

激光与光电子学进展

H13 钢表面激光熔覆 316L/H13+20%WC 复合涂层温度场数值模拟

邱焕霞¹, 俞文斌², 宋建丽^{1*}, 邓佳¹, 李云逸¹, 邓琦林³

¹北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192;

²中车永济电机有限公司西安分公司, 陕西 西安 710016;

³上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

摘要 H13 钢常充作热作模具材料, 在高温高压等工作环境中极易产生磨损、开裂等失效的问题, 激光熔覆是一种有效的再制造方法。然而, 由于激光熔覆骤冷骤热的特点, 使得成形过程温度梯度及冷却速率过大, 常导致热应力过大而引起涂层开裂。对 H13 钢表面激光熔覆 316L/H13+20%WC 复合涂层温度场进行数值模拟, 研究成形过程温度梯度、冷却速率随时间的变化规律, 以及基体预热对温度梯度和冷却速度的影响。同时, 在 H13 钢基体上进行了复合涂层激光熔覆成形试验, 以便对数值模拟结果进行验证。试验结果表明, 预热可明显降低温度梯度和顶层冷却速率, 对于试样表面裂纹产生具有一定的抑制作用。研究结果为 H13 钢表面激光熔覆改性及模具修复提供了参考依据。

关键词 激光技术; H13 钢; 激光熔覆; 复合涂层; 温度场; 数值模拟

中图分类号 TG178

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0314002

Numerical Simulation of Laser Cladding 316L/H13+20%WC Composite Coating on H13 Steel Surface

Qiu Huanxia¹, Yu Wenbin², Song Jianli^{1*}, Deng Jia¹, Li Yunyi¹, Deng Qilin³

¹Beijing Key Laboratory of Photoelectric Testing Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

²CRRC Yongji Electric Co., Ltd. Xi'an Branch, Xi'an, Shaanxi 710016, China;

³School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract H13 steel has often been used as a hot-work die material. However, it tends to undergo failure because of wear and crack generation under high-temperature and high-pressure working conditions. Laser cladding is an effective remanufacturing method for such materials. However, the temperature gradient and cooling rate of the formation process are very large owing to rapid cooling and heating characteristics, often inducing excess thermal stress and cracking of the coating. Herein, a numerical simulation of a laser cladding 316L/H13+20%WC composite coating on H13 steel surface was performed. The variation in the temperature gradient and cooling rate with time and the influence of substrate preheating on the temperature gradient and cooling rate were studied. Moreover, to verify the numerical simulation results, a laser cladding formation test of the composite coating was conducted on the H13 steel substrate. Experimental results show that substrate preheating can significantly reduce

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-04-11; 录用日期: 2021-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(51775050)

通信作者: *songjianli@bistu.edu.cn

the temperature gradient and cooling rate on the top surface of the coating and exerts a certain restraining effect on the cracks of the sample surface. The findings of this study provide a reference for the laser cladding modification and repair of H13 steel dies.

Key words laser technique; H13 steel; laser cladding; composite coating; temperature field; numerical simulation

1 引言

激光熔覆作为一种增材制造及再制造技术,具有能量集中、对基体热影响较小、材料应用范围广、可实现梯度功能及性能定制等特点,因而具有广泛的应用前景。H13钢是一种热作模具钢,在高温环境下工作易出现疲劳、磨损、断裂等失效情况,常通过激光熔覆的方法来进行表面改性及修复。然而,H13钢激光熔覆过程中熔覆层产生较大应力,易导致涂层开裂,严重制约了其在工程实际中的应用^[1]。在H13钢表面进行了316L/H13+20%WC激光熔覆复合涂层试验,以使底层具有较好的韧性及结合强度,表层具有较高的硬度及耐磨性。但试验中发现多层激光熔覆时易出现裂纹。熔覆过程中温度场,尤其是温度梯度及冷却速率对熔覆层组织和性能以及裂纹的影响至关重要。因此,研究H13钢表面激光熔覆温度场对于正确解析激光熔覆物理冶金过程,减少和消除熔覆层裂纹具有重要意义^[2]。

已经有很多学者研究了不同基体材料表面激光熔覆过程工艺参数对温度场的影响^[3-8]及熔覆过程温度场的变化规律^[9-15]。利用温度场数值模拟对成形过程进行预测,有助于减少激光熔覆的试验次数和降低成本,同时提高熔覆过程的效率^[16]。Paul等^[17]利用ABAQUS软件对H13钢表面激光

熔覆CPM9V合金进行了有限元数值模拟,得到的熔覆层高度、稀释区和热影响区与实验结果比较吻合,所建热力学模型能够用于预测实验结果,但仍有误差需要改进。Gao等^[18]建立了一个单道激光熔覆数值预测模型,对熔覆道宽度和高度的预测误差小于6.6%,对最高温度的预测误差约为3.1%。

尽管激光熔覆过程瞬态温度场的数值模拟研究已经取得很大进展^[19],但针对H13钢表面激光熔覆复合涂层温度场的研究及数值模拟还相对较少。因此,本文采用有限元数值模拟软件ANSYS对H13钢表面熔覆复合材料涂层的温度场进行模拟与分析,研究预热对温度场的影响,以便为H13钢表面激光熔覆改性及修复提供参考依据。

