

激光熔覆 316L 不锈钢温度场模拟与分析

刘娟 罗开玉 景祥 鲁金忠

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 运用 ANSYS 有限元软件对激光熔覆 316L 不锈钢的温度场进行了数值计算, 利用建立的三维模型, 分析激光熔覆过程中温度场分布情况和熔池节点温度梯度的变化规律及扫描路径对温度场的影响。结果表明, 熔池的前端和重熔区的等温线比较密集, 热量比较集中, 该区域为裂纹的敏感区。短边扫描比长边扫描更有利于降低节点的温度梯度, 进而抑制裂纹产生, 同时也更有利于熔覆层与基体的结合和激光熔覆的持续进行。

关键词 激光熔覆; 数值计算; 温度场; 扫描路径

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.s103002

Simulation and Analysis of the Temperature Field in Laser Cladding 316L Stainless Steel

Liu Juan Luo Kaiyu Jing Xiang Lu Jinzhong

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013

Abstract The temperature field in 316L stainless steel subjected to laser cladding is analyzed by ANSYS software. Based on the three-dimensional physical model, a study is made to analyze the temperature field distribution, the variation of the temperature gradient of the nodes irradiated by the laser beam and the effect of different scanning paths of laser beam on temperature field in the laser cladding process. Results show that the temperature contours and the heat are intensive and concentrated respectively in the front of melt pool and the regions of the clad overlapping, where cracks are easy to form. In addition, the temperature gradients of the nodes irradiated by the laser beam in the short scanning path are lower than that in the long scanning path. Moreover, compared to the long scanning path, the short scanning path is more conducive to the combination of cladding layer and the substrate and the continuity of laser cladding.

Key words laser cladding; numerical simulation; temperature field; scanning path

OCIS codes 140.3390; 310.4925; 120.6660

1 引言

激光熔覆是通过在基材表面添加熔覆材料, 并利用高能量密度的激光束使之与基材表面薄层一起熔凝的方法, 在基材表面形成与之相互融合的、且具有不同成分与性能的合金覆层^[1]。奥氏体不锈钢是不锈钢中重要的一种, 其生产和使用量约占不锈钢总产量及用量的 70%^[2]。由于 316L 奥氏体不锈钢是面心立方晶体结构金属, 在高温条件下具有优异的强度、耐腐蚀性和抗氧化性^[3], 激光熔覆奥氏体不锈钢在工业中被广泛采用来提高不锈钢表面性能。激光熔覆具有复杂的物理化学反应和固液相变等过程, 且熔池尺寸较小、温度很高以及热源作用时间较短, 熔池内的温度场直接影响着对流、传热和传质, 进而影响凝固过程和成分分布^[4], 因此熔覆过程中温度场直接影响熔覆层的质量。然而, 目前用实验方法很难测量激光熔覆过程中的温

收稿日期: 2015-01-25; **收到修改稿日期:** 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51105179)、中国博士后科研资助计划(2014M551510)、江苏省博士后科研资助计划(1301019A)、江苏大学高级人才启动基金(13JDG049)

作者简介: 刘娟(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光表面改性技术方面的研究. Email: ahliujuan2011@163.com

导师简介: 罗开玉(1975—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光制造技术方面的研究. Email: ykluo@ujs.edu.cn (通信联系人)

度变化。数值模拟是获得熔覆层温度场分布的一种有效途径^[5]。Palumbo等^[6]通过激光熔覆 Al-Si 合金环形基材,研究了激光熔覆过程中节点的热循环曲线,熔覆层与基体交界处材料稀释率和熔池形状的变化规律。Cheikh等^[7]采用同步送粉方式将 316L 不锈钢粉末激光熔覆于低碳钢基材表面,研究了喷嘴中粉末的分布形式对熔覆层几何形态的影响规律。李强等^[8]研究了用送粉法在 45# 钢表面进行大面积激光多道搭接熔覆 316L 不锈钢粉末涂层的微观组织及其形成特性。张永忠等^[9]采用激光熔覆沉积技术制备由成分比例为 100% 的 316L 不锈钢到 100% 的 Stellite31 合金的多层梯度材料,分析了沿梯度方向的组织、成分及硬度变化。

