

激光表面强化 316L 不锈钢的组织与性能研究

李鸿鹏¹, 盛金马¹, 黎彬¹, 常江¹, 张玉娇^{2*}

¹国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 安徽 合肥 230071;

²北京航空航天大学合肥创新研究院, 安徽 合肥 230012

摘要 研究了纳秒脉冲光纤激光表面重熔对 316L 不锈钢组织、力学性能和耐磨性能的影响, 分别采用三维激光扫描共聚焦显微镜、金相显微镜和扫描电子显微镜表征了重熔前后不锈钢的表面形貌、显微组织、拉伸断口形貌与摩擦磨损形貌。结果表明: 重熔层从底部到表层可分为平面晶区、枝晶生长区和表面等轴晶区, 激光重熔处理可将 316L 不锈钢的抗拉强度从 580 MPa 提高到 710 MPa, 不锈钢的表面硬度和耐磨性能也因此得到了显著提高。

关键词 激光技术; 激光重熔; 316L 不锈钢; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG17

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.191601

Microstructures and Properties of Laser Surface-Reinforced 316L Stainless Steel

Li Hongpeng¹, Sheng Jinma¹, Li Bin¹, Chang Jiang¹, Zhang Yujiao^{2*}

¹State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Economic Technology Research Institute, Hefei, Anhui 230071, China;

²Hefei Innovation Research Institute, Beihang University, Hefei, Anhui 230012, China

Abstract Effects of nanosecond pulsed fiber laser surface remelting on the microstructure, mechanical properties, and wear-resistance of 316L stainless steel were investigated. Three-dimensional laser scanning confocal microscopy, optical microscopy, and scanning electron microscopy were used to characterize the surface morphologies, microstructures, tensile fracture morphologies, and wear morphologies of the stainless steel before and after remelting. The results show that the remelting layer can be divided into a planar crystal zone, a dendrite growth zone, and an isometric zone from the bottom to the surface. Laser remelting can increase the tensile strength of 316L stainless steel from 580 MPa to 710 MPa, significantly increasing the microhardness and wear resistance of the stainless steel.

Key words laser technique; laser remelting; 316L stainless steel; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 160.3380; 140.3390; 310.3840

1 引言

316L 奥氏体不锈钢具有良好的耐蚀性、可加工性和优异的力学性能, 已被广泛应用于航空航天、汽车模具和电子电器等领域^[1-3]。然而, 其在工作环境下往往会受到交变、冲击、振动等动载荷的作用, 导致其表面受到了较大的疲劳作用和磨损腐蚀^[4-5]。已有研究表明, 采用表面机械强化、表面热处理强化、表面化学热处理强化等传统的表面强化工艺对 316L 奥氏体不锈钢进行强化, 会使其表面产生大量

的残余拉应力, 并使其表面发生高塑性应变, 生成脆性马氏体, 严重影响了 316L 奥氏体不锈钢的使用性能^[6-7]。

激光表面重熔 (LSR) 技术是近年来出现的一种新型的材料表面改性方法。该方法基于激光材料热力学及快速熔凝作用机理, 利用一定能量密度和波长的激光束辐照工件表面 (工件表面快速熔融后冷却重凝), 达到改善表面性能的效果。该技术具有非接触柔性加工、不受材料限制、无工具消耗、可进行复杂曲面/选区或微区加工等特点^[8-10]。

收稿日期: 2020-01-13; 修回日期: 2020-02-09; 录用日期: 2020-02-24

* E-mail: zhangyujiao@buaa.edu.cn

西北工业大学的 Lin 等^[11]采用 100 W 光纤激光对 Ni-30%Sn 合金进行表面重熔,研究了规则共晶和异常共晶在快速凝固过程中的生长行为,结果发现,重熔后的表面组织主要由初生晶和细化的晶间板层共晶组成。Zhang 等^[12]采用 450 kW 半导体激光器对 Ti-35Nb-2Ta-3Zr 合金进行表面重熔,探究了激光表面重熔工艺对合金微观结构演变和力学性能的影响,结果发现,激光重熔可使合金表面的硬度从 165 HV 提高到 264 HV。Zhou 等^[13]采用 4.5 kW 半导体激光器对激光熔覆铁基非晶复合涂层进行表面重熔,研究后发现,重熔表面的显微硬度和耐蚀性均得到了提高。Li 等^[14]采用波长为 1060 nm 的纳秒脉冲光纤激光器对镁合金表面进行激光重熔,重熔后发现表面硬度提高了约 45%以上,同时耐蚀性也得到了提高。Zhang 等^[15]对 316L 正畸支架进行了表面重熔,结果发现其耐蚀性与激光功率有关。Chikarakara 等^[16]采用 1.5 kW CO₂ 脉冲激光器对 AISI 316L 不锈钢表面进行重熔,分析了高速激光重熔表面的微观组织形态。Zbigniew 等^[17]研究了激光功率对激光重熔 316L 奥氏体不锈钢组织和性能的影响,结果表明,随着激光功率从 0.7 kW 增大到 2.1 kW,不锈钢的孔隙率降低,硬度增加。

