

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

吴丽娟^{a,b}, 汪伟林^{a,b}, 李波^{a,b}, 陈智君^{a,b}, 金琰^{a,b}, 姚建华^{a,b}

(浙江工业大学 a.激光先进制造研究院 b.机械工程学院, 杭州 310023)

摘要: **目的** 研究不同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。**方法** 利用超音速激光沉积技术制备金刚石/Cu 复合涂层。采用扫描电镜和摩擦磨损测试对涂层的显微组织结构和磨损性能进行了分析, 用激光闪烁法测量复合涂层的热导率。**结果** 金刚石均匀分布在复合涂层中, 原始粉末中金刚石体积分数从 30%增加到 50%时, 复合涂层中金刚石颗粒的面积占比仅从 14.01%升至 16.79%, 远低于金刚石颗粒在原始粉末中的含量。400 目金刚石/Cu 复合涂层的平均热导率为 296 W/(m·K), 摩擦系数为 0.551; 800 目金刚石/Cu 复合涂层的平均热导率为 238 W/(m·K), 摩擦系数为 0.545。**结论** 原始粉末中金刚石配比的增加并未对复合涂层中金刚石含量的提升有显著作用。金刚石/Cu 复合涂层的热导率随着增强相颗粒含量的增加而降低, 随着增强相颗粒粒径的增大而提高。不同粒径金刚石颗粒的添加能显著降低 Cu 涂层的摩擦系数, 且小粒径金刚石颗粒的添加使复合涂层的摩擦系数更低和更稳定, 从而使其具有更小的磨损量和磨痕宽度, 表现出较优的耐磨损性能。

关键词: 超音速激光沉积; 金刚石/Cu 复合涂层; 固态沉积; 显微组织; 热导率; 耐磨性

中图分类号: TG174.4; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)02-0040-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.006

Influence of Diamond Particle Size and Content on the Microstructure and Properties of Diamond/Cu Composite Coating Prepared by Supersonic Laser Deposition

WU Li-juan^{a,b}, WANG Wei-lin^{a,b}, LI Bo^{a,b}, CHEN Zhi-jun^{a,b}, JIN Yan^{a,b}, YAO Jian-hua^{a,b}

(a.Institute of Laser Advanced Manufacturing, b.College of Mechanical Engineering,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of different diamond particle sizes and contents on the microstructure and properties of diamond/Cu composite coatings prepared by supersonic laser deposition. The microstructure and wear properties

收稿日期: 2018-10-23; 修订日期: 2018-12-15

Received: 2018-10-23; Revised: 2018-12-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB1103601); NSFC-浙江省两化融合联合基金 (U1509201); 国家自然科学基金 (51701182); 浙江省自然科学基金 (LQ17E050009)

Fund: Supported by National Key R&D Program of China (2017YFB1103601), NSFC-Zhejiang Joint Fund for the Integration of Industrialization and Information (U1509201), National Natural Science Foundation of China (51701182) and Youth Project of Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LQ17E050009)

作者简介: 吴丽娟 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为激光复合表面改性技术。

Biography: WU Li-juan (1994—), Female, Master, Research focus: laserhybrid manufacturing technology and application.

通讯作者: 陈智君 (1978—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光复合表面改性技术。邮箱: roll@zjut.edu.cn

Corresponding author: CHEN Zhi-jun (1978—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: laserhybrid manufacturing technology and application.
E-mail: roll@zjut.edu.cn

of the coatings were analyzed by scanning electron microscopy and friction and wear test. The thermal conductivity of the composite coating was measured by laser scintillation. The diamond particles were evenly distributed in the composite coating. When the content of 800-mesh diamond particles in the original composite powder increased from 30% to 50%, the area ratio of diamond particles in the composite coating only increased from 14.01% to 16.79%, which was much lower than that of the diamond particles in the original composite powder. The average thermal conductivity and friction coefficient of the 400-mesh diamond/Cu composite coating were 296 W/(m·K) and 0.551, respectively; and the average thermal conductivity and friction coefficient of the 800-mesh diamond/Cu composite coating were 238 W/(m·K) and 0.545. The increase of diamond ratio in the original composite powder does not have a significant effect on the increase of diamond content in the composite coating. The thermal conductivity of the diamond/Cu composite coating decreases as the content of the diamond particles increases, and increases as the particle size of the diamond particles increases. The addition of diamond of different particle sizes can significantly reduce the friction coefficient of the Cu coating, and the diamond in smaller size can make the friction coefficient much lower and the coating more stable and then lead to lower wear amount and smaller scar width, so that the excellent wear resistance is obtained.

