

送粉/送丝激光增材修复 Inconel 718 高温合金 V 形槽

姚喆赫^{1,2}, 钱泓宇^{1,2}, 余沛垌³, 陈雅伦^{1,2}, 张群莉^{1,2}, 刘云峰¹, 姚建华^{1,2}

(1. 浙江工业大学, 杭州, 310023; 2. 高端激光制造装备省部共建协同创新中心, 杭州, 310023; 3. 杭州汽轮动力集团股份有限公司, 杭州, 310020)

摘要: 激光熔覆技术已广泛应用于关键部件的增材修复, 其熔覆材料的输送主要采用送粉式或送丝式。为研究送粉式与送丝式激光修复对 Inconel 718 高温合金修复质量的影响, 结合数值模拟与试验研究对比分析了送粉与送丝方式对激光修复过程中 V 形槽温度场、熔池轮廓、修复区宏观形貌与微观组织的影响。结果表明, 送粉与送丝激光修复 V 形槽熔池的激光能量吸收与传递关系不同; 相比于送丝式, 送粉式激光修复过程中的 V 形槽底部能量集中, 导致修复区熔深增大 45.5%; 送粉式修复过程中粉末以固态及半固态形式冲击进入熔池, 修复区表面粗糙度显著增加, 同时送粉式修复区晶粒尺寸随修复深度减小逐渐增大, 修复区中部区域晶粒取向差异明显。

创新点: (1) 揭示了送粉与送丝激光修复 V 形槽熔池的激光能量吸收与传递机制。

(2) 分析了送粉与送丝激光修复区微观组织及熔池凝固过程的热流演变规律。

关键词: 送粉式; 送丝式; 激光增材修复; V 形槽; 温度场

中图分类号: TG 456

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20230307003

0 序言

工业燃气轮机与航空发动机热端部件因服役条件恶劣^[1-2], 易产生表面与结构损伤^[3-5], 如对其直接进行报废换新会造成严重的资源浪费^[6]。激光熔覆技术作为一种高效、柔性、绿色的直接成形技术^[7-8], 相比于电弧堆焊、喷涂等成形修复技术, 具有热影响区域小^[9]、材料应用面广^[10]、熔覆层结合力强^[11]等优点, 在修复失效热端部件中具有明显优势。

当前研究中通常采用工艺稳定^[12-13]的送粉式激光熔覆实现热端部件的失效修复。Onuike 等人^[14]研究了修复区域轮廓对修复成形质量的影响, 结果表明, 因粉末与激光在修复表面过渡平滑, 修复区梯形轮廓比距形轮廓更容易实现低缺陷修复。卢朋辉等人^[15]研究了激光工艺对 K418 高温合金修复区开裂行为的影响, 研究发现, 随着扫描速

度与激光功率的降低, 熔池快速凝固产生的热应力减小, 修复区产生的微裂纹数量降低。卞宏友等人^[16]使用 GH536 粉末修复了 GH738 高温合金试样, 结果表明, Mo, Cr 元素引起的固溶强化作用, 使修复区的拉伸性能、硬度高于 GH536 锻件。

相比于送粉式激光熔覆, 送丝式激光熔覆在材料利用率^[17]、熔覆层表面形貌^[18]、熔覆层成形质量^[19]等方面具有优势。李凯斌等人^[20]研究了不同激光工艺对送丝激光熔覆层表面形貌的影响, 结果表明, 当激光能量密度为 100 J/mm^2 、熔丝率为 $39.44 \times 10^{-6} \text{ g/J}$ 时, 熔覆过程稳定, 熔覆层表面光滑饱满。Abioye 等人^[21]研究了激光功率、送丝速度、扫描速度对熔覆层稀释率的影响规律, 研究发现, 熔覆层稀释率与激光功率、扫描速度呈正相关, 与送丝速度呈负相关, 通过工艺参数调控可获得稀释率良好、表面形貌光滑的熔覆层。Demir 等人^[22]使用送丝式激光熔覆增材制造了纵横比高达 20 的薄壁构件, 结果表明, 金属丝材的利用效率接近 100%, 熔覆区域显微硬度沿增材方向分布均匀。

送粉与送丝方式下高温合金激光增材修复质量存在不同, 为指导修复应用中的工艺选择, 文中开展了送粉式与送丝式激光修复 Inconel 718 高温

收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52035014, 52175443); 浙江省“领雁”研发攻关计划资助项目 (2022C01117); 浙江省自然科学基金资助项目 (LD22E050013)。

合金 V 形槽对比试验研究. 结合数值模拟、高速摄像、修复试样分析等方法, 对比送粉与送丝方式下激光修复过程中 V 形槽的温度场、熔池表面轮廓、修复区宏观形貌与微观组织差异, 分析了因送粉与送丝方式差异而引起的激光能量吸收与传递的变化, 并讨论修复区差异的形成机制. 该研究结果为高温合金激光增材修复应用中的材料输送方法选择提供参考.

1 试验方案与数值模型建立

1.1 试验材料与方法

激光增材修复对比试验平台如图 1 所示, 主要由激光器、高速相机、控制系统、冷却系统、送粉器与送丝器组成. 试验采用送粉与送丝两种方式对 V 形槽进行激光修复, 并通过高速相机对修复过程进行拍摄与记录.

