

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.05

G20Mn5QT 铸钢激光熔覆工艺与组织性能研究

陈书翔¹, 武永寿^{1*}, 管益辉¹, 赵永胜², 刘 艳², 韩晓辉¹

1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111
2. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610031

摘要: G20Mn5QT 铸钢具有优良的力学性能, 应用于轨道车辆的关键部件。然而, G20Mn5QT 铸钢部件在服役过程中由于高频率振动接触可能会出现磨损、锈蚀而导致报废。传统的“以换代修”模式成本较高, 亟需发展高效经济的修复技术。本研究采用激光熔覆修复技术, 选用 316L 不锈钢粉末对 G20Mn5QT 铸钢部件的缺陷进行修复, 通过单因素试验和正交试验, 研究了激光功率、扫描速度和送粉率等工艺参数对熔覆层形貌、组织结构和力学性能的影响。研究发现, 单道激光熔敷试样的熔宽和稀释率随着激光功率的增加而增加, 熔高变化不大; 而熔宽和熔高随扫描速度的增加而减小, 稀释率没有明显的规律; 熔高随着送粉率的增加而增大, 而熔宽和稀释率随送粉率的提高而减小。熔覆层主要由面状晶、胞状晶、柱状晶和等轴晶组成。在适当的工艺参数下, 熔覆层的硬度、耐磨性、拉伸性能、冲击韧性和剪切强度等性能与基体相近或优于基体, 也表明 316L 不锈钢粉末可满足 G20Mn5QT 钢的修复要求。

关键词: G20Mn5QT 铸钢; 激光熔覆修复; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG178, TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0037-11

Study on Microstructure and Properties of G20Mn5QT Cast Steel by Laser Cladding

CHEN Shuxiang¹, WU Yongshou^{1*}, GUAN Yihui¹, ZHAO Yongsheng², LIU Yan², HAN Xiaohui¹

1. CRRC QINGDAO SIFANG Co., Ltd., Qingdao 266111, China
2. College of Material Science and Engineering, Southwest Jiao tong University, Chengdu 610031, China

Abstract: G20mn5QT cast steel has excellent mechanical properties and is applied to key components of railway vehicles. However, during service, G20Mn5QT cast steel component may suffer from wear and corrosion due to high-frequency vibration contact, leading to their scrapping. Laser cladding has the advantages of high energy density, low dilution rate, good interface bonding and small deformation. In order to reduce the cost, the laser cladding repair technology was used to repair the defects of G20Mn5QT cast steel parts with 316L stainless steel powder to improve the present situation of replacement repair. It is found that the melting width and dilution rate of the single-pass laser cladding sample increase with the increase of laser power, but the melting height and the melting width decrease with the increase of scanning speed, The dilution rate has no obvious rule, the melting height increases with the increase of powder feeding rate, while the melting width and dilution rate decrease with the increase of powder feeding rate. The cladding layer is mainly composed of planar, cellular, columnar and equiaxed grains. The hardness, wear resistance, tensile strength, impact toughness and shear strength of the cladding layer are close to or better than those of the matrix under appropriate technological parameters. it also shows that 316L stainless steel powder can meet the repair requirements of G20Mn5QT steel.

Keywords: G20Mn5QT cast steel; repair by laser cladding; microstructure; mechanical properties

引用格式: 陈书翔, 武永寿, 管益辉, 等. G20Mn5QT 铸钢激光熔覆工艺与组织性能研究[J]. 电焊机, 2025, 55(5): 37-47.

收稿日期: 2025-02-10 修回日期: 2025-03-07

作者简介: 陈书翔(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事金属和复合材料的产品研发工作。E-mail: chenshuxiang@cqsf.com。

通讯作者: 武永寿(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事高速列车焊接工艺研发工作。E-mail: wuyongshou2003 @163.com。

Citation: CHEN Shuxiang, WU Yongshou, GUAN Yihui, et al. Study on Microstructure and Properties of G20Mn5QT Cast Steel by Laser Cladding [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 37-47.

0 引言

G20Mn5QT 钢具有优异的强度和韧性^[1],被广泛应用于轨道车辆的关键部件^[2]。轨道车辆在高速运行时,轮轨间的长期高频冲击会导致关键部件的磨损,给高速列车的安全运行带来隐患。迄今为止,更换高铁部件的成本较高,因此,激光熔覆修复技术被引入,以期延长部件使用寿命并降低更换成本。此前,多种表面改性技术^[3-5]已被用于修复其他材料,延长其使用寿命,包括表面再制造^[6]、热喷涂^[7]、电镀^[8]和气相沉积^[9]等。这些技术能够在不改变基材特性的情况下,增强其表面特性。在这些表面改性技术中,激光熔覆(LC)技术因其独特的优势脱颖而出。激光熔覆修复技术^[10-11]具有能量密度高、稀释率低、变形小、与基体冶金结合好、机械性能增强、质量均匀性好等特点,适用于孔的表面修复和改质零件、轴零件和平面零件。叶超^[12]通过工艺参数优化,在 316L 不锈钢表面制备熔覆试样,其显微硬度提升显著,还具备良好的拉伸性能,其中屈服强度为 439 MPa,抗拉强度为 751 MPa,断后伸长率为 26%。崔静等人^[13]针对 300M 钢基体的 316L 激光熔覆层展开界面组织研究,结果表明熔覆层与基体实现冶金结合,底部为平面晶组织,中下部是胞状晶/柱状晶,中上部是树枝晶/等轴晶,表层以等轴晶组织为主。Zhan^[14]等人选择 LC 技术修复 316L 不锈钢,结果表明热循环对熔覆层显微组织和硬度有显著影响。进一步研究表明^[15],粉末成分直接影响 316 熔覆层性能,铁素体-奥氏体双相组织的形成使得修复层组织和力学性能良好。现有研究多集中于 316L 不锈钢粉末在 304 不锈钢及其他材料上的激光熔覆修复^[16-18],然而,G20Mn5QT 铸钢通常作为高速列车的一些复杂结构件,由于形状不规则等情况,一些曲面的磨损和锈蚀尚无有效修复手段,在 G20Mn5QT 铸钢材质的激光熔覆修复研究鲜有报道。

