

红外热像下激光熔丝成形过程冷却速率实时监测

宋栓军¹, 邱成鸿¹, 徐 微², 任晓飞³, 张安莉^{2,4}

- (1. 西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048;
2. 西安交通大学城市学院, 陕西 西安 710018;
3. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;
4. 机器人与智能制造陕西省高校工程研究中心, 陕西 西安 710018)

摘要: 激光熔丝增材制造技术是一种具备成形精度高和加工余量小的一体化制造技术,但由于其非平衡态凝固和复杂的传热传质等物理现象,使得很难通过常规手段监测得到其冷却速率。针对这一问题,提出了一种利用红外热像技术的熔池温度和冷却速率实时监测算法。该算法利用 FLIR X6520sc 型红外热像仪实时捕获增材制造过程中的温度场信号,通过定位温度场中心位置得到熔覆道各点的实时冷却速率,实现了熔覆道冷却速率的全过程实时监测。在此基础上,研究了不同工艺参数对熔池温度和冷却速率的影响规律。最后,探讨不同冷却速率对凝固组织的影响。研究结果发现:在其他工艺参数不变的情况下,扫描速度从 60 mm/min 上升到 300 mm/min,熔池温度减少了 339 °C,冷却速率却增加了 1741 °C/s;激光功率从 200 W 降低到 100 W,冷却速率和熔池温度分别降低了 264 °C/s 和 420 °C;随着送丝速度从 120 mm/min 升高到 600 mm/min,熔池温度和冷却速率分别降低 195 °C 和 224 °C/s;扫描速度是对冷却速率影响最大的因素,为后期研究闭环控制系统提供了基础。此外,随着冷却速率的增加,熔覆道经过快速凝固,其凝固组织得到显著细化。

关键词: 增材制造; 激光熔丝; 红外热像; 熔池温度; 冷却速率

中图分类号: G456.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220074

Real time monitoring of cooling rate in laser metal-wire forming process under infrared thermography

Song Shuanjun¹, Qiu Chenghong¹, Xu Wei², Ren Xiaofei³, Zhang Anli^{2,4}

- (1. School of Mechanical And Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
2. City College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710018, China;
3. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;
4. Robot and Intelligent Manufacturing of Shaanxi Provincial University Engineering Research Center, Xi'an 710018, China)

Abstract: Laser metal-wire additive manufacturing technology is an integrated manufacturing technology with high forming accuracy and small machining allowance. However, due to its non-equilibrium solidification, complex heat, mass transfer and other physical phenomena, the cooling rate is difficult to be monitored by conventional means. To solve this problem, a monitoring algorithm for monitoring molten pool temperature and

收稿日期:2022-01-25; 修订日期:2022-04-11

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61701384);陕西省重点研发计划(2021GY-337)

作者简介:宋栓军,男,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为先进制造技术、脑电数据监测系统开发、新型纺织机械设计与光机电一体化技术、工业机器人设计与优化等。

real-time cooling rate using infrared thermography was proposed. The algorithm used FLIR x6520sc infrared thermal imager to capture the temperature field signal in the process of additive manufacturing in real time, obtained the real-time cooling rate of each point of the cladding channel by locating the position of the molten pool, and realized the real-time monitoring of the cooling rate of the cladding channel in the whole process. On this basis, the effects of different process parameters on molten pool temperature and cooling rate were studied. Finally, the effects of different cooling rates on solidification structure were discussed. The results show that when other process parameters remain unchanged, the scanning speed increases from 60 mm/min to 300 mm/min, and the molten pool temperature decreases by 339 °C, but the cooling rate increases by 1 741 °C/s; Affected by the decrease in laser power (from 200 W to 100 W), the cooling rate and molten pool temperature are reduced by 264 °C/s and 420 °C respectively; With the increase of wire feeding speed from 120 mm/min to 600 mm/min, the molten pool temperature and cooling rate decrease by 195 °C and 224 °C/s respectively; In addition, with the increase of cooling rate, the solidification structure of cladding channel is significantly refined after rapid solidification. The scanning speed is the most important factor affecting the cooling rate, which provides a basis for the later study of the closed-loop control system.

Key words: additive manufacturing; laser metal-wire; infrared thermography; molten pool temperature; cooling rate

0 引言

激光熔丝增材制造技术是利用材料科学、机电一体化技术和激光技术的综合集成,将材料(金属细丝)一层一层地构建成三维物体的技术^[1]。该技术目前用于汽车制造、航空和模具等行业^[2-4]。传统的电弧熔丝增材存在热输入大,热影响区大,成形精度低等问题;电子束熔丝增材零件尺寸受腔体大小限制,设备昂贵、复杂,且要求真空环境。而激光熔丝增材适用于多种场合,能提供较小的热影响区,更好的表面质量和几何形状控制^[5]。