KEY WORDS: supersonic laser deposition; diamond/Cu composite coatings; solid-state deposition; microstructure; thermal conductivity; wear- resistance

铜及其合金因优异的导热性, 常用于电子封装、连铸结晶器等领域, 然而铜的低硬度和低耐磨性使其服役寿命不长, 限制了其在工业的应用, 因此通常在铜表面制备一层既耐磨又导热的涂层^[1-5]。金刚石由于具有优良的耐磨损性能和导热性能, 常用于金属基复合材料涂层的增强相颗粒, 以达到较优的耐磨和导热综合性能^[6-10]。然而金刚石易石墨化, 且 Cu 对激光具有高反射率且极易氧化, 因此采用激光熔覆和热喷涂等方法难以制备性能优良的金刚石/Cu 复合涂层^[11-12]。

超音速激光沉积技术 (Supersonic Laser Deposition, SLD) 是将激光辐照和冷喷涂相耦合的一种新型材料制造技术^[13-15]。在冷喷涂 (Cold Spray, CS) 沉积涂层过程中, 喷涂颗粒和基体的预热处理至关重要。SLD 在 CS 基础上引入激光作为辅助热源, 在沉积过程中保持激光光斑和喷涂粉斑重合且同步运动, 实现对沉积颗粒和基材的加热软化。此外, 颗粒可以以约为冷喷涂一半的速度撞击基体, 通过颗粒和基体的剧烈塑性变形形成致密且结合良好的涂层。沉积颗粒临界速度的有效降低, 既可以使用氮气来替代价格昂贵的氦气, 降低操作成本, 又克服了冷喷涂无法或难以沉积脆性材料和高硬度材料的缺点, 显著拓展了可沉积材料的范围。此外, 由于其相对较低的热输入, 可以有效避免激光熔覆等高热输入技术给材料带来的氧化、相变、烧蚀、晶粒长大等现象, 可最大程度保留沉积材料的原有性质和成分^[16]。

基于 SLD 技术的特征和优势, 本文拟利用 SLD 技术在 Cu 基体上制备温度/氧化敏感的金金刚石/Cu 复合材料涂层。据文献报道^[17-21], 增强相颗粒的粒径和含量对复合材料涂层的微观结构和性能均具有较大的影响。杨理京等人^[17]研究了两种粒径的金刚石对金刚石/Ni60 复合涂层的影响。结果显示, 小粒径的金刚石复合涂层的耐磨性能优于大粒径的金刚石复合

涂层。刘永正^[18]研究了金刚石粒径及体积分数对复合材料热导率的影响。结果表明, 复合材料的热导率随粒径的增大而略有增加, 当体积分数为 10% 时, 复合材料热导率最高。王建东等人^[19]研究不同增强相粒径 TiC 对 TiC_p/Ti6Al4V 复合材料的影响。结果显示, 在拉伸性能方面, TiC 复合材料 (45~75 μm) 优于复合材料 (75~100 μm)。刘艳娥^[20]用烧结法制备 Cu/Al₂O₃ 复合材料。结果显示, 复合材料密度和硬度都随着 Al₂O₃ 含量增加而减小。马彦宇^[21]用钎焊工艺制备颗粒增强铜基耐磨复合材料涂层。结果显示, 复合涂层的密度随着 W₂C 的含量增加而增大, 体积分数为 30% 的涂层孔隙率最低; 当 W₂C 体积分数为 30% 时, 随着颗粒粒径的增加, 涂层的孔隙度逐渐降低。因此, 本文重点研究不同金刚石粒径和含量对复合涂层显微结构、热导率和耐磨性能的影响, 从而为金属基金金刚石复合涂层的制备提供新的技术方法和理论基础。

1 实验

1.1 实验设备

实验所采用的 SLD 系统主要包括 4 kW 的光纤耦合半导体激光器、自主研发的冷喷涂系统、高压气体供应装置和温度反馈系统, 如图 1 所示。高压氮气 (10~30 bar) 被分为两部分: 一部分用于输送喷涂粉末, 另一部分直接进入喷嘴, 两部分气体在混合腔内重新汇合在一起。粉末颗粒在 Laval 喷嘴中被高速气流加速到超音速后, 喷射到基体, 经过剧烈塑性变形形成涂层。

