

IN718 激光送丝修复 304 轴件的工艺参数优化及组织性能分析

吴俊波¹, 王振忠^{1*}, 李毅¹, 刘超凡¹, 陈丰²

(1. 厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361102; 2. 华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: [目的] 为解决传统单一材料体系和制造工艺难以满足轴类零件修复的可靠性, 以及修复后工件表面缺陷显著等问题, 对异质金属结构-功能一体化的激光增材制造技术进行研究. [方法] 采用直径 0.4 mm 的 IN718 镍基合金细丝, 对 304 不锈钢轴件进行异质材料激光直接熔融沉积修复, 采用单因素试验设计研究工艺窗口下工艺参数对熔覆层成形尺寸的影响规律, 分析不同加工路径下试样的宏观组织特征及显微硬度分布. 得到最佳工艺条件. [结果] 900 W 激光功率、1 600 mm/min 扫描速度、9.5 m/min 的送丝速率、30% 搭接率工艺条件下熔覆平整度最高, 均匀性最好. 同时, 扫描速度、送丝速率对成形尺寸影响显著, 而激光功率对成形尺寸无明显影响. 周向熔覆可以实现无拼接痕迹的修复, 轴向熔覆则效果较差. 试样修复区的平均硬度约为 330 HV, 试样基体区的平均硬度约为 220 HV, 试样修复部分的平均硬度要高于基体, 结合区域致密良好, 熔覆无明显未熔合与气孔缺陷. [结论] 研究结果有助于推动激光细丝增材制造对轴类等曲面零件修复的应用.

关键词: 异质材料增材; 激光送丝修复; IN718 镍基合金; 定向能量沉积; 显微硬度

中图分类号: TG 665

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)02-0286-11

Process parameter optimization and microstructure performance analysis of 304 shafts repaired by IN718 with laser wire feeding

WU Junbo¹, WANG Zhenzhong^{1*}, LI Yi¹, LIU Chaofan¹, CHEN Feng²

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361100, China; 2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: [Objective] To solve the problem that the traditional single material system and manufacturing process are difficult to meet the reliability of the repaired shaft parts, and the typical internal defects of the repaired workpiece, herein we investigate the structure-function integration of heterogeneous metals, laser additive manufacturing technology. [Methods] In this paper, IN718 nickel-based alloy wire with 0.4 mm diameter was used to explore the repair process of 304 stainless steel shaft with heterogeneous materials by laser direct melting deposition. Then, the forming size of the cladding layer influenced by process parameters under the process window was investigated through single factor experimental design. Next, the macro-structure characteristics and micro-hardness distribution of samples under different process parameters and paths were analyzed. Finally, the optimal process conditions were obtained. [Results] Results indicate that, when the laser power is 900 W, the scanning speed is 1 600 mm/min, the wire feeding rate is 9.5 m/min, and the bonding rate equals 30%. The cladding roughness and the uniformity reach the maximum level. Under the process window, scanning speed and wire feed speed significantly affect the forming size, but laser power exert little effect on the forming size. When circumferential cladding is used for repair, the repaired area can be achieved without any splicing marks, while the

收稿日期: 2024-09-09 录用日期: 2025-02-25

* 通信作者: wangzhenzhong@xmu.edu.cn

引文格式: 吴俊波, 王振忠, 李毅, 等. IN718 激光送丝修复 304 轴件的工艺参数优化及组织性能分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(2): 286-296.

Citation: WU J B, WANG Z Z, LI Y, et al. Process parameter optimization and microstructure performance analysis of 304 shafts repaired by IN718 with laser wire feeding[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(2): 286-296. (in Chinese)



axial cladding secures a less satisfactory effect. The average hardness of the repaired area of the sample is approximately 330 HV, while the average hardness of the matrix area is approximately 220 HV. The average hardness of the repaired part of the sample exceeds that of the matrix. Finally, the bonding area is dense and no obvious defects of non-fusion and porosity in the cladding exist.

[Conclusions] Hopefully, the proposed research can help promote the application of wire and laser additive manufacturing in the field of heterogeneous material additive for the repair of curved parts such as axes.

Keywords: heterogeneous material additive; laser wire feeding repair; IN718 nickel-based alloy; directed energy deposition; microhardness

航空航天、船舶等领域机械装备普遍存在高温、高压、高速的服役环境,轴类零件作为承受载荷、传递扭矩的关键元件,易发生磨损、氧化烧蚀,轴面磨损是此类装备中高价值轴类零件失效的主要形式^[1],开展高效、高质的轴表面损伤修复技术研究具有重要意义.激光送丝增材制造技术(wire and laser additive manufacturing, WLAM)是以激光为热源,金属丝材为原材料的一种增材制造技术.相比于送粉式激光熔覆,送丝式激光熔覆可实现损伤零部件近净成形,在材料利用率、熔覆层表面形貌、熔覆层成形质量等方面更具优势,近几年在相关高温合金零件修复方面已有较广泛的研究^[2-3].

Inconel 718(IN718)镍基高温合金,具有高强度、耐高温腐蚀、抗蠕变等优良物理化学性质.304 不锈钢同样具有良好的热稳定性,材料成本较低.将 304 不锈钢与 IN718 合金熔覆结合制成双金属结构,可以同时发挥两种材料的优异性能,通过异质材料对基材进行局部强化^[4-5],从而大幅降低成本.利用金属异质增材制造技术获得的异质金属构件具有优异的机械和物化性能. Ramkumar 等^[6]对 IN625 镍基合金和 UNS 32205 不锈钢的焊接工件进行研究,发现焊缝区富 Mo 相在枝晶间析出,而镍侧热影响区无明显的晶粒粗化及第二相析出,试样拉伸断裂发生在焊缝区域,最高抗拉强度达到 850 MPa.李宁等^[7]将 IN718 镍基合金与 304 不锈钢进行电子束焊接,分析接头显微组织及力学性能,发现焊缝区显微硬度值高于镍基合金侧及不锈钢侧,拉伸试样断裂发生于焊缝区内部,呈典型的韧性断裂,断口可观察到明显等轴状韧窝.可见,异质金属材料可为各种极端服役环境下的零件设计制造提供全新思路,能满足相关领域对零件的高性能、多功能化需求^[8].

