

# 超音速激光沉积制备 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层的显微组织及性能研究

王 强<sup>1,2</sup>, 李 楠<sup>1</sup>, 周留成<sup>3</sup>, 东 方<sup>4</sup>, 刘 鑫<sup>5</sup>, 牛文娟<sup>1,2</sup>, 胡 宁<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

(2. 陕西省冶金工程技术研究中心, 陕西 西安 710055)

(3. 空军工程大学 航空等离子体动力学国家级重点实验室, 陕西 西安 710038)

(4. 新疆油田分公司 实验检测研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

(5. 中国特种设备检测研究院 特种设备安全与节能国家市场监管重点实验室, 北京 100029)

**摘 要:** 超音速激光沉积是将超音速冷喷涂和激光辐照加热有机结合的一种新型复合材料表面处理技术, 具有可制备硬质金属复合涂层、沉积效率高优点。本工作利用超音速激光沉积技术在 7B04 铝合金基体上制备硬质铝合金 7075 与陶瓷颗粒 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的复合涂层, 系统研究激光功率对涂层的沉积特性和力学性能的影响规律。采用场发射电子显微镜 (SEM)、能谱分析仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD) 和显微硬度计等仪器, 对涂层的显微组织、相成分和显微硬度进行表征分析, 结果表明: 随着激光功率的增加, 涂层的厚度、致密度、沉积效率、硬度以及涂层中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的分散性和相对沉积效率逐渐增加。当激光功率为 600 W 时, 涂层的沉积厚度达 1543 μm, 孔隙率为 0.05%, 涂层中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末颗粒的相对沉积效率达到峰值 65%, HV 硬度达到 1911 MPa。当激光功率提升至 900 W 时, 涂层的厚度、沉积效率增速放缓, 孔隙率显著增加, 涂层发生氧化相变, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末的相对沉积效率和涂层的硬度下降明显。因而, 适当激光辐照的引入有利于提高铝合金颗粒在沉积过程中的塑性变形能力, 显著改善涂层的质量。然而, 当激光功率过高时, 铝合金颗粒的软化现象加剧, 且易发生氧化相变, 导致涂层的质量下降。

**关键词:** 超音速激光沉积; 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层; 沉积效率; 显微组织; 硬度

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)04-1403-07

7B04 高强铝合金<sup>[1]</sup>是在 7A04 的基础上经过改进得来的, 具有更好的断裂韧性, 主要应用于飞机结构件、承力件、飞机蒙皮和舱壁等部件。由于严苛的服役工况环境及高强度的使用, 零部件表面易出现磨损、裂纹和缺口等缺陷。通过在受损部件表面制备涂层达到恢复尺寸和改善性能是解决以上问题的有效手段<sup>[2]</sup>。

目前, 铝合金表面涂层的制备方法有激光熔覆<sup>[3,4]</sup>, 热喷涂<sup>[5-7]</sup>和冷喷涂<sup>[8-10]</sup>等, 激光熔覆和热喷涂过程中的高热量输入容易导致涂层材料的氧化和相变, 同时会对基体表面产生热损伤, 如变形、开裂等现象<sup>[11,12]</sup>。相比之下, 冷喷涂是一种采用高压气体把金属粉末材料加速到 300~1200 m/s 的速度喷射到基体表面上发生塑性变形沉积的涂层制备技术, 由于气体的加热温度远低于粉末材料的熔点, 因而可以实现涂

层的固态沉积, 有效避免了高温导致的氧化、相变和热损伤等不利影响。由于冷喷涂涂层的沉积成形是基于金属粉末材料在高速撞击下的塑性变形, 因而粉末原材料需要具有较好的塑性。7075 铝合金<sup>[13-16]</sup>属于高强度超硬铝合金, 屈服强度和比强度高, 比较适合用于 7B04 铝合金的表面修复。然而, 前期研究表明, 冷喷涂技术在制备硬质金属材料涂层的过程中存在沉积效率低、涂层致密度差等不足。超音速激光沉积技术 (supersonic laser deposition, SLD) 是一种在冷喷涂技术的基础上加入激光辐照同步加热的新型涂层制备技术, 可实现高强度高硬度粉末材料的有效沉积<sup>[17]</sup>。各国已有研究报道, Lupoi、Yao 等人<sup>[18-25]</sup>利用超音速激光沉积技术制备了 Ti6Al4V、Stellite6、Ni60 等硬质金属涂层以及添加陶瓷颗粒的复合涂层, 且涂层具有良好的致密度。