本文采用激光熔覆技术,研究了 316L 不锈钢粉末在 G20Mn5QT 铸钢材质上的激光熔覆修复过程。

首先在前期粉末选型试验基础上,设计了单因素试验,并采用优化的激光熔覆工艺沉积了 316L 熔覆层试样,利用光学显微镜(OM)和维氏硬度计研究了正交试件的单道几何形状、显微组织和显微硬度。此外,对沉积试样的拉伸性能、磨损性能、剪切强度和低温冲击韧性进行了测试。然后,基于扫描电子显微镜(SEM)对拉伸断口和冲击断口进行了观察和分析。通过分析激光熔覆工艺参数与沉积试样微观组织和力学性能之间的关系,为 G20Mn5QT 材料修复后的综合性能提升提供理论基础,改善“以换代修”的现状,降低成本。

1 试验设备、材料和方法

1.1 试验材料

试验选用的 316L 不锈钢粉末形貌如图 1 所示,粒径为 53~150 μm ,粒度分布和氮氧含量分别如表 1、表 2 所示。基板材料为 G20Mn5QT 铸钢,尺寸 175 mm $\times$ 150 mm $\times$ 30 mm,G20Mn5QT 铸钢和 316L 不锈钢粉末的化学成分见表 3。试验前使用丙酮和无水乙醇对基体材料进行清洗,并将不锈钢粉末置于真空干燥箱中,在 100 $^{\circ}\text{C}$ 环境下烘干 2 h。

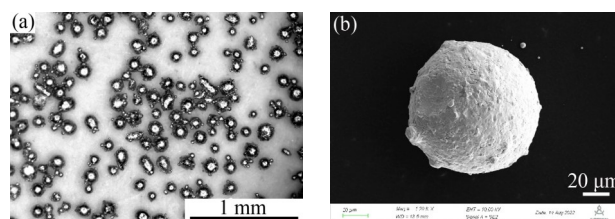


图 1 316L 不锈钢粉末形貌

Fig. 1 Morphology of 316L stainless steel powder

表 1 316L 不锈钢粉末的粒度分布

Table 1 Particle size distribution of 316L stainless steel powder				
$\leq 50 \mu\text{m}$	50~150 μm	$\geq 50 \mu\text{m}$	检测参照标准	制备方法
2.68%	97.21%	0.11%	GB/T1480	气雾化制粉法

1.2 试验设备

激光熔覆设备包括 RFL-C6000,高功率光纤激光器 and 三个同轴喷嘴的激光熔覆头、送粉器、控制柜、三轴数控机床等,激光熔覆系统装置如图 2 所

表 2 316L 不锈钢粉末的其他参数

Table 2 Other parameters of 316L stainless steel powder

测试参数	测试结果	检测标准
Hall Flowmeter	17.80s/50g	GB/T1428
Apparent Density	4.11g/cm ³	GB/T1479.1
Tap Density	4.54g/cm ³	GB/T5162

表 3 316L 不锈钢粉末和 G20Mn5QT 基体的其他参数

Table 3 Other parameters of 316L stainless steel powder and G20Mn5QT substrate

材料	Fe	C	Mn	Ni	Mo
316L	Bal.	0.01	0.93	10.92	2.54
G20Mn5QT	Bal.	0.17~0.23	1.0~1.6	≤0.8	≤0.12

材料	Si	Cr	S	P	Cu
316L	0.72	17.24	0.003	0.01	—
G20Mn5QT	≤0.6	≤0.3	≤0.02	—	≤0.3

示,保护气和送粉气选用氩气。激光器光束的波长 1 070 nm,焦距 11.4 mm,扫描模式为直线扫描方式。根据试验要求,送粉气流量为 7 L/min、保护气流量为 40 L/min、激光光斑直径为 3.5 mm。

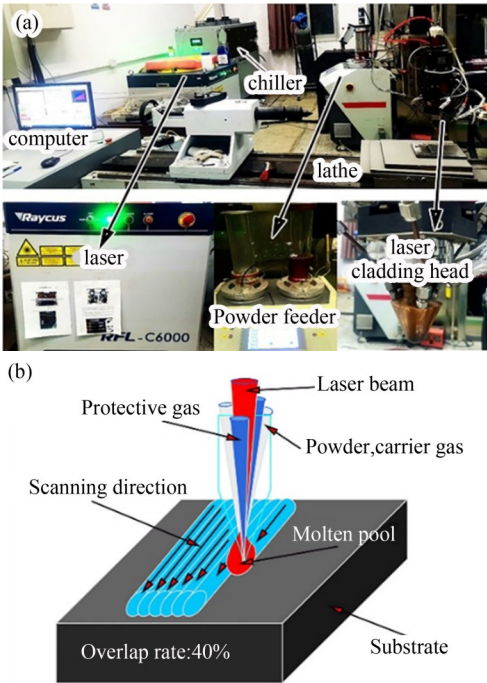


图 2 激光熔覆系统

Fig. 2 Laser cladding system

1.3 试验方法

1.3.1 工艺试验方法

以前期选型试验为基础,为减少变形,要求稀释率小于 5%,据此设计了单因素工艺参数。单因

素主要工艺参数组合为:激光功率 1 700~2 600 W、扫描速度 350~600 mm/min、送粉率 1.0~2.2 r/min。单因素试验参数如表 4 所示。

表 4 单因素试验参数(送粉率:1.0,1.4,1.8,2.2 r/min)

Table 4 Single-factor test parameters (powder feeding rate r/min: 1.0,1.4,1.8,2.2)

编号	激光功率 /W	扫描速度 /(mm·min ⁻¹)	编号	激光功率 /W	扫描速度 /(mm·min ⁻¹)
1	1 700	350	13	1 700	500
2	2 000		14	2 000	
3	2 300		15	2 300	
4	2 600		16	2 600	
5	1 700	400	17	1 700	550
6	2 000		18	2 000	
7	2 300		19	2 300	
8	2 600		20	2 600	
9	1 700	450	21	1 700	600
10	2 000		22	2 000	
11	2 300		23	2 300	
12	2 600		24	2 600	