目前异质金属材料的兼容问题(易诱发缺陷、加工参数响应不一等)会限制高质量异质界面的形成^[9].激光熔覆技术仍存在熔覆层表面质量差,热影响区性能劣化,金属成形区域力学性能不稳定以及残余应力大等问题^[10],容易导致熔覆层出现未熔合、气孔等缺陷,严重影响修复零件的使用性能.实际应用中

熔覆层和基材的结合区域通常是再制造零件中较为薄弱的区域,该区域的组织性能对修复后零件的使用寿命起到决定性作用^[11].已有文献对激光熔覆 IN718 合金的组织特征、拉伸性能、摩擦磨损性能和强化机理等进行研究^[12-14].尹嵩等^[15]进行了轴件修复及强化的试验研究,分析修复后覆层与基体界面处组织成分及硬度的梯度分布、熔覆层与基体复合体的拉伸性能、室温及高温下的磨损行为,结果表明激光熔覆工艺对轴件修复强化的可行性.玄明昊等^[16]采用正交试验法对 TC4 钛合金的激光成形连接工艺参数进行优化,通过缺陷检测发现各参数中线能量密度对连接试验件的拉伸性能影响显著.郭顺等^[17]采用双丝等离子实现了 TC4 与 TA2 交替沉积的异质层状钛合金构件的增材制造,层状结构中 TC4 区域的硬度明显高于 TA2 区域,且沿着沉积方向硬度增加,沿着扫描方向具有屈服强度增加.王梦璐等^[18]通过极差值与排序结果,分析工艺参数对单道熔覆层几何形状的影响规律,结果表明激光功率和粉末供给速率分别为影响熔覆高度和宽度的主要因素.目前较多研究集中在平面零件上激光沉积 IN718 合金的显微组织特征和力学性能,如拉伸和高温性能^[19-21]或者曲面零件的表面涂层的制备,激光送丝增材修复再制造在圆轴等曲面零件的工艺研究和应用很少.

本文使用 IN718 合金细丝对 304 不锈钢圆轴进行异质材料激光修复再制造试验研究,采用增减材复合的形式,将 304 不锈钢圆轴上的缺陷区域通过铣削去除,再进行激光送丝熔覆修复,对轴受损区域进行局部的修复与强化.并基于单因素试验确定最佳工艺参数,观察和分析修复表面与截面区域的组织特征和形成机制,对熔覆区与基体区界面处的微观组织及显微硬度进行测定和分析.

1 激光送丝修复试验材料与方法

1.1 试验材料

激光沉积修复试验采用直径为 32 mm 的 304 不锈钢圆轴作为修复基体,熔覆材料为 IN718 合金丝材,合金丝材的直径为 0.4 mm,其密度为 8.24 g/cm³,合

金丝材及修复基体的化学成分如表 1 所示. IN718 合金的熔点和 20~900 °C 内热膨胀系数分别为 1 320 °C 和 $18.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 1 454 °C 和 0~800 °C 内的热膨胀

系数为 $19.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. 试验前采用砂纸对圆轴表面进行打磨, 并使用体积分数为 99% 酒精超声清洗 20 min.

表 1 合金丝材和基材的化学成分
Tab. 1 Chemical composition of alloy wire and substrate

材料	C	Mo	Ni	Fe	Cr	Al	Ti	Nb	Si	Mn
IN718	0.04	2.92	Bal.	14.18	18.16	0.48	1.04	5.02	0.30	0.20
304	0.07	—	8.50	Bal.	19.32	—	—	—	2.00	2.00

注: “Bal.” 为 “balance” 的缩写, 表示其余部分的含量.

1.2 试验设备与方法

本研究激光熔覆设备为自主研发的双 Z 轴五轴送丝增减材数控机床, 该机床为双转台构型, 采用六轴五联动的五轴联动方式实现增减材复合制造, 配置激光熔覆头及减材铣削刀具主轴, 可直接进行粗、精减材加工, 无需重复装夹定位. 该机床增材系统由激光部分、五轴数控机床、摩擦挤出式送丝机以及供气和循环水冷等设备组成, 实验设备如图 1 所示. 激光部分由激发器与激光头组成, 激光器为连续激光器, 最大输出功率为 3 000 W, 波长为 1 080 nm, 激光光斑直径为 0.8 mm; 送丝机送丝速度为 0~24 m/min, 可打印丝材直径范围为 0.2 mm~1.8 mm; 为了避免送丝激光增材熔覆实验过程中熔覆层熔融金属被氧化, 采用同轴送气的方式, 向激光头中通入 99.99% 纯度的 Ar 气作为保护气. 激光沉积修复如图 2 所示. 通过单因素试验, 研究熔覆加工工艺参数对 IN718 合金单道在圆轴上熔覆层成形规律的影响, 并进行工艺优化.

为研究激光单熔覆道增材制造的成形质量, 根据

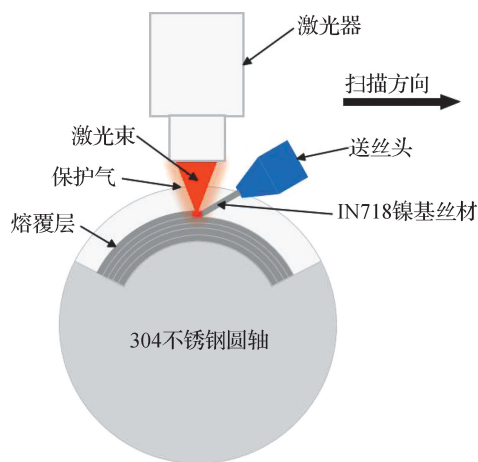
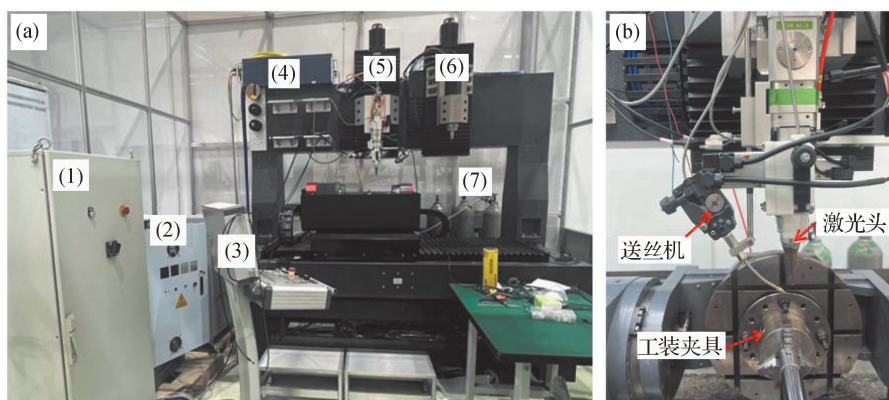


图 2 激光沉积修复
Fig. 2 Laser deposition repair

文献[22-23]选取激光功率(P)、扫描速度(S)和送丝速率(F)作为主要影响因素, 丝材采用直径为 0.4 mm 的 IN718 镍基丝材. 由于激光功率是首要因素^[22], 当激光功率过低, 丝材无法融化, 激光功率过高又会熔



(1) 电控柜; (2) 变压柜; (3) 控制台; (4) 激光器; (5) 增材加工部分; (6) 减材加工部分; (7) 保护气

图 1 双 Z 轴五轴送丝增减材实验设备

Fig. 1 Experimental equipment of double Z-axis and five-axis wire feeding for additive and subtractive manufacturing

覆层表面氧化,甚至因熔池剧烈沸腾,金属蒸气喷溅而形成表面气孔,因此,经初步试验,将激光功率窗口确定在 800~1 200 W. 同时将扫描速度确定在 600~2 000 mm/min,送丝速率确定在 5~10 mm/s. 此时,熔覆道光滑连续且无明显缺陷. 在工艺参数选定范围内,具体工艺参数如表 2 所示.