收稿日期: 2022-04-10

基金项目: 综合研究科学研究基金 (KJ20211A03xx)

作者简介: 王 强, 男, 1984 年生, 博士, 教授, 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055, E-mail: qiang.wang@xauat.edu.cn

超音速激光沉积成功制备涂层的关键在于激光束对冷喷涂过程中高速粒子束的有效作用。关于超音速激光沉积制备硬质铝合金涂层的研究尚未见报道，本工作利用超音速激光沉积技术在航空铝合金材料 7B04 表面制备 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层，系统研究激光功率对涂层的显微组织、致密度、沉积厚度、相成分和硬度的影响规律，探讨涂层的沉积成形机理。

### 1 实验

基体材料采用 7B04 铝合金，化学成分如表 1 所示，热处理状态为 T7351，试样尺寸是 50 mm×30 mm×4 mm。喷涂前对基体材料进行超声波清洗，机械抛光至表面粗糙度 R<sub>a</sub>0.2。喷涂粉末采用 7075 铝合金粉末和 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末。7075 铝合金粉末的化学成分如表 2 所示，由图 1a 可以看出 7075 铝合金粉末球形度较好，表面较为光滑，部分粉末伴有行星颗粒，粒度分布如图 2a 所示，平均粒径为 21 μm。如图 1b 所示，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷颗粒由细小片层状的氧化铝团聚而成，粒度分布如图 2b 所示，平均粒径为 82 μm，其中细小片层状氧化铝的粉末粒径为 1~5 μm。喷涂前，将 7075 铝合金粉末和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒按 70:30 的质量比置于混料机中混合 6~8 h，然后将混合粉末在 80 °C 的真空干燥箱中干燥，保温 5~8 h 后取出。

图 3 展示了本实验所用的超音速激光沉积系统的示意图，沉积机构集成了激光器和冷喷涂喷枪。激光器选用光纤输出半导体激光器，采用西安建筑科技大学轻合金快速增材制造技术研发中心的 DYMET@423 型冷喷涂设备，该设备使用高纯 N<sub>2</sub> 为工作气体。在加工过程中激光光斑与冷喷涂粉斑保持重合并通过机械手臂控制同步运动，超音速激光沉积的参数如表 3 所示。

使用配有能谱分析仪 (EDS) 的 Gemini SEM300 型场发射扫描电子显微镜观察分析超音速激光沉积涂层的组织形貌和成分。利用 D8ADVANCE 型 X 射线

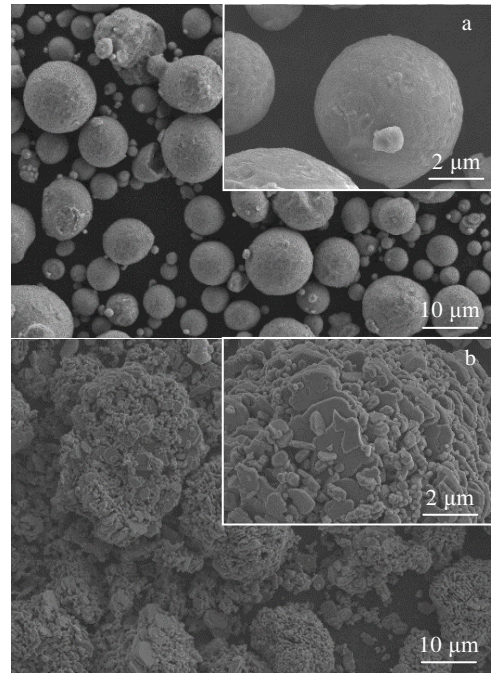


图 1 7075 铝合金粉末和氧化铝颗粒形貌  
Fig.1 Morphologies of spraying powders of 7075 aluminum alloy (a) and α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b)