由于激光熔覆属于复杂的热力能量耦合过程,期间温度场的分布与熔覆层的质量密切相关。本文利用有限元软件 ANSYS,对在 316L 不锈钢基材表面进行激光熔覆时的温度场进行了数值分析,在建立不锈钢激光熔覆温度场的基础上,对多道熔覆熔池前端、已熔侧重熔区等区域的温度场进行模拟分析,获得了熔池节点温度的梯度变化规律及扫描路径对温度场的影响,研究结果为 316L 不锈钢激光熔覆提供了理论依据。

2 激光熔覆 316L 不锈钢温度场的计算模型

2.1 有限元模型的建立

激光熔覆在 316L 不锈钢表面熔覆 304 不锈钢粉末采用同步送粉方法,在计算时,为了模拟实际送粉过程,使用了 ANSYS 软件中的“生死单元”功能,即首先将整个熔覆层单元“杀死”,随着激光光斑的移动将光斑照射区域内的熔覆层单元激活,直至熔覆过程结束。

激光熔覆过程中,由于激光能量输入产生的热量高度集中,其热影响区较小。在划分网格时,由于熔池附近温度变化较为剧烈,为了更加精确地在此区域加载负荷,此区域熔覆单元要进行细化,其他区域稀疏划分。这样在保证计算精度的前提下,适当对有限元模型进行简化,可以减少求解的运行时间。采用六面体单元 SOLID70 对几何模型进行网格划分,试件的初始温度为 20 ℃,基体尺寸为 30 mm×30 mm×8 mm,单道熔覆层的宽度为 3 mm,高度为 1 mm,如图 1 所示。

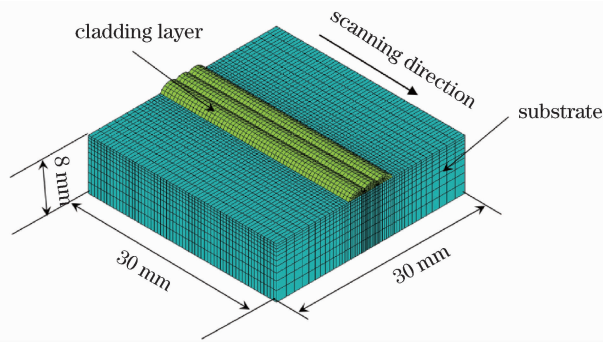


图 1 基体及熔覆层的网格划分

Fig.1 Finite element meshing of substrate and cladding layer

2.2 材料参数及边界条件

温度场模拟过程中影响因素众多,为了简化计算,作如下简化:1)材料连续并各向同性;2)材料表面对激光的吸收率不随温度变化;3)忽略固态相变潜热对温度场分布的影响;4)由于激光加热时间极短,不考虑熔池内液体的流动对温度场的影响^[10];5)忽略气体物质对入射激光的输入影响;6)不考虑基体与试验台之间的热传导,基体与熔覆层的所有外界仅与空气发生对流换热,将辐射换热的影响耦合到对流换热中而不作单独考虑^[11]。

移动的热源作为边界条件引入,热流边界随光斑的移动而变化,是活动边界。采用热源密度近似正态分布的高斯分布热源模型,热流密度表达式为^[5]:

$$q(r) = [\eta P / (\pi R)] \exp(-r/R), \quad (1)$$

式中 R 为激光光斑半径; η 为材料对激光的吸收率; r 为其余点距加热斑点中心的距离; P 为激光功率。对熔覆过程中熔化和凝固的相变问题进行分析时,需要考虑用随温度变化的焓值来代替潜热的吸收和释

放^[12], 焓值的变化 ΔH 可以描述为密度 ρ 、比热容 c 和温度 T 的函数, 其数学表达式为^[5]:

$$\Delta H = \int \rho c(T) dT. \quad (2)$$

在熔覆过程中, 基体表面局部区域被激光瞬间加热至高温状态, 激光熔覆温度场在模拟计算时属于非线性瞬态热分析, 因此, 基体及熔覆层材料的热物性参数均应为温度的函数, 试样的初始温度为室温 (20 ℃), 计算中, 采用的材料热物性参数随温度非线性变化^[13-16]。

