

·封面文章·

超音速激光沉积技术:研究现状及发展趋势

姚建华^{1,2*}, 吴丽娟^{1,2}, 李波^{1,2}, 张群莉^{1,2}

¹浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310014;

²浙江省高端激光制造装备协同创新中心, 浙江 杭州 310014

摘要 超音速激光沉积(SLD)是新近发展起来的一种激光复合制造技术,该技术将激光辐照与冷喷涂相结合,利用高能激光束的热能与高速粒子动能的协同作用,实现了宽范围材料的沉积,并获得了特殊的微观组织和性能。结合本课题组在 SLD 领域的研究成果,从 SLD 原理、沉积材料范围、微观组织结构以及性能表征等方面综述了国内外的最新研究进展,从工艺探索、设备开发以及性能评估等方面对 SLD 技术未来的发展趋势和挑战进行了展望。

关键词 激光技术; 超音速激光沉积; 沉积原理; 相成分; 微观组织; 性能表征

中图分类号 TN249; TG146.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0300001

Research States and Development Tendency of Supersonic Laser Deposition Technology

Yao Jianhua^{1,2*}, Wu Lijuan^{1,2}, Li Bo^{1,2}, Zhang Qunli^{1,2}

¹Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China;

²Collaborative Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract Supersonic laser deposition (SLD) is a newly developed laser hybrid manufacturing technology, which combines the advantages of laser irradiation and cold spray. With the synergistic effects of thermal energy from laser irradiation and kinetic energy from high velocity particles impacting, a wider range of materials can be deposited by this technique and unique microstructures and properties can also be obtained. Based on the research results of the authors' team in the field of SLD, the latest research progress at home and abroad from the aspect of technique principle, deposition material range, phase and microstructure, and performance characterization are summarized. And then, the future trend and challenge of SLD technology are prospected from the perspective of process exploration, equipment development and property evaluation.

Key words laser technology; supersonic laser deposition (SLD); deposition mechanism; phase composition; microstructure; property characterization

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

激光复合制造技术是近些年先进制造技术的典型代表之一,其将激光技术与外部能场或其他工艺进行复合和有效调控,使其综合优点大于各工艺独自优点的简单叠加,即达到 $1+1>2$ 的效应,从而实现传统单一工艺无法实现的材料加工过程,或实现比传统单一工艺效率更高、质量更好、性能更优的制

造工艺^[1-3],有望满足高效、高质量、高性能的现代先进制造技术的要求,具有广阔的应用前景。

超音速激光沉积(SLD)技术是近几年发展起来的一种新型的激光复合制造技术,在表面改性领域引起了国内外学者的广泛关注^[4],该技术已被列为中国大百科全书(第三版)机械工程分卷高能束方向的词条之一。它在冷喷涂(CS)过程中利用高功率激光同步加热喷涂颗粒和基体,使两者得到有效软

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2018-11-23; 录用日期: 2018-12-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103601)、NSFC-浙江两化融合联合基金(U1509201)、国家自然科学基金(51701182)、浙江省自然科学基金(LQ17E050009)、高等学校学科创新引智计划(110000213920168001)

* E-mail: laser@zjut.edu.cn

化,以增强颗粒的变形能力,大大降低颗粒所需的临界沉积速度。由于临界沉积速度得以降低,因此可用价格廉价的氮气或压缩空气替代昂贵的氦气来加速喷涂颗粒,实现硬质材料的沉积,在降低成本的同时扩大了冷喷涂技术可沉积材料的范围。SLD 技术是 2008 年由英国剑桥大学 William O'Neill 课题组率先提出的^[5-6],他们采用该技术制备了 Stellite-6、钛、钨等材料涂层,并对其微观结构、界面结合情况以及力学性能进行了表征^[7-9],评估了 SLD 钨材料在靶材方面的应用潜力。本课题组与剑桥大学在材料沉积及装备开发等领域展开合作^[10-13],将沉积材料的范围从 Stellite-6、Ni60、Ti6Al4V 等单一材料扩展到了 Diamond/Ni60、WC/Stellite-6、WC/SS316L 等高硬度/高耐磨复合材料,并重点针对涂层的微观结构、成分、界面结合情况、耐磨/耐蚀性能进行了表征^[14-28],探索了该技术在泵阀表面耐磨/耐蚀涂层、汽轮机叶片抗汽蚀涂层以及工模具增材再制造方面的应用潜力^[29-33]。在表面改性研究的基础上,本课题组进一步开展了该技术在金属增材制造领域的研究,该技术可以用于铜合金、钛合金以及高温合金等材料的高效率固态沉积。

基于本课题组在 SLD 领域的研究成果,本文从 SLD 技术原理、沉积材料范围、微观结构、性能表征等方面综述国内外研究者在 SLD 领域的最新研究进展,并在此基础上对 SLD 技术未来的发展趋势和方向提出了建议。

2 SLD 技术的原理及特征

SLD 技术是基于冷喷涂发展起来的一种新型的激光复合制造技术,其理论依据是材料颗粒沉积所需的总能量(E_{total})由其动能(E_k)和热能(E_{th})组成^[34],具体表达式如下:

$$E_{total} = E_k + E_{th}, \quad (1)$$

$$E_k = \frac{1}{2}v_p^2, \quad (2)$$

$$E_{th} = c_p(T_p - T_{ref}), \quad (3)$$

式中: v_p 为颗粒的沉积速率; c_p 为材料的比热容; T_p 为颗粒沉积时的初始温度; T_{ref} 为参考温度(通常取室温)。在单一的冷喷涂过程中,材料颗粒沉积的总能量(E_{total})主要来源于其动能(E_k),因此需要较高的沉积速率(v_p)。对于特定的材料,沉积速率必须超过其临界沉积速率(v_{cr})才能实现有效沉积。材料颗粒的临界沉积速率(v_{cr})为

$$v_{cr} = \sqrt{a\sigma/\rho + bc_p(T_m - T_p)}, \quad (4)$$

式中: σ 为与温度相关的屈服强度; ρ 为颗粒的密度; T_m 为颗粒的熔点; a 、 b 为常数。由(1)~(4)式可以看出,材料颗粒沉积所需的总能量和临界沉积速率均与颗粒的初始温度有关。提高颗粒的初始温度,一方面可以增加其沉积时的热能,提高沉积总能量;另一方面可以通过加热软化效应来降低材料的屈服强度,从而降低其临界沉积速率。

