

激光与光电子学进展

基于约束结构球墨铸铁表面激光增材制造镍基高温合金非协同响应研究

郎甜甜, 庞铭*

中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 设计了一种 L 型基体去模拟气门座激光增材带侧壁的约束结构, 构建带约束结构的激光增材仿真模型, 并考虑了激光吸收率的变化、材料相变潜热、增材过程与外界的换热等因素的影响。结果表明: 激光的空间能量密度变化和激光的空间能量输入存在竞争关系, 当提高激光功率、增加功率密度对温升的效果大于增加速度、降低空间能量对温度下降的效果时, 增材层温度增大; 由于基体结构的非对称性及激光增材过程中传散热的综合影响, 增材层与基体底面熔合的深度会大于其与侧面熔合的深度, 且增材层横截面形貌为台阶式月牙形; 由于热传导的滞后性及激光的快速加热和冷却等的综合作用, 随着激光功率和扫描速度的增加, 增材层底面形貌由月牙形逐渐过渡到平台形。

关键词 激光光学; 激光熔覆; 球墨铸铁; 气门座; 熔池

中图分类号 TG164.4; TG157

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1114005

Nonsynergistic Response in Laser Additive Manufacturing of Nickel-Based Superalloys Comprising the Constrained Structure of a Ductile Iron Surface

Lang Tiantian, Pang Ming*

Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract In this study, an L-shaped model was designed to simulate the constraining structure of the laser additive strip sidewall of a valve seat to construct the constrained structure. The basic laser additive simulation model considers the changes in laser absorptivity, latent heat of phase change of the material, and heat exchange between the additive process and the external environment. Results show the existence of a competitive relationship between the laser energy density change and the energy input of the laser in space. When the effect of increasing the laser power and power density on the temperature rise is greater than the effect of increasing the speed and reducing the energy in the space on the temperature drop, the temperature of the additive layer increases. Because of the influence of the substrate structure asymmetry and the heat transfer and dissipation in the laser additive process, the depth of fusion between the additive layer and the bottom surface of the substrate is greater than the depth of fusion with the side surface and the cross section of the additive layer has a stepped-crescent shape. Furthermore, because of the combined effects of the hysteresis of heat conduction and rapid heating and cooling of the laser, with the increase in laser power and scanning speed, the cross-sectional profile of the additive layer gradually switches from a crescent to a platform shape.

收稿日期: 2020-09-28; 修回日期: 2020-11-14; 录用日期: 2020-12-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122018D020)、中国民航大学蓝天青年科研资金资助项目

*E-mail: pangming1980@126.com

Key words laser optics; laser cladding; ductile iron; valve seat; molten pool

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引言

为实现新型动力高可靠性和长寿命的研制目标,气缸盖和气门座采用整体成型的方式,且气缸盖采用球墨铸铁材料。气门座在服役条件下承受着高温高压燃气、气门的冲击拍打等综合作用,服役环境比较恶劣。由于球墨铸铁材料硬度比较低,需要采用特殊工艺提高表面的耐磨性,现有的方法主要有高频感应法、电子束热处理法、火焰热处理法和激光淬火法等。高频感应法通过感应线圈对需要处理的表面进行加热,该方法适用于大面积的表面特殊处理;电子束热处理法需要使用真空箱,对试样大小有限制;火焰热处理法适用于大面积的表面处理;激光淬火法会形成马氏体,马氏体在服役环境温度超过 500 °C 就会出现硬度下降。针对现有方法的不足,已有科研人员采用激光增材的方法在气门座区域开展激光增材制造研究,利用激光增材制造可以根据服役环境调控增材层材料,适应于服役环境。气门座激光增材层的性能与增材制造过程的温度历程密切相关^[1-3]。目前,国内外科研人员已经针对激光增材制造开展了一些研究。Tseng 等^[4]将定制的有限元模型运用于激光增材制造,分析和验证了不同情况下激光增材仿真的结果,进而总结了激光热源特性对温度场分布的影响。de Oliveira 等^[5]研究和分析了在不同条件下的 45 钢上激光熔覆 Co 基涂层,从不同层面表征了应力及其分布情况,并得出涂层的精确数据会受到内部强纹理的影响的结论。Zhao 等^[6]设计并验证了一种符合拉格朗日观点的有限元方法的仿真程序,该程序可以精确控制激光熔覆过程的稀释率,从而提高激光熔覆层的质量,同时通过数值计算定量讨论了基体的预热温度等工艺参数对包覆层稀释率的影响。Nickel 等^[7]研究了分层制造中沉积模式对激光沉积金属零件的应力和挠度的影响,所建立的逐层堆积的应力场和温度场有限元模型预测结果与实验结果相符。解瑞东等^[8]总结了国内外关于增材制造温度场的仿真分析结果,对不同的增材制造温度场在线检测和在线预测方法进行分析和讨论,发现预热仍是降低温度梯度的有效辅助手段。胡泽华等^[9]对镍钛合金激光选区熔化优化工艺参数和相变温度