2 有限元模型的建立

2.1 基本假设

进行温度场数值模拟时作出以下假设以简化模型:1)材料为各向同性;2)忽略熔池流体的流动作用;3)忽略材料的气化^[20]。

2.2 材料热物性参数的设定

基体材料H13钢、熔覆层材料316L不锈钢粉末、表层材料H13+20%WC复合材料粉末热物性参数包含导热系数、比热容、密度分别如表1及图1所示。

表1 H13钢热物性参数

Table 1 Thermo-physical parameters of H13 steel

Temperature /°C	Thermal conductivity /($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	Specific heat /($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	Density /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
25	17.1	452	7977
100	17.9	475	7935
400	21.3	533	7771
600	23.6	565	7663
800	25.8	598	7556
1000	28.1	630	7450
1200	30.3	664	7341
1400	32.4	794	7202
1600	33.8	826	6854
1800	37.1	830	6689

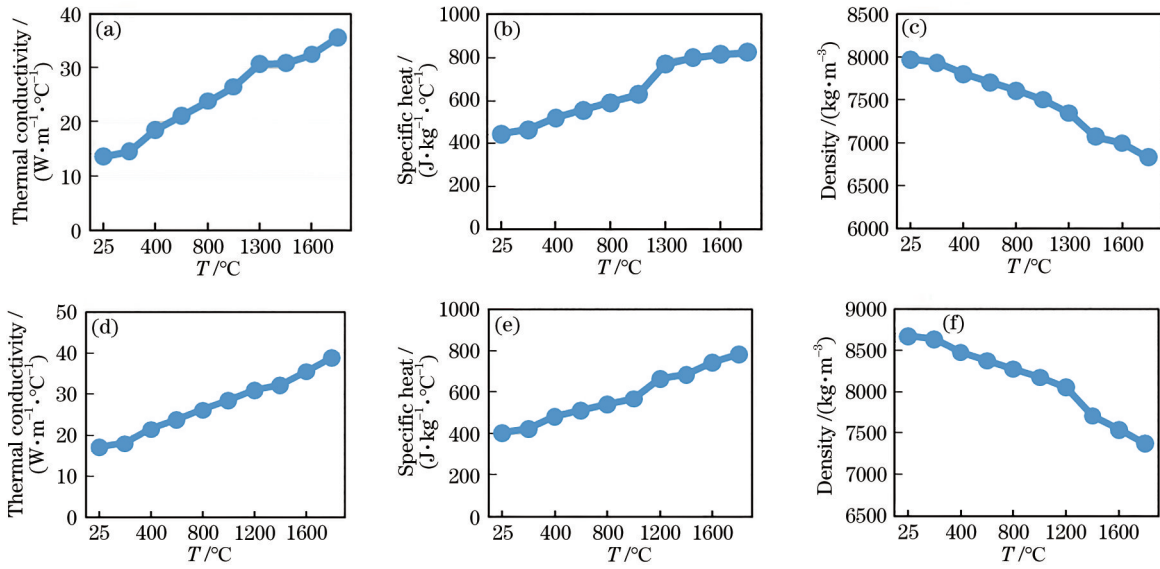


图 1 316L 及 H13+20%WC 粉末热物性参数。(a)~(c) 316L; (d)~(f) H13+20%WC

Fig. 1 Thermo-physical parameters of 316L and H13+20%WC. (a)~(c) 316L; (d)~(f) H13+20%WC

2.3 几何模型的建立

建立 5 道 2 层激光熔覆模型,基体的长×宽×高分别为 50 mm×25 mm×12 mm。光斑直径为 2 mm、熔覆层厚度为 1 mm,为提高计算速度并满足精度要求,采用对称结构中的一半进行建模与分析,靠近熔覆层处网格较致密,远离熔覆层处稍稍疏。有限元模型如图 2 所示。

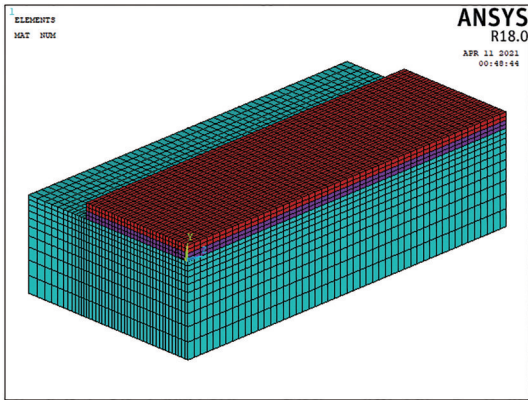


图 2 有限元模型及网格划分

Fig. 2 Finite element model and mesh division

2.4 热源及工艺参数的选取

采用体生热率三维热源,把单位时间、单位体积输入的热量折算成体生热率以体载荷的方式加载到模型单元上,通过 APDL 命令及“生死单元”技术,实现熔覆过程中激光热源的移动加载,将空间上连续的运动转化到离散的时间域中^[19]。在进行激光熔覆前,先使所有熔覆层单元“死亡”;在激光熔覆过程中,“死亡”的单元依次被激活,模拟同步送粉时粉末

随激光束移动而不断添加、熔覆的过程。

采用的工艺参数如下:激光功率为 1200 W,扫描速率为 200 mm/min,搭接率为 25%^[21]。基体初始温度为室温 25 °C,预热处理温度分别为 100 °C、200 °C、300 °C;扫描方式为纵向往复扫描。

