

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

李鹏辉^{1,2} 李波^{1,2} 张群莉^{1,2} 杨理京^{1,2} 李祉宏^{1,2} 姚建华^{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 采用超音速激光沉积(SLD)和激光熔覆(LC)在 316L 不锈钢基体上制备了 WC/SS316L 复合沉积层,对沉积层的宏观形貌、WC 分布、显微组织、相成分及磨损性能进行了对比分析。结果表明,LC 多道搭接的沉积层中有明显的宏观裂纹,而 SLD 沉积层表面平整致密,无宏观缺陷。在 LC 沉积层中,陶瓷相 WC 呈部分聚集的不均匀分布,而在 SLD 沉积层中,陶瓷相 WC 呈弥散状的均匀分布。LC 沉积层组织成分分布不均匀,且产生了有害相,而 SLD 沉积层保持了沉积粉末原有的组织和性能,且表现出形变强化效果。SLD 沉积层的摩擦系数比 LC 沉积层低 28%,表现出较优的抗磨损性能。

关键词 激光技术; 超音速激光沉积; 激光熔覆; 陶瓷-金属复合沉积层; 显微组织; 耐磨性

中图分类号 TN249; TG146.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1102002

Comparative Study on Microstructure and Performance of WC/SS316L Composite Coatings Prepared by Supersonic Laser Deposition and Laser Cladding

Li Penghui^{1,2} Li Bo^{1,2} Zhang Qunli^{1,2} Yang Lijing^{1,2} Li Zhihong^{1,2} Yao Jianhua^{1,2}

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

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

Abstract The WC/SS316L composite coatings are successfully deposited on the surface of 316L stainless steel by both the supersonic laser deposition (SLD) and the traditional laser cladding (LC) technologies. The macroscopic morphology, WC distribution, microstructure, phase composition and wear-resistant property of the as-deposited coatings are comparatively studied. The results show that the multi-pass overlapped coating of LC has obvious macroscopic cracks, while the surface of SLD coating keeps smooth and compact without macroscopic defects. In the LC coating, the ceramic WC particles unevenly distribute, while in the SLD coating they uniformly scatter. In the LC coating, the microstructure distribution is non-uniform and is along with the generation of harmful phase, while in the SLD coating, the deposited powder maintains its original microstructure and performance and the severe plastic deformation can also be observed. The friction coefficient of the SLD coating is 28% lower than that of the LC coating, and thus it exhibits a better wear-resistant property.

Key words laser technique; supersonic laser deposition; laser cladding; ceramic-metal composite coating; microstructure; wear-resistant performance

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 160.3900;

收稿日期: 2016-07-05; **收到修改稿日期:** 2016-07-29

基金项目: NSFC-浙江两化融合联合基金(U1509201)

作者简介: 李鹏辉(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光复合表面改性技术方面的研究。E-mail: phyy0607@163.com

导师简介: 姚建华(1965—),男,博士,教授,主要从事激光复合表面改性技术方面的研究。

E-mail: laser@zjut.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

陶瓷-金属复合沉积层兼具陶瓷相和金属(或合金)粘结相的综合性能^[1-2],在金属表面改性领域得到了广泛应用。传统的激光熔覆(LC)技术在制备陶瓷-金属复合沉积层时是利用高能量密度的激光直接加热熔化熔覆材料和金属基体表层材料,随后依靠基体的自冷却作用快速凝固形成冶金结合的陶瓷-金属复合沉积层^[3-4]。由于在熔覆过程中有高热量的输入,熔覆粉末易发生氧化、分解、相变、烧损等,特别是热敏感陶瓷相(如 WC、金刚石等),很难在复合沉积层的制备过程中保持形貌和成分的完整性。此外,较高残余热应力的存在易使复合沉积层产生裂纹^[5-6]。

相对于高热输入的沉积层制备技术,冷喷涂(CS)技术是一种低热输入的沉积层制备方法,它通过压缩气体使喷涂颗粒在全固态下高速撞击基体并发生塑性变形,从而在基体表面形成沉积层^[7]。利用冷喷涂技术制备陶瓷-金属复合沉积层时,通常以软质金属粉末作为粘结相,在硬质陶瓷相中嵌入变形的金属粘结相而形成复合沉积层^[8-10]。由于冷喷涂复合沉积层的形成对粘结相的塑性变形能力依赖度高,金属粘结相变形不充分会严重影响沉积层质量^[11]。针对单一冷喷涂技术的不足,国内外学者提出了超音速激光沉积(SLD)技术^[12-14],即把激光辐照引入到冷喷涂加工过程中,通过激光辐照对喷涂颗粒和基板进行加热软化处理,从而提高沉积层的使用性能。

