

冷喷涂制备 CuZn35 涂层结构及耐摩擦磨损性能

张龙龙^{1,2}, 黄继波², 刁鹏源², 李德元¹, 黄仁忠², 张楠楠¹, 谢迎春²

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870; 2. 广东省科学院新材料研究所 a. 现代材料表面工程技术国家工程实验室 b. 广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510650)

摘要: **目的** 采用高压冷喷涂技术制备低氧化、致密、耐摩擦磨损的 CuZn35 涂层, 并探究加速气体温度对 CuZn35 涂层性能的影响。**方法** 利用高压冷喷涂技术在铝板上沉积 CuZn35 涂层, 探究加速气体温度对冷喷涂 CuZn35 涂层微观结构及耐摩擦磨损性能的影响。在载荷为 2 N 时, 在旋转式摩擦磨损试验仪上进行试验, 对比铸态 CuZn35 材料的耐磨性能, 评估在压力为 5 MPa, 加速气体温度为 400、600、800 °C 条件下冷喷涂制备的 CuZn35 涂层的耐磨性能。通过光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、三维轮廓仪 (3D Profiler) 对涂层的微观结构和磨损表面形貌进行分析。**结果** 当冷喷涂加速气体温度从 400 °C 升至 800 °C 时, CuZn35 涂层内部颗粒的变形量不断增大, 颗粒之间形成了较好的结合, 孔隙率从 2.67% 降至 0.5% 以下, 硬度从 200HV0.3 升至 242HV0.3, 涂层磨损率从 3.67 mm³/(N·mm) 降至 1.80 mm³/(N·mm)。在温度为 800 °C 条件下制备的 CuZn35 涂层表现出最优的耐摩擦磨损性能, 在磨损过程中涂层材料未发生明显的块状脱落现象, 仅其表面有轻微磨痕, 涂层的磨损率较低, 与铸态 CuZn35 材料相近。**结论** 高压冷喷涂技术可获得与铸态 CuZn35 材料耐磨性能相近的 CuZn35 涂层。随着冷喷涂加速气体温度的升高, CuZn35 涂层的孔隙、微裂纹等缺陷显著减少, 涂层颗粒间的结合性增强, 涂层的硬度逐渐增大。在摩擦磨损实验中, 涂层的耐磨性能随着制备过程中加速气体温度的升高显著增强。

关键词: 高压冷喷涂; 气体温度; CuZn35 涂层; 微观组织; 耐磨性能

中图分类号: TH117.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)03-0172-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.014

Structure and Wear Resistance of CuZn35 Coating Prepared by Cold Spraying

ZHANG Long-long^{1,2}, HUANG Ji-bo², DIAO Peng-yuan², LI De-yuan¹,
HUANG Ren-zhong², ZHANG Nan-nan¹, XIE Ying-chun²

收稿日期: 2022-01-17; 修订日期: 2022-04-27

Received: 2022-01-17; Revised: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金 (52001078); 广东省特支计划 (2019BT02C629); 广州市重点领域研发计划 (202007020008); 广东省软科学研究计划 (2019B101001011)

Fund: Natural Science Foundation of China (52001078); Guangdong Special Support Program (2019BT02C629); Guangzhou Science and Technology Program (202007020008); Guangdong Province Soft Science Research Program Project (2019B101001011)

作者简介: 张龙龙 (1998—), 男, 硕士, 主要研究方向冷喷涂技术。

Biography: ZHANG Long-long (1998-), Male, Master, Research focus: cold spraying technology.

通讯作者: 谢迎春 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为冷喷涂技术。

Corresponding author: XIE Ying-chun (1987-), Male, Doctor, Professor, Research focus: cold spraying technology.

通讯作者: 张楠楠 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为热喷涂技术。

Corresponding author: ZHANG Nan-nan (1980-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: thermal spray technology.

引文格式: 张龙龙, 黄继波, 刁鹏源, 等. 冷喷涂制备 CuZn35 涂层结构及耐摩擦磨损性能[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 172-180.

ZHANG Long-long, HUANG Ji-bo, DIAO Peng-yuan, et al. Structure and Wear Resistance of CuZn35 Coating Prepared by Cold Spraying[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 172-180.

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. a. The Key Lab of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, b. National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

ABSTRACT: CuZn35 brass has high strength and toughness, excellent thermal conductivity, electrical conductivity and corrosion resistance, so it is widely used as a protective coating in thin-walled tubes and turbine blades. At present, CuZn35 coatings are usually prepared by arc spraying, which has high porosity and poor wear resistance. Cold spraying is a promising coating deposition technique for fabricating anti-wear composite coatings. However, up to now, there are few studies on the preparation of CuZn35 coatings by cold spraying method. Cu/Zn mixed powder was often used in the preparation of CuZn coatings, and the composition uniformity and wear resistance of the coatings were poor. During the cold spraying process, the particle temperature before deposition was one of the most important parameters for achieving high-quality coatings. In the present study, by using CuZn35 alloy powder instead of mixed Cu/Zn powder, non-oxidized, density and anti-wear CuZn35 coatings were prepared by high pressure cold spraying. Further, the effect of accelerated gas temperature used during cold spraying on the microstructure and properties of CuZn35 coatings was explored.

The CuZn35 coating was deposited on the 100 mm × 100 mm × 5 mm aluminum plate by high pressure cold spraying system. By changing the gas temperature parameters during the cold spraying process, the effect of accelerated gas temperature on the microstructure and wear resistance of the cold sprayed CuZn35 coating was investigated. Three kinds of CuZn35 coatings were prepared by cold spraying under the conditions of pressure of 5 MPa and accelerated gas temperature of 400, 600 and 800 °C. Compared with as-cast CuZn35 material, the wear resistance of these coatings was evaluated by rotary friction and wear test under a load of 2 N. The cross-section microstructure of the coatings was analyzed by optical microscope (OM). Scanning electron microscope (SEM) and 3D Profiler were used to analyze the coating microstructure and wear surface morphology.