3 温度场数值模拟分析

分别对室温及基体预热 100 °C、200 °C 和 300 °C 的工作状况进行激光熔覆温度场数值模拟,分析了预热对熔覆过程温度场的影响,获得了温度梯度及冷却速率随时间的变化规律,旨在为如何抑制和减少裂纹产生提供参考。

3.1 温度梯度随时间变化规律

在第二道第一熔覆层底部(节点 5447)、两层交界的第二熔覆层底部(节点 26299)和第二熔覆层顶部(节点 29665)分别选取一个节点,依次命名为节点 1、节点 2 和节点 3,观察熔覆过程各点温度梯度随时间的变化规律,节点选取示意图如图 3 所示。

在预热前,三个节点沿扫描方向(Z 方向)及垂直方向(Y 方向)的温度梯度分布如图 4(a)~(c)所示。“grad-Z”和“grad-Y”曲线表示节点沿扫描方向及垂直扫描方向的温度梯度。在激光扫描过后,节点 1 和 3 在两个方向的最大温度梯度随预热温度变化曲线如图 4(c)所示。

在不同预热温度预热后,三个节点沿扫描方向及垂直方向的温度梯度变化量分布如图 5(a)~(f)所示。图中“100 °C Z”和“100 °C Y”曲线为基体预

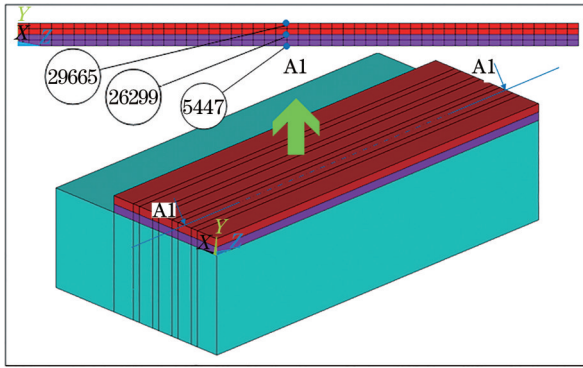


图 3 温度梯度计算节点选取示意图

Fig. 3 Diagram of nodes selection for temperature gradient calculation

热 100 °C 预热后上述两个方向的温度梯度变化,正值表示预热 100 °C 后温度梯度增大,负值表示预热 100 °C 后温度梯度减小。

激光熔覆中,熔覆层组织沿温度梯度最大的方向择优生长。由图 4(a)~(c)可以看出,复合涂层温度梯度达到 10^5 °C/m。由于基体的冷却作用,第一层熔覆层底部节点 1 在竖直方向的温度梯度远大于扫描方向,可以预测第一熔覆层底部与基体交界处的组织沿着竖直方向优先生长。在不同温度预热后,节点 1 在竖直方向和扫描方向的温度梯度变化量如图 5(a)、(b)所示,尤其在激光热源扫描过后有明显的减小,表明预热可有效降低温度梯度;在激光扫描时刻,节点 1 在两个方向上的预热后温度梯

度降幅最大,节点 1 在不同预热温度下的温度梯度降幅如图 5(d)可知,节点 1 所在第一熔覆层底部组织沿竖直方向生长趋势增大。

由图 4(b)、(c)可见,在竖直方向,第二熔覆层底部节点 2 的最大温度梯度大于顶部节点 3;而在扫描方向,由于空气的对流作用,顶部节点 3 的温度梯度大于底部;节点 2 在竖直方向的温度梯度大于扫描方向,节点 3 在扫描方向的温度梯度大于竖直方向。因此,可以预测第二熔覆层的底部组织沿着竖直方向优先生长,顶部组织沿着扫描方向优先生长。由图 5 可见,在不同温度预热后,当激光扫描过后,节点 3 在竖直方向上预热后温度梯度降幅最小,在不同预热温度下的温度梯度降幅如图 5 所示。

由图 4 可见,随着预热温度增加,熔覆层竖直方向和扫描方向的温度梯度逐渐减小。预热温度较低时,温度梯度降低不充分,不能有效防止梯度复合涂层的裂纹产生,提高预热温度会有效降低温度梯度,但预热温度过高会使基体和熔覆层组织性能变差。预热温度为 200 °C 可以使温度梯度有显著的降低,因此选择预热温度为 200 °C 较适宜。

通过对图 4 和图 5 各节点预热前后温度梯度及其变化情况进行比较可见,由于基体的预热和第一熔覆层对第二层的预热作用,节点 3 在竖直方向的温度梯度明显小于节点 1 和节点 2;在激光热源扫描过后,节点 3 的预热后温度梯度在扫描方向降幅大

