

激光与光电子学进展

激光熔覆超高强度钢的稀释率研究

刘艳¹, 刘朋帅¹, 郭洋¹, 李宗津¹, 张清林², 张林杰¹, 张建勋^{1*}

¹西安交通大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710049;

²宁夏工商职业技术学院, 宁夏 银川 750021

摘要 为研究激光熔覆修复过程中稀释率的主要影响因素及其对修复性能的影响,在 300M 钢表面对 12Cr17Ni2B 新型不锈钢粉末进行激光熔覆试验。为了使粉末充分熔化并减小基体热影响区的软化程度,调整粉焦高于基体表面。分别探索扫描速度及粉末吸热率(激光功率与送粉速率之比)对稀释率的影响,结果表明:两种工艺参数均可以显著改变稀释率的大小,扫描速度会显著改变熔覆层的面积,粉末吸热率会显著改变熔合区的面积。为了明晰稀释率对修复性能的影响,采用粉末吸热率为自变量的工艺调控稀释率,并分析稀释率对修复性能的影响;结果表明:稀释率对修复件界面结合强度的影响不大,但对热影响区的软化程度有一定影响,基体对熔覆层的稀释有利于熔合区硬度的提高,但过大的稀释率会导致熔合区开裂。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 单因素试验; 稀释率; 300M 钢; 界面结合强度

中图分类号 TH16; TH14; TN12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2314005

Dilution Rate of Laser Cladded Ultrahigh Strength Steel

Liu Yan¹, Liu Pengshuai¹, Guo Yang¹, Li Zongjin¹, Zhang Qinglin²,
Zhang Linjie¹, Zhang Jianxun^{1*}

¹College of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

²Ningxia Vocational Technical College of Industry and Commerce, Yinchuan, Ningxia 750021, China

Abstract To investigate the primary factors affecting the dilution rate in the laser cladding repair process and its effect on repair performance, we implement laser cladding experiments on 300M steel surface using the new 12Cr17Ni2B stainless steel powder as the laser cladding powder. To melt the powder adequately and reduce the softening degree in the heat-affected zone, the focus of the powder stream is adjusted above the substrate surface. Scanning rate and powder heat absorption rate (the ratio of laser power to powder feed rate) experiments are performed to explore the effect regularity of these process parameters on the dilution rate. The results demonstrate that these process parameters can considerably change the dilution rate. The scanning rate changes the area of the cladding layer, and the powder heat absorption rate changes the area of the fusion zone. To clarify the effect of dilution rate on the repair performance, the process of the single factor powder heat absorption rate is designed to adjust the dilution rate, and the effect of dilution rate on repair performance is analyzed. The results demonstrate that the dilution rate has little effect on the interface bonding strength of the repaired areas; however, it affects the softening degree in the heat-affected zone. The dilution of the matrix is beneficial in terms of improving hardness in the fusion zone but an overly high dilution rate will result in the cracking of the fusion zone.

录用日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-03-25; 录用日期: 2021-04-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1105800)

通信作者: *jxzhang@mail.xjtu.edu.cn

Key words laser technique; laser cladding; single factor experiment; dilution rate; 300M steel; interface bonding strength

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 310.3840

1 引言

航空工业小型化、轻量化和多功能化的发展目标对航空工业用钢的承载能力提出了更高要求。随着钢铁材料研发及制造技术的提高,具有超高比强度的高强钢结构材料得到了广泛应用。超高强度钢凭借超乎一般的高强度、比强度和屈强比,已被大量应用于飞机起落架、连接件、襟翼滑轨、机翼主梁等关键部件,在航空工业领域具有广阔的发展前景^[1-2]。300M 超高强度钢作为飞机起落架制造用材,具有高强度、高硬度、低热导率等特性,属于典型的航空难加工材料^[3-5]。此外,该材料的耐磨性和耐蚀性较差,用该材料生产的服役于海洋环境中的航空零部件(如飞机起落架)通常需要进行表面电镀和镀铬,以抵御恶劣的腐蚀环境。航空零部件中的应力集中或机加工造成的损伤在其长久服役过程中会对飞机的飞行安全造成一定威胁。激光熔覆修复技术为损伤零部件的修复提供了可行性方案^[6-8],不仅可以降低生产成本和更换周期,还避免了航空难加工材料的生产技术问题。