激光熔丝增材制造过程涉及复杂的非平衡物理和化学冶金过程,该过程表现出多种传热和传质模式,特殊情况下还包括化学反应。试验表明,加工过程中复杂的冶金现象与材料和工艺密切相关,并受工艺参数的控制。打印件的力学性能取决于凝固组织,而凝固组织是由温度条件控制的熔池温度和冷却速率所决定的^[6]。因此,熔池温度和冷却速率是决定激光熔丝增材制造过程最终组织的两个主要参数,需要对这两个信号进行监测,以获得具有所需特性的高质量产品。此外,由于激光增材制造具有快速凝固的特性,很难通过一般试验手段获得冷却速率。参考文献[7]采用数值模拟法计算了不同加工条件下的温度分布、热循环曲线和冷却速率,但该方法对模型精度要求较

高,且模拟条件理想化,相比于试验结果存在误差。参考文献[8]采用热电偶记录熔覆过程中固定点的温度变化,但所测温度并非熔池温度,不能直接看作熔池冷却速率。参考文献[9]通过计算枝晶臂间距间接获得冷却速率,但该方法过程复杂,对设备条件要求较高,不适用于普遍情况。随着测温技术的发展,红外热像仪等设备逐渐应用于增材制造领域。相比于传统的点测温方式,该类设备可对增材制造过程中温度场的空间、时间变化进行监测,并实时传输温度数据^[10]。参考文献[11]使用红外热像仪监测制造过程温度场,探究其演化规律,获得了不同送丝速度下熔覆道上固定监测点的热循环和冷却速率,但单个监测点的冷却速率不能说明熔覆道整体的温度变化,无法充分判断凝固组织特性。

总体而言,目前大部分文献主要注重于熔覆道单点冷却速率分析,忽视了熔覆道成形全过程冷却速率的实时监测。为此,针对激光熔丝成形过程提出了一种基于红外热像技术的熔池温度和冷却速率实时监测算法,该算法可以实时监测熔覆道温度场,连续计算任意时刻熔池温度和冷却速率,保证熔覆道各点成形质量。在此基础上,通过研究工艺参数对冷却速率和熔池温度的影响规律,分析其对零件凝固组织的影响,以期为高精度激光熔丝增材制造的成形质量优化提供依据。

1 试验设备

1.1 试验平台

文中研究使用的激光增材制造试验平台由激光器、送丝机、运动平台、保护气嘴以及红外热像仪组成,如图 1 所示。其中,激光器采用的是 IPG 光纤激光器,波长 1064 nm,最大功率 250 W,光斑直径为 0.5 mm;送丝机采用电机驱动滚轮式挤压送丝;激光器和送丝机位于同一平面,分别与基板呈 60°和 40°;保护气嘴放置于焦点正上方 10 mm 处,与激光器和送丝机保持相对静止,气体流量始终保持为 10 L/min。通过 FLIR X6520 sc 型中波红外热像仪获取激光熔覆过程中的热信号,它有一个 640 pixel×512 pixel 制冷式碲镉汞 (MCT) 探测器,具有 3.0~5.0 μm 的光谱范围,帧速最高可达 145 Hz。热成像仪的可检测温度范围从 -20~2500 °C,并分为 3 个不同的范围:低 (5~150 °C),中 (150~500 °C) 和高 (500~2500 °C)。同时,为保护红外相机镜头不受熔覆飞溅的影响,在不影响记录温度的情况下,将红外相机垂直于熔覆道正上方 85°放置,距激光焦点 0.45 m。在此条件下,红外相机的空间分辨率为 0.135 mm/pixel。为精确测量温度,在熔覆过程中,温度范围设定在 500~2500 °C,帧速始终为 100 Hz。试验基板为 316 L 不锈钢,尺寸规格为 100 mm×100 mm×3 mm,金属丝材为 316 L 不锈钢,直径为 0.3 mm。

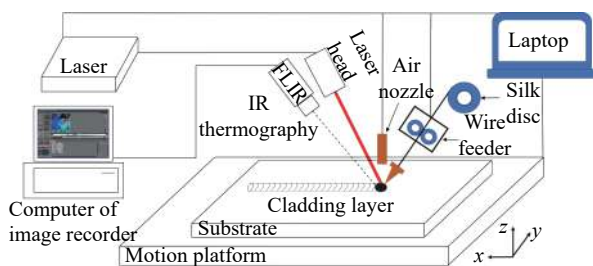


图 1 试验平台结构组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental platform structure

1.2 试验原理

为了方便试验进行,利用 STEVAL-3DP001V1 控制板对运动平台和送丝机的电机进行控制,通过 USB 接口连接电脑,配合 Pronterface 软件并使用 G 代码对运动进行控制,使得运动平台在电机驱动下可同时沿 x、y 和 z 轴运动。在进行激光熔丝增材制造过

程中,激光器与送丝机始终保持相对静止,基板平面沿 X 轴方向移动进行丝材熔覆。在单道熔覆完成后,基板平面可以在 Y 轴前后移动一定的距离,改变焦点位置,以便进行下一次熔覆。整个熔覆过程的热信号被红外热像仪所捕获,通过 Camera Link Medium 接口传输到热像仪数据采集软件,并利用算法对数据进行处理,最终获得熔池温度和实时冷却速率,整个系统为开环控制,其原理图如图 2 所示。