The results of this study showed that the CuZn35 coating could be directly deposited on the surface of aluminum substrate by cold spraying with CuZn35 alloy powder. The particles inside the coating were fully deformed and tightly bonded. The accelerated gas temperature in the cold spraying process had a great effect on the structure and mechanical properties of the coating. With the increase of cold spraying accelerating gas temperature, the deformation of particles in CuZn35 coating increased, and the bonding between particles was better. As a result, the porosity of CuZn35 coating decreased from 2.67% to less than 0.5% with the acceleration gas temperature of cold spraying increasing from 400 °C to 800 °C. Accordingly, the hardness increased from 200HV0.3 to 242HV0.3 with the increase of gas temperature. The wear resistance of the cold sprayed CuZn35 coating increased significantly with the increase of accelerated gas temperature during the deposition process. With the increase of gas temperature from 400 °C to 800 °C, the wear rate of the coating decreased from 3.67 mm³/(N·mm) to 1.80 mm³/(N·mm). The wear resistance of the CuZn35 coating prepared by cold spraying at 800 °C can reach the level of as-cast CuZn35 material. With the increase of accelerated gas temperature during cold spraying, the defects such as pores and microcracks of CuZn35 coating are significantly reduced, the bonding between coating particles is enhanced, and the hardness of the coating is gradually increased. In the friction and wear experiment, the wear resistance of the coating is significantly enhanced with the increase of accelerated gas temperature during preparation.

KEY WORDS: high pressure cold spraying; gas temperature; CuZn35 coating; microstructure; wear resistance

CuZn35 黄铜具有较高的强度和韧性, 同时具有优良的导热性、导电性和耐腐蚀性能, 是有色金属中应用最广的合金材料, 常用于制造各种拉深和弯折的受力零件, 如销钉、铆钉、垫圈、螺母、散热器等。此外, CuZn35 黄铜还常作为防护涂层应用于薄壁管、涡轮叶片、船舶及车辆的特殊部位器件中。目前, CuZn35 涂层通常采用电弧喷涂方法制备。电弧喷涂

方法具有成本低廉、操作简便等优点, 但所制涂层的孔隙率高达 6.4%^[1], 涂层的耐摩擦磨损性能较差, 极大地限制了其实际应用^[2]。

近些年, 冷喷涂涂层技术 (Cold spray, CS) 发展迅速, 有望制备出高性能的 CuZn35 涂层。冷喷涂又称冷气动力喷涂, 不同于传统热喷涂, 它不需将喷涂的金属粉末融化, 而是以压缩气体 (氮气、氦气、

空气等)在相对较低的温度下通过 Laval 喷嘴作为加速气流,并带动粉末颗粒(粒径 1~50 μm)在低温(室温至 900 $^{\circ}\text{C}$)、超音速(300~1 200 m/s)和完全固态下碰撞基板,使颗粒发生强烈的塑性变形,从而沉积形成涂层^[3]。由于冷喷涂涂层在沉积过程中的温度远低于材料的熔点,在喷涂过程中粉末材料不易发生氧化、相变^[4]。此外,冷喷涂过程中的高速冲击使得粉末颗粒之间发生了机械结合,部分区域会形成冶金结合,涂层内部及涂层与基体界面的结合较紧密,涂层的结合强度较高。由于颗粒高速撞击的夯实作用,冷喷涂涂层的孔隙率远低于传统热喷涂方法制备的涂层^[5-7],因此采用冷喷涂技术制备高性能 CuZn35 涂层具有巨大的优势。

目前,国内外学者对冷喷涂制备 Cu-Zn 涂层的力学性能进行了研究^[8-10]。付金良等^[8]采用低压冷喷涂技术在 1Cr13 基体上制备了不同 Zn 含量(体积分数为 10%、20%、30%、40%)的 Cu-Zn 复合涂层,结果表明,当采用 Zn 的体积分数为 40%的粉末材料时,冷喷涂制备涂层的孔隙率最小,为 0.11%,且涂层与基体间的结合强度最高。冯力等^[9]采用低压冷喷涂在 45 钢基体上制备了孔隙率较低的 Cu-Zn 复合涂层,结果表明,当锌的质量分数低于 50%时,涂层的耐腐蚀性能和耐磨损性能都得到提升。他们^[10]还发现,采用热处理表面涂层,涂层的孔隙率会降低,结合强度增强。在以往的冷喷涂 Cu-Zn 复合涂层研究中通常采用铜、锌的混合粉末制备涂层,EDS 元素分析结果表明,这样得到的涂层会出现铜锌元素分布不均匀的现象^[10],因此直接采用铜锌合金粉末制备 Cu-Zn 涂层值得探究。在沉积涂层时,气体条件是冷喷涂涂层制备过程的重要参数之一,较高的气体压力和气体温度可使颗粒的加速效果更好,使其获得更高的速度,进而提高涂层的性能,有利于涂层与基体的结合^[11-15]。冷喷涂涂层中形成的塑性变形会导致材料发生加工硬化,有可能会影响涂层的抗摩擦磨损性能,目前针对 CuZn35 材料还无相关的研究和报道^[16-19]。

综上所述,采用高压冷喷涂技术有望制备致密的高性能 Cu-Zn 涂层,并对基体进行强化。目前尚缺乏涂层制备、工艺参数与涂层组织结构、性能之间关系的研究,对于冷喷涂 Cu-Zn 涂层的耐摩擦磨损行为也鲜有报道。文中以 CuZn35 粉末为原材料,采用高压冷喷涂技术在铝基体上制备 CuZn35 涂层,并探究冷喷涂过程中加速气体温度这一关键工艺参数对涂层微观组织和耐摩擦磨损性能的影响。

1 实验

1.1 材料与方法

采用商用 CuZn35 粉末为原料,粉末中锌的质量分数为 35%,其形貌特征如图 1a 所示,可见粉末的形态整体为不规则状。粉末的粒径分布数据如图 1b 所示,粉末的平均粒径(D_{50})为 25.1 μm ,且 90%以上粉末的粒径小于 65.2 μm 。粉末的形态和粒径范围均适用于冷喷涂涂层制备工艺。在喷涂实验中,采用 100 mm×100 mm×5 mm 的纯铝板材为基体,在喷涂前对其表面进行打磨,露出新鲜的表面,并用酒精清洗。

冷喷涂 CuZn35 涂层的制备采用等离子技研工业株式会社(Plasma Giken Co., Ltd.)研制的 PCS-1000 高压冷喷涂系统。在喷涂过程中,采用 N_2 为加速气体,分别在温度 400、600、800 $^{\circ}\text{C}$ 下制备涂层,研究加速气体温度对冷喷涂 CuZn35 涂层微观结构和耐磨性能的影响。实验中具体的喷涂工艺参数如表 1 所示。

1.2 涂层微观结构观察

使用线切割切取尺寸为 10 mm×5 mm×5 mm 的样品,用于涂层显微硬度和微观结构的分析。将样品嵌入树脂中,用碳化硅砂纸从 180 目、1200 目、2000 目到 4000 目逐步进行研磨,并通过研磨液抛光,最后用 $\text{HCl}-\text{FeCl}_3$ 溶液进行蚀刻。采用光学显微镜(OM, DMI5000M)观察涂层的截面微观结构。