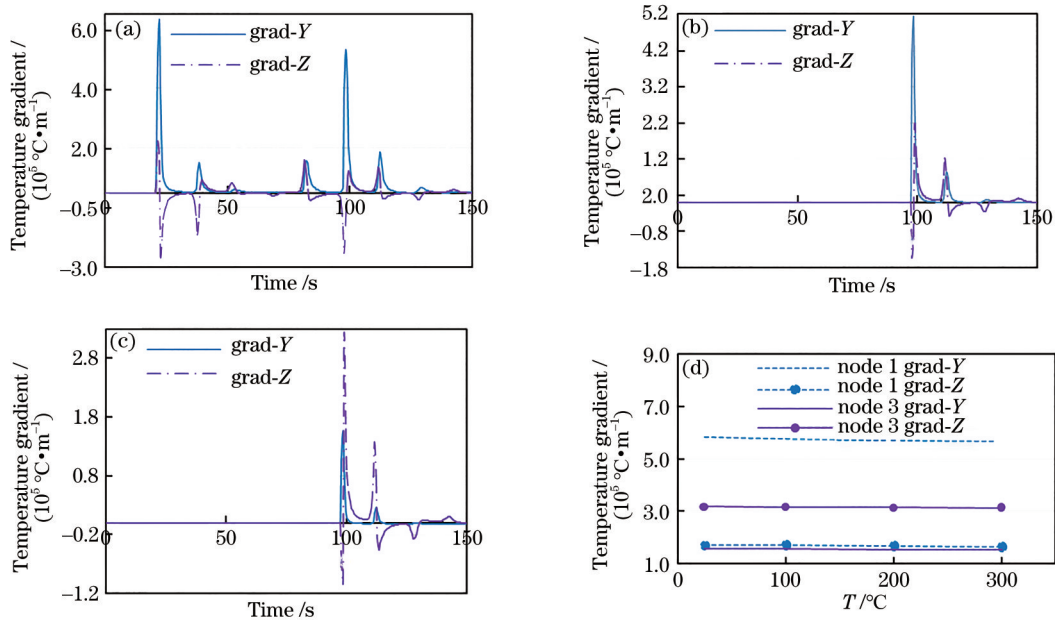


图 4 所选节点温度梯度随时间变化曲线。(a)节点 1;(b)节点 2;(c)节点 3;(d)节点 1 和 3 温度梯度最大值随预热温度变化曲线

Fig. 4 Temperature gradient of selected nodes change with time. (a) Node 1; (b) node 2; (c) node 3; (d) curves of maximum temperature gradient with preheating temperature for node 1 and node 3

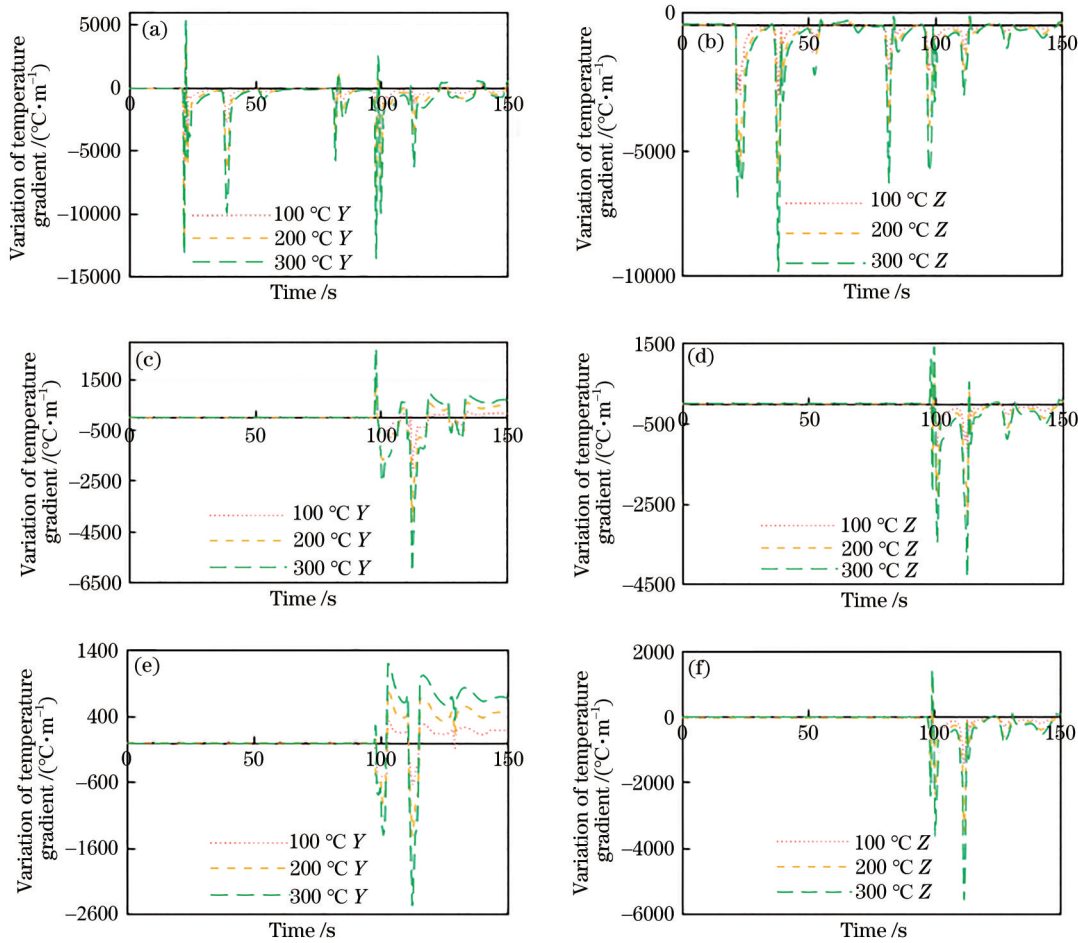


图 5 所选节点温度梯度变化量随时间变化曲线。(a)(b)节点 1; (c)(d)节点 2; (e)(f)节点 3

Fig. 5 Variation of temperature gradient of selected nodes change with time. (a) (b) Node 1; (c) (d) node 2; (e) (f) node 3