试验所用的基板、粉末、丝材材料均为 Inconel 718 镍基高温合金, 化学成分如表 1 所示. 基板尺寸

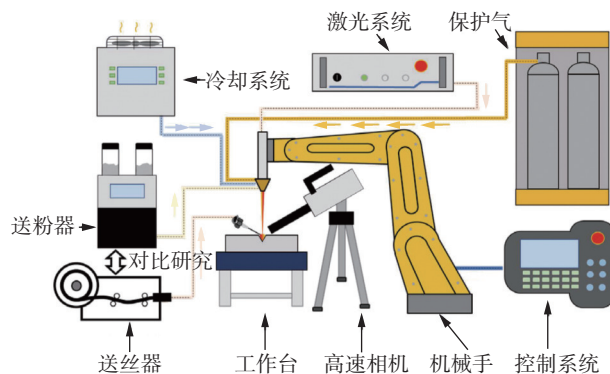


图 1 送粉式与送丝式激光修复试验平台

Fig. 1 Experimental setup for laser repairing with powder feeding and wire feeding

为 $100\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, V 形槽槽深为 1 mm , 开口角度为 60° . 粉末粒径范围为 $100\sim 150\text{ }\mu\text{m}$, 丝材直径为 1 mm . 试验所用激光功率为 1 kW , 光斑直径为 2 mm , 激光扫描速度为 9 mm/s . 经前期试验探明, 送粉试验的粉末利用率约为送丝试验的 20% , 因此修复试验中送粉和送丝量分别为 18 g/min 和 3.6 g/min . 根据已知丝材直径, 换算得送丝速度为 9.3 mm/s .

表 1 Inconel 718 镍基高温合金的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of nickel-based superalloy Inconel 718

Ni	Cr	Nb	Mo	Co	Al	Ti	Si	Mn	C	Cu	Fe
50~55	17~21	4.75~5.5	2.8~3.3	≤1	0.2~0.8	0.7~0.15	≤0.35	≤0.35	≤0.08	≤0.3	余量

试验开始前, 对试板表面进行打磨抛光, 去除表面氧化膜和油渍. 采用 DZF-6051 型真空干燥箱, 对金属粉末进行干燥处理 1 h . 试验过程中, 通过高速相机拍摄修复区内熔池外形尺寸. 试验结束后, 通过线切割进行取样处理, 并分别采用 KEYENCE VK-X1000 型共聚焦显微镜、ZEISS Axio Imager2 型光学显微镜和 ZEISS EVO 18 型扫描电子显微镜对修复区表面形貌、显微组织以及晶粒尺寸取向进行表征.

1.2 数值模型建立

在激光修复 V 形槽中, 送粉或送丝方式的选用, 将影响 V 形槽对激光能量的吸收. 基于 COMSOL 多物理场耦合软件建立数值模型, 对比分析送粉与送丝条件下 V 形槽的温度场变化. 试验所采用激光功率密度为 318 W/mm^2 , 根据文献 [23] 与前期试验结果, 该激光工艺无法在高温合金 Inconel 718 材料表面形成深蚀孔, 因此可忽略激光在材料深度方向上的热输入. 在模拟中, 激光热源

采用表面高斯热源^[24-25], 激光热源输入能量密度 Q 为

$$Q = \frac{2\alpha P}{\pi r_L^2} \exp\left[-\frac{2r^2}{r_L^2}\right] \quad (1)$$

式中: α 为材料对激光的吸收率; P 为激光功率; r 为至光斑中心的距离; r_L 为光斑半径.

激光修复过程中发生热传导、热对流、热辐射等物理过程, 传热控制表达式为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q + q_0 \quad (2)$$

式中: ρ 为材料的密度; C_p 为材料的恒压热容; t 为时间; T 为温度; k 为材料的导热系数; q_0 为热对流与热辐射能量密度.

对流换热的控制表达式为

$$Q_c = -h(T - T_0) \quad (3)$$

式中: h 为表面对流换热系数; T_0 为环境温度, 为 293 K .

热辐射的控制表达式为

$$Q_d = -\varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (4)$$

式中: ε 为表面辐射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_0 为环境温度, 为 293 K.

参考文献 [26-28], 设置基板初始温度为 293 K, 表面对流换热系数为 $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 表面辐射率为 0.3. 设置 IN718 高温合金材料的导热系数、密度、恒压热容等物性参数随温度变化.

数值模型采用改变表面热源施加位置的方法, 模拟送粉与送丝方式下激光在 V 形槽内的不同辐照深度. 在送粉式激光增材修复过程中, 部分激光辐射能量被粉末流吸收, 根据文献 [29], 在粉末粒径 $70 \sim 250 \mu\text{m}$ 送粉量 $18 \text{ g}/\text{min}$ 的条件下粉末吸收约 13% 的辐射能量, 剩余大部分激光能量穿过粉末流直接作用于工件表面. 在模拟中设置粉末吸收后的激光能量直接作用于 V 形槽内壁. 在送丝式激光修复 V 形槽过程中, 熔池与丝材间形成稳定液桥过渡, 绝大部分激光能量被熔池与丝材遮挡, 模拟设置激光能量作用于熔池表面并通过熔池传递至 V 形槽内壁. 为考虑激光在截面上的移入与移出过程, 计算激光热源的加载时长. 激光光斑尺寸为 2 mm , 扫描速度为 $9 \text{ mm}/\text{s}$, 激光经过截面所需时间为 0.22 s , 模拟设置激光能量随时间从 $0 \sim 0.11 \text{ s}$ 时, 增加至激光能量分布最大值; 并从 $0.11 \sim 0.22 \text{ s}$ 时, 降低至 0. 根据送粉式与送丝式不同的传热方式, 分别建立如图 2 所示的传热边界条件.