1.2 实验材料

沉积粉末材料为纯铜粉与金刚石的复合粉末, 考虑到复合涂层中增强相含量过高 (粘结相相对应地就

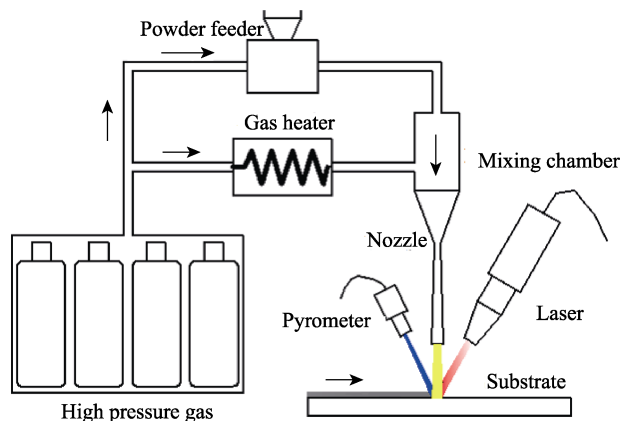


图1 超音速激光沉积系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of SLD system

会过低)会影响其有效沉积,而增强相含量过低则起不到强化作用,因此复合粉末中金刚石含量(以体积分数计)选为30%、40%和50%。实验采用的金刚石微粉为人造单晶金刚石,粒度有400目和800目两种规格,金刚石颗粒呈不规则形状;Cu粉末呈球形,颗粒的粒径分布主要在5~50 μm范围内。实验前,将按体积比配比的Cu粉末与金刚石粉末放入QM-3SP4J行星球磨机中进行球磨混合,磨球与粉料的质料比为2:1,球磨转速为200 r/min,混粉时间为

1 h。基体材料为T1紫铜,试样尺寸为100 mm×50 mm×5 mm,化学成分如表1所示。超音速激光沉积前用Al₂O₃对基体材料进行喷砂预处理,并用无水乙醇超声清洗。

表1 T1紫Cu基体的化学成分
Tab.1 Chemical composition of T1 Cu substrate

wt. %								
Sn	Pb	Sb	As	Fe	Ni	S	Zn	Cu
0.002	0.003	0.002	0.002	0.005	0.002	0.005	0.005	Bal.

1.3 实验方法

采用图1所示的SLD系统制备金刚石/Cu复合涂层,工艺参数如表2所示。利用扫描电子显微镜(SEM, SIGMA HV-01-043, Carl Zeiss)分析沉积层横截面的微观结构和涂层摩擦磨损后的磨痕。利用SEM的图像分析软件测定复合涂层中金刚石颗粒的含量。试验采用耐驰LFA427导热系数测量仪对复合涂层的热导率进行测量。采用HT-1000球盘式摩擦磨损仪测试涂层的摩擦磨损性能。对磨材料为Si₃N₄陶瓷球,该球直径为4 mm,测试温度为室温,加载载荷600 g,转速500 r/min,测试时间60 min。

表2 超音速激光沉积金刚石/Cu复合涂层的工艺参数
Tab.2 Process parameters for the diamond/Cu composite coatings by SLD

N ₂ pressure/MPa	Spray distance/mm	Gas temperature/℃	Laser power/kW	Scanning velocity/(mm·s ⁻¹)	Powder feeding rate/(g·min ⁻¹)
3	30	500	2	10	40

2 结果与讨论分析

2.1 金刚石含量对复合涂层微观结构的影响

图2是采用800目金刚石制备的不同增强相含量的金刚石/Cu复合涂层的背散射电子扫描图,每一种复合涂层中任意选择多张横截面微观组织,利用SEM的图像分析软件测定金刚石颗粒的含量,并取平均值,得到三种复合涂层中金刚石的含量。可以看出,在不同金刚石含量的复合涂层中,金刚石颗粒都均匀分布在Cu粘结相中,且涂层中没有明显的缝隙和孔隙。此外,原始粉末中金刚石含量从30%增加到50%时,涂层中金刚石颗粒的面积占比仅仅从14.01%升至16.79%,远低于金刚石颗粒在原始粉末中的含量。这主要是因为,在SLD过程中,陶瓷相颗粒与陶瓷相颗粒、陶瓷相颗粒与粘结相颗粒、粘结相颗粒与粘结相颗粒之间在高速飞行沉积过程中均会发生碰撞反弹现象,而原始粉末中金刚石颗粒配比的增加,会增加金刚石颗粒与其他颗粒碰撞反弹的几率,从而降低了沉积效率。此外,原始粉末中金刚石颗粒占比增加,

会导致粘结相占比减少,而硬脆的金刚石颗粒需要嵌入塑性变形的粘结相中才能形成有效沉积,粘结相占比的减少势必会影响增强相颗粒的沉积。SLD由于引入了激光对沉积颗粒和基体进行加热(加热温度一般为材料熔点的2/3),金属粘结相得到有效软化而不熔化,在沉积过程中塑性变形更充分、结合更好,脆硬的陶瓷颗粒高速撞击并紧实嵌入粘结相中,形成致密结合的复合沉积层。

2.2 金刚石粒径对复合涂层的影响

图3是不同粒径金刚石制备的复合涂层中增强相颗粒的分布情况。从图中可以看出,在原始复合粉末中金刚石颗粒配比(40%)相同的情况下,800目金刚石/Cu复合涂层中金刚石颗粒分布的均匀性要高于400目金刚石/Cu复合涂层。金刚石/Cu复合材料在沉积过程中,金刚石颗粒会与已沉积的金刚石发生碰撞而破碎,破碎的金刚石颗粒反弹或者被后续粒子夯实在粘结相中。据相关文献报道^[22],沉积过程中金刚石受到的冲击应力为122.5 GPa,远高于金刚石断裂应力(5.8 GPa),因此会在涂层中观察到,金

