

# TIG增材成形5356铝合金温度场数值模拟分析

赵鹏康<sup>1,2</sup>, 唐成<sup>1,2</sup>, 杨明顺<sup>1,2</sup>, 景张帅<sup>1,2</sup>, 李言<sup>1,2</sup>

(1.西安理工大学陕西省机械制造装备重点实验室, 陕西 西安 710048;

2.西安理工大学 教育部数控机床及机械制造装备集成重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要** 用Abaqus软件结合单元生死法,建立钨极惰性气体(tungsten inert gas, TIG)增材成形5356铝合金有限元模型,探讨层间冷却时间、增材方向及预热对温度场的影响规律,并通过实测温度验证仿真结果。结果表明:随层间冷却时间递增,第1层表面中点温度循环曲线的峰值与谷值下降;随层数增加,峰值温度先快速下降,后缓慢下降;谷值温度先快速增加,后缓慢增加。往复式增材成形可有效改善同向增材在熄弧端因热量积累导致的成形缺陷,有利于提升表面平整度。在合理温度范围内的基板预热可使温度分布更均匀。

**关键词** 5356铝合金; TIG; 电弧增材; 数值模拟; 温度场

中图分类号 TG444.2

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2021)02-0071-07

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20201207.004

## Numerical simulation analysis of temperature field of 5356 aluminum alloy based on TIG arc additive manufacturing

ZHAO Pengkang<sup>1,2</sup>, TANG Cheng<sup>1,2</sup>, YANG Mingshun<sup>1,2</sup>, JING Zhangshuai<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Machinery Manufacturing Equipment, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,

China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Integration of CNC Machine Tools and Machinery Manufacturing

Equipment, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract** Abaqus software combined element birth and death method was used to establish a finite element model of 5356 aluminum alloy for additive manufacturing of tungsten inert gas (TIG). The effects of interlayer cooling time, surfacing direction and preheating on temperature field were discussed. The simulation results were verified by the measured temperature. The results show that as the interlayer cooling time increases, the peak and trough values of the thermal cycling curve at the midpoint of the first layer surface decrease. As the number of layers increases, the peak temperature first rapidly decreases and then slowly decreases, while the temperature of the trough first increases rapidly and then increases gradually. Reciprocating surfacing can effectively improve the forming defects caused by the accumulation of the heat at the arc extinguishing end of the same direction, which is beneficial to improve surface flatness. Preheating substrate within a reasonable temperature range can make the temperature distribution of substrate more uniform.

**Keywords** 5356 aluminum alloy; TIG; arc additive manufacturing; numerical simulation; temperature field

电弧丝增材成形(wire arc additive manufacturing, WAAM)技术有材料利用率与堆积效率高、可低成本一体化制造等优势,在航空航天、汽车工业等领域应用广泛,已成为制造大型轻量化零件最适宜的方法<sup>[1-2]</sup>。因铝合金密度小、比强度和断裂韧性高、抗腐蚀性好等优点,成为电弧增材成形优选材料<sup>[3-5]</sup>。不同于一般焊接,电弧增材成形过程较大的温度梯度产生复杂的热应力和变形,导致组织畸变,最终影响零件的成形精度与力学性能,对温度场控制是提高成形质量的关键。

目前,国内外关于铝合金WAAM过程温度场的研究主要采用数值模拟和试验验证。温度场数值计算

方面,主要集中在不同工艺参数下的温度场分布特性及热源模型对熔池温度的影响。Zhao等<sup>[6]</sup>基于冷金属过渡(CMT)增材成形技术研究了4043铝合金封闭圆筒件的温度场,结果表明,温度循环过程分为加速加热、准稳态和稳态,且热源线能量进入准稳态阶段所需成形层数无显著影响。Oyama等<sup>[7]</sup>研究了冷技术过渡(CMT)电弧增材对Al-3Si合金温度场的影响,结果表明,同一熔覆层随热源移动,熔池中心温度峰值不断增大,熔池尺寸在整个增材成形过程中保持稳定。柏久阳<sup>[8]</sup>用钨极惰性气体(GTAW/TIG)增材成形技术研究2219铝合金在热源移动和增材成形高度方向上的温度循环特征,研究表明,温度场达稳态后,不同熔

收稿日期:2020-08-05;修回日期:2020-10-16

基金项目:中国博士后面上基金(2017M613172);陕西省教育厅自然科学基金(17JK0562);校博士启动基金(102-451116012)