基于SLD的特点,本文利用该技术在316L奥氏体不锈钢基材上制备了WC增强的陶瓷-金属基复合沉积层,使其兼具粘结相不锈钢的耐腐蚀性能和增强相WC的耐磨损性能,并对该沉积层与LC沉积层的宏观形貌、显微组织、陶瓷相WC分布及相成分、耐磨性能等方面进行了系统的对比研究。

2 实验材料和方法

2.1 实验材料

SLD与LC采用的粘结相粉末是SS316L奥氏体不锈钢粉末。SLD采用的WC粉末粒径为10~30 μm,LC采用的WC粉末粒径为45~75 μm。粉末材料的扫描电镜(SEM)图如图1所示。粘结相SS316L与强化相WC体积比为7:3,基体均选用316L不锈钢。

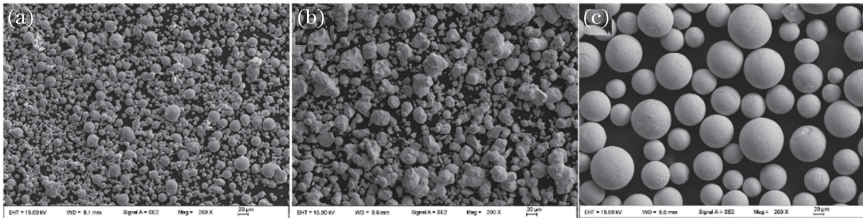


图1 粉末材料的SEM图。(a) SS316L; (b) SLD-WC; (c) LC-WC

Fig. 1 SEM images of feedstock powder. (a) SS316L; (b) SLD-WC; (c) LC-WC

2.2 实验系统与沉积层制备

SLD系统主要包括冷喷涂系统、激光设备和其他辅助装置。冷喷涂系统为自主研制,激光器为光纤耦合半导体激光器;喷涂载气为氮气(N₂),由高压气瓶组提供;预热气体为空气,由空气压缩机提供;激光头部

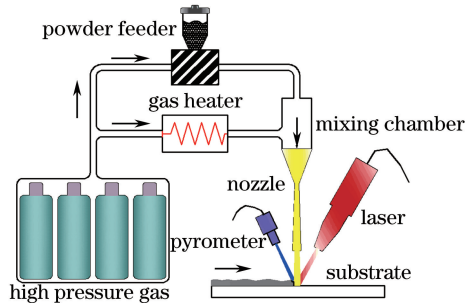


图2 SLD系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SLD system

配有用于监测沉积区域温度的红外高温仪。SLD 系统的示意图如图 2 所示。LC 实验采用预置式铺粉方式, 铺粉厚度为 0.75 mm, 保护气体为氩气(Ar)。SLD 与 LC 实验的优化工艺参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 SLD WC/SS316L 的工艺参数

Table 1 Process parameters for SLD WC/SS316L

N_2 pressure /MPa	Spray distance /mm	Deposition site temperature / $^{\circ}C$	Scanning velocity /($mm \cdot s^{-1}$)	Powder feeding rate /($g \cdot min^{-1}$)
3	30	500-900	10	20

表 2 LC WC/SS316L 的工艺参数

Table 2 Process parameters for LC WC/SS316L

Laser power /kW	Scanning velocity /($mm \cdot s^{-1}$)	Layering thickness /mm	Protection gas
1.5-1.8	8	0.75	Ar

2.3 沉积层表征与性能测试

利用着色探伤法对 LC 沉积层和 SLD 沉积层缺陷进行测试, 通过 SEM、光学显微镜(OM)对沉积层显微组织特征和结合状态进行分析, 通过 X 射线衍射(XRD)仪对沉积层的相结构进行分析研究, 利用能谱仪(EDS)对沉积层的元素分布进行研究。利用球盘式磨损实验机对沉积层的耐磨性能进行测试, 载荷为 500 g, 转速为 500 r/min。

