

激光与光电子学进展

激光辅助低压冷喷涂石墨/Cu 复合涂层的
微观特性及导热/导电性能刘博¹, 邹洪森¹, 田凯¹, 李波^{2*}, 章钢², 姚建华²¹国网宁夏电力有限公司超高压公司, 宁夏 银川 750001;²浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310023

摘要 采用激光辅助低压冷喷涂(CS)技术在Cu基体上制备石墨/Cu复合涂层,研究了不同石墨含量的复合涂层微观特性以及导热导电性能。研究表明,复合涂层中石墨颗粒和Cu颗粒均发生了明显的塑性变形,塑性变形的石墨颗粒嵌入到塑性变形的Cu颗粒中形成复合涂层。在激光加热的辅助下,石墨/Cu复合涂层中颗粒之间结合良好,具有较好的致密性。在激光加热的辅助作用下,CS-Cu涂层的热导率和电导率分别从66.2 W/(m·K)和7.12 MS/m提升至136.6 W/(m·K)和14.65 MS/m。涂层中添加质量分数为5%的石墨时,复合涂层的热导率可进一步提升至209.8 W/(m·K)。但随着复合涂层中石墨含量的继续增加,涂层内界面数量增加,界面热阻及对电子的散射作用增强,导致复合涂层的热导率和电导率下降。

关键词 激光光学; 低压冷喷涂; 石墨/Cu复合涂层; 微观特性; 导热/导电

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1714001

Microstructural Characteristics and Thermal/Electrical Conductivity of Graphite/Cu Composite Coatings Prepared Using Laser-Assisted Low Pressure Cold SprayLiu Bo¹, Zou Hongsen¹, Tian Kai¹, Li Bo^{2*}, Zhang Gang², Yao Jianhua²¹Ultrahigh Voltage Company, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, Ningxia, China;²College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China

Abstract In this study, graphite/Cu composite coatings were prepared on Cu substrates using laser-assisted low pressure cold spray (CS) technology. In addition, the microstructural characteristics and thermal/electrical conductivity of composite coatings with different graphite contents were studied. The results show that both graphite and Cu particles in the composite coating undergo significant plastic deformation, and the plastically deformed graphite particles are embedded in the plastically deformed Cu particles, forming a composite coating. Using laser heating, the graphite and Cu particles in the composite coating are well bonded, resulting in the good compactness of the composite coating. The thermal and electrical conductivities of the CS-Cu coating increase from 66.2 W/(m·K) and 7.12 MS/m to 136.6 W/(m·K) and 14.65 MS/m, respectively, due to the laser heating. With the addition of 5% graphite to the coating, the thermal conductivity of the composite coating is further increased to 209.8 W/(m·K). However, with the continuous increase of the graphite content in the composite coating, the number of the inner interface of the coating increases, the interface thermal resistance and the scattering effect on electrons are enhanced, resulting in the decrease of the thermal conductivity and electrical conductivity of the composite coating.

Key words laser optics; low pressure cold spray; graphite/Cu composite coating; microstructural characteristics; thermal/electrical conductivity

收稿日期: 2021-12-09; 修回日期: 2022-01-02; 录用日期: 2022-01-05

基金项目: 国网宁夏电力有限公司科技项目(5229CG19006X)、宁夏自然科学基金(2021AAC03502)

通信作者: *libo1011@zjut.edu.cn

1 引言

高压隔离开关的作用是将检修的高压母线、断路器电气设备及带电高压线路进行电气隔离,是电力系统中使用量最大、应用范围最广的高压开关设备之一^[1]。理想的高压隔离开关触头材料必须具有良好的导电/导热性能、耐磨损、耐电弧灼伤,以及一定的强度和易于机械加工等特性,如 Cu 合金、Al 合金等^[2-3]。由于隔离开关多在户外运行,长期受到外界环境和气候的影响,电触头表面会出现氧化变黑、锈蚀、裂纹、镀层脱落等问题,影响隔离开关工作性能,继而影响到整个线路的可靠性供电和电网的安全稳定运行^[1]。由于电触头失效始于表面损伤,因此利用表面技术对电触头进行修复和强化是一种经济有效的方式^[4-6]。