第一作者:赵鹏康,男,博士,讲师;研究方向为金属材料焊接机理。E-mail: zhaopengkang@xaut.edu.cn。

覆层对应位置的温度循环有相似性。Pan等<sup>[9]</sup>通过变极性钨极惰性气体增材成形(VP-TIG)法研究2219铝合金在椭圆形热源模型作用下的熔池温度场,研究表明,熔池温度呈周期性波动(20~40 K),熔池形状和速度保持小幅振荡。

5系铝合金因密度低、塑性高及疲劳性能优异等特点,在工业中应用广泛,但目前国内外关于5系铝合金TIG增材成形温度场的研究鲜少<sup>[10]</sup>。作者用数值模拟法建立了无脉冲5356铝合金TIG增材成形有限元模型,分析增材体不同位置的热历程与演变规律,探讨层间冷却时间、增材方向及基板预热对温度场的影响,通过试验进行验证,为进一步研究温度场与力学性能间的关系提供理论指导与数据支撑。

## 1 有限元模型建立

为简化温度场的数值模拟计算,假设:在试验结果的基础上除第1层外,其余熔覆层高度一致;不考虑试验基板与工作台间的热交换。

### 1.1 有限元模型

试验电源选取松下公司的300BP4-TIG型焊机;成形执行部分使用松下TM1400G3六轴多关节工业机器人;钨极与焊丝间的夹角为 $60^\circ$ ,结合YW-CRF011HAE型数字化送丝装置在固定工作台上进行增材成形,成形方式为往复式交流无脉冲。图1为TIG电弧增材成形过程示意图。其中,试验基板5052铝合金尺寸为 $200\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ ,得到10层尺寸为 $80\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 14.5\text{ mm}$ 的直体薄壁件,第1层高为 $1.9\text{ mm}$ ,其余层高为 $1.4\text{ mm}$ 。基板和焊丝化学成分,见表1。

图2为三维有限元网格划分模型。热结构耦合单

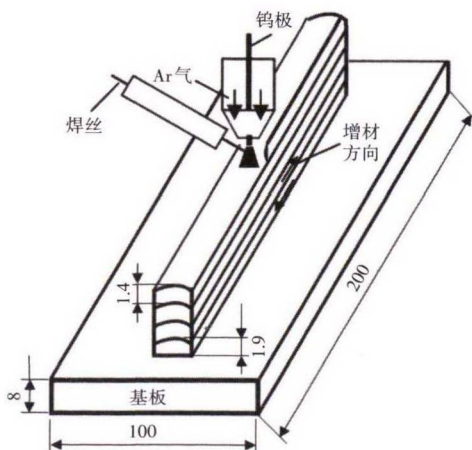


图1 WAAM成形过程示意图(mm)

Fig.1 Schematic diagram of WAAM process(mm)

表1 焊丝和基板的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of welding wire and base material (mass fraction/%)

成分	5356	5052	成分	5356	5052
Si	0.25	0.25	Cr	0.10	0.30
Fe	0.40	0.40	Zn	0.10	0.10
Cu	0.40	0.10	Ti	0.15	0.05
Mn	0.10	0.10	Al	余量	余量
Mg	5.00	2.50			

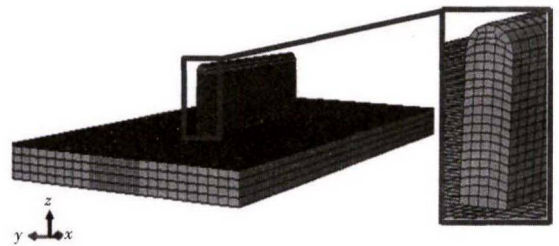


图2 三维有限元模型

Fig.2 Three-dimensional finite element model

元类型取八结点热传递线性六面体单元DC3D8。依据网格单元划分非均匀原则,在保证计算效率的前提下,局部加密多层单道薄壁熔覆层单元尺寸,使高温区温度场精度更高。网格单元总数为25 760,节点总数为32 103。

### 1.2 材料参数

熔覆金属焊丝5356铝合金直径为 $1.2\text{ mm}$ ,不同温度下熔覆焊丝材料热物理性能参数,见表2<sup>[11]</sup>。据文献[12]可得试验基板5052铝合金的热物性参数。考虑材料特性,用热焓法<sup>[13]</sup>计算相变潜热,在Abaqus有限元软件属性模块的相变潜热(latent heat)中添加:熔化潜热为 $294.8\times 10^3\text{ J/kg}$ ;固、液相线温度为 $574^\circ\text{C}$ 、 $638^\circ\text{C}$ 。