3 实验结果与分析

3.1 沉积层宏观形貌与热影响分析

LC 与 SLD 制备的单道沉积层形貌如图 3 所示, 其中红色虚线为原始基体平面。在 LC 沉积层中, 熔池里的对流运动和温度梯度及颗粒凝固前元素成分的不均匀导致 WC 颗粒呈不均匀分布^[15-16]。在 SLD 沉积层中, SS316L 颗粒的塑性变形使 WC 颗粒在沉积层中呈弥散状均匀分布, 没有局部聚集现象。通过图像分析软件测得 LC 沉积层中 WC 体积分数为 16.36%, SLD 沉积层中 WC 体积分数为 29.35%。由图 3 可以看出, LC 沉积层中有明显的 WC 颗粒宏观稀释区, 而 SLD 沉积层中几乎没有稀释区。

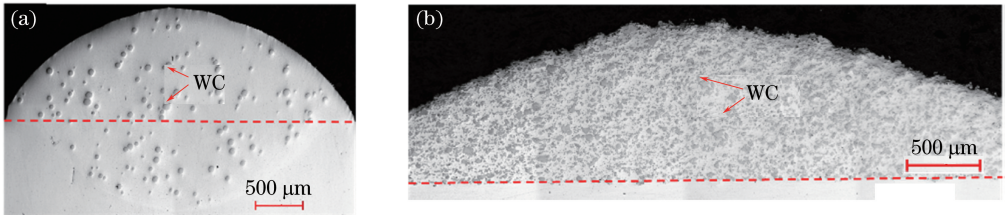


图 3 WC/SS316L 沉积层横截面组织形貌。(a) LC; (b) SLD

Fig. 3 Cross-sectional morphologies of WC/SS316L as-deposited coatings. (a) LC; (b) SLD

LC 和 SLD 多道搭接沉积层的激光功率和温度均设为 1.7 kW 和 900 $^{\circ}C$, 搭接率均为 40%。图 4 (a) 为 WC/SS316L 沉积层宏观形貌, 可以观察到, 多道垂直于扫描速度方向的宏观裂纹贯穿整个 LC 沉积层表面, 而 SLD 沉积层表面平整致密。图 4 (b) 为基体的宏观热影响对比, 可以看出, LC 试样热影响区(HAZ)出现

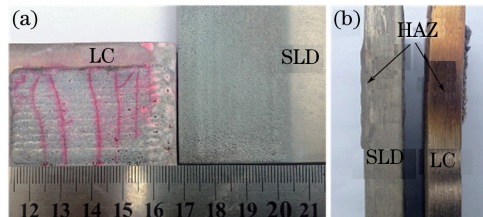


图 4 SLD 与 LC 制备 WC/SS316L 沉积层。(a) 宏观形貌; (b) 基体热影响区

Fig. 4 WC/SS316L as-deposited coatings prepared by LC and SLD. (a) Macroscopic morphology; (b) heat affected zone in substrate

了明显的氧化变色以及翘曲现象,而 SLD 试样几乎没有热致不良影响。二者的差别缘于激光输入能量的不同:在 LC 过程中,基体与预置粉末被激光快速加热熔化,在随后的凝固过程中热应力集中导致沉积层产生开裂^[17];在 SLD 过程中,激光的引入只是为了软化沉积层材料和基体材料,不存在沉积层材料和基体材料的熔化和凝固过程。