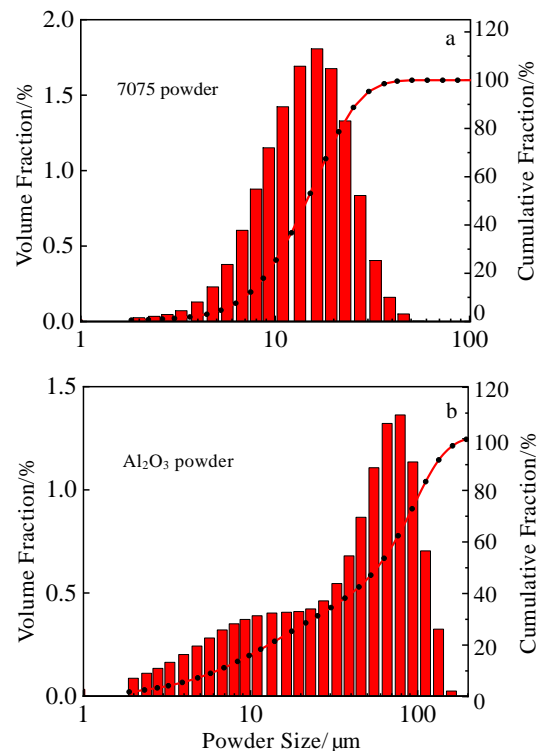


图 2 7075 铝合金和氧化铝颗粒的粉末粒度分布  
Fig.2 Particle size distribution of 7075 aluminum alloy powder (a) and α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder (b)

表 1 7B04 铝合金基体材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of 7B04 aluminum alloy base material (ω/%)

Zn	Mn	Mg	Cu	C	Fe	Cr	Al
4.97	0.19	2.68	1.25	0.51	0.12	0.09	Bal.

表 2 7075 铝合金粉末的化学成分

Table 2 Chemical composition of 7075 aluminum alloy powder (ω/%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
≤0.4	≤0.5	1.6	≤0.3	2.5	0.22	5.3	≤0.2	Bal.

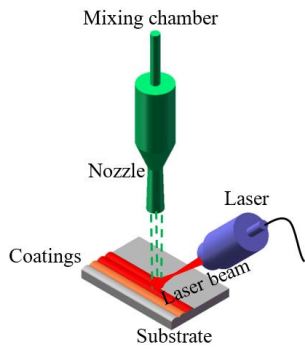


图 3 超音速激光沉积系统

Fig.3 Supersonic laser deposition (SLD) system

衍射仪分析涂层和粉末的物相组成, 工作参数为: 铜靶(Cu-K $\alpha$ ,  $\lambda=0.154\ 056\ \text{nm}$ ), 电压 40 kV, 电流 40 mA。采用 Image Pro Plus (IPP) 图像分析软件测量涂层中的孔隙率和氧化铝颗粒的占比, 基于每个样品的 10 张横截面扫描电镜图取平均值<sup>[6,26]</sup>。涂层的沉积效率由沉积前后的质量变化计算得来, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末的相对沉积效率是通过涂层中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的含量与喷涂前粉末中的添加量比值计算得来。按照 ASTM E384-2011 标准, 使用 HVS-1000 硬度计进行显微硬度测试, 载荷设置为 500 g, 保载时间为 15 s, 每个样品取 5 个点的平均值。

表 3 超音速微粒沉积工艺参数

Table 3 Process parameters of supersonic laser deposition technology

Sample	N <sub>2</sub> pressure/ MPa	N <sub>2</sub> temperature/ °C	Spray distance/ mm	Scanning velocity/mm s <sup>-1</sup>	Powder feeding rate/ g min <sup>-1</sup>	Laser power/ W
a	1	500	20	5	15	0
b	1	500	20	5	15	300
c	1	500	20	5	15	600
d	1	500	20	5	15	900
e	1	500	20	5	15	1200

## 2 结果与分析

### 2.1 涂层的显微组织分析

图 4 是不同激光功率下 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层的横截面宏观结构图, 图 5 是涂层厚度随激光功率的变化趋势图。由图 4 和图 5 可以看出, 随着激光功率的升高, 涂层厚度呈升高趋势。当激光功率为 600 W 时, 涂层的厚度达到了 1543  $\mu\text{m}$ , 是单一冷喷涂层 (CS coating) 厚度的约 3.4 倍, 这表明激光的引入有利于提高涂层的沉积效率。然而, 当激光功率从 600 W 提升

到 900 W 时涂层的厚度无明显增加, 且涂层中出现了明显的孔隙; 当激光功率提升到 1200 W 时, 尽管涂层的厚度有了进一步的提升, 但是涂层和基体的界面处出现孔洞和剥离。

图 6 是不同激光功率下涂层的微观显微组织。从图 6a 可以看出无激光引入的情况下 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层(CS) 的致密性较差, 孔隙率为 3.8%, 细小的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒在涂层中的均匀分散性较差, 较大的孔隙存在于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒周围。如图 6b 所示, 对于 SLD 涂层, 当激光功率为 300 W 时涂层中细小 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的分布均匀性有所提高, 涂层的