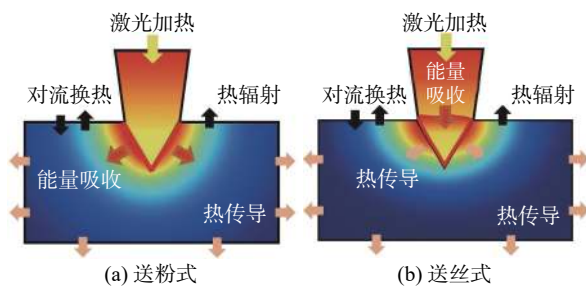


图 2 送粉式与送丝式激光修复模拟中的传热边界条件
Fig. 2 Boundary condition in simulation of laser repairing.
(a) powder feeding method; (b) wire feeding method

2 结果与分析

2.1 V 形槽修复区温度场数值模拟

送粉式与送丝式激光修复 V 形槽的温度场模拟结果如图 3 所示. 两种 V 形槽修复方式的温度场

存在显著差别. 在送粉式激光修复过程中, 呈高斯分布的激光能量直接辐照至 V 形槽表面, 修复区最高温度 (2444.7 K) 出现在 V 形槽底部; V 形槽底部温度梯度集中, 最大温度梯度为 $2.6 \times 10^3 \text{ K}/\text{mm}$. 在送丝式激光修复过程中, 激光能量通过熔池传递至 V 形槽内壁, 修复区最高温度 (2127.8 K) 出现在 V 形槽两侧开口; 修复区温度梯度分布较送粉式均匀, 最大温度梯度为 $1.5 \times 10^3 \text{ K}/\text{mm}$. 根据 IN718 高温合金熔点温度 1493 K [27], 绘制熔池相变轮廓线. 通过几何测量, 对比送粉送丝方式下 V 形槽熔深变化. 送粉式和送丝式熔深分别为 1.58 mm 和 1.12 mm . 相比于送丝式, 送粉式修复区熔深增大 41.07% .

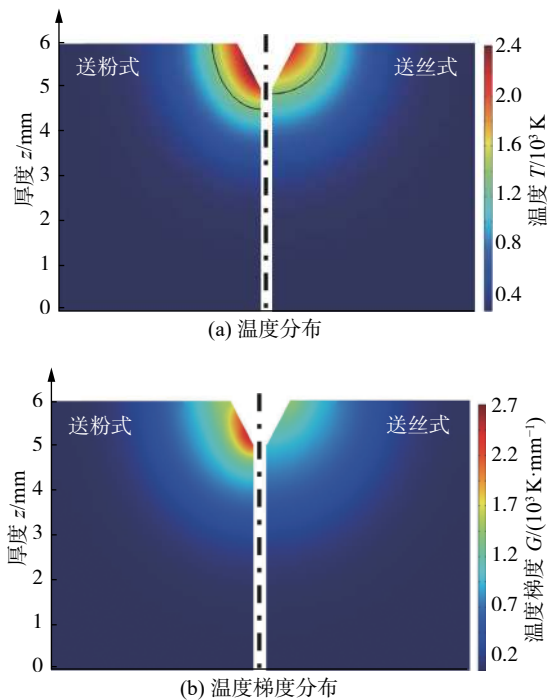
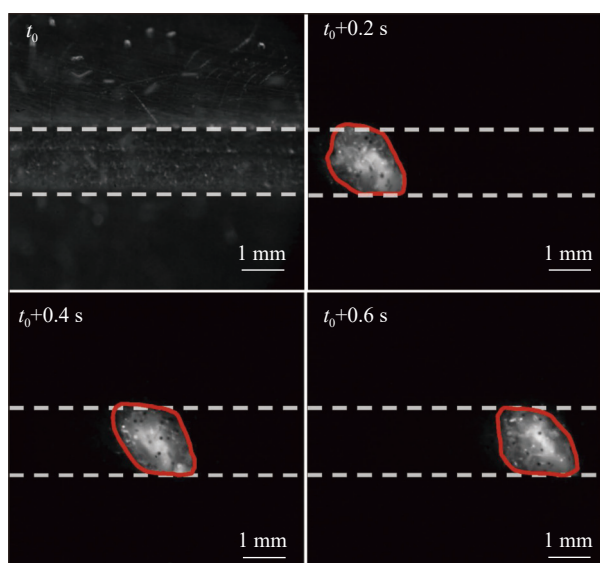


图 3 送粉式与送丝式激光修复 V 形槽温度场模拟结果
Fig. 3 Simulated temperature field during laser cladding.
(a) temperature distribution; (b) temperature gradient distribution

