min,弯曲角度180°。

根据GB/T5270—2005《金属基体上的金属覆盖层 电沉积和化学沉积层 附着强度试验方法评述》进行定性分析,结果显示:弯曲试验后,铜涂层表面未出现宏观开裂、起皮、脱落等现象,表明涂层与基体结合效果良好^[7]。

图7为铜涂层沉积试样的三点弯曲试验结果的宏观形貌和截面微观形貌。10个试样经三点弯曲试验后,宏观上均未出现开裂、起皮、脱落等现象(见图7a),涂层随基体形变发生相应形变;图7b的截面微观形貌显示,即使在弯曲最大形变处,铜涂层与铝基体之间只产生了一些微小裂纹,涂层与基体结合情况整体较好。



(a)宏观形貌 (b)截面微观形貌

图7 铝基铜涂层三点弯曲试验结果

Fig. 7 Three-point bending test results of aluminum-based copper coatings

3.3 铝基铜涂层物相分析

图8为铜涂层的X射线衍射结果。由图可知,涂层的衍射峰主要对应铜的特征峰,且衍射峰背底较强、峰强度较高,呈现出明显的晶化特征,具体表现为衍射峰的微小宽化;此外,图谱中未发现氧元素的特征峰,表明涂层未发生明显氧化。其中,铜涂层在 $2\theta=43.58^\circ$ 、 50.65° 、 74.33° 处出现三强峰。

根据德拜-谢勒公式可初步计算出铜涂层平均晶粒尺寸:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

式中 D 为平均晶粒尺寸; λ 为入射X射线波长 ($0.154\ 06\ \text{nm}$); β 为衍射峰对应的半高宽; K 取常数 0.89。根据式(1)计算得出,铜涂层在某一晶向上的平均晶粒尺寸约为 $20\ \text{nm}$,表明在初始充电电压为 $9.5\ \text{kV}$ 的电爆喷射沉积工艺下,铝表面制备的铜涂层为典型的纳米晶结构。

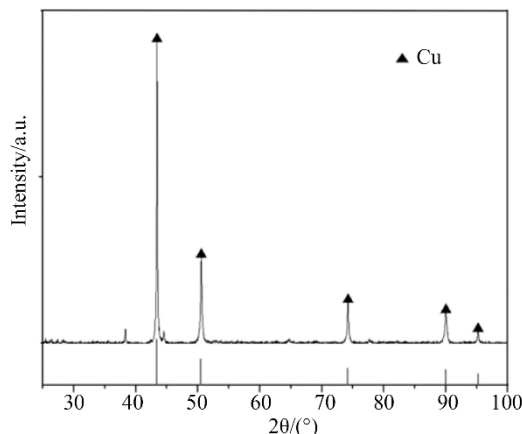


图8 Cu涂层表面X射线衍射检测结果

Fig. 8 X-ray diffraction detection of Cu coated surfaces

分析原因:电爆喷射过程中产生的强大冲击波使电爆管内形成负压,管内空气在粒子从喷口射出之前被排出,使得喷射粒子在该过程中不与空气接触;同时,粒子沉积阶段的时间极短,不足以满足氧化反应所需的时间条件,因此铜涂层的XRD结果中主要呈现铜元素的衍射特征。此外,电爆喷射沉积过程在 $10\ \mu\text{s}$ 内完成^[13],喷射粒子与基体碰撞后迅速铺展、冷却形成涂层,由于完成再结晶过程的时间不足,最终导致涂层中晶粒出现纳米晶结构。