表 2 所选节点的温度梯度变化量最大值

Table 2 Maximum of variation of temperature gradient of selected nodes

Preheating temperature / $^{\circ}\text{C}$	Variation of temperature gradient / ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$)					
	Node 1		Node 2		Node 3	
	grad-Y	grad-Z	grad-Y	grad-Z	grad-Y	grad-Z
100	-6844	-2788	-1964.5	-1206.5	-617	-1399
200	-12451	-6299	-4024.0	-2726.7	-1562	-3433
300	-13525	-9808	-6008.2	-4195.5	-2451	-5495

于节点 2; 而节点 3 在竖直方向的温度梯度降幅小于节点 2。基体预热后, 熔覆层温度梯度总体减小, 预热对第一层的温度梯度降低效果更为明显, 预热温度选择 200°C 较为适宜。

3.2 冷却速率随时间的变化规律

在第一层第五道熔覆层顶部(节点 28050)和第二层第五道熔覆层顶部(节点 31416)的熔池边缘分别选取一个节点, 依次命名为节点 4 和节点 5, 节点选取示意图如图 6 所示。

基体预热前后 4、5 两个节点的温度时间历程曲

线如图 7 所示。图中“ 25°C ”曲线表示基体无预热时节点的温度, “ 100°C ”曲线表示基体预热 100°C 后节点的温度。

基体预热前的温度变化速率时间历程曲线如图 8 所示。基体预热后温度变化速率的变化量时间历程曲线如图 9 所示。图 9 中“ 100°C ”曲线的正值表示某时刻温度变化速率相对于预热前升高, 负值则表示该时刻温度变化速率相对于预热前有所降低。

从图 7 可以看出, 两个节点的温度随着预热温度升高而升高。图 8 中, 当温度变化速率小于 0 时, 即

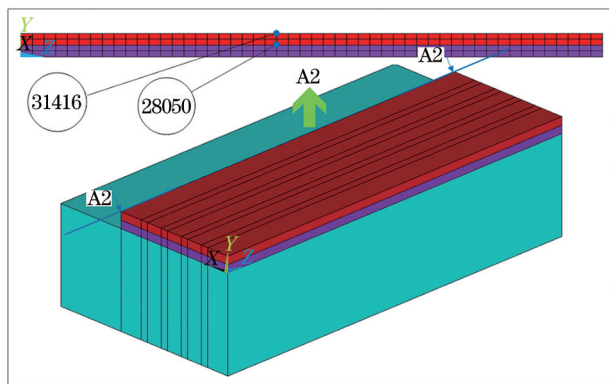


图 6 温度变化速率计算节点选取示意图

Fig. 6 Diagram of nodes selection for temperature variation rate calculation

为冷却速率,复合涂层冷却速率达到 10^3 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。在未对基体进行预热时,第一层第五道由于受到前四道的预热,节点 4 受到激光热源照射时温度升高较缓慢,第二层熔覆层对第一层有热影响,故节点 4 温度在激光热源离开后依然在不断增加;同时,由于第一层对第二层的预热作用,节点 5 的最高温度比节点 4 高出 527.98 $^{\circ}\text{C}$;由于第一层第五道位居熔覆层边缘,在激光热源离开节点 5 时,冷却速率最大,后续受到预热和循环加热,散热较慢;第二层第五道为熔覆层最后一道,激光离开节点 5 后散热较快,最大冷却速率比节点 4 增大了 100 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 左右。

图 9 中,两个节点的冷却速率随着预热温度升

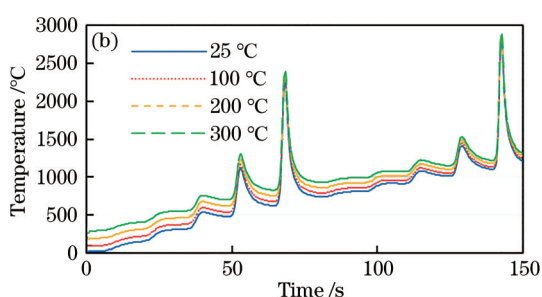
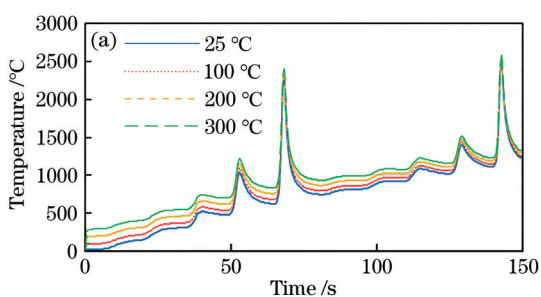


图 7 所选节点在不同预热温度下的温度随时间变化曲线。(a) 节点 4; (b) 节点 5

Fig. 7 Curves of temperature change with time at different preheating temperatures of selected nodes. (a) Node 4; (b) node 5