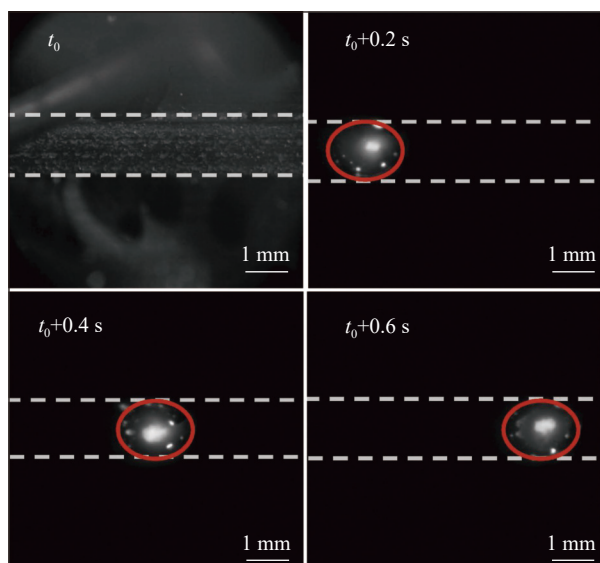
2.2 熔池表面轮廓动态监测

图 4 为熔池表面轮廓变化情况. 图 4 中虚线为初始 V 形槽两侧轮廓, 实线为熔池表面轮廓. 在送粉式激光修复过程中, 随着金属粉末进入 V 形槽底部熔池, 熔池高度、宽度逐渐增加, 熔池表面轮廓倾斜. 在 $t_0 + 0.2 \text{ s}$, $t_0 + 0.4 \text{ s}$, $t_0 + 0.6 \text{ s}$ 时, 均能观察到金属粉末以固态及半固态形式冲击进入熔池, 熔池表面轮廓不规则. 而在送丝式激光修复过程中, 丝材在激光热源的作用下不断熔化并填充修复 V 形槽, 受表面张力影响, 熔池轮廓水平. 在 $t_0 + 0.2 \text{ s}$,

$t_0 + 0.4$ s, $t_0 + 0.6$ s 时, 均可发现熔化丝材通过液桥平稳流入熔池, 熔池表面轮廓光滑。



(a) 送粉式



(b) 送丝式

图 4 送粉式与送丝式激光修复过程熔池轮廓

Fig. 4 Monitoring of the molten pool profile. (a) powder feeding method; (b) wire feeding method

2.3 修复区表面形貌与显微组织

图 5 为送粉与送丝方式下 V 形槽修复区表面形貌, 送粉式 V 形槽修复区表面粘有大量未熔粉末, 表面粗糙度较大. 基于 2.2 节高速相机监测, 粉末对熔池冲击明显, 送粉式修复区的高度起伏明显, 而送丝式修复区表面较光洁. 送粉式和送丝式修复区表面轮廓最大高度 R_z 分别为 $165.1 \mu\text{m}$ 和 $68.3 \mu\text{m}$. 进一步测量了图 5 中 a, b, c 区域 (区域面积 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$) 的修复区表面平均表面粗糙度 R_a . 送粉式修复区和送丝式修复区 R_a 值分别

$13.5 \mu\text{m}$ 和 $2.4 \mu\text{m}$. 相较于送粉式, 送丝式修复区平均粗糙度 R_a 降低了 82.2%.

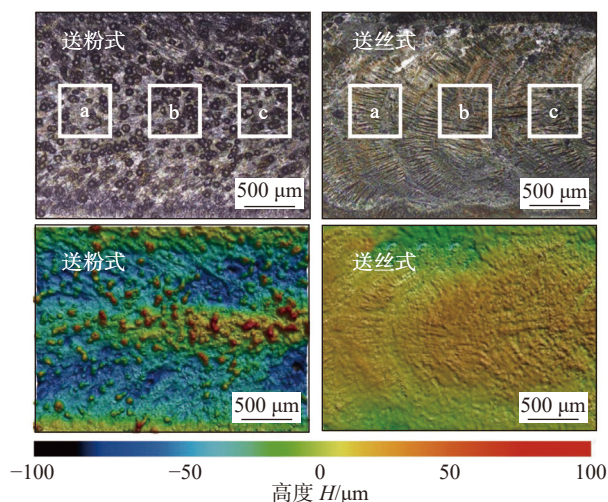
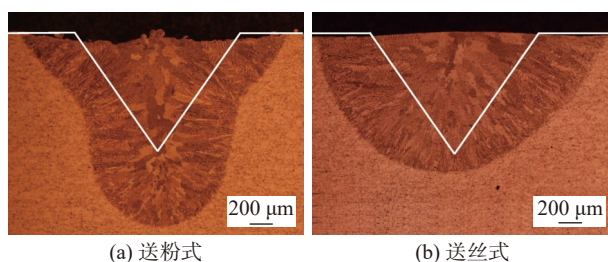


图 5 送粉式与送丝式修复区表面形貌

Fig. 5 Surface morphology of the laser repaired zone with the powder feeding and wire feeding

图 6 为激光修复区金相显微组织. 送粉式修复区底部能量集中, 修复区熔合线在修复区中心明显下凹, 熔深为 1.6 mm . 送丝式修复区凝固过程中各方向温度梯度分布均匀, 修复区熔合线呈半圆形, 熔深大小为 1.1 mm . 根据计算对比, 送粉式修复区相比于送丝式熔深增大 45.5%.