3.2 沉积层显微结构分析

图 5 (a)所示为 LC 沉积层显微组织结构,可以看出 LC 沉积层中仅有一些尺寸较大的颗粒,WC 颗粒的周围析出了大量的块状初晶,其间分布着不规则的细条状共晶,而远离 WC 颗粒的区域形成了较多的柱状晶。LC 沉积层局部放大图如图 5 (b)所示。对图 5 (b)标注区域进行 EDS 元素分析,结果如图 5(d)所示,可以发现 C 原子与 W 原子的原子数分数比大约为 1:1,且 Fe 与 Cr 的原子数也较高。说明这些白色块状组织为未完全分解的 WC,且粘结相元素已经渗入未熔的 WC,说明在熔覆过程中 WC 颗粒发生了较为严重的氧化反应、破碎溶解以及扩散冶金反应溶解。尺寸较小的 WC 被完全氧化、全部溶解,部分球形 WC 在高温熔池中碎化成较小的不规则形状,尺寸较大的 WC 颗粒与周围的熔体发生冶金反应形成了扩散带。SLD 沉积层显微组织结构如图 5(c)所示,可以看到在 SLD 沉积层中没有出现典型的枝晶组织特征。这是由于在 SLD 过程中,材料颗粒是在全固态下进行沉积,不涉及原始粉末和基体材料的高温熔化。增强相 WC 颗粒嵌入塑性变形的粘结相颗粒中,从而得以有效沉积,形成复合沉积层。在 SLD 沉积层中存在塑性变形后的粘结相纤维组织,纤维分布的方向为粘结相颗粒发生塑性变形的伸展方向。粘结相颗粒在经过剧烈的塑性变形之后,其内部出现了细化的亚结构。这些组织和结构最终导致了沉积层形变强化效果^[18],提升了沉积层的机械性能。

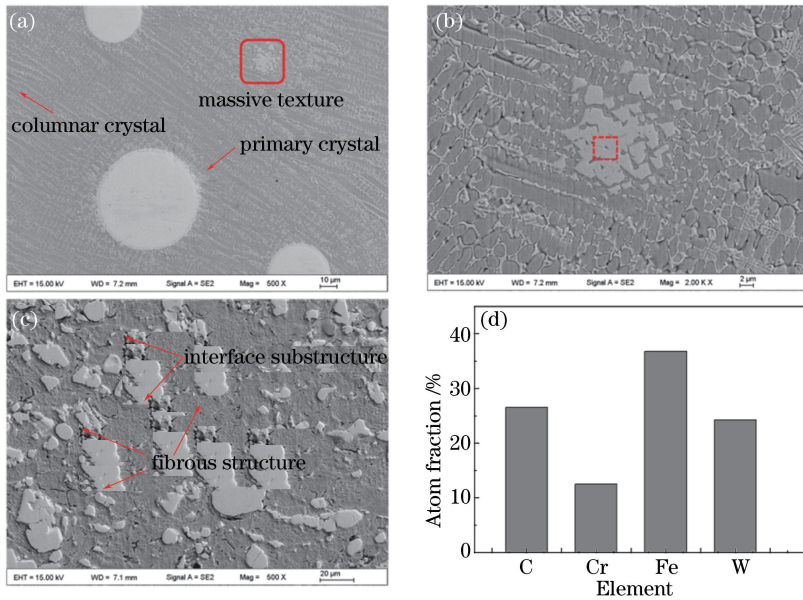


图 5 (a) LC 沉积层显微组织结构; (b) LC 沉积层局部放大; (c) SLD 沉积层显微组织结构; (d) LC 沉积层 EDS 元素分析结果

Fig. 5 (a) Microstructure of LC coating; (b) local magnification of LC coating; (c) microstructure of SLD coating; (d) EDS analysis result in LC coating

3.3 陶瓷相与粘结相结合特性分析

图 6 为 LC 和 SLD 沉积层中陶瓷相 WC 颗粒与粘结相 SS316L 颗粒的结合形貌以及 EDS 分析结果。在 LC 沉积层中,WC 颗粒周围有明显的冶金反应层,如图 6(a)所示。在高温冶金过程中,大量的 C 和 W 原子从 WC 颗粒中析出,在 WC 颗粒周围形成共晶碳化物,大大增强了粘结相与陶瓷相之间的脆性^[19]。对图 6 (a)局部放大区域中箭头所指部分进行 EDS 扫描,结果如图 6(c)所示。由图 6(c)可以看出,陶瓷相与粘结相结合部位存在明显的元素过渡现象,过渡区域较宽。而在 SLD 沉积层中,WC 通过粘结相的剧烈塑性变形得到有效沉积,其周围无冶金反应层,如图 6(b)所示。对 WC 与粘结相结合部位进行 EDS 扫描,结果如