3.4 铜涂层微观组织和织构形貌

电爆喷射沉积制备铝基铜涂层截面EBSD取向成像如图9所示。由图可知,铜涂层的晶粒尺寸明显小于铝基体,这与前述物相分析中纳米晶结构的结论一致。

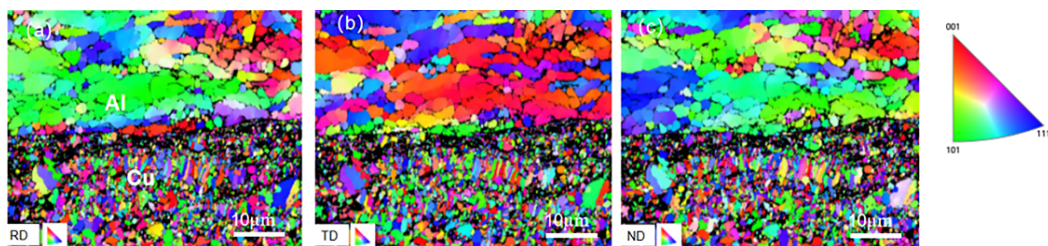


图9 铝基铜涂层截面取向成像图

Fig. 9 Cross-sectional orientation imaging of aluminum-based copper coatings

从图9a、9b、9c可以观察到,铜涂层整体晶粒取向分布具有较大的随机性;相较于铝基体,铜涂层晶粒经高速碰撞后产生了明显的塑性变形,且晶粒取向整体呈现出 $\langle 001 \rangle$ 和 $\langle 101 \rangle$ 晶向的择优趋势,结合分析可知界面沿RD、TD6方向存在择优取向^[14]。此外,铜涂层主要由大量等轴晶与少量柱状晶组

成,其中等轴晶无择优取向,即使取向不同的等轴晶粒间也可彼此咬合,裂纹不易扩展,同时,细小的等轴晶具有细晶强化作用,可提高工件的性能。

3.5 铜涂层晶界分析

图10为铜涂层截面晶界图,晶界图中,黑色线条代表小角度晶界($2^\circ \sim 15^\circ$),绿色线条代表大角度

晶界($>15^\circ$)。对比可知,铝基体中大小角度晶界均布,晶界密度较小;而铜涂层中以大角度晶界为主,小角度晶界占次要部分,且整体晶界密度显著高于铝基体。

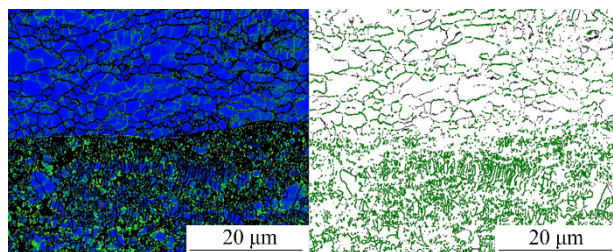


图10 铝基铜涂层截面晶界图

Fig. 10 Cross-sectional grain boundary map of aluminum-based copper coating

小角度晶界类似于微织构,也可称之为宏区,该区域位错易穿过晶界进入相邻晶粒,在外力的作用下易引发较长距离的滑移,属于局部不均匀塑性变形,易导致应力集中,从而降低材料的缺口敏感性和疲劳性能;与之相反,大角度晶界能有效阻碍位错滑移,可提升材料的疲劳性能,减少变形倾向。

由于铜涂层具有较高的晶界密度,且以强化效果更显著的大角度晶界为主,因此表现出更强的晶界强化作用,在强度、硬度等力学性能上优于铝基体。

3.6 铜涂层电化学腐蚀

试验中,将基体与铜导线焊接后嵌入环氧树脂中密封,仅暴露10 mm×10 mm的涂层表面,试样经干燥器固化后进行电化学测试。

所有测试均采用三电极体系,通过上海辰华电化学工作站(CHI660D)完成。在此体系中,试样为工作电极(Working Electrode, WE),铂片作为辅助电极(Counter Electrode, CE),参比电极(Reference Electrode, RE)根据所使用电解液(3.5 wt.% NaCl)中使用饱和甘汞电极。电化学测试之前,首先开启电化学工作站,三电极体系按规范连接:红色接头接助电极,白色接头接参比电极,绿色接头接工作电极。将样品浸入电解液静置0.5 h以达到稳定的开路电位,以确保试样达到稳定状态。参数设置为:扫描速度为1 mV/s,扫描范围-1~1 V。随即在OCP条件下进行电化学阻抗谱(EIS)测试,起始电位选取为开路电位测试的电位稳定值,频率范围为