(a) 送粉式

(b) 送丝式

图 6 送粉式与送丝式修复区显微组织

Fig. 6 Microstructure of the laser repaired zone. (a) powder feeding method; (b) wire feeding method

通过分析修复区显微组织组成可以发现, 送粉与送丝方式下, 修复区显微组织均由长条柱状枝晶与块状转向枝晶组成, 其凝固枝晶生长演变过程相似. 在凝固开始时, 枝晶垂直熔合线向修复区中心外延生长, 随着凝固过程的推进在修复区中心发生转向. 然而, 因送粉与送丝方式 V 形槽修复区温度场不同. 在送粉方式下, 修复区枝晶比送丝式更快转向.

2.4 修复区晶粒尺寸与取向

图 7 为送粉式与送丝式修复区晶粒尺寸分布.

在送粉与送丝方式下, 修复区晶粒尺寸分布存在差异. 送粉式修复区熔深较大, 修复区底部受 V 形槽基板在深度方向上受激冷^[30]作用影响显著, 修复区凝固过程中熔池底部与顶部的温度梯度 G 、生长速度 R 、过冷度变化明显, 晶粒尺寸随修复深度减小而逐渐增大, 晶粒尺寸均匀性较差. 送丝式修复区熔深较小, 且修复区底部避免了激光直接辐照, 激光能量通过熔池传递至修复区底部, 因此基板产生的激冷作用在修复深度方向上并不明显. 送丝式修复区凝固过程中温度梯度 G 、生长速度 R 、过冷度较送粉式变化较小, 晶粒尺寸沿修复深度无明显变化, 晶粒尺寸均匀性比送粉式好. 因修复采用激光热源, 输入能量密度相同, 送粉式与送丝式修复区平均晶粒尺寸无明显差别, 根据统计计算, 送粉式与送丝式修复区平均晶粒尺寸分别为 $56.7\ \mu\text{m}$ 和 $58.5\ \mu\text{m}$.

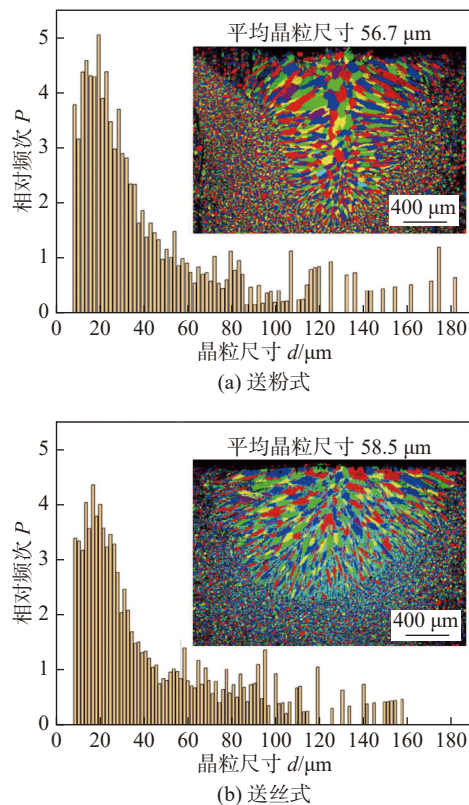


图 7 送粉式与送丝式修复区晶粒尺寸
Fig. 7 Grain size of the laser repaired zone. (a) powder feeding method; (b) wire feeding method

图 8 为送粉式与送丝式激光修复 V 形槽晶粒取向. 受高温温度梯度影响, 送粉式与送丝式修复区均呈现明显取向性. 根据图 8b 和图 8d 极图统计, 送粉式与送丝式下修复区最大均匀分布 (MUD) 值分别为 2.6 与 3.2. 送粉式与送丝式修复区整体取向

向无明显差别. 相比于送丝式, 送粉式修复区熔深较大, 凝固过程中最大热流方向沿修复深度发生了明显转变, 修复区中部上下区域晶粒取向差异明显, 上下各局部区域内取向一致性强. 从图 8a 和图 8c 可知, 送粉式修复区底部中心位置转向枝晶的择优取向为 $\langle 101 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, 并随熔深减小, 逐渐向 $\langle 001 \rangle$ 转变. 与送粉式修复区不同, 送丝式修复区中心位置转向枝晶择优取向为 $\langle 101 \rangle$, $\langle 111 \rangle$, 不发

