

激光与光电子学进展

激光辅助低压冷喷涂表面金属化 CNTs/Cu 复合涂层

刘博¹, 马磊¹, 田凯¹, 李波^{2*}, 孙景勇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技术在 Cu 基体上制备表面金属化 CNTs(Ni-Cu-CNTs)/Cu 复合涂层, 研究了复合涂层的微观特性以及耐磨损性能。研究表明, 在激光辐照的作用下, Ni-Cu-CNTs 增强相和 Cu 黏结相由于受热软化均发生了明显的塑性变形, Ni-Cu-CNTs 颗粒嵌入到塑性变形的 Cu 颗粒中形成连续致密且结合良好的复合涂层, 复合涂层的厚度可达 2609 μm , CNTs 弥散均匀分布在复合涂层中且保持其结构的完整性。添加 Ni-Cu-CNTs 的复合涂层表现出优异的耐磨损性能, 平均摩擦系数可降低至 0.385, 体积磨损速率降至 $1.49 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。复合涂层中的 Ni-Cu-CNTs 增强相一方面通过承受磨球对涂层表面的载荷力, 减少了涂层磨损, 另一方面随着磨损过程的进行, Ni-Cu-CNTs 从涂层中脱离到涂层表面形成润滑层, 降低了涂层的摩擦系数, 从而提高复合涂层的耐磨损性能。

关键词 激光技术; 低压冷喷涂; CNTs/Cu 复合涂层; 微观特性; 耐磨损性能

中图分类号 TN249; TG146.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222754

Surface-Metallized CNTs/Cu Composite Coating Prepared by Laser-Assisted Low-Pressure Cold Spray

Liu Bo¹, Ma Lei¹, Tian Kai¹, Li Bo^{2*}, Sun Jingyong², 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, surface-metallized CNT (Ni-Cu-CNT)/Cu composite coatings were deposited on a Cu substrate by using the laser-assisted low-pressure cold spraying technique. The microstructure and wear resistance of the composite coatings were studied. The results show that under laser irradiation, significant plastic deformation occurs in the Ni-Cu-CNT reinforcement phase and Cu bonding owing to thermal softening. Ni-Cu-CNT particles are embedded into the plastic-deformed Cu particles to form a continuous, dense, and well-bonded composite coating. The thickness of the composite coating can reach 2609 μm , and the CNTs are uniformly distributed in the composite coating while maintaining its structural integrity. The composite coating with Ni-Cu-CNTs shows excellent wear resistance, the average friction coefficient reduces to 0.385, and the volume wear rate reduces to $1.49 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. Moreover, the Ni-Cu-CNT reinforcing phase in the composite coating reduces the wear of the coating by bearing the load of the grinding ball on the coating surface. In addition, Ni-Cu-CNTs separate from the coating to form a lubricating layer on the coating surface during the wear process, reducing the friction coefficient of the coating, and, thus, improving the wear resistance of the composite coating.

Key words laser technique; low-pressure cold spray; CNTs/Cu composite coating; microstructure; wear-resistant property

1 引言

Cu 基复合材料因兼具 Cu 优异的导热/导电性能以及增强相的耐磨、耐蚀等其他方面的性能, 在航空航

天、交通运输、电子电气等领域关键部件的制造及其表面改性方面得到了广泛应用^[1-3]。在 Cu 基复合材料的增强相中, 碳基材料(如石墨、CNTs、石墨烯、金刚石等)由于具有较优的综合性能而备受关注^[4-7]。冷喷涂

收稿日期: 2022-10-13; 修回日期: 2022-11-16; 录用日期: 2022-12-07; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国网宁夏电力有限公司科技项目(5229CG200069)

通信作者: *libo1011@zjut.edu.cn

(CS)技术由于具有低热输入、非熔化沉积的特征,在制备热敏感/相变敏感材料(如Cu及其复合材料)方面具有显著优势^[8-10]。Kwon等^[11]和Cho等^[12]采用CS技术制备了CNTs/Cu复合涂层,其导电/导热性能均优于纯Cu涂层。Pialago等^[13-14]利用CS技术制备了具有高致密度的Cu-CNTs-AlN和Cu-CNTs-SiC复合涂层。Choi等^[15]采用CS技术制备了石墨烯/Cu复合涂层,平均摩擦系数和磨损速率分别从纯铜涂层的0.60和 $8.6 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降至0.46和 $5.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。但由于碳基材料与Cu金属之间的润湿性较差,在CS制备碳基材料增强的Cu复合材料时会存在界面结合不良的问题。因此,国内外许多学者对碳基材料进行表面金属化以提高其与Cu黏结相的界面结合及性能。Chen等^[16]对石墨表面进行镀铜预处理,采用CS技术制备Cu-Al₂O₃-石墨复合涂层,研究了复合涂层的微观结构、力学性能及摩擦磨损性能。Yin等^[17]对金刚石进行了表面镀Cu处理,在CS制备金刚石复合涂层中金刚石保持了其结构的完整性,且表现出优异的耐磨损性能。Aldwell等^[18]在金刚石表面镀Cu和Ni双金属,采用CS技术制备了金刚石/金属复合涂层,复合涂层中金刚石含量高且无相变。

