

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.008

# 基于 MIG 的电弧增材制造不同层间停留时间 温度场仿真模拟

张天雷<sup>1</sup>, 徐刚<sup>1</sup>, 沈艳涛<sup>2</sup>, 明灿<sup>1</sup>, 何林基<sup>1</sup>, 马春伟<sup>1</sup>

(1. 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620; 2. 北京海基科技发展有限公司, 北京 100192)

**摘要:**为了探究电弧增材制造过程温度场特征及层间停留时间对温度场的影响,课题组基于 ABAQUS 建立了三维瞬态的电弧增材制造仿真模型,进行了电弧增材制造过程温度场模拟;采用红外测温仪测得增材制造过程热循环曲线,将模拟结果与实测结果进行对比研究。结果表明:模拟结果和测试结果吻合良好,验证了模型的准确性;在电弧增材制造过程中随着熔覆层数的增加工件高温区域逐渐增大;保持其他参数不变增加层间停留时间可使高温区域减小;基于 MIG 的电弧增材制造层间可达到良好的冶金结合。

**关键词:**电弧增材制造;熔化极惰性气体保护焊;热循环特性;温度场;层间停留时间

中图分类号: TG444; TH16 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2020)03-0037-06

## Numerical Simulation of Thermal Behavior of Different Interlayer Idle Time for MIG-Based Additive Manufacturing

ZHANG Tianlei<sup>1</sup>, XU Gang<sup>1</sup>, SHEN Yantao<sup>2</sup>, MING Can<sup>1</sup>, HE Linji<sup>1</sup>, MA Chunwei<sup>1</sup>

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Beijing Hi-Key Tech Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** A three-dimensional finite element model of MIG-based additive manufacturing were established to reach the temperature filed character and the influence of the idle time using ABAQUS software. Meanwhile, infrared thermometer was used to measure the thermal cycle curve of relevant point on the work piece. The confirmatory test shows that the calculated results match the experimental measurements well, which verifies the accuracy of the simulation. The results indicate that the high temperature zone increase as the depositing height increases with other parameter being constant, the high temperature zone reduce as the interlayer idle time increases. In MIG-based additive manufacturing there is good metallurgy bonding at interlayer.

**Keywords:** WAAM (wire and arc additive manufacturing); MIG (metal inert-gas welding); thermal cycling characteristics; temperature field; interlayer idle time

增材制造技术(additive manufacturing, AM)又称“3D打印技术”,是借助三维CAD数字建模切片处理逐层加工的现代制造技术。由于其较短的生产周期和较高的材料利用率以及个性化的制造能力,已经被广泛应用于航空航天、汽车和医疗等领域<sup>[1]</sup>。对于金属材料增材制造,根据所使用的热源不同可分为:激光

增材制造、电子束增材制造和电弧增材制造等。材料的形态一般为金属粉和金属丝。根据粉末材料的供给形式不同又可分为铺粉和送粉2种形式,而丝材是以送丝的方式供给<sup>[2]</sup>。

电弧增材制造技术(wire and arc additive manufacturing, WAAM)是以熔化极惰性气体保护焊

收稿日期:2019-10-23;修回日期:2020-01-15

基金项目:上海工程技术大学研究生科研创新项目(18KY0514)。

第一作者简介:张天雷(1993),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为金属增材制造。通信作者:马春伟(1970),男,河南西华人,博士,讲师,主要从事材料加工和结构完整性研究。E-mail:macwjx@sues.edu.cn

(metal inert-gas welding, MIG)、非熔化极惰性气体保护焊(tungsten inert gas welding, TIG)、以及等离子体焊(plasma arc welding, PA)等焊接方法,根据三维数字模型以点-线-面-体逐渐形成金属零件的制造工艺<sup>[3-5]</sup>。电弧增材制造技术具有打印零件尺寸大、熔覆效率高、材料利用率高及成本低等优点<sup>[6-7]</sup>。电弧增材制造技术因其特殊的优势,逐渐成为国内外科研院校研究的重点方向<sup>[8]</sup>。相对于传统焊接过程,电弧增材制造过程中的热循环较为特殊,在制造过程中有着多次的预热处理和后热处理过程,因而零件组织容易出现晶粒粗大、热裂纹、晶间腐蚀和变形等问题<sup>[9]</sup>,因此在增材制造过程中控制高温停留时间,减少温度场的分布不均匀和降低残余应力是得到良好构件的关键因素。