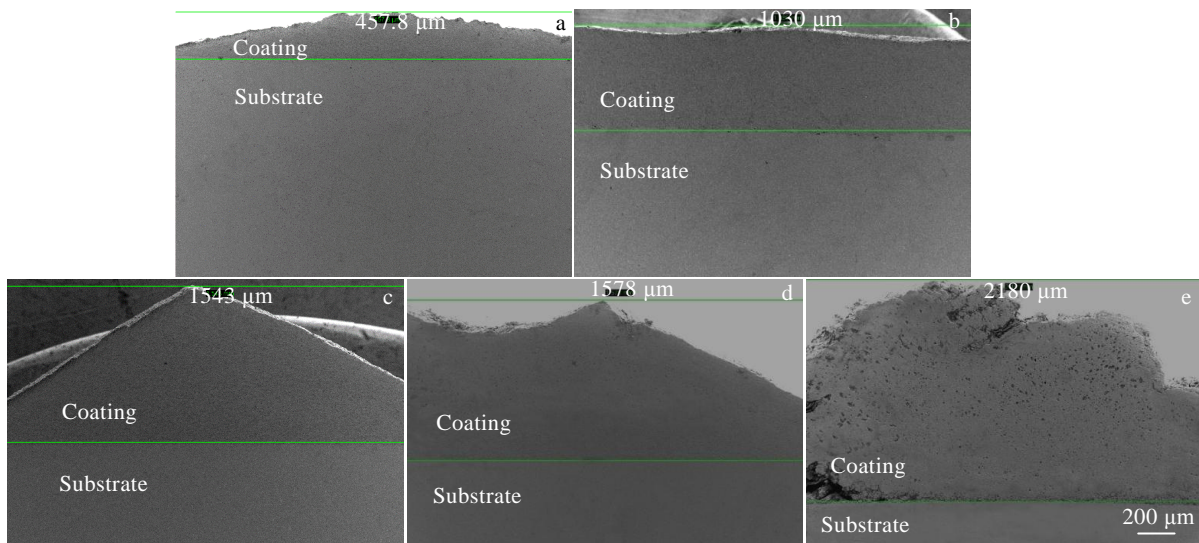


图 4 不同激光功率下涂层的横截面 SEM 像

Fig.4 Comparison of coating thickness under different laser powers: (a) no laser, (b) 300 W, (c) 600 W, (d) 900 W, and (e) 1200 W

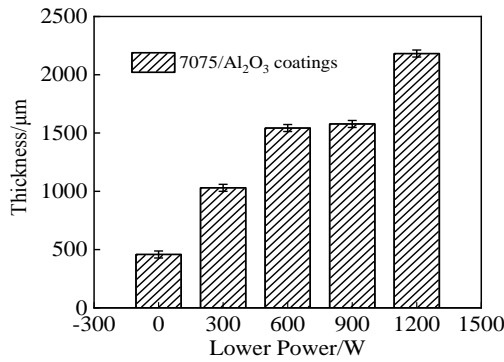


图 5 涂层厚度随激光功率变化

Fig.5 Coating thickness varies with laser power

致密度增加，孔隙率为 1.5%。当激光功率提高至 600 W 时，如图 6c 所示，细小  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的分散均匀性进一步提高，铝合金基体对强化相形成了良好的包覆，孔隙率降为 0.05%。然而，如图 6d 所示，当激光功率达到 900 W 时，涂层中出现较大的孔洞，孔隙率为 7.5%。单一冷喷涂涂层致密性差的原因主要是 7075 铝合金相的塑性变形不充分，一方面难以形成对硬质颗粒  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相的有效包裹，另一方面较硬的金属基体不利于细小  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的分散。在超音速激光沉积中，激光对喷涂粉末的加热使其得到有效的软化，塑性变形能力增强，一方面有利于细小  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒在基体内部的均匀分散，嵌入铝合金基体内部，不易脱落，铝

合金基体与强化相之间形成紧密的结合；另一方面，硬质颗粒的高速撞击对基体起到夯实作用，有助于提高基体内部铝合金颗粒与颗粒之间的结合强度。然而，激光功率过高容易导致涂层出现氧化和烧损现象，铝合金基体与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒间的界面结合强度降低，孔隙率明显增加，涂层质量严重下降。