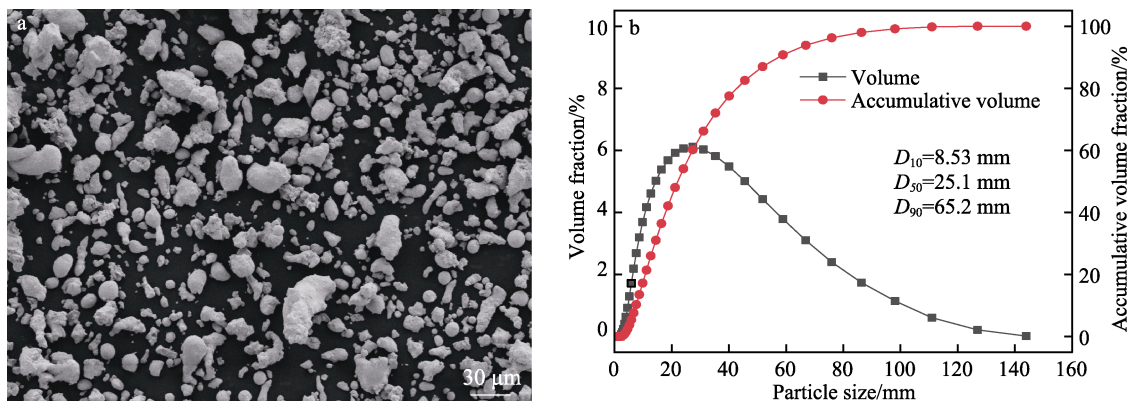


图1 CuZn35 粉末微观形貌特征及粒度分布

Fig.1 Micro morphological characteristics and particle size distribution of CuZn35 powder

表 1 冷喷涂制备 CuZn35 涂层工艺参数
Tab.1 Process parameters of CuZn35 coating prepared by cold spraying

Test sample number	Gas type	Gas temperature/℃	Gas pressure/MPa	Spray distance/mm	Powder speed/(r·min ⁻¹)
1	N ₂	400	5	20	8
2	N ₂	600	5	20	8
3	N ₂	800	5	20	8

1.3 涂层显微硬度测量

对抛光后样品采用维氏硬度仪 (MH-5D) 进行硬度测试, 测量时选用 3 N 的载荷。在涂层截面选取 5 个点进行硬度测试, 通过平均值分析不同工艺参数制备涂层的硬度差异。

1.4 涂层摩擦磨损性能测试

采用线切割切取直径为 20 mm 的圆盘状试样, 用于涂层的摩擦磨损试验。采用旋转摩擦磨损试验机 (MS-T3001), 在干燥室温环境下对 CuZn35 涂层进行摩擦磨损测试。实验中, 摩擦副为直径 4 mm 的 GCr15 球, 测试载荷设置为 2 N, 旋转半径设置为 3 mm,

转速为 360 r/min, 摩擦磨损时间为 30 min。记录涂层在摩擦磨损过程中摩擦因数随时间的变化情况, 并通过 SEM 对试验后涂层的磨损痕迹进行观察, 采用三维轮廓仪测量各试样涂层的磨损深度和磨痕形貌特征。体积磨损率由式 (1) 计算。

$$W = \frac{V}{NL}$$

(1)

式中: W 为体积磨损率; V 为磨损体积, $V=\pi D \cdot S$, D 为磨损半径, S 为磨损截面积, 采用三维轮廓仪测量 10 个位置的磨损截面积, 取其平均值; N 为涂层竖直上方施加的载荷; L 为磨损距离。

2 结果与讨论

2.1 加速气体温度对 CuZn35 涂层微观结构的影响

在不同加速气体温度条件下制备的 CuZn35 涂层截面微观结构和孔隙率如图 2—3 所示。在 3 种冷喷涂参数下, 都能在铝基体上形成良好结合, 并沉积成涂层, 涂层中均未出现氧化现象。沉积到涂层中的 CuZn35 颗粒相较于原始粉末, 经历了剧烈的塑性变形。