冷喷涂(CS)是一种依靠喷涂颗粒高速撞击的动能实现塑性变形沉积的表面技术^[7-9],在 Cu 基材料涂层制备及强化修复方面得到了广泛应用^[10-13]。为了进一步改善 CS 涂层的组织结构及性能,激光辅助冷喷涂在近些年受到了越来越多的关注^[14-16]。通过将激光与 CS 同步耦合,可提升 CS 涂层的致密性、界面结合以及耐磨/耐蚀等性能^[17-19]。此外,由于激光的热软化效应,可将 CS 涂层的材料范围拓宽至高硬度合金及其复合材料,如 Ni60 涂层^[20]、W 涂层^[21]、Ti 涂层^[22]、Stellite-6 涂层^[23]、WC/Stellite-6 复合涂层^[24]、金刚石/Ni60 复合涂层^[25]。因此,激光辅助冷喷涂技术已成为材料表面修复及强化的一种新兴技术。

为了进一步提升 Cu 基电触头的性能,在 Cu 基体

中添加增强相[如石墨烯、石墨、碳纳米管(CNTs)]制备高性能触头复合材料已成为一种趋势^[26-28],而在复合材料中,增强相的形貌及含量将影响复合材料的性能^[29-30]。因此,本文在激光辅助冷喷涂 Cu 基材料的基础上^[31-33],采用激光辅助冷喷涂在 Cu 基体上制备石墨/Cu 复合涂层,系统研究了复合涂层的微观结构及不同石墨含量对复合涂层导热/导电性能的影响。本文的研究成果有望为高压隔离开关触头的修复及表面强化提供一种新途径。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验采用电解 Cu 粉(粒径范围为 300~400 目)作为复合涂层的粘结相,其显微形貌如图 1(a)所示;采用商业购买的石墨作为复合涂层的增强相。由于 Cu 粉和石墨存在密度上的差异,因此对商业购买的石墨表面进行化学镀铜的处理。化学施镀前,先对石墨粉末进行表面除胶、粗化、敏化以及活化处理,然后将处理好的石墨粉末倒入化学镀液(配方见表 1)中充分搅拌。施镀完成后,用去离子水将粉末洗涤至中性,在 120 °C 下真空干燥 6 h。镀铜石墨的显微形貌如图 1(b)所示。试验前,将 Cu 粉和镀铜石墨按质量比 19:1(镀铜石墨质量分数 5%)、9:1(镀铜石墨质量分数 10%)和 17:3(镀铜石墨质量分数 15%)三个配比进行机械混合。基体材料为 T1 紫铜,尺寸为 100 mm×50 mm×5 mm,试验前对基板进行喷砂处理。

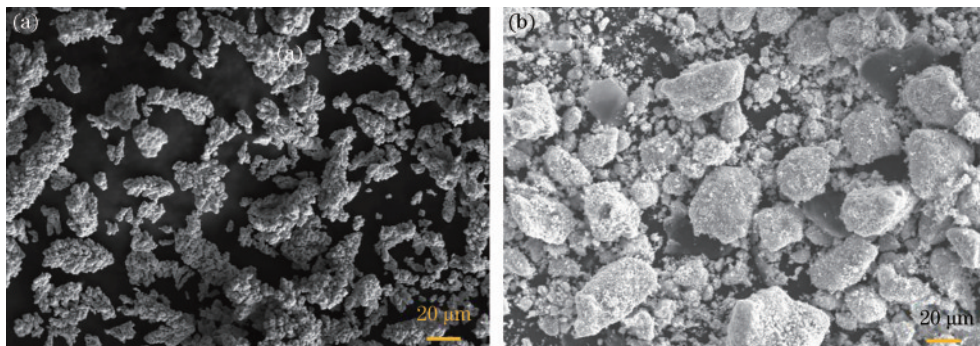


图 1 原始粉末的显微形貌。(a) Cu 粉;(b)镀铜石墨

Fig. 1 Microstructures of original powders. (a) Cu powder; (b) Cu-coated graphite

表 1 化学镀液配方

Table 1 Chemical plating solution formula

CuSO ₄ ·5H ₂ O / (g·L ⁻¹)	Na ₃ C ₄ H ₄ O ₇ ·2H ₂ O / (g·L ⁻¹)	NaPH ₄ / (g·L ⁻¹)	T / °C	pH
30-40	40-50	10-15	60±2	11