表 2 激光熔覆 IN718 合金丝材试验工艺参数
Tab. 2 Test process parameters of laser cladding

IN718 alloy wire	
工艺参数	参数值
P/W	800,900,1 000,1 100,1 200
$S/(mm \cdot \text{min}^{-1})$	600,800,1 000,1 200,1 400,1 600, 1 800,2 000
$F/(m \cdot \text{min}^{-1})$	5.0,5.5,6.0,6.5,7.0,7.5,8.0,8.5, 9.0,9.5,10.0

将单因素工艺试验获得的激光单熔覆道实验样件沿轴向进行线切割、打磨抛光,使用光学显微镜(基恩士 VHX-900)测量熔覆层的熔宽(W)、熔高(H)、宽高比(W/H),并通过测量得到的熔宽来设置不同搭接率下对应的中心距(D),如图 3 所示. 其中,搭接率计算公式为

$$\delta = 1 - \frac{D}{W} \quad (1)$$

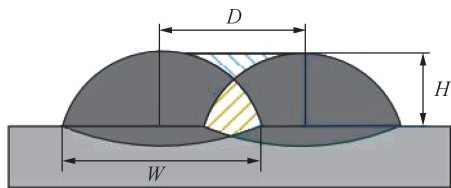
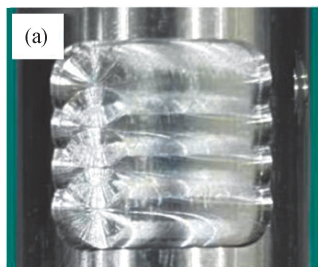


图 3 搭接率截面参数

Fig. 3 Section parameters of lap ratio

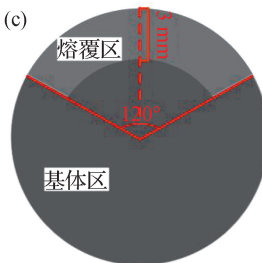
熔覆修复样件如图 4(a)所示,在直径 32 mm 的圆轴上采用圆弧式铣削 120°的槽,槽的宽度和深度为



(b)



(c)



(a)熔覆修复件;(b)熔覆修复件三维示意图;(c)熔覆修复件特征尺寸示意图

图 4 修复前试样

Fig. 4 Sample before repair

20×3 mm,其三维和截面示意图如图 4(b)和(c)所示. 对熔覆修复完成后的试件沿径向进行线切割,再经打磨、抛光、腐蚀等工序完成样品的制备,然后采用光学显微镜、显微维氏硬度计对试样的形貌、显微组织及硬度进行分析. 在相同工艺参数下,分别对轴向和周向两个方向熔覆修复的试样沿着截面中心线测量其显微硬度,如图 4(c)所示测量点间隔 0.5 mm,共采取 15 个点样.

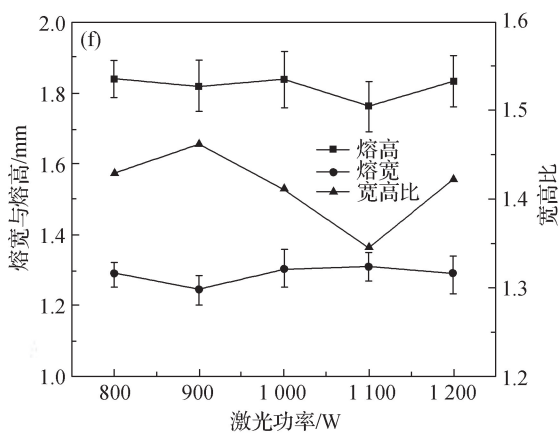
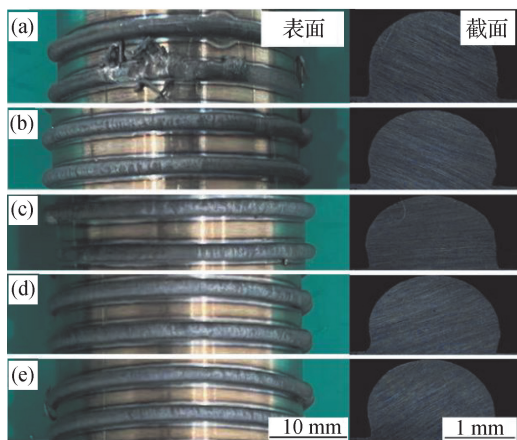
2 激光送丝修复试验结果与分析

2.1 工艺参数对 IN718 熔覆层成形尺寸的影响规律

2.1.1 激光功率对熔覆层成形的影响

为了研究不同工艺参数对激光熔覆 IN718 合金成形质量的影响,采用单因素实验,依次探究激光功率、扫描速度、送丝速率 3 个不同因素,同时在上一个确定的最优参数下逐步优化,以达到最佳熔覆效果,为后续搭接率的优化及熔覆修复奠定基础. 对于激光送丝增材技术工艺的稳定性仍然是当前研究的重点之一,因此在确定最佳工艺参数时,首先考虑工艺的稳定性,这个主要体现在单熔覆道实验中的熔覆道的熔高、熔宽与宽高比上. 由于进行初始工艺参数探究时,熔覆质量尚不确定,故每个设定的激光功率进行两次熔覆,并选取熔覆层表面连续且光滑的熔覆道进行线切割并在光学显微镜下观察其宏观形貌,初始设定送丝速率为 10.0 m/min,扫描速度为 1 000 mm/min,光斑直径为 0.8 mm,保护气流量为 0.25 L/min. 图 5 为激光熔覆 IN718 合金单道熔覆实验中不同激光功率下,圆轴表面熔覆的单熔覆道与截面的宏观形貌.

当激光功率小于 900 W 时[图 5(a)],在熔覆过程中,由于热密度不足,使得送丝机挤出的丝材不能及时熔化,从而导致顶丝问题比较严重,熔覆质量较差.



(a)800 W;(b)900 W;(c)1 000 W;(d)1 100 W;(e)1 200 W;(f)不同激光功率下熔覆层截面尺寸

图 5 不同激光功率熔覆层的表面与截面形貌及尺寸变化

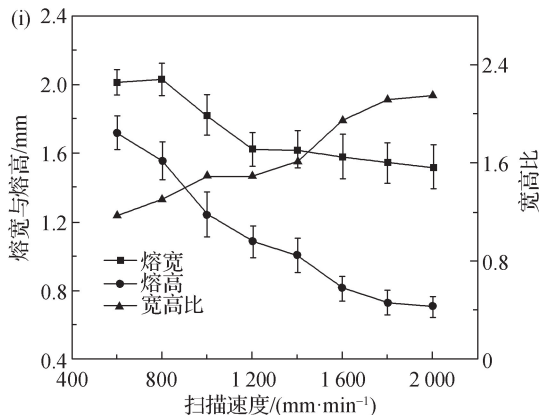
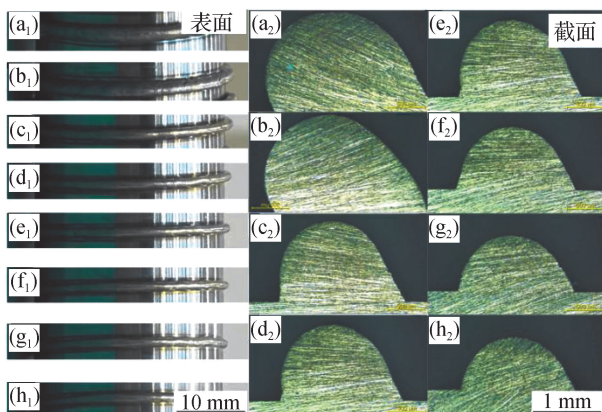
Fig. 5 Surface and cross section morphology and size variation of cladding layer with different laser power