单因素试验结束后,选取参数组合,开展工艺参数正交耦合试验,确定最优激光熔敷工艺参数。

1.3.2 试样制备及测试方法

显微组织表征和硬度测试样品尺寸为 15 mm×15 mm×8 mm,微剪切试验试样尺寸 1.5 mm×1.5 mm×20 mm,拉伸性能、摩擦磨损性能和冲击性能测试试样尺寸如图 3 所示。采用 FM-700 型维氏硬度仪测量熔覆层及基体的硬度,载荷 200 g,加载时间 15 s。显微组织观察利用 Leica DMI8A 光学显微镜和德国 ZEISS Sigma 300 扫描电镜,选择 DNS300 电子万能试验机对拉伸性能进行测试,选用 MMU-5G 屏显式磨损试验机测试熔覆层的磨损性能。采用微型剪切的试验方法测试熔合区和基体剪切强度。微型剪切的示意图如图 3d 所示,剪切速度 1 mm/min。设备由西南交通大学焊接实验室研制,位移和力传感器及数据采集均由电脑集成控制完成。

2 试验结果

2.1 单层单道试验成形质量

图 4 为不同工艺参数下 316L 不锈钢粉末部分单层单道熔覆层的表面形貌。结果显示,在所研究的工艺参数范围内,所有单道熔覆层均表现出均匀

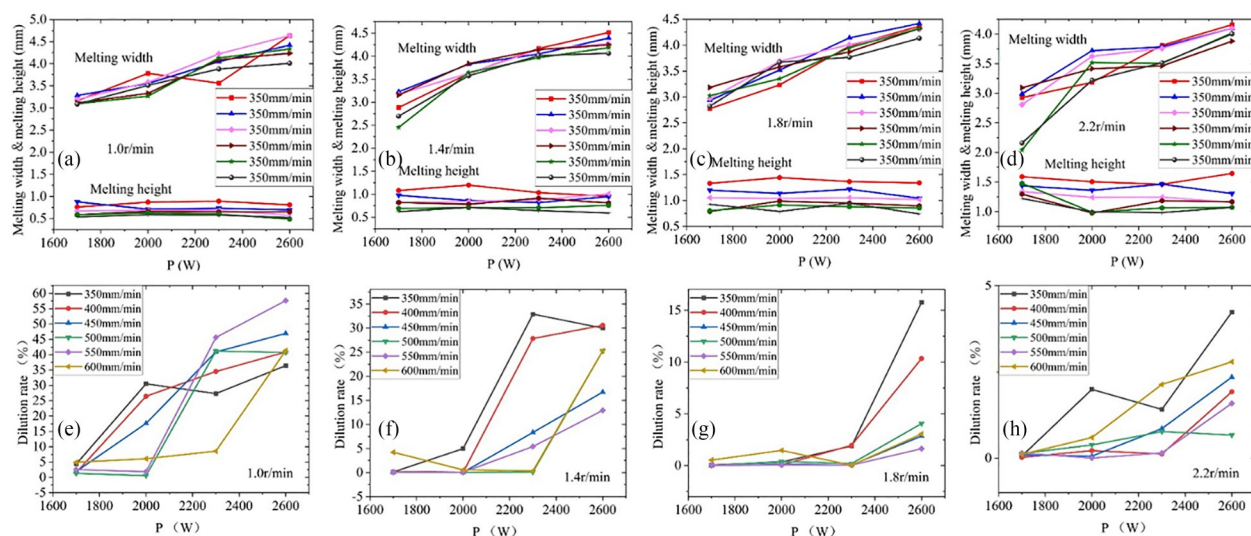


图6 激光功率对熔宽、熔高和稀释率的影响

Fig. 6 Influence of laser power on cladding width, cladding height and dilution rate

由图6可知,单道成形试样的熔宽和稀释率都随着激光功率的增加而增加,熔高变化不大,熔高变化不大主要是送粉率和扫描速度不变,单位时间内粉末的填充量不变,因此熔高变化不大。这是由于激光功率决定了熔覆能量,随着激光功率的升高,作用于熔覆粉末和基体的热量增加,熔池尺寸增大,导致熔宽增大。同时,基体受热熔化区域扩大,熔融基体与粉末的混合程度提高,造成稀释率增大。

扫描速度对G20Mn5QT基板上316L不锈钢粉末单道熔覆层熔宽、熔高和稀释率的影响规律如图7所示。由图7可以看出,扫描速度增加时,熔宽和

稀释率整体呈下降趋势,高功率下扫描速度对熔宽和稀释率的影响显著;熔高则显著降低,低扫描速度下熔高波动较大,熔宽的降低趋势远不如熔高明显。当激光功率固定不变时,稀释率随扫描速度提高并没有呈现出明显一致的规律性变化。原因分析:随着扫描速度的提高,单位体积所吸收的能量降低导致被熔化的粉末数量减少,表现为熔宽和熔高均减小,由于熔宽和熔高同时变小,因此稀释率变化没有明显的规律。

送粉率对G20Mn5QT基板表面316L不锈钢粉末单道熔覆成形试样的熔宽、熔高和稀释率的影响

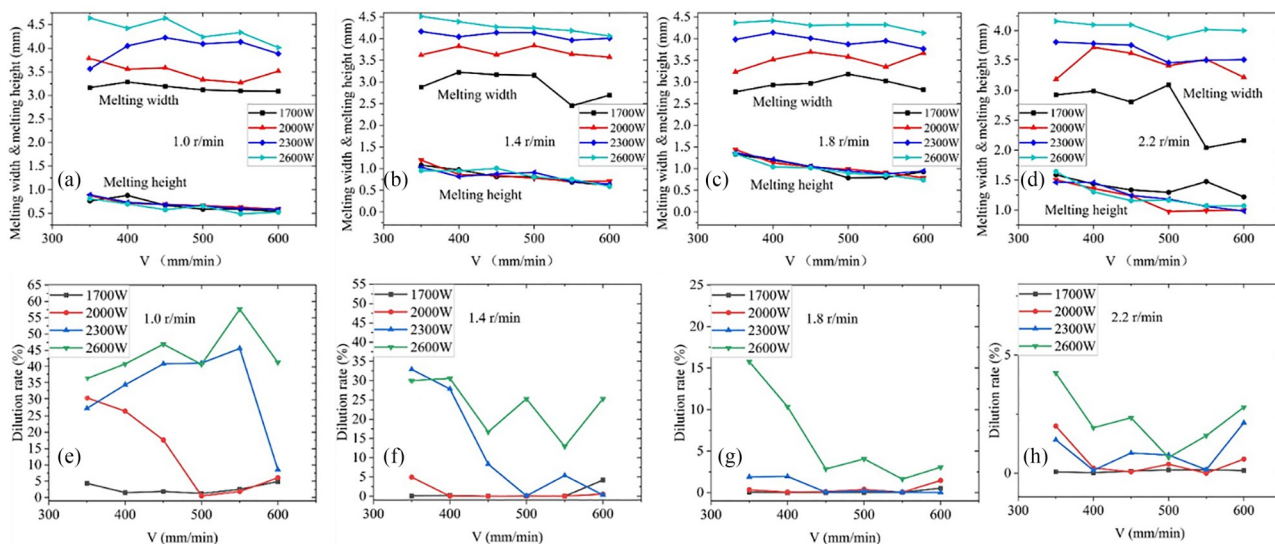


图7 扫描速度对熔宽、熔高和稀释率的影响

Fig. 7 Influence of scanning speed on cladding width, cladding height and dilution rate

