

# 基于 ANSYS 的 TIG 电弧增材制造温度场数值模拟分析

刘东帅, 吕彦明\*, 周文军, 杨华, 王康

江南大学机械工程学院江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122

**摘要** 高效率、低成本、制造周期短且无需模具的电弧增材制造技术为大型复杂金属结构件的生产提供了新方法。基于 ANSYS 参数化设计语言 APDL, 借助 Jmatpro 得到了高温下 ER50-6 碳钢焊丝材料的物理参数, 采用生死单元法实现了电弧增材制造过程的动态模拟仿真。模拟分析了单道单层焊接以及焊后冷却过程的温度场分布及温度的变化规律, 并与实验结果进行对比, 验证了模拟的可行性与正确性。在此基础上分析了不同基板厚度下电弧增材制造温度场的变化规律, 得到了增材制造的最佳基板厚度, 并研究了直壁零件单道多层增材制造过程中温度场的变化规律。实验得到的焊道温度变化规律可为增材制造后借助堆焊余温对成形件进行锻打改性的时机的选择提供重要的理论依据。

**关键词** 激光技术; 电弧增材制造; TIG 焊接; 数值模拟; 温度场; 模型简化

中图分类号 TG444

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.241405

## Numerical Simulation of Temperature Field in TIG Arc-Additive Manufacturing Based on ANSYS

Liu Dongshuai, Lü Yanming\*, Zhou Wenjun, Yang Hua, Wang Kang

*Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China*

**Abstract** Arc additive manufacturing technology with high efficiency, low cost, short manufacturing cycle, and no molds represents a new method for the production of large and complex metal structures. In this study, based on the ANSYS parametric design language APDL, the thermophysical parameters of ER50-6 carbon steel-welding wire are obtained using Jmatpro and the dynamic simulation of arc additive manufacturing process is realized by the birth-death-element method. The feasibility and correctness of the simulation of the temperature variation in welding and post-weld cooling are verified via comparison with the experimental results. The variation rule of the temperature field in arc-additive manufacturing under different substrate thicknesses is analyzed to obtain optimal substrate thickness. Furthermore, the study explores the variation of the temperature field during the multi-layer additive manufacturing process of straight, single wall parts. This provides an important theoretical basis for forging modification process of the formed parts based on additive manufacturing residual temperature.

**Key words** laser technique; arc additive manufacturing; TIG weld; numerical simulation; temperature field; model simplification

**OCIS codes** 140.3390; 350.3850; 000.6850; 000.4430

## 1 引言

近些年兴起的快速增材制造技术以其无需传统模具、加工工序少及制造周期短等优势而被人们关

注<sup>[1]</sup>。根据热源的不同,增材制造可分为激光增材、电子束增材以及电弧增材<sup>[2]</sup>。针对激光和电子束在增材大型化、整体化复杂结构件方面的不足,以电弧为热源的低成本高沉积率的堆焊技术被越来越多的

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-06-05; 录用日期: 2019-06-14

\* E-mail: lvyanning126@126.com

人重视<sup>[3]</sup>。

电弧增材同激光熔覆都是基于逐层熔覆的原理堆积制造零件,热源会重复对基板和已焊焊道进行热处理,产生热循环效应,影响基板与已焊焊道的宏观形貌、微观组织及力学性能,因此研究焊接过程中的温度对增材成形件形貌、性能和寿命的影响具有重要意义<sup>[4]</sup>。与激光电子束等热源方式不同,TIG (Tungsten Inert Gas)电弧增材由非熔化钨极提供稳定的热源,能量相对较低,电弧稳定,能够成形组织致密的金属零件<sup>[5]</sup>。有许多学者进行了电弧增材制造方面的研究,如:樊丁等<sup>[6]</sup>基于 TIG 电弧增材制造建立了电弧与熔池交互的数学模型,并分析了熔池的温度场;Ding 等<sup>[7-8]</sup>采用三维热弹性瞬态模型和稳态热分析模型,研究了电弧增材制造过程中的温度模拟和变形预测;李少海<sup>[9]</sup>采用数值模拟的方法模拟了 TIG 堆焊 Q235 钢时焊接能量与焊接时间对焊件温度场、应力场的影响。然而电弧及熔池都具有很高的温度,单纯依靠实验方法很难全面反映实时的增材过程,并且电弧在等离子状态下仍有一些理论问题尚未得到完全解决。目前,国内外针对 TIG 电弧增材多层堆积中温度及应力分布规律报道还不多,增材制造过程中热源往复移动引起的温度场分布不均成形成件产生变形甚至裂纹的主要因素<sup>[10]</sup>,研究增材制造过程中的温度变化规律,是降低工件中残余应力的关键。