基于上述理论,英国剑桥大学的 William O'Neill 课题组提出将激光加热与冷喷涂同步耦合的 SLD 技术^[5-6],其原理示意图如图 1 所示。在该技术中,高压气流(压缩空气或者氮气)分为两路:一路通过送粉器携带喷涂颗粒进入混合腔,另一路通过气体加热器进行预热,然后在混合腔内与携带喷涂颗粒的气流充分混合,形成气固两相流。混合后的气固两相流进入拉瓦尔喷嘴加速,喷涂颗粒以超音速撞击激光同步加热的基体表面形成沉积层。激光头与基体表面的法线呈一定的角度,拉瓦尔喷嘴与基体表面垂直,激光束与喷涂粉末会有部分重叠,因此激光不仅能对基体表面区域加热,还能对喷涂粉末进行预热,可以对二者起到软化的作用。喷涂区域的沉积温度可以通过红外高温仪实时监控,并可以通过闭环反馈系统实时调节激光的输出功率,保证沉积层制备过程中的沉积温度恒定。

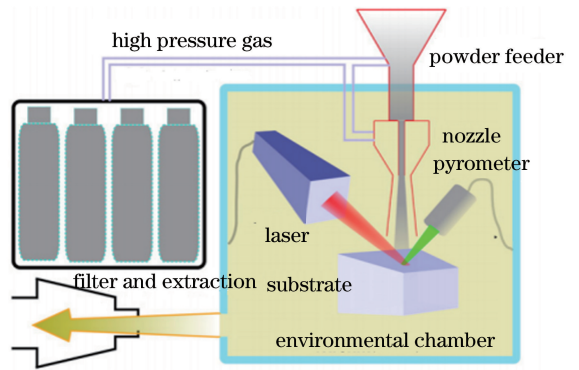


图 1 SLD 原理示意图^[5]

Fig. 1 Schematic of SLD principle^[5]

SLD 技术与单一冷喷涂或单一激光熔覆(LC)、热喷涂等技术相比,具有如下的技术特征:

1) SLD 技术是基于冷喷涂技术发展起来的材料沉积技术,不存在熔化凝固引起的冶金相变,可保持原始粉末成分不变;同时,沉积效率大幅提升,有望达到现有单一激光沉积制造的 4~10 倍。

2) 由于沉积过程中仍然保持了冷喷涂低热量输入的沉积特性,材料的沉积温度远低于 LC、热喷涂等技术,因此可有效避免高热输入中存在的相变、

变形、开裂等热致不良影响,尤其是在沉积一些热敏感材料时,优势更为明显。同时,在 SLD 过程中,由于激光的加热作用,沉积粉末和基体材料得到有效软化,增加了粉末和基体材料的塑性变形能力,因此所制备的沉积层较单一冷喷涂沉积层更致密,结合强度更高,有望获得高性能的沉积层。

3) SLD 技术由于激光的引入,沉积粉末的临界沉积速率较单一冷喷涂大大降低,可以在较低的撞击速率下形成沉积层。因此,可用压缩空气或氮气替代价格昂贵的氦气作为载气,从而大大降低制造成本。此外,临界沉积速率的降低可以提高沉积粉末的沉积效率和利用率,从而降低材料成本。

3 SLD 沉积层材料的范围

SLD 技术由于结合了冷喷涂与激光技术的优势,可在不同的基材上制备单一材料沉积层或复合材料沉积层。表 1 是目前文献报道的利用 SLD 技术所制备的沉积层的概况。

表 1 SLD 制备的沉积层的概况

Table 1 Summary of coatings prepared by supersonic laser deposition

Coating material	Substrate material	Reference
Ti	Steel tube	[6,8]
W	Mo	[9]
Ni60	Carbon steel	[17-18]
Diamond/Ni60	Carbon steel	[20-22]
WC/Stellite-6	Carbon steel	[23-24]
WC/SS316L	Steel	[25-28]
Al-Cu alloy	Ceramic	[35]
Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	[36]
SS316L	Carbon steel	[37]
Al	304L stainless steel	[38]
Cu	Carbon steel	[39]
Stellite-6	Carbon steel	[7,10-16,40-41]
Cu/Ni+Al ₂ O ₃	Carbon steel	[42]
Al-12%Si	Stainless steel	[43]
Ti+HAP	Ti-6Al-4V	[44]
Ni/Ni60	Carbon steel	[45]
WC/Ni60	Steel	[46]

本课题组利用 SLD 技术成功制备了无石墨化、无开裂、高金刚石含量的 Diamond/Ni60 复合沉积层^[20-22],这是单一 LC 或单一冷喷涂技术无法实现的。金刚石在高温、氧化气氛中易发生石墨化相变和氧化烧蚀^[47],Ni60 在 LC 过程中具有较高的裂纹敏感性^[48],因此,采用基于材料高温熔融过程的 LC 技术难以获得高质量的 Diamond/Ni60 复合沉积

层。而冷喷涂技术是依赖材料塑性变形实现沉积的,难以制备高硬度、低塑性的材料沉积层^[49]。虽然已有人采用冷喷涂技术成功制备了金属基金刚石复合沉积层^[50-52],但这些复合沉积层都以软质金属作为黏结相,尚未有人成功制备以高硬度金属(如 Ni60)作为黏结相的金刚石复合沉积层。此外,SLD 技术可以有效沉积铜、铝及其复合材料,这是单一 LC 技术难以实现的^[39,50-51]。

由此可见,SLD 技术可以突破一些传统沉积技术在沉积材料范围方面的局限性,在沉积材料和基体材料的选择上具有较大的灵活度,工艺适应性好,可满足宽领域范围内表面改性与再制造的需求。

4 SLD 沉积层的物相及微观结构

LC 技术利用高能密度的激光束产生的快速熔凝,在基材表面形成与基体相互熔合且成分与性能完全不同的合金熔覆层,其微观组织为典型的枝晶结构^[53]。冷喷涂技术是一种基于材料塑性变形在工件表面实现固态沉积的过程,可以保持原始粉末材料的物相和微观组织结构^[54]。而 SLD 技术则结合了 LC 和冷喷涂这两种技术的优势,其沉积层的物相以及微观组织结构的演变规律引起了国内外许多学者的关注。

