



## 激光辅助低压冷喷涂Cu涂层 微观结构及导热性能

张城锋<sup>1,2,3</sup>, 邱方苗<sup>1,2,3</sup>, 李波<sup>1,2,3,4</sup>, 张群莉<sup>1,2,3</sup>, 弗拉基米尔·科瓦连科<sup>1,2,3</sup>, 姚建华<sup>1,2,3</sup>

1. 浙江工业大学 激光先进制造研究院, 杭州 310023;
2. 高端激光制造装备省部共建协同创新中心, 杭州 310023;
3. 浙江工业大学 机械工程学院, 杭州 310023;
4. 江苏亚威机床股份有限公司, 扬州 225200)

**摘要:** 针对Cu材料修复需求, 采用激光辅助低压冷喷涂技术(Low pressure cold spray, LPCS)在铜基体表面制备Cu涂层, 研究了不同激光辐照功率对LPCS-Cu涂层微观结构及性能的影响。结果表明: LPCS-Cu涂层的孔隙率为1.23%, 平均显微硬度为124.0 HV<sub>0.2</sub>, 热导率为66.2 W/(m·K), 涂层/基体界面结合处存在明显缝隙。随着激光辐照功率的增大, LPCS-Cu涂层的表面趋于平整, 孔隙率最低可达0.3%, 平均显微硬度可达143.4 HV<sub>0.2</sub>, 热导率可达170.2 W/(m·K), 且涂层与基体界面结合良好, 无明显缝隙。这是由于激光辐照提高了沉积颗粒和基体的塑性变形能力, 促进了沉积颗粒之间以及沉积颗粒与基体之间的相互结合, 使涂层具有较好的致密性和界面结合, 表现出较优的导热性能。

**关键词:** 冷喷涂; 激光辐照; 微观结构; 显微硬度; 导热性能

文章编号: 1004-0609(2022)-12-3706-12

中图分类号: TN249; TG146.1

文献标志码: A

**引文格式:** 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]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3706-3717. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42523

ZHANG Cheng-feng, QIU Fang-miao, LI Bo, et al. Microstructure and thermal conductivity of laser-assisted low-pressure cold sprayed Cu coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3706-3717. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42523

Cu及其合金因具有优良的电导率、热导率以及延展性等优点, 在电子封装、航空航天、军事工业等领域得到了广泛应用。但由于Cu材料耐磨性较差, 常会因为表面磨损而失效。因此, 针对失效Cu部件进行修复再制造是一种经济有效的绿色制造方式, 符合当前国家“碳达峰和碳中和”长远目标对制造业的要求。

Cu材料由于具有高导热性以及激光的高反

射性, 采用激光熔覆技术修复Cu部件时会存在能耗大、效率低、冶金缺陷多等问题<sup>[1-2]</sup>; 此外, Cu是一种氧化敏感的材料, 在高热输入的修复技术(如激光熔覆、堆焊、热喷涂等)中容易出现氧化相变的问题<sup>[3-4]</sup>。冷喷涂(Cold spray, CS)是一种基于材料塑性变形实现沉积的表面修复及增材制造技术<sup>[5-6]</sup>, 其低热输入及塑性沉积的特征在制备Cu材料涂层方面具有显著优势<sup>[7-9]</sup>。其中, 低压冷喷涂

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52075495); 中国博士后科学基金特别资助(2020T130263); 浙江省属高校基本科研业务费(RF-A2020009); 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划(2021R403066)

**收稿日期:** 2021-10-11; **修订日期:** 2021-12-09

**通信作者:** 李波, 副研究员, 博士; 电话: 15088688625; E-mail: libo1011@zjut.edu.cn

(Low pressure cold spray, LPCS)由于具有设备轻巧且操作方便的优点,在Cu、Ni、Al、Zn等材料的野外保养和现场修复方面备受青睐<sup>[10-12]</sup>。KOIVULUOTO等<sup>[13]</sup>利用LPCS在钢基体上以0.6 MPa的载气制备Cu涂层,但涂层孔隙率较高且界面结合较差;冯力等<sup>[14]</sup>利用LPCS在铜基体上以0.6~0.8 MPa的载气压力制备Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合涂层,虽然所制备的涂层孔隙率及界面结合有所改善,但由于引入了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷相,影响了涂层的导热导电性能;徐玲玲等<sup>[15]</sup>采用LPCS在铝合金上以1.45 MPa的载气压力制备Cu涂层,由于涂层中存在较多的孔隙,其导热能力与块体Cu有较大差距。由此可以看出,低压CS由于载气压力较低的原因,所制备的Cu涂层会存在致密性差和结合力弱的问题,影响涂层的使用性能。因此,LPCS涂层通常会采用后续热处理以改善涂层质量和性能<sup>[16]</sup>,但这无疑增加了工艺的复杂性。

近些年,将激光辐照与CS同步耦合的超音速激光沉积(Supersonic laser deposition)或激光辅助冷喷涂(Laser-assisted cold spray)引起了广泛关注<sup>[17-18]</sup>。由于激光的加热软化效应,使沉积材料的塑性变形能力提升,临界沉积速度降低,从而可提高涂层沉积效率、致密性以及界面结合等<sup>[19-21]</sup>。因此,基于目前LPCS存在的问题,考虑到激光辐照对CS粉末沉积的有益效果,本文作者拟将激光辐照与LPCS进行同步耦合,通过激光的辅助作用,改善LPCS制备Cu涂层(LPCS-Cu)的微观结构及性能。为了系统研究激光辐照对涂层微观结构及性能的影响,在保持LPCS工艺参数不变的情况下,通过改变激光辐照功率来制备不同的涂层,然后对涂层的表面形貌、截面形貌、致密性、界面结合等微观特性以及导热性能进行分析。本文的研究成果有望为LPCS在Cu材料部件的现场修复方面提供理论指导和方法支撑。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

沉积粉末材料为电解Cu粉,其显微形貌如图1所示。由图1可以看出,Cu粉呈不规则的枝晶状。

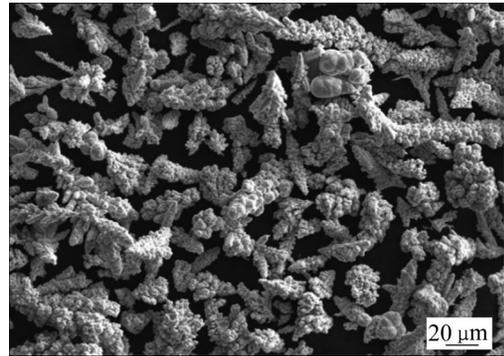


图1 原始Cu粉的显微形貌

Fig. 1 Morphology of feedstock Cu powder

在CS过程中,不规则粉末较球形粉末更易被加速。试验前将Cu粉置于真空干燥箱中在100℃的温度下烘干1h。基体材料为T1紫铜,尺寸为100mm×50mm×5mm,试验前先进行喷砂处理,再用无水乙醇清洗基体表面去除油污等杂质。