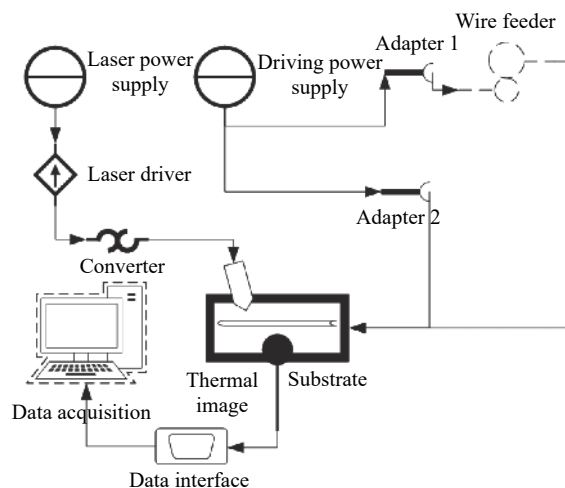


图 2 试验控制原理图

Fig.2 Schematic diagram of experimental control

1.3 红外热像仪发射率标定

红外测温原理基于普朗克定律,其数学表达式为:

$$M_{\lambda}(T) = \frac{C_1 \varepsilon(\lambda, T) \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (1)$$

式中: $C_1=3.7415 \times 10^{-16}$, 为第一辐射常数; $C_2=1.4389 \times 10^{-2}$, 为第二辐射常数。

从公式 (1) 中可以看出,想要获得物体表面的准确温度,要求知道辐射表面的 $\varepsilon(\lambda, T)$ 发射率^[12]; 否则,相机所测得的温度与物体表面的真实温度会存在着一定的差异^[13]。文中试验使用德国三铨公司生产的 M22 光纤式双色高温计结合红外热像仪对发射率进行标定。这款双色高温计的相关参数见表 1。

双色高温计采用比色测温法,通过两个相邻波长的红外辐射能量的比值来确定目标物体的温度,以此来减小发射率的影响,其数学表达式为:

$$M_1(T) = \varepsilon_1 \frac{C_1 \lambda_1^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda_1 T}}} \Delta \lambda_1 \quad (2)$$

$$M_2(T) = \varepsilon_2 \frac{C_2 \lambda_2^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda_2 T}}} \Delta \lambda_2 \quad (3)$$

$$R(T) = \frac{M_{\lambda_1}(T)}{M_{\lambda_2}(T)} = \frac{C_1 \varepsilon(\lambda_1, T) \lambda_1^{-5}}{\frac{e^{\frac{C_2}{\lambda_1 T}} - 1}{C_1 \varepsilon(\lambda_2, T) \lambda_2^{-5}}} \quad (4)$$

当两个波长较为相近时,两个波段的波长间隔为 $\Delta \lambda_1$ 和 $\Delta \lambda_2$, 并且 $e^{\frac{C_2}{\lambda_1 T}} \gg 1$ 和 $e^{\frac{C_2}{\lambda_2 T}} \gg 1$, 再如果 $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$, 则得到:

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{-5} \frac{\Delta \lambda_1}{\Delta \lambda_2} e^{\left(\frac{C_2}{\lambda_1 T} - \frac{C_2}{\lambda_2 T} \right)} \quad (5)$$

公式 (5) 中已经没有 ε_1 和 ε_2 , 也就是说, 物体发射率对测温结果没有太大的影响。

表 1 双色高温计相关参数

Tab.1 Related parameters of two-color pyrometer

Detector	Indium potassium arsenic detector×2
Spectral range/ μm	Passageway 1: 1.45–1.65 Passageway 2: 1.65–1.8
Measuring range/ $^{\circ}\text{C}$	600–2 500
Measurement accuracy/ $^{\circ}\text{C}$	<2 500
Response time/ms	<1
Exposure time/ms	<0.5

在此工作中进行的发射率标定试验示意图如图 3 所示, 红外热像仪置于相同位置。同时, 双色高温计用专用夹具固定于平台侧面, 与工作平台呈垂直角, 距离为 240 mm, 红外光斑位于打印焦点, 光斑大小为 1 mm。按照一定的工艺参数熔覆单道, 然后在空气中冷却。在这种情况下, 焦点处的温度变化可以

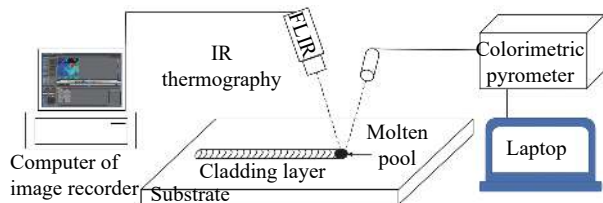


图 3 发射率标定试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of emissivity calibration experiment

同时被红外热像仪和双色高温计捕捉到。双色高温计的结果是相对准确的值, 通过改变红外热像仪的发射率使两者数值相近。如表 2 所示, 当发射率为 0.1 时, 误差最小, 并且在整个过程和后续温度计算中都保持这个发射率恒定。

表 2 不同发射率下偏差率

Tab.2 Deviation rate under different emissivities

Serial number	Emissivity	Deviation rate
1	0.08	5.8%
2	0.09	5.6%
3	0.1	4.1%
4	0.11	6.2%
5	0.12	7.3%