激光熔覆修复技术采用激光束作为修复热源,利用预制粉末或同轴送粉的方式对零件的损伤部位或者缺陷部位进行激光修复。在激光熔覆过程中,修复区的稀释率对激光、粉末及基体等较为敏感^[9-10]。稀释率是衡量激光修复性能的关键指标之一^[11]。目前已有的研究表明,激光熔覆过程中过大的稀释率不仅会损伤粉末材料的固有性能,还可能会增大修复区域的开裂倾向,而过小的稀释率通常会导致粉末与基体界面处不能形成良好的冶金结合,导致修复件的界面结合性能较差^[12]。大部分研究没有考虑粉焦、粉末/基体物相组成对稀释率及修复性能的影响。在传统激光熔覆能量密度(约为 70~150 W/cm²)的基础上,获得小稀释率且较高界面结合强度的熔覆工艺对于减小熔覆过程中热源对基体的热影响程度以及提高粉末的利用率具有

重要意义。

12Cr17Ni2B 是一种增材制造与修复用新型马氏体不锈钢粉末^[13],高的铬含量以及一定的硼含量使得该粉末具有一定的耐蚀性和耐磨性。镀层损伤件的修复通常是先将原来的镀层彻底清理干净,然后对镀层下的损伤基体进行修复。本研究团队尝试使用具有一定耐磨性及耐蚀性的修复材料(12Cr17Ni2B 粉末)在 300M 钢表面进行单道熔覆试验,然后探索主要工艺参数对稀释率的影响机制,即:采用单因素试验方法研究粉末吸热率^[12](激光功率与送粉速率的比值)、扫描速度对稀释率的影响机制。调整粉焦的位置高于基体,以获得界面结合质量良好、热影响区软化程度较小、稀释率为零的熔覆道,并在此基础上研究稀释率对修复性能的影响。本文结果对研究激光熔覆的稀释率及熔覆件的性能调控具有一定的参考价值。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验中使用的粉末是采用旋转电极雾化法自制的 12Cr17Ni2B 新型不锈钢粉末,其成分如表 1 所示。基板是尺寸为 100 mm×70 mm×40 mm 的淬火+二次中温回火态 300M 钢,其名义成分如表 2 所示,抗拉强度为 1887 MPa。采用 YLS-4000 光纤激光器、MOTOMANNX100 焊接机器人和 RC52 四路同轴送粉熔覆头配合在 300M 钢表面进行激光熔覆修复试验。为保证粉末充分熔化并减小对基体的热影响,在激光能量密度不变的情况下,调整粉焦高于基体表面 15 mm(光斑直径为 2.5 mm),如图 1 所示。熔覆头行走的速度为扫描速度。

表 1 12Cr17Ni2B 新型不锈钢粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of new martensitic stainless steel 12Cr17Ni2B

Element	C	Ni	Cr	Si	B	V	Fe
Mass fraction /%	0.12	2.46	16.87	0.77	0.64	0.22	Bal.

表 2 300M 钢的名义成分

Table 2 Nominal composition of 300M steel

Element	C	Ni	Cr	Si	V	Mn	Cu	Mo	Fe
Mass fraction /%	0.38-0.43	1.65-2.0	0.70-0.95	1.45-1.80	0.05-0.10	0.60-0.90	≤0.35	0.30-0.50	Bal.

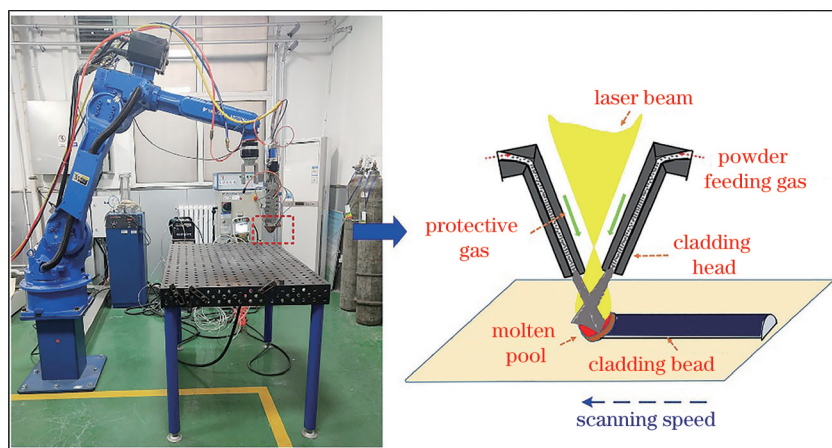


图1 激光熔覆试验示意图

Fig. 1 Diagram of laser cladding

选用高纯氩气(纯度为 99.99%)作为熔覆保护气及送粉气,送粉器型号为 DPSF-3。为揭示稀释率的主要影响因素及其对熔覆性能的影响,本研究设计了两组单因素试验,即恒定粉末吸热率变扫描

速度条件下的试验(扫描速度单因素熔覆试验,编号为 R1~R8)以及恒定扫描速度变粉末吸热率条件下的试验(粉末吸热率单因素熔覆工艺,编号为 P1~P6),试验工艺参数如表 3 所示。