2.2 试验系统与涂层制备

试验所用的激光辅助冷喷涂系统示意图,如图 2 所示,该系统由光纤耦合半导体激光器、低压冷喷涂设备、机械手臂和气瓶等组成。低压冷喷涂的喷枪

和激光头固定在机械手臂上,通过机械手臂编程实现涂层制备路径的规划。在涂层制备过程中,激光束与粉末束成 30° 的夹角,激光光斑(匀强光斑,直径为 6 mm)和喷涂粉斑(粉斑直径为 4 mm)保持圆心重合。石墨/Cu 复合涂层的冷喷涂工艺参数如下:N₂ 压力为 0.8 MPa, N₂ 预热温度为 400 °C,喷涂距离为 15 mm,扫描速度为 30 mm/s,送粉率为 25 g/min,在该工艺参数下可保证喷涂颗粒的速度达到 1 Ma(1 Ma=1225.08 km/h)以上。根据之前的研究结果^[34],激光

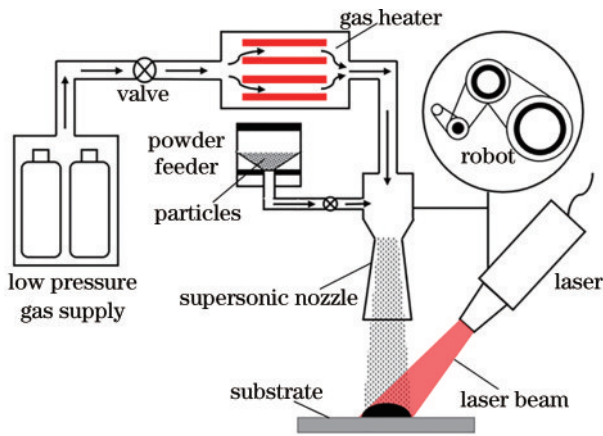


图 2 激光辅助低压冷喷涂系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser-assisted low pressure cold spray system

辐照功率选择 600 W, 在该激光辐照功率下, 可保证 Cu 颗粒仅受热软化而不熔化。在上述冷喷涂以及激光工艺参数下, 制备了不同石墨含量的复合涂层, 分别是质量分数 0% 的石墨 (CuGr0)、质量分数 5% 的石墨 (CuGr5)、质量分数 10% 的石墨 (CuGr10) 和质量分数 15% 的石墨 (CuGr15)。

2.3 涂层表征

采用扫描电子显微镜 (SEM, IGMA HV-01-043, Carl Zeiss, 德国) 对粉末形貌以及涂层的截面形貌、微观组织等进行表征。利用激光热导仪 (型号 LFA467) 对石墨/Cu 复合涂层的热导率进行测量。根据测试要求将试样加工成直径 $\Phi 12.5$ mm 的圆柱体, 为防止复合沉积层中 Cu 粘结相氧化影响测试结果, 测试前样品

进行真空保存, 测试温度为常温, 升温速率为 20 K/min。利用 SIGMATEST 2.069 电导率测试仪对复合涂层的电导率进行检测。

3 结果与讨论

3.1 复合涂层的微观特性

图 3 是添加不同石墨含量的石墨/Cu 复合涂层的截面形貌。为了区别复合涂层中的石墨颗粒和 Cu 颗粒, 采用背散射电子成像 (BSE) 模式对复合涂层截面形貌进行观察。从图 3 可以看出, 三个涂层的微观特性基本类似, 石墨均匀分散在复合涂层中, 如图中箭头所示。为了进一步观测复合涂层中石墨颗粒和 Cu 颗粒的显微形貌, 利用更高倍数的电镜对复合涂层的截面形貌进行了拍摄。因为三个涂层的微观特性相差不大, 所以只选取了 CuGr15 试样进行了分析, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 复合涂层中的石墨颗粒和 Cu 颗粒形貌与沉积前的原始形貌 (图 1) 相比, 均发生了明显的塑性变形, 塑性变形的石墨颗粒嵌入到塑性变形的 Cu 颗粒中形成复合涂层。这是因为石墨和 Cu 均是塑性变形能力较好的材料, 在 CS 沉积过程中, 较高的动能易使二者发生强烈的塑性变形从而相互结合形成复合涂层。此外, 从图 4 可以看出, 复合涂层中几乎看不到孔隙, 说明该复合涂层致密性良好。这是由于激光辐照可以提升喷涂颗粒的塑性变形能力, 使其在 CS 沉积过程中变形更充分, 相互结合更紧密, 从而可大幅降低涂层的孔隙率^[29, 32]。激光辐照对涂层致密性的改善效果在激光辅助冷喷涂 Cu 涂层中也得到了证实^[34]。