3 温度场的数值分析

3.1 多道激光熔覆的温度场

计算中采用的激光熔覆参数为: 激光功率 P 为 1400 W, 扫描速度 v 为 4 mm/s, 光斑直径 D 为 1.5 mm。材料对激光能量收率设为 0.8, 单道扫描时间为 7.5 s, 三道扫描总时间为 22.75 s。由此计算得到多道激光熔覆的第三熔道某时刻温度场分布情况如图 2 所示。

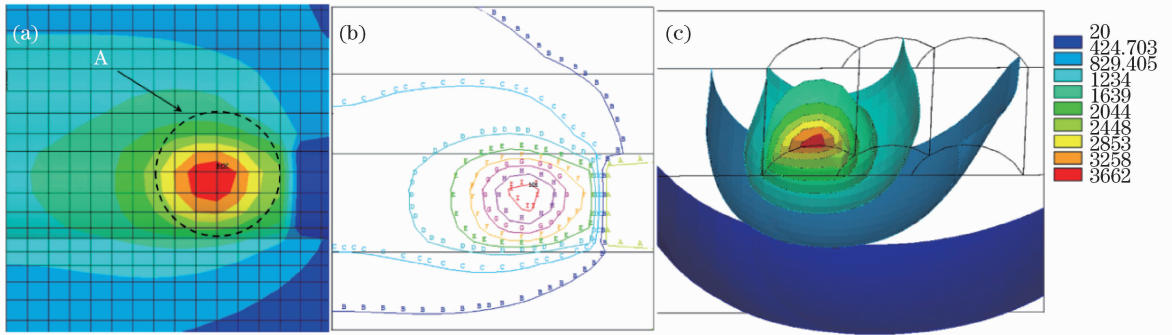


图 2 温度场分布图: (a) 正面温度场云图, (b) 正面温度场等温线图, (c) 剖面温度场等温面图

Fig. 2 The simulation results of thermal field. (a) Front cloud picture of temperature field; (b) temperature contours near the pool; (c) profile of isothermal surface near the pool

图 2 (a)~(c) 分别为多道激光熔覆激光扫描至第三熔道某处时的正面温度分布云图、正面温度场等温线图、剖面温度场等温面图。图 2 (a) 中所示的 A 区域为激光光斑所照射的区域, 激光热源是以光斑中心呈高斯分布状, 然而从图 2 (a) 中温度分布云图来看: 光斑前端温度分布比较密集, 光斑后端温度分布相对稀疏; 光斑的上端为已熔区域, 该区域包含第二熔道与第三熔道熔覆层的重熔区, 光斑上端区域的温度分布相较光斑下端温度分布更为密集。图 2 (b) 为图 2 (a) 对应的等温线图, 图 2 (b) 进一步表明了光斑前端和熔道重熔区等温线比较密集, 热量比较集中, 该区域对应的温度梯度亦较大, 是裂纹的敏感区^[17]。图 2 (c) 显示的是等温面剖面图, 光斑附近等温面较密集, 距光斑越远等温面越稀疏。已熔侧的等温面比未熔侧的等温面更稀疏, 这表明已熔侧更便于温度的扩散, 这是前道熔覆对后续熔覆的影响原因^[18]。

由图 2 可知, 多道激光熔覆光斑前端和光斑侧边的重熔区是裂纹的敏感区, 已熔侧更有利于温度的扩散。

为进一步研究温度场的分布情况, 选取相关节点分析其温度梯度的变化情况。在多道激光熔覆的某一截面上, 选取第三熔道截面上的 6 个节点, 如图 3 所示, 剖面上 B 区域放大图中的 6 个节点, 依次为节点 0~5, 其中节点 0~2 位于第三熔道的重熔区。