表 3 单因素试验参数

Table 3 Single factor experimental process parameters

Constant powder heat absorption rate			Constant scanning rate				
No.	Power / kW	Powder feed rate / (g·min ⁻¹)	Scanning rate / (mm·min ⁻¹)	No.	Power / kW	Powder feed rate / (g·min ⁻¹)	Scanning rate / (mm·min ⁻¹)
R1	1.7	13.1	350	P1	1.1	13.1	1680
R2			420	P2	1.2		
R3			840	P3	1.25		
R4			1260	P4	1.3		
R5			1680	P5	1.4		
R6			2100	P6	1.5		
R7			2520				
R8			2940				

2.2 宏观截面的几何尺寸

选用 320~3000 目水砂纸对熔覆试样的横截面进行打磨、抛光,然后采用腐蚀剂(10 g 无水硫酸铜 + 50 mL 浓盐酸 + 50 mL 蒸馏水)进行腐蚀。采用 Nikon ECLIPSE MA200 型倒置金相显微镜对熔覆试样的组织特征进行观察;采用 Image J 软件对熔覆道横截面的几何尺寸进行测量。

2.3 修复性能表征

采用 HXD-1000TMC/ LCD 显微硬度计沿增材件垂直方向进行显微硬度测试,测试环境为室温,加载载荷为 2.94 N,保载时间为 15 s。采用微剪切测试装置对熔覆件界面处的结合强度进行微剪切测试,即:将微剪切测试装置安装固定在拉伸试

验机上,通过压头以 0.5 mm/min 的下压速度进行连续加载,记录试样从变形到失效整个过程中的载荷-位移数据。试验装置示意图如图 2 所示,该装置主要由 6 个零件构成,自上而下分别是压杆、冲头、上模座、导向压头、下模具和底座,其中冲头的直径为 2 mm。

3 分析与讨论

与熔覆件横截面相关的参数主要包括稀释率(F_D)、熔高(T_c)、熔宽(W)、熔深(T_p)、熔覆层面积(A_c)及熔合区面积(A_p),如图 3 所示。

稀释率是影响激光熔覆性能的关键因素,其计算公式为

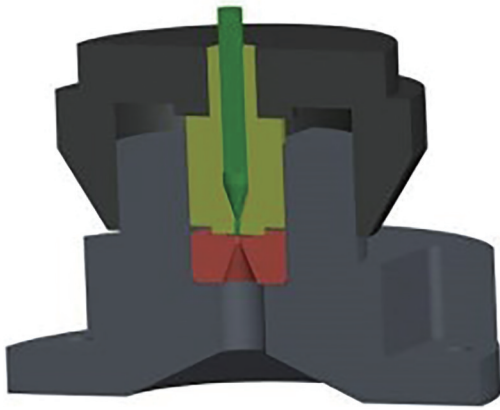


图 2 微剪切试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of micro-shear experimental apparatus

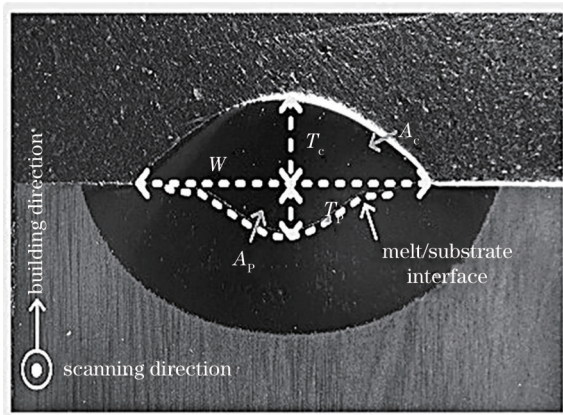


图 3 与熔覆件横截面相关的主要参数

Fig. 3 Main parameters related to cladding layer cross-section

$$F_D = A_p / (A_c + A_p) \quad (1)$$

可以通过关注熔合区、熔覆层的面积来实现对熔覆件稀释率的调控。

为简化工艺参数对稀释率的影响,将激光熔覆功率与送粉速率简化为一个参量,即粉末吸热率 $P_F^{[9]}$,用其表示激光熔覆过程中单位质量粉末吸收的能量。其计算公式为

$$P_F = P / V_F, \quad (2)$$

式中: P 为激光功率; V_F 为送粉速率。完成既定粉末熔覆所需要的激光能量是一定的,多余的能量会被基体吸收,基体吸收能量后产生表面熔融并稀释粉末成分,形成熔合区,产生一定的稀释率。因此,粉末吸热率在一定程度上反映了基体与粉末吸收能量的比值。通过对粉末的吸热率进行合理调控,可以实现对激光熔覆稀释率的调控。