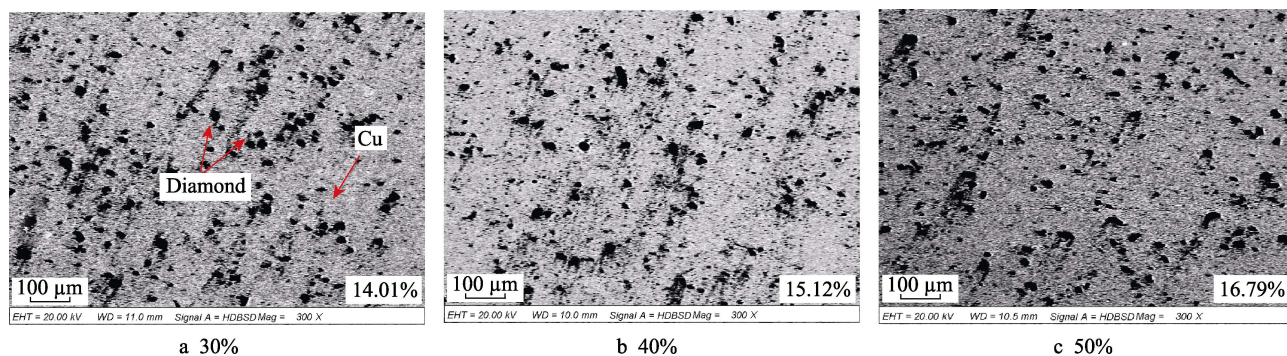


图 2 不同金刚石配比下的金刚石/Cu 复合涂层的微观结构
Fig.2 Microstructures of the diamond/Cu composite coatings with different diamond contents

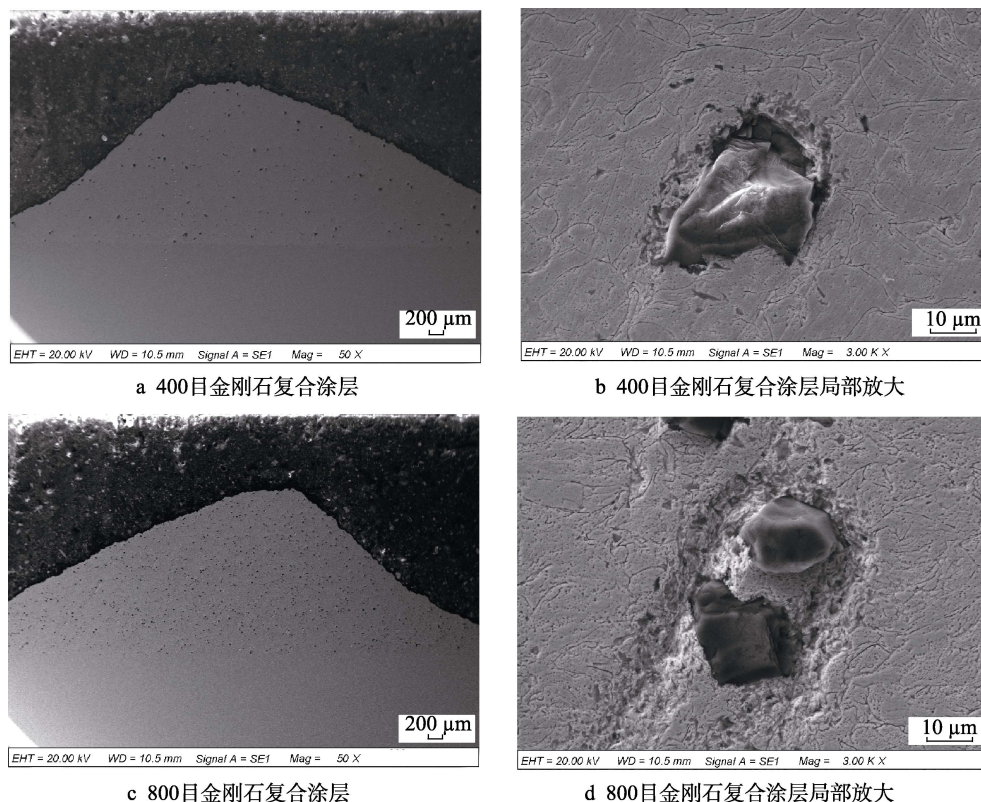


图 3 不同粒径金刚石在复合涂层中的分布

Fig.3 Distribution of diamond with different particle sizes in the composite coatings: a) 400-mesh diamond/Cu composite coating; b) partial enlarged detail of 400-mesh diamond/Cu composite coating; c) 800-mesh diamond/Cu composite coating; d) partial enlarged detail of 800-mesh diamond/Cu composite coating