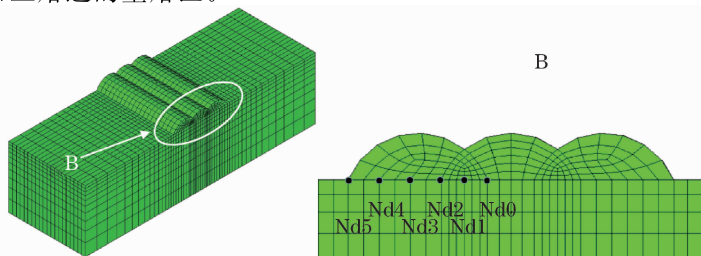


图 3 多道激光熔覆剖面图

Fig. 3 Profile of the multi-track laser cladding

图 4 (a)为重熔区节点 Y 方向温度梯度随时间的变化曲线,由图 4 (a)可以看出节点 0、1、2 的 Y 方向温度梯度曲线变化一致,当激光扫描至第二熔道该节点位置处节点温度梯度急剧增加,随着激光光斑的移出,温度梯度逐渐降低;当激光光斑再次扫描至第三熔道该节点位置处时,节点的温度梯度再次剧增。这与实际熔覆情况是一致的,因节点 0~2 位于重熔区,重熔区节点会被激光光斑扫描两次。由图 4 (a)可以看出节点 2 在 Y 方向的温度梯度均值明显大于节点 0 和节点 1,节点 0 在 Y 方向的温度梯度峰值为 $9.55 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C/m}$,节点 1 在 Y 方向的温度梯度峰值为 $8.75 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C/m}$,而节点 2 在 Y 方向的温度梯度峰值为 $12.4 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C/m}$,大于节点 0 和节点 1 的温度梯度峰值。图 4 (b)显示的是节点 3~5 在 Y 方向温度梯度随时间变化的曲线,三节点的曲线变化类似,均在 16.125 s 时刻 Y 方向温度梯度值达到最大,梯度峰值分别为 $10.8 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C/m}$, $10.1 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C/m}$, $8.9 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C/m}$ 。这是由于激光光斑扫描至节点位置处,导致节点温度梯度该时刻出现峰值。通过对图 4 的分析可知,重熔区节点 2 在激光光斑到达时刻其 Y 方向的温度梯度峰值最大。

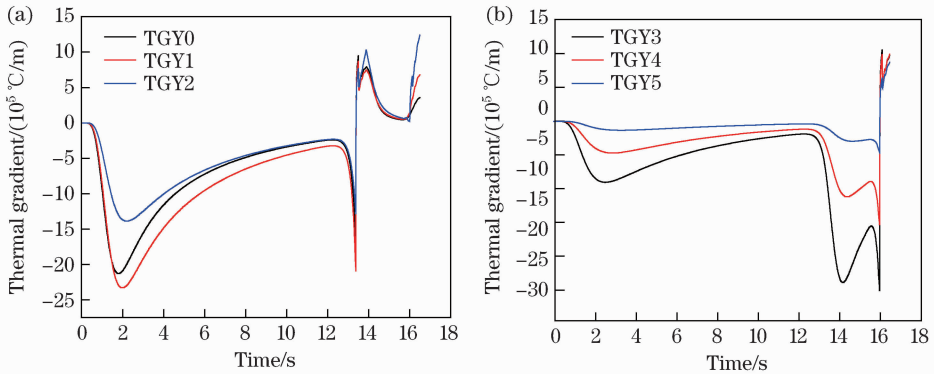


图 4 节点 Y 方向温度梯度随时间变化曲线

Fig. 4 Y-component thermal gradient distribution of each point as a function of time