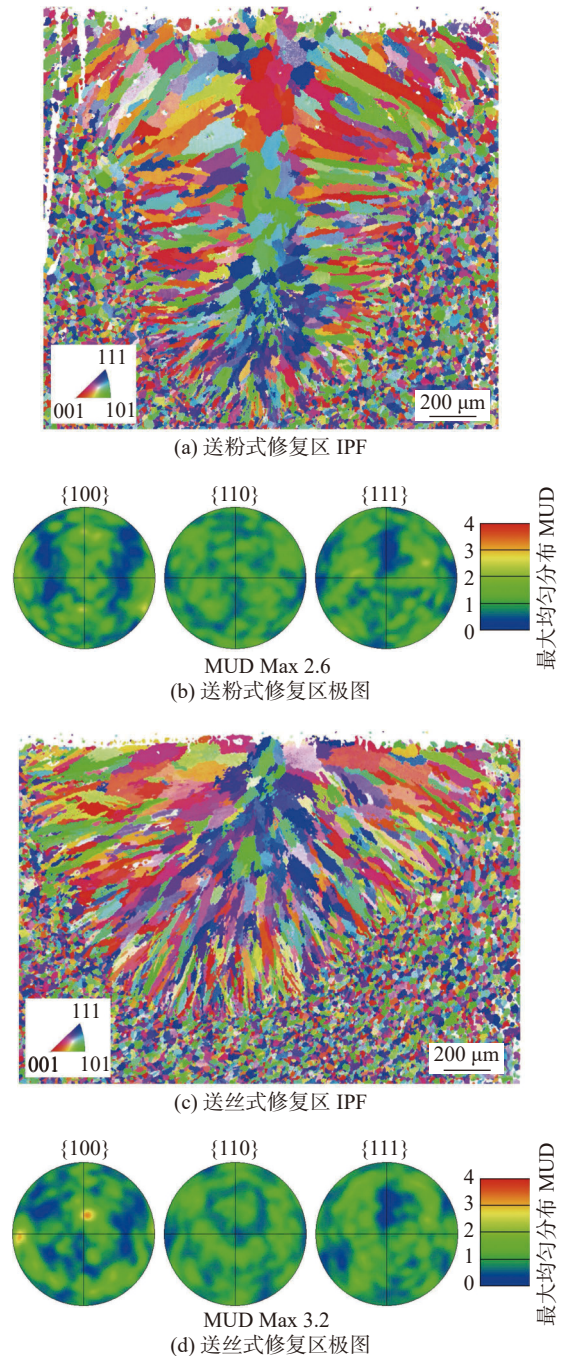


图 8 送粉式与送丝式修复区晶粒取向
Fig. 8 Grain orientation of the laser repaired zone. (a) IPF of powder feeding method; (b) pole figure of powder feeding method; (c) IPF of wire feeding method; (d) pole figure of wire feeding method

生<001>方向转变。

3 讨论

在送粉式与送丝式激光修复过程中,粉末/丝材对激光能量的遮挡效果不同,影响了V形槽与熔池对激光能量吸收与传递,使V形槽修复过程中温度场和熔池表面轮廓不同,导致修复区域的宏观形貌与微观组织存在差异。

送粉式与送丝式激光修复过程中,V形槽与熔池对激光能量吸收与传递关系如图9所示。送粉式激光修复过程中,粉末对激光的遮挡作用较小^[31],激光能量直接辐照至V形槽表面。首先在V形槽底部形成熔池,并随着粉末的填充逐渐增大。在熔池形成后,激光后端能量通过熔池传递至V形槽两侧表面。因前后端激光对V形槽传热方式不同,修复区熔合线中心明显向下突出。而送丝式激光修复过程中,丝材直径占V形槽总开口宽度的90%,且丝材位于V形槽中心位置,激光前端能量被丝材遮挡,丝材在激光作用下逐渐熔化与熔池间形成稳定液桥过渡^[32]。因激光能量被丝材、液桥、熔池吸收,并通过熔池传递至V形槽两侧表面。前后端激光对V形槽传热方式相同,V形槽内各方向上温度梯度大小接近,修复区熔合线为半圆形。

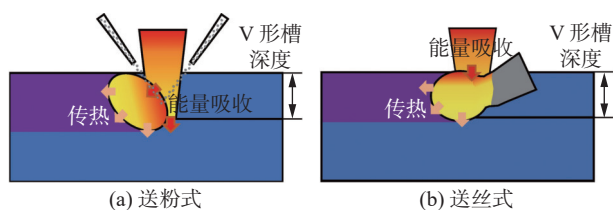


图9 送粉式与送丝式激光修复中激光能量的吸收与传递
Fig. 9 Absorption and transfer of laser energy during laser repairing. (a) powder feeding method; (b) wire feeding method

送粉与送丝方式下V形槽修复区温度场不同,导致修复区域凝固晶粒尺寸与取向存在差异。送粉式激光修复过程中,修复区底部首先形成熔池,根据2.1节结果,因激光直接辐照,V形槽底部温度梯度 G 较大。受基板激冷作用影响,底部修复区熔池散热条件好,过冷度、冷却速度较大,因此在修复区底部,大量晶粒形核并在短时间内相互挤压竞争生长,形成细小柱状晶与转向晶,凝固形成晶粒尺寸较小^[33],中心转向晶粒择优取向为<111>, <101>。随着修复过程进行,修复区熔池不断增大,

晶粒生长空间增大,并且激光持续的热输入,导致激光后端基板对熔池凝固所引起的激冷作用减小。因此随修复深度减小,固液界面前温度梯度 G 降低,过冷度、冷却速度减小,晶粒尺寸增大^[34]。因修复区熔深较大,熔池凝固过程中最大热流方向沿修复深度变化向激光扫描方向转变^[35],凝固形成转向枝晶择优取向转变为<001>。送丝式激光修复过程中,修复区熔深较小,晶粒在修复深度方向上未产生明显的竞争生长,修复区底部避免了激光直接辐照,激光能量通过熔池传递至修复区底部,基板产生的激冷作用在修复深度方向上相比于送粉式修复区并不明显。修复区各处过冷度、冷却速度较送粉式变化较小,凝固形成晶粒尺寸分布均匀。受大温度梯度影响,底部柱状枝晶向熔池中心生长^[36],并在顶部中心区域沿最大热流方向转向^[37],择优取向为<111>, <101>,因送丝式修复区熔深较浅,转向枝晶未继续向<001>方向转变。