### 1.2 涂层制备

涂层制备所采用的激光辅助LPCS系统主要包括光纤耦合半导体激光器(Laserline)、冷喷涂设备(Dymet 423)、低压气源供应装置以及机械手臂(STÄUBLI),其示意图如图2所示。工作载气(N<sub>2</sub>)经过加热器加热后进入拉瓦尔喷嘴,送粉器将微米Cu颗粒送入到Laval喷嘴与加热后的工作载气进行混合,气固两相流被加速到一定速度后喷射到经高能激光束同步加热的基体表面区域,经过剧烈塑性变形形成涂层。本试验在前期优化的LPCS工艺参数(包括载气压力、载气预热温度、喷涂距离、扫描速度、送粉速率等)的基础上,仅调变激光辐照功率制备不同的涂层,具体工艺参数如表1所列。

### 1.3 涂层结构与性能表征

采用奥林巴斯OLS5000 3D测量激光显微镜观察涂层的表面形貌,采用德国ZeissAXIOScope.A1型光学显微镜观察涂层表面区域的组织形貌;采用德国ZeissEV018型扫描电镜电子显微镜(SEM)观察涂层截面形貌以及涂层/基体的界面结合情况;采用HMV-G-FA型自动维氏硬度计测试涂层的显微硬度,所用载荷为1.92N,加载时间为15s,每个试样测试点测三次,取其平均值为最终结果;利用

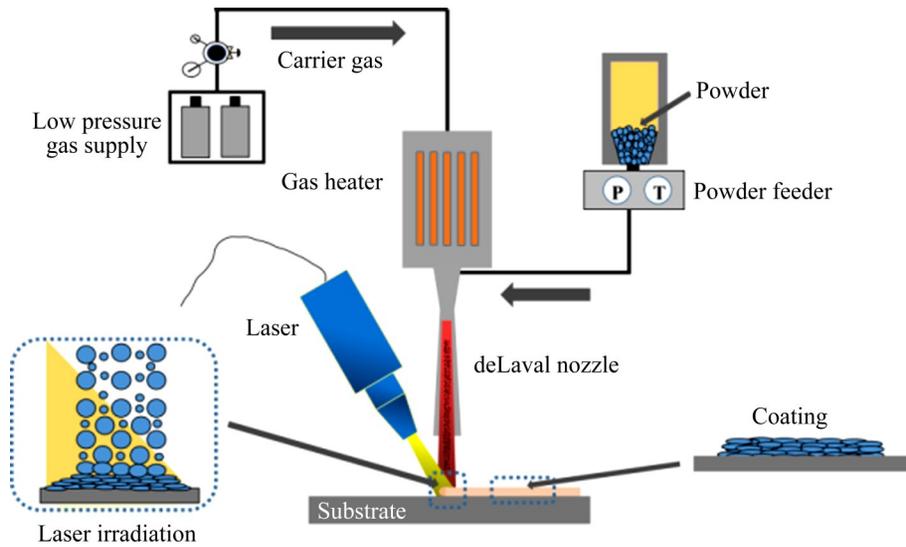


图2 激光辅助低压冷喷涂系统示意图

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

表1 激光辅助低压冷喷涂Cu涂层工艺参数

Table 1 Process parameters of laser-assisted low-pressure cold sprayed Cu coating

Sample No.	Gas pressure/MPa	Gas temperature/°C	Laser irradiation power/W	Standoff distance/mm	Scanning velocity/(mm·s <sup>-1</sup> )	Powder feeding rate/(g·min <sup>-1</sup> )
1	0.8	400	0	15	10	20
2	0.8	400	400	15	10	20
3	0.8	400	500	15	10	20
4	0.8	400	600	15	10	20
5	0.8	400	700	15	10	20

图像分析软件 Image J 测定涂层的孔隙率；采用 LFA467-激光导热仪按闪光法测量涂层热导率，测试温度为常温。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层表面形貌

图3(a)所示为LPCS-Cu涂层的表面三维轮廓图。从图3(a)中可以看出，涂层表面起伏较为明显。为了定量地分析激光辐照对LPCS-Cu涂层表面形貌的影响，采用共聚焦三维轮廓仪对不同激光功率辅助的LPCS-Cu涂层表面起伏情况进行测试。涂层表面粗糙度测试结果见图3(b)。从图3(b)可以看出，LPCS-Cu涂层的表面起伏最为明显，表面粗糙度达39.484 μm；当激光辐照功率为400 W时，

涂层表面的起伏程度有所降低，粗糙度降至28.413 μm；随着激光辐照功率进一步增加，涂层表面的起伏程度也进一步降低，当激光辐照功率为700 W时，涂层表面起伏程度最低，粗糙度降至18.299 μm，较LPCS-Cu涂层降低了50%。图3表明，激光辐照能改善LPCS-Cu涂层的表面平整度。DANLOS等<sup>[22]</sup>在研究激光烧蚀/加热对CS涂层表面形貌的影响时也发现类似的规律，即激光加热能降低CS涂层的表面粗糙度。涂层表面粗糙度的降低将减少后续的机加工量，这对利用LPCS技术实现Cu材料的表面修复再制造具有积极作用。

图4所示为不同激光辐照功率辅助下的LPCS-Cu涂层顶部的微观结构。从图4(a)可以看出，LPCS-Cu涂层顶部较为疏松，具有较多的孔隙。而当有激光辐照时，涂层顶部则变得较为致密，如图