规律如图8所示。由图8可知,随着送粉率的提高,熔高呈现上升趋势,熔宽呈现先减小后波动的趋势,稀释率明显降低。这是由于随着送粉率的增

加,更多粉末进入熔池,使得熔高增大。其次,由于粉末吸收了较多热量,作用于基体的热量减少使熔宽和熔深相应减小,导致稀释率减小。

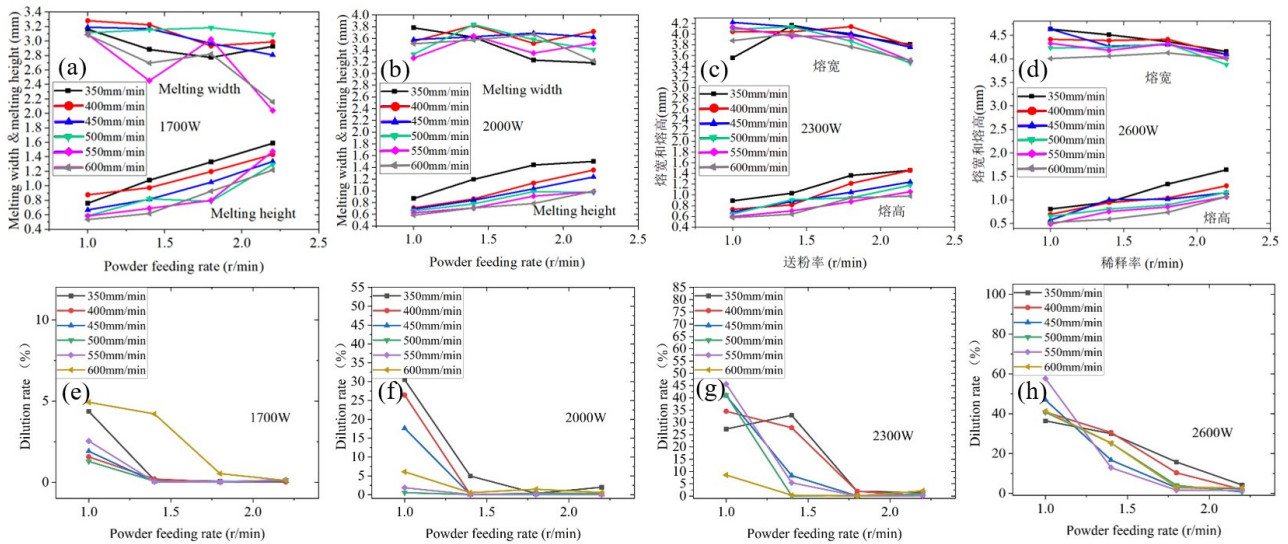


图8 送粉率对熔宽熔高和稀释率的影响

Fig. 8 Influence of powder feeding rate on cladding width, cladding height and dilution rate

为了减少变形,熔覆层需具有较低的稀释率(小于5%),因此在单因素试验中选择稀释率较低的工艺参数重新设计了正交试验参数,如表5所示。光斑直径为3.5 mm,保护气流量为40 L/min,载气流量为7 L/min。并对单层单道截面形貌和多层多道的组织进行了观察。

表5 正交试验参数

Table 5 Orthogonal test parameters

编号	激光功率/kW	扫描速度/(mm·min ⁻¹)	送粉速度/(r·min ⁻¹)
1	2	450	1.8
2	2	500	2.0
3	2	550	2.2
4	2.3	450	2.0
5	2.3	500	2.2
6	2.3	550	1.8
7	2.6	450	2.2
8	2.6	500	1.8
9	2.6	550	2.0

图9为采用优化后的参数所获316L不锈钢粉末单层单道熔覆层截面形貌。从单道熔覆层的截面形貌可以看出,成形截面没有明显的气孔和未熔合等缺陷。在正交工艺参数下,单道成形编号9最好,1、5、6、8次之,稀释率均小于5%,均满足修复要求。

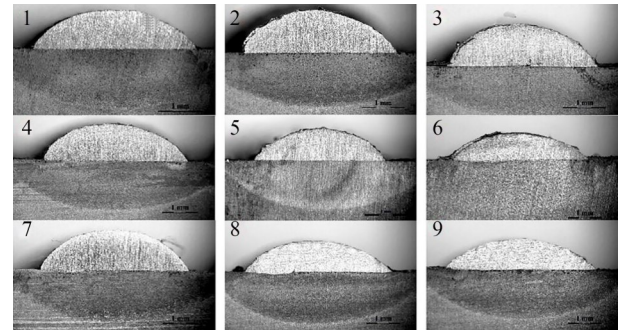


图9 正交试验单层单道截面形貌

Fig. 9 Cross-sectional morphology of single-layer single-pass in orthogonal test

2.3 多层多道熔覆试验成形质量

表5参数条件下的熔覆层表面宏观形貌如图10所示,可以看出熔覆层表面无明显裂纹、气孔等缺陷,成形均匀平整。为了进一步证实熔覆层表面是否存在裂纹和气孔等缺陷,对正交试样做了渗透探伤试验,熔覆层表面无裂纹、气孔等缺陷。

光学显微镜低倍下不同工艺参数下样品的横截面形状如图11所示。可以观察到除5#和8#试样外,横截面没有出现裂纹,沉积试样中存在小孔。并且在其他参数中气孔主要出现在搭接区域,这是因为激光的快速扫描和熔池的快速凝固导致保护气体在熔池中溶解后未能及时从熔池顶部逸出。