图 5 是节点 0~5 的 X 方向温度梯度随时间的变化曲线,从图中可以看出,截面上各节点 X 方向温度梯度曲线的变化趋势一致,在约为 13.75 s 时刻各节点的温度梯度急速上升达到峰值,该时刻亦是激光熔覆过程中激光光斑首次扫描至该批节点位置处的时间。这是因为激光光斑第一次扫描至该批节点时,节点的 X 方向温度梯度陡升,随着光斑的移出温度梯度急速降低,当光斑再次扫描至节点位置时,由于前道激光熔覆的预热作用节点的温度梯度上升趋势明显减缓。从图中可以明显看出,各节点 X 方向温度梯度峰值大小依次为节点 0、节点 1、节点 2、节点 3、节点 4、节点 5,故节点 0 的 X 方向温度梯度峰值最大,该处亦是裂纹的敏感区。由于 6 个节点的曲线重叠度较高,为了便于观察曲线图中最大波峰处各节点的曲线变化情况,将 12~15 s 间的各节点纵坐标按顺序依次节点 0 纵坐标 + 5δ ,节点 1 纵坐标 + 4δ ,节点 2 纵坐标 + 3δ ,节点 3 纵坐标 + 2δ ,节点 4 纵坐标 + δ ,其中 $\delta = 2.0 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C/m}$,所得曲线如图 5 中的小图。从图 5 中的小图可以看出,节点 0~2 达到峰值的时间比节点 3~5 更早,这是因为节点 0~2 位于重熔区,前道熔覆时激光扫描过该处节点,对该处节点的预热作用更为明显。

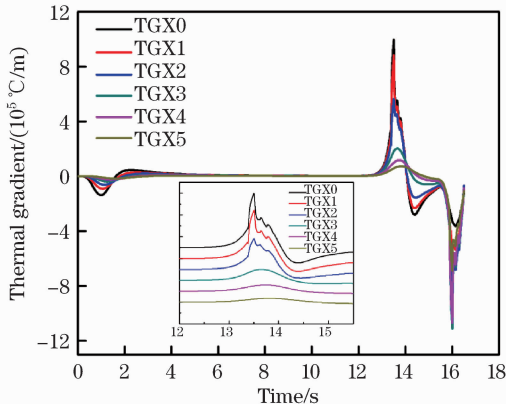


图 5 节点 X 方向温度梯度随时间的变化曲线

Fig. 5 X-component thermal gradient distribution of each point as a function of time

3.2 短边扫描与长边扫描的温度场分析

在其他工艺条件和实验参数相同的情况下,分别进行如图 6 所示的长边往复扫描和短边往复扫描模拟。为了研究短边扫描与长边扫描对温度场的影响情况,并结合上述的分析结果,通过截取短边扫描和长边扫描第三熔道上距熔覆始端 5 mm 处截面上的节点来分析比较相对应的温度场结果。

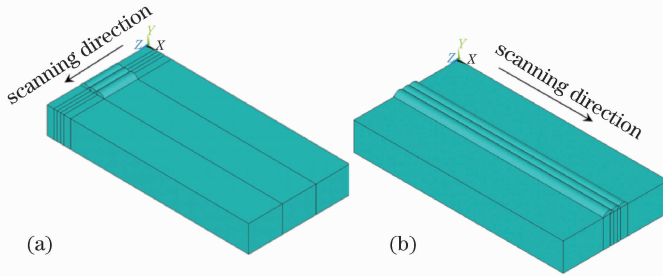


图 6 短边扫描与长边扫描的示意图。(a)短边往复扫描;(b)长边往复扫描

Fig. 6 Schematic representation with different scan paths. (a) Short reciprocating scanning path; (b) long reciprocating scanning path

在短边扫描和长边扫描对应的截面上选取节点 0,并对节点 0 在 X 方向的温度梯度进行对比,如图 7 (a)所示。从图 7 (a)中可以看出,两者相比长边扫描对应节点 X 方向温度梯度峰值明显大于短边扫描节点的对应值,短边扫描对应节点的 X 方向温度梯度峰值为 $5.54 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C/m}$,而长边扫描对应节点的 X 方向温度梯度峰值为 $7.43 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C/m}$ 。这是因为短边扫描路程短,激光熔覆前一道时的温度对后一熔道有明显的预热作用,进而影响了熔覆层上节点 X 方向的温度梯度,故而短边扫描比长边扫描更有利于降低节点 X 方向温度梯度。