当激光功率为 900~1 000 W 时,熔覆道表面成形良好[图 5(b)~(c)],无明显氧化现象. 当激光功率大于 1 000 W 时,熔覆道的表面成形良好,熔覆层连续,但是由于激光功率较高,表面氧化较为严重,表面张力变化以及熔池中心区域塌陷导致结合处形成内凹[图 5(d)~(e)],从而影响熔覆层与基体的结合强度. 熔覆层的熔宽、熔高与宽高比随激光功率的变化规律如图 5(f)所示,随着激光功率的增大,熔高、熔宽、熔道宽高比的变化均不大. 熔高在 1.75~1.85 mm 之间波动,熔宽在 1.2~1.3 mm 之间波动,熔道宽高比约在 1.35~1.45 区间波动. 这说明在固定的送丝速度和扫描速度下,激光功率在 800~1 200 W 区间时,对熔道的尺寸影响不大,熔宽一般由激光融化金属丝生成的液滴大小所决定,因此说明激光功率在工作窗口内对

金属液滴的尺寸影响不大. 考虑到 900 W 时熔覆层宽高比最大,同时不存在顶丝和表面氧化的问题,故选取 900 W 作为最佳激光功率.

2.1.2 扫描速度对熔覆层成形的影响

对于圆轴上的沉积熔覆,扫描进给采用相对运动方式,即激光头保持不动,由夹具带着轴旋转来进行轴表面的沉积熔覆. 如图 1(b)所示,相对扫描方向向右,则在实际运动中,圆轴逆时针旋转. 将激光功率设置为 900 W 后,送丝速度仍为 10.0 m/min,对不同扫描速率下圆轴表面上熔覆的熔覆层的表面与截面形貌进行对比分析,结果如图 6 所示. 由图 6 可知,扫描速度为 600~2 000 mm/min 时,熔道表面光滑且平整,且随着扫描速度的增加,熔道截面形状由向一侧倾斜逐渐趋于对称. 对称的熔道截面有助于避免后续



(a)600 mm/min;(b)800 mm/min;(c)1 000 mm/min;(d)1 200 mm/min;(e)1 400 mm/min;(f)1 600 mm/min;(g)1 800 mm/min;(h)2 000 mm/min;(i)不同扫描速度下熔覆层截面尺寸

图 6 不同扫描速度熔覆层的表面与截面形貌及尺寸变化

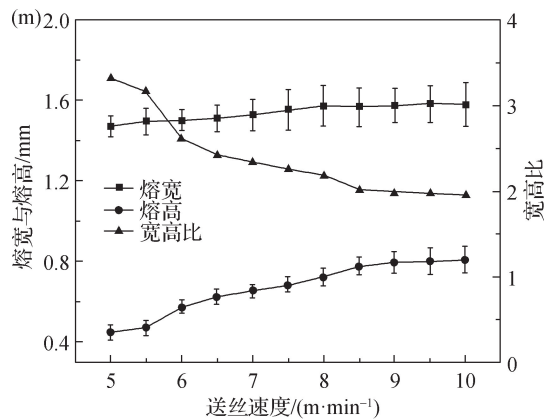
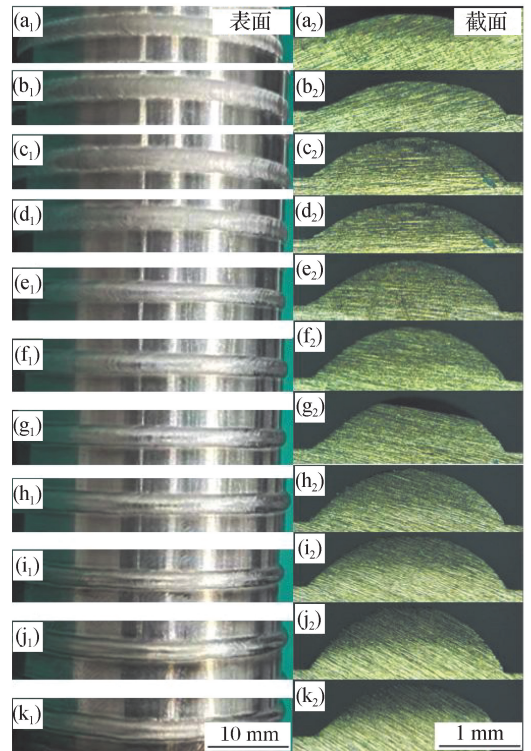
Fig. 6 Surface and cross section morphology and size variation of cladding layer with different scanning speeds

多层或多道熔覆时产生如边缘塌陷或者气孔等缺陷。其中,当扫描速度小于等于 $1\ 000\ \text{mm}/\text{min}$ 时[图 6(a)~(c)],由于在同一位置熔覆过多材料,送丝机又为侧面送丝,导致熔高较高,出现了熔覆层向一边倾斜的情况,同时在熔融材料表面张力的作用下存在内凹。继续增大扫描速度,熔覆道的倾斜逐渐改善[图 6(d)~(h)],当扫描速度大于等于 $1\ 600\ \text{mm}/\text{min}$ 时[图 6(f)~(h)],熔覆道倾斜不再明显,且与基体结合处连续,无内凹。

随着扫描速度的增加,熔覆层的熔宽、熔高与宽高比随激光功率的变化规律如图 6(i)所示。总体而言,随着扫描速度的增大,单熔覆道的熔宽呈先迅速下降后趋于稳定的变化趋势,熔高呈显著下降的趋势。扫描速度在从 $600\ \text{mm}/\text{min}$ 到 $1\ 200\ \text{mm}/\text{min}$ 时,熔宽从 $2.0\ \text{mm}$ 左右迅速下降到 $1.6\ \text{mm}$ 左右,宽高比由 1.2 增大至 1.5 左右;扫描速度大于 $1\ 000\ \text{mm}/\text{min}$ 时,熔高虽有下降,但趋势明显减缓,整体宽高比逐渐增大至 2.2 左右。在一定范围内,较大的宽高比代表着熔覆层与基体的结合情况良好,但在熔宽基本不变的情况下,熔高过低带来的过大的宽高比会导致熔覆效率降低。因此,在同时考虑熔覆层与基体的结合效果和熔覆效率的情况下,选取 $1\ 600\ \text{mm}/\text{min}$ (宽高比约为 2) 作为最佳扫描速度。