2 试验方法

2.1 熔池温度获取方法

通过红外热像仪捕获 640 pixel×524 pixel 分辨率的红外图像。但这些图像只提供每个像素的温度值。为了更好地进行热像分析, 将图像输出为二维矩阵, 如图 4 所示。图像矩阵的大小为 524×640, 其中 Y 为图像的总像素行数, X 为图像的总像素列数。如果是 640 pixel×524 pixel 图像, 则 X=640, Y=524。矩阵中的每个元素都有赋值的行和列, 以及一个位置向量 (x,y), 如图 2 所示, 每个元素的大小等于温度值的大小。每一帧中数值最大的像素点表示为熔池的最高温度, 因此, 通过识别图像阵列中最大温度值, 并将其

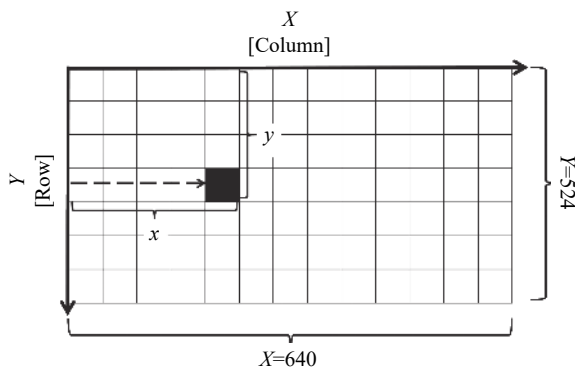


图 4 二维红外图像矩阵

Fig.4 Two dimensional infrared image matrix

与周围 8 个温度值平均, 最终获得的温度值定义为熔池温度, 且后续计算所用熔池温度均为该值。

2.2 冷却速率算法原理

为实现连续、整体的冷却速率实时监测, 文中算法利用红外热像仪对成形过程进行动态监测, 得到温度场的时空矩阵, 并对其精准定位分析后计算得到每一点对应的冷却速率, 通过循环迭代计算获得熔覆道上的连续冷却速率, 避免了单点冷却速率所带来的局限性。该算法的简要描述如图 5 所示。

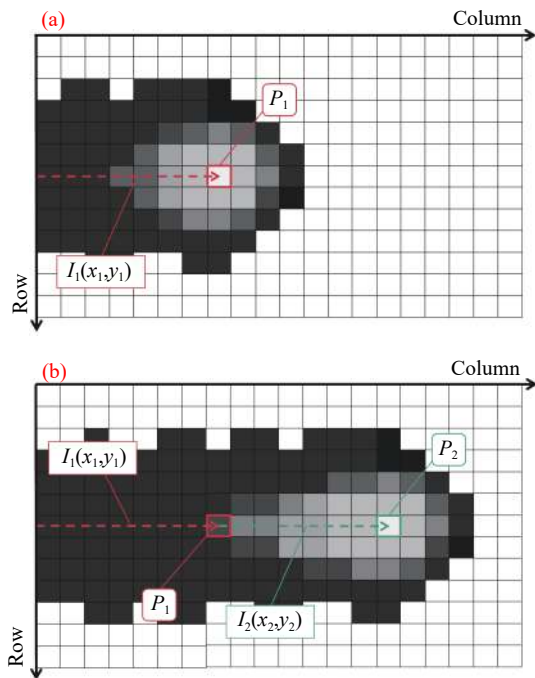


图 5 冷却速率计算示意图

Fig.5 Schematic diagram of cooling rate calculation

图 5(a) 和图 5(b) 分别显示了在 $t_1 = t_0$ 和 $t_2 = t_0 + n\tau$ 时的两张热图像, τ 为采样时间, n 为初始时间 t_0 后的总采样次数。在 t_1 处 (图 5(a)), 激光束在点 P_1 处发射。因此, P_1 位于熔池内部, 其位置向量 (x_1, y_1) 和温度 T_m 为熔池温度。在 t_0 s 开始后, 当激光束离开 P_1 , 以速度 V_s (即 CNC 工作台的运行速度) 移动, 经过时间 $(n\tau)$ s 后, 点 P_1 在新的热像图中得到一个新的温度值 T_n 。影响 P_1 点微观结构的两个因素是: (1) 熔池温度 T_m , (2) 冷却速率 C_p , 冷却速率定义为温度在时间上的减少量。对于点 P_1 , 冷却速率定义为:

$$C_{P_1} = \left| \frac{\Delta T(t)}{\Delta t} \right| = \left| \frac{T_n(t) - T_m(t)}{n\tau} \right| \quad (6)$$

式中: $T_m(t)$ 为熔池的瞬时温度; $T_n(t)$ 为 $(n\tau)$ s 后熔池的还原温度。因此, 通过公式 (5) 可以得到每个采样时间的实时冷却速率 C_{P_1} 。其中 $n\tau$ 主要通过熔池从最高温度降到平稳温度所需时间来确定, 由于不同工艺下时间并不相同, 所以每组试验对应 $n\tau$ 的取值也并不一样。冷却速率算法流程如图 6 所示。