扫描速度决定了粉末与基体受激光辐照时间的长短。在激光功率和送粉速率一定的情况下,扫

描速度的变化可以引起单位面积上粉末沉积量的变化,同时也会改变基体对能量的吸收及熔合区的面积。通过合理调控扫描速度可以对沉积层与熔合区的面积比进行调整,进而实现对激光熔覆稀释率的调控。

因此,本研究团队分别进行了恒定粉末吸热率变扫描速度以及恒定扫描速度变粉末吸热率两组激光熔覆试验,熔覆道的宏观形貌如图 4 所示,其中 R1~R8 及 P1~P6 分别对应恒定粉末吸热率变扫描速度以及恒定扫描速度变粉末吸热率熔覆试验,可以看到 R4~R6 与 P1~P5 熔覆试验下焊道的均匀性较好。

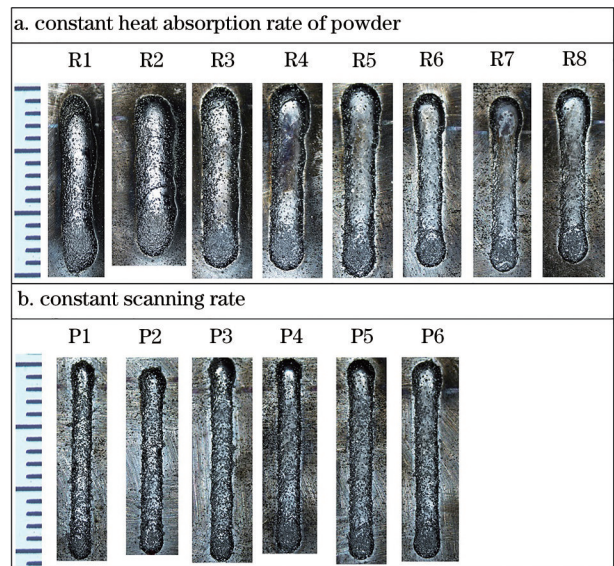


图 4 恒定粉末吸热率变扫描速度以及恒定扫描速度变粉末吸热率条件下的熔覆道

Fig. 4 Cladding tracks formed at constant powder heat absorption rate and variable scanning rates as well as constant scanning rate and variable powder heat absorption rates

3.1 扫描速度单因素熔覆工艺

图 5 显示了恒定粉末吸热率变扫描速度条件下熔覆道横截面的几何形貌(HAZ 表示热影响区),其中激光功率恒定为 1.7 kW,送粉速率恒定为 13.1 g/min。由图 1(a)~(h)可以看出:当扫描速度在 350~2940 mm/min 范围内变化时,熔覆道的熔高和熔覆层面积逐渐减小;当扫描速度增大到 2520 mm/min 和 2940 mm/min 时,熔覆道的横截面形貌开始变得不规则,这可能是过快的扫描速度导致粉体沉积不均匀引起的。此外,随着扫描速度增大,熔覆道的润湿角逐渐减小,过小的扫描速度

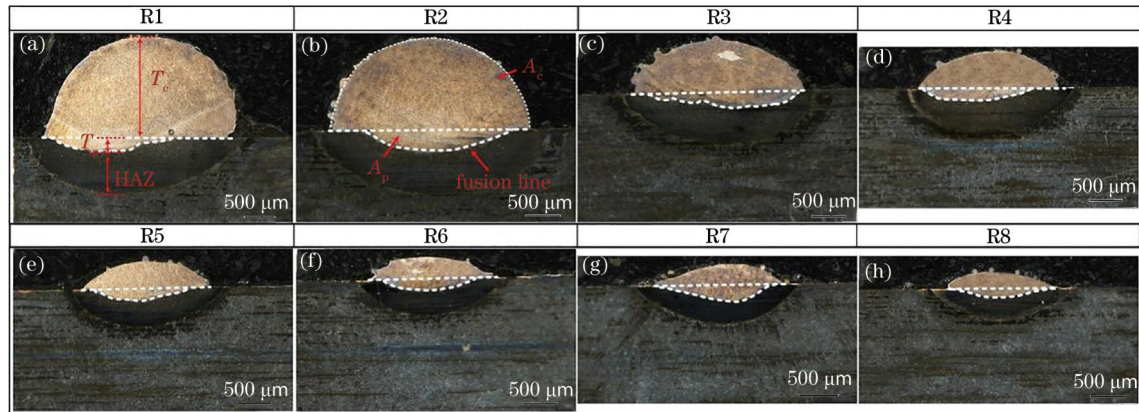


图 5 恒定粉末吸热率变扫描速度条件下熔覆道横截面的几何形貌

Fig. 5 Geometrical morphologies of cladding bead cross-section formed at constant powder heat absorption rate and variable scanning rates