图 6(d)所示。由图 6(d)可以发现,界面结合处也存在元素渐变现象,但过渡区域较 LC 沉积层窄。这种元素互渗使得颗粒之间的结合由单一冷喷涂的机械结合转变为 SLD 的机械结合与冶金结合共存。不同于 LC 沉积层中 WC 颗粒与粘结相 SS316L 颗粒高温冶金反应形成的脆性层,SLD 沉积层中的冶金结合仅是微量的元素互渗,在粘结相颗粒内部依然保持着塑性变形的特征,没有出现增强相 WC 颗粒的分解、氧化以及相变等。这种元素微量互渗行为在增加增强相和粘结相之间结合强度的同时,依然会保持增强陶瓷相和粘结相的原始成分和组织结构,从而保证制备的复合沉积层兼具粘结相和增强相的综合性能。

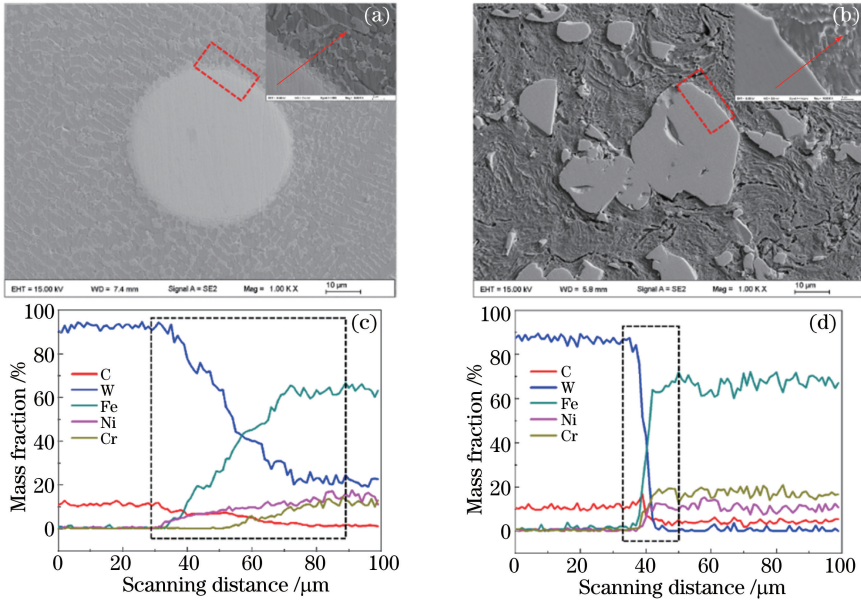


图 6 WC 与 SS316L 结合显微形貌。(a) LC 沉积层; (b) SLD 沉积层; (c) LC 沉积层和 EDS 分析结果; (d) SLD 沉积层和 EDS 分析结果

Fig. 6 Micromorphology of combined WC and SS316L. (a) LC coating; (b) SLD coating; (c) LC coating and EDS analysis results; (d) SLD coating and EDS analysis results

3.4 沉积层的相分析

图 7 所示为原始粉末、SLD 沉积层和 LC 沉积层的 XRD 图谱,其中 2θ 为衍射角。由图可以看出,SLD 沉积层与原始粉末物相组成几乎一致,主要由 WC 和 $\gamma(\text{Fe-Ni})$ 固溶体组成。这表明在 SLD 过程中,激光辐照没有改变原始粉末的相成分。而在 LC 沉积层中,除了原始粉末中的 WC 和 $\gamma(\text{Fe-Ni})$ 固溶体相之外,还有 W_2C 和 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 等共晶碳化物新相。这说明在 LC 过程中,高热输入使粉末与基体熔化形成熔池,热敏感的 WC 颗粒在高温条件下发生分解,产生的 W 和 C 与熔池中的 Ni、Fe 等元素发生冶金反应形成了 W_2C 和 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 等碳化物,这些脆性新相的生成会影响沉积层的力学性能及使用性能^[20]。由此可见,相比于 LC,SLD 是一种低热输入的固态沉积方式,在保留原始粉末组织与性能的同时,能够避免沉积材料的氧化、分解以及相变等热致不良影响。