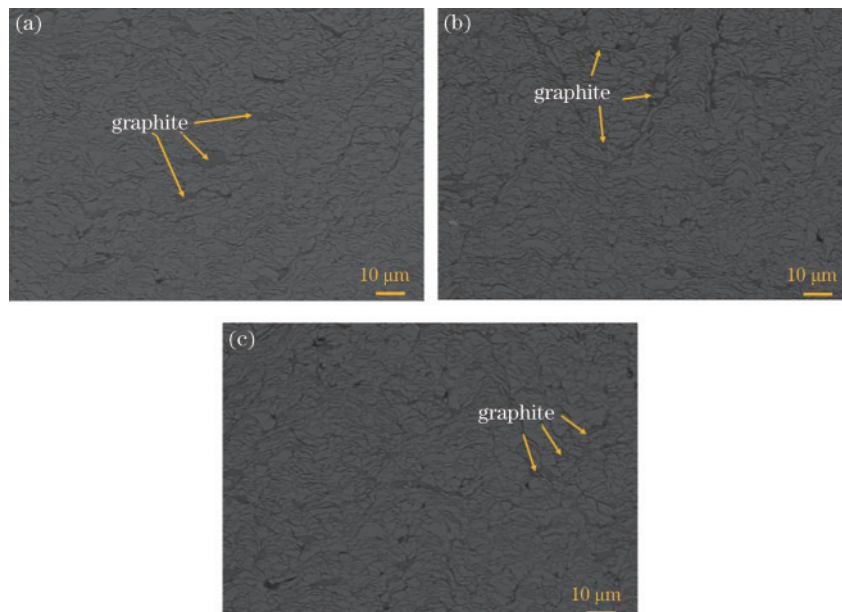


图 3 激光辅助低压冷喷涂石墨/Cu 复合涂层的截面形貌。(a) CuGr5; (b) CuGr10; (c) CuGr15

Fig. 3 Cross-sectional microstructures of graphite/Cu composite coatings prepared by laser-assisted low pressure cold spray.

(a) CuGr5; (b) CuGr10; (c) CuGr15

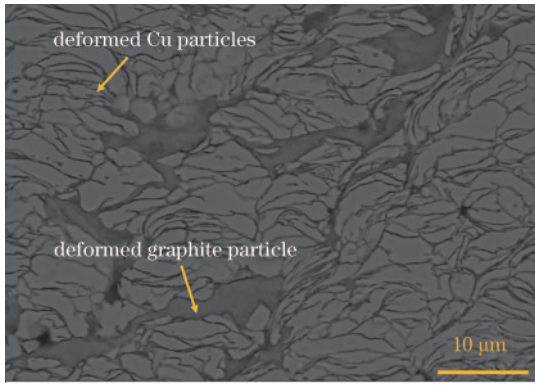


图 4 激光辅助低压冷喷涂石墨/Cu 复合涂层的显微形貌

Fig. 4 Microstructures of graphite/Cu composite coatings prepared by laser-assisted low pressure cold spray

3.2 复合涂层的导热性能

图 5 为利用激光闪烁法测得的激光辅助冷喷涂石墨/Cu 复合涂层的热导率。为了对比,还制备了无激光辐照的 CS-Cu 试样,对其热导率也进行了测量。从图 5 可以看出,CS-Cu 涂层的热导率为 $66.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,远低于纯 Cu 的热导率 [$397 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],这是因为 CS-Cu 涂层是依靠 Cu 颗粒之间的机械结合形成的,颗粒与颗粒之间的界面较多,影响了涂层的热导率。而在 CS 过程中耦合激光后,CuGr0 涂层的热导率可提升至 $136.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,为 CS-Cu 涂层的 2 倍,这是由于激光辅助改善了 CS-Cu 涂层的致密性,从而使其热导率大幅上升。在激光辐照 CS-Cu 涂层中添加质量分数 5% 的石墨后 (CuGr5),涂层的热导率继续提升,可达 $209.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。但随着石墨含量的继续增加 (CuGr10 和 CuGr15),涂层的热导率不再上升,反而呈现下降的趋势。

