

激光熔覆钴基合金非对称宏观形貌形成机理及 微观特性研究

江国业*, 李敏, 徐平, 庞铭

中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 采用 YLS-3000 光纤激光器开展了激光熔覆钴基高温合金实验, 通过光学显微镜、显微硬度计表征了激光熔覆钴基高温合金的宏观形貌、显微组织和显微硬度。结果表明: 由于激光熔覆过程前序熔覆对后续熔覆有预热作用, 在不同激光熔覆参数作用下, 熔覆层的宽度分别由起始的 4.84, 5.17, 5.88 mm 逐渐过渡到熔覆末尾的 5.28, 6.61, 6.78 mm, 激光熔覆区域的上表面形貌为喇叭形; 由于激光熔覆的送粉方向和相邻的激光熔覆对基体的预热作用, 激光熔覆形貌为非对称性月牙形; 在表面熔覆层中心区域可观察到等轴晶, 在内部熔覆层中部可观察到非均匀树枝晶。由于激光熔覆过程的非平衡凝固、不同区域的加热和冷却速度差异, 熔覆层的硬度呈现非均匀性分布, 且都高于基体硬度。

关键词 激光加工; 激光熔覆; 钴基合金; 宏观形貌; 显微组织; 显微硬度

中图分类号 TG146.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.081401

Asymmetric Macro-Morphologies Formation Mechanism and Microscopic Characteristics of Co-Based Alloys by Laser Cladding

Jiang Guoye*, Li Min, Xu Ping, Pang Ming

Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract The YLS-3000 fiber laser is used to laser cladding of the Co-based superalloy. The macro-morphology, microstructure and microhardness of Co-based superalloy after laser cladding are characterized by the optical microscope and the microhardness tester. The results show that due to the preheating effect of the preceding cladding process on the subsequent cladding process, the widths of the cladding layer gradually transit from the initial 4.84, 5.17, 5.88 mm to the cladding-terminal 5.28, 6.61, 6.78 mm, respectively under the effects of different laser cladding parameters. The upper surface morphology of laser cladding area is horn shape. The morphology of laser cladding is asymmetric crescent shape due to the powder feeding direction during laser cladding and the preheating effect of adjacent laser cladding on the substrate. The equiaxed grains are observed in the central area of surface cladding layer and the non-uniform dendrites are observed in the middle of inner cladding layer. Because of the non-equilibrium solidification in the process of laser cladding and the differences between heating rates and cooling ones in different sections, the hardness of the cladding layer presents a non-uniform distribution, and is always higher than the hardness of its substrate.

Key words laser processing; laser cladding; Co-based alloy; macro-morphology; microstructure; microhardness

OCIS codes 140.3295; 160.3900

1 引言

激光熔覆是指利用高能激光束在基体材料表面

制备具有某种特性的熔覆层, 是一种效率高、熔凝速度快、对试样的变形影响小的表面改进技术, 该技术能有效地改善基体材料表面的耐磨、耐腐蚀、耐高温

收稿日期: 2018-09-18; 修回日期: 2018-10-08; 录用日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(51206179)、中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项资助(3122018D020)

* E-mail: guoyejiang@foxmail.com

和抗氧化的性能,可以根据工程上零件使用环境的功能性需求,进行熔覆层材料的优选,从而提高零件的可靠性^[1-5]。钴基自熔性合金具有良好的耐热性、耐磨性和耐腐蚀性等^[6-10]。现在国内外对钴基合金均有不同程度的研究。叶宏等^[11]针对扫描速度和电流强度两种特定参数的设定对 H13 钢表面制备 Co 基金属涂层成形质量的影响进行了相关的研究,认为随着激光扫描速度的增加以及电流强度的降低,钴基金属涂层的熔高和熔宽均降低,空洞裂缝数量减少。童文辉等^[12]研究了球墨铸铁表面激光熔覆钴基合金涂层后组织和性能的变化,分析了涂层横截面的显微组织和硬度在两种设定功率下的变化情况。Alimardani 等^[13]研究了局部表面预热对钴基合金涂层的影响。杨尚磊等^[14]利用 CO₂ 激光热源在 Inconel600 镍基金属基体上熔覆制备了纳米稀土 Y₂O₃/Co-Cr-W 系钴基合金涂层,并对涂层的微观组织及性能进行了分析。Weng 等^[15]分析了 Ti-6Al-4V 表面激光熔覆不同元素配比下的钴基合金涂层硬度的变化情况,硬度可达 1314 HV。Cai 等^[16]探究了激光熔覆 Ni-Cr-Co-Ti-V 高熵合金涂层的组织与耐磨性。现有文献的重点是关注激光熔覆钴基合金的微观特性变化,但没有文献系统地研究激光熔覆钴基合金熔覆层宏观形貌的非对称形貌形成机理。