虽然人们针对激光表面重熔 316L 奥氏体不锈钢进行了大量研究,但面向小功率纳秒脉冲光纤激光器重熔 AISI 316L 奥氏体不锈钢组织和力学性能的研究还比较少。为了进一步建立 AISI 316L 奥氏体不锈钢组织、力学性能与激光表面重熔工艺参数之间的关系,本文采用纳秒脉冲光纤激光器对 AISI 316L 不锈钢基板进行表面重熔,分析了重熔前后的组织及力学性能。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料及参数

试验基板选用经丙酮洗净并烘干的冷轧退火态奥氏体 AISI 316L 不锈钢,其尺寸为 120 mm × 50 mm × 15 mm,成分如表 1 所示。试验前先将基板预热,然后采用波长为 1064 nm 的 500 W 纳秒脉冲光纤激光,在气体保护箱中(保护箱内氧气的体积分数低于 10⁻⁴)对基板进行表面重熔。其中,激光功率为 120 W,光斑直径为 80 μm,脉宽为 100 ns,频率为 200 kHz,光斑搭接率为 45%,扫描速度为 130 mm/s,扫描次数为 5 次,采用“弓”字形填充方式进行重熔。

表 1 AISI 316L 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of AISI 316L stainless steel

Element	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	Fe
Mass fraction /%	17.0	12.0	2.5	≤1.0	≤2.0	Bal.

2.2 试验方法

采用 VK-X100 型三维激光扫描共聚焦显微镜观察重熔前后的表面形貌。采用电火花线切割机将成形件切割成所需的标准金相试样,试样经打磨、抛光后用王水腐蚀,然后采用 Axiovert 200 MAT 金相显微镜观察试样的显微组织。

采用 MHV-2000 型显微硬度计进行硬度测试,加载载荷为 1.96 N,加载时间为 15 s;每个位置测量 5 次,取 5 次测量的平均值作为该位置处的显微硬度。采用 CMT-4303 型微机控制电子万能试验机进行单轴拉伸测试,板状拉伸试样(上下表面均进行了激光重熔)的厚度为 1 mm,拉伸变形区的表面尺寸为 30 mm × 8 mm,拉伸速度为 1.5 mm/min。采用 CETR-UMT-2 型摩擦磨损试验机以球盘往复磨损的方式进行耐磨性能测试,法向载荷为 20 N,往复滑移距离为 15 mm,频率为 2 Hz,磨损时间为 60 min;然后采用 S4800 型扫描电子显微镜(SEM)观察磨损表面的形貌。采用 D/Max-2500 PC 型 X 射线衍射仪(XRD)对重熔层进行物相分析,扫描速度为 0.03 (°)/s,扫描角度为 20°~100°。

3 分析与讨论

316L 不锈钢重熔前后的共聚焦表面形貌如图 1 所示。原始表面为自由机械加工表面,高度差约为 118.26 μm,如图 1(a)所示,平均表面粗糙度 R_a 约为 18.37 μm。经激光重熔后,316L 不锈钢表面残留的机械加工条纹被去除,表面留有间距约为 15 μm 的激光重熔痕迹,表面高度差降至 45.58 μm,如图 1(b)所示,平均表面粗糙度 R_a 降至 5.29 μm。这是由于表层金属快速熔化后形成微熔池,在重力和表面张力的作用下,微熔池产生了迁移^[14]。原始的粗糙表面凹凸不平,重熔后,熔融的合金从凸起的波峰位置流向凹下的波谷位置,使得表面粗糙度降低。

激光重熔是一种快熔快冷的加工过程。激光重熔零件的表面性能取决于其凝固组织,而凝固组织又取决于局部凝固条件,即体系的物质和能量传递过程^[12]。因此,本文对重熔后的截面组织进行了分析,分析结果如图 2 所示。316L 不锈钢的原始显微