0.01~105 Hz,振幅为0.01 V。接下来,在-0.6~+0.8 V(相对于OCP)的电压范围下进行动电位极化(PDP)曲线测试,扫描速率为0.01 mV/s。由于电化学测试结果具有可重复性,故采用相同的测试参数,并在每组实验中选择3个平行试样进行测试,从而可以有效地验证数据的可靠性。

图11为铜涂层与铝基体在3.5 wt.% NaCl溶液中的动电位极化曲线。从图中观察可知,所有样品都具有明显的钝化区间,铜涂层钝化区间为-0.48 VSCE~-0.72 VSCE。这表明铜涂层和铝基体在腐蚀过程中容易形成稳定的钝化膜来减缓进一步的腐蚀。腐蚀电位(E_{corr})是衡量材料腐蚀稳定性的一个重要指标,较低的 E_{corr} 意味着材料更容易腐蚀^[15];腐蚀电流密度(I_{corr})是另一个关键参数,它直接关系到材料的腐蚀速率^[16]。根据Faraday定律, I_{corr} 越高,腐蚀速率越快,耐蚀性能越差^[17]。对图11的极化曲线进行拟合后,得到了三个电化学参数(E_{corr} 、 I_{corr} 、 R_p),如表2所示。拟合结果表明,铜涂层的 E_{corr} 为-0.818 V, $I_{\text{corr}}=3.291\times 10^{-5}$ A/cm², $R_p=722.8$ Ω·cm²。相较于铝基体($E_{\text{corr}}=-0.898$ V, $E_{\text{corr}}=8.743\times 10^{-5}$ A/cm², $R_p=534.6$ Ω·cm²),表现出更正的腐蚀电位、更小的腐蚀电流密度及更高的极化电阻,证实其耐蚀性更优。

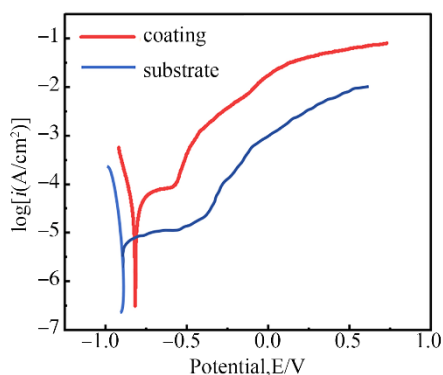


图11 铜涂层与铝基体在3.5 wt.% NaCl溶液中的电位极化曲线

Fig. 11 Potentiodynamic polarization curves of copper coating and aluminum substrate in 3.5 wt.% NaCl solution

表2 电化学参数

Table 2 Electrochemical parameters

样品	E_{corr}/V	$I_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$R_p/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$
涂层	-0.818	3.291×10^{-5}	722.8
基体	-0.898	8.743×10^{-5}	534.6

图 12 为铜涂层和铝基体在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的电化学交流阻抗测试的 Nyquist 图。由图观察可知,所有样品的 Nyquist 图呈现半圆形,单容抗弧特征。电容性半圆弧的大小表示试样交流阻抗的大小,半圆弧的直径越大,表明材料的耐蚀性能越强^[18]。根据 Nyquist 图,铜涂层的半圆弧直径大于铝基体,进一步验证其耐蚀性较好,对于基体具有一定的保护作用。