本文通过实验分析激光熔覆钴基合金宏观形貌、微观组织特征、硬度变化规律,探明激光熔覆熔覆钴基合金非对称性形貌、微观特性及硬度的变化机理。工程上可能有部分特殊零件在不同工作条件下需要均匀强化或非均匀强化,此研究可以为此类工艺优化提供技术支撑。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

激光熔覆基体材料选用 A3 钢,其长宽高分别为 120,120,10 mm。在进行激光熔覆前先对基体进行喷砂、清洗操作,除去表面铁锈和油污,最后用空压机气流吹干。熔覆层合金粉末为钴基合金 T800,规格为 100/325 目,熔覆材料的化学成分如表 1 所示。

表 1 钴基粉末化学成分

Table 1 Chemical compositions of Co-based powder

Composition	C	Si	Fe	Cr	Ni	Mo	Co
Mass fraction /%	0.08	3.40	1.50	18.00	1.50	28.50	Bal.

2.2 实验方法

本文实验采用的是额定功率为 3 kW 的 YLS-

3000 光纤激光器,激光熔覆送粉器采用武汉光电国家实验室研发的 HUST-IV 型激光熔覆自动送粉器,送粉方式为侧向送粉,送粉角为 60°,实验过程采用氩气作保护气体。激光功率、扫描速率、送粉速率、保护气流量及激光正离焦量分别用 P 、 V 、 U 、 Q 和 D 表示。做完激光熔覆实验,沿垂直于激光熔覆方向对试样进行线切割、抛光,将浓盐酸(HCl)和浓硝酸(HNO₃)按体积比为 3:1 组成硝基盐酸,然后采用硝基盐酸进行腐蚀,腐蚀时间为 5 s 左右,通过 LEICA MEF4 金相显微镜(OM)对熔覆层各区域组织进行观察分析。

显微硬度的测试采用 HVS-1000 型数显显微硬度计,硬度测试的路径如图 1 中的直线 a 和 b 所示。直线 a 所在位置为纵向硬度测试方向,直线 b 为横向硬度测试方向。

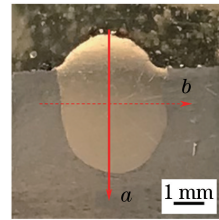


图 1 显微硬度测量路径示意图

Fig. 1 Schematic of microhardness measurement path

3 实验结果分析

3.1 熔覆层的非对称性形貌

激光熔覆层横截面的宏观形貌主要分为两部分:基体表面熔覆区、基体内部熔化区。图 2 为激光熔覆后熔覆层上表面外观形貌图,图中黑色箭头方向为激光熔覆方向,所采用的激光熔覆参数为扫描速率 $V=3$ mm/s、送粉速率 $U=8$ g/min、保护气流量 $Q=12$ L/min、激光功率 $P=2.2$ kW,图 2 中试样(a)、(b)和(c)的正离焦量分别为 110,130,150 mm。

从图 2 中可以观察到:激光熔覆区域的上表面形貌为喇叭形状,即开始区域宽度小,收尾宽度逐渐变大。当激光离焦量为 110 mm 时,起点的熔覆层宽度为 4.84 mm,终点熔覆层宽度为 5.28 mm;离焦量为 130 mm 时,起点的熔覆层宽度为 5.17 mm,终点熔覆层宽度为 6.61 mm;离焦量为 150 mm 时,起点的熔覆层宽度为 5.88 mm,终点熔覆层宽度为 6.78 mm。当离焦量为 110 mm 时,熔覆层表面有明显的颗粒分布,当离焦量为 150 mm 时,熔覆层表面相对光滑平整。在其他参数都不变的情况下,随着激光离焦量的增加,熔覆层的宽度增加;在 3 条单道