石颗粒由于破碎，其尺寸较原始粉末中的尺寸有所变化。金刚石的破碎率可由式（1）计算^[23]：

$$R = \left(1 - \frac{D_1}{D_2}\right) \times 100\% \tag{1}$$

式中： R 为破碎率； D_1 为沉积层金刚石平均粒径； D_2 为金刚石粉末的平均粒径。400 目金刚石颗粒的平均粒径为 $39.63\text{ }\mu\text{m}$ ，800 目金刚石颗粒的平均粒径为 $20.82\text{ }\mu\text{m}$ 。根据图 3 复合涂层中金刚石颗粒的平均粒径，计算得出 400 目金刚石的破碎率为 62%，800 目金刚石的破碎率为 33%。很明显，金刚石粒径的减小，大大降低了金刚石颗粒的破碎率，保证了金刚石颗粒在复合涂层中的完整性。在超音速激光沉积过程中，

400 目金刚石颗粒由于质量大，其撞击时动能更大，因此更容易破碎。破碎后的金刚石碎屑与高速飞行粒子容易发生反弹现象，从而降低金刚石在复合涂层中的含量和分布均匀性。此外，从图 3b、d 可以看出，相对于小颗粒的金刚石和粘结相之间形成的紧密结合，大颗粒的金刚石和粘结相结合之间存在较为明显的间隙，这可能是因为在制样过程中，大粒径的金刚石发生破碎，使少量的金刚石从涂层中剥落，从而形成了间隙。

2.3 界面结合分析

图 4 为 800 目金刚石/Cu 复合涂层界面结合形貌。可以观察到涂层与基体呈现出较好的界面结合，结合

界面处发生了明显的材料卷曲现象。由于超音速激光沉积时,激光对沉积颗粒以及基体进行了加热软化,沉积颗粒高速碰撞软化的基体时,在高应力和高应变作用下,二者发生绝热剪切失稳现象产生塑性流动。当界面处颗粒和基体材料的流动速度不一致时,会引起 Kelvin-Helmholtz 效应,界面处材料产生卷曲和旋涡,从而导致材料混合互锁,形成机械咬合。而形成的波浪状界面,大大增加了涂层与基体的接触面积,有利于提高两者间结合强度。

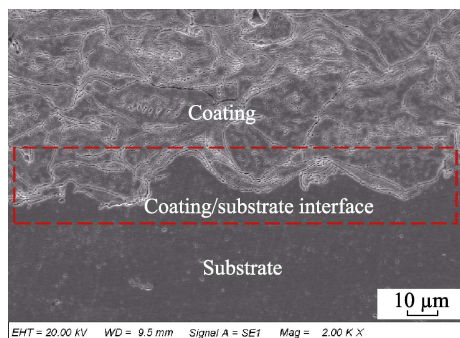


图4 800目金刚石/Cu复合涂层界面结合情况
Fig.4 Interfacial bonding of 800-mesh diamond/Cu composite coating

2.4 复合涂层的热导率

采用激光闪烁法测量超音速激光沉积金刚石/Cu复合涂层的热导率,结果如图5所示。可以看出,无论是400目金刚石/Cu复合涂层,还是800目金刚石/Cu复合涂层,其热导率都低于金属Cu基体(385~400 W/(m·K))^[6],且复合涂层的热导率随着增强相金刚石颗粒体积分数的增加而下降。金刚石/Cu复合涂层中,主要依靠粘结相电子传热为主,增强相颗粒的阻挡以及界面的散射作用,会使自由电子的平均自由程受到不同程度的影响^[24]。随着增强相金刚石颗粒含量的增加,界面增多,自由电子平均自由程下降^[25],所以金刚石/Cu复合涂层的热导率会降低。一般情况下,界面热阻是影响复合材料热导率的重要因素,界面数量越多,界面热阻越大,复合涂层的导热性能就会快速降低。复合涂层的热导率可由表达式(2)计算^[26]:

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

式中, K 为热导率的值,下标 c、m 和 d 分别表示复合涂层、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(2)可知,除了粘结相和增强相的热导率、增强相颗粒的体积分数及界面热导率外,增强相的粒径大小也是决定热导率的关键因素。采用大粒径的金刚石对提高金刚石/Cu复合材料的导热性有明显优势。