的影响因素进行分析,并对镍钛合金未来的发展和应用进行了展望。潘爱琼等^[10]研究了不同的工艺参数对成形的 SRR99 镍基单晶缺陷的影响,发现工艺参数对增材层的致密度有很大的影响。席明哲等^[11]运用 ANSYS 软件对金属薄壁零件的三维瞬态温度场进行数值模拟,总结了零件温度场随时间的变化规律,同时用数值模拟结果解释了柱状晶的成形过程。曾大文等^[12]通过建立模型得出激光熔池温度与速度随时间的分布,预热效果会使熔池最高温度、深度和半径与时间呈正相关,同时经实验验证,三维准稳态模型最接近三维非稳态模型。

目前,国内外虽然开展了一些激光增材制造方面的仿真研究,但还没有关于解决气门座激光熔覆未熔合问题的报道。本文通过构建简化后的气门座圈结构仿真模型,以增材层与基体底面和侧面都熔合为约束条件,通过改变激光在时间和空间的能量分布,研究激光空间能量分布的变化和时间域上能量的变化对基体底面和侧面熔合深度的影响规律,为工程上气门座激光增材参数优化提供参考。

2 数学物理模型

2.1 数学模型

激光增材制造过程是增材区域面积逐渐增大的动态过程,且在激光增材制造过程中,旧的增材区域凝固和新的增材区域形成是同步进行的,激光增材制作过程中的温度分布是三维瞬态温度场分布,其能量传导公式为^[13]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q, \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度; c 为材料比热容; λ 为材料导热系数; T 为材料温度; Q 为材料内部热源及潜热效应项。 λ 、 ρ 、 c 均为温度的函数。

2.2 物理模型

2.2.1 有限元网格模型

为了模拟在实际增材制造过程中带有侧壁的气门座形状,对模型进行了简化,将其简化为 L 型球墨铸铁,基体是两个不同的长方体,尺寸分别为 20 mm × 10 mm × 12 mm 和 20 mm × 5 mm × 5 mm;

增材区域选用的激光粉末为 Ni25, 增材区域为 20 mm×5 mm×1 mm 的长方体。基体材料和激光增材区域的有限元模型如图 1 所示。为了提高仿真精度, 在增材区域采用加密网格, 增材区域的单元尺寸是 0.25 mm×0.29 mm×0.25 mm, 有限元单元选择六面体高阶实体热单元, 同时利用表面效应单元加载与外界进行对流换热。采用送粉式激光增材, 随着激光扫描的进行, 新的增材区域逐渐形

成, 在 ANSYS 软件中先把增材区域全部“杀死”, 然后逐步激活, 以模拟增材过程中新的增材区域形成。在建立仿真模型时, 通过修改增材层单元的刚度来控制单元“生死”, 即将被“杀死”单元的刚度矩阵与一个很小的缩减系数相乘, 这时单元的密度等参数值近似为零。当激光热源前进一步时, 下一步的死单元便会被激活, 直至增材结束。激光扫描方向和增材方向如图 1 所示。

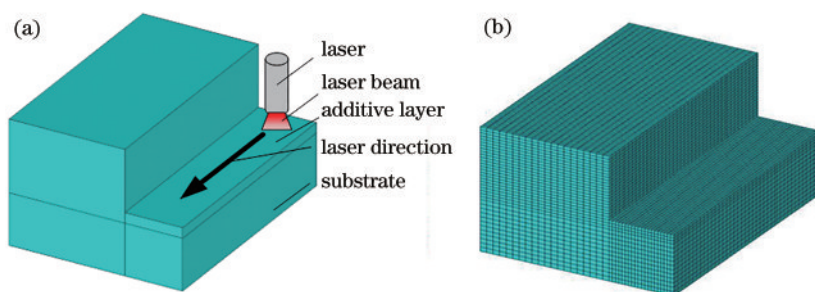


图 1 激光增材球墨铸铁有限元模型。(a)球墨铸铁模型的激光增材区域示意图;(b)有限元模型

Fig. 1 Finite element model of laser additive spheroidal graphite cast iron. (a) Schematic of laser additive area of ductile iron model; (b) finite element model

2.2.2 热物性参数

不同温度下材料的热物性参数可能不一样。因此, 若在计算中忽略温度对热物性参数的影响, 则会

导致实验结果出现偏差^[14]。经查阅有关文献^[15]并利用数值模拟插值法和外推法, 得到随温度变化的球墨铸铁和 Ni25 材料的热物理参数, 如表 1 与表 2 所示。

表 1 球墨铸铁的热物性参数

Table 1 Thermal physical parameters of ductile iron

Temperature / °C	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Specific heat capacity / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Density / (kg·m ⁻³)
20	29.55	491	7096
200	29.79	526	7096
400	28.95	569	7096
600	28.23	698	7096
765	26.62	1100	7096
800	25.90	824	7096
1000	24.64	742	7096
1500	21.96	1031	7096