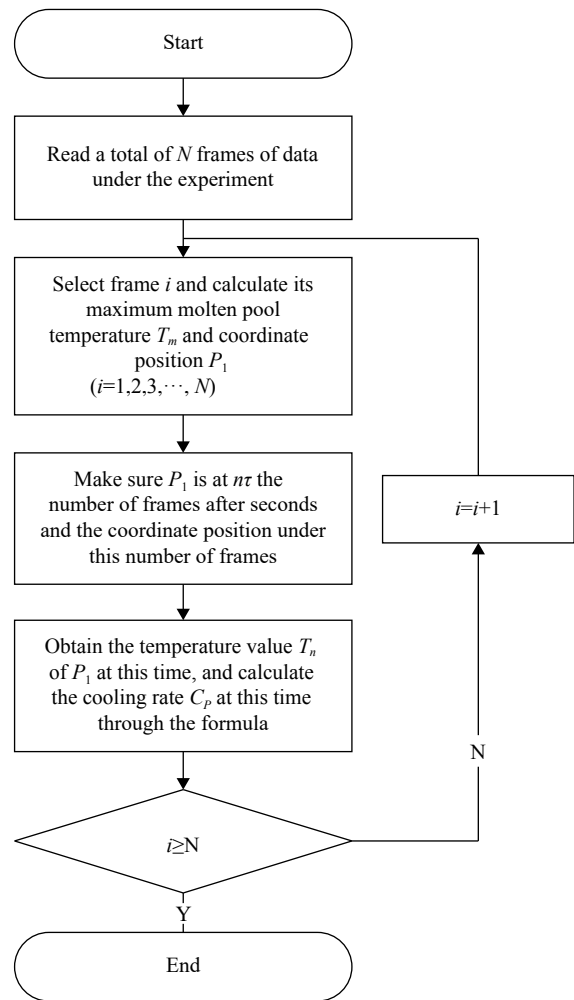


图 6 冷却速率算法流程图

Fig.6 Flow chart of cooling rate algorithm

2.3 试验设计

为了探讨熔池温度和冷却速率对微观组织的影响, 制备了 3 组工艺参数不同的试样。A 系列试样的加工参数如表 3 所示, 其中基板平台的扫描速度从试样 A1 逐渐增大到试样 A5。B 系列试样的工艺参数如表 4 所示, 主要针对激光功率进行研究。C 系列试样的工艺参数如表 5 所示。其中, 送丝比是指熔覆道长度与送丝长度的比值。设计这些试样是为了研究

表 3 不同扫描速度下工艺参数

Tab.3 Process parameters at different scanning speeds

Number	Laser power P/W	Scanning speed $V_s/mm \cdot min^{-1}$	Wire feeding ratio	Wire feeding speed $V_f/mm \cdot min^{-1}$
A1	175	60	1 : 2	120
A2	175	120	1 : 2	240
A3	175	180	1 : 2	360
A4	175	240	1 : 2	480
A5	175	300	1 : 2	600

表 4 不同激光功率下工艺参数

Tab.4 Process parameters under different laser powers

Number	Laser power P/W	Scanning speed $V_s/mm \cdot min^{-1}$	Wire feeding ratio	Wire feeding speed $V_f/mm \cdot min^{-1}$
B1	200	60	1 : 2	120
B2	175	60	1 : 2	120
B3	150	60	1 : 2	120
B4	125	60	1 : 2	120
B5	100	60	1 : 2	120

表 5 不同送丝速度下工艺参数

Tab.5 Process parameters under different wire feeding speeds

Number	Laser power P/W	Scanning speed $V_s/mm \cdot min^{-1}$	Wire feeding ratio	Wire feeding speed $V_f/mm \cdot min^{-1}$
C1	125	120	1 : 1	120
C2	125	120	1 : 2	240
C3	125	120	1 : 3	360
C4	125	120	1 : 4	480
C5	125	120	1 : 5	600

不同工艺参数对冷却速率的影响, 以及冷却速率对凝固组织样貌的影响。

3 结果与讨论

在此节中, 将分析不同激光功率、扫描速度和送丝速度下实时冷却速率和熔池温度的变化规律, 来了解冷却速率对熔覆道凝固组织的影响。通过了解这些影响, 未来可以将冷却速率作为一个监测和控制信

号, 调整工艺参数来获得不同组织特性的产品。

3.1 扫描速度对冷却速率影响

在激光熔丝增材制造过程中, 冷却速率和熔池温度直接影响熔池的组织凝固模式的过程。因此, 实时捕获每条熔覆道的冷却速率和熔池温度, 以了解过程中的凝固组织演变。图 7 和图 8 给出了各个扫描速度下熔覆道的熔池温度和实时冷却速率。各熔覆道的冷却速率和熔池温度的平均值也列于表 6。