表2 5356热物理参数

Table 2 Thermal physical parameters of 5356

温度 $T/^\circ\text{C}$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	热导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	比热容 $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
25	2 680	90	1 200
200	2 670	110	1 244
400	2 665	130	1 360
600	2 660	135	1 452
800	2 660	145	1 540
1 200	2 655	150	1 540

### 1.3 单元生死法

用单元生死法模拟焊丝的逐次熔覆与填充过程。单元“死”(remove)指给刚度矩阵和热传导矩阵乘一个无限小参数,使单元的热载荷、比热容等变为0,但不

影响其它部位求解;单元“生”(add)指使比热容、热导率等恢复初始值重新参与求解<sup>[10]</sup>。本文通过编译Python程序,借助Abaqus中单元生死功能(model change)实现对直体薄壁单元生死控制。

1.4 边界条件与移动热源

试验工艺参数:增材成形电流为170 A;增材成形速度为0.3 m/min;送丝速度为3.4 m/min;层间冷却时间为50 s;保护气体为高纯度(99.99%)Ar气;气体流量为15 L/min。温度场边界条件为对流、辐射及初始温度,用式(1)中综合传热系数等效基板、焊缝与空气间的热交换<sup>[6]</sup>。 $T$ 为实时温度;热对流系数 $h_{conv}$ 取16 W/(m<sup>2</sup>·K);表面辐射率 $\epsilon$ 为0.83;史蒂芬玻尔兹曼常数 $\sigma$ 为5.67×10<sup>-8</sup> J/(K·m<sup>2</sup>·s);环境温度 $T_0$ 为20 ℃。

$$H_{conv} = \frac{\epsilon\sigma(T^4 - T_0^4)}{(T - T_0)} + h_{conv} \quad (1)$$

式中 $H_{conv}$ 为综合传热系数。

用Fortran语言编译移动热源子程序,并通过DFLUX接口定义热流载荷。电弧焊选取双椭球热源模型,其热流密度的数学定义式:

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3} f_i U I \eta}{\pi\sqrt{\pi} a_i b c} \exp\left\{-3\left[\left(\frac{x}{a_i}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (2)$$

式中: $f_i(i=1, 2)$ 为前后椭圆半球热流密度的分布权重系数, $f_1+f_2=2$ ;  $a_i, b, c$ 为热源模型的几何尺寸参数; $U$ 为增材成形电压; $I$ 为增材成形电流; $\eta$ 为热源效率。

1.5 试验验证

增材成形试验过程用2个K型热电偶测量并记录试验基板上表面靠近熔覆层位置点A(0, -30, 8)、B(-10, -20, 8)的瞬时温度-时间变化曲线,图3a、b分别为热电偶分布实物图与测量点位置示意图。坐标原点 $o$ 位于试验基板下表面的几何中心。对比模拟仿真与试验结果,测温点A(热电偶与直体薄壁件的距离为30 mm)的温度循环曲线,如图3c所示。可以看出,两条曲线吻合较好,变化趋势一致,温度值的最大误差小于10%。测量B(热电偶与直体薄壁件的距离为20 mm)的实测数据与模拟值误差也小于10%。造成误差的主要原因:模型误差;模拟过程中未考虑试验工作台散热;温差测量设备自身精度所限。