表 2 Ni25 的热物性参数

Table 2 Thermal physical parameters of Ni25

Temperature / °C	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Specific heat capacity / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Density / (kg·m ⁻³)
20	16.0	424	7528.4
200	16.2	450	7528.4
400	17.1	453	7528.4
600	20.1	460	7528.4
800	22.0	493	7528.4
1000	25.0	521	7528.4
1500	33.4	620	7528.4

2.2.3 热边界条件

1) 激光辐照区域的热边界条件

在球墨铸铁激光增材实验中,激光的能量一部分被材料吸收用于升温,一部分被材料通过热传导与外界换热,还有一部分激光被材料反射掉,其激光直接辐射区域的热边界条件为^[13]

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = q, \quad (2)$$

式中: q 为激光有效功率密度; n_x, n_y, n_z 为边界外法线方向的余弦。

2) 激光辐照区域外的热边界条件

在仿真程序中,同时向模型单元加载对流换热和激光热源时,单元上的激光热源效果会遮盖对流换热的效果,其与外界换热方程为^[13]

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial x} n_x \right) = h(T_s - T_0), \quad (3)$$

式中: h 为对流换热系数; T_s 为周围环境温度; T_0 为试样材料边界的温度。

在实验过程,在试样底面铺设一层隔热介质,使仿真底面处于绝热环境,其换热方程为^[14,16]

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} n_z = 0. \quad (4)$$

3 结果分析与讨论

3.1 激光参数对基体熔合的影响

表 3 所示在不同功率和速度下的基体和增材层的熔合情况,其中✓代表在增材制造过程中增材层与基体的底面和侧面同时发生熔合,×代表在增材制造过程中增材层与基体的底面和侧面未同时发生熔合。在激光增材制造过程中,由于结构的影

响以及不同区域传热量和散热量的差异,同样的参数情况下温度响应不同。通过改变激光功率,调整激光在空间的能量分布;通过改变激光的扫描速度,调整激光在时间域上的能量分布。由于增材区域与基体底面和侧面熔合的深度存在差异,通过调整激光在时间和空间的能量分布,可得到不同的基体底面和侧面的熔化深度变化率。由表 3 可知:以基体底面和侧面都熔合为约束条件,球墨铸铁激光增材制造的功率越低,需要的临界最大速度越慢;激光功率越高,需要的临界最大速度越快。在球墨铸铁基体上进行激光增材时采用的是送粉方式,且增材层区域与基体底面熔合的深度大于其与侧面的熔合深度,在激光输入能量不够的条件下,其与基体底面和侧面的熔合深度同时降低,当熔合深度降低到一定的程度就会出现基体底面熔合、侧面未熔合的现象,在实验中也可以观察到这个现象。以增材层底面和侧面都与基体熔合为约束条件,通过降低激光功率来改变激光能量在空间的分布,采用减慢激光扫描速度的方法调整时间域上的能量分布,以弥补空间域上降低的能量。在增材层和基体底面及侧壁都熔合的临界参数条件下,研究增材区域温度及其深度随激光功率的演变规律,其具体参数如下:激光功率为 2 kW 时,选择 1 mm/s 的临界扫描速度;激光功率为 3 kW 时,选择 2 mm/s 的临界扫描速度;激光功率为 4 kW 时,选择 5 mm/s 的临界扫描速度;激光功率为 5 kW 时,选择 7 mm/s 的临界扫描速度;激光功率为 6 kW 时,选择 10 mm/s 的临界扫描速度。随着激光功率的降低,通过减慢激光扫描速度来弥补单位时间内减少的激光输入能量。

表 3 不同功率和速度的基体熔合情况

Table 3 Fusion situation of substrates at different powers and speeds

Power/kW	Fusion situation at different speeds									
	1 mm /s	2 mm /s	3 mm /s	4 mm /s	5 mm /s	6 mm /s	7 mm /s	8 mm /s	9 mm /s	10 mm /s
1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2	✓	×	×	×	×	×	×	×	×	×
3	✓	✓	×	×	×	×	×	×	×	×
4	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×	×
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Note: ×—non-fusion; ✓—fusion.

3.2 不同路径的温度分布规律

图 2(a)、(b)所示为表 3 的 5 种临界速度下,激光增材扫描距离到 0.01 m 时沿着不同路径经过侧面

和底面的温度分布。图 2(c)为 A、B 两条路径的选取示意图。由图 2 可知:底面温度在距离基体底面 0.002 m 时开始出现上升趋势,在 0.004~0.005 m

时出现明显的上升趋势,5种临界速度下温度平均上升速度分别为 723.6, 1031.1, 1221.5, 1340.3, 1322.7 °C/mm;侧面温度在距离侧面增材层 0.01 m 时达到基体熔化点,开始形成熔池,在 0.010~0.011 m 时温度变化剧烈,平均上升速度分别为 935.4, 1162.7, 1311.4, 1423.1, 1432.6 °C/mm。与 2 kW 激光功率和 1 mm/s 扫描速度相比,6 kW 激光

功率和 10 mm/s 扫描速度在增材区域的温度较高,在基体区域的温度较低,且在靠近增材层区域温度上升速度明显大于 2 kW 和 1 mm/s 的情况。这是因为激光具有快速加热和快速冷却的功能,功率增大加快了激光辐照区域的升温速度,而热传导具有滞后性,速度增加则降低了热扩散区域等综合作用。