课题组采用 ABAQUS 有限元分析软件,通过二次开发及生死单元技术建立了基于 MIG 的电弧增材制造有限元模型,模拟 10 层增材制造薄壁样的温度场及 30 和 60 s 层间停留时间的对比。

### 1 试验设备及材料

电弧增材制造试验采用 Cloos 公司生产的型号为 CLOOS ROMAT ® 350 六轴机器人及搭配型号为 GLC353 QUINTO CP 的 MIG 焊机,保护气体为 Ar。

试验基板尺寸为 150.0 mm × 100.0 mm × 7.5 mm,材料为 SUS304 不锈钢,其化学成分如表 1 所示;熔覆材料为 ER308 焊丝,焊丝的化学成分如表 2 所示。

表 1 SUS304 不锈钢化学成分

Table 1 Chemical composition of SUS 304 stainless steel %

C	Mn	Si	Mo	Co
0.050	1.140	0.410	0.360	0.210
Cr	Ni	Cu	Fe	其余
18.400	8.190	0.180	70.780	0.305

表 2 ER308 焊丝化学成分

Table 2 Chemical composition of ER308 welding wire %

C	Mn	Si	Mo	Cr
0.030	1.790	0.480	0.005	19.720
Ni	Cu	S	P	Fe
9.400	0.060	0.013	0.022	68.480

增材制造过程采用 Optris 红外测温仪实时测量基板下表面温度,其测量范围为 -50 ~ 975 ℃。

## 2 基于 MIG 的电弧增材制造有限元模型的建立

### 2.1 材料库的建立

本试验选用的基板材料 SUS304 和熔覆材料 ER308 的热物理性能如表 3 和表 4 所示<sup>[10]</sup>。

表 3 SUS 304 热物理属性

Table 3 Thermal physical parameters of SUS 304

温度/ ℃	比热容/ (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	热导率/ (W · m <sup>-1</sup> · ℃ <sup>-1</sup> )	弹性模 量/GPa	热膨胀系 数 × 10 <sup>-6</sup> /℃	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )
25	450	16.09	204.04	16.09	7 800
400	590	21.02	177.23	21.02	7 660
800	640	26.40	139.49	26.40	7 500
1 000	660	28.93	118.49	28.93	7 410
1 200	710	31.51	95.93	31.51	7 310
1 400	3 160	32.94	16.07	32.94	7 170
1 450	7 390	30.71	0.00	30.71	7 010
1 500	810	31.43	0.00	31.43	8 100

表 4 ER308 不锈钢热物理性能

Table 4 Thermal physical parameters of ER308

温度/ ℃	比热容/ (J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	热导率/ (W · m <sup>-1</sup> · ℃ <sup>-1</sup> )	弹性模 量/GPa	热膨胀系 数 × 10 <sup>-6</sup> /℃	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )
25	462	14.6	208	13.61	7 770
400	496	15.1	180	14.26	7 640
800	512	16.1	138	16.35	7 480
1 000	525	17.9	113	17.07	7 400
1 200	540	18.0	90	17.77	7 310
1 400	577	20.8	44	19.64	7 190
1 450	604	23.9	10	25.30	7 010
1 500	676	32.2	10	25.78	6 690

### 2.2 基于 MIG 的增材制造三维模型建立

根据实际增材制造情况建立的有限元模型如图 1 所示。其中基板尺寸为 150.0 mm × 100.0 mm × 7.5 mm,增材部分尺寸为 100.0 mm × 12.0 mm × 30.0 mm,每层 3 mm 共 10 层。