2.1.3 送丝速率对熔覆层成形的影响

送丝速率是决定熔覆效率的关键因素,更高的送丝速率代表着更高的熔覆效率,在保证熔覆层表面质量以及和激光功率相匹配(丝材及时熔化)的情况下,选择最高的送丝速率作为最佳的送丝速率。在设定激光功率和扫描速度分别为 $900\ \text{W}$ 和 $1\ 600\ \text{mm}/\text{min}$ 后,对不同送丝速率下圆轴上熔覆层的表面与截面形貌进行对比分析,结果如图 7 所示。当送丝速率小于等于 $7.0\ \text{m}/\text{min}$ 时[图 7(a)~(e)],熔覆层过薄且不连续,并存在明显波纹,边缘呈锯齿状。当送丝速度继续增加,熔覆层表面波纹将减少,呈逐渐光滑的趋势[图 7(f)~(j)]。当送丝速率为 $10\ \text{m}/\text{min}$ 时[图 7(k)],由于送丝速度过快,激光不能及时熔化送丝机挤出的丝材,扰动熔池的稳定性,导致熔覆层出现变形和偏转,送丝速率继续增大时,甚至会出现顶丝的情况。如图 5(a)所示,不能形成连续完整的熔覆层。如图 7(f)~(j)所示,即送丝速率为 $7.5\sim 9.5\ \text{m}/\text{min}$ 时,熔覆层表面连续且光滑,截面形貌良好。另外,如图 7(m)所示,熔宽随送丝速率的增加而减小,减小的速率呈下降趋势;熔高与宽高比随着送丝速率的增加呈上升趋势,且下降速率不断减小。当送丝速率为 $8.5\sim 10.0\ \text{m}/\text{min}$ 时,熔宽、熔高、宽高比随送丝速率的影响变化不大。



(a) $5.0\ \text{m}/\text{min}$; (b) $5.5\ \text{m}/\text{min}$; (c) $6.0\ \text{m}/\text{min}$; (d) $6.5\ \text{m}/\text{min}$; (e) $7.0\ \text{m}/\text{min}$; (f) $7.5\ \text{m}/\text{min}$; (g) $8.0\ \text{m}/\text{min}$; (h) $8.5\ \text{m}/\text{min}$; (i) $9.0\ \text{m}/\text{min}$; (j) $9.5\ \text{m}/\text{min}$; (k) $10.0\ \text{m}/\text{min}$; (m) 不同送丝速率下熔覆层截面尺寸

图 7 不同送丝速率熔覆层的表面与截面形貌及尺寸

Fig. 7 Surface and cross section morphology and size variation of cladding layer with different wire feed rates

故在考虑熔覆效率的情况下,选择 $9.5\ \text{m}/\text{min}$ 作为最佳送丝速率,再根据所用 IN718 合金丝材直径为 $0.4\ \text{mm}$,材料密度为 $8.24\ \text{g}/\text{cm}^3$ 计算得到对应送丝速率为 $10\ \text{g}/\text{min}$ 。

2.2 搭接率对熔覆层均匀性的影响

针对单层表面质量的表征主要分为平整度和结构均匀度两个方面。平整度衡量指标即震荡曲面各个波峰 H_i 和波谷 h_i 差值的平均值,称为峰谷差值 S_a 。

如式(2)所示, S_a 越小, 证明震荡曲面振幅越小, 表面平整度越好, 反之 S_a 越大, 证明震荡曲面振幅越大, 表面平整度越差. 另外由于增材过程中的工艺参数不合适或者外界干扰会导致熔覆层各熔道出现熔宽、熔高等几何结构尺寸的不均匀分布, 因此还需要使用结构均匀度表征这种不均匀现象的程度. 其指标主要包括波峰标准差 σ_H (式(3)) 和波谷标准差 σ_h (式(4)), 各个标准差数值越小, 则证明各个熔道尺寸分布越均匀, 熔覆层表面质量就越好. 在以上工艺参数的优化中, 最佳工艺参数 ($P = 900 \text{ W}$, $S = 9.5 \text{ m/min}$, $F = 1600 \text{ mm/min}$) 的平均熔宽约为 1.8 mm , 因此其搭接率与熔道中心距的对应关系如表 3 所示. 在利用不同搭接率在圆轴表面沉积宽度为 10 mm 的 IN718 合金熔覆层, 不同搭接率的熔覆层表面与截面形貌分别如图 8 和 9 所示. 可以看出在最佳工艺参数下, 各熔覆道光滑且连续, 氧化程度小, 没有明显塌陷或者气孔等缺陷. 随着搭接率由 0% 增加至 50% , 试样表面的光滑程度不断增加, 且相邻两道熔覆层之间的沟槽逐渐减小.

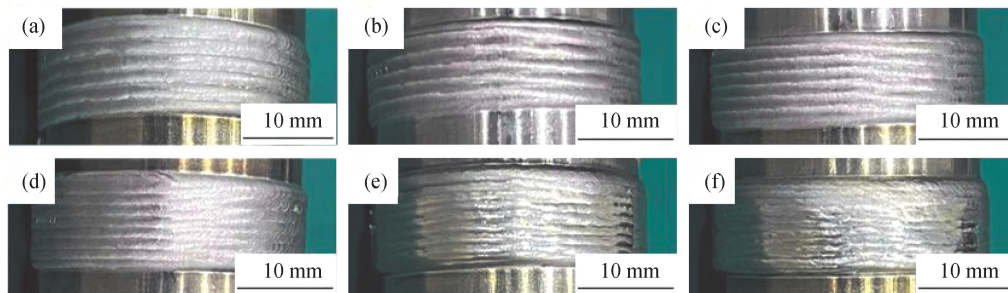
$$S_a = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - h_i)}{n}, \tag{2}$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n}}, \tag{3}$$

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n}}. \tag{4}$$

表 3 搭接率与对应的熔道中心距
Tab. 3 Lap rate and corresponding cladding layer center distance

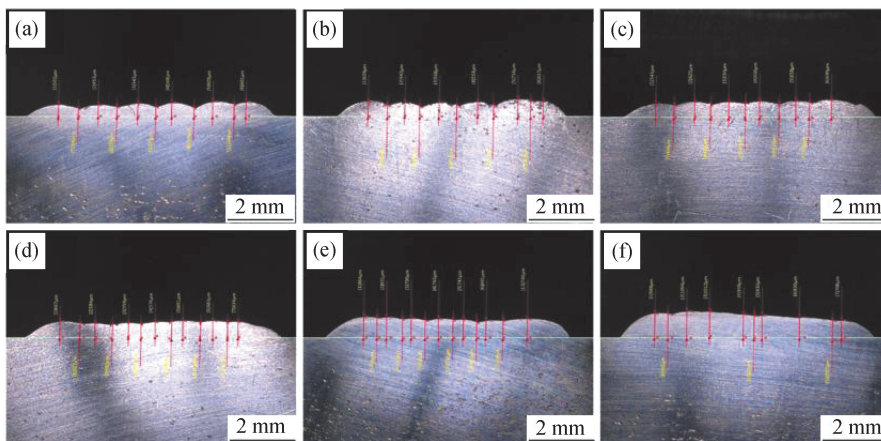
熔道中心距/mm	搭接率 $\delta/\%$
1.80	0
1.62	10
1.44	20
1.26	30
1.08	40
0.90	50