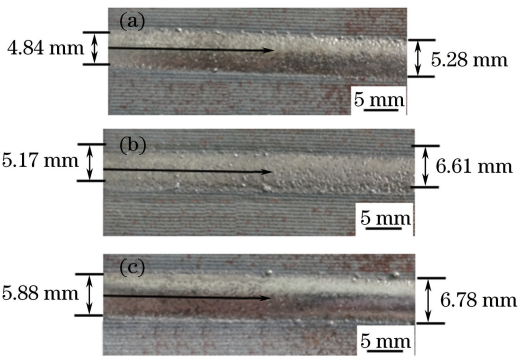


图2 不同离焦量下激光熔覆钴基合金上表面宏观形貌。

(a) $D=110\text{ mm}$; (b) $D=130\text{ mm}$; (c) $D=150\text{ mm}$

Fig. 2 Upper surface macro-morphologies of laser cladded Co-based alloy under different defocus amounts. (a) $D=110\text{ mm}$; (b) $D=130\text{ mm}$; (c) $D=150\text{ mm}$

熔覆的实验中,任意一条熔覆层起点的宽度都小于图片终点处熔覆层宽度;并且可以观察到,随着离焦量的增加,熔覆层上表面的粗糙度降低,表面更加

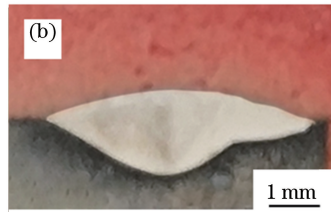
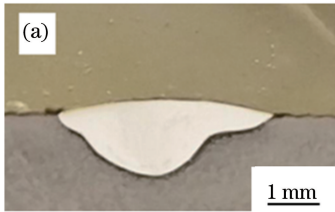


图3 试样的横截面形貌。(a) $D=130\text{ mm}$; (b) $D=150\text{ mm}$

Fig. 3 Cross-sectional pattern of specimen. (a) $D=130\text{ mm}$; (b) $D=150\text{ mm}$

由于实验采用的侧向送粉方式,且实验是在一个平板上做多道激光熔覆实验(如图4所示),单道熔覆方向为 y 轴的正方向,后续熔覆在前序熔覆的 x 轴正方向一侧展开。由于在做完第一道实验后,马上就进行下一道实验,前序熔覆对后续熔覆有预热作用,靠近前序熔覆侧的温度会高于远离该侧温度,即图4中虚线一侧温度高于实线的一侧,这是因为:空间温度分布不对称及侧向送粉导致空间粉末

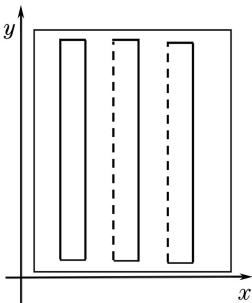


图4 熔覆方向示意图

Fig. 4 Schematic of cladding direction

光滑。激光熔覆层终点熔覆层宽度比起点熔覆层宽度大,这是由于伴随激光熔覆过程的进行,前面熔覆过程对后边的熔覆有预热的作用,导致后面熔覆区域基体温度升高,在相同的能量输入的条件下,可以熔覆更多的粉末。激光熔覆参数离焦量的大小,表示熔覆层基体与激光焦点的距离,离焦量越大,光斑越大,在激光能量足够的条件下,大光斑在空间上能熔更多区域的粉末,所以伴随离焦量的增加,熔覆层的宽度整体呈增加趋势。