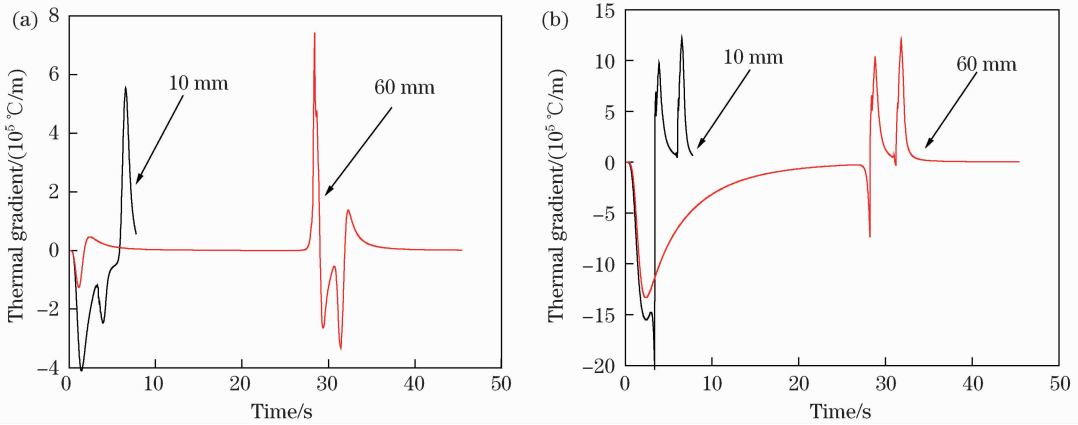


图 7 节点(a)X方向和(b)Y方向温度梯度随时间的变化

Fig. 7 (a) X-component and (b) Y-component thermal gradient distributions of the points taken from different scanning paths as a function of time

用上述同样的方法在短边扫描与长边扫描的截面上选取节点 2,分析其 Y 方向温度梯度的变化情况。图 7 (b)是短边扫描与长边扫描对应节点的 Y 方向温度梯度变化曲线,从图中可以看出,两曲线的变化趋势类似,均出现两个峰值,两曲线的峰值相差也很小,这是由于激光两次扫描过节点造成的,同时也说明短边扫描时前一道熔覆的温度对后一熔道的预热作用对节点 Y 方向温度梯度没有明显影响,故短边扫描与长边扫描对节点 Y 方向温度梯度影响相差很小。

激光熔覆过程中基体上熔池的深度和宽度对激光熔覆的进行有着重要的作用,基体的熔深和熔宽越大,越有利于激光熔覆连续和稳定地进行^[17]。图 8 为短边扫描与长边扫描过程中基体熔池宽度方向上路径节点的温度变化曲线图,图中 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 是 316L 不锈钢的熔点,温度大于 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 的节点位于熔池的内部,温度小于 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 的节点位于熔池的外部,温度高于 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 的节点对应的距离为熔池宽度。AB 两点对应的横轴间距为短边扫描时熔池的宽度 L_{AB} ,计算可得 $L_{AB} = 3.11 \text{ mm}$,激光熔覆的光斑直径为 $D_{\text{spot}} = 3 \text{ mm}$, $L_{AB} >$

D_{spot} , 因此短边熔覆过程中金属粉末全部熔化。 CD 两点对应的横轴间距为长边扫描时熔池的宽度 L_{CD} , 计算可得 $L_{CD} = 2.72 \text{ mm}$, $L_{CD} < D_{spot}$, 因此长边熔覆过程中金属粉末有部分未熔化。 $L_{AB} > L_{CD}$, 表明短边熔覆熔池的宽度比长边熔覆熔池的宽度大, 更有利于粉末的熔化和激光熔覆的进行。

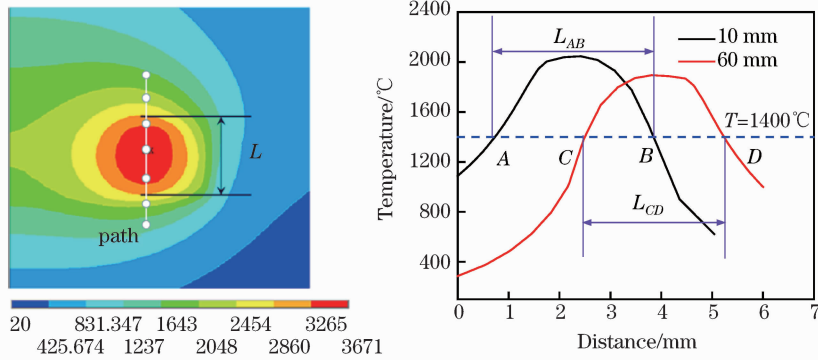


图 8 熔池宽度示意图及宽度方向上路径节点温度变化曲线

Fig. 8 Schematic representation and temperature cycles along a path defined on the surface of the substrate