基于送粉式与送丝式V形槽修复区宏观形貌与微观组织的对比分析可知,送粉式激光修复区底部能量集中,熔合线中心明显向下突出,熔深较大。送粉式激光修复相比于送丝式,更容易获得底部熔合良好的修复区,对修复激光设备功率、修复激光工艺要求较低。然而较大的熔深会对修复件带来更深的热影响,并且引起修复区凝固过程中底部与顶部的温度梯度、过冷度、冷却速度相差较大,这使修复区晶粒尺寸分布与晶粒取向差异明显。送丝式激光修复相比于送粉式,在修复区热影响深度、晶粒尺寸均匀性方面具有优势。根据不同激光设备功率与缺陷外形,可选用送粉或送丝方式进行激光修复。当激光设备功率不足,缺陷外形深宽比较大时,选用送粉式激光修复,可以避免因缺陷底部能量不足而引起的熔合不良^[38]。当激光设备功率充足,缺陷外形深宽比较小时,选用送丝式激光修复,可以获得表面形貌良好、热影响区域小、晶粒尺寸分布均匀的凝固组织。

4 结论

(1) 相比于送丝式,送粉式修复过程中,因粉末冲击影响,熔池轮廓不规则,修复区表面平均粗糙度增大82.2%。在送粉方式下,激光前端对V形槽底部直接辐照,V形槽底部修复区温度、温度梯度大于送丝式,修复区熔深增大45.5%。

(2) 相比于送丝式,送粉式激光修复过程中,

V 形槽基板对熔池的激冷作用在修复深度方向上变化显著, 并且因前后端激光对 V 形槽传热方式不同, 熔池内温度梯度 G 、过冷度、冷却速度 ($G \times R$) 沿修复深度减小而减小, 修复成形晶粒尺寸均匀性较差, 修复区上下区域晶粒取向差异明显。

(3) 当激光设备功率不足, 缺陷外形深宽比较大时, 选用送粉式激光修复, 可以避免因缺陷底部能量不足而引起的熔合不良; 当情况相反时, 选用送丝式激光修复, 可以获得表面形貌良好, 热影响区小, 晶粒尺寸分布较均匀的凝固组织。

参考文献

- [1] 郭建亭. 高温合金在能源工业领域中的应用现状与发展 [J]. 金属学报, 2010, 46(5): 513–527.
Guo Jianting. The current situation of application and development of superalloys in the fields of energy industry[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(5): 513–527.
- [2] 师昌绪, 徐滨士, 张平, 等. 21 世纪表面工程的发展趋势 [J]. 中国表面工程, 2001(1): 2–7.
Shi Changxu, Xu Binshi, Zhang Ping, *et al.* Development of surface engineering in the 21st century[J]. China Surface Engineering, 2001(1): 2–7.
- [3] 应雨龙, 李靖超, 庞景隆, 等. 基于热力模型的燃气轮机气路故障预测诊断研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 731–743, 952.
Ying Yulong, Li Jingchao, Pang Jinglong, *et al.* Review of gas turbine gas-path fault diagnosis and prognosis based on thermodynamic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 731–743, 952.
- [4] 郭伟, 董丽虹, 王慧鹏, 等. 基于红外热像技术的涡轮叶片损伤评价研究进展 [J]. 航空学报, 2016, 37(2): 429–436.
Guo Wei, Dong Lihong, Wang Huipeng, *et al.* Research progress of damage estimation for turbine blades based on infrared thermographic technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 429–436.
- [5] 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.
Yao Zhehe, Yao Jianhua, Xiang Qiao. Development of laser remanufacturing technology and application[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 63–70.
- [6] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1–6.
Xu Binshi. Remanufacture engineering and its development in china[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 1–6.
- [7] 宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 29–39.
Song Jianli, Li Yongtang, Deng Qilin, *et al.* Research progress of laser cladding forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 29–39.
- [8] Ya Wei, Pathiraj B, Yu Xinghua. From statistical analysis to process optimization during cladding using a Nd: YAG laser[J]. China Welding, 2022, 31(4): 7–22.
- [9] 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展 [J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1–11.
Zhang Jinchao, Shi Shihong, Gong Yanqi, *et al.* Research progress of laser cladding technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1–11.
- [10] Liu Y A, Ding Y, Yang L J, *et al.* Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 66: 341–363.
- [11] 封慧, 李剑峰, 孙杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复 [J]. 中国激光, 2014, 41(8): 86–91.
Feng Hui, Li Jianfeng, Sun Jie. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 86–91.
- [12] Sun Y W, Hao M Z. Statistical analysis and optimization of process parameters in Ti6Al4V laser cladding using Nd:YAG laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(7): 985–995.
- [13] Lee H K. Effects of the cladding parameters on the deposition efficiency in pulsed Nd: YAG laser cladding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 202(1-3): 321–327.
- [14] Onuik B, Bandyopadhyay A. Additive manufacturing in repair: Influence of processing parameters on properties of Inconel 718[J]. Materials Letters, 2019, 252: 256–259.
- [15] 卢朋辉, 刘建睿, 薛蕾, 等. 激光成形修复 K418 高温合金的显微组织与开裂行为 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(2): 315–319.
Lu Penghui, Liu Jianrui, Xue Lei, *et al.* Microstructure and cracking behavior of K418 superalloy by laser forming repairing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(2): 315–319.
- [16] 卞宏友, 朱明昊, 李英, 等. 激光沉积修复 GH536/GH738 合金的组织及力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(3): 542–549.
Bian Hongyou, Zhu Minghao, Li Ying, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser deposition repair of GH536/GH738 superalloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(3): 542–549.
- [17] Brandl E, Michailov V, Viehweger B, *et al.* Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 206(6): 1120–1129.
- [18] 尹研, 王匀, 许植英, 等. 基于激光填丝熔覆的 Cr12MoV 模具修复及性能表征 [J]. 表面技术, 2019, 48(11): 312–319.
Yin Yan, Wang Yun, Xu Zhenying, *et al.* Repair and characteriza-