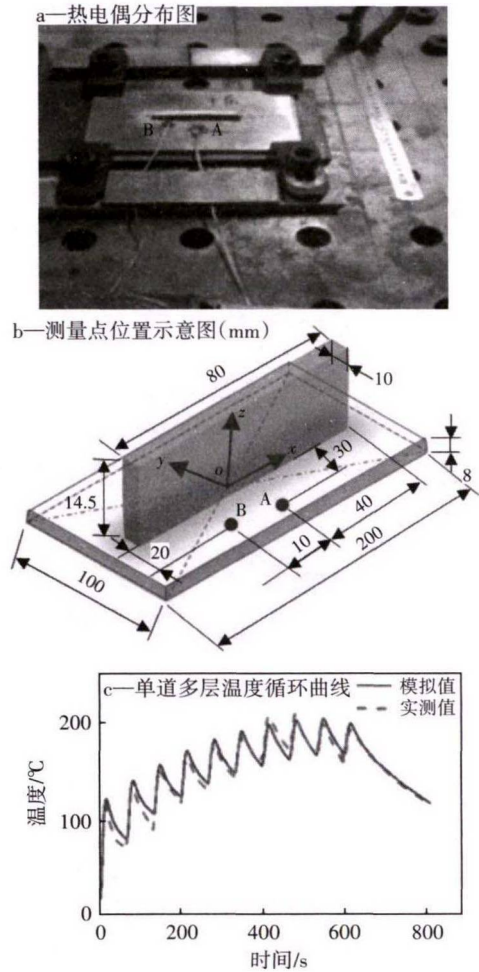


图3 温度试验测量与数值模拟结果对比  
Fig.3 Comparison between experimental and simulated temperature thermal cycling curve results

2 结果与讨论

2.1 温度场模拟分析

热源移动8 s(熔覆层中间)时,第1、5、10层的温度场云图,如图4所示。可以看到,熔池温度场呈明显椭圆形,熔池等温线前端稠密而尾部稀疏。TIG增材成形热源温度梯度分布不均匀的主要原因在于移动电弧自身的热惯性<sup>[14]</sup>,弧柱受热升温与散热降温并非瞬态,该过程运动电弧的温度动态响应滞后于焊接电流,进而导致热源前后的热量分布不同。试验发现,增材成形过程电弧正下方高温液态金属受电弧吹力和保护气作用回流集中到电弧后侧,由于铝合金导热能力较强,回流金属快速凝固,最后形成不均匀的温度分布。

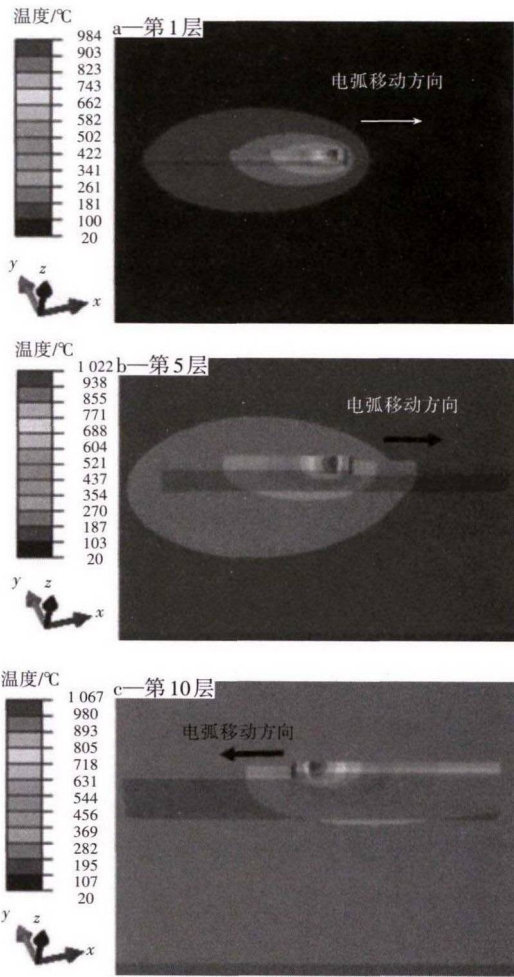


图4 多层单道温度场云图

Fig.4 Multi-layer single-pass temperature field cloud map

随热源往复移动,熔融金属的增材叠加进程不同位置散热能力因热输入、边界条件及热损失<sup>[15]</sup>的相互作用发生变化。第1层靠近基板,以热传导方式向基板散热,且较大的基板面积有助于快速降温,温度明显降低,表面中点温度为984 °C(图4a);中间第5层能量由熔覆前的累积热量和随后热处理作用共同组成,以辐射散热为主,逐层熔覆使热传导受阻,已成形层温度场在较长冷却时间内逐渐趋于稳定,热源中心点的温度达1 022 °C(图4b);第10层散热不受试验基板影响,热量积累与凝固层间热传导效率降低使熔覆层整体温度进一步增到约为1 067 °C(图4c)。沿直体薄壁件的生长方向,熔覆层区被反复加热,产生的累积能量使新的成形层散热速率减缓,从而使后熔覆层高温热扩散区明显大于前层,基板温度上升<sup>[16]</sup>。

为获得增材成形件内部温度场演变规律,提取不同熔覆层表面中点的温度-时间循环曲线进行分析,如图5所示。可以看出,在热源直接作用下的瞬时温度最高,对应曲线上的第1个峰值;随后即发生快速冷却,待到热源经过下一层相应点时温度再次增高,但