(350 mm/min)会导致过多的熔融粉末沉积,部分熔融粉末与基体结合处的接触角润湿不好,不利于沉积层与基体的结合。

由表 4 及图 6 可知,随着扫描速度增大,相对于熔宽,熔高减小的幅度更大一些(W/T_c 逐渐增大),同时稀释率呈现先增大后减小的趋势变化。这表明,随着扫描速度增大,沉积层面积比熔合区面积

减小得更快,当扫描速度增大到 2520 mm/min 时,沉积层面积开始比熔合区面积减小得缓慢,熔覆层的横截面形貌开始变得不规则。可见,扫描速度对沉积层面积的影响更显著。随着扫描速度增大,热影响区(HAZ)的深度 T_p 逐渐减小。在 R5 工艺之后,随着扫描速度增大,热影响区尺寸开始减小得不明显,如表 4 所示。

表 4 恒定粉末吸热率变扫描速度条件下熔覆道横截面的几何尺寸

Table 4 Geometrical sizes of cladding bead formed at constant powder heat absorption rate and variable scanning rates

No.	Process parameter			Geometrical size					
	Power / kW	Powder feed rate / ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	Scanning rate / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	$T_c / \mu\text{m}$	$W / \mu\text{m}$	Contact angle / ($^\circ$)	$T_p / \mu\text{m}$	W/T_c	$A_p / (A_c + A_p) / \%$
R1	1.7	13.1	350	1708.8	3182.5	40.1	778.6	1.9	5.9
R2			420	1533.0	3349.2	42.2	742.9	2.2	14.2
R3			840	890.1	2865.1	36.1	635.7	3.2	19.4
R4			1260	620.9	2317.5	29.2	550.0	3.7	21.4
R5			1680	461.5	2159.5	27.2	414.3	4.7	25.9
R6			2100	362.6	2119.8	26.7	400.0	5.8	26.7
R7			2520	335.2	2150.8	27.1	378.6	6.4	36.5
R8			2940	274.7	1793.7	22.6	342.9	6.5	29.5

对 8 组熔覆道进行显微硬度测试,测试结果如图 7 所示(以熔合线为坐标零点)。由图 7 可以看到,随着扫描速度增大,热影响区软化点到熔覆层/基体界面的距离减小,且软化程度逐渐减小。这主要是因为随着扫描速度增大,基体对激光能量的吸收逐渐变弱,熔合区及热影响区尺寸开始逐渐减小。

可见,扫描速度决定了粉末与基体吸收的激光能量的比例,它对稀释率的显著影响主要是通过显著改变沉积层面积来实现的。下文选取 R5 工艺对应的扫描速度进行粉末吸热率的单因素熔覆试验。

3.2 粉末吸热率单因素熔覆工艺

图 8 给出了恒定扫描速度变粉末吸热率工艺下熔覆道横截面的几何形貌。为了简化粉末吸热率的变化,控制送粉速率恒为 13.1 g/min,扫描速度恒为 1680 mm/min。由图 8(a)~(f)可以看出,随着激光功率从 1.1 kW 增大到 1.5 kW,熔覆道的熔深及熔合区面积逐渐增大,当激光功率增大到 1.5 kW 时,熔合区出现开裂现象。图 8(a)显示当激光功率为 1.1 kW 时,熔覆道横截面的稀释率为 0。

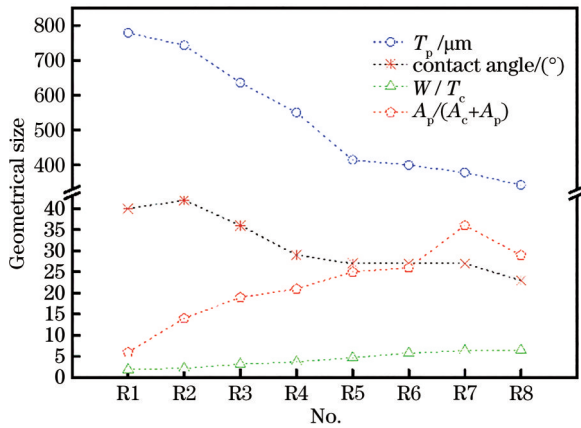


图 6 恒定粉末吸热率变扫描速度条件下熔覆道横截面几何尺寸的变化

Fig. 6 Variations of cross-section size of cladding bead formed at constant powder heat absorption rate and variable scanning rates