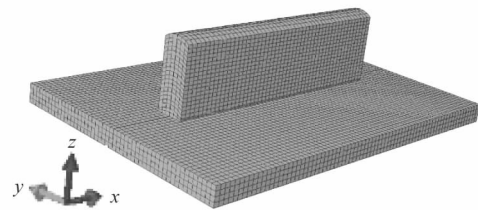


图 1 几何模型和网格划分

Figure 1 Geometric model and mesh generation

### 2.3 增材制造数值模拟边界条件

#### 2.3.1 热源模型

对于电弧增材制造,焊接热源的热流密度不仅作用在焊接面上,同时在深度方向上也有作用,因此选用

双椭球体热源进行描述。因 ABAQUS 没有自带的焊接热源模型,需要通过 Fortran 语言编写子程序并进行运算,热源形态如图 2 所示。

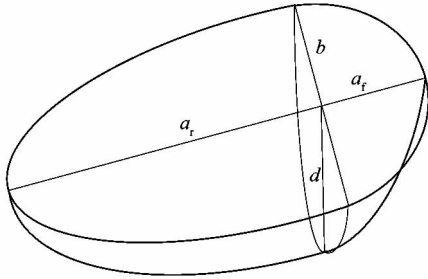


图 2 双椭球热源

Figure 2 Double ellipsoid heat source model

实际增材过程中热源移动方向上的前半椭球比较陡,后半椭球比较平坦<sup>[11]</sup>。

双椭球体热源前半部分热流密度函数为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}r_f Q}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \cdot \exp \left[ -3 \left( \frac{x-v}{a_f} \right)^2 - 3 \left( \frac{y}{b} \right)^2 - 3 \left( \frac{z}{d} \right)^2 \right] \quad (1)$$

双椭球体热源后半部分热流密度函数为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}r_b Q}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \cdot \exp \left[ -3 \left( \frac{x-v}{a_r} \right)^2 - 3 \left( \frac{y}{b} \right)^2 - 3 \left( \frac{z}{d} \right)^2 \right] \quad (2)$$

其中,  $Q = U \cdot I \cdot \eta$ 。 (3)

式中: $a_f$ 为前半球长半轴; $a_r$ 为后半球长半轴; $q$ 为热流密度; $b$ 为前后半球短半轴; $d$ 为熔池深度; $Q$ 为热输入功率; $U$ 为焊接电压; $I$ 为焊接电流; $\eta$ 为焊接热效率; $v$ 为热源移动速度; $t$ 为时间; $r_f$ 和  $r_b$ 分别为热源模型前后部分能量分布系数,并且  $r_f + r_b = 2$ 。

双椭球体热源参数如表 5 所示。

表 5 双椭球热源形状参数

Table 5 Parameters of double heat source model

$a_f$ /mm	$a_r$ /mm	$b$ /mm	$d$ /mm	$r_f$	$r_b$
6	12	6	6	0.6	1.4

### 2.3.2 边界散热条件

模拟过程中假设能量损失为工件与空气的对流换热损失和工件辐射散热损失,则作用在模型表面的能量边界条件为:<sup>[12]</sup>

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = -q_{\text{conv}} - q_{\text{radi}} \quad (4)$$

式中: $k$ 为导入系数; $T$ 为模型边界温度; $z$ 为导热方向

距离; $q_{\text{conv}}$ 为对流换热; $q_{\text{radi}}$ 为辐射散热。

$$\text{其中: } q_{\text{conv}} = h_c (T - T_0); \quad (5)$$

$$q_{\text{radi}} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) \quad (6)$$

式中: $h_c$ 为对流换热系数; $T_0$ 为环境温度; $\sigma$ 为 Stefan-Boltzmann 常数; $\varepsilon$ 为表面辐射率。

### 2.4 增材制造工艺参数

课题组所使用的仿真模型是以实际增材制造过程为基础建立的,其工艺参数如表 6 所示。

表 6 电弧增材制造有限元模拟模型参数及工艺参数  
Table 6 Finite element simulation model parameters and process parameters of arc additive manufacturing process

层间停留时间/s	热源移动速度/(mm · min <sup>-1</sup> )	层高/mm	层宽/mm	层数
30	200	3	12	10
60	200	3	12	10

长度/mm	电流/A	电压/V	热效率/%
100	180	20	60
100	180	20	60

### 2.5 温度场热循环曲线验证

为了验证模拟温度场结果的准确性,在试验过程中采用红外线测温仪对基板下方一点进行实时测温,测量点位置 A 如图 3 所示。增材路径如图 4 所示,为同向 10 层累加,层间停留时间分别为 30 和 60 s。