本文借助 ANSYS 有限元仿真模拟电弧增材的动态成形过程,分析了增材制造过程中基板与焊道的温度场分布及变化规律,并利用实验验证了数值模拟方法的正确性。模拟得到的电弧增材多道堆积过程中温度场的变化规律,能够为成形件微观组织演变的研究提供理论指导。

## 2 数值模型

### 2.1 模型假设

- 1) 假设熔池和电弧呈轴对称分布;
- 2) 假设焊接系统周围空气的温度稳定;
- 3) 假设焊接系统的输出功率稳定,焊接过程平稳;
- 4) 忽略电磁作用对温度场、应力场的影响;
- 5) 忽略熔池流场的作用,不考虑电弧压力。

### 2.2 模型分析及简化

#### 2.2.1 模型分析

采用 TIG 非熔化钨极氩气气体保护焊进行实验,

利用 YC-315TX 焊机、WF-007A 填丝机、VMC600 加工中心以及 Fluke Ti400 红外热像仪等组成的加工平台,研究电弧增材制造过程中基板及焊道温度场的变化规律。实验选择的电流为 170 A,焊接速度为 120 mm/min,送丝速度为 470 mm/min,起弧高度为 4 mm,保护气流量为 9 L/min。选用直径为 1.6 mm 的 ER50-6 碳钢焊丝,在尺寸为 240 mm×220 mm×15 mm 的 45 钢基板中心,沿宽度方向焊接 40 mm 长的焊道。实验前用丙酮溶液擦拭基板表面,以去除油污。焊丝与基板的化学成分如表 1 所示。

表 1 基板与焊丝的化学成分

Ingredient	Mass fraction / %							
	C	Cr	Mn	Ni	Si	P	S	Cu
Substrate	0.5	0.25	0.8	0.25	0.37	0.035	0.035	0.025
Wire	0.15	—	1.85	—	1.15	0.025	0.035	0.5

实物模型如图 1(a)所示,采用扫描精度为 0.03 mm 的 handyscan700 扫描仪对焊道与基板进行扫描,得到的焊道的点云数据如图 1(b)所示,焊道截面的模型如图 2 所示。

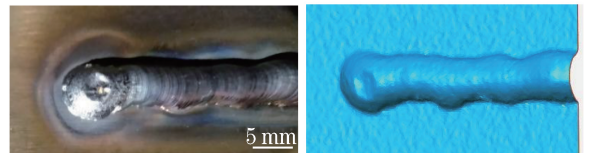


图 1 焊道实物模型与点云数据。(a)单层焊道;  
(b)焊道点云

Fig. 1 Physical and point cloud data of weld bead.

(a) Single-layer weld bead; (b) point cloud of weld bead

#### 2.2.2 模型简化

对几何模型进行简化,忽略焊道和基板的倒角、小凹槽以及小孔等小特征,将焊道截面简化为图 2 所示的模型。网格划分如图 3 所示。考虑到焊道周围区域的温度梯度比较大,将焊道区域的网格细化,单元尺寸为 0.5 mm×0.5 mm×0.5 mm;焊道附近基板的网格划分得相对稀疏,单元尺寸为 1 mm×1 mm×1 mm;远离焊道的基板区域的网格划分得较稀疏,单元尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm。这样做的目的是提高计算的精度和效率。