(a)0%;(b)10%;(c)20%;(d)30%;(e)40%;(f)50%

图 8 搭接率试验中的熔覆道表面形貌

Fig. 8 Surface morphology of cladding layers in lap rate test



(a)0%;(b)10%;(c)20%;(d)30%;(e)40%;(f)50%

图 9 搭接率试验中的熔覆道截面形貌

Fig. 9 Section morphology of cladding layers in lap rate test

搭接率与熔覆层平均高度和最大峰谷值的关系如图 10(a)所示. 随着搭接率的增加,熔覆层平均高度逐渐增大,且搭接率大于 30%后,熔覆层平均高度的增长速率进一步提升,搭接率小于 30%,熔覆层最大的峰谷值逐渐减小,但当搭接率大于 30%时,峰谷值开始增大,这是由于搭接率过大时,已经凝固成形的熔覆层部分与后续的挤出丝材接触并产生干扰,导致熔池不稳定[图 9(f)]. 搭接率 40%时熔覆层产生变

形,成形质量不佳. 如图 9(d)~(f)所示,随着搭接率的增加,相邻两熔道间波峰与波谷之间的差值在逐渐减小,当搭接率大于等于 30%时,已经没有明显的波峰波谷,并且当熔覆层的波峰、波谷的标准差都相对较小时,说明熔覆层结构更均匀,具体波峰、波谷以及整体尺寸的标准差如图 10(b)所示. 可以看出,30%的搭接率的熔覆层截面波峰波谷以及整体尺寸的标准差均较小,故选取 30%的搭接率作为最佳搭接率.

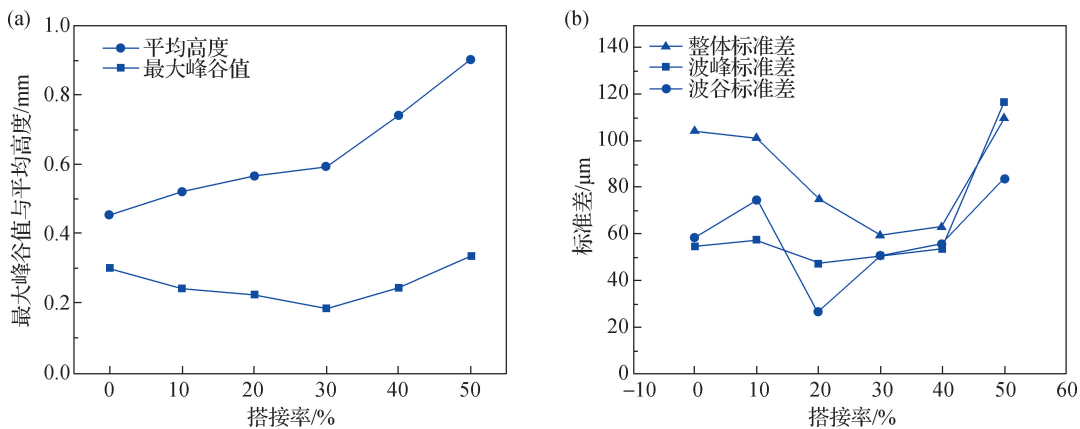


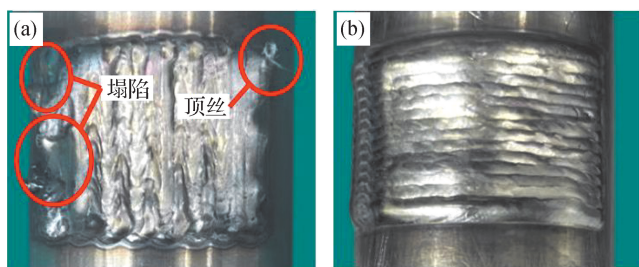
图 10 不同搭接率下熔覆层平整度与结构均匀度参数

Fig. 10 Flatness and structural uniformity parameters of cladding layer under different bonding rate

2.3 水平面熔覆沉积方向对熔覆层宏观形貌及截面显微硬度的影响

在对轴进行铣削去除受损区域后,对铣削出的凹陷部分进行送丝修复. 为了使修复后的轴能够继续投入使用,再铣削后的表面精度与力学性能需要达到使用要求,熔覆修复后的轴表面宏观形貌中不能出现明显的塌陷或顶丝等缺陷. 因此,采用前文中得到的最佳工艺参数探究熔覆沉积方向对熔覆层宏观形貌及截面显微硬度的影响. 图 11(a)和(b)分别为轴向熔覆修复与周向熔覆修复成形试样的表面宏观形貌. 如图 11 所示,通过轴向熔覆修复的样件表面出现较多的塌陷以及顶丝等缺陷;采用周向熔覆时(旋转方向为逆时针),送丝方向为前送丝,此时截面形状呈对称的圆弧形,有良好的表面形貌,没有产生明显的熔覆缺陷. 这是由于在送丝头位置固定时,通过轴向熔覆时,送丝方向为侧送丝,而侧送丝形成的熔覆层的截面形状不对称,最高点偏向丝材一侧^[24],经过多层多道的熔覆积累后,修复层表面产生塌陷,同时导致丝材与塌陷凝固后的部分产生干涉,造成顶丝,进一步恶化修复层表面形貌. 另外,前文获得的搭接率是基于平面获得的,对于轴向熔覆,熔覆道之间为曲面搭接,而周向熔覆时,位于轴向上的不同熔覆道仍可以等效为平

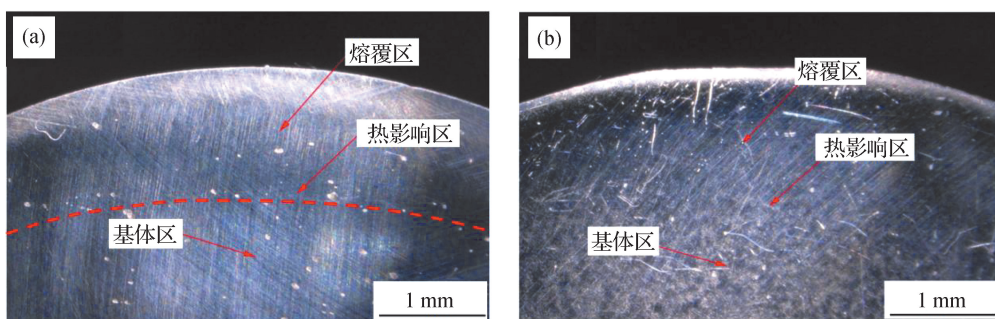
面搭接,这也是造成轴向熔覆修复层表面效果差的原因之一. 基体与修复区截面的宏观组织形貌如图 12 所示,轴向熔覆方式的熔覆区与基体区有着较明显的分层,而周向熔覆方式下,熔覆区与基体区过渡更加均匀.