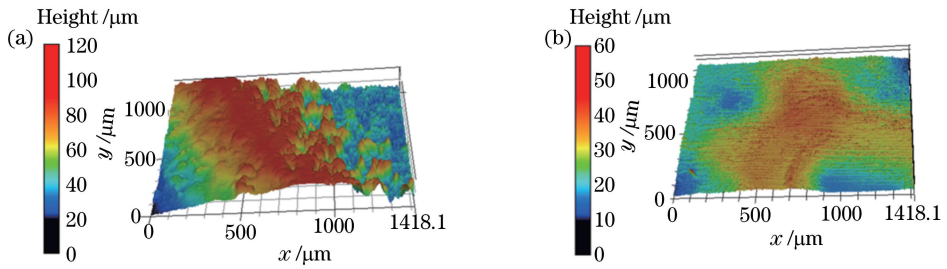


图1 316L 不锈钢重熔前后的共聚焦表面形貌。(a)重熔前;(b)重熔后

Fig. 1 Confocal surface morphologies of 316L stainless steel before and after remelting. (a) Before remelting; (b) after remelting

组织呈典型的等轴状奥氏体形貌。在激光重熔过程中,高密度激光使材料表层瞬间形成熔池,熔化层深度一般在毫米级以下^[15]。由图 2(b)可以看出:重熔层的厚度约为 $(350 \pm 15) \mu\text{m}$;重熔层组织致密,无气孔和裂纹,晶粒明显细化,与基体形成了良好的冶金结合;在重熔层与基体结合区形成了明显的热影响区(HAZ)。与熔池中的形核相比,熔池与基板界面处的形核过冷度最低,导致熔池在随后的冷却凝固过程呈现出典型的外延柱状生长特点。对于面心立方的奥氏体,其枝晶的择优生长方向是 $\langle 100 \rangle$ ^[18]。

此外,从重熔层底部到表层,重熔组织可分为平面晶区(A区)、枝晶生长区(B区)和表面等轴晶区(C区)。重熔层的组织主要取决于温度梯度(G)与凝固速度(R)之比 G/R ^[19]。在熔池与基板界面处,温度梯度 G 最大,凝固速度 R 最小,因此该处具有

很大的 G/R 值,凝固组织是以低速生长的平面晶,在底部外延组织还没有生长到表面时,熔池尾部沿水平方向生长的枝晶就已在该处凝结。随凝固前沿向表面推移,温度梯度 G 减小,凝固速度增大,导致 G/R 值减小,大部分平面晶沿着从熔池底部到表层的方向以多层、连续的方式生长,形成枝晶结构。重熔层表面的凝固速度最大,且熔融的合金液可通过表面散热形成细小的等轴晶。由重熔组织的局部放大图可以看出,从重熔层的底部到表层,枝晶间距逐渐变大,平均间距从 $11.34 \mu\text{m}$ 增大到 $15.67 \mu\text{m}$ 。这主要是由于界面与扫描速度方向近似垂直,因此凝固速度在熔化方向(也就是枝晶生长方向)上的分量较小,而该处的温度梯度相对熔池底部明显降低,因而该处外延枝晶的间距相比其他部位有一定的增大^[16]。

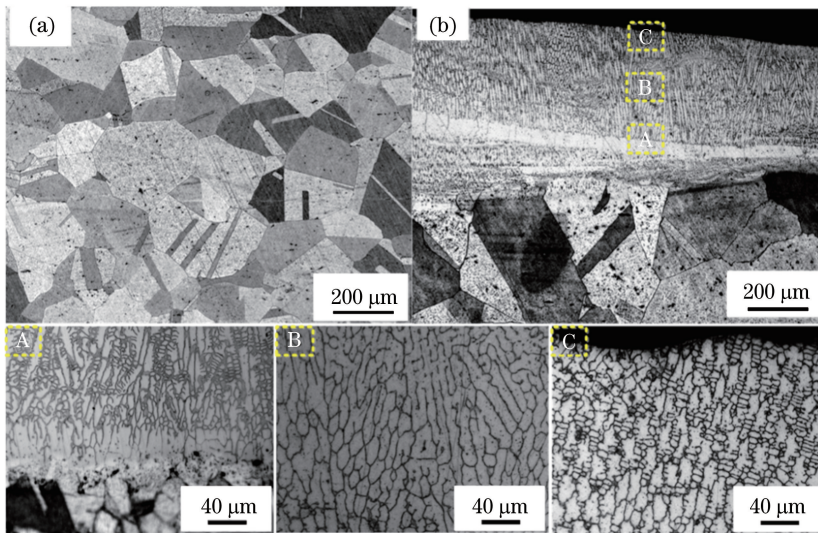


图2 316L 不锈钢重熔前后的显微组织。(a)重熔前的显微组织;(b)重熔后的截面组织及其局部放大

Fig. 2 Microstructures of 316L stainless steel before and after remelting. (a) Microstructure of 316L stainless steel before remelting; (b) cross-section microstructure of 316L stainless steel after remelting and its partially enlarged images