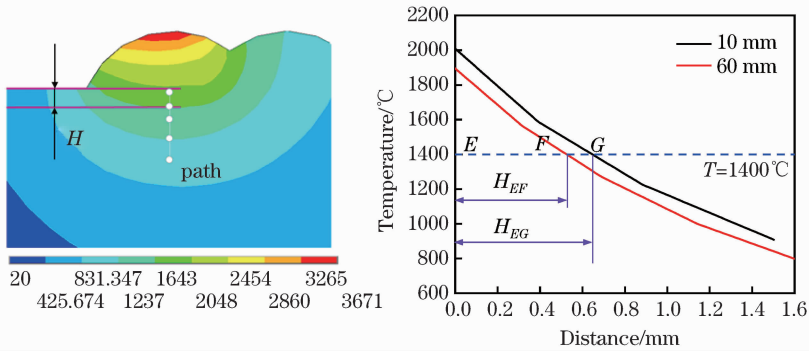


图 9 熔池深度示意图及深度方向上路径节点温度变化曲线

Fig. 9 Schematic representation and temperature cycles along a path defined across the surface of the substrate and the bottom substrate

熔池深度的大小也是激光熔覆过程中的重要影响因素, 短边扫描与长边扫描过程中基体熔池深度方向上路径节点的温度变化曲线如图 9 所示, 温度高于 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 的节点位于熔池内部, H_{EF} 和 H_{EG} 分别是长边扫描、短边扫描对应的基体上熔池的深度, 从图中可以明显看出, $H_{EG} > H_{EF}$, 即短边扫描对应的熔池深度大于长边扫描时熔池的深度。这是因为短边扫描熔覆长度比较短, 前一道熔覆时的热量流失相对较慢, 所以对后一熔覆道预热更为明显, 当后一熔道进行激光熔覆时基体熔化得更快更深。这也表明了短边扫描比长边扫描更有利于熔覆层与基体的结合和激光熔覆的持续进行。

4 结 论

1) 激光熔覆熔池前端和已熔侧重熔区的等温线比较密集, 热量比较集中, 是裂纹的敏感区。重熔区节点 2 在激光光斑到达时刻其 Y 方向温度梯度峰值最大, 节点 0 的 X 方向温度梯度峰值最大, 该处也是裂纹的敏感区。

2) 短边扫描与长边扫描的节点在 Y 方向温度梯度峰值相差很小, 而节点在 X 方向温度梯度峰值, 短边扫描对应值明显比长边扫描对应值小。因此, 短边扫描比长边扫描更有利于降低节点的温度梯度, 进而抑制裂纹的产生。

3) 多道激光熔覆过程中由于短边扫描熔覆长度比较短, 前一道熔覆时的热量流失相对较慢, 所以对后一熔覆道预热更为明显, 当后一熔道进行激光熔覆时基体熔化得更快更深。短边扫描时对应的基体熔池的宽度和深度均比长边扫描对应的值大, 因此短边扫描比长边扫描更有利于熔覆层与基体的结合和激光熔覆的持续进行。