4.1 物相组成

文献[10]和文献[7]分别对 SLD 制备的 Stellite-6 沉积层的物相组成进行了表征,并将其与原始粉末进行对比分析,得到了相同的结论:SLD 制备的 Stellite-6 仍然保持了原始粉末的物相,其物相主要由 Co、W₂C 和 Cr₇C₃ 组成。文献[17-18]对比分析了 SLD 与 LC 制备的 Ni60 沉积层的 X 射线衍射(XRD)图谱,结果显示:SLD 制备的 Ni60 沉积层与原始粉末的物相一致,均由 γ -Ni、FeNi_n(*n* 为原子个数)、Cr_mC_n(*m*、*n* 为原子个数)、Cr₃B、Ni₃Si₂ 组成;而 LC 制备的 Ni60 沉积层除了存在上述物相外,由于熔覆过程的稀释行为还生成了 Fe₅C₂ 相。文献[39]采用 XRD 和 X 射线能谱(EDS)研究了激光辐照对 SLD 制备的铜沉积层物相的影响,结果显示,SLD 制备的铜沉积层的物相与原始铜粉基本一致,几乎观察不到铜的氧化。

除了单一材料沉积层的物相表征外,文献[22]采用 Raman 光谱对比分析了 SLD 与 LC 制备的 Diamond/Ni60 复合沉积层的物相,结果如图 2 所示。可以看出,SLD 沉积层仅在 1335 cm⁻¹ 处出现了金刚石的特征拉曼峰,而 LC 沉积层除了金刚石

的特征峰以外,还在 1589 cm^{-1} 处出现了石墨的特征拉曼峰。这表明,SLD 技术可以很好地保持金刚石颗粒的完整性,而 LC 技术则由于热输入高会导致金刚石石墨化。文献[25,27]对比分析了 SLD 与冷喷涂 WC/SS316L 复合沉积层的物相,结果表明,SLD 沉积层的物相与冷喷涂沉积层完全一致,均由 WC 和 SS316L 组成,无 WC 分解。文献[24]对比分析了 SLD 与 LC 制备的 WC/Stellite-6 沉积层的物相,结果显示:SLD 制备的 WC/Stellite-6 沉积层的物相与原始粉末一致,由 WC、面心立方晶体结构的 $\text{Co}(\text{Co-FCC})$ 以及 Cr_{23}C_6 组成;而 LC 沉积层除了上述物相以外,还出现了 W_2C 、 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 等其他的碳化物。此外,文献[44]和文献[46]分别对 SLD 制备的 HAP/Ti 和 WC/Ni60 复合沉积层进行了物相分析,并得到了基本一致的结论,即 SLD 能够很好地保持原始复合粉末的物相,不会引起相变、分解以及氧化等不良效应。

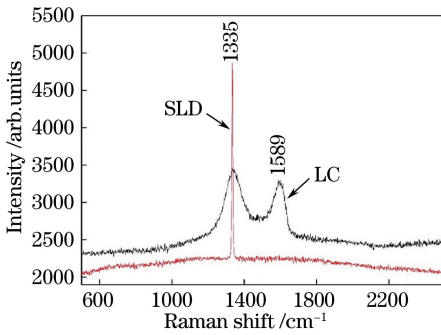


图 2 SLD 与 LC 制备的 Diamond/Ni60 沉积层的拉曼光谱^[22]
Fig. 2 Raman spectra of Diamond/Ni60 coatings prepared by SLD and LC^[22]

4.2 微观组织

文献[14-16]、文献[36]以及文献[7]分别对 SLD 制备的 Stellite-6 沉积层的微观组织进行了表征,并将其与 LC 沉积层进行了对比分析。结果显示,SLD 沉积层中能够看到挤压变形的 Stellite-6 颗粒(如图 3 所示),不同于 LC 快速熔凝形成的枝晶结构,SLD 沉积层较 LC 沉积层的晶粒更细小。文献[17-18]和文献[9]分别研究了 SLD 制备的 Ni60 和钨沉积层的微观组织,其与 SLD 制备的 Stellite-6 沉积层类似,即沉积层中存在固态颗粒,表明 SLD 过程仍然保持了冷喷涂技术热输入低的特征。

文献[20-28]研究了 SLD 制备的 Diamond/Ni60、WC/SS316L、WC/Stellite-6 等复合沉积层的微观组织。图 4 是 SLD 与 LC 制备的 Diamond/Ni60 复合沉积层的微观组织的对比。可以看出,

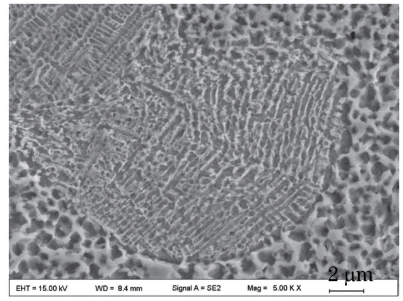


图 3 SLD 制备的 Stellite-6 沉积层的微观组织^[16]
Fig. 3 Microstructure of Stellite-6 coating prepared by SLD^[16]

SLD 沉积层中的金刚石颗粒保持了其结构的完整性,通过嵌入 Ni60 黏结相中形成了复合沉积层,而 LC 沉积层中的金刚石颗粒则出现了严重的石墨化。SLD 制备的 WC/SS316L 和 WC/Stellite-6 复合沉积层的微观组织与 Diamond/Ni60 沉积层相似,即 WC 颗粒通过嵌入塑性变形的黏结相中形成了复合沉积层,且 WC 颗粒结构完整,无分解相变,在复合沉积层中均匀分布。

SLD 技术虽然引入了激光加热,但其与 LC 中熔化过程的作用不同,只是通过快速加热对沉积材料和基体材料进行软化,但不熔化,且材料的沉积过程仍保持了冷喷涂的固态沉积机制,能有效避免喷涂粉末发生氧化、烧蚀、相变及晶粒长大等不良影响,保持原始粉末的物相和微观组织,基体没有任何微观组织上的变化,没有形成热影响区。因此,SLD 技术特别适合于易变形工件以及热敏感材料的表面沉积与再制造,能最大程度地确保材料性能的完整性。