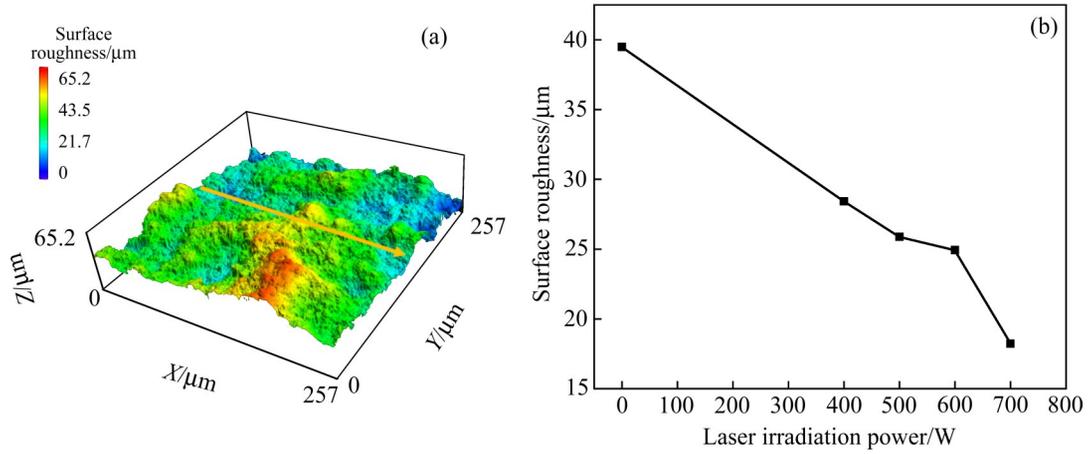


图3 LPCS-Cu涂层表面三维轮廓及不同激光辐照功率辅助的LPCS-Cu涂层表面粗糙度

Fig. 3 3D surface contour of LPCS-Cu coating (a) and surface roughness of LPCS-Cu coatings assisted with different laser irradiation powers (b)

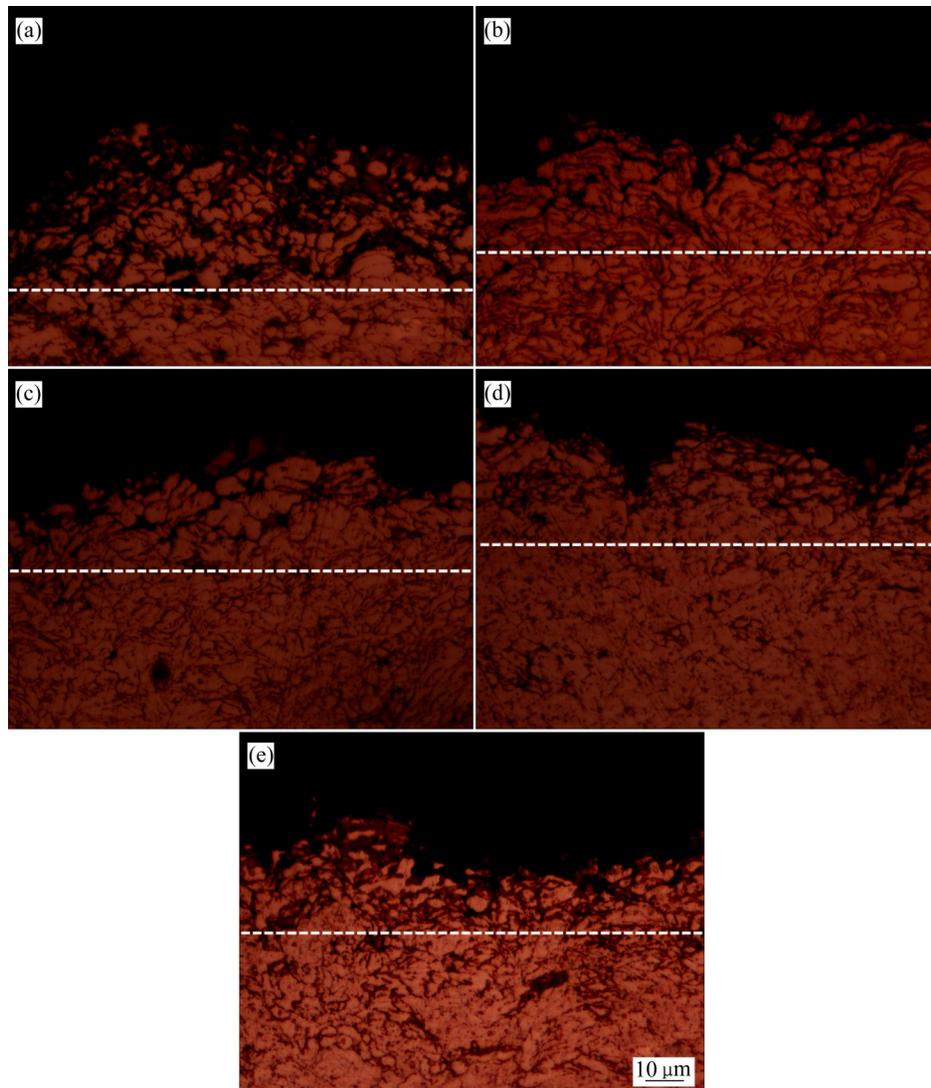


图4 不同激光辐照功率辅助的LPCS-Cu涂层顶部形貌

Fig. 4 Morphologies of top layers of LPCS-Cu coatings assisted with different laser irradiation powers: (a) 0 W; (b) 400 W; (c) 500 W; (d) 600 W; (e) 700 W

4(b)~(e)所示。此外,从图(4)中可以发现,所有涂层的内部(见图4中虚线以下部分)较顶部更为致密。这是因为在CS过程中,后续高速沉积的颗粒对已沉积颗粒具有夯实的作用,因此涂层内部较为致密;而涂层顶部的颗粒由于没有后续颗粒的夯实作用,与涂层内部相比,则表现出较为疏松的微观结构。当有激光辐照时,虽然没有后续颗粒的夯实作用,但由于激光加热软化的效应,颗粒变形能力加强,在沉积过程中更易变形,因此与未加激光辐照的涂层相比,其顶部较为致密,这是导致图(3)中不同涂层表面起伏差异的原因之一。

## 2.2 涂层截面形貌

为了观察不同激光辐照功率辅助的LPCS-Cu涂层的微观结构,在2000倍和5000倍的扫描电镜倍数下对涂层的截面形貌进行了观察,结果如图5所示。从图5中可以看出,未加激光辅助的LPCS-Cu涂层中有较多的孔隙,如图5(a1)~(a2)所示。当激光辐照功率为400 W时,虽然在涂层中仍然还能观察到孔隙,但相较于未加激光辅助的涂层,孔隙数量有所减少,如图5(b1)~(b2)所示。随着激光辐照功率的继续增加,涂层中的孔隙明显减少。此外,从高倍SEM电镜照片可以看出,所有涂层均是由塑性变形的Cu颗粒相互结合所组成,特别是激光辐照功率为700 W时,涂层中有较多塑性变形严重的细长Cu颗粒(如图5(e2)所示),这与激光对颗粒加热软化从而增强其塑性变形能力有关。