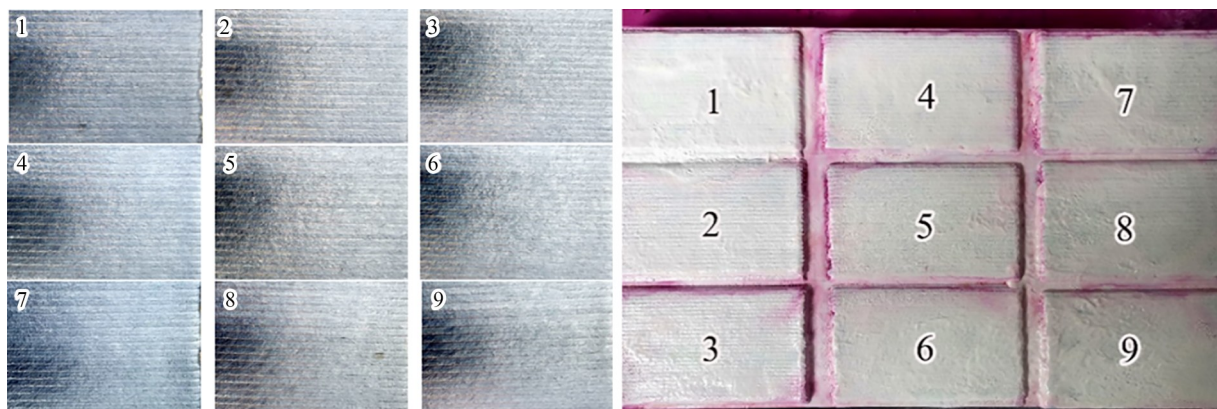


图10 正交试样表面形貌与渗透探伤

Fig. 10 Surface morphology and penetration testing of orthogonal test specimens

如图 11e 形貌所示,当激光功率为 2 300 W,扫描速度为 500 mm/min 时,与其他样品相比,该样品的表面形成均匀且未发现明显的缺陷存在。从图 11h 可以看出,当激光功率为 2 600 W 时,稀释率较大,不满足修复要求,因此最终选择激光功率为 2 300 W,扫描速度为 500 mm/min,送粉速度为 2.2 r/min 为本

文的多层多道熔覆工艺。

2.4 微观组织

基体 G20Mn5QT 和热影响区的金相组织如图 12 所示。图 12a 为基体组织,由白色块状铁素体和黑色片状珠光体组成,晶粒大小均匀;图 12b 为基体热影响区显微组织,主要由针状和块状铁素体以及