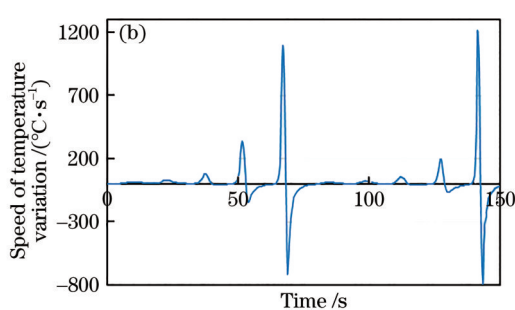
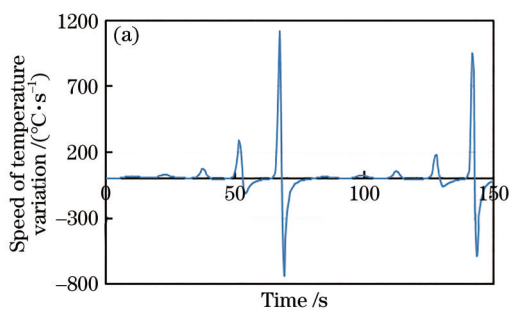


图 8 所选节点的熔池边缘温度变化速率随时间变化曲线。(a) 节点 4; (b) 节点 5

Fig. 8 Curves of temperature variation rate at cladding pool edge change with time of selected nodes. (a) Node 4; (b) node 5

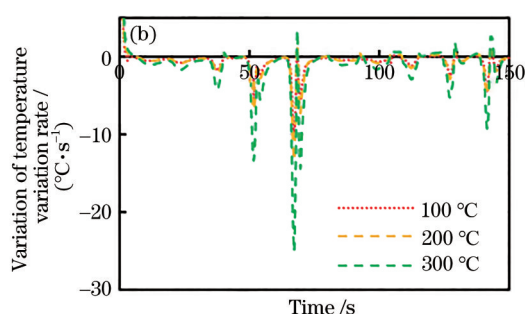
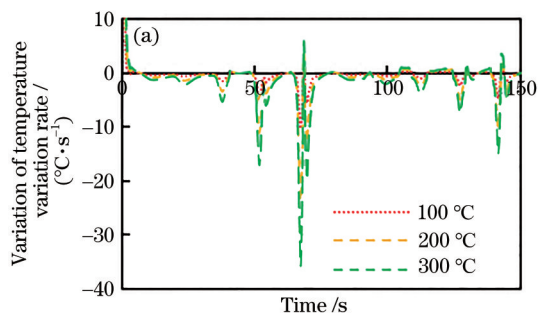


图 9 所选节点的熔池边缘温度变化速率的变化量随时间变化曲线。(a) 节点 4; (b) 节点 5

Fig. 9 Curves of variation of temperature variation rate at cladding pool edge change with time of selected nodes.

(a) Node 4; (b) node 5

高而减小。在对基体进行不同温度预热处理后, 100 °C 预热后, 两个节点的温度相对升高 25~73 °C, 200 °C 预热后, 两个节点的温度相对升高 56~171 °C, 300 °C 预热后, 两个节点的温度相对升高 88~268 °C [图 7(a)、(b)]; 100 °C 时, 冷却速率相对下降 0~10 °C/s, 200 °C 时, 整个熔覆层冷却速率相对下降 0~24 °C/s, 300 °C 时, 两个节点的冷却速率相较于未预热时降低幅度最大, 为 0~36 °C/s [图 9(a)、(b)]。激光熔覆时冷却速率越小越不容易产生裂纹, 冷却速率大有利于组织细小, 当熔池边缘的冷却速率过大, 容易产生较大的拉应力, 因此应当适当减小冷却速率, 可在一定程度上抑制顶层裂纹的萌生, 预热温度为 200 °C 较适宜。

4 H13 钢激光熔覆复合涂层试验

4.1 试验方法与设备

试验采用自行搭建的激光熔覆系统, 半导体激光器功率为 2 kW、重力送粉器送粉速率 3.5 g/min, 基体尺寸为 160 mm×100 mm×12 mm。复合涂层

材料成分如表 3 所示, 未预热的基体熔覆层材料从基体开始向上依次为 2 层 316L 不锈钢和 H13+20%WC 复合材料, 200 °C 预热的基体熔覆层材料为从基体开始向上依次为 4 层 316L 不锈钢和 H13+20%WC 复合材料, 其他工艺参数与数值模拟相同。采用 Mach3 Plasma 数控软件控制三维数控工作台往复移动及升降来完成激光熔覆成形过程。基体采用箱式电阻炉加热至 200 °C 初始温度, 熔覆结束后取下试件, 用石棉保温逐渐冷却至常温。试验完成后, 采用线切割将试样切成 10 mm×20 mm 的块状, 经打磨、镶嵌及抛光处理后, 在金相显微镜下进行组织形貌观察。

4.2 试验结果分析

图 10 为相同材料和工艺参数下, 基体未预热及预热 200 °C 时的熔覆层组织形貌。由图中可以看出, 不对基体预热时, 由于冷却速率及热应力很大, 熔覆层产生垂直于扫描方向的热裂纹。裂纹从 H13+20%WC 底部萌生, 沿拉应力最大且薄弱的晶界向 316L 结合界面延伸约 450 μm 后停止生长,

表 3 试验材料成分

Table 3 Composition of experiment materials

Cladding material	Mass fraction / %							
	C	Cr	Si	Mn	Mo	V	Fe	Ni
316L stainless steel powder	0.03	18	1.2	2	3	-	Bal.	12
H13 steel powder	0.32—0.45	4.75—5.5	0.80—1.2	0.20—0.5	1.10—1.75	0.80—1.2	Bal.	-