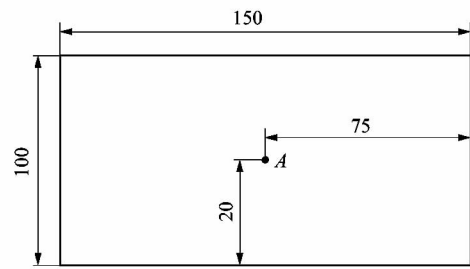


图 3 基板上测温点示意图

Figure 3 Schematic diagram of temperature measurement point on substrate

A 点层间停留时间为 30 和 60 s 时的温度实测结果与模拟结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出 A 点的温度模拟结果和实测结果变化趋势基本吻合,在降温过程中模拟结果略高于实测结果。由于模拟过程中没有考虑熔滴过渡和熔池的流动以及蒸发等热量散失,而且测量点也无法做到完全精确,因此模拟和测量结果有误差,但误差在可接受的范围内,课题组认为此模型可以反映电弧增材制造过程中温度场的变化。

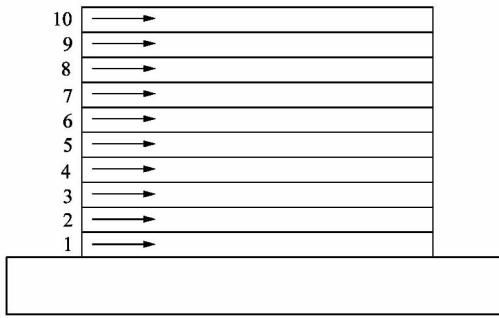
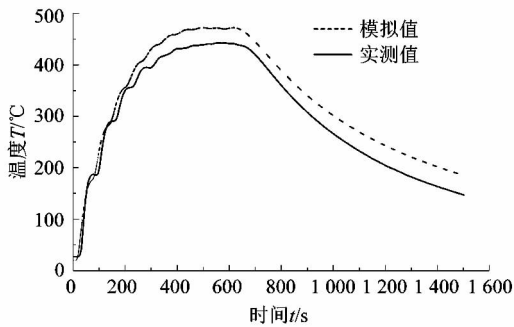
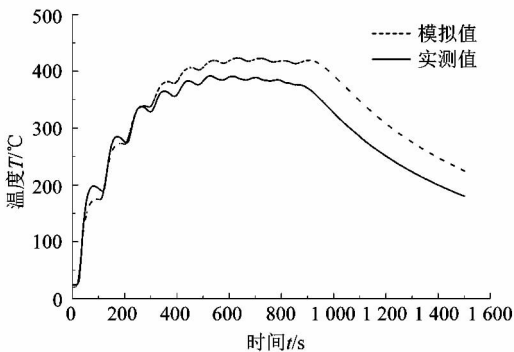


图4 路径示意图

Figure 4 Schematic of path



(a) 层间停留30 s



(b) 层间停留60 s

图5 温度测量曲线和模拟曲线对比

Figure 5 Measurement thermal circle and simulation thermal circle comparison

### 3 MIG 增材制造温度场模拟结果

#### 3.1 增材制造过程中温度场演变

随着热源的移动,在增材路径上的单元被激活,图6和图7是层间停留时间分别为30和60s的第1层、第5层和第10层的 midpoint 温度场。

从图6~7可知,相同层间停留时间的不同层数的温度场,随着层数的增加熔池后方高温区域不断增大。工件的温度因热输入、热传导、对流换热和热辐射散失相互作用而导致动态变化。增材过程中热源输入的能量大于散失的能量,是一个热积累过程。由于多层制造过程中前一层对后一层有预热作用,导致后一层增