此外,粒径减少会增加增强相/粘结相的界面数量和热阻,从而导致热导率下降,因此400目金刚石/Cu复合涂层的热导率整体优于800目金刚石/Cu复合涂层。

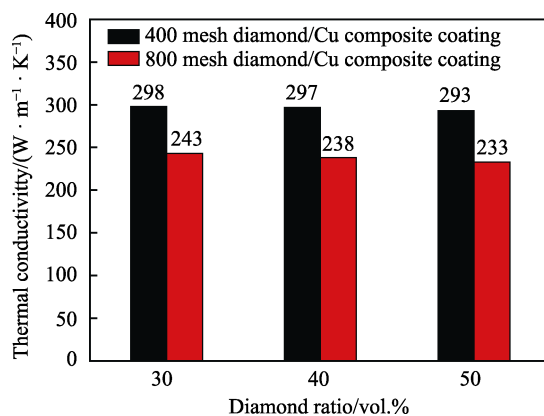
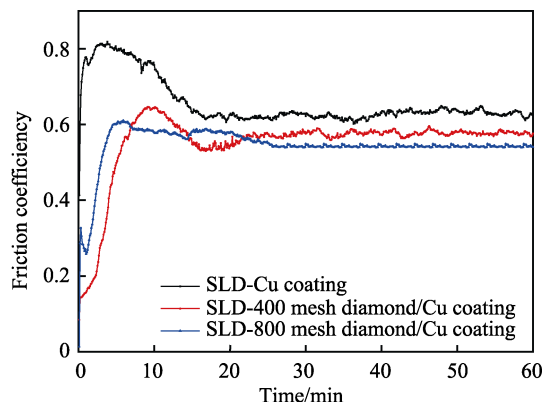


图5 不同粒径的金刚石/Cu复合涂层的热导率
随金刚石粒径和体积分数的变化

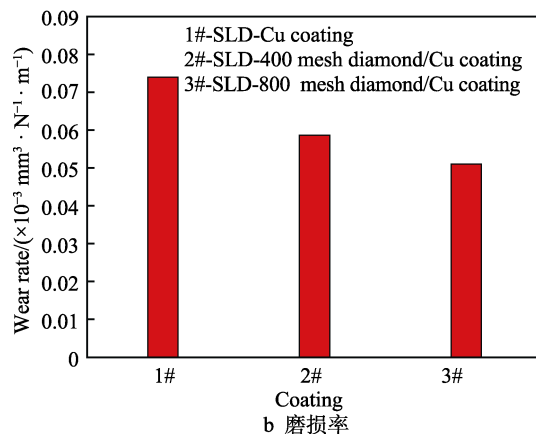
Fig.5 Variation of thermal conductivity of diamond/Cu composite coatings with different diamond particle sizes along with the diamond particle size and volume fraction

2.5 复合涂层的耐磨性能

图6a所示为三种涂层的摩擦系数曲线。可以看



a 摩擦系数曲线



b 磨损率

图6 超音速激光沉积Cu及金刚石/Cu涂层的摩擦磨损性能对比

Fig.6 Comparison of wear-resistant properties of Cu and diamond/Cu coatings by SLD:
a) friction coefficient curve; b) wear rate

出 Cu 涂层的摩擦系数比复合涂层的要大且摩擦系数曲线出现较大的波动。这说明加入金刚石,可以降低涂层的摩擦系数,提高涂层的耐磨性能。400 目金刚石/Cu 复合涂层和 800 目金刚石/Cu 复合涂层的平均摩擦系数分别为 0.551 和 0.545,说明不同粒径的金刚石颗粒对复合涂层摩擦系数影响不大。但从图 6a 中还可以看出,800 目金刚石/Cu 复合涂层的摩擦系数较 400 目金刚石/Cu 复合涂层要更稳定。图 6b 是 SLD 制备的 Cu 涂层和不同粒径金刚石/Cu 复合涂层的磨损率对比。从图中可以看出,金刚石/Cu 复合涂层的磨损率均低于 Cu 涂层。此外,虽然两种复合涂层中金刚石含量相差不是很大,但 800 目金刚石/Cu 复合涂层的磨损率低于 400 目金刚石/Cu 涂层。Skolianos S 等人^[27]的研究结果发现, SiC_p 颗粒增强的 Al-4.5%Cu-1.5%Mg 合金涂层的磨损率随着碳化物的尺寸减小而降低,这与本文的研究结果相一致。

图 7 是超音速激光沉积 Cu 涂层和不同粒径金刚石/Cu 复合涂层的磨痕对比。可以看出, Cu 涂层、400 目金刚石/Cu 复合涂层以及 800 目金刚石/Cu 复合涂层的磨痕宽度分别为 692.2、624.6、604.2 μm ,这进一步表明金刚石颗粒的添加会降低涂层的磨损量。分析涂层的磨痕发现,在纯铜涂层中有较大的剥落区,磨损机制主要为粘着磨损;在复合涂层表面有一些较浅的犁沟和凹坑。这是因为随着粘结相被磨损,少量的金刚石在对磨过程中会发生破损剥落,进而在磨损测试中对涂层表面造成犁沟状划痕。此外,复合涂层相对纯铜涂层,粘结相剥落区较小,磨损机制为粘着磨损和磨粒磨损,金刚石复合涂层的耐磨性优于纯铜涂层。另外,800 目金刚石/Cu 复合涂层的耐磨性能优于 400 目金刚石/Cu 复合涂层,这是因为大粒径的金刚石在磨损过程中更容易发生破碎剥落,而破碎的金刚石碎屑在对磨过程中容易加剧复合涂层表面的磨损。