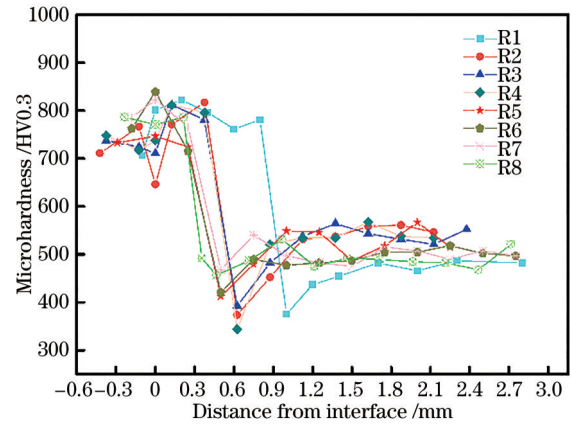


图 7 恒定粉末吸热率变扫描速度条件下熔覆道的显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distribution of cladding beads formed at constant powder heat absorption rate and variable scanning rates

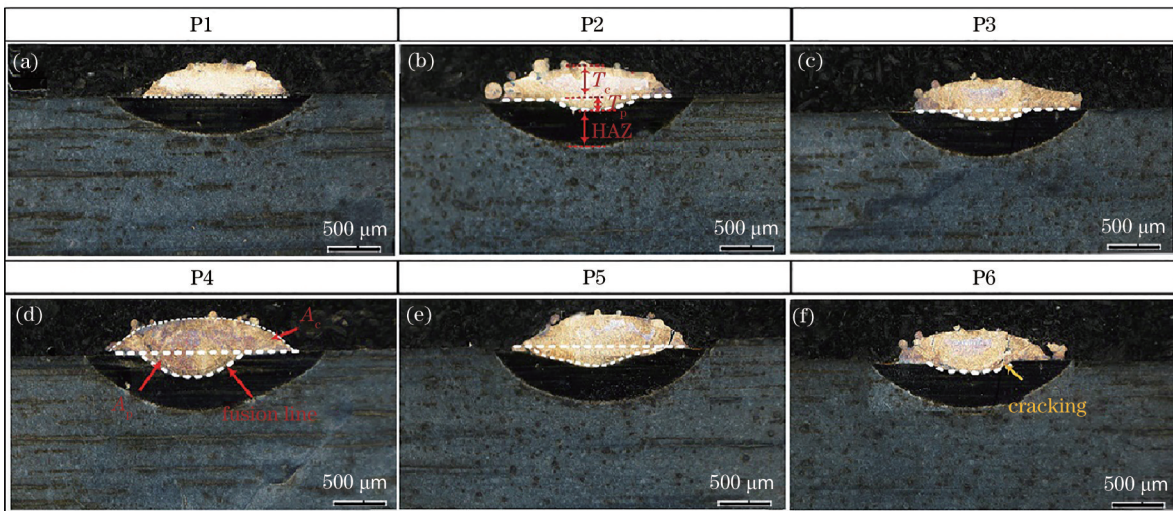


图 8 恒定扫描速度变粉末吸热率工艺下熔覆道横截面的几何形貌

Fig. 8 Geometrical morphologies of cladding bead cross-section formed at constant scanning speed and variable powder heat absorption rates

由表 5 可知,随着激光功率的增大,熔高、熔宽、润湿角及热影响区尺寸变化不大,熔宽与熔高之比呈先增大后减小的变化趋势,即随着功率的增大,熔覆道先横向变宽,当激光功率大于 1.3 kW 时开始出现明显的纵向延伸,当激光功率为 1.5 kW 时熔合区出现开裂。

对表 5 所示数据进行整理,结果如图 9 所示。由图 9 可以看到,随着激光功率增大,稀释率整体呈增大的变化趋势。这主要是因为扫描速度及送粉速率一定的情况下,激光功率决定了粉末和基体吸收能量的总和,激光功率越大,基体吸收的能量越多,熔合区的面积越大,在单位时间送粉量一定

的情况下,稀释率就越大。

结合熔深及熔高的变化可知激光功率对稀释率的影响主要是通过显著改变熔合区面积来实现的。

对 6 组工艺下的熔覆道进行显微硬度表征,结果如图 10 所示。由图 10 可以看到,在本试验采用的激光功率范围内,激光功率对热影响区尺寸的影响不显著,但对热影响区的软化程度有一定影响,即:随着激光功率增大,热影响区的软化程度变大。这主要是因为激光功率增大使得熔覆粉末和基体吸收能量的总和增大,在粉末熔化所吸收的热量不变的情况下,基体吸收的能量增大,导致高强度热影响区的软化程度增大。

表 5 恒定扫描速度变粉末吸热率工艺下熔覆道横截面的几何尺寸

Table 5 Geometrical size of cladding bead cross-section formed at constant scanning speed and variable powder heat absorption rates