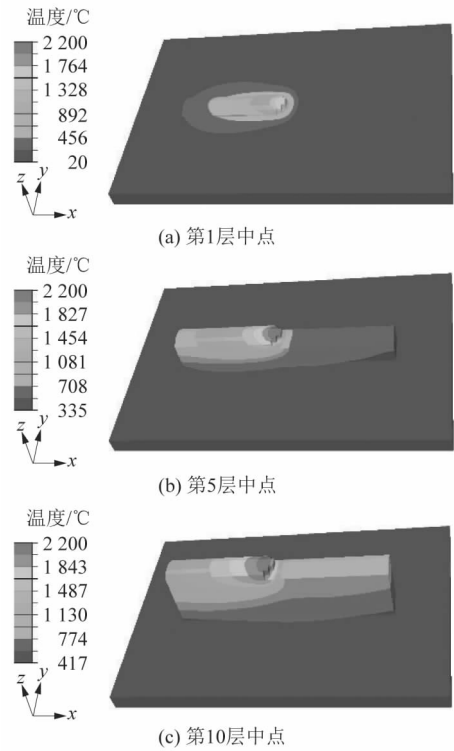


图6 层间停留时间30 s 温度场

Figure 6 Temperature field of interlayer idletime 30 s

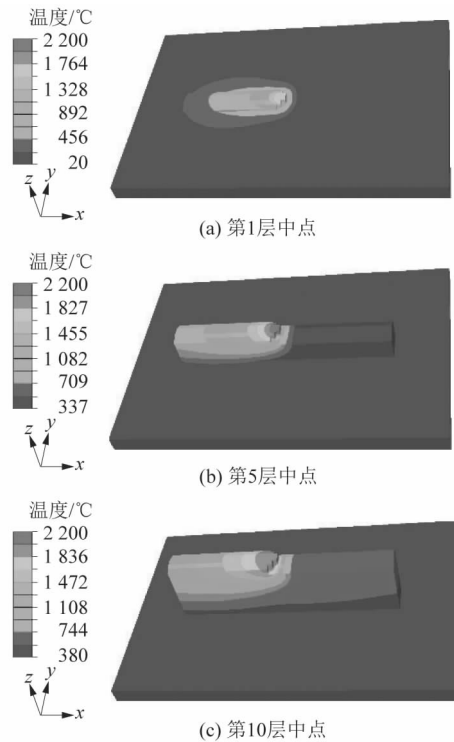


图7 层间停留时间60 s 温度场

Figure 7 Temperature field of interlayer idletime 60 s

材过程中温度梯度减小,即热传导效率减小,热积累逐渐增多,使随着层数的增加高温区域变大。

对比不同层间停留时间的相同层数的温度场,第1层由于没有预热处理效应温度场分布相同;第5层和第10层,层间停留时间 60 s 的高温区域小于层间停留时间 30 s 的高温区域,因为层间停留时间越久通过热传导和热对流以及热辐射散失的能量越多,前一层对后一层的预热效果减小,温度梯度提高热传导效率增大,使得高温区域减小。