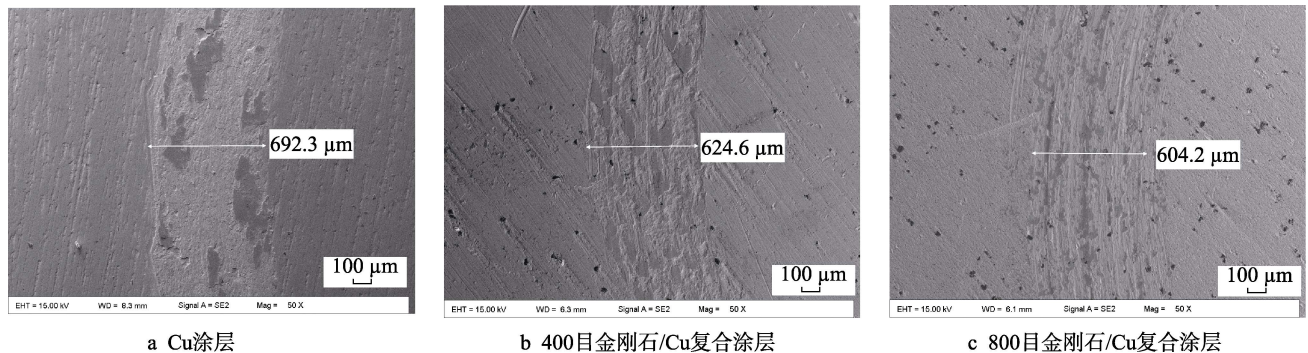


图 7 超音速激光沉积 Cu 及金刚石/Cu 涂层的磨痕对比

Fig.7 Comparison of worn surfaces of Cu and diamond/Cu coatings by SLD: a) Cu coating; b) 400-mesh diamond/Cu composite coating; c) 800-mesh diamond/Cu composite coating

3 结论

1) 增加原始粉末中金刚石的含量对复合涂层中金刚石含量的提高并没有显著的作用。不同粒径金刚石颗粒的添加均能获得增强相均匀分布且界面结合良好的金刚石/Cu 复合涂层,但由于硬脆的金刚石颗粒在高速飞行沉积的过程中会发生碰撞破碎和反弹,导致复合涂层中的金刚石颗粒含量低于其在原始复合粉末中的占比。

2) 超音速激光沉积金刚石/Cu 复合涂层的热导率随着增强相颗粒含量的增加而降低,随着增强相颗粒粒径的增大而提高,这均与复合涂层中的界面热阻有关。增强相含量增加或粒径减少会增加增强相/粘结相的界面数量和热阻,从而导致涂层热导率下降。

3) 纯 Cu 涂层的磨损机制为粘着磨损,金刚石/Cu 复合涂层的磨损机制为粘着磨损和磨粒磨损,金刚石的添加能显著提高 Cu 涂层的耐磨性,使复合涂层具有比纯 Cu 涂层更低的摩擦系数、磨损量和磨痕宽度,表现出较优的耐磨损性能。大粒径的金刚石在磨损过程中更容易发生破碎剥落,而破碎的金刚石碎屑在对

磨过程中容易加剧复合涂层表面的磨损,因此小粒径金刚石复合涂层的耐磨性更好。

参考文献:

- [1] GOTO Y, KAMEBUCHI Y, HAGIO T, et al. Electrodeposition of copper/carbonous nanomaterial composite coatings for heat-dissipation materials[J]. Coatings, 2017, 8(1): 5.
- [2] 邓安强, 樊静波, 谭占秋, 等. 金刚石/铜复合材料在电子封装材料领域的研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(5): 56-61.
DENG An-qiang, FAN Jing-bo, TAN Zhan-qiu, et al. Research progress of diamond/Cu composite material for electronic packaging[J]. Diamond & abrasives engineering, 2010, 30(5): 56-61.
- [3] 赵妍冰, 刘克明, 陆德平, 等. 金刚石/铜电子封装复合材料的研究状况及展望[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(6): 31-36.
ZHAO Yan-bing, LIU Ke-ming, LU De-ping, et al. Research status and prospect of CD/Cu composite for electronic packaging material[J]. Heat treatment technology and equipment, 2013, 34(6): 31-36.