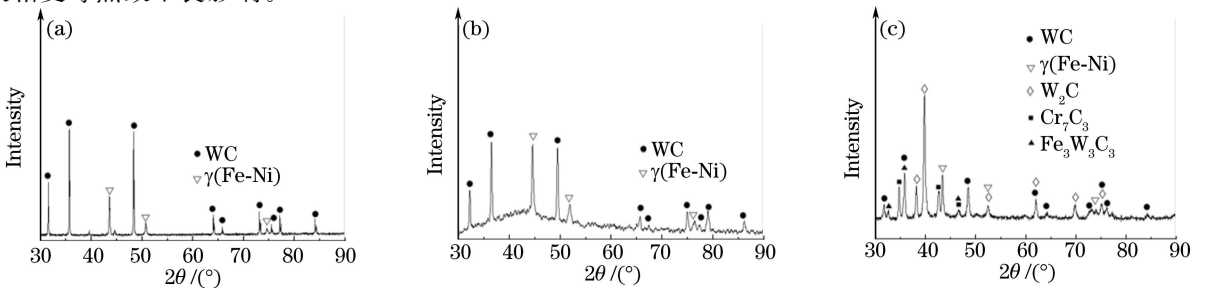


图 7 原始粉末与沉积层的 XRD 图谱。(a) 原始粉末; (b) SLD 沉积层; (c) LC 沉积层
Fig. 7 XRD patterns of feedstock powder and as-deposited coatings. (a) Feedstock powder; (b) SLD coating; (c) LC coating

3.5 沉积层耐磨性能分析

图 8 为 SLD 与 LC 的 WC/SS316L 沉积层在相同载荷作用下的滑动摩擦系数随时间的变化曲线。LC 沉积层的平均摩擦系数为 0.9, SLD 沉积层的摩擦系数为 0.65, 较 LC 沉积层, SLD 沉积层的摩擦系数降低了 28%。磨痕的显微形貌如图 9 所示, 可以看到 SLD 与 LC 沉积层的磨痕宽度分别为 629.16 μm 和 859.71 μm , 且磨痕中均存在深色(1 和 3)和浅色(2 和 4)两种区域。SLD 沉积层和 LC 沉积层磨痕的局部放大形貌分别如图 9 (b)、(d)所示。SLD 沉积层表面有一些较浅的犁沟, 无大的剥落区。在磨损过程中, 有细小的 WC 颗粒从 SLD 沉积层中剥落, 随着摩擦副的转动对粘结相造成刮伤, 形成磨粒磨损机制。但总体来看, SLD 沉积层的磨痕较浅, 表现出较高的耐磨性。而在 LC 沉积层中, 表面存在许多粘着磨损引起的剥落坑。这是由于 WC 颗粒存在脆硬相, 在持续的磨损过程中脆硬的 WC 颗粒发生了碎裂, 如图 9(d)中的箭头所示。WC 颗粒在 SLD 沉积层中的含量高且分布均匀, 激光辐照作用增加了陶瓷相与粘结相的结合强度, 这些因素的共同作用提高了 SLD 沉积层的抗磨损性能。LC 沉积层中的 WC 颗粒在熔池中部分被烧损, 并且由于熔池的对流运动, WC 颗粒在沉积层中的分布极不均匀, 所以在磨损过程中沉积层与摩擦副的粘着倾向无法降低, LC 沉积层表现出较低的耐磨性能。EDS 分析结果如图 10 所示, 可以发现深色区域中氧元素含量很高, 浅色区域中几乎没有氧元素。