低压冷喷涂(LPCS)由于具有操作简单、设备轻巧、可便携性等优点,在Cu、Al、Zn等金属材料沉积及其部件的现场修复等方面得到了广泛关注^[19-22]。但由于LPCS较低的载气压力和预热温度,喷涂粉末的沉积速度有限,所制备的涂层会因为粉末颗粒的塑性变形不充分而存在孔隙率高、结合力差、沉积效率低等问题^[23-25]。近些年,将激光加热与CS同步相结合的技术已成为一个研究热点^[26-29]。Zhang等^[30]利用纳秒脉冲激光辅助CS制备了高强度的Al-Cu合金涂层。Barton等^[31]利用激光辅助CS在AISI 1018中碳钢基体上制备了氧化物弥散强化的Fe91Ni8Zr1合金。Nikbakht等^[32]采用激光辅助CS技术在三种不同基体

上制备了CrMnCoFeNi高熵合金涂层。Yao等^[33-36]采用激光辅助CS技术制备了Ni基、Co基合金及其复合材料涂层。研究表明,激光同步加热能提升CS涂层的沉积效率、致密性、结合强度以及耐磨/耐蚀等性能。

基于上述的研究现状,本文针对高压隔离开关触头(Cu基合金)修复与强化需求,采用激光辅助LPCS技术在Cu基体上制备CNTs/Cu复合涂层,研究了CNTs表面金属化以及激光同步辐照对复合涂层微观结构及性能的影响,以期突破CS技术制备CNTs/Cu复合涂层在致密性、结构完整性以及性能提升等方面的限制。本文的研究结果有望为Cu基材料的修复、强化以及增材制造提供一种新思路。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验采用电解枝晶状的Cu粉作为复合涂层的黏结相,其显微形貌如图1(a)所示。采用碳纳米管(CNTs)作为复合涂层的增强相,其原始形貌如图1(b)所示。由于Cu粉和CNTs存在密度上的差异,因此在激光辅助LPCS试验之前首先对CNTs表面进行金属化处理,采用化学镀的方法在CNTs表面镀Ni和Cu双金属层。化学镀通过还原反应使得镀液中的金属离子还原成纳米级的金属颗粒沉积在CNTs的表面活化点上,形成包覆镀层^[37]。图2是CNTs表面化学镀Ni/Cu双金属的工艺过程示意图。图3是化学镀Ni/Cu双金属的CNTs(Ni-Cu-CNTs)显微形貌。从图3(a)的整体形貌可以看出,CNTs表面包覆有均匀致密的金属镀层。为了证实Ni和Cu双金属的存在,利用能谱仪(EDS)对金属镀层进行了元素分析,结果如图3(b)所示。从图3(b)可以看出,CNTs表面的金属镀层中含有明显的Ni、Cu元素信号峰,证实了CNTs表面双金属层的存在。

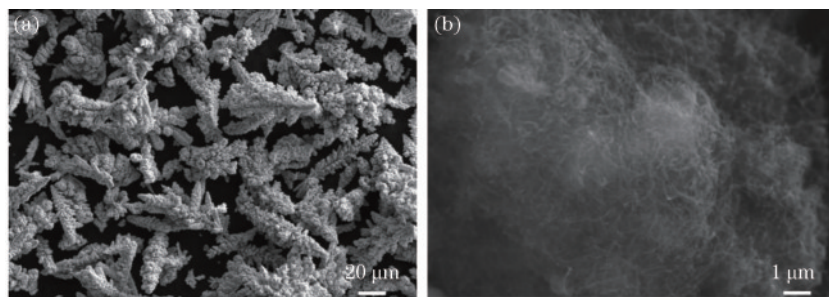


图1 原始粉末的显微形貌。(a) Cu粉;(b) CNTs粉末

Fig. 1 Morphologies of original powders. (a) Cu powder; (b) CNTs powder

激光辅助LPCS试验前,将如图1(a)所示的枝晶状Cu粉和如图3(a)所示的Ni-Cu-CNTs按一定的质量比(Ni-Cu-CNTs在复合粉末中的质量分数分别为5%和10%两种情况)放入通有氩气保护的球磨罐中,然后通过行星球磨机进行低速球磨混合。球磨罐中的

磨球和粉末的球料比为5:1(质量比),球磨机转速为150 r/min,球磨时间为30 min。球磨后的复合粉末形貌如图4所示,由于球磨过程采用低速短时间的方式,因此球磨后的复合粉末中Ni-Cu-CNTs和枝晶状Cu粉的形貌均未遭到破坏,保持与原始粉末相似的形貌。

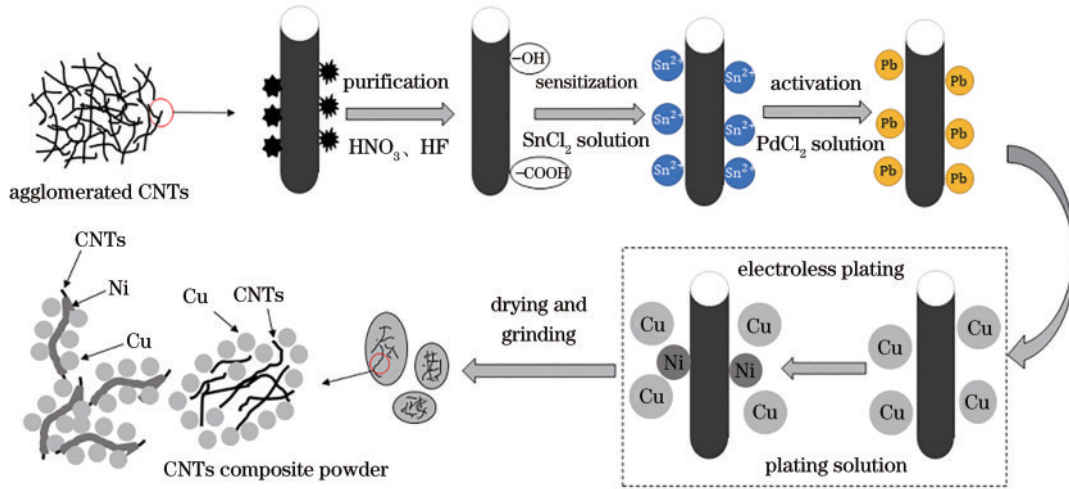


图 2 CNTs 表面化学镀 Ni 和 Cu 双金属工艺过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electroless plating of Ni and Cu on CNTs powder