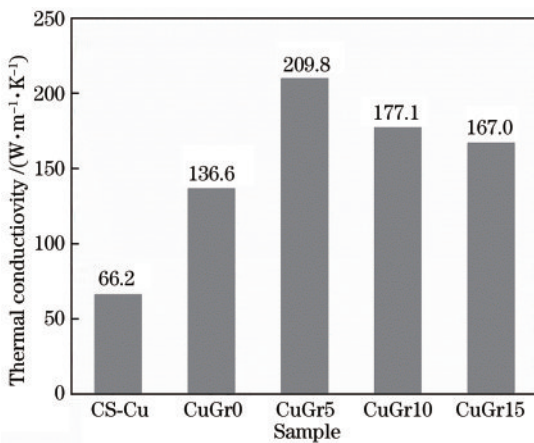


图 5 激光辅助低压冷喷涂石墨/Cu 复合涂层的热导率

Fig. 5 Thermal conductivity of graphite/Cu composite coatings prepared by laser-assisted low pressure cold spray

材料的热导率与界面结构密切相关。在石墨/Cu 复合涂层中,热传导有两种形式,一是 Cu 的电子传导,二是石墨的声子传导,电子-声子耦合在 Cu 和石墨的

界面热传导中起决定作用。复合涂层的热导率^[35]可表示为

$$K_c = K_m \frac{\left[2 \left(\frac{K_d}{K_m} - \frac{K_d}{ah_c} - 1 \right) V_d + \frac{K_d}{K_m} + \frac{2K_d}{ah_c} + 2 \right]}{\left(1 - \frac{K_d}{K_m} + \frac{K_d}{ah_c} \right) V_d + \frac{K_d}{K_m} + \frac{2K_d}{ah_c} + 2}, \quad (1)$$

式中: K 为热导率的值,下标 c、m 和 d 分别代表复合涂层、粘结相和增强相; V_d 和 a 分别表示增强相颗粒的体积分数和平均粒径; h_c 为界面热导率。由式(1)可知,在粘结相和增强相材料确定的条件下,复合涂层的热导率与增强相的含量(V_d)、增强相的平均粒径(a)以及复合涂层中增强相/粘结相界面的热导率(h_c)相关。复合涂层中增强相含量越多,平均粒径越小,则增强相/粘结相界面数量越多,电子-声子耦合则越多。由于增强相/粘结相界面处存在热阻,复合涂层中界面数量越多,则对复合涂层的热导率越不利。因此,随着复合涂层中石墨含量的增加,复合涂层中石墨/Cu 界面数量增多,涂层的热导率呈现下降的趋势。

3.3 复合涂层的导电性能

由金属电子理论可知,电子在通过理想点阵的时候不会产生散射,这时的电阻即为零。而当电子通过晶体点阵不完整或有缺陷的区域时,电子波就会发生散射,这就是电阻产生的原因。因此复合涂层中杂质原子、缺陷、晶界的存在均会导致电导率的变化。此外,涂层孔隙中氧的存在也会阻止带电粒子的运动从而降低电导率^[36]。

图 6 是利用 SIGMATEST 2.069 电导率测试仪测得的石墨/Cu 复合涂层的电导率。从图 6 可以看出,在同一冷喷涂工艺参数下,冷喷涂 Cu 涂层 (CS-Cu) 的电导率仅为 $7.12 \text{ MS}/\text{m}$,而在激光加热的辅助作用下,涂层 (CuGr0) 的电导率提升至 $14.65 \text{ MS}/\text{m}$,较纯

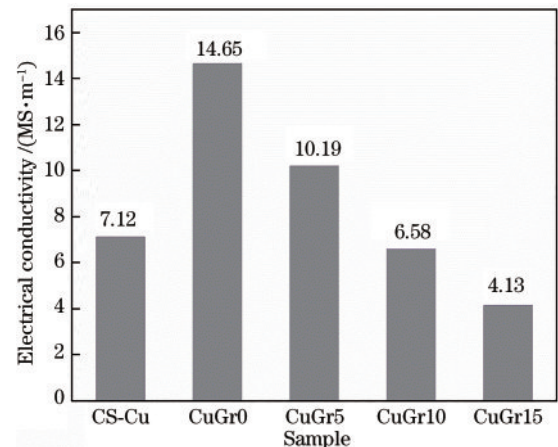


图 6 激光辅助低压冷喷涂石墨/Cu 复合涂层的电导率

Fig. 6 Electrical conductivity of graphite/Cu composite coatings prepared by laser-assisted low pressure cold spray