为了定量地分析激光辐照对LPCS-Cu涂层致密性的影响,采用Image J图像处理软件对不同涂层的孔隙率进行了测量。每个涂层样品任意选取3个位置进行分析,计算孔隙面积占整个选取面积的百分比,取三个位置的平均值作为涂层中孔隙率的衡量标准,结果如图6所示。可以看出,LPCS-Cu涂层的孔隙率为1.4%,当激光辐照功率为400 W时,涂层孔隙率降至0.9%,随着激光辐照功率的继续增加,涂层孔隙率进一步降至0.2%左右。激光辐照功率为700 W时,所制备Cu涂层的孔隙率仅为LPCS-Cu涂层的1/7左右。SOMMITSCH等<sup>[23]</sup>和ZHANG等<sup>[24]</sup>在激光辅助冷喷涂制备Al及Al合金材料涂层时也发现了类似的现象,即激光辐照可以提高涂层的致密性。这是因为激光辐照可软化喷

涂颗粒,增强其塑性变形能力,在沉积过程中,颗粒可充分变形且更易被后续沉积颗粒夯实,因此相互之间结合更紧密。

## 2.3 涂层/基体界面结合

图7所示为不同激光辐照功率辅助的LPCS-Cu涂层与基体的界面结合情况。从图7(a)和(b)可以看出,无激光辐照或较低激光辐照功率(400 W)下制备的涂层与基体之间存在明显的缝隙,表明界面结合较差。随着激光辐照功率的增加,涂层与基体之间的缝隙明显缩小,结合趋于紧密,表明激光辐照可以改善LPCS-Cu涂层与基体之间的结合强度。YIN等<sup>[25]</sup>利用有限元方法数值模拟了喷涂颗粒软化对其沉积行为的影响,结果显示提高喷涂颗粒的初始温度能使其更易发生塑性形变,形成金属射流,从而可有效沉积到基体表面;FUKUMOTO等<sup>[26]</sup>研究发现提高基体的表面温度可促进Cu颗粒与基体有效结合,从而提高沉积效率;YU等<sup>[27]</sup>对仅预热喷涂颗粒、仅预热基体以及同时预热喷涂颗粒和基体三种不同的预热方式进行了数值模拟,结果表明同时预热喷涂颗粒和基体可增加二者的有效接触面积,表现出一种协同变形行为,有利于颗粒与基体之间的界面结合。在激光辅助LPCS过程中,由于耦合了激光辐照,可同时对喷涂颗粒和基体进行加热软化(如图2所示)。根据前述其他学者的试验及模拟结果可知,对喷涂颗粒和(或)基体进行预热,有利于提高涂层与基体的界面结合。因此,随着激光辐照功率的提高,LPCS-Cu涂层与基体之间的界面结合越好,如图7所示。

## 2.4 涂层显微硬度

图8所示为不同激光辐照功率辅助的LPCS-Cu涂层的显微硬度测试结果,从涂层顶部往基体方向逐点测试,相邻测试点之间的间隔为0.1 mm。由图8可以看出,基体的平均显微硬度为107.2 HV<sub>0.2</sub>。在涂层与基体的界面结合处,激光辐照功率为0 W与400 W的涂层平均显微硬度分别为58.3 HV<sub>0.2</sub>和81.0 HV<sub>0.2</sub>,而激光辐照功率为500 W、600 W和700 W的涂层平均显微硬度分别为105.1 HV<sub>0.2</sub>、100.5 HV<sub>0.2</sub>和106.9 HV<sub>0.2</sub>。这与图7中不同涂层的界面结合情况相关,无激光辐照或者激光辐照功率较低(400 W)时,涂层与基体的界面结