### 3.2 增材制造过程中热循环

通过模拟 10 层增材制造过程,可以得到各个点的热循环曲线。选取每层中点的热循环曲线来说明增材制造过程中热循环的特征,详见图 8 和图 9。

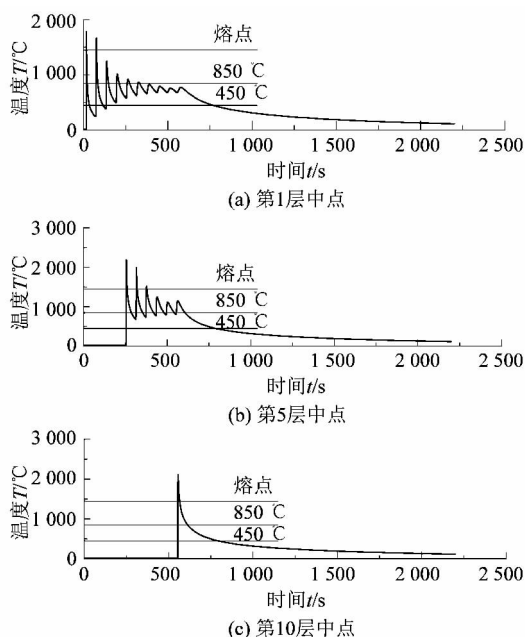


图 8 层间停留时间 30 s 热循环曲线

Figure 8 Thermal circle of interlayer idletime 30 s

10 层的增材制造过程中有 10 次的热处理过程。从图 8 可知,在相同层间停留时间内,随着层数的增加最高温度升高,该现象说明电弧增材制造过程是一个热积累的过程。在电弧增材制造过程中前一层对后一层有预热处理作用,后一层对前一层有后热处理作用。在图 8(a) 的温度曲线中,第 1 个曲线峰值大于熔点温度表示第 1 层材料被融化;第 2 个峰值也超过了熔点,说明第 2 层增材过程中将第 1 层融化;第 3 个峰值没有超过熔点表示增材第 3 层时第 1 层中点处不会融化;剩余峰值表示随着熔覆层的增高,第 1 层中点的温度极值逐渐降低,没有被重熔,只是经过了多次热处理过程。图 8(b) 的温度曲线中,第 5 层中第 3 个峰值

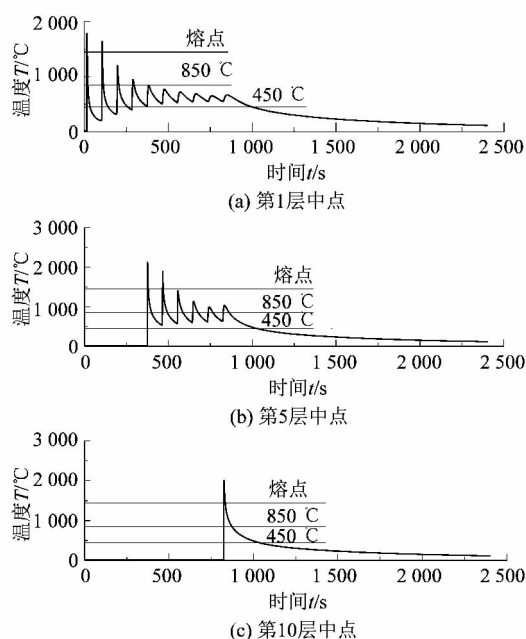


图 9 层间停留时间 60 s 热循环曲线

Figure 9 Thermal circle of interlayer idletime 60 s

依然超过熔点温度,第 5 层被融化了 3 次,说明随着层数的增加热积累效应越明显。图 8(c) 的温度曲线中,由于没有后热处理,第 10 层只融化了 1 次。由图 8 可知除最后一层外其余层至少被融化了 2 次,层与层之间可以达到很好的冶金结合。

奥氏体不锈钢敏化温度区间为 450 ~ 850 °C,在此温度区间内奥氏体不锈钢容易生成  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Fe}_{23}\text{C}_6$ ,将导致晶间腐蚀的发生,因此在制造过程中应避免工件在此温度区间停留。对比图 8(a) 和图 9(a) 温度曲线,发现当层间停留时间在 30 s 时有 2 次温度最低点降到了敏化温度区间以下;而层间停留时间为 60 s 时有 3 次温度最低点降到了敏化温度区间以下。对比图 8(b) 和图 9(b),可以发现时间间隔 60 s 的层间停留温度范围低于层间停留时间为 30 s 的温度范围;对比图 8(c) 和图 9(c),发现层间停留 60 s 的最后一层温度降到敏化温度以下时间为 204 s,而层间停留 30 s 的最后一层温度降到敏化温度以下时间为 229 s,显然图 9(c) 的情况好于图 8(c)。因此在基于 MIG 的奥氏体不锈钢电弧增材制造过程中应适当增大层间停留时间,使温度降到敏化温度区间以下来减少晶间腐蚀。

## 4 结论

1) 课题组根据 ABAQUS 平台建立了基于 MIG 的电弧增材制造三维有限元模型,利用 Fortran 语言编制了适合电弧增材制造的三维双椭球热源模型,解决了电弧增材制造多层的数值模拟问题。

2) 模拟和测量的热循环曲线吻合良好。在增材制造过程中存在前一层对后一层有预热处理的作用,后一层对前一层有后热处理的作用,随着层数的增加工件高温区域不断增大,但增加层间停留时间可减小高温区域。

3) 基于 MIG 的电弧增材制造过程中除最后一层外每一层至少被融化 2 次,层与层之间可以达到良好的冶金结合。

4) 奥氏体不锈钢在电弧增材制造过程中,增加层间停留时间可减小材料处于敏化温度区间的时间,以此减少晶间腐蚀的影响。

**参考文献:**

[1] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: a review[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23 (6): 1917 - 1928.