## 2.2 涂层的沉积效率

图 7 展示了涂层的沉积效率和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末颗粒的相对沉积效率，可以看出涂层的沉积效率随着激光功率的增加而增加，当激光功率达到 600 W 后涂层沉积效率增速变慢，其变化趋势与涂层的厚度变化相类似。然而，涂层中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末颗粒的相对沉积效率与涂层的沉积效率变化趋势有明显区别。在无激光的条件下，涂层中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相对沉积效率为 45%，与前期的实验结果相接近<sup>[6,26]</sup>。

初期，随着激光功率的增加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的相对沉积效率逐渐增加，激光功率为 600 W 时达到峰值 65%，归因于激光能量的引入有效软化了铝合金颗粒，在沉积过程中对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒起到了良好的包裹作用，提高了硬质颗粒的有效沉积。然而，当激光功率为 900 W 时  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的相对沉积效率急剧下降，在 1200 W 的激光功率下降到 40%，结合图 4 和图 6 的组织分析，涂层在 900 和 1200 W 的条件下孔隙率明显增加，激光功率增加导致的铝合金颗粒软化与硬质  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的沉积是一个竞争过程：一方面，高速飞行的硬质  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒对软化铝合金颗粒的冲蚀加剧，失去了有效沉积的环

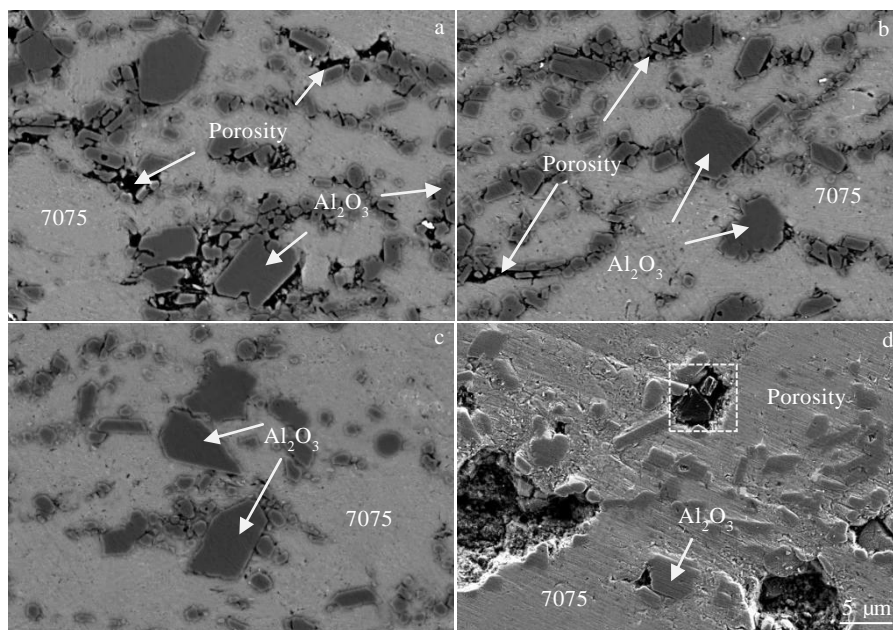


图 6 CS 涂层与 SLD 涂层的致密性对比

Fig.6 Comparison of the compactness of CS coating (a) and SLD coating: (b) 300 W, (c) 600 W, and (d) 900 W

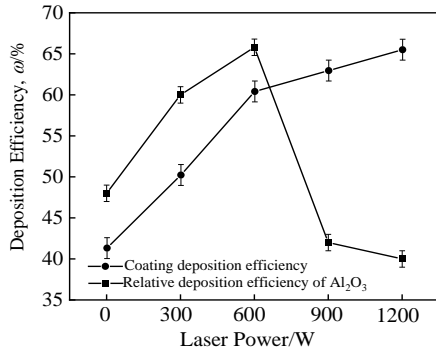


图 7 涂层的沉积效率和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的相对沉积效率

Fig.7 Coating deposition efficiency and relative deposition efficiency of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

境; 另一方面, 沉积过程中硬质 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒之间的相互碰撞反弹现象加剧, 影响铝合金颗粒和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的共同沉积, 因此复合涂层的整体沉积效率增速放缓。