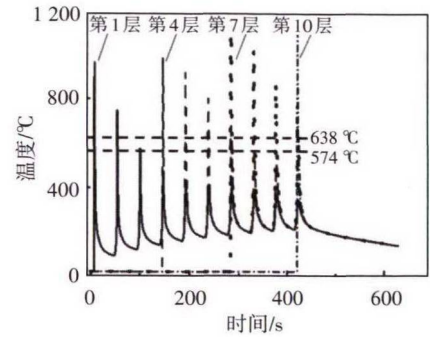


图5 不同层表面中点的温度循环曲线

Fig.5 Temperature cycling curves of middle points under different layers

峰值依次不断衰减。第1层温度循环曲线的第2、3峰值位于固相线之上,第4层温度循环曲线的第2、3、4峰值大于固相线温度,第7层与第4层类似。整个增材成形过程中第1层有2次重熔,第4、7层有3次重熔,其中包括完全重熔和部分重熔。由此可见,多层增材成形重叠热循环有其固有的复杂性,同时表明随增材成形进行,严重的热累积导致工件过热,因此必须合理选择层间冷却时间<sup>[17]</sup>。

### 2.2 层间冷却时间对温度场的影响

图6为10层直体薄壁件增材成形过程不同层间时间间隔的第1层表面中点温度循环曲线峰值和谷值分布。由图6a可以看出,第1组峰值不存在温差,其后伴随熔覆层数增加,峰值不断下降,不同组的温差先增大后稳定,这是由于第1层熔覆层在基板上被热源直接加热,且温度场边界件一致,因此温度最高,温差为0;经历不同的层间时间间隔,第2组峰值均超过材料熔点温度(630 °C<sup>[18]</sup>),此时热累积效应对前层温度

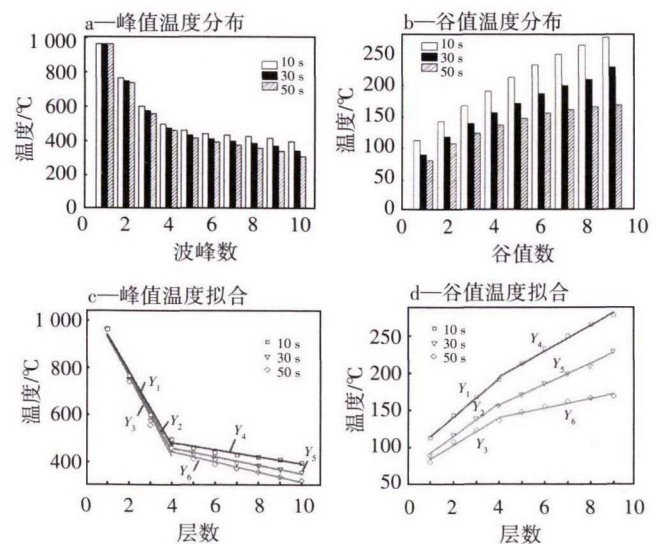


图6 不同层间冷却时间第1层温度循环曲线上波峰和波谷  
Fig.6 Peaks and troughs in temperature cycling curve of the first layer at different interlayer cooling time

的影响很小,因此温差并不显著,约为18℃。层间冷却时间递增使散热越多,对应热累积效应减弱,不同组的峰值温差更显著。3~10组的峰值低于熔点温度,表明散热程度对成形层的影响逐渐增强直至保持稳定,最大温差达57℃。图6b中谷值温差先稳定后增大,这是因为在相同的能量输入下,层间冷却时间越短,熔覆8~10层时向第1层传递的热量越多,故7、8、9组的谷值温差明显增大。

图6c、d分别为峰值温度和谷值温度与堆积层数间关系的拟合图。式中, $x$ 和 $Y$ 分别表征增材成形层数与温度, $Y_1\sim Y_3, Y_1'\sim Y_3'$ 代表前4层的峰值与谷值温度; $Y_4\sim Y_6, Y_4'\sim Y_6'$ 表示后6层的峰值与谷值温度。可以发现,整体变化过程分为两个阶段,前4层变化较快,后6层变化较慢。函数拟合结果表明,峰值组前4层斜率的绝对值从156.42增至172.72,后6层斜率绝对值从14.86增至19.61;相应地,谷值组的前4层斜率从25.91减至18.30,后6层斜率从17.23减至6.37。随层数增加,峰值组的温度先快速下降,后缓慢下降;而谷值组温度先快速增加,后缓慢增加。分段拟合函数:

$$Y_1 = -156.42x + 1097.54Y_1' = 25.91x + 89.30; \quad (3)$$

$$Y_2 = -161.72x + 1099.55Y_2' = 22.30x + 70.55; \quad (4)$$

$$Y_3 = -172.72x + 1102.56Y_3' = 18.30x + 66.56; \quad (5)$$

$$Y_4 = -14.86x + 541.57Y_4' = 17.23x + 126.18; \quad (6)$$

$$Y_5 = -16.14x + 536.14Y_5' = 14.06x + 101.30; \quad (7)$$

$$Y_6 = -19.61x + 531.54Y_6' = 6.37x + 115.09. \quad (8)$$

### 2.3 增材方向对温度场的影响

增材方向是影响增材成形件尺寸精度的重要因素,前期研究结果表明<sup>[19]</sup>,同向增材起弧端凸起及熄弧端塌陷现象在成形后期愈发明显,见图7a。该现象归因于起弧停留和熄弧延迟作用引起的缺陷遗传累积效应,最终严重影响表面平整度,探究不同增材方向的温度变化历程。设置层间时间间隔为30s,其余参数与表3保持一致,模拟得到两种增材方向的温度场。

图7为两种增材方向下第2层表面不同位置的温度循环曲线,A、B、C为熔覆层左、中、右侧的特征节点。图7a为同向式增材的温度循环曲线。可以发现,同向式起弧时不同位置的温度循环过程一致。图7b为图7a对应的3个位置上最高温度的变化曲线。可以看到,沿热源移动方向上能量的累积,使靠近右侧的曲线更稠密。分析往复式增材的温度循环曲线得知,逐层交替反复沉积使往复式起弧左右两侧交替成为温度的上升区和下降区。如图7c中C点在第2层时峰值温度比A、B点的低,而在第3层时C点的峰值温度比A、B点高,如此反复交替,将改善同向式起弧端及

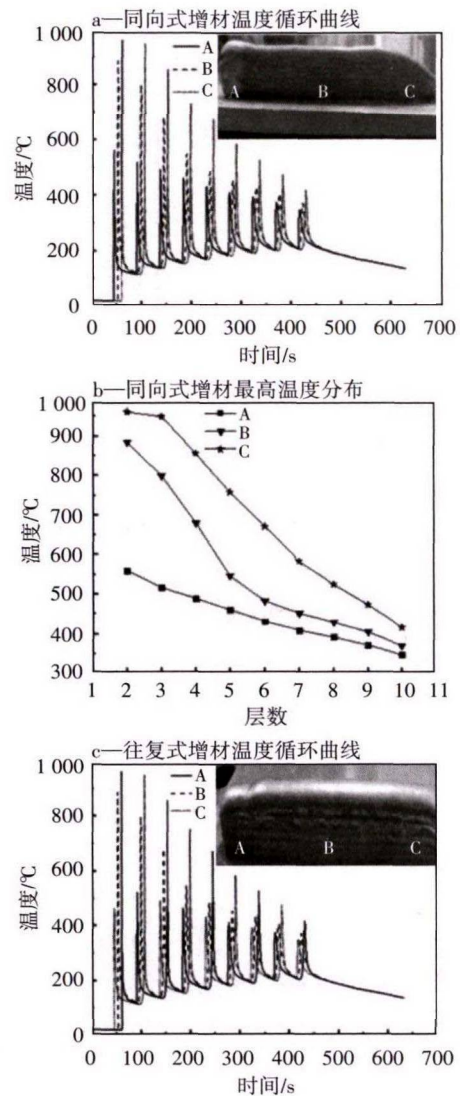


图7 不同增材方向的温度循环曲线

Fig.7 Temperature cycling curves of different deposition directions

熄弧端的成形缺陷,有利于提高成形质量(图7c右上角插图)。

### 2.4 基板预热对温度场的影响

图8为不同预热温度下(室温、60、100、140℃)第1层表面中点的温度循环特性。可以看出,温度-时间循环曲线首个波峰分别为984、1000、1022、1051℃,即峰值温度随预热值的递增而上升,这是由于预热使基板温度增大,改变基板与第1层熔覆层间的温差,导致该层向试验基板的热传递受阻,冷却速率下降<sup>[20]</sup>;对比8a~d发现,波谷值连线逐渐趋于平缓,室温下波谷的最大值与最小值相差约为120℃;当预热温度从60℃增至140℃时,相应的温差为96、71、46℃,呈递减趋势,表明在合理温度范围内通过预热基板使成形件的温度分布更均匀。此分析能有效控制温度变化,减少成形缺陷,为制备具有良好精度和组织性能的结构件提供参考。