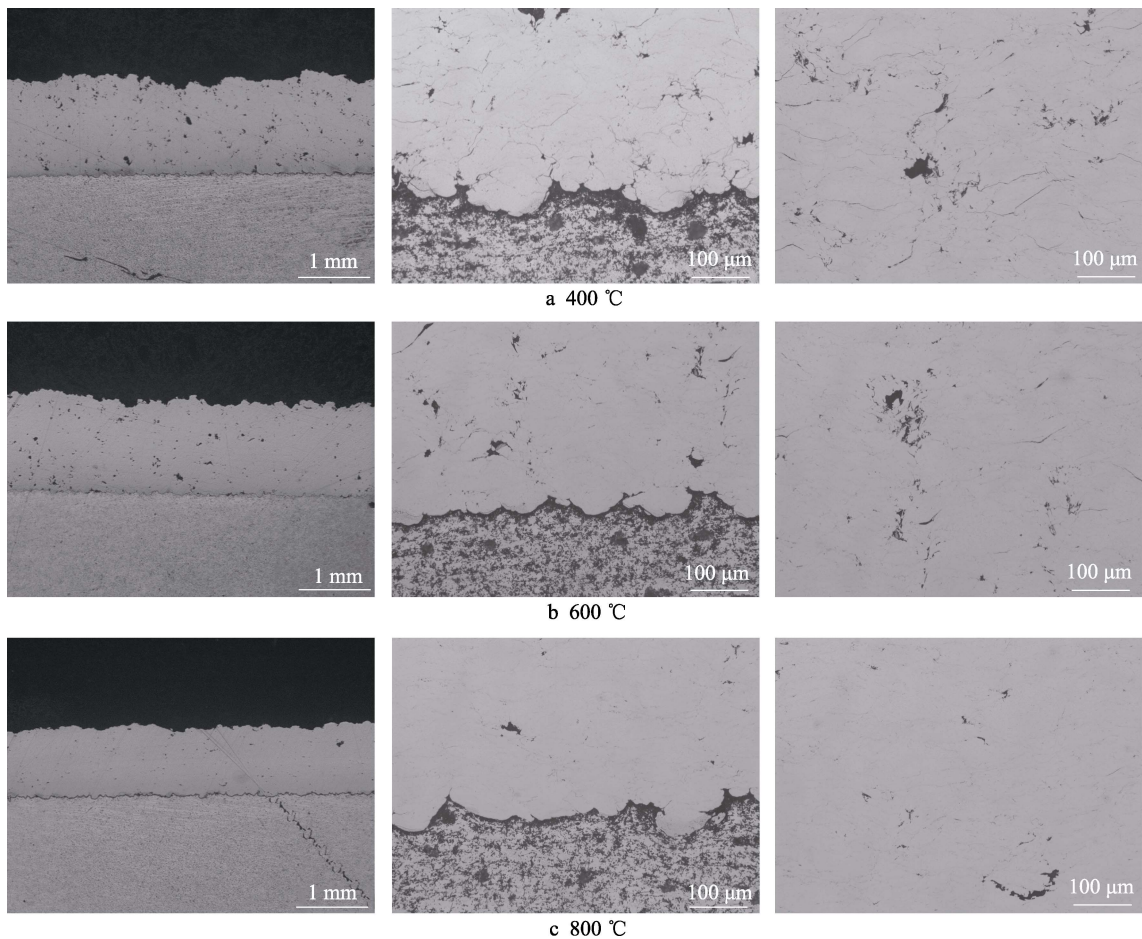


图 2 不同加速气体温度下制备 CuZn35 涂层的截面微观形貌
Fig.2 Cross-sectional micro morphologies of CuZn35 coatings prepared at different accelerated gas temperature

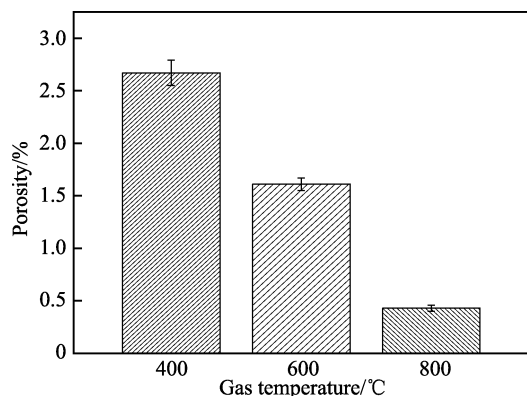


图 3 不同加速气体温度下制备 CuZn35 涂层的孔隙率
Fig.3 Porosity of CuZn35 coatings prepared at different accelerated gas temperature

所有涂层总体上均表现出较为致密的结构,在沉积颗粒之间仍存在一些孔隙。对比 3 种涂层可看出,加速气体温度对 CuZn35 涂层的结构有着显著影响。在 400 °C 加速气体条件下制备的涂层中含有较多的不规则大孔洞,且涂层堆叠颗粒间存在大量微裂纹,表明该参数下沉积的涂层颗粒间截面的结合可能较弱。随着加速气体温度从 400 °C 提高到 800 °C,涂层中的孔隙和微裂纹等缺陷逐渐减少。在 600 °C 加速气体条件下制备的涂层中仍含有一定量的大孔洞和粒子间微裂纹,但是显著少于在 400 °C 加速气体条件下制备的涂层,表明涂层内颗粒间的结合得到改善。当加速

气体温度增至 800 °C 时,涂层结构致密,内部基本未形成大孔洞,涂层的颗粒间结合紧密,无明显微裂纹存在,涂层的孔隙率低于 0.5%,接近于铸态 CuZn35 材料的微观结构。冷喷涂涂层颗粒间的结合主要取决于颗粒撞击过程中的动能和颗粒本身的变形能力。文中研究表明,提高加速气体温度改善了粉末颗粒材料在撞击时的变形能力,因此沉积得到的涂层颗粒间结合紧密,孔隙率低。

为了进一步分析在 3 种加速气体温度下制备的涂层中粉末颗粒的变形行为及粉末颗粒之间的结合情况,采用 HCl-FeCl₃ 溶液将所制备的涂层试样刻蚀后,观察其金相组织。如图 4 所示,随着喷涂过程中加速气体温度的提高,涂层内部颗粒的变形量逐渐增大,颗粒由原来的类球形和不规则形变为扁平状。在气体温度 600、800 °C 下制备涂层的内颗粒间界面处的未结合微裂纹较少,表明颗粒之间形成了较好的结合。3 种涂层中颗粒变形行为的差异可能导致涂层经历不同程度的加工硬化,从而影响涂层的硬度和摩擦磨损行为。

3 种温度下制备的 CuZn35 涂层和铸态 CuZn35 材料的 XRD 衍射图谱如图 5 所示,可以看出,CuZn35 涂层与铸态 CuZn35 材料物相组成一致,表明在冷喷涂过程中未发生相变,且涂层未发生氧化。由图 5 中衍射峰半峰宽可以分析出,CuZn35 涂层相较于铸态 CuZn35 材料,其内部晶粒更加细小。

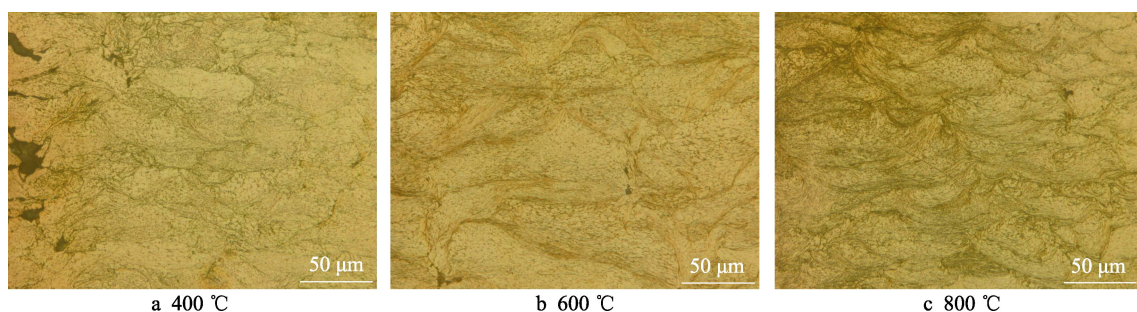


图 4 不同加速气体温度下制备 CuZn35 涂层腐蚀后的金相组织形貌

Fig.4 Metallographic morphology of CuZn35 coatings prepared under different accelerated gas temperature after corrosion

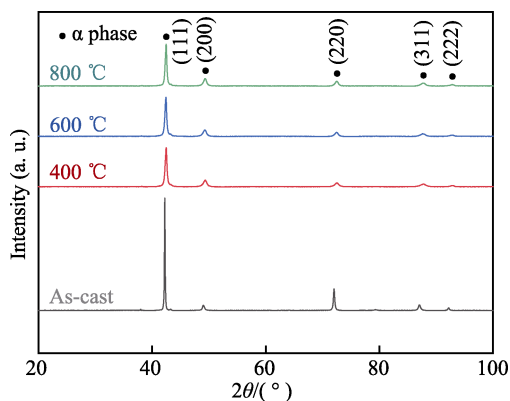


图 5 CuZn35 涂层与铸态 CuZn35 材料的 XRD 衍射图谱
Fig.5 XRD patterns of CuZn35 coating and as-cast CuZn35 materials