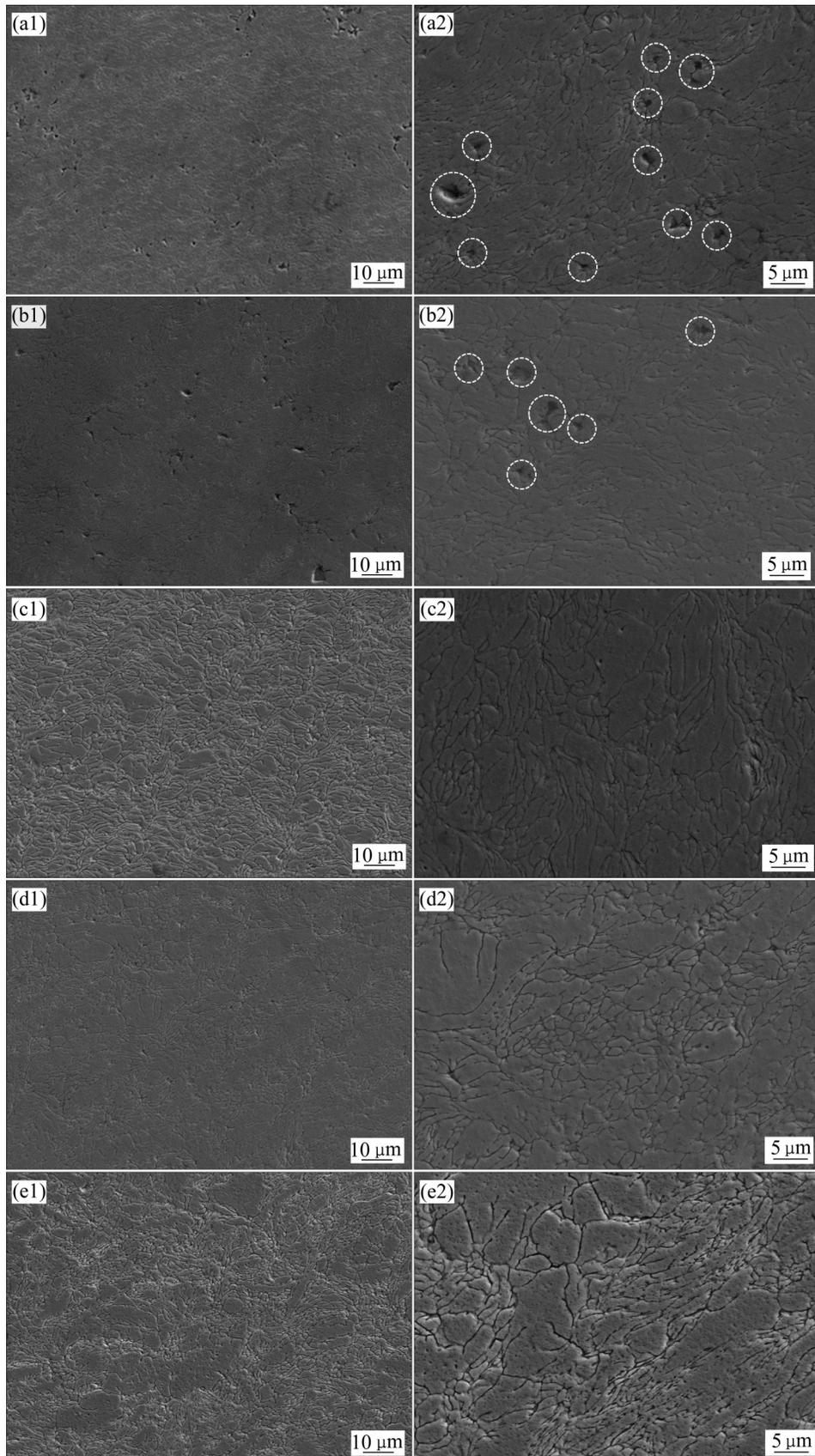


图 5 不同激光辐照功率辅助的 LPCS-Cu 涂层截面形貌

Fig. 5 Cross-sectional morphologies of LPCS-Cu coatings assisted at different laser irradiation powers: (a1), (a2) 0 W; (b1), (b2) 400 W; (c1), (c2) 500 W; (d1), (d2) 600 W; (e1), (e2) 700 W

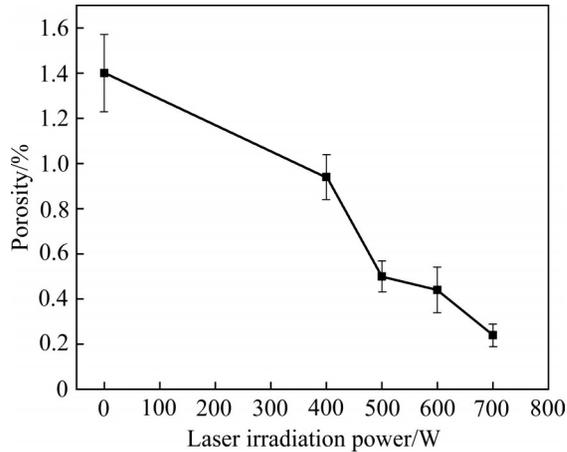


图6 不同激光辐照功率辅助的LPCS-Cu涂层孔隙率  
Fig. 6 Porosity of LPCS-Cu coatings assisted with different laser irradiation powers

合处存在较大的缝隙, 这会导致显微硬度测试值偏低, 随着激光辐照功率的增加, 涂层与基体界面结合趋于紧密, 显微硬度测试值与基体保持一致。激光辐照功率为0 W、400 W、500 W、600 W和700 W的涂层平均显微硬度分别为124.0 HV<sub>0.2</sub>、129.4 HV<sub>0.2</sub>、135.4 HV<sub>0.2</sub>、138.7 HV<sub>0.2</sub>和143.4 HV<sub>0.2</sub>, 均高于基体的显微硬度, 且随着激光辐照功率的增大, 涂层硬度呈现增大趋势。产生这个现象的原因有两个方面: 一方面是因为在CS过程中, 喷涂颗粒是通过高速撞击产生塑性变形实现沉积的, 在此过程中, 会存在加工硬化的效应<sup>[28]</sup>, 因此涂层硬度较基体硬度有所提高; 另一方面随着激光辐照功率的增加, 喷涂颗粒受热软化效应增强, 塑性变形能力增加, 在沉积过程变形更充分, 加工硬