### 2.3 涂层的物相分析

图 8 是 CS 涂层和不同激光功率下 SLD 涂层的 XRD 图谱。可以看出, 激光功率为 300 和 600 W 时的沉积层物相与冷喷涂层保持一致, 均由 Al 和 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成。图 9a 和 9c 展示了激光功率为 600 W 时涂层中

基体相的 EDS 点成分分析, 无氧化现象发生。当激光功率升高到 900 W 时, 涂层的 XRD 图谱分析中显示 MgO 相的存在。如图 9b 和 9d 所示, 900 W 时的涂层中基体上孔洞附近的 EDS 点成分分析表明涂层发生氧化。结合前面的显微组织分析结果, 超音速激光沉积过程中激光功率较低时不会引起涂层材料的氧化, 对粉末颗粒的加热提高了其塑性变形能力, 有利于强化相颗粒的沉积, 提高了涂层的致密度。然而, 激光功率较高的情况下, 过高的热输入导致了涂层发生氧化, 涂层的致密度下降。

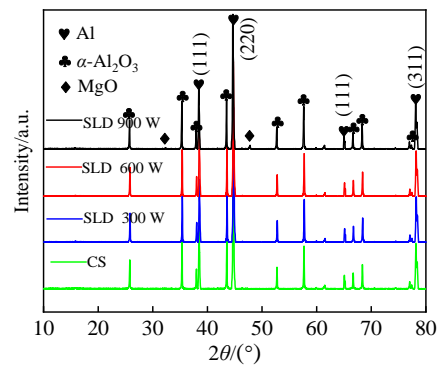


图 8 CS 涂层与 SLD 涂层的 XRD 图谱

Fig.8 XRD patterns of CS coating and SLD coating

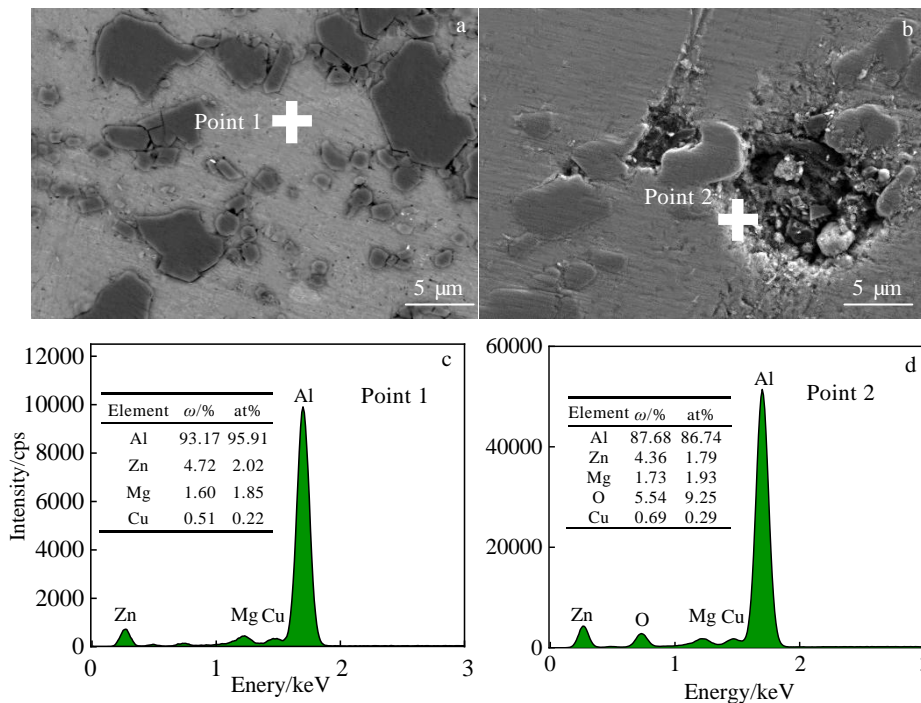


图 9 激光功率在 600 和 900 W 时的超音速激光沉积 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层的 SEM 像和 EDS 能谱分析

Fig.9 SEM images (a, b) and EDS analysis results (c, d) of supersonic laser deposited 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings at laser powers of 600 and 900 W

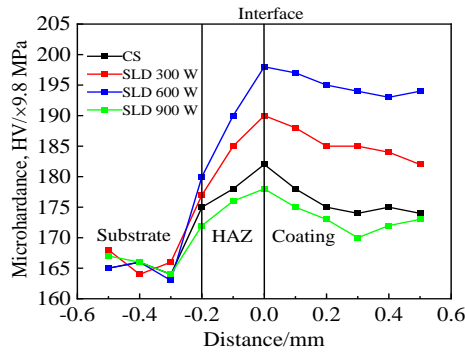


图 10 不同激光功率下超音速激光沉积 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层的显微硬度曲线