2.2 加速气体温度对 CuZn35 涂层硬度的影响

硬度是影响涂层耐摩擦磨损性能的重要因素。在不同加速气体温度下冷喷涂制备的 CuZn35 涂层的硬度如图 6 所示,可知冷喷涂涂层的硬度相较于铸态 CuZn35 合金^[10]显著增大,文献报道了不同铸态 CuZn35 合金的硬度范围为 105HV0.3~178HV0.3^[20]。这是因为颗粒塑性变形引起位错密度增加,发生加工硬化,使涂层硬度增大。随着冷喷涂过程中加速气体温度的升高,涂层的硬度整体呈增大趋势。在加速气体温度 400 °C 条件下制备的涂层硬度约为 200HV0.3,在加速气体温度 600 °C 条件下制备的涂层硬度约为 225HV0.3,而

在加速气体温度 800 °C 条件下制备的涂层硬度则约为 240HV0.3。通常, 随着冷喷涂加速气体温度的升高, 粉末撞击基体前的软化作用逐渐明显, 材料更易发生变形。从涂层的微观结构可以看到, 在加速气体温度高的条件下制备的 CuZn35 涂层中的颗粒变形更显著, 因此在加速气体温度 800 °C 条件下制备的涂层发生的塑性变形最大, 涂层材料加工硬化效应最明显, 因此涂层的硬度最高。对于热处理温度敏感的材料, 除了粉末材料的变形导致的加工硬化作用以外, 涂层在形成过程中的基体温度也会影响涂层的硬度。当喷涂过程中基体温度过高时, 可能会产生类似于热处理的作用, 消除部分涂层中的加工硬化效应, 使涂层的塑性变好。文中实验结果表明, 当加速气体温度从 400 °C 增至 800 °C 时, 涂层的显微硬度逐渐升高, 表明气体温度对基体加热产生的涂层软化作用相较于粉末塑性变形引起的加工硬化作用更弱, 因此涂层的硬度随着加速气体温度的升高呈增大趋势^[21-22]。

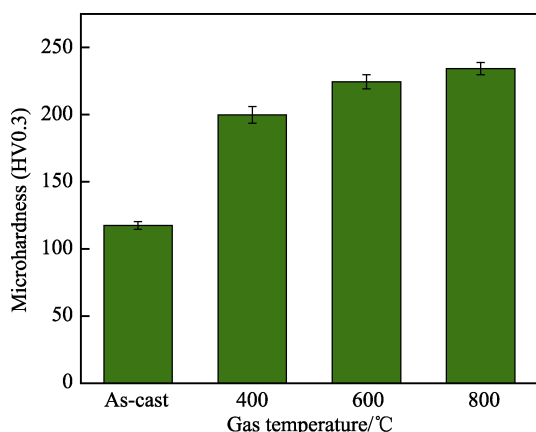


图 6 不同加速气体温度条件下制备的 CuZn35 涂层的硬度及其与铸态 CuZn35 材料的比较

Fig.6 Hardness of CuZn35 coatings prepared under different accelerated gas temperature and comparison between coatings and as-cast CuZn35 materials

2.3 涂层摩擦磨损行为分析

摩擦磨损实验后采用三维轮廓仪测得涂层表面磨痕的宏观观察结果如图 7 所示, 可知在 3 种加速气体温度条件下制备的涂层在相同的摩擦实验条件下形成的磨痕深度存在显著差异。在 400、600、800 °C 条件下制备涂层的磨痕深度分别约为 90、65、55 μm, 表明涂层的抗摩擦磨损性能随着冷喷涂过程中加速气体温度的升高而增强。其中, 在 800 °C 条件下制备涂层的磨痕深度与铸态 CuZn35 材料接近。

冷喷涂 CuZn35 涂层和铸态 CuZn35 材料在摩擦磨损实验过程中摩擦因数随时间的变化规律如图 8a 所示。所有涂层的摩擦因数都在摩擦初始阶段的 200 s 内快速增大, 然后达到稳定值。3 种涂层在稳定磨损阶段的摩擦因数相差不大, 在 400、600、800 °C 条

件下制备涂层的平均摩擦因数分别为 0.63、0.61、0.61。在 400 °C 条件下制备涂层的摩擦因数略高, 这可能是因该参数下制备涂层的孔隙相对较多。相较于冷喷涂涂层材料, 铸态 CuZn35 材料表现出较低的摩擦因数, 约为 0.32, 表明冷喷涂制备的 CuZn35 涂层与铸态 CuZn35 具有较大的材料属性差异。3 种涂层的磨损率结果如图 8b 所示, 当冷喷涂加速气体温度从 400 °C 提高至 600、800 °C 时, CuZn35 涂层的磨损率从 3.67 mm³/(N·mm) 降至 2.22 mm³/(N·mm) 和 1.80 mm³/(N·mm)。该结果与加速气体温度对 CuZn35 涂层微观结构和硬度的影响相关。通常情况下, 高硬度有利于涂层的耐磨性。在冷喷涂过程中, CuZn35 涂层的硬度随着加速气体温度的升高而增大。此外, 加速气体温度的提高还改善了涂层颗粒间的结合, 因此在 800 °C 条件下制备的涂层表现出最好的耐摩擦磨损性能, 其磨损率与铸态 CuZn35 材料的磨损率接近。