(a)轴向熔覆修复;(b)周向熔覆修复

图 11 不同沉积方向下的熔覆修复表面形貌
Fig. 11 Surface morphology of cladding repair by different deposition directions

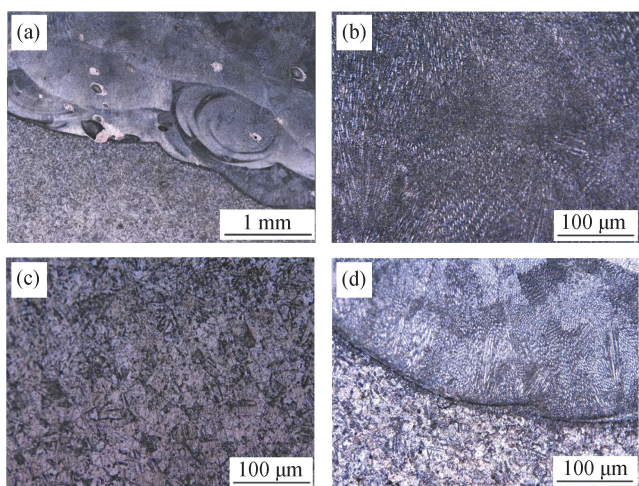
图 13 和 14 分别为轴向与周向熔覆修复层截面显微组织,观察到轴向熔覆相邻熔覆层间存在明显的搭接线,熔覆层与基体分界清晰. 并且如图 13(b)~(c)所示,熔合线两侧组织分布存在一定的不均匀性,熔覆区分散分布着枝晶,而如图 15 所示,在周向熔覆修



(a)轴向熔覆;(b)周向熔覆

图 12 不同沉积方向下的熔覆修复宏观截面

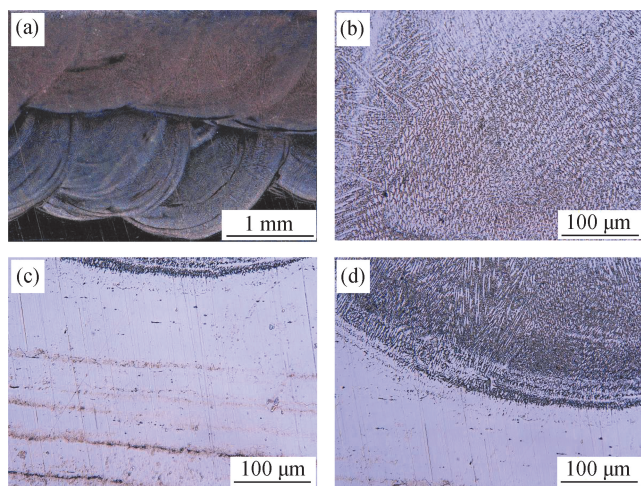
Fig. 12 Macro cross-section of cladding repair by different deposition directions



(a)整体;(b)熔覆区;(c)基体区;(d)热影响区

图 13 轴向修复的熔覆截面金相组织

Fig. 13 Micro structure of cladding cross-section by axial repair

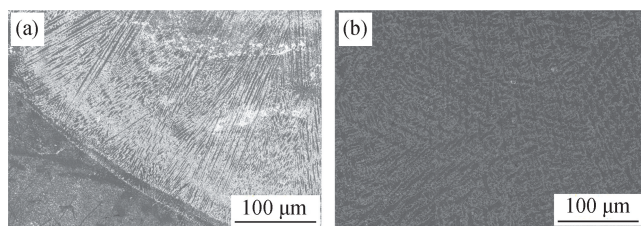


(a)整体;(b)熔覆区;(c)基体区;(d)热影响区

图 14 周向修复的熔覆截面金相组织

Fig. 14 Micro structure of cladding cross-section by circumferential repair

复层的熔覆区,分布少量的柱状晶与大量相较于轴向熔覆更细的等轴晶.这是由于周向熔覆的过程中,轴件旋转导致熔池在圆周方向连续移动,热输入分布更均匀,轴旋转时熔池始终处于动态平衡状态,冷却速率较快(单位面积热积累较低),熔覆层快速凝固抑制晶粒生长,形成细晶组织^[25](Hall-Petch 效应),显著提高硬度;而轴向熔覆时,熔池沿轴线单向移动时,热量易在熔覆方向累积,导致冷却速率较慢,晶粒生长时间延长,形成粗大柱状晶,硬度相对较低.如图 11 所示,周向熔覆方式由于具有更快的冷却速率,熔覆层的散热效果更好,因此修复层表面获得了更好的熔覆效果.如图 13(d)与 14(d)所示,轴向熔覆修复截面在结合区存在明显的拼接痕迹,周向熔覆修复的熔覆层与基体在结合区结合良好,无明显拼接痕迹.



(a)热影响区;(b)熔覆区

图 15 周向熔覆修复下不同区域的 SEM 图像

Fig. 15 SEM images of different areas by circumferential cladding repair

如图 15(b)所示,在周向熔覆的熔覆区中具有明显的柱状晶组织,这是由于在周向熔覆的熔覆堆积过程中,旋转对称的加工路径促进等轴晶或细小柱状晶

生长,轴向熔覆沿单一方向生长容易形成粗大柱状晶.在横截面上周向熔覆方式的熔池在圆周方向连续移动,热输入分布更均匀,生长出细小柱状晶,晶界密度高,阻碍位错运动能力高,硬度提升.轴向熔覆方式熔池沿单一方向流动生长形成粗大柱状晶,晶界方向与受力方向一致时易发生滑移,硬度较低.并且根据 Hall-Petch 公式可知,晶粒细化有助于提高组织的硬度,材料的硬度随着晶粒尺寸的减小而增加^[26].具体来说,硬度随晶粒尺寸的减小按平方根的关系增加.其具体表达式如式(5)所示.

$$H = H_0 + kd^{-1/2}, \quad (5)$$

其中, H 是材料的硬度, H_0 是位错运动的阈值应力, k 是 Hall-Petch 常数, d 是晶粒的平均直径.

图 16 为激光熔覆 IN718 合金界面区域的显微硬度图.可以看出,显微硬度分布分为三个不同的区域,从左到右分别对应熔覆区、热影响区和基体区.由于 IN718 的材料硬度高于 304 不锈钢,熔覆区的平均显微硬度高于基体区与热影响区.周向熔覆样件的熔覆区显微硬度约为 330 HV,而轴向熔覆样件的熔覆区显微硬度约为 310 HV;周向熔覆的平均显微硬度约为 220 HV,轴向熔覆的平均显微硬度约为 200 HV;作为过渡区域的热影响区,显微硬度从熔覆区侧逐渐减小到基体区.通过周向熔覆修复的试样,整体硬度比轴向熔覆修复方式高 20 HV 左右.