5 SLD 沉积层的性能表征

SLD 沉积层的性能往往与其成分、微观组织等相关,因此 SLD 沉积层的性能也引起了国内外研究者的广泛关注。

5.1 沉积层的致密性

文献[6]对比分析了 SLD 与超音速火焰喷涂(HVOF)钛沉积层的孔隙率,结果显示,HVOF 钛沉积层的孔隙率高达 5.4%,而 SLD 钛沉积层的孔隙率仅为 0.5%,如图 5 所示;Li 等^[39]对比分析了 SLD 与冷喷涂铜沉积层的致密性,结果显示,冷喷涂铜沉积层的孔隙率高达 3.367%,而 SLD 铜沉积层的孔隙率仅为 0.08%,这与 Bray 等得到的结果一致,即激光辅助能够显著提高冷喷涂沉积层的致密性;文献[11]对比分析了 SLD 和 HVOF Stellite-6 沉积层的孔隙率,结果显示:SLD 沉积层的孔隙率

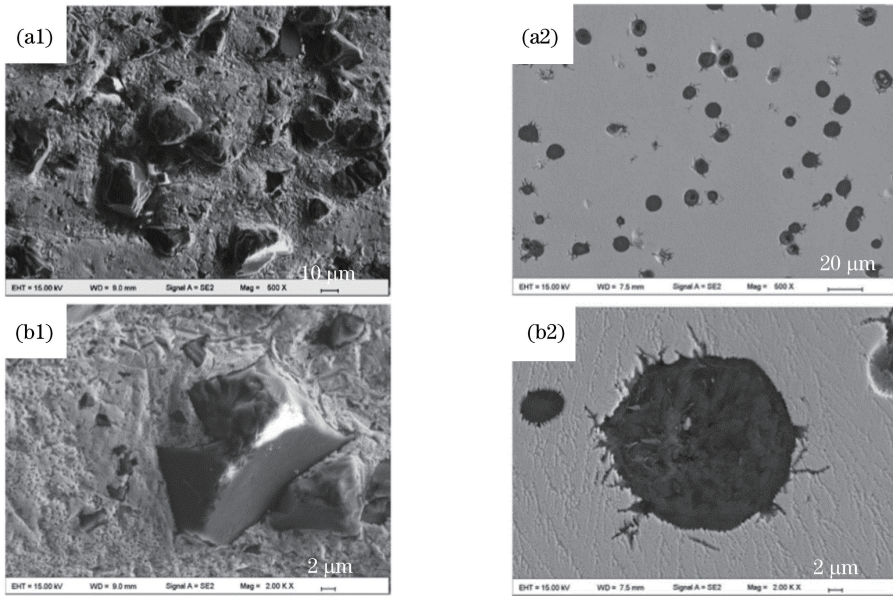


图 4 不同方法制备得到的 Diamond/Ni60 复合沉积层的微观组织^[22]。(a) SLD; (b) LC

Fig. 4 Microstructure of Diamond/Ni60 composite coatings by different preparation methods^[22]. (a) SLD; (b) LC

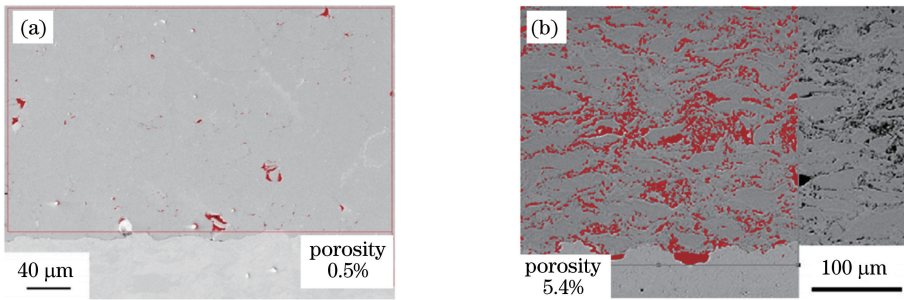


图 5 不同方法制备得到的钛沉积层的孔隙率^[6]。(a) SLD; (b) HVOF

Fig. 5 Porosity of Ti coatings prepared by different methods^[6]. (a) SLD; (b) HVOF

(0.2%) 远低于 HVOF 沉积层的孔隙率(3.0%);文献[43]研究了激光功率对 SLD Al-12%Si 沉积层孔隙率的影响,结果表明,沉积层孔隙率随激光功率的增加而先升高后降低,当激光功率为 2.5 kW 时,孔隙率最低,仅为 0.16%;文献[27]研究了激光辐照温度对 SLD 制备的 WC/SS316L 复合沉积层致密性的影响,结果显示,激光辐照温度的提高有利于改善复合沉积层的致密性。

单一冷喷涂沉积层致密性较差的主要原因是喷涂粉末的塑性变形不充分。SLD 由于引入了激光对沉积粉末和基体进行加热,粉末得到有效软化,在沉积过程中的塑性变形更充分,粉末之间的结合更好,因此沉积层的致密性更高。此外,SLD 技术在制备致密的金属-陶瓷复合沉积层方面具有极大的优势,激光辐照能有效软化金属黏结相,脆硬的陶瓷颗粒高速撞击并嵌入黏结相中形成致密结合的复合沉积层。

5.2 结合性能

SLD 沉积层的结合性能(包括沉积层与基体之间的结合以及沉积层内部颗粒之间的结合)也是国内外学者目前关注的一个焦点。文献[55]利用 SLD 技术分别在 Al6060 和 Fe52 基体上制备了铝沉积层,并利用拉伸法对沉积层/基体界面的结合强度进行了测试,结果显示,Al/Al6060 和 Al/Fe52 界面的结合强度分别为冷喷涂的 1.8 倍和 4 倍;文献[35]对比分析了冷喷涂和 SLD 制备的铜沉积层/基体的结合强度,结果显示,SLD 制备的铜沉积层/基体的结合强度是冷喷涂沉积层的 4 倍;文献[16-18]对 SLD 制备的 Ni60 和 Stellite-6 沉积层/基体的界面结合情况进行了表征。以上研究结果显示,由于激光的引入,沉积层/基体界面结合处可以得到额外的热量,有利于界面处元素的扩散,从而形成部分冶金结合,使得 SLD 沉积层的界面结合机制从冷喷涂的机械结合向冶金结

合与机械结合共存的混合机制转变,从而提高了界面的结合强度。图 6 是 SLD 制备的 Ni60 沉积层/基体界面的结合特征,可以看出,界面处除了材料混合导致的机械结合以外,还出现了元素扩散层。