在不同加速气体温度条件下, 冷喷涂制备 CuZn35 涂层和铸态 CuZn35 材料磨痕表面的 SEM 形貌如图 9 所示。在气体温度 400 °C 条件下制备涂层的表面磨痕形貌如图 9a 所示, 表现为大面积片状磨痕, 并伴随有大块片状的碎片从涂层上脱落。块状剥落表明该涂层内部存在结合较差的界面, 这对应于涂层截面中观察到的大量微裂纹。当涂层受到摩擦作用时, 涂层材料以块状形式从结合较弱的颗粒界面缺陷处剥离, 磨损形式主要为剥层磨损, 涂层以较快的速率磨损。此外, 涂层表面存在明显的沟槽, 这些凹槽平行于滑动方向, 这是由反复滑动摩擦过程中磨损碎屑引起的刮擦作用所致。在气体温度 600 °C 条件下制备的 CuZn35 涂层与在 400 °C 条件下制备涂层的磨损机制类似, 如图 9b 所示, 磨痕表面也可见层状磨损碎屑和材料脱落后的凹槽。不同的是, 该涂层表面的层状磨损碎屑尺寸较小, 部分磨屑在摩擦后未从涂层表面剥落, 仍黏结在涂层表面, 表明该涂层成片单元间的结合相较于 400 °C 下制备涂层有所提高。从涂层微观结构中也可看到, 在 600 °C 条件下制备的涂层内颗粒间界面处的微裂纹明显减少, 因此涂层在磨损过程中的块状脱落现象得以改善。此外, 该涂层在磨损中也存在小尺寸平行沟槽, 表明在磨损过程中伴随着磨粒磨损, 但凹坑深度较 400 °C 下制备的涂层更浅。在气体温度 800 °C 条件下制备涂层的磨损形貌特征与在 400 °C 条件下制备涂层存在较大差异, 如图 9c 所示。在涂层表面仅有少量的层片状磨损碎屑, 在磨损过程中未发生明显的涂层材料块状脱落, 也未见大尺寸的磨损凹坑, 其涂层表面仅有轻微的磨痕。该结果表明, 在 800 °C 的气体温度下制备涂层的内部层片颗粒间的结合强度较高, 涂层不再表现出剥层磨损形式。铸态 CuZn35 材料的磨损形貌如图 9d 所示, 在 800 °C 条件下制备涂层的磨损形貌特征与铸态 CuZn35 材料较为相似, 材料在摩擦过程中不易

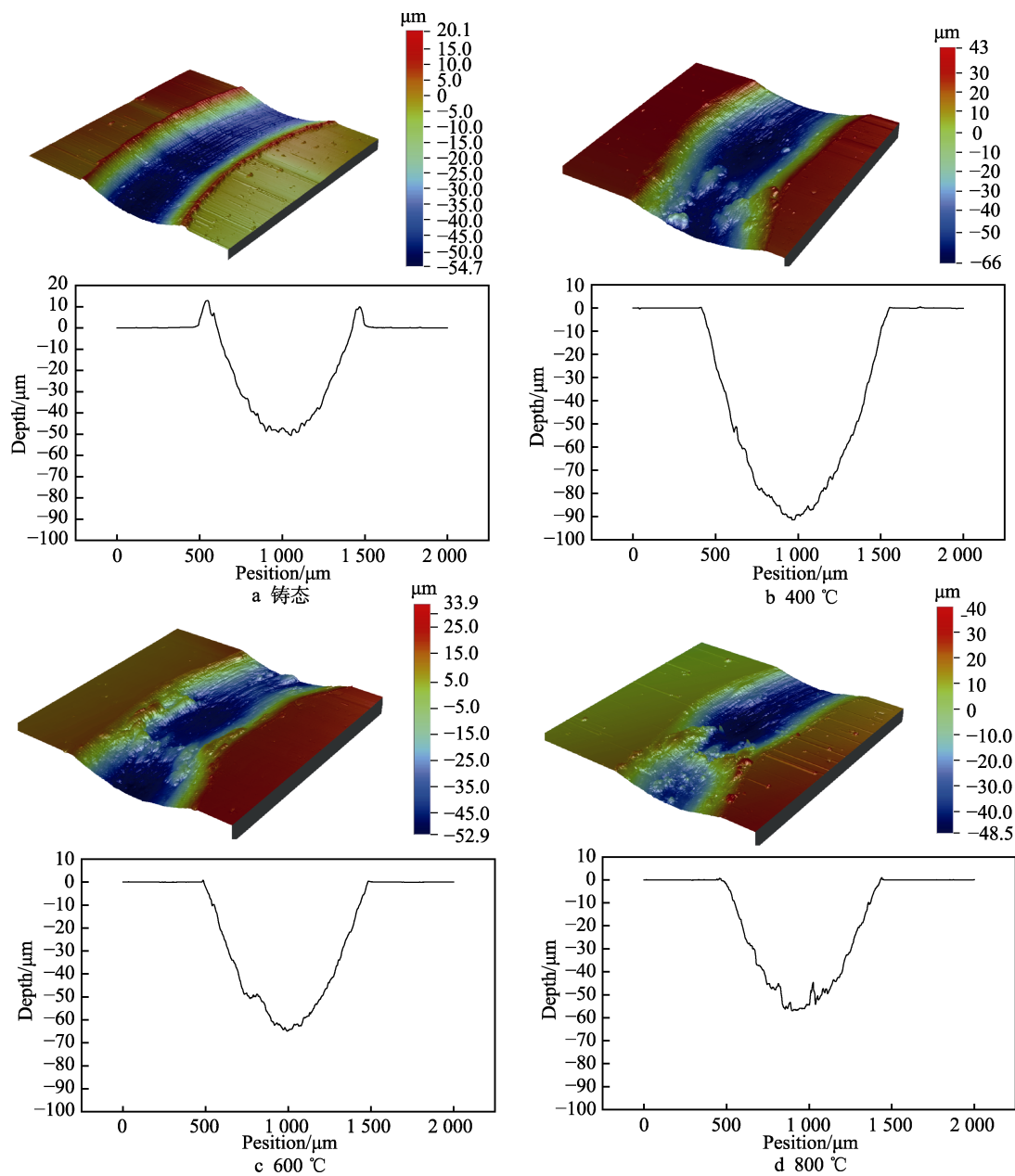


图7 不同加速气体温度条件下制备的 CuZn35 涂层及铸态 CuZn35 材料的表面磨痕形貌
Fig.7 Surface wear scar morphologies of CuZn35 coatings and as-cast CuZn35 materials prepared under different accelerated gas temperature: a) as-cast; b) 400 °C; c) 600 °C; d) 800 °C