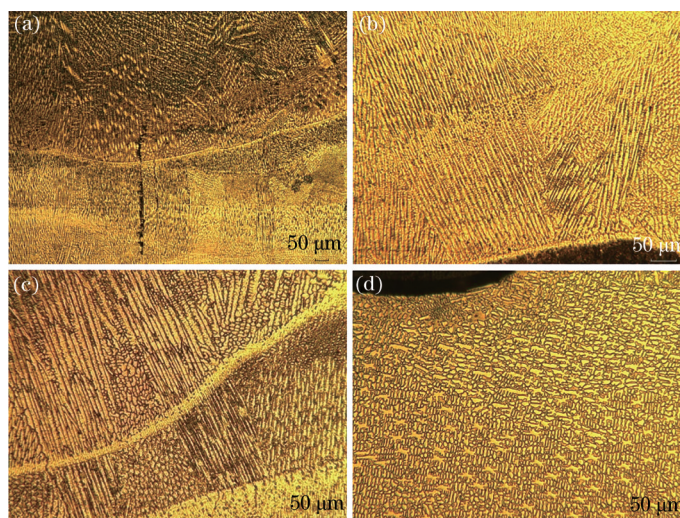


图 10 基体不同状态 316L/H13+20%WC 复合涂层激光熔覆成形组织。(a)未预热时熔覆层搭接处裂纹;(b)预热 200 °C 熔覆层底部 316L 组织;(c)预热 200 °C 熔覆层搭接处组织;(d)预热 200 °C 熔覆层顶部 H13+20%WC

Fig. 10 Microstructure of laser cladding forming 316L/H13+20%WC composite coatings under different conditions of substrate. (a) Crack at the cladding layer bonding under room temperature of substrate; (b) bottom microstructure of 316L cladding layer under 200 °C preheating of substrate; (c) microstructure of the cladding layer bonding under 200 °C preheating of substrate; (d) top microstructure of H13+20%WC cladding layer under 200 °C preheating of substrate

基本呈沿晶开裂方式,熔覆层组织非常细小,如图 10(a)所示。

基体预热 200 °C 时,基体与底层 316L 不锈钢的界面、316L 与 H13+20%WC 搭接处及顶部 H13+20%WC 组织分别如图 10(b)~(d)所示。可以看出,熔覆层底部界面由白亮的平面晶组成,呈良好的冶金结合;底部组织由于受基体预热的影响,枝晶稍为粗壮,沿着温度梯度最大的竖直方向优先呈外延生长,与数值模拟结果一致。熔覆层搭接处的组织沿竖直方向生长,如图 10(b)所示,由于多道搭接及顶层对底层的重熔及加热,搭接处组织为外延生长的细小树枝晶及胞晶组织,如图 10(c)所示。由数值模拟可知,顶层 H13+20%WC 复合涂层由于冷却速度较快,但预热后顶层扫描方向温度梯度和冷却速率相对减小,加之 WC 的形核作用,形成细小的等轴晶及胞晶组织,并可有效预防裂纹的产生;尽管受预热和温度积累的影响,相对基体未预热组织尺度略微增大,但仍然细小、致密,底部熔覆 4 层仍无明显缺陷。且由于顶部扫描方向的温度梯度稍大,组织沿着扫描方向的枝晶臂稍发达,这与温度场数值模拟结果一致,如图 10(d)所示。

5 结 论

在 H13 钢基体上进行了 316L/H13+20%WC 复合涂层熔覆温度场数值模拟,分析了基体预热处理状态对熔覆层温度梯度及冷却速率的影响。采用激光熔覆试验方法对数值模拟结果进行了验证,得到如下结论。

H13 钢激光熔覆 316L/H13+20%WC 复合涂层温度梯度达到 10^5 °C/m。熔覆层底部节点竖直方向的温度梯度远大于扫描方向。基体预热后,随着预热温度增加,熔覆层温度梯度有不同程度减小,第一熔覆层底部竖直方向温度梯度降幅最大,预热对第一层的温度梯度降低效果更为明显,有效抑制了由于底部温度梯度及冷却速率突变造成的开裂等缺陷产生。

激光熔覆复合涂层冷却速率达到 10^3 °C/s。熔覆时,相邻熔覆道之间会产生热影响,基体预热 200 °C 后,熔覆层节点温度相对升高约 56~171 °C,熔覆层顶部节点熔池边缘的冷却速率降低 0~24 °C/s 左右,可在一定程度上抑制顶层裂纹的萌生,预热温度为 200 °C 较适宜。

对 H13 钢基体不同预处理状态进行了激光熔覆试验,结果表明:基体预热 200 °C 后,底部熔覆层组织与基体及各熔覆层间呈良好的冶金结合,组织生长方向及形态与数值模拟结果一致,整个熔覆层组织细小致密,无明显缺陷。表明基体预热可降低复合涂层温度梯度和冷却速率,对抑制熔覆层裂纹萌生和发展具有一定的作用。