Fig.10 Microhardness curves of supersonic laser deposited 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings under various laser power conditions

## 2.4 基体及涂层的硬度分析

图 10 为单一冷喷涂和不同激光功率时的超音速激光沉积 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层从基体延伸到涂层方向上的显微硬度分布曲线,以结合界面(interface)为沉积层与基体的分界线,从基体沉积层开始自上而下测试,压痕间隔为 100 μm。由图 10 可以看出,7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层显微硬度的分布曲线呈现 3 个明显区域,分别为基体区域、热影响区(HAZ)和沉积层区域,硬度呈上升趋势。在涂层的沉积过程中,高速飞行颗粒对基体表面的撞击具有喷丸的效应,基体表层硬度增加。无激光引入的情况下,CS 涂层的平均显微硬度(HV)为 1715 MPa,高于基体的 HV 硬度 1617 MPa。随着激光功率的增加,SLD 涂层的平均显微硬度(HV)明显增加,在激光功率为 600 W 时达到 1911 MPa,涂层硬度的增加:一方面是由于激光功率的增加导致的铝合金颗粒的塑性变形增强,应变硬化现象增加,涂层处于压应力状态;另一方面归因于涂层中硬质强化相 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒含量的增加,同时硬质颗粒起到对铝合金基体的持续夯实作用,也有助于铝合金颗粒的进一步变形<sup>[26-27]</sup>。当激光功率为 900 W 时,SLD 涂层的平均显微硬度下降明显,这归因于较高激光功率引起铝合金颗粒表层发生氧化,导致涂层中铝合金颗粒与颗粒间的界面结合以及铝合金颗粒与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒间的界面结合强度下降。另外,涂层中孔隙率的升高和硬质强化相 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒含量的降低也是导致涂层硬度下降的原因。

## 3 结 论

1) 随激光功率的增加,涂层的厚度逐渐增加,涂层中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的分散均匀性明显提升,且涂层的孔隙率逐渐下降,归因于激光辐照对铝合金粉末颗粒塑性变形能力的提升。激光功率为 600 W 时,涂层的厚度为 1543 μm,孔隙率为 0.05%,较单一冷喷涂层的质量显著改善。然而,当激光功率超过 600 W 后,涂层的厚度增加放缓,孔隙率增大,且涂层中出现明显的氧化现象。

2) 随着激光功率的增加,涂层的沉积效率呈增加趋势。涂层中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末颗粒的相对沉积效率在激光功率为 600 W 时达到峰值 65%。当激光功率超过 600 W 后,涂层的沉积效率增加缓慢,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末颗粒的相对沉积效率出现明显下降,归因于激光功率增加导致的铝合金颗粒软化以及硬质 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的碰撞反弹。

3) 激光功率为 300 和 600 W 时,涂层在沉积过程中无氧化发生,与粉末原材料的物相一致。涂层的硬度(HV)随激光功率的增加明显,在激光功率为 600 W 时达到 1911 MPa,归因于铝合金粉末颗粒变形程度的增加和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的第二相强化作用。当激光功率提升至 900 W 时,较高激光功率引起铝合金颗粒表层氧化,涂层的孔隙率升高,且涂层中硬质强化相 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的含量降低,导致涂层的硬度下降明显。

## 参考文献 References

- [1] Zhang Y G, Chen Y L, Bian G X *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2021, 886: 161 231
- [2] Yin S, Cavaliere P, Aldwell B *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2018, 21: 628
- [3] Hu M, Ren X X, Sun J B *et al.* *International Journal of Photoenergy*[J], 2021, 2021: 1
- [4] Song M J, Wu L S, Liu J M *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2021, 133: 106 531
- [5] Gao Peihu(高培虎), Jia Han(贾 涵), Wang Wei(王 伟) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(9): 3055
- [6] Wang Q, Sun Q, Zhang M X *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2018, 352: 627
- [7] Li Changjiu(李长久) *et al.* *Thermal Spray Technology*(热喷涂技术)[J], 2018, 10(4): 1
- [8] Li Xu(李 旭), Wang Qiang(王 强), Mao Xuan(毛 轩) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(6): 2186
- [9] Xie X L, Yin S, Raelison R N *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 86: 20