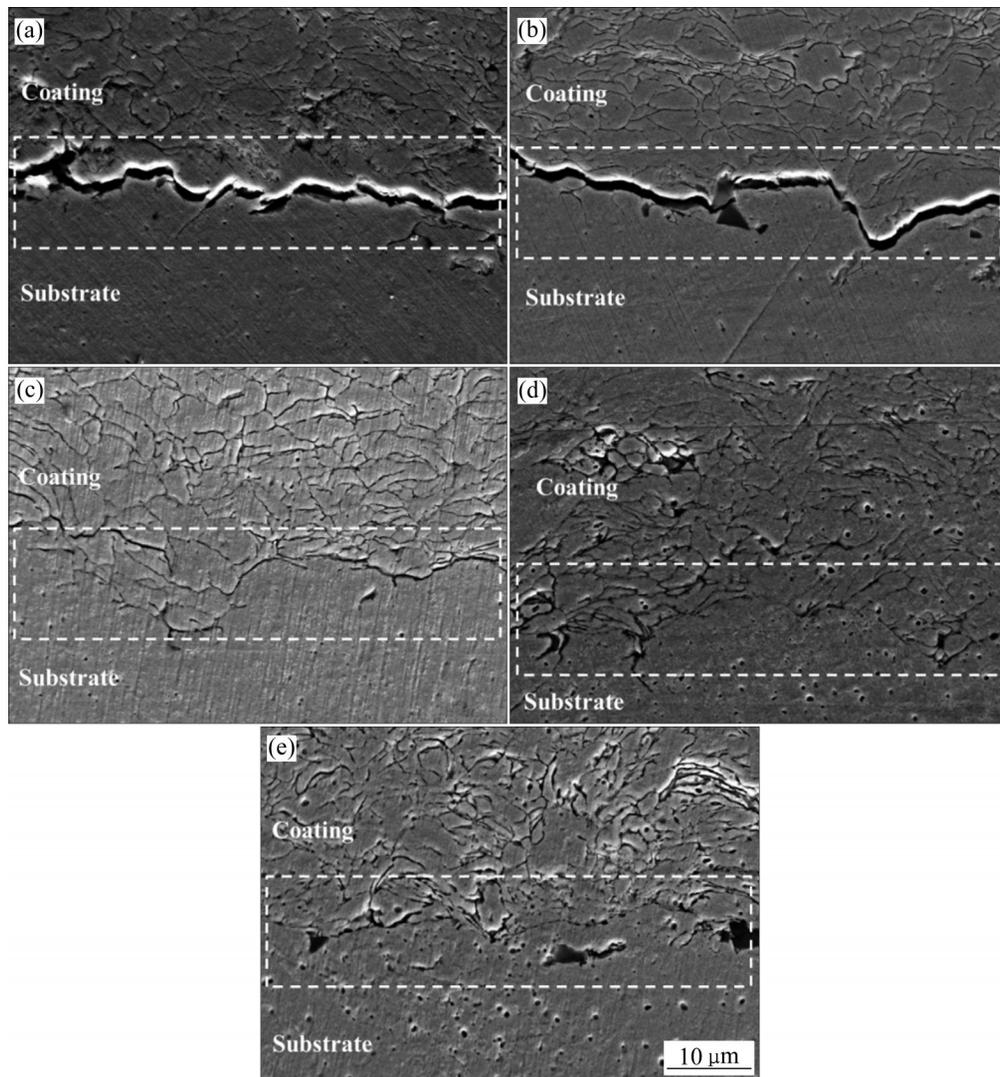


图7 不同激光辐照功率辅助的LPCS-Cu涂层/基体界面结合  
Fig. 7 Coating/substrate interfacial bonding of LPCS-Cu coatings assisted at different laser irradiation powers: (a) 0 W; (b) 400 W; (c) 500 W; (d) 600 W; (e) 700 W

化效应更显著,从而导致涂层的显微硬度随着激光辐照功率的增加而提高。此外,从图6中可知,涂层的孔隙率随着激光辐照功率的增加而降低,涂层致密性的提升可减少孔隙对硬度测试结果的影响,这也是导致涂层显微硬度测试值较高的另一个原因。

值得注意的是,靠近涂层顶部区域的显微硬度(见图8中椭圆标示)低于涂层内部区域的显微硬度,且激光辐照涂层顶部的显微硬度高于无激光辐照涂层顶部的显微硬度。产生这个现象的主要原因是涂层顶部处于喷涂过程的结束阶段,无后续沉积颗粒的夯实作用,加工硬化效果较涂层内部区域减弱,因此其显微硬度低于涂层内部区域。当有激光辐照时,虽然涂层顶部的沉积颗粒同样没有后续颗粒的夯实作用,但与未受热软化的颗粒相比更易变形,颗粒之间的结合更为致密(见图5),因此,其显微硬度高于无激光辐照涂层。

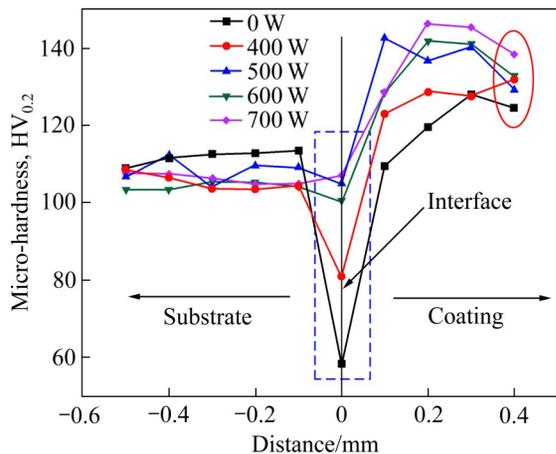


图8 激光辅助LPCS-Cu涂层显微硬度曲线

Fig. 8 Micro-hardness curves of laser-assisted LPCS-Cu coatings

## 2.5 涂层的导热性能

为了测试LPCS-Cu涂层的导热性能,先采用如图9(a)所示的取样方法线切割不同激光辐照功率制备的涂层热导率测试样(见图9(b)),然后利用激光导热分析仪在室温条件下测试涂层的热导率,测试结果如图10所示。从图10中可以看出,无激光辐照的涂层热导率为66.2 W/(m·K),随着激光辐照功率的增加,涂层热导率逐渐升高。当激光辐照功率为700 W时,涂层的热导率升至170.2 W/(m·K)。

CAO等<sup>[29]</sup>采用高压冷喷涂(High pressure cold spray, HPCS)在2.5 MPa、600 °C的载气条件下制备了Cu涂层,测得其热导率为190.51 W/(m·K),略高于本文中700 W激光辐照功率辅助的LPCS-Cu涂层的热导率。由此可以看出,通过激光辐照的辅助,即便采用LPCS制备Cu涂层,也能获得与HPCS-Cu涂层相当的热导率,说明激光辐照能大幅改善LPCS-Cu涂层的热导率。

热传导本质上为材料内部微小粒子碰撞所导致的能量转移。就金属材料而言,主要通过其内大量自由移动电子实现热量的传导。材料内部的界面会极大地阻碍自由电子的移动,进而会影响导热性能<sup>[30]</sup>。材料内部界面越少,则自由电子移动越为顺畅,其热导率就高,反之则低。此外,因为空气是不良导热体,若材料内部存在孔隙时,孔隙内的空气也会对材料的导热性能产生负面影响<sup>[31]</sup>,涂层的热导率与涂层致密性的经验关系如式(1)所示<sup>[32]</sup>:

$$k = \alpha c_p \rho \quad (1)$$

式中: $k$ 为涂层材料的热导率; $\alpha$ 为涂层材料的热扩散系数; $c_p$ 为涂层材料的定压比热容; $\rho$ 为涂层的致密性。由式(1)可知,对于给定的涂层材料,涂层致密性越高(孔隙率越低),其热导率越高。

由图10还可以看出,LPCS-Cu涂层的热导率最差,其原因有两个方面:一方面是因为LPCS是基于微米级颗粒的塑性变形实现沉积的,涂层内部的微米颗粒之间存在较多的界面,界面热阻会降低涂层的导热性能;另一个方面,由于LPCS的载气压力和预热温度相对较低,沉积颗粒的塑性变形程度有限,颗粒之间的界面结合不良,涂层致密性较差,内部存在较多的孔隙(如图5(a2)所示),而由式(1)可知,孔隙的存在对涂层的热导率将产生不利影响。当有激光辐照辅助时,虽然涂层内部依然存在较多的颗粒界面,但由于沉积颗粒受热软化的作用,其塑性变形能力增加,沉积颗粒之间的界面结合得到改善,涂层孔隙率下降(如图5(e2)所示),而由式(1)可知,涂层致密性的提升有利于提高涂层的热导率。CAO等<sup>[29]</sup>在研究退火热处理对CS-Cu涂层热导率的影响时发现再结晶可提升涂层的热导率。LI等<sup>[33]</sup>发现激光辐照对CS-Cu涂层具有退火的效果。因此,可以推测,在较高的激光辐照功率