参 考 文 献

- [1] Hao N H, Lu W, Zuo T C. Thermal-mechanical coupling finite element analysis of temperature field in laser cladding process[J]. China Surface Engineering, 2004, 17(6): 10-14.
郝南海, 陆伟, 左铁钊. 激光熔覆过程热力耦合有限元温度场分析[J]. 中国表面工程, 2004, 17(6): 10-14.
- [2] Wang X, Yu Y G, Huang E Z, et al. Research status of laser cladding temperature field simulation [J]. Thermal Spray Technology, 2019, 11(4): 10-15.
王旭, 于月光, 黄恩泽, 等. 激光熔覆温度场模拟与表征的研究现状[J]. 热喷涂技术, 2019, 11(4): 10-15.
- [3] Xue C F, Dai Y, Wang D J, et al. Numerical analysis of temperature field in laser cladding shaping of metal powder[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2006, 20(3): 93-96.
薛春芳, 戴耀, 王丹杰, 等. 金属粉末激光熔覆成形温度场的数值分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2006, 20(3): 93-96.
- [4] Fu F X, Chang G R, Zhao X X, et al. Influence of laser spot diameter on cladding layer cracking[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031401.
付福兴, 畅庚榕, 赵小侠, 等. 激光光斑直径对熔覆层裂纹的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031401.
- [5] Ren Z H, Wu M P, Tang Y H, et al. Numerical simulation and experimental research of laser cladding based on thermo-mechanical coupling[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051404.
任仲贺, 武美萍, 唐又红, 等. 基于热力耦合的激光熔覆数值模拟与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051404.
- [6] Wang Y C, Sun W L, Huang Y, et al. Research of decision method of laser cladding sequence selection based on temperature field evaluation[J]. Laser Technology, 2018, 42(5): 605-610.
王亚晨, 孙文磊, 黄勇, 等. 基于温度场评估的激光熔覆顺序决策方法研究[J]. 激光技术, 2018, 42(5): 605-610.

- [7] Zhang L, Chen X M, Liu W, et al. Formation mechanism and sensitivity of cracks in laser-cladded Ni-based-alloy coatings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 111401.
张磊, 陈小明, 刘伟, 等. 激光熔覆 Ni 基合金裂纹的形成机理及敏感性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 111401.
- [8] Lai P, Zhang Q M. The numerical simulation of temperature field in laser cladding[J]. Applied Laser, 2009, 29(3): 189-193.
赖鹏, 张庆茂. 激光熔覆过程温度场的数值模拟[J]. 应用激光, 2009, 29(3): 189-193.
- [9] Zheng L J, Li Y, He D C, et al. Analysis on temperature field of multi-path laser cladded and microstructure of coatings layer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S1): 52-57.
郑丽娟, 李燕, 何大川, 等. 激光多道熔覆温度场及熔覆层组织分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 52-57.
- [10] Sun J G. Temperature field of multi-pass laser cladding with synchronous powder feeding and influence of substrate preheating temperature[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(10): 194-196.
孙建功. 同步送粉激光多道熔覆温度场及基体预热温度影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(10): 194-196.
- [11] Cheng G P, Li M X, He Y Z, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field in laser clad coating[J]. Heat Treatment, 2009, 24(4): 49-54.
程广萍, 李明喜, 何宜柱, 等. 激光熔覆层温度场和应力场的数值模拟[J]. 热处理, 2009, 24(4): 49-54.
- [12] Zhao H H, Li H C, Zhang G J, et al. Numerical simulation of temperature field and stress distributions in multi-pass single-layer weld-based rapid prototyping [J]. Reviews On Advanced Materials Science, 2013, 33(5): 402-409.
- [13] Wang L Q, Duan M Y. Study on temperature field computer simulation during local PWHT process for D406A steel based on ANSYS[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(21): 227-229, 232.
王力群, 段谟意. 基于 ANSYS 的 D406A 钢局部焊后热处理温度场计算机仿真研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(21): 227-229, 232.
- [14] Qi J H. Computer simulation research on temperature field of steel tube heat treatment based on ANSYS [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(4): 231-233, 237.
齐建华. 基于 ANSYS 的钢管热处理温度场计算机模拟研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(4): 231-233, 237.
- [15] Guo W, Zhang Y P, Chai R X. Numerical simulation and experimental study of single-track laser cladding of 304 stainless steels[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 091401.
郭卫, 张亚普, 柴蓉霞. 单道次激光熔覆 304 不锈钢数值模拟与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 091401.
- [16] Huang Y L, Wen B X, Huang M. Characteristics of the temperature field and formation of the microstructure for laser cladding processing[J]. Applied Laser, 2017, 37(5): 629-633.
黄延禄, 温宝贤, 黄铭. 激光熔覆加工温度场特征与凝固组织形成[J]. 应用激光, 2017, 37(5): 629-633.
- [17] Paul S, Singh R, Yan W Y. Finite element simulation of laser cladding for tool steel repair[M]// Joshi S N, Dixit U S. Lasers based manufacturing. New Delhi: Springer India, 2015: 139-156.
- [18] Gao J L, Wu C Z, Hao Y B, et al. Numerical simulation and experimental investigation on three-dimensional modelling of single-track geometry and temperature evolution by laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106287.
- [19] Dang Y X, Qi W J, Lu L L. Research status and development trend of numerical simulation of laser cladding technology[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(6): 23-27.
党元晓, 祁文军, 芦丽丽. 激光熔覆技术数值模拟研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 23-27.
- [20] Gu J Q. Numerical simulation of residual stress in laser cladding[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010.
顾建强. 激光熔覆残余应力场的数值模拟[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- [21] Li H Y, Song J L, Tang B, et al. Numerical simulation of the laser cladding temperature field of Stellite6 alloy on the surface of H13 steel[J]. Applied Laser, 2020, 40(4): 571-578.
李海洋, 宋建丽, 唐彬, 等. H13 钢表面激光熔覆 Stellite6 合金的温度场数值模拟[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 571-578.