除了沉积层/基体界面的结合强度以外,沉积层内部的结合强度也是非常重要的。文献[9]利用三点弯曲实验测得 SLD 制备的钨沉积层的内部结合强度高达 724 MPa,与锻态金属钨的拉伸强度

相当。文献[14]利用相同的方法测试了 SLD 制备的 Stellite-6 沉积层的强度,并对断口形貌进行了分析,结果发现:SLD 沉积层的强度与 LC 沉积层的强度相当;SLD 沉积层的断裂属于韧性断裂,不同于 LC 沉积层的脆性断裂。文献[24]研究了 SLD 制备的 WC/Stellite-6 复合沉积层中 WC 增强相与 Stellite-6 黏结相的界面结合情况,结果发现在增强相/黏结相界面结合处存在过渡层,出现了元素扩散现象,具有冶金结合的特征。

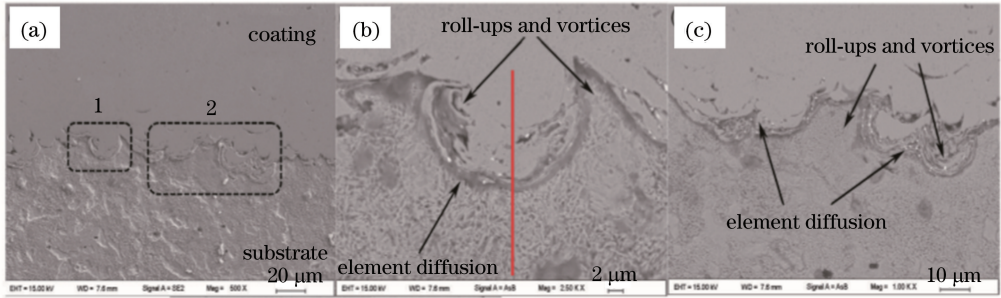


图 6 SLD 制备的 Ni60 沉积层/基体界面的结合特征^[18]。(a)沉积层/基体界面结合区;(b)区域 1 的放大图;(c)区域 2 的放大图

Fig. 6 Coating/substrate interfacial bonding characteristics of Ni60 coating prepared by SLD^[18].

(a) Coating/substrate bonding zone; (b) amplification of area 1 in Fig. 6(a); (c) amplification of area 2 in Fig. 6(a)

在单一的冷喷涂技术中,喷涂材料发生绝热剪切失稳并在压力作用下产生塑性流,导致颗粒间、颗粒与基体材料间的混合和机械咬合,沉积层/基体间呈现机械结合,结合强度不高,当厚度达到一定程度时将导致剥落。SLD 在冷喷涂的基础上引入激光同步辐照,在激光加热和绝热升温的作用下,沉积层内部和界面处的元素发生扩散,形成冶金结合。SLD 沉积层内部、沉积层/基体的结合机制为机械咬合和冶金结合共存,沉积层结合性能远优于冷喷涂沉积层的结合性能,因此可以实现任意厚度的有效沉积。

5.3 耐磨损性能

材料的耐磨损性能往往与其硬度有一定的联

系,因此国内外许多学者对 SLD 沉积层的显微硬度进行了表征。文献[43]研究了激光功率对 SLD 制备的 Al-12%Si 沉积层显微硬度的影响,结果显示,当激光功率为 2.5 kW 时,沉积层具有均匀的显微硬度,这与沉积层中无孔隙、裂纹有关;文献[39]通过研究发现,由于激光辐照软化效应,SLD 制备的铜沉积层的显微硬度会随着激光功率的增大而减小;文献[16-17]对比研究了 SLD 与 LC 制备的 Stellite-6 和 Ni60 沉积层的显微硬度(如图 7 所示,HAZ 为热影响区,BZ 为界面结合处),结果表明,由于 SLD 过程中高速颗粒碰撞产生的加工硬化现象,SLD 沉积层的显微硬度高于 LC 沉积层,从而表现出较优异的耐磨损性能。

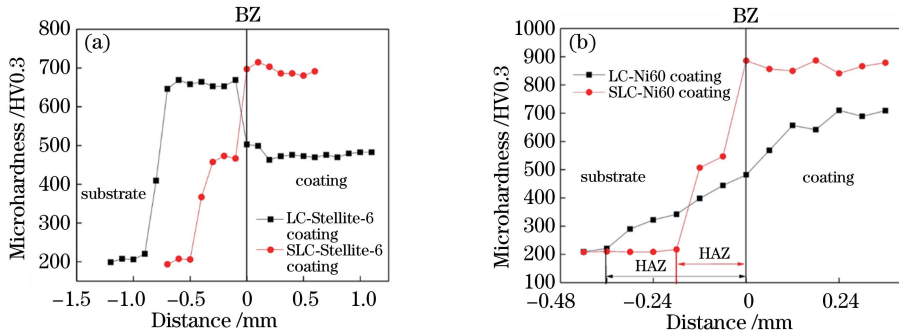


图 7 SLD 与 LC 制备的沉积层的显微硬度。(a) Stellite-6^[16]; (b) Ni60^[17]

Fig. 7 Microhardness of the coatings prepared by SLD and LC. (a) Stellite-6^[16]; (b) Ni60^[17]

除了从显微硬度的角度来间接反映 SLD 沉积层的耐磨损性能以外,国内外学者也通过摩擦磨损实验来直接表征 SLD 沉积层的耐磨损性能。例如:文献[10]对比研究了 SLD 与 LC 制备的 Stellite-6 沉积层的耐磨损性能,结果表明,SLD 沉积层较 LC 沉积层具有更低的摩擦因数,其质量磨损量也小于 LC 沉积层;文献[17]对比研究了 SLD 与 LC 制备的 Ni60 沉积层的耐磨损性能,得到的结论与文献[10]基本一致,即 SLD 沉积层较 LC 沉积层具有更低的摩擦因数、更窄的磨痕宽度以及更小的体积磨

损量,这归功于 SLD 沉积层中细小的晶粒以及碳化物/硼化物在镍基体中的均匀分布;文献[24,27]研究了 SLD 制备的复合沉积层(如 WC/SS316L、WC/Stellite-6)的耐磨损性能,并将其与 LC 沉积层的耐磨损性能进了对比,结果如图 8 所示,研究结果表明,SLD 沉积层的耐磨损性能优于 LC 沉积层,原因在于 SLD 沉积层能够保持 WC 颗粒的完整性,且 WC 颗粒在复合沉积层中的含量高、分布均匀、与黏结相结合良好,从而使得沉积层表现出优良的耐磨损性能。