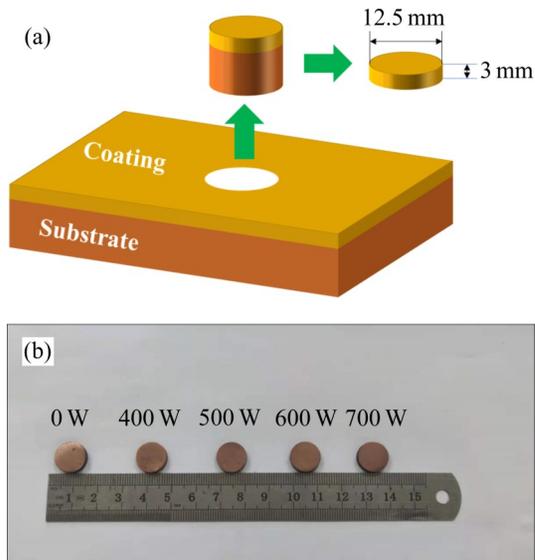


图9 激光辅助LPCS-Cu涂层热导率测试取样示意图及测试样实物图

Fig. 9 Schematic diagrams of sampling (a) and sample photos (b) for thermal conductivity testing of laser-assisted LPCS-Cu coatings

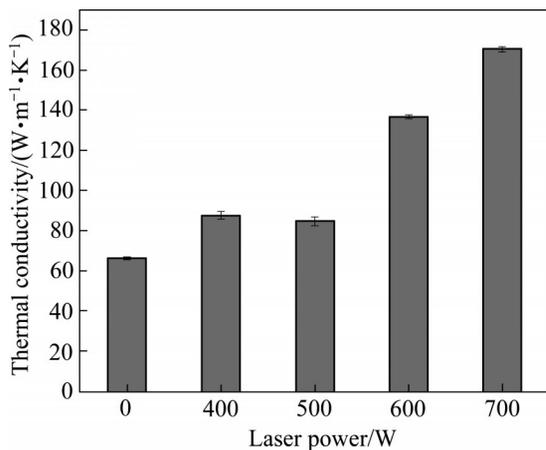


图10 激光辅助LPCS-Cu涂层的热导率

Fig. 10 Thermal conductivity of laser-assisted LPCS-Cu coatings

下, 涂层内部塑性变形较为严重的颗粒在热驱动力的作用下可发生再结晶, 再结晶可消除部分变形颗粒之间的界面, 从而削弱了界面热阻对涂层热导率的影响, 这也是激光辅助LPCS-Cu涂层热导率提高的原因之一。

### 3 结论

1) 由于激光辐照对沉积颗粒的加热软化效应,

沉积颗粒塑性变形能力增强, 激光辅助的LPCS-Cu涂层较未加激光辅助的涂层表面更平整, 表层组织更致密; 随着激光辐照功率的增加, LPCS-Cu涂层孔隙率下降, 当激光辐照功率为700 W时, 涂层的孔隙率仅为0.2%; 涂层与基体之间的界面结合随着激光辐照功率的增加而趋于紧密, 这得益于激光辐照对沉积颗粒和基体的同步加热, 使两者协同变形, 结合良好。

2) 随着激光辐照功率的增加, LPCS-Cu涂层显微硬度可增至143.4 HV<sub>0.2</sub>, 远高于基体的显微硬度, 这是因为随着激光辐照功率的增加, 沉积颗粒的塑性变形能力增加, 在沉积过程中加工硬化效应更显著, 因此导致显微硬度大幅提升。

3) LPCS-Cu涂层的热导率随着激光辐照功率的增加而逐渐提升, 当激光辐照功率为700 W时, 热导率可达170.2 W/(m·K), 为未加激光辐照涂层的热导率的257.1%。这是因为激光辐照提高了涂层的致密性, 减少了涂层中孔隙对热导率的不利影响。此外, 较高的激光功率还会导致涂层中严重变形的颗粒发生再结晶, 消除部分界面, 减少了界面热阻对热导率的不良影响。

### REFERENCES

- [1] 朱红梅, 龚文娟, 易志威. AZ91 镁合金表面激光熔覆 Al-Cu 合金涂层的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1498-1504.  
ZHU Hong-mei, GONG Wen-juan, YI Zhi-wei. Microstructure and property of laser cladding Al-Cu alloy coating on surface of AZ91 magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7): 1498-1504.
- [2] 杨胶溪, 文强, 李子阳, 等. 添加Ni对激光熔覆CuAl10铜合金组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0306006.  
YANG Jiao-xi, WEN Qiang, LI Zi-yang, et al. Influence of Ni additions on the microstructures and properties of laser clad CuAl10 coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0306006.
- [3] 单际国, 赵楠楠, 任家烈. 聚焦光束堆焊铜基自熔合金过程中Fe<sub>3</sub>Si增强相的反应合成[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(3): 450-454.