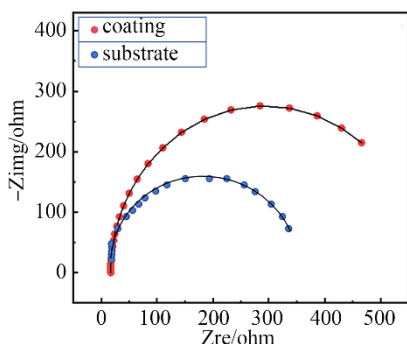


图 12 电化学交流阻抗测试 Nyquist 图

Fig. 12 Nyquist plot of electrochemical AC impedance test

图 13、图 14 分别为铜涂层和铝基体在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的电化学交流阻抗测试的 bode 相位角图和 bode 模图。由图可知,铜涂层的电化学阻抗值和相位角较铝基体的数值稍大,因此其具有良好的电化学稳定性,从而减少了电子传输的阻力。但是,因为试样表面的不均匀性或电化学活性位点的覆盖,从而降低了电化学反应的速率,导致铜涂层阻抗值和相位角没有进一步扩大。因此,这种复杂的变化表明了 Cu 对涂层电化学性能具有双重影响。较大相位角和低频区阻抗模值被视为材料耐腐蚀性能的重要指标。这是因为较大的相位角和阻抗模值通常意味着材料表面形成了更加稳定和致密的保护层,从而更有效地阻挡了腐蚀介质的侵蚀^[19]。再次证明铜涂层也具有较好的耐腐蚀性能。同时,电化学阻抗谱测试获得了与极化曲线测试基本一致的结果。

3.7 铜涂层导电性测试

以最优工艺参数制备的铝基铜涂层为测试样品,采用 RTS-11 型金属四探针测试仪对铜涂层与铝基体进行方阻测试,分别对铜涂层与铝基体不同选区进行若干次试验,试验结果为铜涂层平均方阻为 $0.03 \text{ m}\Omega/\square$,铝基体平均方阻为 $0.1 \text{ m}\Omega/\square$,铜涂

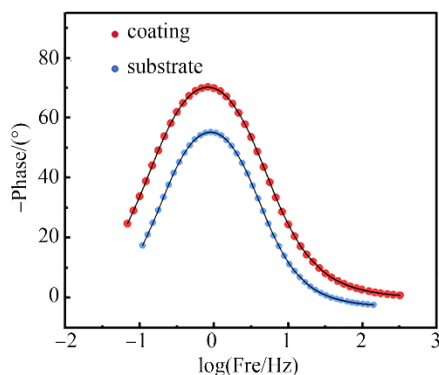


图 13 电化学交流阻抗测试 bode 相位角图

Fig. 13 Electrochemical AC impedance test bode phase angle plot

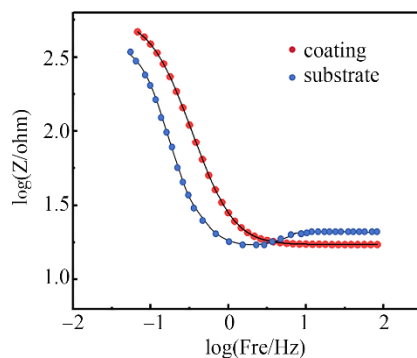


图 14 电化学交流阻抗测试 bode 模图

Fig. 14 Electrochemical AC impedance test bode mode plot

层的方阻明显低于铝基体,相较于铝基体而言,通过管约束电爆喷射沉积所制备的铜涂层具有更好的导电性。

综合上述研究结果,证实管约束电爆喷射沉积方法在铝基铜涂层的制备方面是可行的,在简化制备过程、提高涂层质量、清除基体表面氧化层以及提高基体耐蚀性与导电性具有一定的优势。通过进一步优化装置的自动化水平、完善结构设计以及提升喷涂效率,该技术有望在铝基铜涂层的工程制备以及其他高熔点金属材料涂层的制备领域实现广泛应用。

4 结论

(1)采用自主设计的管约束带载丝连续电爆喷射沉积装置进行铝表面铜涂层的制备,获得致密、均匀、平整的铜涂层,且铜涂层与铝基体可实现冶金结合。

(2)通过系统优化工艺参数,确定了铝表面氧

化层清除及铜涂层制备的最佳工艺参数:①喷射清除阶段。初始充电电压 11 kV,电容储量 6.66 μF ,电极间距 60 mm,铜丝丝径 0.3 mm,喷射距离 30 mm。②铝基铜涂层制备:保持其他参数不变,初始充电电压调整为 9.5 kV 时,涂层粗糙度达微米级($R_a=0.9\text{ }\mu\text{m}$, $S_a=1.9\text{ }\mu\text{m}$),综合性能最优。

(3)铜涂层与铝基体结合强度优异,180°弯曲试验中无宏观开裂或脱落;EBSD 分析证实涂层对基体表面具有显著的细晶强化与晶界强化作用,晶粒尺寸细化至纳米级(约 20 nm);电化学测试显示,铜涂层的腐蚀电位(-0.818 V)较铝基体更正,腐蚀电流密度($3.291\times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$)显著降低,耐蚀性更优;四探针测试表明其方阻($0.03\text{ m}\Omega/\square$)远低于铝基体($0.1\text{ m}\Omega/\square$),导电性提升显著。