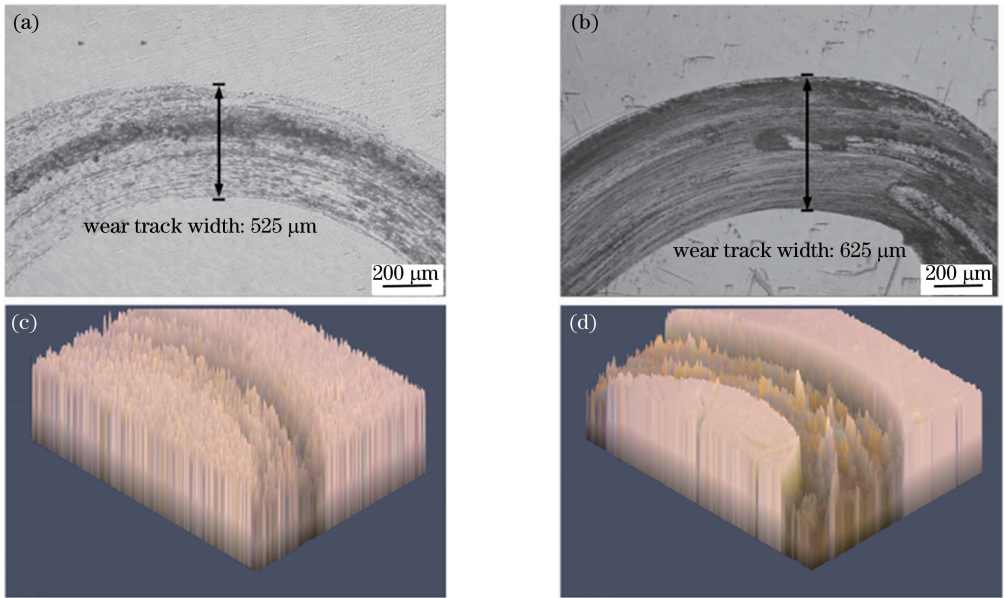


图 8 SLD 和 LC 制备的 WC/Stellite-6 沉积层的磨痕^[24]。(a) SLD,磨痕的低倍形貌; (b) LC,磨痕的低倍形貌;(c) SLD,磨痕的三维形貌;(d) LC,磨痕的三维形貌

Fig. 8 Worn surface of WC/Stellite-6 coatings prepared by SLD and LC^[24]. (a) SLD, worn surface at low magnification; (b) LC, worn surface at low magnification; (c) SLD, three-dimensional morphology; (d) LC, three-dimensional morphology

沉积层的耐磨损性能与沉积层的硬度、附着力、柔韧性等物理性能密切相关。在 SLD 过程中,喷涂颗粒与沉积区域连续高速撞击,使得两者产生剧烈的塑性变形。在材料塑性变形过程中,晶粒发生滑移,位错密度不断增加,产生固定割阶和位错缠结等,阻碍位错的进一步运动,沉积层产生加工硬化现象,使得沉积层的硬度增大。同时,SLD 技术保持了原始材料的成分和精细结构,确保了沉积层的韧性。此外,由于激光加热,沉积层内的部分沉积颗粒之间发生元素互渗,增大了沉积层内部的结合强度。因此,SLD 特征对沉积层的硬度、附着力、柔韧性等方面的贡献导致制备的沉积层的耐磨性能优于 LC 和冷喷涂沉积层。

5.4 耐腐蚀性能

耐腐蚀性能是材料的一种非常重要的性能,因

此 SLD 沉积层的耐腐蚀性能也是国内外研究者关注的焦点。文献[42]研究了 SLD 制备的 Cu/Ni+Al₂O₃ 沉积层的耐腐蚀性能,结果显示,由于激光辐照可以增加沉积层的致密性,因此 SLD 沉积层抵抗溶液渗入的能力要高于冷喷涂沉积层。文献[44]研究了 Ti+HAP 复合沉积层的生物耐腐蚀性能,结果表明,HAP 的添加能显著提升纯钛的腐蚀热力学性能。文献[27]研究了 SLD 与 LC 制备的 Ni60 沉积层的耐腐蚀性能,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),结果如图 9 所示,可见:SLD 沉积层较 LC 沉积层具有更高的腐蚀电位(E)和极化电阻以及更低的腐蚀电流密度(I),这主要是由于基体材料中的铁和碳元素进入了 LC 沉积层中,稀释了镍和铬元素的含量,从而导致耐腐蚀性能降低。文献[28]研究了 SLD 制备的 WC/SS316L 复合沉积层的电

化学性能, 研究表明, 黏结相 SS316L 在激光辐照和后续颗粒的撞击下实现致密结合, 而且黏结相在沉积过程中发生了剧烈的塑性变形, 内部的位错密度增大, 击穿电位发生正移, 使得耐腐蚀性能得以提高。

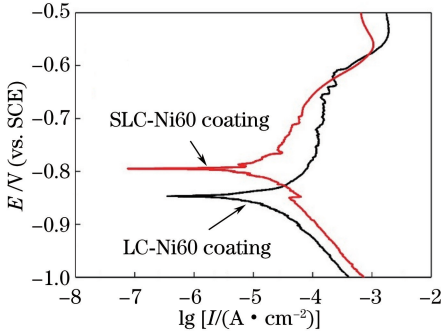


图 9 SLD 与 LC 制备的 Ni60 沉积层的极化曲线^[27]

Fig. 9 Polarization curves of Ni60 coatings prepared by SLD and LC^[27]

SLD 过程中, 在激光辐照软化以及粒子高速冲击的夯实作用下, 沉积层的孔隙率较低, 沉积层表面较为致密, 能有效抵挡腐蚀介质的渗入, 为基体提供有效的保护作用。另外, SLD 是一个固态沉积过程, 能避免基体对沉积层的稀释, 保留原始喷涂材料的成分和相结构, 继承喷涂材料优异的耐腐蚀性能。