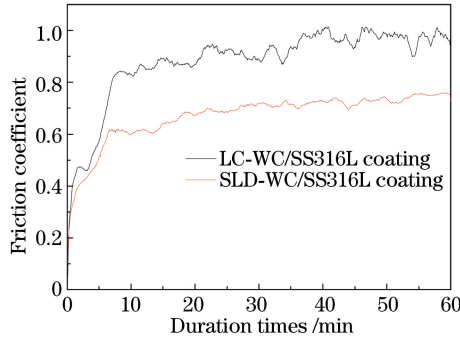


图 8 摩擦系数随时间的变化

Fig. 8 Variation of friction coefficient with time

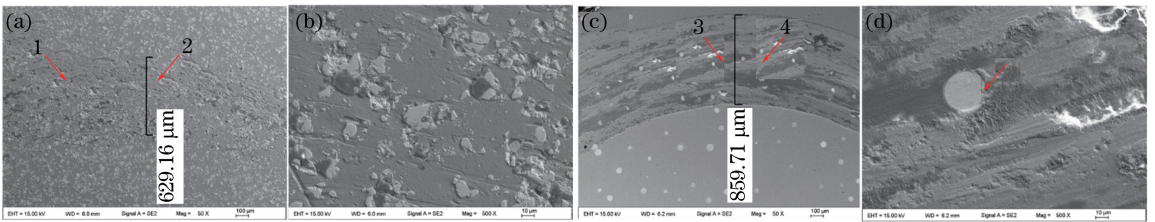


图 9 磨痕显微形貌。(a)(b) SLD 沉积层; (c)(d) LC 沉积层

Fig. 9 Micromorphology of worn surface. (a)(b) SLD coating; (c)(d) LC coating

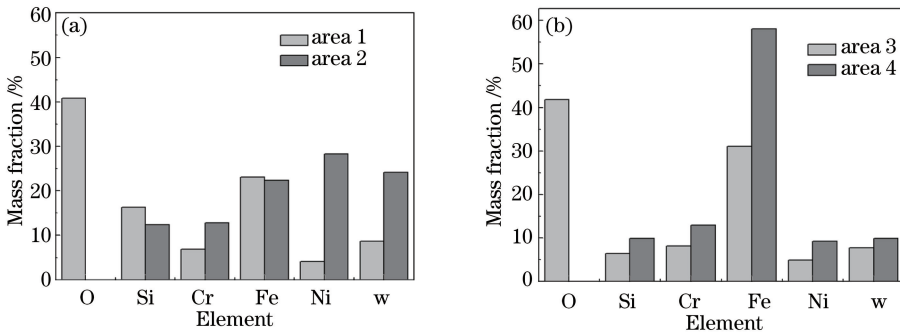


图 10 沉积层磨痕的 EDS 分析。(a) SLD 沉积层; (b) LC 沉积层

Fig. 10 EDS analysis of worn surface of as-deposited coatings. (a) SLD coating; (b) LC coating

4 结 论

采用 SLD 和 LC 技术在 316L 不锈钢基体上制备了 WC/SS316L 复合沉积层,对沉积层的宏观形貌、WC 分布、显微组织、相成分及磨损性能进行了对比分析,得到以下结论。

1) 采用 SLD 技术制备出了表面平整致密且增强相均匀分布的 WC/SS316L 复合沉积层;在 LC 过程中,熔池的对流运动造成 WC 分布不均匀,在随后的凝固过程中,热应力集中使得 LC 沉积层表面形成较多的宏观裂纹和显著的热影响区。

2) 在 LC 过程中,WC 颗粒发生氧化分解并与熔池中的 Fe、Ni 等元素发生冶金反应形成脆性相,这些新相影响了 LC 沉积层的力学性能及使用性能;SLD 是以 WC 嵌入塑性变形的粘结相中的方式进行沉积,无高温冶金反应,能够有效避免氧化、分解、裂纹以及变形等热致不良影响,且由于激光辐照作用,WC 与 SS316L 之间的结合方式由机械结合转变为机械结合与冶金结合共存。