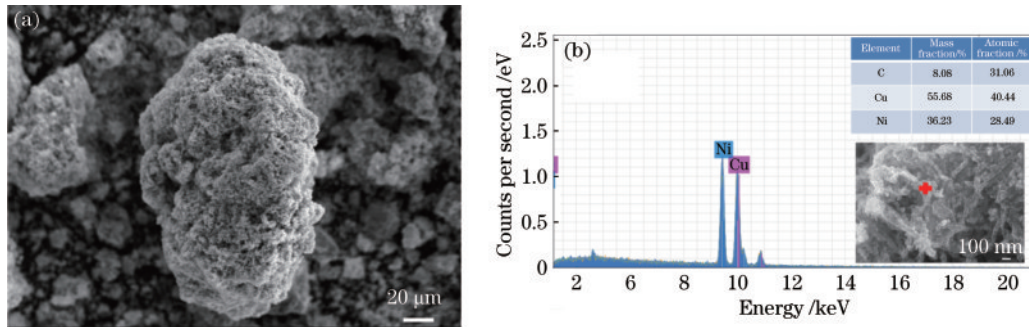


图 3 Ni-Cu-CNTs 粉末的显微形貌。(a)整体形貌；(b) EDS 元素分析

Fig. 3 Morphology of Ni-Cu-CNTs powder. (a) Overall morphology; (b) EDS elemental analysis

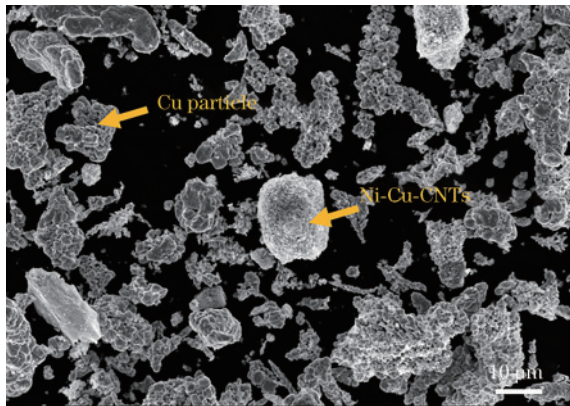


图 4 球磨后 Ni-Cu-CNTs/Cu 复合粉末的显微形貌

Fig. 4 Morphology of Ni-Cu-CNTs/Cu composite powder after ball milling

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和超声清洗预处理。

2.2 试验系统与涂层制备

本试验所用的激光辅助低压冷喷涂系统示意图参见本课题组的前期工作^[38], 该系统由光纤耦合半导体激光器、低压冷喷涂设备、机械手臂和氮气源等组成。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 (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。激光辅助 LPCS 复合涂层的工艺参数如下: N₂ 压力为 0.8 MPa, N₂ 预热温度为 500 °C, 喷涂距离为 15 mm, 扫描速度为 30 mm/s, 送粉率为 25 g/min, 激光辐照功率为 600 W。

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。采用 SEM 自带的 Bruker Xflash 6130 能量色谱仪对粉末和涂层的元素进行分析。采用 HT-1000 球盘式摩擦磨损仪测试涂层的摩擦磨损性能, 对磨副为 Si₃N₄ 陶瓷球 (硬度 2200 HV), 磨球直径为 5 mm, 转速为 350 r/min, 试验载荷为 5 N, 试验时间为 60 min, 采用激光共聚焦显微镜测量磨痕的表面形貌以及横截面积。