冷喷涂涂层的电导率提升了 100%。这是由于引入激光辐照能够软化 Cu 粉末,增强粉末的塑性变形能力,降低了涂层的孔隙率,增强了电子在涂层内部的移动能力,因此提高了涂层的电导率。然而随着原始粉末中石墨质量分数从 0% 增加到 15%,复合涂层的电导率从 14.65 MS/m 降低至 4.13 MS/m。这是由于随着复合涂层中石墨含量增加,石墨/Cu 界面数量增加,这些界面会导致自由电子散射,从而导致复合涂层的电导率下降。

4 结 论

本文采用激光辅助低压冷喷涂技术制备了不同石墨含量的石墨/Cu 复合涂层,并对复合涂层的微观特性和导热/导电性能进行了分析,得到的主要结论如下:

1) 复合涂层中石墨颗粒和 Cu 颗粒均发生了明显的塑性变形,塑性变形的石墨颗粒嵌入到塑性变形的 Cu 颗粒中形成复合涂层。在激光加热的辅助下,石墨/Cu 复合涂层中颗粒之间结合良好,具有较好的致密性。

2) 在激光加热的辅助作用下,CS-Cu 涂层的热导率由 66.2 W/(m·K) 提升至 136.6 W/(m·K)。添加质量分数为 0.5% 石墨的复合涂层热导率可达 209.8 W/(m·K)。随着石墨含量的增加,复合涂层中界面数量增多,界面热阻增大,降低了复合涂层的热导率。

3) CS-Cu 涂层的电导率为 7.12 MS/m,而在激光加热辅助作用下,涂层的电导率提升至 14.65 MS/m,较纯冷喷涂涂层提升了 100%。这是因为激光辅助能够软化 Cu 颗粒,降低了涂层的孔隙率。随着石墨含量的增加,复合涂层中界面数量增多,对电子散射作用增强,从而降低了涂层的电导率。

参 考 文 献

- [1] 凌颖, 赵莉华, 林显, 等. 高压隔离开关电触头性能改善探讨[J]. 高压电器, 2010, 46(8): 101-105.
Ling Y, Zhao L H, Lin X, et al. Discussion of improvement method of electrical contacts on high voltage disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 101-105.
- [2] 钱宝光, 耿浩然, 郭忠全, 等. 电触头材料的研究进展与应用[J]. 机械工程材料, 2004, 28(3): 7-9.
Qian B G, Geng H R, Guo Z Q, et al. Development and application of electrical contact materials[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2004, 28(3): 7-9.
- [3] 王瑞娟, 王俊勃, 宋宇宽, 等. 高压和真空铜基触头材料的研究进展[J]. 电工材料, 2014(4): 15-18.
Wang R J, Wang J B, Song Y K, et al. Research and development of high-voltage and vacuum copper based contact materials[J]. Electrical Engineering Materials, 2014(4): 15-18.