(4)本研究提出的管约束电爆喷射沉积技术为铝基铜涂层的制备提供了创新性解决方案,其在简化工艺、提升涂层质量及性能方面的优势,为铜铝复合材料在电力、新能源等领域的应用奠定了技术基础,同时也为高熔点金属涂层的制备提供了新的思路与方法。

参考文献:

- [1] 蒋志达,王少华,刘文才,等.铜铝层状复合材料研究进展[J].中国有色金属学报,2023,33(12):3925-3940.
JIANG Z D, WANG S H, LIU W C, et al. Research progress of copper-aluminum layered composites [J]. China Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33 (12): 3925-3940.
- [2] 宁晨红,高硕洪,郑江鹏,等.蓝光激光熔覆纯铜覆层的组织及性能研究[J/OL].材料导报,1-12[2024-05-11].
NING C H, GAO S H, ZHENG J P, et al. Study on the organization and properties of pure copper cladding layer by blue laser melting[J/OL]. Materials Herald, 1-12[2024-05-11].
- [3] 张龙龙.不锈钢表面冷喷涂铜涂层的制备及性能研究[D].辽宁:沈阳工业大学,2022.
ZHANG L L. Research on the preparation and performance of cold sprayed copper coating on stainless steel surface[D]. Liaoning: Shenyang University of Technology, 2022.
- [4] 陈文超.等离子辅助低压冷喷涂铜涂层工艺及性能[D].辽宁:沈阳工业大学,2022.
CHEN W C. Plasma-assisted low-pressure cold spraying copper coating process and performance[D]. Liaoning: Shenyang University of Technology, 2022.
- [5] 韩峰.约束电爆喷射沉积方法及机理研究[D].甘肃:兰州理工大学,2019.
HAN F. Research on the method and mechanism of constrained electro-explosive jet deposition [D]. Gansu: Lanzhou University of Science and Technology, 2019.
- [6] 闫维亮,王旭东,周辉,等.电爆喷涂方法的研究进展[J].稀有金属材料与工程,2021,50(08):3020-3030.
YAN W L, WANG X D, ZHOU H, et al. Research progress of electroburst spraying method [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(08): 3020-3030.
- [7] 周毅,朱亮,段靖邦,等.电爆喷射沉积法制备 Al 涂层[J].金属热处理,2023,48(07):259-265.
ZHOU Y, ZHU L, DUAN J B, et al. Preparation of Al coatings by electroburst jet deposition [J]. Metal Heat Treatment, 2023, 48(07): 259-265.
- [8] 李红阔,朱亮,王旭东.约束电爆喷射沉积碳质增强/银基复合涂层[J].焊接技术,2021,50(11):67-70+106.
LI H K, ZHU L, WANG X D. Constrained electroburst spray deposition of carbon reinforced/silver-based composite coatings[J]. Welding Technology, 2021, 50(11): 67-70+106.
- [9] 韩峰,朱亮,李志勇.电爆炸喷涂用于 Ta10W 合金表面 Mo 涂层的制备[C]//第二十次全国焊接学术会议论文集,2015:996-999.
- [10] 朱亮,乔河涛,张鹏飞,等.管约束钼丝电爆喷涂涂层特性[J].稀有金属材料与工程,2013,42(07):1488-1491.
ZHU L, QIAO H T, ZHANG P F, et al. Coating characteristics of tube-constrained molybdenum wire electroburst spraying [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(07): 1488-1491.
- [11] 刘宗瀚,朱亮,林巧力,等.粉末电爆喷涂方法制备 Ti_3SiC_2 涂层[J].金属热处理,2021,46(01):138-142.
LIU Z H, ZHU L, LIN Q L, et al. Preparation of Ti_3SiC_2 coatings by powder electroburst spraying [J]. Metal Heat Treatment, 2021, 46(01): 138-142.
- [12] 李林波,罗洪杰,杜昊,等.氧化铝含量对冷喷涂 Al- Al_2O_3 复合涂层表面形貌和显微结构的影响[J].表面技术,2022,51(01):303-310.
LI L B, LU H J, DU H, et al. Effect of aluminum oxide content on the apparent morphology and microstructure of cold sprayed Al- Al_2O_3 composite coatings [J]. Sur-