对重熔层横截面的显微硬度(图 3)进行分析后发现:从基板到热影响区再到重熔层,硬度分布曲线

呈逐渐增大的趋势,但在表层有稍许下降;基板的平均显微硬度约为 225 HV,重熔层的平均显微硬度

约为 388 HV。重熔后,在高的冷却速率和温度梯度下,熔融的合金液快速凝固形成了晶粒细小的平面晶区(A区)、枝晶生长区(B区)和表面等轴晶区(C区)。距表层越远,冷却速率越小,组织中的位错密度越低,硬度越低^[12]。然而,当激光照射到 316L 基板上时,表层聚集着大量的能量,316L 基板由表向里迅速熔化,由于最表层温度过高导致钢中的碳、硅等元素被烧损,固溶强化效果减弱,因此表层的硬度略有下降^[16-17]。

图 4(a)为激光重熔前后 316L 不锈钢的的应力-应变曲线,可见:激光重熔后,拉伸强度得到了明显提高,抗拉强度从重熔前的 580 MPa 提高到了重熔后的 710 MPa,但延伸率降低了 8.5%。这是由于激光重熔导致的晶粒细化可以提高组织中晶界的占比,而晶界是位错运动的有力障碍,拉伸变形时的抗拉强度因为细晶强化作用而得到提高。然而,激

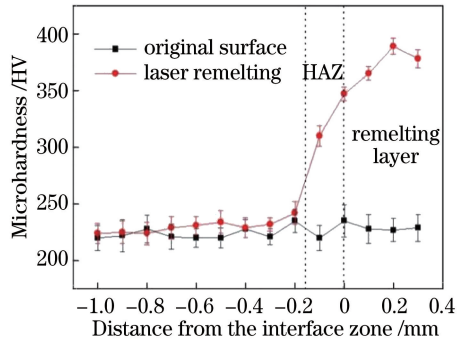


图 3 显微硬度分布曲线

Fig. 3 Microhardness distribution curve

光重熔后的快速冷却过程会导致重熔层内部产生高密度位错,并且重熔层与基体界面会产生一定的内应力,因此拉伸变形时的延伸率下降,塑性降低。观察图 4(b)、(c)可以发现,重熔后,拉伸断口上的韧窝消失,且出现了典型的解理平面和细小的裂纹。

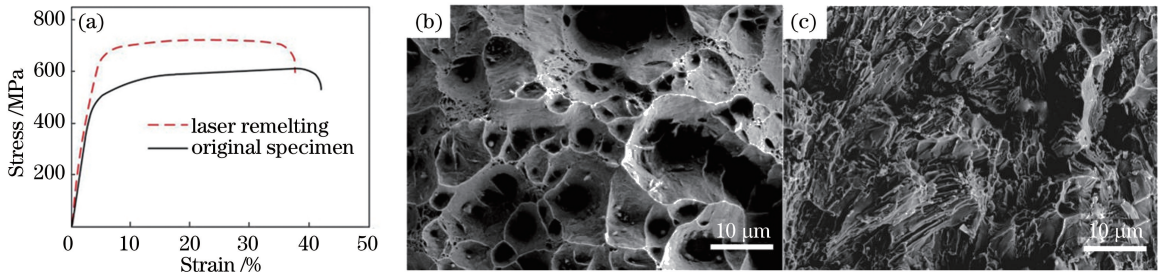


图 4 拉伸性能及断口形貌。(a)应力-应变曲线;(b)原始试样的断口形貌;(c)激光重熔试样的断口形貌

Fig. 4 Tensile properties and fracture morphology. (a) Stress-strain curves; (b) fracture morphology of the original specimen; (c) fracture morphology of laser remelting specimen

为了进一步研究激光重熔试样的表面性能,本文进行了摩擦磨损试验。激光重熔前后 316L 不锈钢的磨损深度对比如图 5(a)所示,可见:在几乎同等宽度的磨损程度下,原始试样的磨损深度最大,达到了 16.34 μm ;激光重熔后,由于表面硬度增大,磨损深度降低至约 7.25 μm 。激光重熔前后 316L 不