3 结果与讨论

3.1 复合涂层的微观特性

图 5 是添加不同 Ni-Cu-CNTs 含量 (质量分数 5%

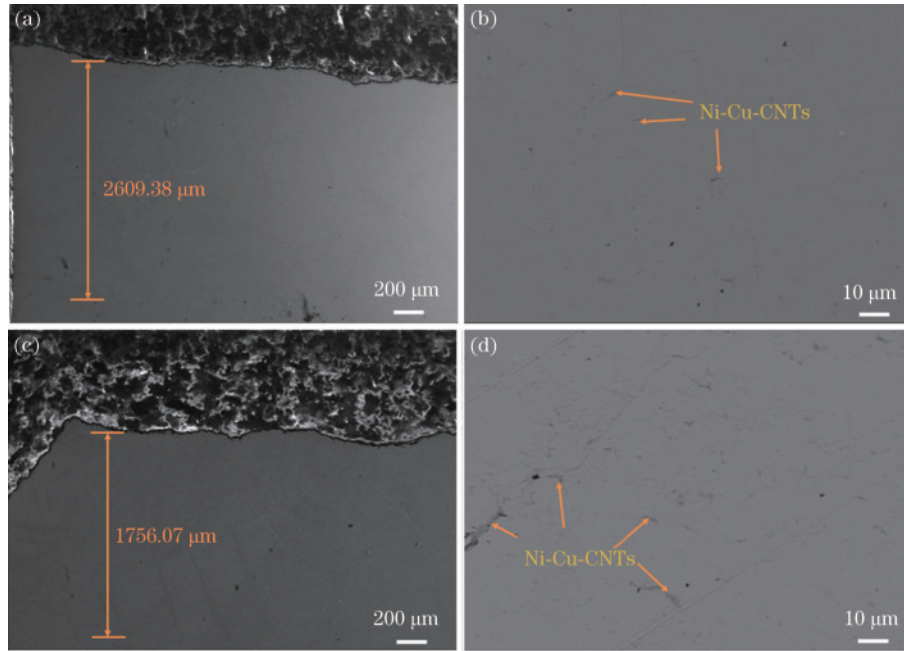


图5 激光辅助低压冷喷涂 Ni-Cu-CNTs/Cu 复合涂层的截面形貌。(a)(b)质量分数 5% Ni-Cu-CNTs;
(c)(d)质量分数 10% Ni-Cu-CNTs

Fig. 5 Cross-sectional microstructures of Ni-Cu-CNTs/Cu composite coatings prepared by laser-assisted low pressure cold spray.
(a)(b) Mass fraction of 5% Ni-Cu-CNTs; (c)(d) mass fraction of 10% Ni-Cu-CNTs

和 10%，分别记为样品 1 和样品 2) 的复合涂层截面形貌，可以看出，不同 Ni-Cu-CNTs 含量的复合涂层均连续致密且无明显裂纹。CS 涂层是基于材料塑性变形进行沉积的，因此其结合机制主要为机械结合，在金相制样过程中，结合较弱的颗粒会从涂层中脱落，从而形成如图 5(b) 和 (d) 中黑点所示的孔隙。此外，还可以发现涂层表面因起伏而导致的厚度不同的现象，这是激光辅助 CS 技术的固有特征，与喷涂距离、扫描速度、激光辐照功率等工艺参数有关^[37]。样品 1 和样品 2 的厚度分别为 2609.38 μm 和 1756.07 μm ，高于目前文献已报道的单一 LPCS 所制备的涂层厚度^[11-12]，这表明激光辐照有助于提高 LPCS 的沉积效率。从图 5(b) 和 (d) 可以看出，Ni-Cu-CNTs 均匀分布在复合涂层中(如图中箭头所示)。通过对比图 5(b) 和 (d) 中 Ni-Cu-CNTs 在复合涂层截面中的面积占比可以看出，随着原始粉末中 Ni-Cu-CNTs 配比含量的增加，复合涂层中的 Ni-Cu-CNTs 含量也相应增多。如本课题组前期工作所述^[33-37]，在 CS 过程中同步引入激光辐照，一方面可以对粉末进行预热，提升其塑性变形能力，另一方面，通过对粉末的预热，可以降低其临界沉积速度^[39]。基于上述的两个有益效应，喷涂粉末在沉积过程中发生充分塑性变形，从而可形成如图 5 所示的连续致密涂层。而由于临界沉积速度的降低，在相同的喷涂工艺参数下，会有更多的粉末可超过其临界沉积速度而实现有效沉积，因此激光辅助 LPCS 涂层的沉积效率高于单一 LPCS。值得注意的是，随着原始粉末中 Ni-Cu-CNTs 含量的增加，复合涂层中的增强相含量相应

增加，但复合涂层的厚度会有所降低，如图 5(a) 和 (c) 所示。这是因为在 CS 中，增强相本身不易发生塑性变形，而是通过嵌入塑性较好的黏结相来实现有效沉积^[35-36]。随着原始粉末中增强相含量的增加，黏结相的相对占比减少，因此，复合涂层的厚度相应地有所降低。

为了进一步检测复合涂层中 Ni-Cu-CNTs 的存在，在高倍电镜下对复合涂层中的 Ni-Cu-CNTs 形貌进行观察，并利用 EDS 对其成分进行分析[图 6(a)]，结果如图 6 所示。从图 6(a) 可以明显看到，Ni-Cu-CNTs 嵌在 Cu 黏结相之间，图 6(b) 的 EDS 结果显示了 Ni 和 Cu 元素的存在，进一步证实了 Ni-Cu-CNTs 存在于复合涂层中。此外，还可以观察到 CNTs 表面的金属镀层形貌与图 3 所示的原始粉末基本一致，表明在激光辅助 LPCS 沉积过程中，Ni-Cu-CNTs 保持了其结构的完整性。这是由于在激光辅助 LPCS 过程中，激光辐照对 Cu 黏结相和 CNTs 表面的金属镀层均起到了加热软化的作用，促进了增强相和黏结相达到协同变形^[40]，可在较低撞击速度下实现有效结合，从而避免高速撞击对 CNTs 结构的破坏。另外，激光在此过程中的作用只是加热软化而非熔化喷涂材料^[33-36]，因此可以避免 CNTs 在高温下的烧损，这也是 Ni-Cu-CNTs 结构完整性的另一个原因。