图3为激光熔覆层的横截面宏观形貌,即沿激光扫描速度垂直方向切取的熔覆层试样,图3试样(a)的实验参数为 $V=3\text{ mm/s}$ 、 $U=8\text{ g/min}$ 、 $Q=12\text{ L/min}$ 、 $P=2.2\text{ kW}$ 和 $D=130\text{ mm}$,试样(b)的实验参数为 $V=3\text{ mm/s}$ 、 $U=8\text{ g/min}$ 、 $Q=12\text{ L/min}$ 、 $P=2.2\text{ kW}$ 和 $D=150\text{ mm}$ 。从图3可以观察到,激光熔覆区域横截面形貌为非对称月牙形状。熔覆区域的横截面形貌与送粉方式、基体的空间温度分布密切相关。

密度产生差异,进而导致激光熔覆层横截面形貌为非对称性月牙形形貌。

3.2 熔覆层显微组织

图5和图6的工艺参数为激光扫描速度 $V=3\text{ mm/s}$ 、激光功率 $P=2.2\text{ kW}$ 、送粉速率 $U=8\text{ g/min}$ 、保护气流量 $Q=12\text{ L/min}$ 、激光离焦量 $D=150\text{ mm}$ 。图5针对基体表面上凸起的熔覆层,

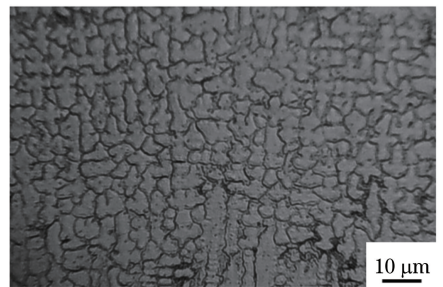


图5 表面熔覆层横截面的微观组织

Fig. 5 Cross-sectional microstructure of surface cladding layer

描述其熔覆层中心区域的金相组织,主要形成致密均匀的等轴晶。图6针对基体表面以下的熔覆层,描述其熔覆层中部区域的微观组织,主要为粗大非均匀的树枝晶。在图7中能观察到明显的熔池流动痕迹。

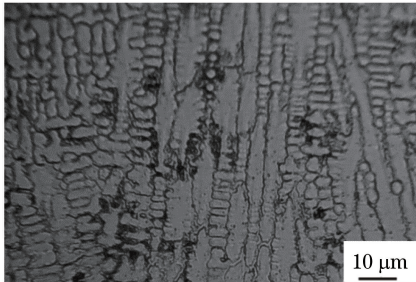


图6 内部熔覆层横截面的微观组织

Fig. 6 Cross-sectional microstructure of internal cladding layer

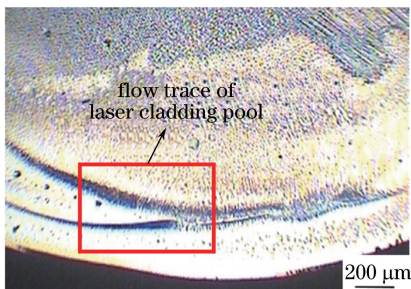


图7 激光熔覆层熔池流动痕迹

Fig. 7 Flow trace of molten pool of laser cladding layer

根据凝固理论可知^[17],在凝固过程中液相的温度梯度 G 、凝固速率 R 和合金的材料成分等因素决定熔覆层组织生长形貌。在材料的冷却过程中,熔池的冷却速度越快,越容易析出细小的晶粒,其中冷却速度表示降温阶段的温度变化率;冷却速率的不同会导致晶粒的尺寸不同和分布情况不同。在靠近熔覆层外表面,由于温度梯度 G 为最小值,凝固速度 R 最大,熔池与周围环境的热交换速度快,温度下降的速率大,导致晶粒的生长时间短,所以表层的晶粒是较为细小并且分布均匀致密的等轴晶。在内部熔覆层的中部,熔池中的对流换热不如熔覆层外表面迅速,且晶粒的生长方向和主要传热方向相关,故导致熔覆层中部为粗大的并且分布不均匀的树枝晶。

3.3 熔覆层硬度分布规律

图8和图9的激光参数为激光扫描速率 $V = 3 \text{ mm/s}$ 、激光功率 $P = 2.2 \text{ kW}$ 、送粉速率 $U = 8 \text{ g/min}$ 、保护气流量 $Q = 12 \text{ L/min}$ 、激光离焦量 $D = 150 \text{ mm}$ 。显微硬度测试点位置如图1所示。