- tion of Cr12MoV dies based on laser cladding by wire[J]. Surface Technology, 2019, 48(11): 312 – 319.
- [19] Zhang Y N, Cao X, Wanjara P. Microstructure and hardness of fiber laser deposited Inconel 718 using filler wire[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(9-12): 2569 – 2581.
- [20] 李凯斌, 李东, 刘东宇, 等. 光纤激光送丝熔覆修复工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 82 – 87.
- Li Kaibin, Li Dong, Liu Dongyu, *et al.* Research of fiber laser cladding repairing process with wire feeding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 82 – 87.
- [21] Abioye T E, Folkes J, Clare A T. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2145 – 2151.
- [22] Demir A G. Micro laser metal wire deposition for additive manufacturing of thin-walled structures[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 100: 9 – 17.
- [23] Lee Y S, Zhang W. Modeling of heat transfer, fluid flow and solidification microstructure of nickel-base superalloy fabricated by laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12: 178 – 188.
- [24] Wei H L, Mukherjee T, Zhang W, *et al.* Mechanistic models for additive manufacturing of metallic components[J]. Progress in Materials Science, 2021, 116: 113.
- [25] Li C, Yu Z B, Gao J X, *et al.* Numerical simulation and experimental study on the evolution of multi-field coupling in laser cladding process by disk lasers[J]. Welding in the World, 2019, 63(4): 925 – 945.
- [26] Anderson M, Patwa R, Shin Y C. Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(14): 1879 – 1891.
- [27] Khorasani M, Ghasemi A, Leary M, *et al.* Numerical and analytical investigation on molten pool temperature of laser-based powder bed fusion of IN718[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 177: 121477.
- [28] Jin K N, Yang Z Y, Chen P, *et al.* Dynamic solidification process during laser cladding of IN718: Multi-physics model, solute suppressed nucleation and microstructure evolution[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 192: 122907.
- [29] 黄辰阳, 陈嘉伟, 朱言言, 等. 激光定向能量沉积的粉末尺度多物理场数值模拟[J]. 力学学报, 2021, 53(12): 3240 – 3251.
- Huang Chenyang, Chen Jiawei, Zhu Yanyan, *et al.* Powder scale multiphysics numerical modelling of laser directed energy deposition[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(12): 3240 – 3251.
- [30] Lv H, Li X D, Li Z J, *et al.* Investigation on the columnar-to-equiaxed transition during laser cladding of IN718 alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 67: 63 – 76.
- [31] 刘振侠, 黄卫东, 万柏涛. 送粉式激光熔覆数值模型基本问题研究[J]. 中国激光, 2003, 30(6): 567 – 570.
- Liu Zhenxia, Huang Weidong, Wan Baitao. Investigation of basic problems of the numerical model for powder feed laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(6): 567 – 570.
- [32] 彭进, 李俐群, 林尚扬, 等. 激光液态填充焊的填材熔化与过渡稳定性[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 9 – 12.
- Peng Jin, Li Liqun, Lin Shangyang, *et al.* Melting of filler metal and transfer stability in laser welding with pre-melting liquid filler[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 9 – 12.
- [33] 郭艳华, 戴国庆, 孙中刚, 等. 激光增材制造钛合金冶金组织特征及其调控方法研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(12): 4733 – 4744.
- Guo Yanhua, Dai Guoqing, Sun Zhonggang, *et al.* Research progress of metallurgical structure characteristics and control methods of laser additive manufacturing titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(12): 4733 – 4744.
- [34] Prasad A, Yuan L, Lee P, *et al.* Towards understanding grain nucleation under additive manufacturing solidification conditions[J]. Acta Materialia, 2020, 195: 392 – 403.
- [35] Hosseini E, Popovich V A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100877.
- [36] Wang J, Lin X, Wang J T, *et al.* Grain morphology evolution and texture characterization of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 768: 97 – 113.
- [37] 魏雷, 林鑫, 王猛, 等. 激光立体成形中熔池凝固微观组织的元胞自动机模拟[J]. 物理学报, 2015, 64(1): 356 – 363.
- Wei Lei, Lin Xin, Wang Meng, *et al.* Cellular automaton simulation of the molten pool of laser solid forming process[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(1): 356 – 363.
- [38] 张霜银, 林鑫, 陈静, 等. 工艺参数对激光快速成形 TC4 钛合金组织及成形质量的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 255(10): 1839 – 1843.
- Zhang Shuangyin, Lin Xin, Chen Jing, *et al.* Influence of processing parameter on the microstructure and forming characterizations of Ti-6Al-4V titanium alloy after laser rapid forming processing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 255(10): 1839 – 1843.

第一作者: 姚喆赫, 博士, 副研究员; 主要研究方向为能场复合激光制造; Email: zhyao@zjut.edu.cn.

通信作者: 姚建华, 博士, 教授; Email: lam@zjut.edu.cn.

(编辑: 戴红)