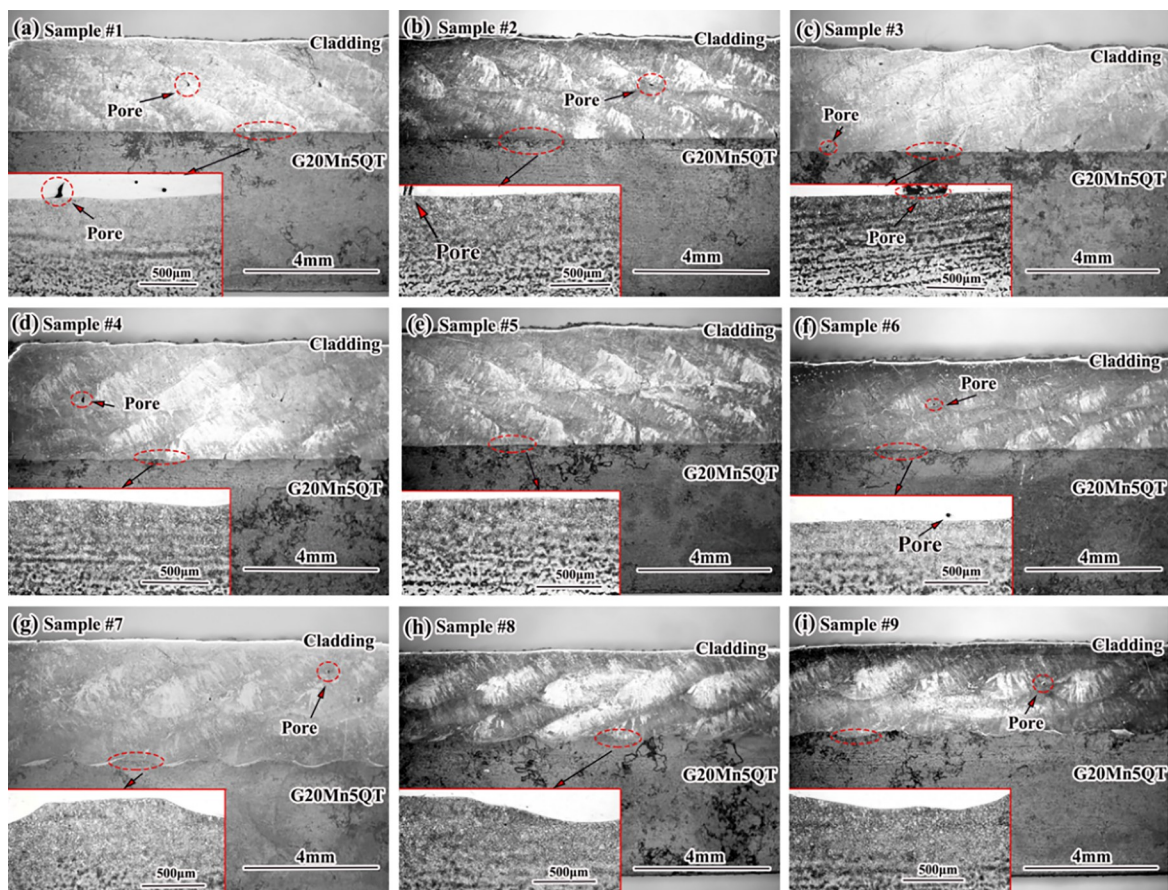


图11 正交试验多层多道截面形貌

Fig. 11 Cross-sectional morphology of multi-layer multi-pass in orthogonal test

低碳马氏体组成。激光热循环导致基体快速加热与冷却,形成针状铁素体,并伴随部分奥氏体转变为低碳马氏体。

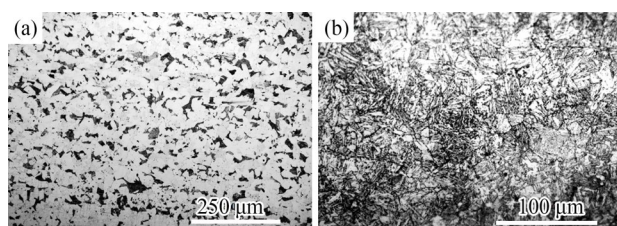


图 12 基体与热影响区显微组织

Fig. 12 Microstructure of the substrate and heat-affected zone

316L 熔覆层显微组织如图 13a 所示,可以看出熔覆层具有定向凝固的特征,熔覆层组织基本为奥氏体,熔覆层中有少量气孔,这是保护气体在熔池中因蒸汽反冲而溶解或被夹带,未能及时逸出至熔池顶部,熔池快速凝固速率导致形成气孔。其中底部属于典型的平面晶组织,如图 13b 所示;中下部是胞状晶/柱状晶的混合晶,如图 13c 所示;中上部出现大量树枝晶/等轴晶,如图 13d 所示;表层主要是等轴晶组织,如图 13e 所示。柱状晶组织在奥氏体组织凝固过程中温度梯度过大,使奥氏体朝单一方向生长,从而再形成柱状晶组织。通过图 13f 可以看到,在多道搭接过程中,搭接区组织无明显变化,

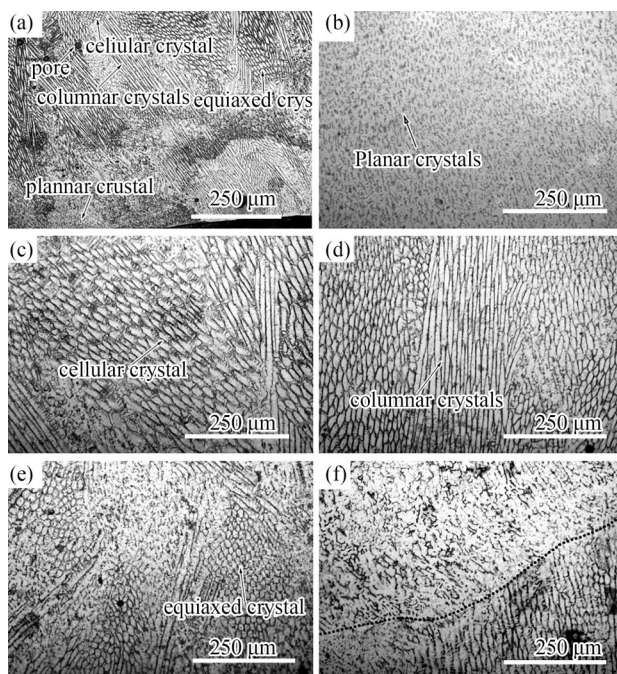


图 13 熔覆层显微组织

Fig. 13 Microstructure of 316L cladding layer

基本保持原有的晶体类型与尺寸。

根据成分过冷理论,凝固组织的生长形态取决于固液界面前沿液相的温度梯度 G_L 和凝固速度 v_R 的综合作用。当激光扫描到工件将 316L 不锈钢粉末和基材表面迅速加热到其熔点以上,使其熔化形成熔覆层,随后在基体热传导和热辐射中快速冷却凝固,一方面由于熔覆层界面熔合区靠近基材,此时基材温度很低,导热速率较快,固-液界面前沿液相的温度梯度极大,其结晶参数 G_L/v_R 很大,几乎不产生成分过冷。另一方面,由于熔池尺寸的限制和动态凝固特征的影响,对流难以充分展开,固-液界面前沿多余的溶质不能被及时排走,从而有利于界面的稳定性,所以溶质在熔池底部半熔化的晶粒表面形成非自发晶核,并沿着散热反方向外延生长形成很薄的一层平面晶(见图 14a)。随着凝固过程的进行,固-液界面前沿受到熔池非平衡动态凝固特性的影响,成分过冷度逐渐增大, G_L 逐渐降低加之合金溶液对流扰动和稀释率降低,平面晶的生长方式遭到破坏,开始出现胞状晶生长(见图 14b),晶粒

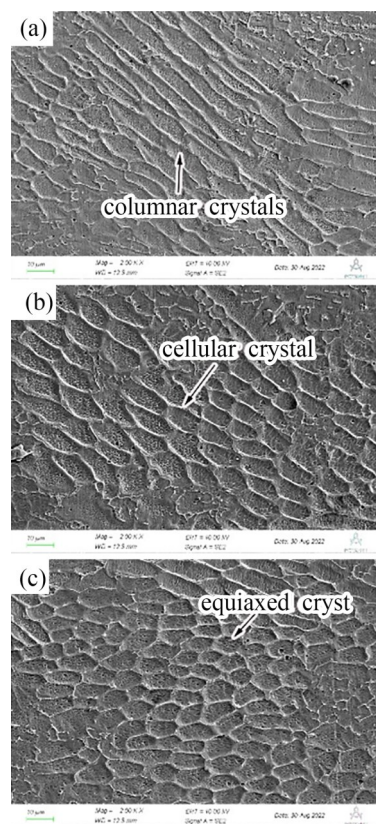


图 14 熔覆层 SEM 形貌

Fig. 14 SEM morphology of the cladding layer

生长遵循择优取向原则,取向不利的生长方向受到抑制,伴随着结晶潜热的释放,固液界面前沿温度梯度 G_L 进一步降低,溶质元素出现明显的成分富集,形成较宽的成分过冷区间,熔覆层中出现粗大的柱状晶;柱状晶粒在生长的过程中深入液相内部,造成局部横向产生成分过冷,因此在一次晶轴上生长出二次晶轴,形成部分柱状树枝晶。熔覆层中上部出现了树枝晶、等轴晶的混合晶,分析认为这主要是因为熔池强制对流的影响,熔池在表面张力、保护气吹力等的作用下,合金粉末熔体能直接加入到熔池,在合金成分中异质形核的作用下造成等轴晶的形成,此外在各种力的作用下产生强制对流导致了枝晶臂的断裂,也有助于等轴晶的形成。熔覆层表层主要是等轴晶组织,如图 14c 所示。分析认为,这里结晶热力学和成分过冷起了主要作用,由于液体结晶潜热的释放,基体传热和结晶潜热保持局部平衡,使液相中的温度梯度和凝固速度进一步减小,成分过冷加大,在液相中形成很宽的成分过冷区,自发结晶占据了主导地位,所以熔覆层表层晶体生长杂乱而形成了大量的等轴晶。