- [4] 张晓宇, 蔺伟康, 许旻, 等. 添加稀土 Nd 改善金刚石/铜复合材料界面[J]. 表面技术, 2018, 47(5): 27-32.
ZHANG Xiao-yu, LIN Wei-kang, XU Min, et al. Addition of rare earth neodymium to improve interface of diamond/copper composites[J]. Surface technology, 2018, 47(5): 27-32.
- [5] 曲聪凯. 铜结晶器表面激光熔覆 Ni 基涂层的组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
QU Cong-kai. The structure and property study on Ni-based coating prepared by laser on the surface of crystallizer copper alloy[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [6] 张荻, 苑孟颖, 谭占秋, 等. 金刚石/Cu 复合界面导热改性及其纳米化研究进展[J]. 金属学报, 2018, 54(11): 1586-1596.
ZHANG Di, YUAN Meng-ying, TAN Zhan-qiu, et al. Progress in interface modification and nanoscale study of diamond/Cu composites[J]. Acta metallurgica sinica, 2018, 54(11): 1586-1596.
- [7] PELLIZZARI M, CIPOLLONI G. Tribological behaviour of Cu based materials produced by mechanical milling/alloying and spark plasma sintering[J]. Wear, 2017, 376-377: 958-967.
- [8] CHE Q L, ZHANG J J, CHEN X K, et al. Spark plasma sintering of titanium-coated diamond and copper-titanium powder to enhance thermal conductivity of diamond/copper composites[J]. Materials science in semiconductor processing, 2015, 33: 67-75.
- [9] 李信, 龙剑平, 胥明. 金刚石颗粒/金属基复合材料的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(7): 654-656.
LI Xin, LONG Jian-ping, XU Ming. Progress in diamond/metal matrix composites[J]. Special casting & non-ferrous alloys, 2012, 32(7): 654-656.
- [10] ABYZOV A M, KRUSZEWSKI M J, CIUPINSKI Ł, et al. Diamond-tungsten based coating-copper composites with high thermal conductivity produced by pulse plasma sintering[J]. Materials & design, 2015, 76: 97-109.
- [11] 张永忠, 金具涛, 涂义, 等. 纯铜表面激光熔覆铜合金涂层的组织及耐磨性[J]. 金属热处理, 2009, 34(4): 28-32.
ZHANG Yong-zhong, JIN Ju-tao, TU Yi, et al. Microstructure and wear resistance of laser clad copper alloy coating on pure copper[J]. Heat treatment of metals, 2009, 34(4): 28-32.
- [12] IRAVANI M, KHAJEPOUR A, CORBIN S, et al. Pre-placed laser cladding of metal matrix diamond composite on mild steel[J]. Surface & coatings technology, 2012, 206(8): 2089-2097.
- [13] BRAY M, COCKBURN A, O' NEILL W. The laser-assisted cold spray process and deposit characterization[J]. Surface & coatings technology, 2009, 203(19): 2851-2857.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
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.
- [17] YANG L J, LI B, YAO J H, et al. Effects of diamond size on the deposition characteristic and tribological behavior of diamond/Ni60 composite coating prepared by supersonic laser deposition[J]. Diamond & related materials, 2015, 58: 139-148.
- [18] 刘永正. 金刚石/铜复合材料热导率研究[C]// 中国功能材料科技与产业高层论坛论文集. 镇江: 江苏大学, 2009: 323-325.
LIU Yong-zheng. Study on thermal conductivity of diamond/copper composites[C]//Proceedings of China high-level forum on functional materials technology and industry. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009: 323-325.
- [19] WANG J D, LI L Q, LIN P P, et al. Effect of TiC particle size on the microstructure and tensile properties of TiC_p/Ti6Al4V composites fabricated by laser melting deposition[J]. Optics & laser technology, 2018, 105: 195-206.
- [20] 刘艳娥. 刹车片金属陶瓷复合材料制备及摩擦特性研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(6): 1329-1331.
LIU Yan-e. Preparation and friction characteristics of brake pad made from ceramic composite materials[J]. Foundry technology, 2018, 39(6): 1329-1331.
- [21] 马彦宇. 铜基钎料钎焊颗粒增强复合涂层的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
MA Yan-yu. Study on Cu-based filler metal brazed composite coating with particle reinforced[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [22] NA H, BAE G, SHIN S, et al. Advanced deposition characteristics of kinetic sprayed bronze/diamond composite by tailoring feedstock properties[J]. Composites science & technology, 2009, 69(3-4): 463-468.
- [23] KIM H J, JANG J H, CHANG H L. Assessment of metal/diamond composite coating by cold spray deposition[J]. Journal of the Korean institute of metals and materials, 2007, 45(7): 409-415.
- [24] 晏义伍. 颗粒尺寸对 SiC_p/Al 复合材料性能的影响规律及其数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
YAN Yi-wu. Effect of particle size on properties of SiC_p/Al composites and its numerical simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [25] 余志华, 张建云, 周贤良, 等. 电子封装 SiC_p/Al 复合材料导热性能研究与进展[J]. 金属功能材料, 2009, 16(1): 59-64.
YU Zhi-hua, ZHANG Jian-yun, ZHOU Xian-liang, et al. Research and development on thermal conductivity of SiC/Al composites applied to electronic packaging[J]. Metallic functional materials, 2009, 16(1): 59-64.
- [26] HASSELMAN D P H, JOHNSON L F. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance[J]. Journal of composite materials, 1987, 21(6): 508-515.
- [27] SKOLIANOS S, KATTAMIS T Z. Tribological properties of SiC_p-reinforced Al-4.5% Cu-1.5% Mg alloy composites[J]. Materials science & engineering A, 1993, 163(1): 107-113.