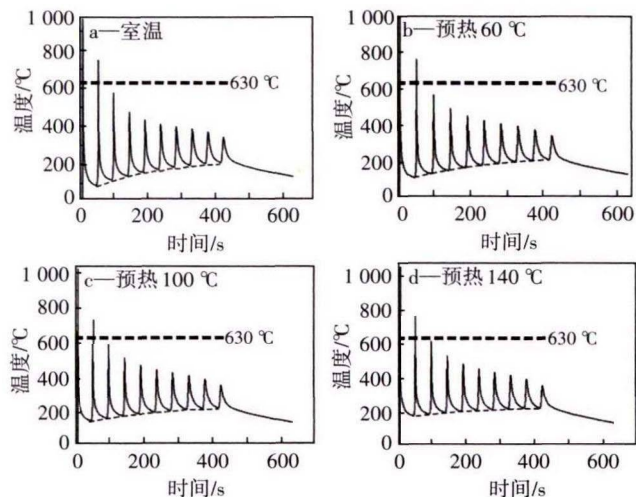


图8 预热与未预热第1层中点的温度循环曲线

Fig.8 Temperature cycling curves of middle points on the first layer preheated and non-preheated

### 3 结论

1) 实测温度循环曲线变化趋势与模拟过值相吻合,验证了仿真结果的正确性。

2) 沿直体薄壁件生长方向,累积的熔覆层能量使新成形层散热速率减缓,使后熔覆层高温热扩散区明显大于前层。

3) 多层单道薄壁结构件熔覆过程中,随层间冷却时间递增,第1层表面中点峰值与谷值温度均下降;随层数增加,峰值组温度先快速下降,后缓慢下降;而谷值组温度先快速增加,后缓慢增加。

4) 往复式起弧有利于改善同向起弧方式熄弧端的成形缺陷;逐层交替反复沉积使往复式起弧左右两侧交替成为温度的上升区和下降区。

5) 随基板预热温度增加,第1层温度循环曲线首个波峰温度增加,波谷值连线逐渐趋于平缓,成形件整体的温度分布更均匀。

### 4 参考文献

- [1] HACKENHAAR W, MAZZAFERRO J A E, MONTEVECCHI F, et al. An experimental-numerical study of active cooling in wire arc additive manufacturing [J]. *Journal of Manufacturing Process*, 2020, 52: 58-65.
- [2] MOREIRA A F, RIBEIRO K S B, MARIANI F E, et al. An initial investigation of tungsten inert gas (TIG) torch as heat source for additive manufacturing (AM) process [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 92: 671-677.
- [3] 曾涛, 晁耀杰, 邹龙江, 等. 5A06铝合金活性TIG焊接接头组织与性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(4): 82-86. ZENG Tao, CHAO Yaojie, ZOU Longjiang, et al. Microstructure and properties of activating TIG welded joints of 5A06 alu-

minum alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(4): 82-86. (in Chinese)