[2] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143:172 - 96.

[3] DING Donghong, PAN Zengxi, CUIURI D, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests[J]. International Journal of Advanced Manufacturing

Technology, 2015, 81(1/2/3/4): 465 - 481.

[4] WANG F, WILLIAMS S, RUSH M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(5/6/7/8): 597 - 603.

[5] 王华明. 高性能金属构件增材制造技术开启国防制造新篇章[J]. 国防制造技术, 2013(3): 5 - 7.

[6] MARTINA F, MEHNEN J, WILLIAMS S W, et al. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (6): 1377 - 1386.

[7] 李明祥, 张涛, 于飞, 等. 金属电弧熔丝增材制造及其复合制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(17): 14 - 21.

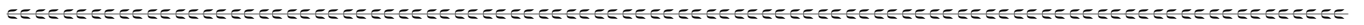
[8] 田彩兰, 陈济轮, 董鹏, 等. 国外电弧增材制造技术的研究现状及展望[J]. 航天制造技术, 2015(2): 57 - 60.

[9] 杨晓倩, 李亚江, 王娟. 304 奥氏体不锈钢焊接性及焊接方法研究进展[J]. 现代焊接, 2015(12): 9 - 13.

[10] 杨罗扬, 王克鸿, 马冯生. 基于 CMT 的不锈钢电弧增材制造温度场研究[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(4): 41.

[11] 王天琪, 李亮玉, 李香. 半椭球体热源模型的焊接温度场数值模拟[C]//全国材料与热加工物理模拟及数值模拟学术会议. 洛阳: 中国机械工程学会, 2006: 383.

[12] 石珩, 郭妍宁, 黄健康, 等. 考虑自由表面的 TIG 焊熔池行为数值模拟[J]. 电焊机, 2015, 45(7): 3.



(上接第 36 页)

[9] NEDIALKOV N N, LMAMOVA S E, ATANASOV P A, et al. Mechanism of ultrashort laser ablation of metals: molecular dynamics simulation[J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1/2/3/4): 243 - 248.

[10] GLOVER T E. Hydrodynamics of particle formation following femtosecond laser ablation [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2003, 20(1): 125 - 131.

[11] IHLEMANN J, WOLFF B, SIMON P. Nanosecond and femtosecond excimer laser ablation of fused silica[J]. Applied Physics A, 1992, 54(4): 363 - 368.

[12] 李毅. 高重复频率飞秒激光微纳加工中热效应的研究及应用[D]. 天津: 天津大学, 2012: 15.

[13] LIN Z B, ZHIGILEI L V, CELLI V. Electron-phonon coupling and electron heat capacity of metals under conditions of strong electron-phonon nonequilibrium [J]. Physical Review B, 2008, 77 (7): 075133.

[14] ANISIMOV S I, RETHFELD B. Theory of ultrashort laser pulse interaction with a metal [J]. Nonresonant Laser-Matter Interaction, 1997, 3093: 192 - 203.

[15] REN Yunpeng, CHEN J K, ZHANG Yuwen. Optical properties and thermal response of copper films induced by ultrashort-pulsed lasers [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(11): 113102.

[16] SCHA C, URBASSEK H M, ZHIGILEI L V. Metal ablation by picosecond laser pulses: A hybrid simulation [J]. Physical Review B, 2002, 66(11): 2 - 70.

[17] HOHLFELD J, WELLERSHOFF S S, GUDDE J, et al. Electron and lattice dynamics following optical excitation of metals [J]. Chemical Physics, 2000, 251(1/2/3): 237 - 258.

[18] KIM J, NA S. Metal thin film ablation with femtosecond pulsed laser [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(7): 1443 - 1448.

[19] 王文君. 飞秒激光金属加工中的形状及形貌控制研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2008: 23 - 29.