3.2 复合涂层的耐磨损性能

图 7 为激光辅助低压冷喷涂 Ni-Cu-CNTs/Cu 复合涂层的摩擦系数随时间变化的曲线。为了对比，对纯铜涂层试样也进行了测试。可以看出，纯铜涂层的

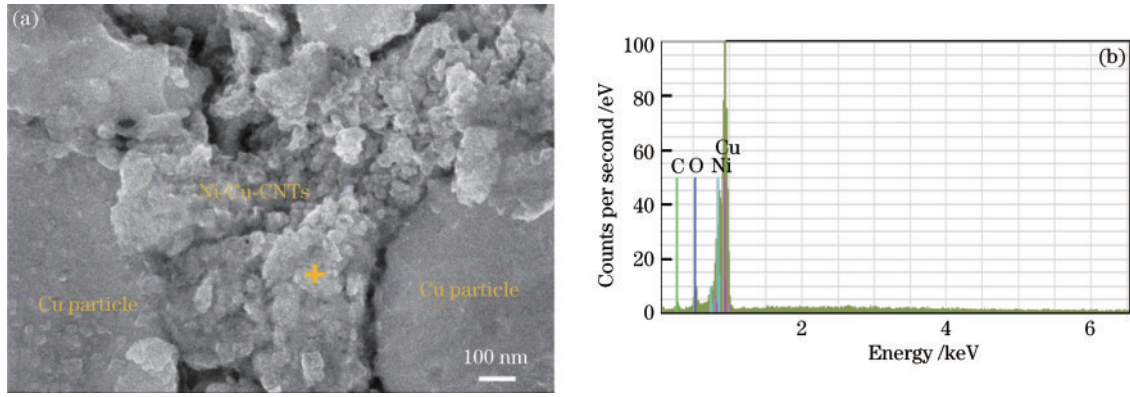


图 6 复合涂层中 Ni-Cu-CNTs 的形貌及元素分析。(a) 显微形貌; (b) EDS 成分分析

Fig. 6 Morphology and elemental analysis of Ni-Cu-CNTs in composite coating. (a) Micromorphology; (b) EDS composition analysis

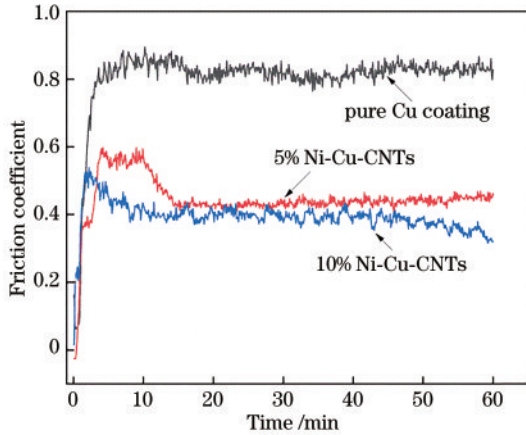


图 7 激光辅助低压冷喷涂 Ni-Cu-CNTs/Cu 复合涂层的摩擦系数

Fig. 7 Friction coefficient of Ni-Cu-CNTs/Cu composite coatings prepared by laser-assisted low pressure cold spray

平均摩擦系数为 0.822, 添加 Ni-Cu-CNTs 的复合涂层平均摩擦系数大幅降低, 样品 1 和样品 2 的平均摩擦系数分别为 0.437 和 0.385。由于 CNTs 具有良好的自润滑性能和力学性能, 添加 CNTs 有助于涂层耐磨性

的提升。在摩擦磨损过程中, 随着摩擦磨损时间的增加, CNTs 从涂层中剥离出来, 逐渐在磨损表面起到自润滑作用, 因此摩擦系数下降。

图 8 为利用激光共聚焦轮廓仪测试的涂层磨痕三维 (3D) 形貌。可以看出, 纯铜涂层的磨痕宽度和深度都较大。相比于纯铜涂层, 添加 Ni-Cu-CNTs 的复合涂层磨痕深度和宽度均有所减小, 且从图 8(c) 可以看出, 当 Ni-Cu-CNTs 含量较高时, 磨痕表面变得光滑, 磨痕两侧的磨屑堆积较少, 表明该复合涂层的耐磨损性能较好。各个涂层的磨痕截面尺寸如图 9(a) 所示, 可以更加直观地对比各涂层的磨损程度。从图 9(a) 可以看出, 纯铜涂层的磨痕尺寸最大, 随着 Ni-Cu-CNTs 增强相的添加, 复合涂层的磨痕尺寸显著减小。根据图 9(a) 的结果可以计算出各个涂层的体积磨损速率, 结果如图 9(b) 所示。从图 9(b) 可以看出, 纯铜涂层的体积磨损速率高达 $12.8 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 当添加质量分数 5% Ni-Cu-CNTs 后, 复合涂层的体积磨损速率降至 $2.59 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 当 Ni-Cu-CNTs 的质量分数进一步增加至 10% 时, 复合涂层的体积磨损速率进一步降至 $1.49 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 这表明 Ni-Cu-CNTs 的添加有利于提升涂层的耐磨损性能。

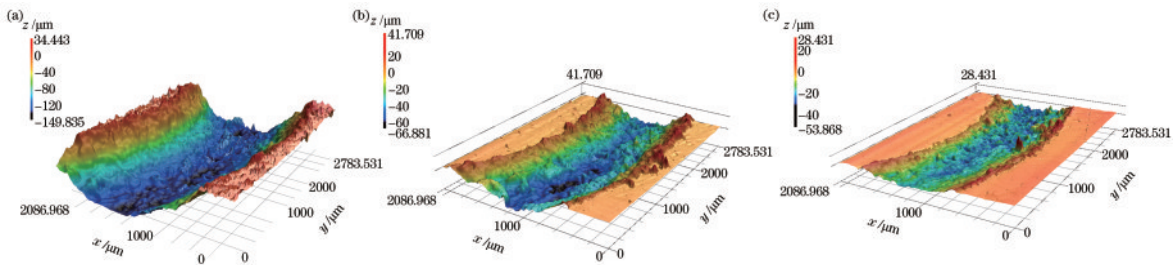


图 8 涂层磨痕的 3D 轮廓。(a) 纯铜涂层; (b) 质量分数 5% Ni-Cu-CNTs; (c) 质量分数 10% Ni-Cu-CNTs

Fig. 8 3D profiles of wear scars. (a) Pure Cu coating; (b) mass fraction of 5% Ni-Cu-CNTs; (c) mass fraction of 10% Ni-Cu-CNTs