6 SLD 的发展趋势

SLD 技术结合了冷喷涂和激光技术的优势, 在沉积效率、物相/成分控制、性能调控等方面较传统的 LC、热喷涂、冷喷涂等材料沉积技术具有一定的优势, 是一种非常有潜力的制造技术, 它不仅是一种新的表面改性及再制造技术, 还有望能成为一种新的增材制造(3D 打印)技术, 这将大大突破增材制造的效率、材料范围和质量控制等难题, 是极具发展前景的增材制造技术之一。但若要大范围推广该技术, 还需要在以下几个方面继续突破:

1) SLD 是一种复合技术, 涉及的工艺参数众多, 若单纯依靠实验手段去优化工艺参数, 将会费时费力。因此, 非常有必要采用数值模拟与实验相结合的方法去探索各参数之间的相互影响规律, 建立激光与超音速粒子能量场之间的耦合机制, 阐明激光与沉积粒子的相互作用关系以及沉积机理, 从而为工艺参数的优化和选择提供理论指导。

2) SLD 系统涉及多个关键单元, 绝非是它们之间简单的叠加, 如何实现多能场之间的协同耦合与智能化控制将是难点, 尤其是如何采用该技术实现

增材制造, 如何有效实施路径规划与分层。因此, 研制专用工艺软件及成套装备迫在眉睫。

3) 由于 SLD 对粉末的加速性能与其塑性等密切相关, 因此, 需要进一步针对 SLD 技术研究满足 SLD 条件的材料设计方法, 获得适用于该项技术的材料体系。

参 考 文 献

- [1] Lauwers B, Klocke F, Klink A, *et al.* Hybrid processes in manufacturing[J]. CIRP Annals, 2014, 63(2): 561-583.
- [2] Yao J H. Research progress and future prospect of laser hybrid manufacturing technology [J]. Electromachining & Mould, 2017(S1): 4-11. 姚建华. 激光复合制造技术研究现状及展望[J]. 电加工与模具, 2017(S1): 4-11.
- [3] Wang H Y, Sun J, Liu L M. Formation and controlling mechanism of pores in laser-TIG hybrid welding of 6061-T6 aluminum alloys at high speed [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45 (3): 0302001. 王红阳, 孙佳, 刘黎明. 6061-T6 铝合金激光-电弧复合高速焊气孔形成及控制机制[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 0302001.
- [4] 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.
- [5] Cockburn A, Bray M, O'Neill W. The laser-assisted cold spray process [J]. The Laser User, 2008, 53: 30-31.
- [6] Bray M, Cockburn A, O'Neill W. The laser-assisted cold spray process and deposit characterisation [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203 (19): 2851-2857.
- [7] Lupoi R, Cockburn A, Bryan C, *et al.* Hardfacing steel with nanostructured coatings of Stellite-6 by supersonic laser deposition [J]. Light: Science & Applications, 2012, 1(5): e10.
- [8] Lupoi R, Sparkes M, Cockburn A, *et al.* High speed titanium coatings by supersonic laser deposition [J]. Materials Letters, 2011, 65 (21/22): 3205-3207.
- [9] Jones M, Cockburn A, Lupoi R, *et al.* Solid-state manufacturing of tungsten deposits onto molybdenum substrates with supersonic laser deposition [J]. Materials Letters, 2014, 134(3): 295-297.
- [10] Luo F, Cockburn A, Lupoi R, *et al.* Performance comparison of Stellite 6[®] deposited on steel using supersonic laser deposition and laser cladding [J].

- Surface & Coatings Technology, 2012, 212: 119-127.
- [11] Luo F, Lupoi R, Cockburn A, *et al.* Characteristics of Stellite 6 deposited by supersonic laser deposition under optimized parameters[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2013, 20(2): 52-57.
- [12] Luo F, Kong F Z, William O, *et al.* Effect of laser heating temperature on coating characteristics of Stellite 6 deposited by cold spray [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(7): 840-846.
骆芳, 孔凡志, 威廉·欧尼尔, 等. 激光加热温度对冷喷 Stellite 6 合金沉积层表面特性的影响[J]. 兵工学报, 2012, 33(7): 840-846.
- [13] Luo F, Cockburn A, Cai D B, *et al.* Simulation analysis of Stellite 6[®] particle impact on steel substrate in supersonic laser deposition process[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(3): 378-393.
- [14] 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.
- [15] Li B, Jin Y, Yao J H, *et al.* Influence of laser irradiation on deposition characteristics of cold sprayed Stellite-6 coatings [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 100: 27-39.
- [16] Li Z H, Yang L J, Zhang Q L, *et al.* Comparative research of Stellite 6 coatings prepared by supersonic laser deposition and laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0503008.
李祉宏, 杨理京, 张群莉, 等. 超音速激光沉积与激光熔覆 Stellite 6 涂层的对比研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503008.
- [17] 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.
- [18] Yang L J, Li Z H, Li B, *et al.* Microstructure and deposition mechanism of Ni60 coatings prepared by supersonic laser deposition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0306005.
杨理京, 李祉宏, 李波, 等. 超音速激光沉积法制备 Ni60 涂层的显微组织及沉积机理[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0306005.
- [19] Li B, Wu L J, Zhang X, *et al.* Microstructure and corrosion-resistant property of Ti6Al4V coating prepared by supersonic laser deposition [J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 159-166.
李波, 吴丽娟, 张欣, 等. 超音速激光沉积 Ti6Al4V 涂层的微观结构及耐腐蚀性能 [J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 159-166.
- [20] Yang L J, Li Z H, Li B, *et al.* Microstructure of diamond/Ni60 composite coatings produced by supersonic laser deposition and laser cladding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(6): 221-227.
杨理京, 李祉宏, 李波, 等. 超音速激光沉积与激光熔覆金刚石强化涂层的组织形态 [J]. 材料热处理学报, 2016, 37(6): 221-227.
- [21] 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 and Related Materials, 2015, 58: 139-148.
- [22] 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.
- [23] Li Z H, Yang L J, Li B, *et al.* Microstructural characteristics of WC/Stellite 6 composite coating prepared by supersonic laser deposition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1106002.
李祉宏, 杨理京, 李波, 等. 超音速激光沉积 WC/Stellite 6 复合涂层显微组织特征的研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1106002.
- [24] 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 & Coatings Technology, 2017, 321: 386-396.
- [25] Li B, Li P H, Zhang Q L, *et al.* Study on microstructure and wear-resistant properties of WC/SS316L composite coatings prepared by supersonic laser deposition [J]. Electromachining & Mould, 2016(1): 35-39.
李波, 李鹏辉, 张群莉, 等. 超音速激光沉积 WC/SS316L 复合涂层微观结构及磨损性能研究 [J]. 电加工与模具, 2016(1): 35-39.
- [26] Li P H, Li B, Zhang Q L, *et al.* Comparative study on microstructure and performance of WC/SS316L composite coatings prepared by supersonic laser deposition and laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1102002.
李鹏辉, 李波, 张群莉, 等. 超音速激光沉积与激光熔覆 WC/SS316L 复合沉积层显微组织与性能的对比研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1102002.
- [27] Li B, Yao J H, Zhang Q L, *et al.* Microstructure and tribological performance of tungsten carbide reinforced stainless steel composite coatings by supersonic laser deposition [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 275: 58-68.
- [28] Jin Y, Li B, Zhang X, *et al.* Deposition behavior and electrochemical failure mechanism of WC/SS316L