- [4] 杜志敏, 王俊勃, 付翀, 等. 覆层技术发展现状及其在制备铜基电触头材料中的应用[J]. 电工材料, 2009(2): 30-34.
Du Z M, Wang J B, Fu C, et al. The current situation and application of cladding technology in the copper based electrical contact materials[J]. Electrical Engineering Materials, 2009(2): 30-34.
- [5] 韩雨君, 周小平. 火焰喷涂高熵合金增强铜基复合涂层的组织和耐磨性研究[J]. 材料保护, 2021, 54(5): 18-23.
Han Y J, Zhou X P. Study on the microstructure and wear resistance of flame sprayed high entropy alloy reinforced copper-based composite coatings[J]. Materials Protection, 2021, 54(5): 18-23.
- [6] 陈岁元, 王建访, 刘常升, 等. 铜合金表面激光诱导原位反应制备颗粒增强 Co 基复合合金涂层[J]. 复合材料学报, 2008, 25(4): 126-130.
Chen S Y, Wang J F, Liu C S, et al. Particle reinforced Co-based composite alloy coating produced by laser inducing *in situ* synthesis on the surface of copper alloy [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(4): 126-130.
- [7] 王洪涛, 李长久, 杨冠军. 硬质相对冷喷涂 FeAl 金属间化合物涂层性能的影响[J]. 材料保护, 2010, 43(4): 90-94, 117.
Wang H T, Li C J, Yang G J. Influence of hard phase on the properties of cold-sprayed FeAl inter-metallic compound coatings[J]. Materials Protection, 2010, 43(4): 90-94, 117.
- [8] 陈斌星, 陈伟. 汽车用 AZ80 镁合金表面冷喷涂 Al-25% Al₂O₃ 涂层组织及摩擦磨损性能[J]. 材料保护, 2019, 52(5): 44-47.
Chen B X, Chen W. Microstructure and friction property of cold-sprayed Al-25% Al₂O₃ coating on the surface of AZ80 magnesium alloy for automobile[J]. Materials Protection, 2019, 52(5): 44-47.
- [9] Suo X K, Yin S, Li H, et al. Numerical and experimental investigation on bonding behavior of cold sprayed porous WC-17Co particles onto different substrates [J]. Coatings, 2018, 8(10): 367.
- [10] Suo X K, Abdoli L, Liu Y, et al. Colonization of bacteria on the surfaces of cold-sprayed copper coatings alters their electrochemical behaviors[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26(4): 687-694.
- [11] 杨康, 李文亚. 冷喷涂 Cu/Ni/Al 复合涂层内部粒子间的结合特性研究[J]. 焊管, 2018, 41(1): 15-20.
Yang K, Li W Y. Research on bonding characteristics of particles in cold spraying Cu/Ni/Al composite coating[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(1): 15-20.
- [12] 马广璐, 孔令艳, 李铁藩, 等. 冷喷涂单颗粒铜在铝基体上的显微结构研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(4): 1166-1173.
Ma G L, Kong L Y, Li T F, et al. Microstructure of copper particle deposited on aluminum by cold spray[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(4): 1166-1173.
- [13] Luo X T, Ge Y, Xie Y C, et al. Dynamic evolution of oxide scale on the surfaces of feed stock particles from