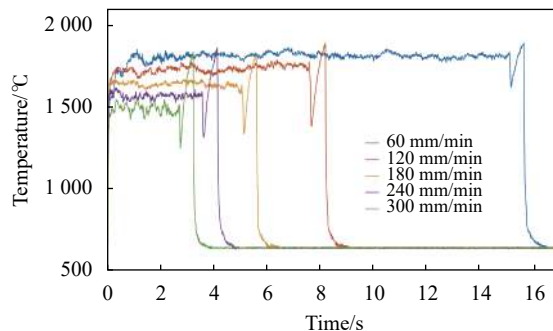


图 7 不同扫描速度下熔池温度

Fig.7 Molten pool temperature at different scanning speeds

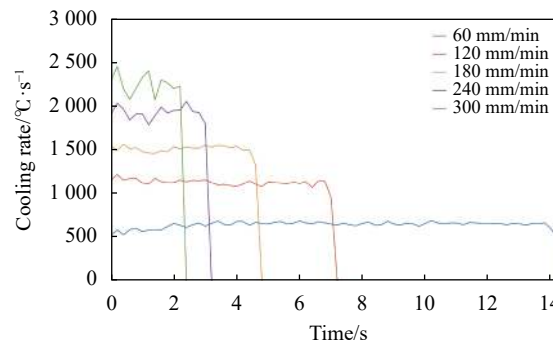


图 8 不同扫描速度下冷却速率

Fig.8 Cooling rate at different scanning speeds

表 6 试样 A 的平均冷却速率和平均熔池温度

Tab.6 Average cooling rate and average molten pool temperature of sample A

Number	Average cooling rate/ $^{\circ}C \cdot s^{-1}$	Average molten pool temperature/ $^{\circ}C$
A1	648	1821
A2	1131	1730
A3	1517	1637
A4	1927	1566
A5	2389	1482

在图 7 中, 各试样熔池温度曲线较为稳定, 且在对温度范围内波动。各曲线在尾部均存在波峰和

波谷,该现象是由于激光器存在一定响应时间,基板停止运动后激光持续加热所造成的。如表 3 所示,A 系列试样的熔覆长度和送丝比均保持不变,对于 A 系列试样,单位长度丝材熔覆质量是相同的,且由于扫描速度增大,熔覆时间减少,熔覆道吸收的热量随之减少,最终导致熔池温度减小。由表 6 可知,样本 A1~A5 的平均熔池温度分别为 1 821、1 730、1 637、1 566、1 482 °C,试验规律与理论分析相符。因此,扫描速度与激光熔丝增材制造过程中的熔池温度呈负相关。

另一方面,按照上述算法计算各试样的冷却速率,为了更详细地比较冷却速率变化,列出了每个 A 试样稳定区域的冷却速率。如图 6 所示,曲线 A1、A2 和 A3 较为平缓,A4 与 A5 波动较大。这是因为同一采样频率下,A4 和 A5 的扫描速度过快,熔覆时间过短导致采样点相对较少。同时由于电机高速转动使得基板平台振动较大,所以获取的数据波动较为剧烈。由表 6 可得,样本 A1~A5 的平均冷却速率分别为 648、1 131、1 517、1 927、2 389 °C/s,说明尽管熔池温度随扫描速度增大而减少,但由于激光光源快速移动,导致基板整体温度降低,散热条件变好,冷却速率却随之增大。需要指出的是,由于表 6 中冷却速率和熔池温度的不一致行为,以及为了保证研究测量的准确性,每个试样熔覆了两次,并观察到相似的结果。

3.2 激光功率对冷却速率影响

图 9 和图 10 分别是 B 系列试样对应的熔池温度和冷却速率,从图 9 中可以看出,激光功率对熔池温度的影响与扫描速度相反,激光功率越大,熔池温度越高。这是由于随着激光功率的降低,熔覆道上单位面积能量密度减小,且单位长度丝材熔覆质量在送丝比恒定的条件下保持不变,最终导致了熔池温度的下降。如表 7 所示,试样 B1~B5 的激光功率从 200 W 降低到 100 W,熔池温度随之从 1 930 °C 降到 1 510 °C,试验结果与理论相符。

同时,受熔池温度降低的影响,熔覆过程中基板温度下降,熔覆道上热积累减小,使得越低功率下基板散热条件越好,再加上恒定送丝速度使得熔覆道散热条件相对较好,综合导致了冷却速率随激光功率的减小而降低。由图 9 可知,不同功率下实时冷却速率