锈钢磨损后的表面形貌如图 5(b)、(c)所示。由图 5(b)可见:原始试样的磨损面凹凸不平,出现了大量的犁沟和层状剥离带,并带有少量磨损颗粒,磨痕边缘出现了剪切作用导致的塑性变形;此外,局部区域在磨损过程中产生了黏着,在反复摩擦作用下,黏着部位开裂,导致表面磨损较为严重。重熔后,试样表面

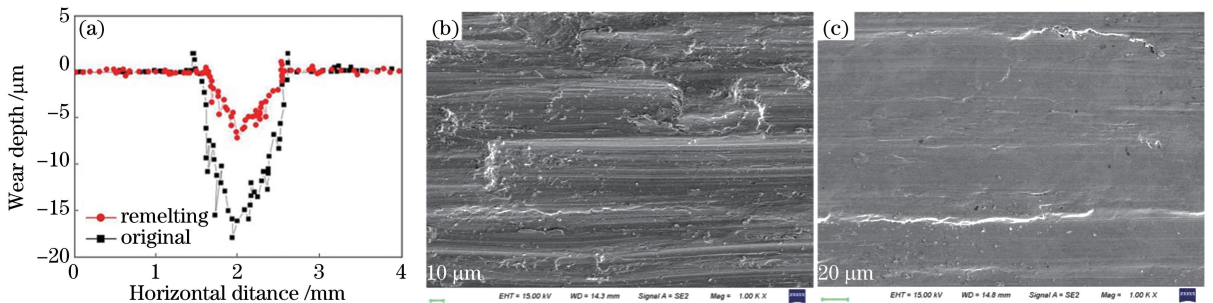


图 5 摩擦磨损实验结果。(a)磨损深度;(b)原始试样的磨损形貌;(c)激光重熔试样的磨损形貌

Fig. 5 Friction and wear experiment. (a) Wear depth; (b) wear morphology of original specimen; (c) wear morphology of laser remelting specimen

硬度提高,试样表面没有立即被破坏。在磨损过程中,前期脱落的微纳米颗粒在摩擦过程中起到了“微纳滚珠”的作用,将“滑动摩擦”部分转变为“滚动摩擦”,避免了金属摩擦表面的直接接触,能够很好地抵抗塑性变形,并起到了支撑作用。因此,激光重熔试样表面的磨损形貌更加平整,如图 5(c)所示。

重熔层的物相分析结果如图 6 所示,与文献[20-21]中原始 316L 基板的 XRD 图谱对比后可以看见,重熔层的物相基本没有发生改变,这与文献[17]的研究结果一致,但(111)与(200)处的峰值强度增大了,这说明重熔后的晶粒取向发生了较大改变。

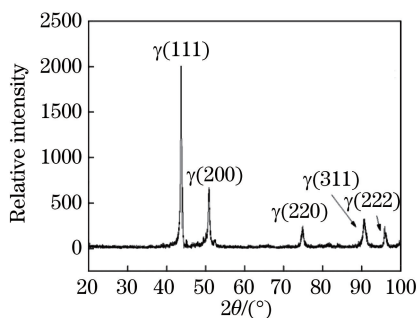


图 6 重熔层的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD pattern of remelting layer

4 结 论

在 316L 不锈钢表面进行激光重熔,研究了重熔层的组织与力学性能,结果表明:激光重熔可使 316L 不锈钢的表面粗糙度 R_a 由 $18.37 \mu\text{m}$ 降低到 $5.29 \mu\text{m}$;从重熔层底部到表层,组织可分为平面晶区、枝晶生长区和表面等轴晶区,平均枝晶间距从底部的 $11.34 \mu\text{m}$ 增大到表层的 $15.67 \mu\text{m}$;激光重熔后,抗拉强度从原始基板的 580 MPa 提高到 710 MPa,但延伸率降低了 8.5%,平均显微硬度从 225 HV 增大到 388 HV,磨损深度从 $16.34 \mu\text{m}$ 降低到 $7.25 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

[1] Guo P, Zou B, Huang C Z, et al. Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 12-22.

[2] Li Y H, Gao S Y. Surface enhanced 316L/SiC nano-composite coatings via laser cladding and following

cold-swaging process[J]. Applied Physics A, 2017, 123(10): 660.