3.3 复合涂层的磨损机制

为了进一步探究复合涂层的摩擦磨损机制, 对复合涂层的磨痕进行 SEM 和 EDS 分析, 结果如图 10 所示。从图 10 可以看出: 样品 1 的磨痕表面存在较大的

剥落区, 且可以观察到颗粒状磨屑, 并在磨损过程中形成分层现象, 通过元素分析发现部分区域分布有少量 Ni 元素, 其磨损机制为黏着磨损; 样品 2 的磨痕宽度减小, 耐磨性得到了提升, 这是 Ni 和 CNTs 共同作用产

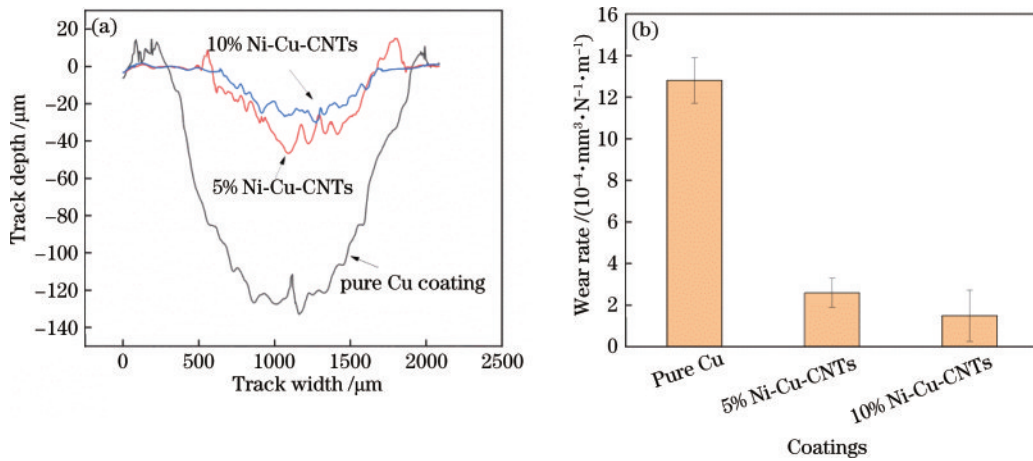


图9 涂层的耐磨损性能。(a)磨痕尺寸;(b)磨损速率

Fig. 9 Abrasion resistance of coating. (a) Track size; (b) wear rate

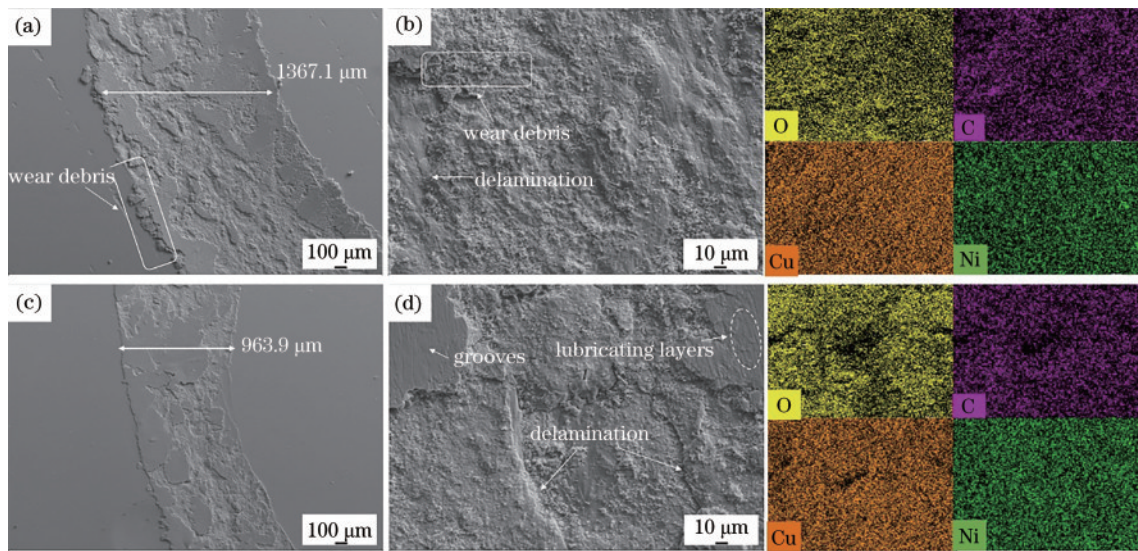


图10 激光辅助低压冷喷涂 Ni-Cu-CNTs/Cu 复合涂层的磨痕形貌及 EDS 元素分析。(a) (b) 质量分数 5% Ni-Cu-CNTs; (c) (d) 质量分数 10% Ni-Cu-CNTs

Fig. 10 Morphology and EDS analysis of wear scar of Ni-Cu-CNTs/Cu composite coatings prepared by laser-assisted low pressure cold spray. (a) (b) Mass fraction of 5% Ni-Cu-CNTs; (c) (d) mass fraction of 10% Ni-Cu-CNTs