- [10] Li Xu(李 旭), Wang Qiang(王 强), Niu Wenjuan(牛文娟) *et al. Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2019, 44(11): 1
- [11] Matejicek J, Sampath S. *Acta Materialia*[J], 2001, 49(11): 1993
- [12] Wang Q, Rui X, Wang Q J *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2019, 367: 288
- [13] Dayani S B, Shaha S K, Ghelichi R *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2018, 337: 150
- [14] Rao Y Q, Wang Q, Oka D *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2020, 383: 125 271
- [15] Rokni M R, Widener C A, Champagne V K *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2017, 310: 278
- [16] Meydanoglu O, Jodoin B, Kayali E S *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2013, 235: 108
- [17] Bray M, Cockburn A, O'Neill W *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2009, 203(19): 2851
- [18] Jones M, Cockburn A, Lupoi R *et al. Materials Letters*[J], 2014, 134: 295
- [19] Lupoi R, Sparkes M, Cockburn A *et al. Materials Letters*[J], 2011, 65(21-22): 3205
- [20] Yao J H, Li Z H, Li B *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 661: 526
- [21] Li Bo(李 波), Wu Lijuan(吴丽娟), Zang Xin(张 欣) *et al. China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2018, 31(5): 159
- [22] Li B, Jin Y, Yao J H *et al. Optics & Laser Technology*[J], 2018, 100: 27
- [23] Li B, Yao J H, Zhang Q L *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2015, 275: 58
- [24] Wu L J, Zhang G, Li B *et al. Coatings*[J], 2020, 10(3): 276
- [25] Zhang C, Zhang D B, Luo C *et al. Coatings*[J], 2021, 11(3): 267
- [26] Wang Q Spencer K, Birbilis N *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2010, 205(1): 50
- [27] Wang Q, Niu W J, Li X *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2021, 428: 127 847

## Microstructure and Properties of 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings Prepared by Supersonic Laser Deposition

Wang Qiang<sup>1,2</sup>, Li Nan<sup>1</sup>, Zhou Liucheng<sup>3</sup>, Dong Fang<sup>4</sup>, Liu Xin<sup>5</sup>, Niu Wenjuan<sup>1,2</sup>, Hu Ning<sup>1</sup>

(1. College of Metallurgy Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(2. Shaanxi Research Center of Metallurgical Engineering, Xi'an 710055, China)

(3. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

(4. Experiment Testing Institute, Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China)

(5. Key Laboratory of Special Equipment Safety and Energy saving for State Market Regulation, China Special Equipment Inspection and Research Institute (CSEI), Beijing 100029, China)

**Abstract:** Supersonic laser deposition is an innovative surface treatment technology, which combines supersonic cold spray technology and laser irradiation heating technology. It has the advantages of preparing hard metal composite coating with high deposition efficiency. In this work, composite coatings of hard 7075 Al alloy and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic particles were prepared on 7B04 Al alloy substrate by supersonic laser deposition technology. The effect of laser power on the deposition characteristics and mechanical properties of coatings was systematically studied. The microstructure, phase composition and microhardness of the coating were characterized and analyzed by field emission electron microscope (SEM), energy dispersive analyzer (EDS), X-ray diffractometer (XRD) and microhardness tester. The results show that with the increase of laser power, the thickness, density, deposition efficiency, hardness and the dispersion uniformity and deposited amount of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles in the coating increase. When the laser power is 600 W, the coating thickness reaches to 1543 μm, the coating porosity is only 0.05%, the relative deposition efficiency of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles is 65%, and the coating HV hardness rises to 1911 MPa. However, when the laser power is enhanced to 900 W, the thickness and deposition efficiency of the coating slow down, and the porosity increases significantly. The oxidation of coating materials is found, and the relative deposition efficiency of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles and the coating hardness decrease significantly. In summary, the appropriate amount of laser input is beneficial to improve the plastic deformation of aluminum alloy particles, resulting in significant enhancement of coating quality, while the excessive laser input leads to softening of aluminum alloy particles and even oxidation of powder materials, which deteriorate the quality of deposited coatings.

**Key words:** supersonic laser deposition; 7075/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating; deposition efficiency; microstructure; hardness

Corresponding author: Wang Qiang, Ph. D., Professor, College of Metallurgy Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China, E-mail: qiang.wang@xauat.edu.cn