- [4] 董力群, 梁景恒, 毛镇东, 等. 6A01铝合金激光-MIG复合焊和MIG焊接头性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42(2): 60-63. DONG Liqun, LIANG Jingheng, MAO Zhendong, et al. Joint properties of 6A01 aluminum alloy by laser-TIG hybrid welding and MIG welding [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2019, 42(2): 60-63. (in Chinese)
- [5] ZHOU Yinghui, LIN Xin, KANG Nan, et al. Influence of travel speed on microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2219 aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 37(2): 143-153.
- [6] ZHAO Yun, JIA Yazhou, CHEN Shujun, et al. Process planning strategy for wire-arc additive manufacturing: Thermal behavior considerations [J]. *Additive manufacturing*, 2020, 32: 1-10.
- [7] OYAMA K, DIPLAS S, MHAMDI M, et al. Heat source management in wire-arc additive manufacturing process for Al-Mg and Al-Si alloys [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 26: 180-192.
- [8] 柏久阳. 2219铝合金GTA增材制造及其热处理过程的组织演变[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. BAI Jiuyang. Microstructure evolution of 2219-Al during GTA based additive manufacturing and heat treatment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] PAN Jiajing, HU Shengsun, YANG Lijun, et al. Investigation of molten pool behaviors and weld bead formation in VP-GTAW by numerical modelling [J]. *Materials and Design*, 2016, 111: 600-607.
- [10] 刘东帅, 吕彦明, 周文军, 等. 基于ANSYS的TIG电弧增材制造温度场数值模拟分析[J]. *激光与光电子进展*, 2019, 56(24): 1-7. LIU Dongshuai, LÜ Yanming, ZHOU Wenjun, et al. Numerical simulation of temperature field in TIG arc additive manufacturing based on ANSYS [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 1-7. (in Chinese)
- [11] 朱瑞栋, 董文超, 林化强, 等. 基于SYSWELD的动车组缓冲梁焊接结构数值模拟[C]. 青岛: 中国机械工程学会焊接学会全国焊接学术, 2013: 15-17. ZHU Ruidong, DONG Wenchao, LIN Huaqiang, et al. Numerical simulation of welding structure of buffer beam of EMU based on SYSWELD [C]. Qingdao: Chinese Society of Mechanical Engineering Welding Society National Welding Academic, 2013: 15-17. (in Chinese)
- [12] 马锋. 基于ABAQUS平台对铝合金焊接变形和应力的数值模拟及研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016. MA Feng. Study on numerical simulation of welding deformation and residual stress of aluminum alloy based ABAQUS [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)

- [13] 孔源,刘伟军,王越超,等. 钛合金激光直接成形过程中热力耦合场的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(24): 74-82.  
KONG Yuan, LIU Weijun, WANG Yuechao, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field of direct laser metal deposition shaping process of titanium alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 74-82. (in Chinese)
- [14] 王昂洋,何建萍,袁焱韬,等. 脉冲微束等离子弧焊电弧的光辐射强度动态分布特征[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 70-74.  
WANG Angyang, HE Jianping, YUN Yaotao, et al. Dynamic distribution characteristics of light radiation intensity of pulsed micro-plasma arc welding arc [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 70-74. (in Chinese)
- [15] 舒林森,王家胜,白海清,等. 磨损轴面激光熔覆过程的数值模拟及试验[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 217-223.  
SHU Linsen, WANG Jiasheng, BAI Haiqing, et al. Numerical and experimental investigation on laser cladding treatment of wear shaft surface [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 217-223. (in Chinese)
- [16] 王福雨,刘伟军,赵宇辉,等. 复杂薄壁零件激光快速成形过程的热力耦合场数值模拟[J]. 机械工程学报, 2013, 49(5): 191-198.  
WANG Fuyu, LIU Weijun, ZHAO Yuhui, et al. Thermo-mechanical coupling field simulation of complex thin-wall part laser rapid prototype process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(5): 191-198. (in Chinese)
- [17] 李丙如,周建平,许燕,等. 金属熔焊成形三维温度场数值模拟与分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(3): 42-46.  
LI Bingru, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Three-dimension numerical simulation and analysis of temperature field in metal welding deposition prototyping [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(3): 42-46. (in Chinese)
- [18] SHEN Junjie, IKEDA K, HATA S, et al. "Abnormal transient creep" in fine-grained Al-5356 alloy observed at low strain rates by high-resolution strain measurement [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(5): 1209-1214.
- [19] 赵鹏康,唐成,蒲尊严,等. TIG电弧增材制造5356铝合金微观组织与拉伸性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(5): 65-70.  
ZHAO Pengkang, TANG Cheng, PU Zunyan, et al. Microstructure and tensile properties of 5356 aluminum alloy by TIG wire arc additive manufacturing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(5): 65-70. (in Chinese)
- [20] SAADATMAND M, TALEMI R. Study on the thermal cycle of wire arc additive manufactured (WAAM) carbon steel wall using numerical simulation [J]. Frattura ed Integrità Strutturale, 2020, 14(52): 98-104.

### 致谢本期审稿专家(按姓氏笔画排名)

马雅林 王 荣 王渠东 王 磊 卢立伟 刘宗昌 孙廷富  
 芦 笙 张少宗 张 伟 张振宇 陈小伟 陈 巍 孟庆森  
 赵红梅 钟 涛 种法力 聂凤明 栗卓新 贾成厂 夏法锋  
 陶春虎 黄正祥 葛 鹏 韩福生 谭寿洪 翟红菊

《兵器材料科学与工程》编辑部