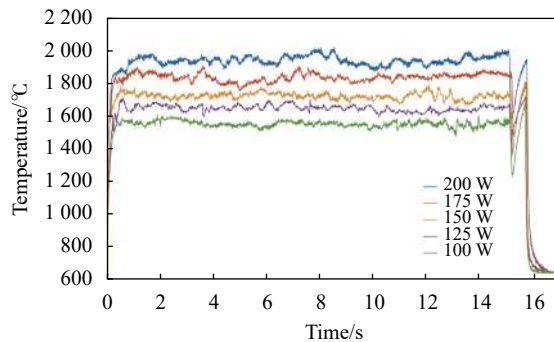


图 9 不同激光功率下熔池温度

Fig.9 Molten pool temperature at different laser powers

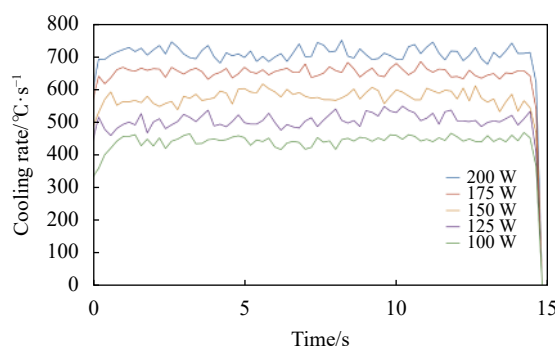


图 10 不同扫描速度下冷却速率

Fig.10 Cooling rate at different scanning speeds

表 7 试样 B 的平均冷却速率和平均熔池温度

Tab.7 Average cooling rate and average molten pool temperature of sample B

Number	Average cooling rate/°C·s ⁻¹	Average molten pool temperature/°C
B1	698	1 930
B2	642	1 821
B3	565	1 720
B4	498	1 640
B5	434	1 510

曲线分布情况与熔池温度曲线类似,均呈规律式下降,但由于熔池温度存在一定的波动,所以导致对应冷却速率曲线同样呈现不平稳现象。如表 7 所示,平均冷却速率从 B1 的 698 °C/s 降到了 B5 的 434 °C/s。由此得出结论:熔池温度和冷却速率均与激光功率呈正相关。

3.3 送丝速度对冷却速率影响

另一方面,与其他两个工艺参数(激光功率和扫描速度)相比,送丝速度同样也对冷却速率有很大影

响。为此,进行的一组新的试验,在单道熔覆过程中,改变送丝速度,同时保持激光功率和扫描速度恒定。

C 系列试样的冷却速率和熔池温度分别如图 11 和图 12 所示,其平均熔池温度和平均冷却速率列于表 8。从图中可以明显看出,随着送丝速度的增加,冷却速率随之减少,同时熔池温度也在下降。其原因是扫描速度恒定导致熔覆过程中单位面积所吸收的热

量相同,而送丝速度增大使得单位长度丝材熔覆质量增多;另一方面,过多熔丝形成的熔覆道导致散热条件变差,也使得冷却速率降低。因此,可以观察到:在其他工艺参数一定的条件下,送丝速度与冷却速率和熔池温度均呈负相关。

表 8 试样 C 的平均冷却速率和平均熔池温度

Tab.8 Average cooling rate and average molten pool temperature of sample C

Number	Average cooling rate/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$	Average molten pool temperature/ $^{\circ}\text{C}$
C1	1326	1618
C2	1258	1562
C3	1210	1519
C4	1154	1474
C5	1104	1423

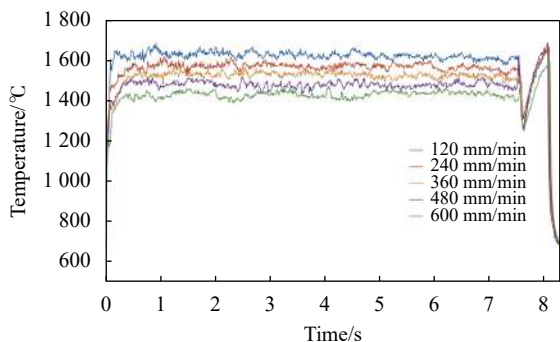


图 11 不同送丝速度下熔池温度

Fig.11 Molten pool temperature under different wire feeding speeds

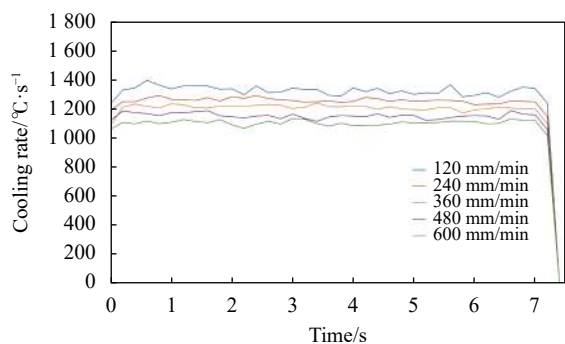


图 12 不同送丝速度下冷却速率

Fig.12 Cooling rate at different wire feeding speeds

3.4 凝固组织随冷却速率变化规律

诸多研究结果表明,冷却速率对凝固组织有着极为重要的影响,进而决定制件的性能。为了更详细地比较不同冷却速率下凝固组织样貌,需要高倍显微照片。如图 13 所示,选取 A 试样中 A1、A2、A3 的组织样貌显微照片,其对应冷却速率依次为 648、1131、1517 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。这些显微照片都是在熔覆道中心位置拍摄的。由图可以看出,随着冷却速率的上升,凝固组织中 ferrite 由细小的蠕虫状组织逐渐粗化,形成板条状组织,奥氏体来不及生长,凝固组织得到显著细化,具有快速凝固特征。该现象产生的原因是不同工艺参数下熔覆道内部温度和散热条件不同导致冷却速