No.	Process parameter			Geometrical size					
	Power / kW	Powder feed rate / (g·min ⁻¹)	Scanning rate / (mm·min ⁻¹)	T _c / μm	W / μm	Contact angle / (°)	T _p / μm	W / T _c	A _p / (A _c + A _p) / %
P1	1.1			351.9	1506.2	41.5	365.2	4.3	1.9
P2	1.2			309.5	1660.7	45.0	324.6	5.4	11.9
P3	1.25	13.1	1680	333.3	1801.3	43.5	352.4	5.4	11.5
P4	1.3			333.5	1816.1	38.2	324.5	5.4	23.7
P5	1.4			375.0	1694.4	56.8	303.6	4.5	26.0
P6	1.5			386.1	1879.7	36.3	342.2	4.9	20.5

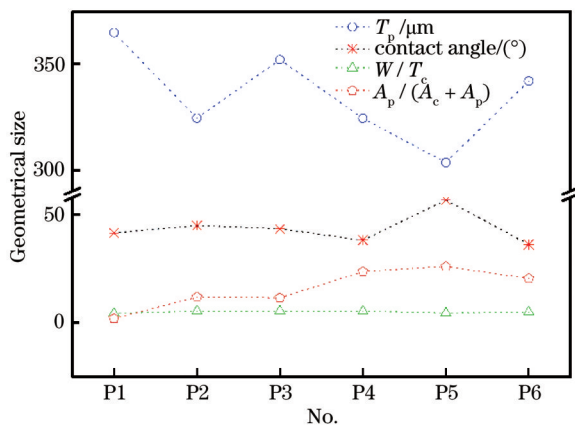


图 9 恒定扫描速度变粉末吸热率工艺下熔覆道横截面几何尺寸的变化

Fig. 9 Variations of cross-section size of cladding bead formed at constant scanning speed and variable powder heat absorption rates

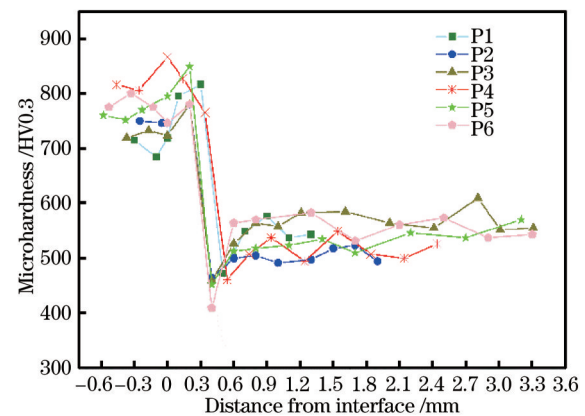


图 10 恒定扫描速度变粉末吸热率工艺下熔覆道的显微硬度分布

Fig. 10 Microhardness distribution of cladding bead formed at constant scanning speed and variable powder heat absorption rates

3.3 稀释率与修复性能

为了揭示稀释率是否会对熔覆件界面结合强度产生影响,选取稀释率为 0 的 P1 工艺以及稀释率、润湿角适中且横截面形貌较为规则的 P4 工艺分

别制备熔覆件,然后利用微剪切测试装置对两种熔覆件的界面结合强度进行表征,结果如图 11(a)所示。图 11(a)中的虚线圆圈代表微剪切测试点,图 11(b)为界面结合强度的测试结果。由图 11(b)

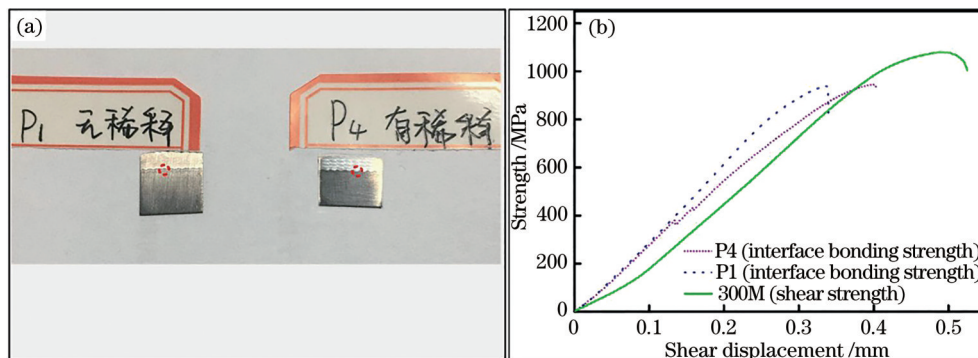


图 11 有无稀释率情况下的微剪切试验结果。(a)微剪切测试点;(b)界面结合强度和剪切强度的测试结果

Fig. 11 Microshear test results with and without dilution rate. (a) Microshear test points; (b) tested interface bonding strength and shear strength