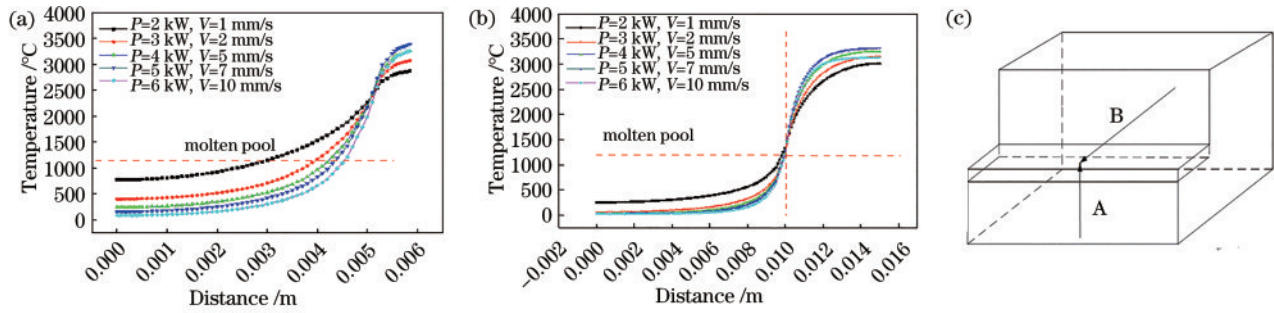


图 2 不同功率下路径 A 和 B 的温度变化。(a)侧面路径 A 的温度变化曲线;(b)侧面路径 B 的温度变化曲线;(c)路径示意图
Fig. 2 Temperature changes of paths A and B at different powers. (a)Temperature change curves of side path A; (b) temperature change curves of bottom path B; (c) schematic of paths

图 3 所示为 5 种临界条件下激光增材扫描到 0.01 m 时温度监测点的温度随时间的变化曲线,监测点温度的变化都呈先上升后下降的趋势。从图 3 可以观察到:监测点的最高温度先是随着激光功率和速度的增加而升高,然后随着功率和速度的进一步升高,监测点的最高温度下降。提高激光功率会增加输入的总能量,从而使熔池的温度升高。然而,当激光扫描速度降低时,激光辐照区域的输入能量减少,从而导致熔池温度降低。通过提高激光功率

来增加激光的空间能量密度对温升的影响和通过加快激光扫描速度来降低空间能量输入对温度降低的影响有一个竞争关系。当激光功率提升对温度升高的效应大于激光扫描速度增加对温度下降的效应时,总的温度就会升高;否则,随着激光功率和扫描速度的提升,监测点的温度会下降。当激光功率为 6 kW、激光扫描速度为 10 mm/s 时,监测点的温度变化曲线只有一个峰值,这是因为激光功率高,扫描速度快,激光增材区域的温度瞬间升高到最高点,同时与周围环境存在较大的温差,随后向周围快速散热,升高的温度快速下降。而激光功率为 2 kW 和激光扫描速度为 1 mm/s 的温度曲线中出现多个峰值,这是因为激光能量低,扫描速度慢,同时由于预热效应和滞后效应,基体在激光增材加热下的条件下温度瞬间上升到最大峰值,随后激光离开基体,而基体与周围物质存在温度差,向周围传热后基体温度下降,随后受滞后效应的影响,温度短暂保持或轻微上升,随后温度继续下降。

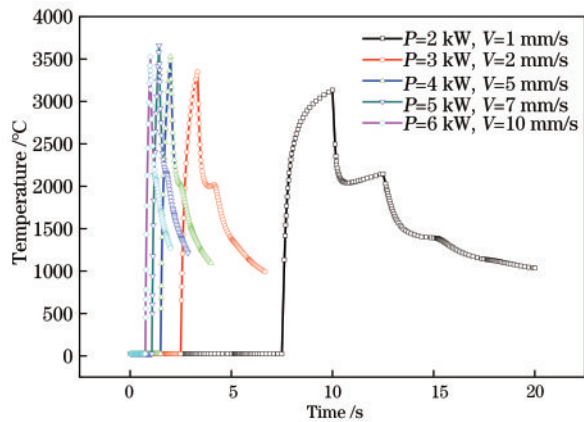


图 3 激光增材扫描距离为 0.01 m 时监测点温度随时间的变化曲线
Fig. 3 Temperature curves changed with time at the monitoring point when the laser additive scanning distance is 0.01 m

3.3 激光参数变化对熔池深度的影响规律

图 4 所示为 5 种临界条件下的熔池深度变化曲线。从图 4 可以观察到:在 5 种临界条件下,随着功率和速度的同时增加,熔池深度逐渐减小。当激光功率为 2 kW、激光扫描速度为 1 mm/s 时,侧面和底面的平均熔池深度分别为 0.74 mm 和 4.13 mm;当激光功率为 3 kW、激光扫描速度为 2 mm/s 时,侧面