参 考 文 献

- 1 Zheng Lijuan, Liu Huiying, Li Wei, *et al.*. Optimization of key parameters for laser cladding Ni60 alloy on 16Mn steel surface[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(3): 109-113.
郑丽娟, 刘会莹, 李 伟, 等. 16Mn 钢表面激光熔覆 Ni60 合金关键参数优化[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(3): 109-113.
- 2 Zhu Fuchun, Cao Xu. Finite element simulation of deep-drawing process for 304 austenitic stainless steel[J]. Stamping, 2010, (5): 78-81.
朱富春, 曹 旭. 304 奥氏体不锈钢拉深过程有限元模拟[J]. 锻压装备与制造技术, 2010, (5): 78-81.
- 3 Sun Yaoning, Liang Zefen, Zhang Xudong. Progress and key technology analysis of laser cladding wear resistance coating on stainless steel surface[J]. Material & Heat Treatment, 2009, (16): 113-116,124.
孙耀宁, 梁泽芬, 张旭东. 不锈钢表面激光熔覆耐磨涂层的进展及关键技术分析[J]. 热加工工艺, 2009, (16): 113-116, 124.
- 4 L Ding, Ch X Zhu, X M Li. Numerical simulation of laser cladding Co-based alloy on the surface of copper[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 31(8): 710-714.
- 5 Quan Xiumin, Ding Lin, Wei Xing. Analysis of temperature field of laser cladding Ni-based alloy[J]. Laser Technology, 2013, 37(4): 547-550.
权秀敏, 丁 林, 魏 兴. 激光熔覆 Ni 基金属温度场的数值分析[J]. 激光技术, 2013, 37(4): 547-550.
- 6 G Palumbo, S Pinto, L Tricarico. Numerical finite element investigation on laser cladding treatment of ring geometries[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155-156:1443-1450.
- 7 Hussam El Cheikh, Bruno Courant, Samuel Branchu. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process[J]. Optics and Laser in Engineering, 2012, 5(7): 413-422.
- 8 Li Qiang, Zhang Yongzhong, Li Jinfeng, *et al.*. Microstructure and corrosion performance of laser clad 316L stainless steel coating[J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 237-240,270.
李 强, 张永忠, 李劲风, 等. 激光熔覆 316L 不锈钢涂层的结构与腐蚀性能[J]. 激光技术, 2004, 28(3): 237-240, 270.
- 9 Zhang Yongzhong, Xi Mingzhe, Shi Likai. Multi-layer functional gradient materials of 316L stainless steel to stellite 31 alloy prepared by laser clad deposition[J]. Metal Heat Treatment, 2007, 32(9): 45-47.
张永忠, 席明哲, 石力开. 激光熔覆沉积制备多层 316L 不锈钢-Stellite31 合金梯度功能材料[J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 45-47.
- 10 Lei Yiwen, Sun Ronglu, Tang Ying, *et al.*. Numerical simulation of temperature distribution and TiC growth kinetics for high power laser clad TiC/NiCrBSiC composite coatings[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 9(8): 1141-1147.
- 11 Chen Lie, Gu Chengzhong, Xie Peilin. Numerical analysis of temperature field in laser cladding on tooth surface of helical gear shaft[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0303006.
陈 列, 古成中, 谢沛霖. 斜齿轮轴齿面激光熔覆过程中温度场的数值分析[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0303006.
- 12 Liu Zhenxia, Huang Weidong, Wan Baitao. Investigation of basic problems of numerical model for powder-feed laser cladding [J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(6): 567-570.
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.
- 13 B Brickstad, L B Josefson. A parametric study of residual stress in multi-pass butt-welded stainless steel pipes [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1998, 75(1): 11-25.
- 14 S J Kirkaldy, C R Sharma. A new phenomenology for steel it and CCT curves[J]. Scripta Metallurgica, 1982, 16(10): 1193-1198.
- 15 Siamak Serajzadeh. Modelling of temperature history and phase transformations during cooling of steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(6): 311-317.
- 16 Tamas Reti. Computer simulation of steel quenching process using a multi-phase transformation model[J]. Computer Materials Science, 2002, 22(8): 261-278.
- 17 Zhang Yaojun, Singare Sekou, Sun Jin. Simulation on temperature field and stress field of laser cladding on 45 carbon piece[J]. Material & Heat Treatment, 2012, (20): 138-140,144.
张耀君, 四 库, 孙 进. 45 钢送丝激光熔覆温度场及应力场模拟[J]. 热加工工艺, 2012, (20): 138-140, 144.
- 18 Zhao Hongyun, Zhang Hongtao, Xu Chunhua. Temperature and stress fields of multi-track laser cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, (2): 495-501.

栏目编辑: 殷建芳