3) 与 LC 沉积层相比,SLD 沉积层的摩擦系数降低了 28%,表现出较优的抗磨损性能。

参 考 文 献

- Feng Shurong, Zhang Shuquan, Wang Huaming. Wear resistance of laser clad hard particles reinforced intermetallic composite coating on TA15 alloy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0203002.
冯淑容, 张述泉, 王华明. 钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203002.
- Chen Xiao, Huang Shuowen, Duan Xiaohua, *et al.* Preparation and properties of TiB₂-50% Co anti-corrosion and wear resistant coating[J]. Transactions of Material and Heat Treatment, 2014, 35(11): 174-179.
陈 泉, 黄硕文, 段小华, 等. TiB₂ 硬质相增强 50Co 金属陶瓷粉末与耐磨损腐蚀涂层[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(11):174-179.
- Cui Zeqin, Wang Wenxian, Wu Hongliang, *et al.* Microstructure and wear resistance of AZ31B magnesium alloy by laser cladding with Al-Si/Al₂O₃-TiO₂ powders[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603020.
崔泽琴, 王文先, 吴宏亮, 等. 镁合金表面激光熔覆 Al-Si/Al₂O₃-TiO₂ 复合涂层界面特征及耐磨性[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603020.
- Zhou C, Zhang Z, Hong T, *et al.* Study of protection from cracks in laser cladding of metal-ceramic composite coating [C]. SPIE, 1996, 27(1): 259-264.
- Wu Dongjiang, Chu Yang, Niu Fangyong, *et al.* Influence of temperature distribution of ceramic coating using top-hat assistant laser beam in dual-beam laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0703012.
吴东江, 褚 洋, 牛方勇, 等. 双激光束熔覆过程平顶辅助光束对陶瓷涂层温度场的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0703012.
- Farahmand P, Liu S, Zhang Z, *et al.* Laser cladding assisted by induction heating of Ni-WC composite enhanced by nano-WC and La₂O₃ [J]. Ceramics International, 2014, 40(10): 15421-15438.
- Schmidt T, Gärtner F, Assadi H, *et al.* Development of a generalized parameter window for cold spray deposition[J]. Acta Materialia, 2006, 54(3): 729-742.
- Wang Hongtao, Chen Xiao, Ji Gangchang, *et al.* Preparation of WC/FeAl intermetallic compound based cermet coating by cold spraying[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(3): 70-73.
王洪涛, 陈 泉, 纪岗昌, 等. WC/FeAl 金属间化合物基金属陶瓷涂层的冷喷涂制备[J]. 金属热处理, 2013, 38(3): 70-73.
- Pialago E J T, Kwon O K, Chan W P. Cold spray deposition of mechanically alloyed ternary Cu-CNT-SiC composite powders[J]. Ceramics International, 2015, 41(5): 6764-6775.
- Dosta S, Couto M, Guilemany J M. Cold spray deposition of a WC-25Co cermet onto Al7075-T6 and carbon steel substrates[J]. Acta Materialia, 2013, 61(2): 643-652.
- Cui Lang, Ma Bing, Feng Shengqiang, *et al.* Progress in preparation of ceramic coating and ceramic-metal composite coating by cold spraying[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(1): 115-120.
崔 焱, 马 冰, 冯胜强, 等. 冷喷涂制备陶瓷及陶瓷金属复合涂层的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(1): 115-120.
- Bray M, Cockburn A, O' Neill W. Thelaser-assisted cold spray process and deposit characterisation[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(19): 2851-2857.

- 13 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.
- 14 Yao J, Li Z, Li B, *et al.* Characteristics and bonding behavior of Stellite 6 alloy coating processed with supersonic laser deposition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 661: 526-534.
- 15 Konrad C, Zhang Y, Xiao B. Analysis of melting and resolidification in a two-component metal powder bed subjected to temporal Gaussian heat flux[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(19): 3932-3944.
- 16 Dai Donghua, Gu Dongdong, Li Yali, *et al.* Numerical simulation of metallurgical behavior of melt pool during selective laser melting of W-Cu composite powder system[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1103001.
戴冬华, 顾冬冬, 李雅莉, 等. 选区激光熔化 W-Cu 复合体系熔池熔体运动行为的数值模拟[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1103001.
- 17 Xu Chengwei, Wang Zhenquan, Hu Xin, *et al.* Research on microstructure and property of laser cladding layer on 1Cr17Ni2 stainless steel[J]. *Surface Technology*, 2011, 40(1): 11-13.
徐成伟, 王振全, 胡 欣, 等. 1Cr17Ni2 不锈钢表面激光熔覆层的微观组织和性能研究[J]. *表面技术*, 2011, 40(1): 11-13.
- 18 Yang Lijing, Li Zhihong, Li Bo, *et al.* Microstructure and deposition mechanism of Ni60 coatings prepared by supersonic laser deposition[J]. *Chinese J 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 Zhihong, Yang Lijing, Li Bo, *et al.* Microstructural characteristics of WC/Stellite 6 composite coating prepared by supersonic laser deposition[J]. *Chinese J 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.
- 20 Yang Jiaoxi, Wang Zhiyong, Zuo Tiechuan. High power diode laser cladding aggregate tungsten carbide-Ni based superhard composites[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(12): 3262-3266.
杨胶溪, 王智勇, 左铁钊. 高功率半导体激光熔覆絮状 WC-Ni 基超硬复合材料[J]. *中国激光*, 2009, 36(12): 3262-3266.