和底面的平均熔池深度分别为 0.45 mm 和 2.59 mm; 当激光功率为 4 kW、激光扫描速度为 5 mm/s 时, 侧面和底面的平均熔池深度分别为 0.45 mm 和 2.24 mm; 当激光功率为 5 kW、激光扫描速度为 7 mm/s 时, 侧面和底面的平均熔池深度分别为 0.44 mm 和 2.04 mm; 当激光功率为 6 kW、激光扫描速度为 10 mm/s 时, 侧面和底面的平均熔池深度分别为 0.40 mm 和 1.82 mm。当激光功率为 2 kW、激光扫描速度为 1 mm/s 时, 熔池深度曲线呈上升趋势, 最大熔池深度值达到 0.87 mm, 其他

4 种情况的熔池深度变化不大, 熔池深度值集中在 0.40~0.45 mm; 底面熔池深度在逐渐增加, 激光功率为 2 kW、激光扫描速度为 1 mm/s 时的底面熔池深度值最大, 当激光增材扫描距离为 0.02 m 时底面基体完全熔化, 其余 4 种情况的熔池均未完全熔化, 激光功率为 6 kW、激光扫描速度为 10 mm/s 时的底面熔池深度值最小。因此, 提高激光功率会导致激光功率密度增大, 进而使激光对单位增材区域内的输入总能量提升; 加快激光的扫描速度会缩短样品与激光的相互作用时间, 导致熔化深度降低。

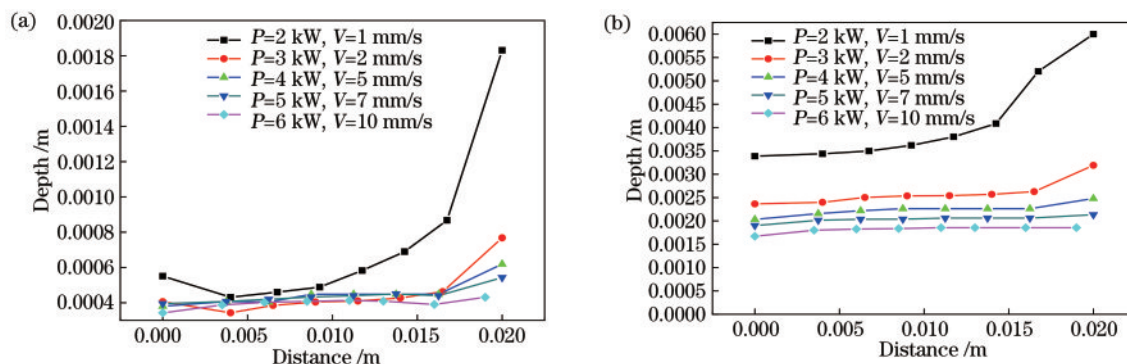


图 4 5 种临界条件下的熔池深度变化曲线。(a)侧面熔池深度; (b)底面熔池深度

Fig. 4 Molten pool depth curves under five critical conditions. (a) The depth of the side of molten pool; (b) the depth of the bottom of molten pool

图 5 所示为 5 种临界条件下, 激光增材扫描距离为 0.01 m 时熔池的横截面。从图 5 可以观察到: 在约束情况下, 熔池的横截面为台阶式月牙形, 且

随着激光功率和扫描速度的增加, 底面形状由月牙形逐渐过渡到平底形。台阶式月牙形侧面是增材层通过热传导熔化形成的, 根据传热学原理, 温度

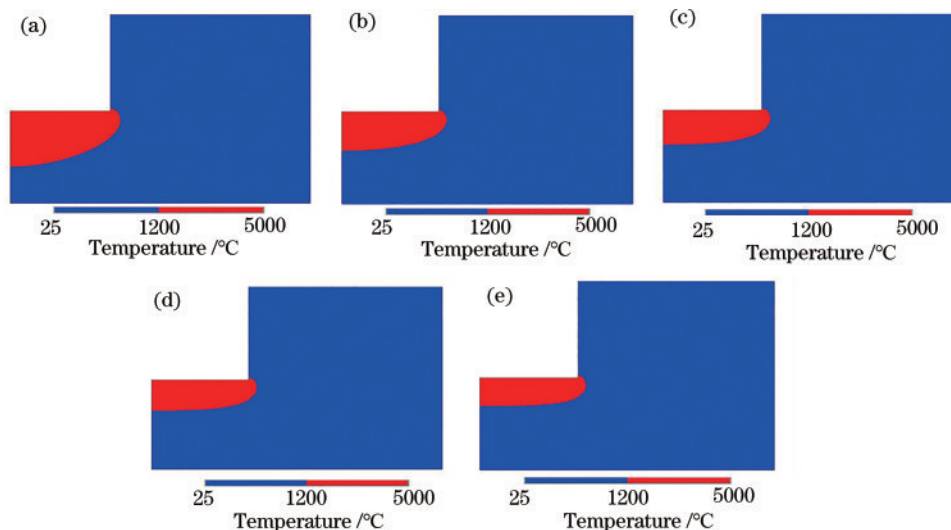


图 5 5 种临界条件下激光增材扫描距离到 0.01 m 时最高温度点的切片。(a) $P=2$ kW, $V=1$ mm/s; (b) $P=3$ kW, $V=2$ mm/s; (c) $P=4$ kW, $V=5$ mm/s; (d) $P=5$ kW, $V=7$ mm/s; (e) $P=6$ kW, $V=10$ mm/s