- SHAN Ji-guo, ZHAO Nan-nan, REN Jia-lie. Reaction synthesis of Fe<sub>3</sub>Si reinforcement via light beam surfacing of Cu-based self-fluxing alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(3): 450–454.
- [4] 郇庆婷, 刘雅琴, 蔡宏章, 等. 等离子喷涂 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层的制备及性能研究[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(20): 88–91.
- HUAN Qing-ting, LIU Ya-qin, CAI Hong-zhang, et al. Research on preparation and properties of plasma sprayed Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(20): 88–91.
- [5] 陈金雄, 王群, 罗丝丝, 等. AZ31 镁合金冷喷涂 Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层组织及性能[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(9): 1720–1729.
- CHEN Jin-xiong, WANG Qun, LUO Si-si, et al. Microstructure and properties of cold sprayed Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on AZ31 magnesium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(9): 1720–1729.
- [6] 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.
- [7] WU H J, HUANG C J, XIE X L, et al. Influence of spray trajectories on characteristics of cold-sprayed copper deposits [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2021, 405: 126703.
- [8] LI Y J, LUO X T, LI C J. Improving deposition efficiency and inter-particle bonding of cold sprayed Cu through removing the surficial oxide scale of the feedstock powder[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2021, 407: 126709.
- [9] 唐丽芳, 李文生, 何玲, 等. 冷喷涂自敏发光高铝青铜复合涂层及其摩擦磨损性能[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(5): 931–941.
- TANG Li-fang, LI Wen-sheng, HE Ling, et al. Friction and wear properties of cold spray self-sensitization luminescent/Cu-14Al-X composite coating[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(5): 931–941.
- [10] HUANG G S, WANG H R, LI X B, et al. Deposition efficiency of low pressure cold sprayed aluminum coating[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, 33(10): 1100–1106.
- [11] BAI Y, WANG Z H, LI X B, et al. Corrosion behavior of low pressure cold sprayed Zn-Ni composite coatings[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 719: 194–202.
- [12] GILLET V, AUBIGNAT E, COSTIL S, et al. Development of low pressure cold spray coatings on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 364: 306–316.
- [13] KOIVULUOTO H, LAGERBOM J, KYLMÄLAHTI M, et al. Microstructure and mechanical properties of low-pressure cold-sprayed (LPCS) coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, 17(5): 721–727.
- [14] 冯力, 李洞亭, 畅继荣, 等. 低压冷喷涂增材制造铜基块体性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(5): 1729–1735.
- FENG Li, LI Dong-ting, CHANG Ji-rong, et al. Research on performance of low pressure cold spraying additive manufacturing of copper-based blocks[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(5): 1729–1735.
- [15] 徐玲玲, 周香林, 孙澄川, 等. 冷喷涂导热导电铜涂层的制备与研究[J]. *热喷涂技术*, 2017, 9(4): 7–12.
- XU Ling-ling, ZHOU Xiang-lin, SUN Cheng-chuan, et al. Preparation and study of cold spray thermally conductive copper coating[J]. *Thermal Spray Technology*, 2017, 9(4): 7–12.
- [16] 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.
- [17] 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 Jian-hua, WU Li-juan, LI Bo, et al. Research states and development tendency of supersonic laser deposition technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0300001.
- [18] 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 Li-jing, LI Zheng-xian, HUANG Chun-liang, et al. Producing hard material coatings by laser-assisted cold spray: A technological review[J]. *Materials Review*, 2018, 32(3): 412–417, 426.
- [19] 章钢, 张杰, 李波, 等. 激光辐照对超音速激光沉积 Ti6Al4V 涂层致密性及耐磨性能的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 1414002.

- ZHANG Gang, ZHANG Jie, LI Bo, 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.
- [20] 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 Jing-yong, YAN Yu-liang, LI Bo, 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.
- [21] 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.
- [22] DANLOS Y, COSTIL S, GUO X, et al. Ablation laser and heating laser combined to cold spraying[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205: 1055–1059.
- [23] SOMMITSCH C, LONESCU M, MISHRA B, et al. Structures and properties of laser-assisted cold-sprayed aluminum coatings[J]. *Materials Science Forum*, 2017, 879: 984–989.
- [24] 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.
- [25] YIN S, WANG X F, SUO X K, et al. Deposition behavior of thermally softened copper particles in cold spraying[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61: 5105–5118.
- [26] FUKUMOTO M, WADA H, TANABE K, et al. Effect of substrate temperature on deposition behavior of copper particles on substrate surfaces in the cold spray process[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, 16(5/6): 643–650.
- [27] 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 & Coatings Technology*, 2013, 220: 174–178.
- [28] FENG Y, LI W Y, GUO C W, et al. Mechanical property improvement induced by nanoscaled deformation twins in cold-sprayed Cu coatings[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 727: 119–122.
- [29] CAO K, YU M, LIANG C M, et al. Study on thermal conductivity of cold sprayed Cu coating[J]. *Surface Engineering*, 2020, 36(10): 1058–1066.
- [30] MA J N, BOLZONI L, YANG F. Interface manipulation and its effects on the resultant thermal conductivity of hot-forged copper/Ti-coated diamond composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 868: 159182.
- [31] LI Y J, LUO X T, RASHID H, et al. A new approach to prepare fully dense Cu with high conductivities and anti-corrosion performance by cold spray[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 740: 406–413.
- [32] DUTTON R, WHEELER R, RAVICHANDRAN K S, et al. Effect of heat treatment on the thermal conductivity of plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2000, 9(2): 204–209.
- [33] LI Bo, YANG Li-jing, LI Zhi-hong, 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.

## Microstructure and thermal conductivity of laser-assisted low-pressure cold sprayed Cu coating

ZHANG Cheng-feng<sup>1,2,3</sup>, QIU Fang-miao<sup>1,2,3</sup>, LI Bo<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Qun-li<sup>1,2,3</sup>,  
VOLODYMYR Kovalenko<sup>1,2,3</sup>, YAO Jian-hua<sup>1,2,3</sup>

- (1. Institute of Advanced Laser manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;
2. Collaborative Innovation Center of High-end Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou 310023, China;
3. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;
4. Jiangsu Yawei Machine Tool Co., Ltd., Yangzhou 225200, China)

**Abstract:** In order to meet the repair needs of Cu-based materials, laser-assisted low pressure cold spray (LPCS) technology was used to prepare Cu coatings on the surface of a copper substrate in this study. The effects of different laser irradiation powers on the microstructure and performance of LPCS-Cu coatings were systematically investigated. The results show that the porosity, average micro-hardness and thermal conductivity of the LPCS-Cu coating are 1.23%, 124.0 HV<sub>0.2</sub> and 66.2 W/(m·K), respectively. There are obvious gaps at the coating/substrate interface of the LPCS-Cu coating. As laser irradiation power increased, the surface fluctuation of LPCS-Cu coatings decrease. The porosity, average micro-hardness and thermal conductivity of the LPCS-Cu coating can be optimized to 0.3%, 143.4 HV<sub>0.2</sub> and 170.2 W/(m·K) respectively by the assistance of laser irradiation. The interface between coating and substrate is well bonded without obvious gaps for the laser-assisted LPCS-Cu coating. Laser irradiation improves the plastic deformation ability of the deposited particles and the substrate, which is beneficial to the interfacial bonding between the deposited particles and between the deposited particles and the substrate. Therefore, the laser-assisted LPCS-Cu coating has better compactness and exhibits improved thermal conductivity performance with comparison to the counterpart without laser irradiation.

**Key words:** cold spray; laser irradiation; microstructure; micro-hardness; thermal conductivity

**Foundation item:** Project(52075495) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2020T130263) supported by the China Postdoctoral Science Foundation; Project(RF-A2020009) supported by the Fundamental Research Funds for the Provincial Universities of Zhejiang, China; Project(2021R403066) supported by the College Students' Science and Technology Innovation Activity Plan of Zhejiang Province, China

**Received date:** 2021-10-11; **Accepted date:** 2021-12-09

**Corresponding author:** LI Bo; Tel: +86-15088688625; E-mail: libo1011@zjut.edu.cn

(编辑 王 超)