2.5 力学性能

拉伸性能、冲击强度和剪切强度的测试结果如表 6 所示。可以发现,316L 熔覆层的拉伸性能优于 G20Mn5QT,其中抗拉强度为 732 ± 25 MPa,屈服强度为 558 ± 20 MPa,断裂后延伸率为 $28\%\pm 2\%$ 。316L 熔覆层具备较高的抗拉强度和屈服强度可能是晶

粒的尺寸和形态对抗拉强度起着重要作用,而位错相关的晶界偏析将可能成为障碍,导致熔覆层的屈服强度增强^[19]。通过 SEM 观察拉伸试样的断裂面,发现母材的拉伸断口表面有均匀的凹坑(见图 15a),呈现韧性断裂特征。图 15b 为 316L 熔覆层拉伸断口形貌,断面上有各种形状和尺寸的凹坑,深等轴凹坑的存在表明为韧性断裂。与基体相比,316L 熔覆层存在一些更深或更大尺寸的韧窝,这与 316L 熔覆层延伸率高于基体吻合,表明修复后的 316L 熔覆层具有良好的强度和塑性。此外,在低温 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下对 316L 熔覆层和基体进行了冲击试验,要求修复件的低温冲击吸收功不低于 27 J。从表 6 中可以看出,G20Mn5QT 铸钢在 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的冲击吸收能量值约为 63 J,而 316L 熔覆层冲击吸收能量为 123 J,冲击吸收能量比基体高出 48.78%,这可能是试样塑性在低温韧性方面起着重要作用。从图 16 可以看出,基体和 316L 熔覆层均表现出明显的塑性断裂。但 316L 熔覆层可以看到明显的大等轴凹坑,等轴凹坑表明断裂面韧性断裂,表明 316L 熔覆层在低温下具有良好的韧性。对 316L 熔覆层与基体的熔合区和基板的剪切强度进行了测试,发现熔合区剪切强度为 499 ± 20 MPa,比基体剪切强度高约 21.7%。激光熔覆获得的 316L 不锈钢熔覆层的拉伸性能、冲击吸收能量和抗剪强度均高于 G20Mn5QT 铸钢,充分证明了激光熔覆工艺用于制备熔覆层 316L 可满足 G20Mn5QT 铸钢的修复。

表 6 拉伸性能、冲击吸收能量和剪切强度测试结果

Table 6 Test results of tensile properties, impact absorbed energy and shear strength

性能	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	冲击强度/J	剪切强度(熔合区)/MPa
316L 熔覆层	732 ± 25	558 ± 20	28 ± 2	123 ± 12	499 ± 20
G20Mn5QT	660 ± 15	421 ± 10	22 ± 2	63 ± 8	410 ± 10

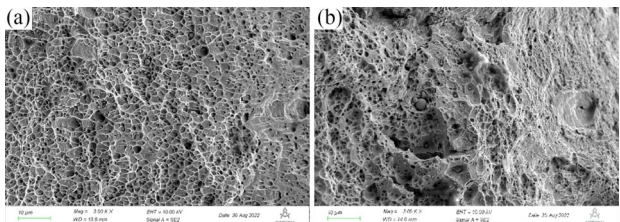


图 15 拉伸断口 SEM 形貌

Fig. 15 SEM morphology of tensile fracture surface

显微硬度和磨损性能测试结果如表 7 所示。基体显微硬度值约为 200 ± 10 HV_{0.2}, 316L 熔覆层硬度

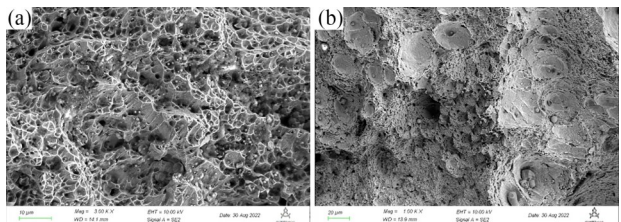


图 16 冲击断口 SEM 形貌

Fig. 16 SEM morphology of impact fracture surface

值约为 205 ± 15 HV_{0.2},熔覆层硬度略高于基体。激光熔覆过程具有极快的凝固速度,形成的晶体组织

细小致密,产生明显的细晶强化作用,显著提升熔覆层的硬度,与传统 316L 材料加工方法相比^[20],激光熔覆得到的 316L 不锈钢熔覆层硬度有很大提升。从摩擦磨损性能测试结果可以看出,母材的磨损失重为 102±15 mg,摩擦系数为 0.45~0.57,而 316L 熔覆层磨损失重为 68±15 mg,摩擦系数在 0.35~0.48 之间,磨损性能高于母材,符合修复目标要求。如图 17 所示,为 316L 熔覆层摩擦磨损形貌,主要有磨

屑、犁沟及一些磨损坑等。在图 17a 中可以观察到沿滑动方向平行排列的凹槽、细磨屑和平坦的磨损表面,这表明磨损机制存在粘着磨损和磨粒磨损。

表 7 显微硬度和磨损性能测试结果

性能	硬度/HV _{0.2}	磨损失重/mg	摩擦系数
316L 熔覆层	205±15	68±10	0.35~0.48
G20Mn5QT	200±10	102±15	0.45~0.57

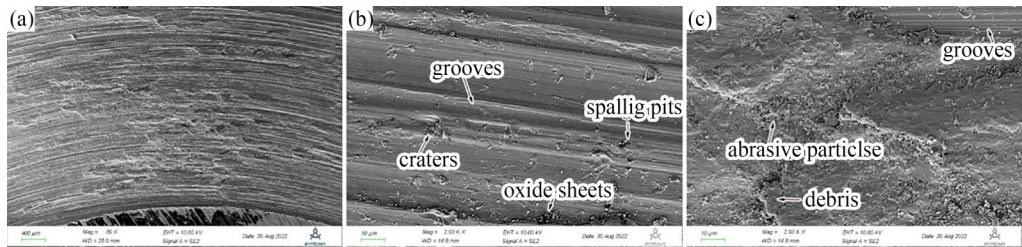


图 17 摩擦磨损 SEM 形貌

Figure 17 SEM morphology of friction and wear surface

3 结论

本研究基于优化的激光熔覆工艺参数,在 G20Mn5QT 铸钢基材表面实现了高结合强度的 316L 不锈钢熔覆层制备。通过系统分析关键工艺参数对熔覆层几何形貌(熔宽、熔高)及冶金结合质量(稀释率)的影响规律,结合微观表征技术,系统表征了基体与熔覆层的显微组织结构,并重点研究了其硬度分布、剪切强度、冲击韧性及拉伸性能等关键力学特性。通过上述系统性研究,得出以下重要结论:

(1)显微分析表明,G20Mn5QT 铸钢基体组织主要由白色块状铁素体和黑色片状珠光体组成,其热影响区组织主要由针状和块状铁素体以及低碳马氏体组成的混合形态,316L 熔覆层的组织基本为奥氏体,界面区域形成规则的平面晶结构,中下部过渡为胞状晶与柱状晶的混合生长形态,而中上部发育为典型树枝晶向等轴晶转化特征,表层最终凝固为细密的等轴晶组织。

(2)316L 单道熔覆层的熔宽和稀释率随着激光功率的增加而增大,熔高变化不大;熔宽和熔高随扫描速度的增加而减小,稀释率没有明显的规律;熔高随着送粉率的增加而增大,而熔宽和稀释率却减小。

(3)通过对力学性能的测试,发现 316L 熔覆层硬度和磨损性能均高于 G20Mn5QT 铸钢;冲击吸收能量约为基体的 2 倍,断裂后延伸率达到了 28±2%,微剪切强度、抗拉强度、屈服强度为 499±20 MPa、732±25 MPa、558±20 MPa,高出基体材料 17.8%、10.91%、32.5%,熔覆层综合力学性能满足工艺要求,验证了 316L 不锈钢粉末用于 G20Mn5QT 铸钢修复具备可行性。

参考文献:

[1] Yin Y, Ma T, Han Q H, et al. Material Parameters in the GTN Model for Ductile Fracture Simulation of G20Mn5QT Cast Steels[J]. J. Mater. Civil. Eng., 2022, 34(1).DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004050.

[2] Zhang Z X, Li Z W, Wu H, et al. Size and Shape Effects on Fatigue Behavior of G20Mn5QT Steel from Axle Box Bodies in High-Speed Trains [J]. Metals, 2022, 124. DOI:10.3390/met12040652.

[3] Zhang L J, Yu P F, Cheng H, et al. Nanoindentation Creep Behavior of an Al0.3CoCrFeNi High-Entropy Alloy[J]. Metall. Mater. Trans. A, 2016, 47(12): 5871-5875.

[4] Hsu M C, Wang C L, Xu F, et al. Direct immersogeometric fluid flow analysis using B-rep CAD models[J]. Comput Aided Geom D, 2016, 43: 143-158.

- [5] Zhao X, Yang H, Cui Z, et al. Enhanced photocatalytic performance of Ag-Bi₄Ti₃O₁₂ nanocomposites prepared by a photocatalytic reduction method[J]. Mater. Technol., 2017, 32(14): 870-880.
- [6] Zhang M Y, He S H, Jiang B Y, et al. The Study on Feasibility and Welding Characteristics of GMAW Surfacing Remanufacturing of H13 Steel Cutter Ring of TBM Hob[J]. Coatings, 2021, 11(12): 1559.
- [7] Kutschmann P, Grimm M, Lindner T, et al. Comparison of Aqueous and Gelled 3.5% NaCl Electrolytes for Assessing the Corrosion Resistance of Thermal Spray Stainless-Steel Coatings in Electrochemical Corrosion Tests[J]. Coatings, 2022, 12(3): 344.
- [8] 吕春雷, 芮灿, 电镀技术在机械备件修复中的生产应用[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(04): 106-110.
LV C L, RUI C. Application of electroplating technology in the repair of mechanical spare parts Lyu[J]. Plating & Finishing, 2023, 45(04): 106-110.
- [9] 任建伟, 崔启政, 李宏然, 等. 涡轮导叶化学气相沉积渗铝熔覆层研究[J]. 热喷涂技术, 2022, 14(04): 42-47.
REN J W, CUI Q Z, LI H R, et al. Study of Chemical Vapor Deposition Aluminizing Coatings on Turbine Guide Blade[J]. Thermal Spray Technology, 2022, 14(04): 42-47.
- [10] Kanyane L R, Malepe T J, Malatji N, et al. Synthesis and Characterization of Al-SiC Composite Coatings on 316L Stainless Steel Fabricated via Laser Cladding Technique[J]. Metallogr Microstruc, 2021, 10(5): 601-609.
- [11] Cai J, Shi J M, Wang K S, et al. A modified parallel constitutive model for elevated temperature flow behavior of Ti-6Al-4V alloy based on multiple regression[J]. Int. J. Mater. Res., 2017, 108(7): 527-541.
- [12] 叶超, 侯亮, 陈云, 等. 316L 不锈钢激光熔覆宏微观特征优化[J]. 焊接学报, 2023, 44(03): 8-16+129.
- [13] 崔静, 路梦柯, 翟巍, 等. 300M 钢激光熔覆 316L 不锈钢修复层组织及性能研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(06): 710-719.
- [14] Zhan M J, Sun G F, Wang Z D, et al. Numerical and experimental investigation on laser metal deposition as repair technology for 316L stainless steel[J]. Opt. Laser Technol., 2019, 118: 84-92.
- [15] Sun G F, Shen X T, Wang Z D, et al. Laser metal deposition as repair technology for 316L stainless steel: Influence of feeding powder compositions on microstructure and mechanical properties[J]. Opt. Laser Technol., 2019, 109: 71-83.
- [16] Liu W, Wei H Y, Liu A L, et al. Multi-index co-evaluation of metal laser direct deposition: An investigation of energy input effect on energy efficiency and mechanical properties of 316L parts[J]. J. Manuf. Process, 2022, 76: 277-290.
- [17] Song L J, Zeng G C, Xiao H, et al. Repair of 304 stainless steel by laser cladding with 316L stainless steel powders followed by laser surface alloying with WC powders[J]. J. Manuf. Process, 2016, 24: 116-124.
- [18] Xu G, Wu L J, Su Y Y, et al. Microstructure and mechanical properties of directed energy deposited 316L/Ti6Al4V functionally graded materials via constant/gradient power[J]. Mat. Sci. Eng., 2022, 839: 142870.
- [19] Wang X L, Muniz-Lerma J A, Sanchez-Mata O, et al. Microstructure and mechanical properties of stainless steel 316L vertical struts manufactured by laser powder bed fusion process[J]. Mat. Sci. Eng., 2018, 736: 27-40.
- [20] 余俊. 粉末冶金 316L 不锈钢的制备及性能研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2012.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>