图8是熔覆层的纵向硬度分布。从图8可以观察到,熔覆区域硬度虽有一定波动但均高于基体硬度。激光熔覆区域硬度的波动,是由于激光熔覆过程的非平衡凝固导致不同区域的力学性能差异;从熔覆层到基体的过渡区域,硬度是逐渐降低的,过渡区域的硬度变化是由于硬度与过渡区域激光熔覆钴基合金粉末/基体的熔合比例、温度分布和冷却速度密切相关。

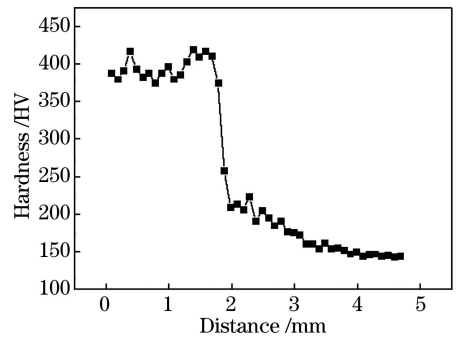


图8 激光熔覆层纵向硬度分布

Fig. 8 Longitudinal hardness distribution of laser cladding layer

图9为熔覆层不同区域的横向硬度分布图,从图9可以观察到,靠近熔覆层上部区域的横向硬度比靠近熔覆层底部的横向硬度高,熔覆层中部的横向硬度主要在上部横向硬度和靠近熔覆层底部的横向硬度范围内波动。激光熔覆层不同区域的硬度差异也是与激光熔覆过程中基体/钴基的混合比例、不同区域的温度分布和冷却速度密不可分的。

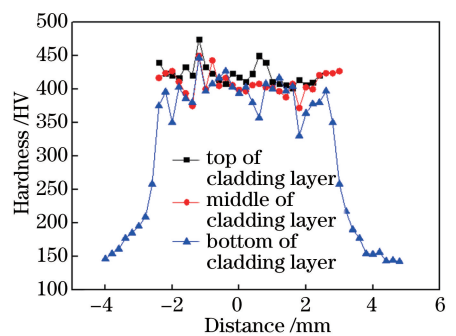


图9 激光熔覆层不同深度的横向硬度分布

Fig. 9 Transverse hardness distributions at different depths of cladding layer

4 结 论

在每道激光熔覆过程中,由于前序熔覆过程对后续熔覆的预热作用,熔覆层的宽度分别由起始的4.84,5.17,5.88 mm 逐渐过渡到熔覆末尾的5.28,6.61,6.78 mm,导致激光熔覆的上表面形貌为喇叭

形;由于激光熔覆过程前序熔覆工艺对基体的预热作用,且靠近前序熔覆区域温度相对较高及侧向送粉等综合作用,激光熔覆的形貌为非对称性月牙形。由于激光的快速加热和冷却、不同区域的加热和冷却速度差异等综合影响,表层熔覆区域呈现为细小的等轴晶,内部熔覆层中部为非均匀性树枝晶。由于熔覆区域的非平衡凝固、不同区域的加热和冷却速度差异,熔覆层的硬度呈现非均匀性分布,且高于基体的硬度。本文主要探究了在一定的参数设定下熔覆层非对称的宏观形貌以及硬度的非均匀性分布,可对激光熔覆钴基的性能强化工艺提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] Kusinski J, Kac S, Kopia A, *et al.* Laser modification of the materials surface layer: A review paper [J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2013, 60(4): 711-728.
- [2] Hemmati I, Ocelik V, De Hosson J T M. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni-Cr-B-Si coatings[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 302-311.
- [3] Weng F, Chen C Z, Yu H J. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review [J]. *Materials & Design*, 2014, 58: 412-425.
- [4] Zhou K X, Qin R Y, Cao Q, *et al.* Process of laser cladding of $1\text{Cr}_{15}\text{Ni}_4\text{Mo}_3$ powder on $30\text{CrMnSiNi}_2\text{A}$ steels[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071404.
周可欣, 秦仁耀, 曹强, 等. $30\text{CrMnSiNi}_2\text{A}$ 钢激光熔覆 $1\text{Cr}_{15}\text{Ni}_4\text{Mo}_3$ 粉末工艺[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071404.
- [5] Wang S, Cheng X, Tian X J, *et al.* Effect of TiC addition on microstructures and properties of MC carbide reinforced Inconel625 composites by laser additive manufacturing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0602002.
王舒, 程序, 田象军, 等. TiC 添加量对激光增材制造 MC 碳化物增强 Inconel625 复合材料组织及性能的影响[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0602002.
- [6] Zhai J H, Liu Z J, Zhang Y, *et al.* Laser cladding repair of inner cylinder piston rods[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111411.
翟建华, 刘志杰, 张勇, 等. 内缸活塞杆的激光熔覆修复[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111411.
- [7] Wei Y, Wei X S, Liang D D, *et al.* Microstructure