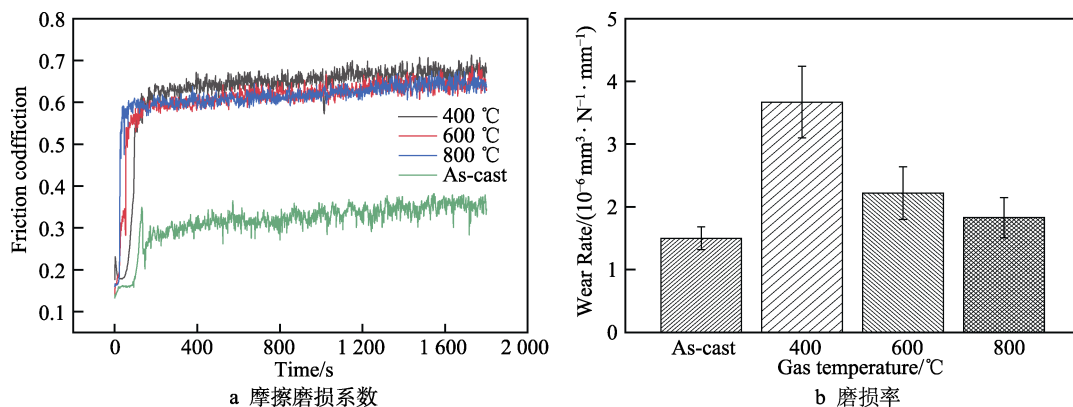


图8 不同加速气体温度条件下制备的 CuZn35 涂层及铸态 CuZn35 材料的变化
Fig.8 Changes of CuZn35 coatings and as-cast CuZn35 materials prepared under different accelerated gas temperature: a) friction and wear coefficient; b) wear rate

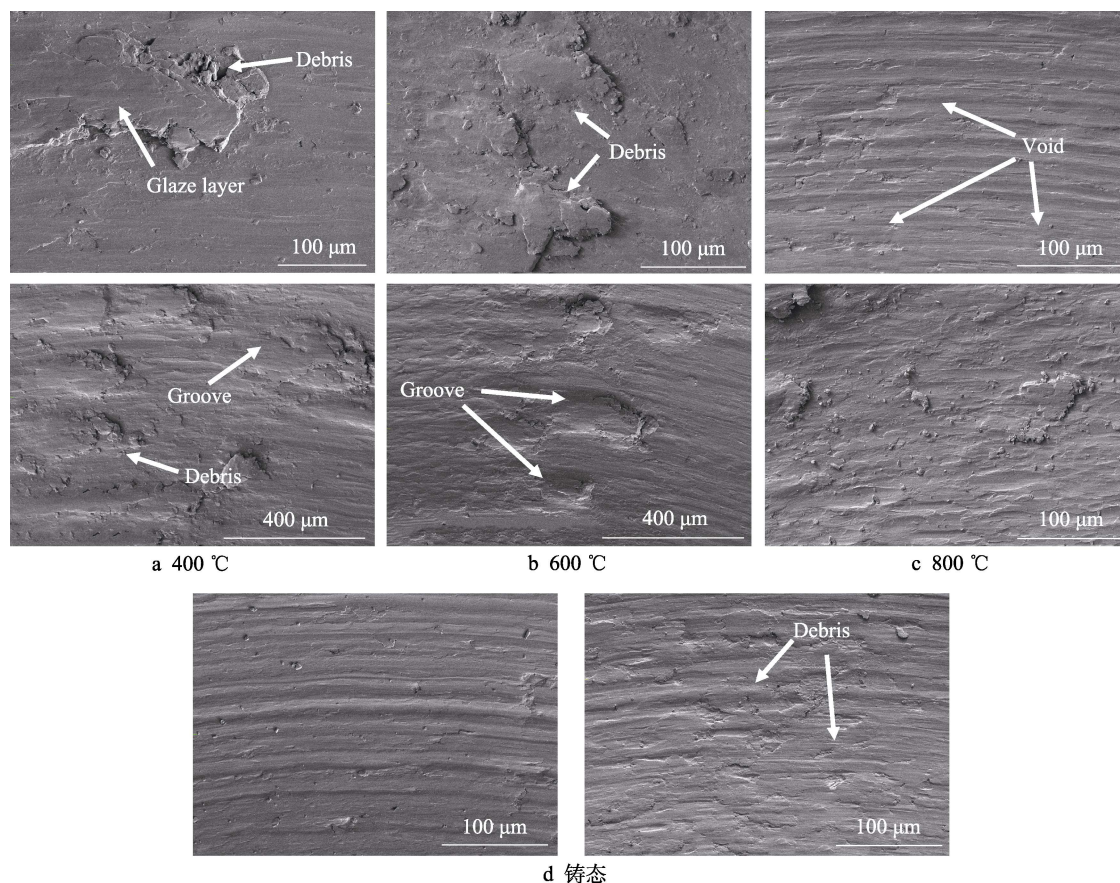


图 9 不同加速气体温度条件下制备的 CuZn35 涂层及铸态 CuZn35 材料的磨痕特征
Fig.9 Wear scar characteristics of CuZn35 coatings and as-cast CuZn35 materials prepared under different accelerated gas temperature: a) 400 °C; b) 600 °C; c) 800 °C; d) as-cast

发生大面积层片状脱落, 仅有少量颗粒碎片从涂层上脱落^[23-26]。相较于铸态 CuZn35 材料, 在 800 °C 条件下制备涂层由于存在内部空隙等缺陷, 造成涂层部分区域磨损较为严重, 如图 9c (右) 所示, 且铸态 CuZn35 材料的摩擦因数较低, 在磨损过程中的润滑效果较好, 导致涂层虽然硬度高, 但其摩擦磨损性能稍差于铸态 CuZn35 材料。

3 结论

采用气体压力为 5 MPa 的高压冷喷涂技术在铝基体上沉积 CuZn35 涂层, 研究了冷喷涂加速气体温度 (400、600、800 °C) 对涂层的微观组织、硬度及摩擦磨损行为的影响。主要结论如下。

1) 当加速气体温度从 400 °C 提高到 800 °C 时, 涂层中的孔隙和微裂纹等缺陷逐渐减少。在加速气体 800 °C 下制备的 CuZn35 涂层结构致密, 内部基本未形成大孔洞, 涂层中颗粒间结合紧密, 无明显的微裂纹, 涂层孔隙率低于 0.5%, 且涂层与基体界面结合紧密。

2) 在压力 5 MPa, 加速气体温度 400、600、800 °C 条件下制备的 CuZn35 涂层的硬度均达到了 200HV0.3。随着冷喷涂过程中加速气体温度的升高, 涂层的硬度呈增大趋势, 在加速气体温度 800 °C 条件下制备涂层

的硬度约为 240HV0.3。

3) 加速气体温度对冷喷涂 CuZn35 涂层抗摩擦磨损性能有着显著影响。涂层的磨损率随着加速气体温度的升高而显著降低。在气体温度 800 °C 条件下制备涂层的硬度高, 且涂层颗粒间的结合强度较高, 因此表现出最优的耐摩擦磨损性能, 磨损率约为 $1.80 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$, 与铸态 CuZn35 材料接近。

参考文献:

- [1] 刘峰, 范宏训. 电弧喷涂工艺对 Zn-Cu 合金制模涂层性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(12): 1248-1250.
LIU Feng, FAN Hong-xun. Effects of Arc Spraying Parameters on Performances of Zn-Cu Alloy Moulding Coating[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(12): 1248-1250.
- [2] 陈一胜, 傅政, 朱志云, 等. 高强耐磨黄铜的研究现状[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(5): 23-29.
CHEN Yi-sheng, FU Zheng, ZHU Zhi-yun, et al. Research Status of High Strength and Anti-Attrition Brass[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2012, 3(5): 23-29.