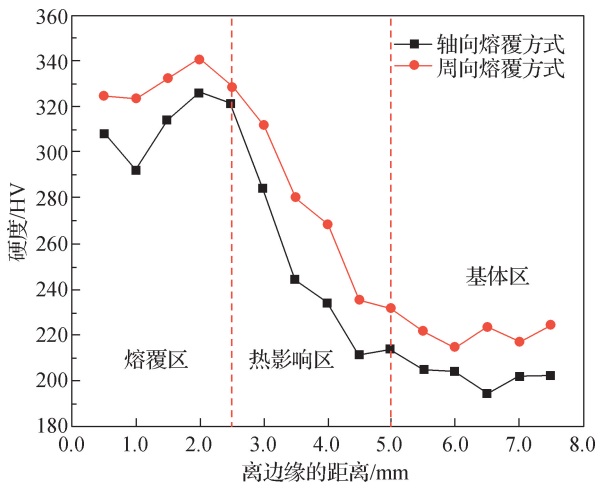


图 16 IN718 激光熔覆层界面区域的显微硬度分布

Fig. 16 Microhardness distribution in the interfacial region of IN718 laser cladding

3 结 论

本文采用直径 0.4 mm 的 IN718 镍基合金细丝,

对 304 不锈钢轴件进行异质材料激光直接熔融沉积修复工艺研究,研究了激光熔覆工艺参数对 IN718 熔覆修复效果的影响以及水平面上熔覆沉积方向对熔覆层宏观形貌及截面显微硬度的影响规律.研究发现:1) 对于轴表面的熔覆沉积,900 W 激光功率、1 600 mm/min 扫描速度、9.5 m/min 的送丝速率、30% 搭接率工艺条件下熔覆平整度最高,均匀性最好.在该工艺参数下,在搭接率的熔覆实验中,各熔覆道光滑且连续,氧化程度小,没有明显塌陷或者气孔等缺陷.搭接率为 30% 时,熔覆层截面平均熔高和最大峰谷值最小,且波峰波谷以及整体尺寸的标准差均较小,熔覆层结构更均匀.2) 采用周向熔覆进行修复时,可以实现修复区域无拼接痕迹,而轴向熔覆效果较差.经检测修复区的平均硬度约为 330 HV,试样基体区的平均硬度约为 220 HV,比轴向熔覆试样整体平均硬度高 20 HV,结合区域致密良好,无明显未熔合与气孔缺陷.

本研究基于激光送丝增材制造技术,确定了对轴类零件修复的最佳工艺参数,改善了异质材料修复结合处拼接痕迹明显,力学性能不稳定等缺陷,有助于推动激光送丝增材制造技术在异质材料轴类零件修复的应用.

参考文献:

- [1] 陈菊芳,李小平,薛亚平. 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能[J]. 中国激光,2019,46(5):326-334.
- [2] 张杰,张群莉,姚建华,等. 激光熔覆 IN718 合金工艺优化及界面组织性能分析[J]. 中国激光,2022,49(16):1602021.
- [3] 姚喆赫,姚建华,向巧. 激光再制造技术与应用发展研究[J]. 中国工程科学,2020,22(3):63-70.
- [4] 杨光,邹文北,王超,等. 激光增材连接异质铝合金的组织及性能研究[J]. 中国激光,2022,49(22):129-136.
- [5] 刘艳艳,肖猛,高雪松,等. FGH95/GH4169 异质材料激光增材修复再制造界面的组织与性能研究[J]. 热加工工艺,2021,50(23):22-25.
- [6] RAMKUMAR K D, SRIDHAR R, PERIWAL S, et al. Investigations on the structure-property relationships of electron beam welded Inconel 625 and UNS 32205[J]. Materials & Design,2015,68:158-166.
- [7] 李宁,王刚,王廷,等. Inconel 718 镍基合金与 304 不锈钢电子束焊接[J]. 焊接学报,2019,40(2):82-85,164-165.
- [8] 王迪,邓国威,杨永强,等. 金属异质材料增材制造研究进展[J]. 机械工程学报,2021,57(1):186-198.
- [9] SHAKIL M, AHMAD M, TARIQ N H, et al. Microstructure and hardness studies of electron beam welded Inconel

- 625 and stainless steel 304L [J]. *Vacuum*, 2014, 110: 121-126.
- [10] 张杰, 张群莉, 李栋, 等. δ 时效处理对激光增材修复 Inconel 718 合金组织与性能的影响 [J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 74-81.
- [11] WANG Q Y, XI Y C, LIU X Y, et al. Microstructure and mechanical properties of interface between laser clad Hastelloy coating and steel substrate [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(3): 733-740.
- [12] 卞宏友, 刘子茗, 刘伟军, 等. 激光沉积修复 GH4169/GH738 合金时效热处理组织与摩擦磨损性能 [J]. *中国激光*, 2023, 50(12): 177-185.
- [13] 张杰, 李科, 吴志生, 等. 激光熔覆 GH4169 涂层组织特征及高温耐磨性研究 [J]. *应用激光*, 2022, 42(6): 36-42.
- [14] 王慧君, 郭鹏飞, 耿建峰, 等. DD6 镍基单晶高温合金激光重熔区杂晶的形成机制研究 [J]. *中国激光*, 2024, 51(10): 285-297.
- [15] 尹嵩, 陆海峰, 潘晨阳, 等. 面向轴件应用的激光熔覆修复强化试验研究 [J]. *材料保护*, 2021, 54(2): 86-92.
- [16] 玄明昊, 邢本东, 苏亚东, 等. 基于正交试验的 TC4 钛合金激光成形连接工艺参数优化 [J]. *航空制造技术*, 2019, 62(8): 64-69.
- [17] 郭顺, 徐俊强, 杨东青, 等. 异质层状钛合金增材构件微观组织与力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(12): 6017-6027.
- [18] 王梦璐, 李占明, 孙晓峰, 等. Inconel 718 合金激光增材修复关键工艺优化 [J]. *焊接学报*, 2024, 45(6): 30-38.
- [19] STEVENS E L, TOMANT J, TO A C, et al. Variation of hardness, microstructure, and Laves phase distribution in direct laser deposited alloy 718 cuboids [J]. *Materials & design*, 2017, 119: 188-198.
- [20] BLACKWELL P L. The mechanical and microstructural characteristics of laser-deposited IN718 [J]. *Journal of materials processing technology*, 2005, 170 (1/2): 240-246.
- [21] SUI S, CHEN J, MING X, et al. The failure mechanism of 50% laser additive manufactured Inconel 718 and the deformation behavior of Laves phases during a tensile process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91: 2733-2740.
- [22] 于天彪, 宋博学, 郗文超, 等. 激光熔覆工艺参数对熔覆层形貌的影响及优化 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(4): 537-542.
- [23] 姚俊. 梯度结构功能零件增/减材复合成形机理与工艺实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [24] 杨鑫, 韩红彪, 闫晨宵, 等. 送丝角度与方式对激光熔丝单道沉积层成形的影响 [J]. *焊接学报*, 2024, 45(4): 43-48, 56, 131-132.
- [25] ZHANG J, ZHANG Q L, ZHUANG Y F, et al. Microstructures and cyclic hot corrosion behavior of laser deposited Inconel 718 alloy under different heat treatment conditions [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135(10): 106659.
- [26] 李倩, 陈发强, 王茜, 等. 激光熔覆 WC 增强 Ni 基复合涂层的研究进展 [J]. *表面技术*, 2022, 51(2): 129-143.

(责任编辑:任滢滢)