可以看出, P1 工艺制备的熔覆件的界面结合强度为 945 MPa, P4 工艺制备的熔覆件的界面结合强度为 939 MPa, 300M 钢基体的剪切强度为 1117 MPa。可见, 在无稀释率的情况下也可以得到结合强度良好的修复件。

4 结 论

本研究团队借助粉末吸热率(激光功率与送粉速率之比)来简化工艺参数对稀释率的影响, 得到的主要结论如下:

1) 粉末吸热率一定时, 扫描速度决定了粉末与基体吸收的激光能量的比例, 对稀释率有较为显著的影响。扫描速度对稀释率的显著影响主要是通过显著改变沉积层面积来实现的。过小的扫描速度(350~420 mm/min)会导致过多的熔融粉末沉积, 易造成熔融粉末与基体结合处接触角的润湿不好, 不利于沉积层与基体的结合强度; 而过大的扫描速度(增大到 2520 mm/min 时)则会导致熔覆道横截面沉积层形貌不规则。

2) 扫描速度一定时, 粉末吸热率决定了粉末和基体吸收能量的总和, 此时粉末吸热率与基体熔合区面积呈正相关, 对稀释率有显著影响。粉末吸热率对稀释率的显著影响主要是通过显著改变熔合区面积来实现的。在粉末充分熔融的状态下, 较小的粉末吸热率可以制备出无稀释率的熔覆道, 而过大的粉末吸热率易产生过大的熔合区, 从而导致开裂现象。

3) 基体对粉末合金成分的稀释易造成高硬度的熔合区。对比有无稀释率的熔覆件的界面结合强度可以发现, 有无稀释率对熔覆件界面结合强度的影响不显著, 其界面结合强度分别是 300M 基体剪切强度的 85% 和 84%。

参 考 文 献

- [1] Liu X M, Wang C X, Liu R, et al. History and development of ultra-high strength structural steel [R]. Beijing: China Metal Society, 2002.
刘宪民, 王春旭, 刘蕤, 等. 超高强度结构钢的历史及发展[R]. 北京: 中国金属学会, 2002.
- [2] Zhao B, Xu G X, He F, et al. Present status and prospect of ultra high strength steel applied to aircraft landing gear[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(6): 1-6.
赵博, 许广兴, 贺飞, 等. 飞机起落架用超高强度钢应用现状及展望[J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 1-6.
- [3] Sun Y K, Zhang W. Development and research status of materials used for landing gear of civil aircraft[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(20): 22-24, 29.
孙艳坤, 张威. 民机起落架用材料的发展与研究现状[J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 22-24, 29.
- [4] Bo X T. Aviation ultra high strength steel[J]. Heat Treatment, 2015, 30(6): 60-61.
薄鑫涛. 航空超高强度钢[J]. 热处理, 2015, 30(6): 60-61.
- [5] Li Y, Tian W J, Lei L, et al. Research progress of processing technique of difficult-to-machine aviation material[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(4): 12-17.
李郁, 田卫军, 雷玲, 等. 航空典型难加工材料切削加工技术研究进展[J]. 装备制造技术, 2018(4): 12-17.
- [6] Wang S, Zheng S, Liu W J, et al. Optimization of process parameters of laser cladding Fe35A alloy on 45 steel surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0914007.
王胜, 郑舜, 刘文军, 等. 45 钢表面激光熔覆 Fe35A 合金的工艺参数优化[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0914007.
- [7] Guo W, Zhang Y P, Chai R X. Numerical simulation and experimental study of single-track laser cladding of 304 stainless steels[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 091401.
郭卫, 张亚普, 柴蓉霞. 单道次激光熔覆 304 不锈钢数值模拟与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 091401.
- [8] Guo W, Li K K, Chai R X, et al. Numerical simulation and experiment of dilution effect in laser cladding 304 stainless steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051402.
郭卫, 李凯凯, 柴蓉霞, 等. 激光熔覆 304 不锈钢稀释效应的数值模拟与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051402.
- [9] Zhu G X, Zhang A F, Li D C. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 296-301.
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 296-301.
- [10] Chryssolouris G, Zannis S, Tsirbas K, et al. An experimental investigation of laser cladding[J]. CIRP Annals, 2002, 51(1): 145-148.
- [11] Kim J D, Peng Y. Melt pool shape and dilution of

- laser cladding with wire feeding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 104(3): 284-293.
- [12] Pan H, Zhao J F, Liu Y L, et al. Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloy by laser cladding repair[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0403007.
潘浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403007.
- [13] 张建勋, 刘艳, 邱长军, 等. 一种增材制造与修复用铁粉的气雾化制备工艺: CN110640156A[P]. 2020-01-03.
Zhang J X, Liu Y, Qiu C J, et al. An gas atomization preparation process of iron powder used for additive manufacturing and repair: CN110640156A[P]. 2020-01-03