- metal matrix composites prepared by supersonic laser deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0102001.
- 金琰, 李波, 张欣, 等. 金属基复合材料 WC/SS316L 超音速激光沉积行为及电化学失效机理[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0102001.
- [29] Yao J H, Li P H, Li B, *et al.* Cold spraying method for controllable laser spot energy distribution: 106283030A[P]. 2017-01-04.
姚建华, 李鹏辉, 李波, 等. 一种可控激光光斑能量分布的冷喷涂方法: 106283030A[P]. 2017-01-04.
- [30] Yao J H, Li B, Chen Z J, *et al.* Metal-based/diamond laser composite coating and preparation method thereof: 104018156A[P]. 2014-09-03.
姚建华, 李波, 陈智君, 等. 一种金属基/金刚石激光复合涂层及其制备方法: 104018156A[P]. 2014-09-03.
- [31] Yao J H, Yang L J, Li B, *et al.* Method for supersonic laser deposition of low stress coating: 104005021A[P]. 2014-08-27.
姚建华, 杨理京, 李波, 等. 一种超音速激光沉积低应力涂层的方法: 104005021A[P]. 2014-08-27.
- [32] Yao J H, Li P H, Li B. Coaxial powder feeding device for supersonic laser deposition: 206089807U [P]. 2017-04-12.
姚建华, 李鹏辉, 李波. 一种超音速激光沉积同轴送粉装置: 206089807U[P]. 2017-04-12.
- [33] Yao J H, Li B, Chen Z J, *et al.* Metal-based/diamond laser composite coating and preparation method thereof: 9945034[P]. 2018-04-17.
- [34] Assadi H, Kreye H, Gärtner F, *et al.* Cold spraying- a materials perspective [J]. Acta Materialia, 2016, 116: 382-407.
- [35] Riveiro A, Lusquinos F, Comesana R, *et al.* Supersonic laser spray of aluminium alloy on a ceramic substrate [J]. Applied Surface Science, 2007, 254(4): 926-929.
- [36] Birt A M, Champagne V K, Sisson R D, *et al.* Statistically guided development of laser-assisted cold spray for microstructural control of Ti-6Al-4V[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(4): 1931-1943.
- [37] Gorunov A I, Gilmudtinov A K. Investigation of coatings of austenitic steels produced by supersonic laser deposition [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 88: 157-165.
- [38] Olakanmi E O. Optimization of the quality characteristics of laser-assisted cold-sprayed (LACS) aluminum coatings with Taguchi design of experiments (DOE) [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(11): 1490-1499.
- [39] Li B, Yang L J, Li Z H, *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.
- [40] Yuan L J, Luo F, Yao J H. Deposition behavior at different substrate temperatures by using supersonic laser deposition [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2013, 20(10): 87-93.
- [41] Lu Y H, Yuan L J, Cai D B, *et al.* Effect of the process parameters on the indentation size of particle deposited using supersonic laser deposition[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(10): 2349-2353.
- [42] Kulmala M, Vuoristo P. Influence of process conditions in laser-assisted low-pressure cold spraying [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(18): 4503-4508.
- [43] Olakanmi E O, Tlotleng M, Meacock C, *et al.* Deposition mechanism and microstructure of laser-assisted cold-sprayed (LACS) Al-12 wt.% Si coatings: effects of laser power[J]. JOM, 2013, 65(6): 776-783.
- [44] Tlotleng M, Akinlabi E, Shukla M, *et al.* Microstructural and mechanical evaluation of laser-assisted cold sprayed bio-ceramic coatings: potential use for biomedical applications [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(3): 423-435.
- [45] Yao J H, Yang L J, Li B, *et al.* Deposition characteristics and microstructure of a Ni60-Ni composite coating produced by supersonic laser deposition[J]. Lasers in Engineering, 2017, 36: 117-131.
- [46] Luo F, Cockburn A, Sparkes M, *et al.* Performance characterization of Ni60-WC coating on steel processed with supersonic laser deposition [J]. Defence Technology, 2015, 11(1): 35-47.
- [47] de Feudis M, Caricato A P, Taurino A, *et al.* Diamond graphitization by laser-writing for all-carbon detector applications [J]. Diamond & Related Materials, 2017, 75: 25-33.
- [48] Wang C L, Gao Y, Wang R, *et al.* Microstructure of laser-clad Ni60 cladding layers added with different amounts of rare-earth oxides on 6063 Al alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 1099-1107.
- [49] Moridi A, Hassani-Gangaraj S M, Guagliano M, *et al.* Cold spray coating: review of material systems and future perspectives [J]. Surface Engineering, 2014, 30(6): 369-395.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] Wang Z, Chen X Y, Gong Y F, *et al.* Tribocorrosion behaviours of cold-sprayed diamond-Cu composite coatings in artificial sea water [J]. *Surface Engineering*, 2018, 34(5): 392-398.
- [53] Guan Z Z. *Handbook of laser processing* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2007.
- 关振中. *激光加工工艺手册* [M]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [54] Zhou X L, Zhang J S, Wu X K. *Advanced cold spray technology and its applications* [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
周香林, 张济山, 巫湘坤. *先进冷喷涂技术与应用* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [55] Koivuluoto H, Milanti A, Bolelli G, *et al.* Structures and properties of laser-assisted cold-sprayed aluminum coatings [J]. *Materials Science Forum*, 2016, 879: 984-989.