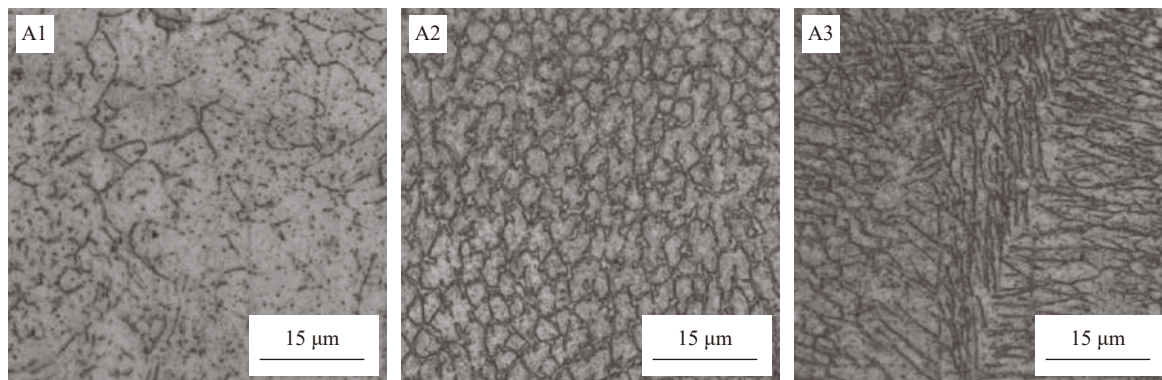


图 13 凝固组织随冷却速率的变化

Fig.13 Change of solidification structure with cooling rate

率的不同,从而影响凝固组织的表面形貌,这与红外热分析得到的冷却速率规律相吻合。

4 结 论

针对激光熔丝成形过程中冷却速率监测连续性和整体性的难题,提出了基于红外热像技术的熔池温度和冷却速率实时监测算法。进行了 3 组不同工艺参数试验,定量分析了不同参数对熔池温度和冷却速率的影响。试验结果表明:该算法能够对整个熔覆过程进行实时监测,可连续输出实时冷却速率和熔池温度,为获得高质量激光熔丝成形件提供了客观依据。并通过观察对应的试验数据,得到以下的结论:

(1) 随着扫描速度从 60 mm/min 增加到 300 mm/min,熔覆道吸收热量减少,基板温度降低,平均熔池温度减少了 339 °C,平均冷却速率增加了 1741 °C/s,分别呈降低和升高趋势。

(2) 当激光功率从 200 W 降低到 100 W 时,熔覆道上能量密度减小,平均冷却速率和平均熔池温度分别降低了 264 °C/s 和 420 °C。冷却速率和熔池温度与激光功率呈正相关。

(3) 随着送丝速度从 12 mm/min 升高到 600 mm/min,熔覆道单位长度丝材熔覆质量增大,散热条件变差,导致平均熔池温度和平均冷却速率分别降低 195 °C 和 224 °C/s。冷却速率和熔池温度与送丝速度呈负相关。

(4) 不同冷却速率下的凝固组织样貌不同,且随着冷却速率的增加而逐渐细化,具有快速凝固特征。

参考文献:

- [1] Liu Feng, Wu Weihui, Yang Yongqiang, et al. Laser selective melting forming of component gradient material parts [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1510-1518. (in Chinese)
- [2] Zeng Shoujin, Wu Qirui, He Jiachen, et al. Design and performance prediction of laser melting Voronoi porous structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1059-1071. (in Chinese)
- [3] Zhang Guodong, Cheng Guanghua, Zhang Wei. Research progress of ultrafast laser selective welding technology [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1209-1223. (in Chinese)
- [4] Tan Songnian, Ding Yalin, Xu Yongsun, et al. Review on the development of additive manufacturing metal mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 75-86. (in Chinese)
- [5] Hrabe N, Quinn T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6 Al-4 V) fabricated using electron beam melting (EBM) [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 573(20): 271-277.
- [6] Zhang Y J, Gang Y U, He X L. Numerical study of thermal history in laser aided direct metal deposition process [J]. *Chinese Science: Physics, Mechanics, Astronomy*, 2012, 55(8): 1431-1438.
- [7] Griffith M L. Understanding thermal behavior in the LENS process [J]. *Materials & Design*, 1999, 20(2/3): 107-113.
- [8] Yuan C, Ke Z, Jian H, et al. Characterization of heat affected zone liquation cracking in laser additive manufacturing of Inconel 718 [J]. *Materials and Design*, 2015, 90: 586-594.
- [9] Cai Lijing, Zhou Kailai, Shen Guizhu, et al. Infrared thermal imager high precision temperature measurement calibration technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20210043. (in Chinese)
- [10] Sun Hongsheng, Liang Xingang, Ma Weigang, et al. Non scanning wide range multi wavelength imaging temperature measurement technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200394. (in Chinese)
- [11] Zhu Jinqian, Ling Zemin, Du Farui, et al. Infrared thermal image monitoring of temperature field in laser fuse additive manufacturing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0604002. (in Chinese)
- [12] Bagavathiappan S, Lahiri B B, Saravanan T, et al. Infrared thermography for condition monitoring-A review [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 35-55. (in Chinese)
- [13] Li Yunhong, Sun Xiaogang, Lian Jihong. Research on infrared thermal image temperature measurement technology and its application [J]. *Modern Electronic Technology*, 2009, 32(1): 112-115. (in Chinese)