生的。由于 CNTs 的自润滑作用,涂层部分位置出现了润滑层,剥落和脱落现象减少,磨损表面变得光滑。对比分析发现,所有涂层的表面均出现了氧元素,这是由于磨球与涂层的连续滑动会产生热量,从而在涂层表面形成氧化层。

添加的 Ni-Cu-CNTs 增强相提升了复合涂层的耐磨损性能,主要原因有两方面:1)CNTs 通过承受磨球对涂层表面的载荷力,减少了涂层磨损;2)随着时间的增加,CNTs 从涂层中脱离到涂层表面形成润滑层,使得涂层磨损率和摩擦系数降低。但添加的 CNTs 较少时,不能有效或完全覆盖磨损表面。当 CNTs 含量提高时,在磨损过程中 CNTs 会均匀分布到磨痕中形成润滑层,减小了涂层的磨损和摩擦系数。许多研究也证实了 CNTs 金属基复合材料在磨损过程中,磨损表面产生的 CNTs 润滑层有助于降低涂层磨损率和摩擦系数^[41-42]。

4 结 论

本文采用激光辅助低压冷喷涂技术制备了 Ni-Cu-CNTs/Cu 复合涂层,并对复合涂层的微观特性和耐磨损性能进行了分析,得到的主要结论如下:

1) 在激光辐照的作用下,Ni-Cu-CNTs 增强相和 Cu 黏结相由于受热软化均发生了明显的塑性变形,Ni-Cu-CNTs 颗粒嵌入到塑性变形的 Cu 颗粒中形成连续致密且结合良好的复合涂层,复合涂层的厚度可达 2609 μm,CNTs 弥散均匀分布在复合涂层中且保持其结构的完整性。

2) 添加 Ni-Cu-CNTs 的复合涂层表现出优异的耐磨损性能,平均摩擦系数可从纯铜涂层的 0.822 降低至 0.385,体积磨损速率可从纯铜涂层的 $12.8 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 降至 $1.49 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。

3) Ni-Cu-CNTs 增强相对复合涂层耐磨损性能提升的机制主要有两个方面,一是 Ni-Cu-CNTs 通过承受磨球对涂层表面的载荷力,减轻了涂层的磨损程度,二是随着磨损过程的进行, Ni-Cu-CNTs 从涂层中脱离到涂层表面形成润滑层,降低了涂层的摩擦系数,从而提升了复合涂层的耐磨损性能。

参 考 文 献

- [1] 钱刚, 凤仪, 张学斌, 等. 铜基自润滑电接触复合材料研究综述[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 7-12, 27.
Qian G, Feng Y, Zhang X B, et al. Review on research of Cu-based self-lubricating electrical contact composites [J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 7-12, 27.
- [2] 韩昌松, 郭铁明, 南雪丽, 等. 铜基复合材料的研究新进展[J]. 材料导报, 2012, 26(19): 90-94.
Han C S, Guo T M, Nan X L, et al. New research progress in Cu-based composites[J]. Materials Review, 2012, 26(19): 90-94.
- [3] 谢鲲, 张惠, 张守清. 稀土氧化物弥散强化铜基复合材料的制备技术[J]. 热加工工艺, 2016, 45(10): 25-29.
Xie K, Zhang H, Zhang S Q. Manufacture technology of rare earth oxides dispersion strengthened Cu-based composite [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(10): 25-29.
- [4] Lungu M V, Barbu A. Graphene and its derivative reinforced tungsten-copper composites for electrical contact applications: a review[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2022, 41(15/16): 624-636.
- [5] 陶静梅, 洪鹏, 陈小丰, 等. 碳纳米管增强铜基复合材料的研究进展[J]. 材料工程, 2017, 45(4): 128-136.
Tao J M, Hong P, Chen X F, et al. Research progress on carbon nanotubes reinforced Cu-matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(4): 128-136.
- [6] Liu W X, Jiang X S, Shao Z Y, et al. A review on nanocarbon-reinforced Cu-matrix nanocomposites with high mechanical strengths[J]. Current Nanoscience, 2017, 13(4): 410-420.
- [7] 易健宏, 鲍瑞, 李才巨, 等. 碳纳米管增强 Cu 和 Al 基复合材料的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(5): 1209-1219.
Yi J H, Bao R, Li C J, et al. Research progress of CNTs reinforced Cu/Al matrix composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(5): 1209-1219.
- [8] Sun W, Chu X, Lan H M, et al. Current implementation status of cold spray technology: a short review[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(4): 848-865.
- [9] 杨景文, 李文亚, 邢词皓, 等. 冷喷涂铜涂层研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 58-70, 85.
Yang J W, Li W Y, Xing C H, et al. Research progress in cold spraying of copper coating[J]. Materials Protection, 2022, 55(1): 58-70, 85.
- [10] Liao T Y, Biesiekieski A, Berndt C C, et al. Multifunctional cold spray coatings for biological and biomedical applications: a review[J]. Progress in Surface Science, 2022, 97(2): 100654.
- [11] Kwon S H, Park D Y, Lee D Y, et al. A study on the microstructure and physical properties of cold sprayed Cu/CNT composite coating[J]. Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, 2008, 46(3): 182-188.
- [12] Cho S, Takagi K, Kwon H, et al. Multi-walled carbon nanotube-reinforced copper nanocomposite coating fabricated by low-pressure cold spray process[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(16): 3488-3494.
- [13] Pialago E J T, Kwon O K, Kim M S, et al. Ternary Cu-CNT-AlN composite coatings consolidated by cold spray deposition of mechanically alloyed powders[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 199-209.
- [14] Pialago E J T, Kwon O K, Park C W, et al. Cold spray deposition of mechanically alloyed ternary Cu-CNT-SiC composite powders[J]. Ceramics International, 2015, 41(5): 6764-6775.
- [15] Choi J, Okimura N, Yanada T, et al. Deposition of graphene-copper composite film by cold spray from particles with graphene grown on copper particles[J]. Diamond and Related Materials, 2021, 116: 108384.
- [16] Chen W Y, Yu Y, Cheng J, et al. Microstructure, mechanical properties and dry sliding wear behavior of Cu-Al₂O₃-graphite solid-lubricating coatings deposited by low-pressure cold spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2018, 27(8): 1652-1663.
- [17] Yin S, Xie Y C, Cizek J, et al. Advanced diamond-reinforced metal matrix composites via cold spray: properties and deposition mechanism[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 113: 44-54.
- [18] Aldwell B, Yin S, McDonnell K A, et al. A novel method for metal-diamond composite coating deposition with cold spray and formation mechanism[J]. Scripta Materialia, 2016, 115: 10-13.
- [19] 杨理京, 付树仁, 王少鹏, 等. 不同载气温度条件下低压冷喷涂 Al-Al₂O₃ 复合涂层的沉积特性[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 71-77, 127.
Yang L J, Fu S R, Wang S P, et al. Deposition characteristics of Al-Al₂O₃ composite coating prepared by low pressure cold spraying at different carrier gas temperatures[J]. Materials Protection, 2022, 55(1): 71-77, 127.
- [20] Li W B, Wu H J, Verdy C, et al. Study of low-pressure cold spray additive manufacturing: investigation of kinematic spray parameters on deposition and properties[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2022: 0260.
- [21] Moreno-Murguía B, Mora-García A G, Canales-Siller H, et al. Influence of stand-off distance and pressure in copper coatings deposition efficiency and particle velocity [J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 430: 127986.
- [22] Zarazua-Villalobos L, Mary N, Bernard C, et al. Improved deposition efficiency of low-pressure cold-sprayed tin coating through powder recycling[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(8): 2577-2593.
- [23] Jibrán W, Hogan J, McDonald A. Towards optimization of thickness, hardness, and porosity of low-pressure cold sprayed WC-Ni coatings[J]. The International Journal of

- Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(7): 2149-2160.
- [24] Mohankumar A, Duraisamy T, Sampathkumar D, et al. Optimization of cold spray process inputs to minimize porosity and maximize hardness of metal matrix composite coatings on AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Nanomaterials, 2022, 2022: 7900150.
- [25] Zhang Z C, Liu Z Q, Ge H, et al. The fabrication of porous metal-bonded diamond coatings based on low-pressure cold spraying and Ni-Al diffusion-reaction[J]. Materials, 2022, 15(6): 2234.
- [26] 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.
- [27] Li W Y, Cao C C, Wang G Q, et al. 'Cold spray +' as a new hybrid additive manufacturing technology: a literature review[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2019, 24(6): 1-26.
- [28] 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.
- [29] 姚建华, 吴丽娟, 李波, 等. 超音速激光沉积技术: 研究现状及发展趋势[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0300001.
- Yao J H, Wu L J, Li B, et al. Research states and development tendency of supersonic laser deposition technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0300001.
- [30] Zhang C, Zhang D B, Luo C, et al. Nanosecond-pulse laser assisted cold spraying of Al-Cu aluminum alloy[J]. Coatings, 2021, 11(3): 267.
- [31] Barton D J, Bhattiprolu V S, Hornbuckle B C, et al. Residual stress generation in laser-assisted cold spray deposition of oxide dispersion strengthened Fe91Ni8Zr1 [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2020, 29(6): 1550-1563.
- [32] Nikbakht R, Cojocar C V, Aghasibeig M, et al. Cold spray and laser-assisted cold spray of CrMnCoFeNi high entropy alloy using nitrogen as the propelling gas[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2022, 31(4): 1129-1142.
- [33] 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: 26-35.
- [34] Yao J H, Li Z H, Li B, et al. Characteristics and bonding behavior of Stellite 6 alloy coating processed with supersonic laser deposition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 661: 526-534.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 蒋超伟, 刘博, 张耘溢, 等. 激光辅助低压冷喷涂 CNTs/Cu 复合涂层工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0724001.
- Jiang C W, Liu B, Zhang Y Y, et al. Process optimization of CNTs/Cu composite coating prepared by laser-assisted low pressure cold spraying[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0724001.
- [38] 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损性能[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.
- [39] Assadi H, Gärtner F, Stoltenhoff T, et al. Bonding mechanism in cold gas spraying[J]. Acta Materialia, 2003, 51(15): 4379-4394.
- [40] Yu M, Li W Y, Wang F F, et al. Effect of particle and substrate preheating on particle deformation behavior in cold spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 220: 174-178.
- [41] Akbarpour M R, Alipour S, Farvizi M, et al. Mechanical, tribological and electrical properties of Cu-CNT composites fabricated by flake powder metallurgy method[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, 19(3): 694-706.
- [42] Chen B B, Yang J, Zhang Q, et al. Tribological properties of copper-based composites with copper coated NbSe₂ and CNT[J]. Materials & Design, 2015, 75: 24-31.