- face Technology, 2022, 51(01):303-310.
- [13] 朱亮, 张周伍. 电爆技术用于超细粉制备和表面喷涂的研究进展[J]. 材料导报, 2005(12):76-79+71.
ZHU L, ZHANG Z W. Research progress of electro-burst technology for ultrafine powder preparation and surface coating [J]. Materials Guide, 2005 (12): 76-79+71.
- [14] Wright S I, Nowell M M. A review of in situ EBSD studies[J]. Electron Backscatter Diffraction in Materials Science, 2009:329-337.
- [15] Mueller W A. Theoretical Considerations in the Measurements of Polarization and Corrosion Potential Curves[J]. Corrosion, 1969, 25(11):73-181.
- [16] Amin M A, Khaled K F, Fadl-Allah S A. Testing validity of the Tafel extrapolation method for monitoring corrosion of cold rolled steel in HCl solutions - experimental and theoretical studies [J]. Corrosion Science, 2010, 52(1):140-151.
- [17] Huang Y, Song G, Chang X, et al. Nanostructured Ag⁺-substituted fluorhydroxyapatite-TiO₂ coatings for enhanced bactericidal effects and osteoinductivity of Ti for biomedical applications[J]. International journal of nanomedicine, 2018:265-284.
- [18] Cristoforetti A, Rossi S, Deflorian F, et al. On the Limits of the EIS Low-Frequency Impedance Modulus as a Tool to Describe the Protection Properties of Organic Coatings Exposed to Accelerated Aging Tests[J]. Coatings, 2023, 13(3):598-602.
- [19] Wang M, Xue Z, Yan S, et al. Pulse Electrodeposited Super-Hydrophobic Ni-Co/WS₂ Nanocomposite Coatings with Enhanced Corrosion-Resistance [J]. Coatings, 2022, 12(12): 1897.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第23页

- TIG hybrid welding [J]. Applied Laser, 2023, 43(8): 48-54.
- [82] 张婧, 杜伟, 王孟果, 等. 钛合金激光-MIG电弧复合焊接接头组织性能[J]. 金属加工(热加工), 2023(04): 10-13+17.
ZHANG J, DU W, WANG M G, et al. Microstructure and properties of Laser-MIG arc hybrid welding joint of titanium alloy [J]. Metal Forming (Hot Working), 2023(04):10-13+17.
- [83] Su X, Tao W, Chen Y, et al. Microstructure and tensile property of the joint of laser-MIG hybrid welded thick-section TC4 alloy[J]. Metals, 2018, 8(12):1002.
- [84] Luo P, Feng W, Zu G, et al. Microstructure and impact toughness of Laser-Arc hybrid welded joint of medium-thick TC4 titanium alloy[J]. Coatings, 2024, 14(4):395.
- [85] He Z, Zhao Y, Chen F, et al. Effect of beam defocusing on porosity formation mechanism in Laser-MIG hybrid welded titanium alloy joints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131(7):4185-4199.
- [86] 王洪潇, 王春生, 邓钢, 等. 12 mm厚TC4钛合金激光-MIG复合焊接接头疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 电焊机, 2024, 54(10):17-31.
WANG H X, WANG C S, DENG G, et al. Study on fatigue crack growth behavior of 12 mm thick TC4 titanium alloy Laser-MIG hybrid weld joint [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(10):17-31.
- [87] 宛文涛, 李树楠, 张振东. TA12钛合金激光-MIG电弧复合焊残余应力研究[J]. 焊接技术, 2023, 52(12): 50-53.
YAN W T, LI S N, ZHANG Z D. Research on residual stress in laser-MIG hybrid welding of TA12 titanium alloy[J]. Welding Technology, 2023, 52(12):50-53.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>