and wear resistance of Ni-based and Co-based alloy surfacing layers by plasma transferred arc [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(5): 62-67.

魏莹, 魏先顺, 梁丹丹, 等. 等离子转移弧堆焊镍基和钴基合金堆焊层的组织和耐磨性能研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(5): 62-67.

- [8] Li Y Q, Xie F Q, Zhou J, *et al.* Microstructure and erosion behavior of laser cladding Co-based alloy on DZ125 superalloy[J]. *Tribology*, 2010, 30(1): 53-56.
李涌泉, 谢发勤, 周俊, 等. DZ125 高温合金表面激光熔覆 Co 基合金的组织和冲蚀性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(1): 53-56.
- [9] Zhang C H, Zhang S, Li C Y, *et al.* Laser cladding Stellite X-40 Co-based alloy on hot die steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(1): 17-20.
张春华, 张松, 李春彦, 等. 热作模具钢表面激光熔覆 Stellite X-40 钴基合金[J]. *焊接学报*, 2005, 26(1): 17-20.
- [10] Wang H Y, Cui C Y, Zhou J. Microstructure and properties of cobalt-based alloy coating on tool steel surface prepared by laser cladding[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2010, 40(4): 1000-1004.
王红颖, 崔承云, 周杰. 工具钢表面激光熔覆 Co 基合金涂层的组织及性能[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2010, 40(4): 1000-1004.
- [11] Ye H, Yu W X, Lei L P, *et al.* Process optimization of Co-based coating on H_{13} steel by laser cladding and its microstructure and properties[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(12): 117-121.
叶宏, 喻文新, 雷临萍, 等. H_{13} 钢激光熔覆 Co 基涂层工艺优化及组织性能[J]. *金属热处理*, 2016, 41(12): 117-121.
- [12] Tong W H, Zhao Z L, Wang J, *et al.* Microstructure and property of laser cladding cobalt based alloy coatings on ductile cast iron[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2017, 41(12): 1386-1390.
童文辉, 赵子龙, 王杰, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆钴基合金涂层的组织与性能[J]. *稀有金属*, 2017, 41(12): 1386-1390.
- [13] Alimardani M, Fallah V, Khajepour A, *et al.* The effect of localized dynamic surface preheating in laser cladding of Stellite 1 [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204(23): 3911-3919.
- [14] Yang S L, You J Q, Zhang D M, *et al.* Microstructure and properties of Co-based alloy laser

- cladding on Ni-based alloy [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2016, 41(3): 130-133.
- 杨尚磊, 尤加强, 张冬梅, 等. Ni 基合金基体激光熔覆 Co 基合金涂层的微观组织与性能[J]. *金属热处理*, 2016, 41(3): 130-133.
- [15] Weng F, Yu H J, Chen C Z, *et al.* Microstructures and wear properties of laser cladding Co-based composite coatings on Ti-6Al-4V [J]. *Materials & Design*, 2015, 80: 174-181.
- [16] Cai Z B, Cui X F, Liu Z, *et al.* Microstructure and wear resistance of laser cladded Ni-Cr-Co-Ti-V high-entropy alloy coating after laser remelting processing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 99: 276-281.
- [17] Gaumann M, Henry S, Cleton F, *et al.* Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 271(1/2): 232-241.