- cracking and segmenting to peel-off while cold spraying copper powder having a high oxygen content[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 67: 105-115.
- [14] 杨理京, 李争显, 黄春良, 等. 激光辅助冷喷涂制备高硬度材料涂层的研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(3): 412-417, 426.
- Yang L J, Li Z X, Huang C L, et al. Producing hard material coatings by laser-assisted cold spray: a technological review[J]. *Materials Review*, 2018, 32(3): 412-417, 426.
- [15] 孙景勇, 晏宇亮, 李波, 等. 超音速激光沉积与激光熔覆 Stellite-6 涂层的抗气蚀性能及其机制对比研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 1002118.
- Sun J Y, Yan Y L, Li B, et al. Comparative study on cavitation-resistance and mechanism of stellite-6 coatings prepared with supersonic laser deposition and laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 1002118.
- [16] Olakanmi E O, Doyoyo M. Laser-assisted cold-sprayed corrosion- and wear-resistant coatings: a review[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, 23(5): 765-785.
- [17] Bray M, Cockburn A, O'Neill W. The Laser-assisted cold spray process and deposit characterisation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 203(19): 2851-2857.
- [18] 章钢, 张杰, 李波, 等. 激光辐射对超音速激光沉积 Ti₆Al₄V 涂层致密性及耐磨损性能的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 1414002.
- Zhang G, Zhang J, Li B, et al. Influence of laser irradiation on compactness and wear resistance of Ti₆Al₄V coating prepared by supersonic laser deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1414002.
- [19] Zhang Q L, Wu L J, Zou H S, et al. Correlation between microstructural characteristics and cavitation resistance of Stellite-6 coatings on 17-4 PH stainless steel prepared with supersonic laser deposition and laser cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 860: 158417.
- [20] 杨理京, 李祉宏, 李波, 等. 超音速激光沉积法制备 Ni60 涂层的显微组织及沉积机理[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0306005.
- Yang L J, Li Z H, Li B, et al. Microstructure and deposition mechanism of Ni60 coatings prepared by supersonic laser deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0306005.
- [21] Jones M, Cockburn A, Lupoi R, et al. Solid-state manufacturing of tungsten deposits onto molybdenum substrates with supersonic laser deposition[J]. *Materials Letters*, 2014, 134: 295-297.
- [22] Lupoi R, Sparkes M, Cockburn A, et al. High speed titanium coatings by supersonic laser deposition[J]. *Materials Letters*, 2011, 65(21/22): 3205-3207.
- [23] Lupoi R, Cockburn A, Bryan C, et al. Hardfacing steel with nanostructured coatings of Stellite-6 by supersonic laser deposition[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(5): e10.
- [24] Li B, Jin Y, Yao J H, et al. Solid-state fabrication of WC_p-reinforced Stellite-6 composite coatings with supersonic laser deposition[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 321: 386-396.
- [25] Yao J H, Yang L J, Li B, et al. Beneficial effects of laser irradiation on the deposition process of diamond/Ni60 composite coating with cold spray[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 330: 300-308.
- [26] 李双艺, 李爱军, 戴丹, 等. 石墨烯/铜复合材料的制备及其性能与应用[J]. *功能材料*, 2017, 48(9): 9043-9051.
- Li S Y, Li A J, Dai D, et al. Preparation, properties and application of graphene/Cu composite materials[J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(9): 9043-9051.
- [27] 张铭君, 朱世伟, 于俊凤, 等. 石墨/铜基复合材料研究进展[J]. *铸造技术*, 2017, 38(11): 2565-2570, 2578.
- Zhang M J, Zhu S W, Yu J F, et al. Development of graphite/copper matrix composites[J]. *Foundry Technology*, 2017, 38(11): 2565-2570, 2578.
- [28] Babu R V, Kanagaraj S. Thermal, electrical and mechanical characterization of microwave sintered copper/carbon nanotubes (CNT) composites against sintering duration, CNT diameter and its concentration [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 258: 296-309.
- [29] 吴丽娟, 汪伟林, 李波, 等. 金刚石粒径及含量对超音速激光沉积金刚石/Cu 复合涂层微观结构及性能的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(2): 40-46.
- Wu L J, Wang W L, Li B, et al. Influence of diamond particle size and content on the microstructure and properties of diamond/Cu composite coating prepared by supersonic laser deposition[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(2): 40-46.
- [30] 王剑, 郭丽娜, 林万明, 等. 石墨烯含量对铜基复合材料的导电、导热、耐腐蚀和力学性能的影响[J]. *新型炭材料*, 2019, 34(2): 161-169.
- Wang J, Guo L N, Lin W M, et al. The effects of graphene content on the corrosion resistance, and electrical, thermal and mechanical properties of graphene/copper composites[J]. *New Carbon Materials*, 2019, 34(2): 161-169.
- [31] Li B, Yang L J, Li Z H, et al. Beneficial effects of synchronous laser irradiation on the characteristics of cold-sprayed copper coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, 24(5): 836-847.
- [32] 黄焯杰, 吴丽娟, 李波, 等. 超音速激光沉积 WC/Cu 复合涂层的微观结构及耐磨性能表征[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(10): 78-85.
- Huang X J, Wu L J, Li B, et al. Microstructure characterization and tribological properties evaluation on WC/Cu composite coating prepared by supersonic laser deposition[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(10): 78-85.
- [33] 王健君, 田凯, 陈智君, 等. 超音速激光沉积石墨/Cu 复合涂层微观结构及耐磨性能[J]. *中国激光*, 2021, 48(18): 1802015.
- Wang J J, Tian K, Chen Z J, et al. Microstructure and wear resistance of graphite/Cu composite coating prepared by supersonic laser deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(18): 1802015.

- [34] 张城锋, 邱方苗, 李波, 等. 激光辅助低压冷喷涂 Cu 涂层微观结构及导热性能[J/OL]. 中国有色金属学报: 1-17[2022-02-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20211210.1646.001.html>.
Zhang C F, Qiu F M, Li B, et al. Microstructure and thermal conductivity of laser-assisted low-pressure cold sprayed Cu coating[J/OL]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals: 1-17[2022-02-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20211210.1646.001.html>.
- [35] Guillemet T, Geffroy P M, Heintz J M, et al. An innovative process to fabricate copper/diamond composite films for thermal management applications[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43 (10): 1746-1753.
- [36] Koppad P G, Ram H R A, Ramesh C S, et al. On thermal and electrical properties of multiwalled carbon nanotubes/copper matrix nanocomposites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 580: 527-532.