- [3] Ganesh P, Giri R, Kaul R, et al. Studies on pitting corrosion and sensitization in laser rapid manufactured specimens of type 316L stainless steel[J]. Materials & Design, 2012, 39: 509-521.
- [4] Trelewicz J R, Halada G P, Donaldson O K, et al. Microstructure and corrosion resistance of laser additively manufactured 316L stainless steel [J]. JOM, 2016, 68(3): 850-859.
- [5] Dong Q, Li Y H, Guan H, et al. Nano-indentation and finite element simulation study on the elastic-plastic properties of 316L stainless steel by laser cladding[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(2): 128-133.
- 董齐, 黎宇航, 关红, 等. 基于纳米压痕和有限元模拟的激光熔覆 316L 不锈钢弹塑性性能研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(2): 128-133.
- [6] Ding X B, Sun H, Yu G J, et al. Corrosion behavior of Hastelloy N and 316L stainless steel in molten LiF-NaF-KF [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015, 35(6): 543-548.
- 丁祥彬, 孙华, 俞国军, 等. Hastelloy N 合金和 316L 不锈钢在 LiF-NaF-KF 熔盐中的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(6): 543-548.
- [7] Guo X. Microstructure, tensile properties and toughening mechanism of warm and cold rolling 304 and 316L stainless steels with aluminum [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019: 18-20.
- 郭鑫. 温轧和冷轧态含铝高强 304 与 316L 不锈钢微观组织和拉伸性能及其强韧化机制[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019: 18-20.
- [8] Colaço R, Pina C, Vilar R. Influence of the processing conditions on the abrasive wear behaviour of a laser surface melted tool steel [J]. Scripta Materialia, 1999, 41(7): 715-721.
- [9] Zhang H C. Fatigue crack propagation behavior and wear performance of laser remelted 40Cr steel[D]. Changchun: Jilin University, 2019: 30-35.
- 张海潮. 激光重熔调质 40Cr 钢疲劳裂纹扩展行为及磨损性能[D]. 长春: 吉林大学, 2019: 30-35.
- [10] Tran V N, Yang S, Phung T A. Microstructure and properties of Cu/TiB₂ wear resistance composite coating on H13 steel prepared by *in situ* laser cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 480-486.
- [11] Lin X, Cao Y Q, Wang Z T, et al. Regular eutectic

- and anomalous eutectic growth behavior in laser remelting of Ni-30wt%Sn alloys[J]. *Acta Materialia*, 2017, 126: 210-220.
- [12] Zhang T, Fan Q, Ma X L, et al. Effect of laser remelting on microstructural evolution and mechanical properties of Ti-35Nb-2Ta-3Zr alloy[J]. *Materials Letters*, 2019, 253: 310-313.
- [13] Zhou S F, Xu Y B, Liao B Q, et al. Effect of laser remelting on microstructure and properties of WC reinforced Fe-based amorphous composite coatings by laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 103: 8-16.
- [14] Li Y H, Arthanari S, Guan Y C. Influence of laser surface melting on the properties of MB26 and AZ80 magnesium alloys [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 378: 124964.
- [15] Zhang X Y, Zou Y, Zeng X L. Effect of laser surface remelting on the corrosion resistance of 316L orthodontic brackets [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2016, 11: 2877-2886.
- [16] Chikarakara E, Naher S, Brabazon D. Spinodal decomposition in AISI 316L stainless steel via high-speed laser remelting [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 302: 318-321.
- [17] Zbigniew B, Bonek M, Dobrzański L A, et al. The laser surface remelting of austenitic stainless steel [J]. *Materials Science Forum*, 2010, 654/655/656: 2511-2514.
- [18] Saeidi K, Gao X, Lofaj F, et al. Transformation of austenite to duplex austenite-ferrite assembly in annealed stainless steel 316L consolidated by laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 633: 463-469.
- [19] Duan X X, Gao S Y, Dong Q, et al. Reinforcement mechanism and wear resistance of $Al_2O_3/Fe-Cr-Mo$ steel composite coating produced by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 291: 230-238.
- [20] Lin X, Yang H O, Chen J, et al. Microstructure evolution of 316L stainless steel during laser rapid forming [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(4): 361-368.
林鑫, 杨海欧, 陈静, 等. 激光快速成形过程中316L不锈钢显微组织的演变 [J]. *金属学报*, 2006, 42(4): 361-368.
- [21] Ganesh P, Kaul R, Sasikala G, et al. Fatigue crack propagation and fracture toughness of laser rapid manufactured structures of AISI 316L stainless steel [J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2014, 3(1): 36-45.