Fig. 5 Sections at the highest temperature point when the laser additive scanning distance reaches 0.01 m under five critical conditions. (a) $P=2$ kW, $V=1$ mm/s; (b) $P=3$ kW, $V=2$ mm/s; (c) $P=4$ kW, $V=5$ mm/s; (d) $P=5$ kW, $V=7$ mm/s; (e) $P=6$ kW, $V=10$ mm/s

从高温区域传递到低温区域及不同区域的散热差异共同导致了熔池横截面呈现台阶式月牙形;月牙形底面形状的变化是激光的快速加热和冷却特性、热传导的滞后性,加上激光扫描速度增加等综合作用导致的。随着激光功率的提高,满足基体底面和侧面同时熔合的临界速度也增大,在基体同一位置底面熔池深度从 2.54 mm 降低到 1.84 mm,侧面熔池深度从 0.49 mm 降低到 0.40 mm。这是因为激光功率为 2 kW 和激光扫描速度为 1 mm/s 时,单位区域内输入的能量高,散热不均匀,空气热导率小且传热速度慢,基体热导率大且传热速度快;其他临界条件下,单位增材区域内输入的总能量少,随着速度和功率的增加,熔池深度减小且熔池底面变化平缓,输入能量分布均匀。

3.4 激光功率和速度变化对温度等值线的影响规律

图 6 所示为 5 种临界条件下激光增材扫描距离

为 0.01 m 时 z 方向温度梯度分布。从图 6 可以观察到: $P=2$ kW、 $V=1$ mm/s 时最大温度梯度为 1.5×10^6 °C/m, $P=3$ kW、 $V=2$ mm/s 时最大温度梯度为 2.1×10^6 °C/m, $P=4$ kW、 $V=5$ mm/s 时最大温度梯度为 2.5×10^6 °C/m, $P=5$ kW、 $V=7$ mm/s 时最大温度梯度为 2.8×10^6 °C/m, $P=6$ kW、 $V=10$ mm/s 时最大温度梯度为 2.9×10^6 °C/m, 最大温度梯度值随着激光功率和扫描速率的提高而增大。激光增材制造快速加热过程,使激光增材区域和基体存在较大的温差,通过基体的导热及其与外界的换热,该区域温度迅速降低,导致大的温度梯度主要集中在激光增材区域,且底面增材区域比侧面增材区域大。同时,温度梯度的大小与温度的空间分布差值密切相关,加快激光的扫描速度会降低激光辐射区域的能量输入,从而降低熔池的最高温度;增大激光功率会导致激光对单位增材区域内的激光输入能量增大,进而导致激光增材区域温度增加。