- [3] POZA P, GARRIDO-MANEIRO M Á. Cold-Sprayed Coatings: Microstructure, Mechanical Properties, and Wear Behaviour[J]. *Progress in Materials Science*, 2022, 123: 100839.
- [4] KUMAR S, KUMAR M, JINDAL N. Overview of Cold Spray Coatings Applications and Comparisons: A Critical Review[J]. *World Journal of Engineering*, 2020, 17(1): 27-51.
- [5] 赵国锋, 王莹莹, 张海龙, 等. 冷喷涂设备及冷喷涂技术应用研究进展[J]. *表面技术*, 2017, 46(11): 198-205.
ZHAO Guo-feng, WANG Ying-ying, ZHANG Hai-long, et al. Application of Cold Spraying Equipment and Cold Spraying Technology[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(11): 198-205.
- [6] 黄仁忠, 孙文, 郭双全, 等. 冷喷涂技术的研究进展与应用[J]. *中国表面工程*, 2020, 33(4): 16-25.
HUANG Ren-zhong, SUN Wen, GUO Shuang-quan, et al. Research Developments and Applications of Cold Spray Technology[J]. *China Surface Engineering*, 2020, 33(4): 16-25.
- [7] 邓楠, 董浩, 车洪艳, 等. 冷喷涂制备金属涂层及其在增材制造应用中的研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(3): 57-66.
DENG Nan, DONG Hao, CHE Hong-yan, et al. The Research Progress on Preparation of Metal Coatings by Cold Spraying and Its Application in Additive Manufacturing[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(3): 57-66.
- [8] 付金良, 王雄, 冯力, 等. Zn 含量对低压冷喷涂 Cu-Zn 复合涂层力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(2): 94-96.
FU Jin-liang, WANG Xiong, FENG Li, et al. Effect of Zn Content on Mechanical Properties of Low-Pressure Cold Sprayed Cu-Zn Composite Coating[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(2): 94-96.
- [9] 冯力, 畅继荣, 李洞亨, 等. 低压冷喷涂 Cu-Zn 复合涂层的耐蚀性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(6): 2029-2038.
FENG Li, CHANG Ji-rong, LI Dong-tong, et al. Corrosion Resistance of Low Pressure Cold Sprayed Cu-Zn Composite Coatings[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(6): 2029-2038.
- [10] 冯力, 王雄, 安国升, 等. 退火热处理对低压冷喷涂 Cu-Zn 复合涂层性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(7): 2444-2450.
FENG Li, WANG Xiong, AN Guo-sheng, et al. Effect of Annealing Heat Treatment on Properties of Low-Pressure Cold Sprayed Cu-Zn Composite Coatings[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(7): 2444-2450.
- [11] 李文亚, 樊柠松, 殷硕. 冷喷涂过程中气固两相流动行为及喷涂工艺优化研究新进展[J]. *中国表面工程*, 2020, 33(4): 82-101.
LI Wen-ya, FAN Ning-song, YIN Shuo. State-of-the-Art of Gas-Solid Two-Phase Flow Behavior during Cold Spray and Process Parameters Optimization[J]. *China Surface Engineering*, 2020, 33(4): 82-101.
- [12] ZHANG Liu-yan, YANG Shui-mei, LV Xiao, et al. Wear and Corrosion Resistance of Cold-Sprayed Cu-Based Composite Coatings on Magnesium Substrate[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, 28(6): 1212-1224.
- [13] SIRVENT P, GARRIDO M A, LOZANO-PEREZ S, et al. Oscillating and Unidirectional Sliding Wear Behaviour of Cold Sprayed Ti-6Al-4V Coating on Ti-6Al-4V Substrate[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 382: 125152.
- [14] XIE Ying-chun, PLANCHE M P, RAOELISON R, et al. Investigation on the Influence of Particle Preheating Temperature on Bonding of Cold-Sprayed Nickel Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 318: 99-105.
- [15] YIN Shuo, WANG Xiao-fang, SUO Xin-kun, et al. Deposition Behavior of Thermally Softened Copper Particles in Cold Spraying[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(14): 5105-5118.
- [16] LI Na, LI Wen-ya, YANG Xia-wei, et al. Corrosion Characteristics and Wear Performance of Cold Sprayed Coatings of Reinforced Al Deposited Onto Friction Stir Welded AA2024-T3 Joints[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 349: 1069-1076.
- [17] MUNAGALA V N V, TORGERSON T B, SCHARF T W, et al. High Temperature Friction and Wear Behavior of Cold-Sprayed Ti₆Al₄V and Ti₆Al₄V-TiC Composite Coatings[J]. *Wear*, 2019, 426/427: 357-369.
- [18] NG C H, YIN Shuo, LUPOI R, et al. Correlation between Flattening Ratio and Wear Performance of Cold Sprayed Metal Matrix Composite Coatings[J]. *Materials Letters*, 2021, 283: 128773.
- [19] XIE Ying-chun, YIN Shuo, CHEN Chao-yue, et al. New Insights into the Coating/Substrate Interfacial Bonding Mechanism in Cold Spray[J]. *Scripta Materialia*, 2016, 125: 1-4.
- [20] 黄绍辉, 冯卫, 巢国辉, 等. 耐磨复杂黄铜管组织及磨损性能研究[J]. *上海有色金属*, 2015, 36(4): 173-176.
HUANG Shao-hui, FENG Wei, CHAO Guo-hui, et al. Study on Microstructure and Wear Performance of Complex Brass Tube[J]. *Shanghai Nonferrous Metals*, 2015, 36(4): 173-176.
- [21] HUANG Chun-jie, LI Wen-ya, FENG Yan, et al. Microstructural Evolution and Mechanical Properties Enhancement of a Cold-Sprayed CuZn Alloy Coating with Friction Stir Processing[J]. *Materials Characterization*, 2017, 125: 76-82.
- [22] ARKHIPOV V E, MOSKVITIN G V, PUGACHEV M S. The Effect of Process Parameters of Gas-Dynamic Spray on Generation of Brass-Type Coating Structure[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1023(1): 012004.