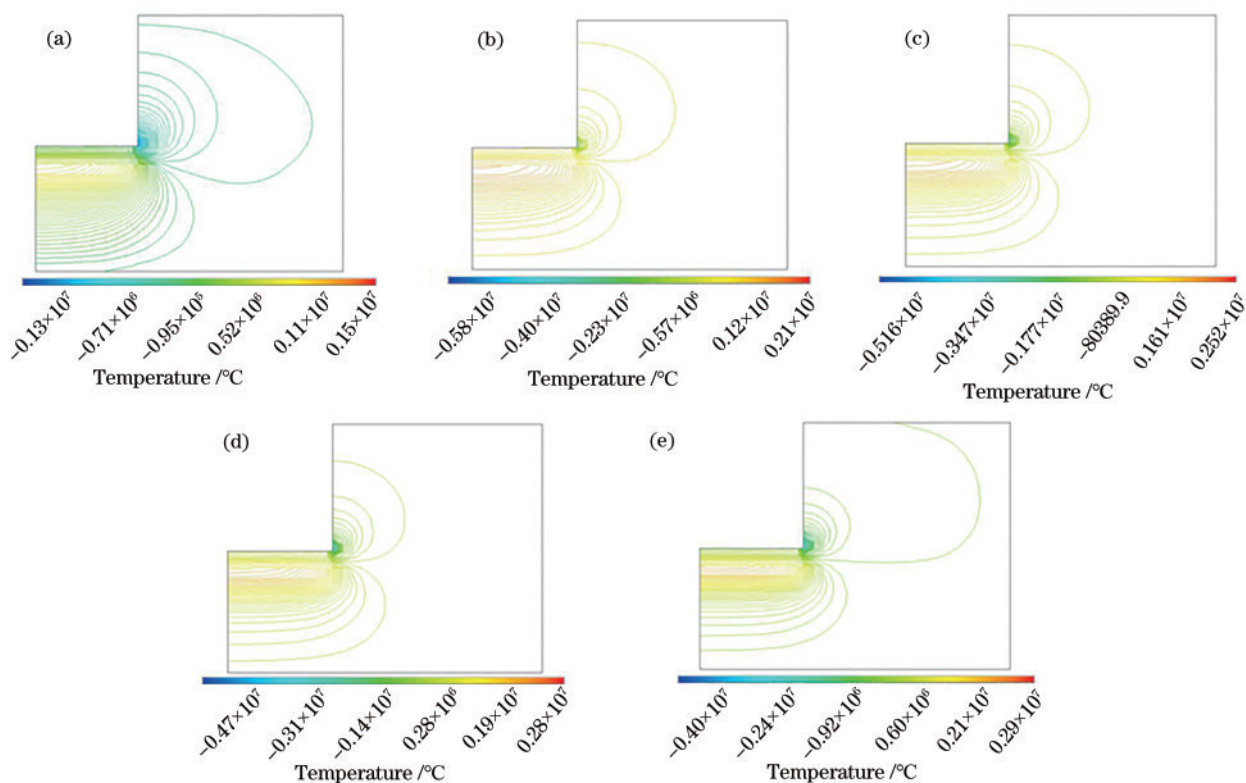


图 6 5 种临界条件下 z 方向温度梯度等值线图。(a) $P=2$ kW, $V=1$ mm/s; (b) $P=3$ kW, $V=2$ mm/s; (c) $P=4$ kW, $V=5$ mm/s; (d) $P=5$ kW, $V=7$ mm/s; (e) $P=6$ kW, $V=10$ mm/s

Fig. 6 Contour maps of temperature gradient in z direction under five critical conditions. (a) $P=2$ kW, $V=1$ mm/s; (b) $P=3$ kW, $V=2$ mm/s; (c) $P=4$ kW, $V=5$ mm/s; (d) $P=5$ kW, $V=7$ mm/s; (e) $P=6$ kW, $V=10$ mm/s

4 仿真模型验证

目前,激光增材制造仿真模型的验证主要有两

种方法:一种是将温度测量结果与仿真结果进行比较;另外一种是比较温度梯度与枝晶的生长方向。本实验采用比较温度梯度与枝晶的生长方向的方法:

法。图 7(a)所示为垂直于激光熔覆方向的横截面顶部组织,图 7(b)所示为图 7(a)圆圈位置的仿真温度梯度,图 7(a)和图 7(b)具有相同的激光参数。由金属凝固原理可知:枝晶的生长方向沿散热最快方向的反方向,即与温度梯度最大方向有关。从图 7(b)可以观察到,该区域有水平方向和垂直方向

的温度梯度,且此时垂直方向的温度梯度值大于水平方向的温度梯度值,散热方向以垂直方向为主,水平方向为辅,说明枝晶的生长方向具有一定的角度,不垂直于基体底面,但更靠近垂直方向。枝晶的生长方向与仿真结果具有一致性,说明了所设计模型的有效性。

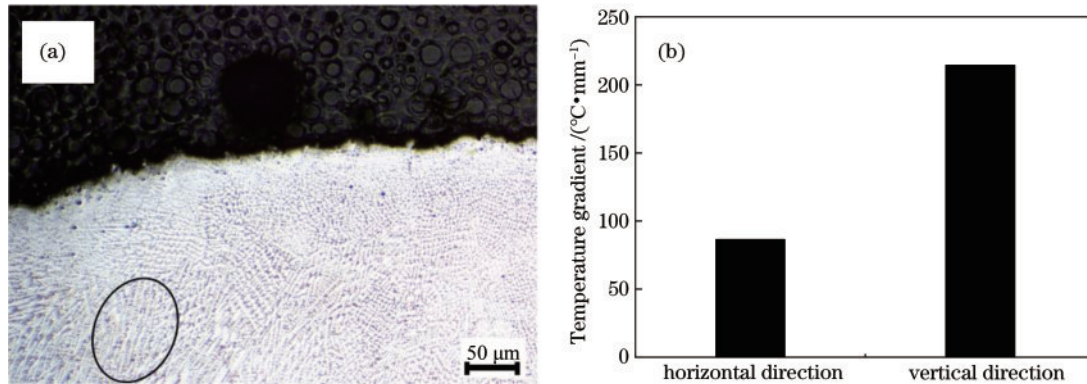


图 7 $P=2\text{ kW}$ 、 $V=1\text{ mm/s}$ 时增材层的组织和温度梯度。(a)增材层横截面顶部组织;
(b)同一位置的水平和垂直方向的温度梯度

Fig. 7 Organization and temperature gradients of the additive layer under $P=2\text{ kW}$ and $V=1\text{ mm/s}$. (a) Top organization of additive layer cross-section; (b) horizontal and vertical temperature gradients at the same location

5 结 论

采用激光增材的方式在球墨铸铁基体上制造镍基高温合金,在几何结构的非对称等综合影响下,基体底面和侧面的熔化深度存在非协同关系,且基体底面的熔化深度大于侧面的熔化深度。激光在空间域上的能量密度变化和空间域上的能量输入对增材层的温度影响存在竞争关系,当通过增加激光功率提高激光在空间域的能量密度对温度升高的贡献值大于通过增加激光扫描速度来降低空间域上的能量输入对温度降低的贡献值时,增材层温度就会上升。以基体底面和侧面都熔合为约束条件,在激光增材制造过程中,激光功率越低,需要的临界最大速度越小;激光功率越高,需要的临界最大速度越大。在激光的快速加热和冷却、热传导滞后等综合作用下,随着激光功率和扫描速度的增加,增材层底面由月牙形逐渐过渡到平台形。

参 考 文 献

- [1] Pang M, Liu Q X. Numerical simulation of temperature field of wear-resistant anti-corrosion laser cladding self-lubricating coating on 300M super-strength steel [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(2): 35-42.
- [2] Pang M, Fu Y X. Numerical simulation study on asymmetric distribution of laser melting magnesium alloy pool [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(20): 110-113.
- [3] Pang M, Zhang X H, Tan W D, et al. Research on effect rules of different specimen thickness on temperature field of laser melting strengthening RuT300 [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(8): 104-108.
- [4] Tseng W C, Aoh J N. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 141-152.
- [5] de Oliveira U, Ocelik V, de Hosson J T M. Residual stress analysis in Co-based laser clad layers by laboratory X-rays and synchrotron diffraction techniques [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3/4): 533-542.

庞铭,刘全秀. 300M钢激光熔覆耐磨防腐自润滑涂层温度场数值模拟研究[J]. 航空材料学报, 2020, 40(2): 35-42.

[2] Pang M, Fu Y X. Numerical simulation study on asymmetric distribution of laser melting magnesium alloy pool [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(20): 110-113.

庞铭,浮艺旋. 激光熔凝镁合金熔池非对称分布数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(20): 110-113.

[3] Pang M, Zhang X H, Tan W D, et al. Research on effect rules of different specimen thickness on temperature field of laser melting strengthening RuT300 [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(8): 104-108.

庞铭,张啸寒,谭雯丹,等. 不同试样厚度对激光熔凝强化 RuT300 温度场影响规律的研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(8): 104-108.

[4] Tseng W C, Aoh J N. Simulation study on laser cladding on preplaced powder layer with a tailored laser heat source [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 141-152.

[5] de Oliveira U, Ocelik V, de Hosson J T M. Residual stress analysis in Co-based laser clad layers by laboratory X-rays and synchrotron diffraction techniques [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3/4): 533-542.

- [6] Zhao G P, Cho C, Kim J D. Application of 3-D finite element method using Lagrangian formulation to dilution control in laser cladding process [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2003, 45(5): 777-796.
- [7] Nickel A H, Barnett D M, Prinz F B. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 317(1/2): 59-64.
- [8] Xie R D, Zhu J W, Zhang H, et al. Review of detection, analysis and control of temperature field in laser additive manufacturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050003.
解瑞东, 朱尽伟, 张航, 等. 激光增材制造温度场检测分析与控制综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050003.
- [9] Hu Z H, Song C H, Liu L Q, et al. Research progress of selective laser melting of nitinol [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1202005.
胡泽华, 宋长辉, 刘林青, 等. 镍钛合金激光选区熔化成形技术研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1202005.
- [10] Pan A Q, Zhang H, Wang Z M. Process parameters and microstructure of Ni-based single crystal superalloy processed by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102007.
潘爱琼, 张辉, 王泽敏. 镍基单晶高温合金选区激光熔化成形工艺及组织 [J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1102007.
- [11] Xi M Z, Zhang Y Z, Shi L K, et al. Numerical simulation of 3 D transient temperature field in thin-wall metal parts fabricated by laser direct deposition [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(4): 887-892.
席明哲, 张永忠, 石力开, 等. 激光快速成形金属薄壁零件的三维瞬态温度场数值模拟 [J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(4): 887-892.
- [12] Zeng D W, Xie C S. Numerical simulation for the process of 3D transient convection and heat transfer in the molten pool [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(2): 102-105.
曾大文, 谢长生. 激光熔池三维非稳态对流传热过程的数值模拟 [J]. *激光技术*, 2002, 26(2): 102-105.
- [13] Yang S M, Tao W Q. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] Pang M, Zhang X H, Liu G. Effect of space travel velocity of spray gun on temperature field of Mo/8YSZ composite coating prepared by plasma spraying process [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2020, 40(1): 71-80.
庞铭, 张啸寒, 刘光. 喷枪空间行进速率对等离子喷涂 Mo/8YSZ 复合涂层温度场的影响 [J]. *航空材料学报*, 2020, 40(1): 71-80.
- [15] Tan Z, Guo G W. Thermophysical properties of engineering alloys [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
谭真, 郭广文. 工程合金热物性 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [16] Pang M, Zhang X H, Fu W, et al. Research on effects rule of change of laser melting strengthening RuT300 ending parameters on molten pool [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(24): 130-134.
庞铭, 张啸寒, 付威, 等. 激光熔凝强化 RuT300 收尾参数变化对熔池影响规律的研究 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47(24): 130-134.