### 2.3 传热边界条件

基板被置于室温空气中,电弧作为单一热源被加载到基板与焊丝上。由于基板尺寸远大于焊缝尺寸,因此温度从熔池区域向远离热源基板部位扩散<sup>[11]</sup>。在焊接过程中,热量主要通过电弧传导到熔

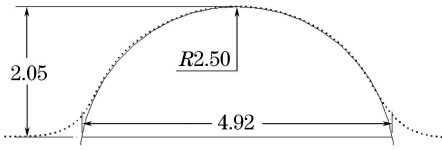


图2 简化后的焊道截面模型

Fig. 2 Simplified weld bead section model

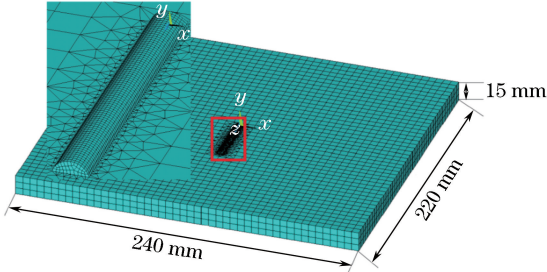


图3 有限元网格模型

Fig. 3 Finite element mesh model

池中,材料熔化沉积过程的热量交换主要为对流换热,其次是热辐射。所以选用综合传热系数

$$h = \frac{(T^4 - T_a^4)\epsilon\sigma h_c}{T - T_a}, \quad (1)$$

式中: $h$  为综合传热系数; $T$  为工件表面的实时温度; $T_a$  为环境温度,设定为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ; $\epsilon$  为辐射率; $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数; $h_c$  为对流换热系数。

焊接时的温度很高,材料在相变及熔化过程中会吸收或放出一定的热量,因此在计算材料的焓值时,要考虑材料的相变潜热。焓值的计算公式为

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

式中: $\rho$  为材料随时间变化的密度; $c(T)$  为材料随时间变化的比热容。

实际的焊接过程会涉及到复杂的热力学、电磁学等问题,而且材料的物理参数会随温度而变化。目前通过实验很难测得高温下金属的热物理参数。本文采用 Jmatpro 模拟材料热物理参数,与材料已有的物理参数进行对比,对模拟的参数进行修正后的结果如表 2 所示。

表2 ER50-6 和 45 钢的热物理参数

Table 2 Thermophysical coefficients of ER50-6 and 45 steel

Temperature / $^\circ\text{C}$	45 steel			ER50-6		
	Density / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Specific heat / ( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	Heat conductivity / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	Density / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Specific heat / ( $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	Heat conductivity / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
25	7.82	0.46	47.04	7.77	0.48	27.78
200	7.76	0.53	44.18	7.72	0.54	30.66
400	7.70	0.62	39.07	7.65	0.63	30.86
800	7.61	0.60	26.51	7.52	0.69	25.45
1200	7.40	0.66	31.32	7.31	0.67	30.23
1600	6.88	0.83	140	6.79	0.84	140
2000	6.54	0.83	140	6.45	0.84	140

## 2.4 焊接过程的温度场设置

### 2.4.1 热源模型的建立与加载

热源模型会直接影响模拟的结果,因此合理的热源模型是实现良好焊接模拟的基础条件<sup>[12]</sup>。对于电弧焊接来说,热源的热流会沿着基板厚度方向施加影响,因此选取对焊缝网格划分细度要求不高的体生热率热源模型。体生热率热源计算公式为

$$H = \frac{KUI}{tVA} \quad (3)$$

式中: $K$  为热源的热效率; $U$  为电压; $I$  为电流; $A$  为焊道横截面积; $V$  为焊速; $t$  为单位载荷步的时间。模拟过程中  $K$  取 0.7, 电流  $I$  为 170 A, 电压  $U$  为 9 V, 焊速为 0.002 m/s。

### 2.4.2 生死单元的建立与加载

采用生死单元法模拟焊接过程,通过修改单元刚度在焊接模拟前将焊道单元“杀死”,单元被“杀

死”只是将单元的各项材料属性降到最低,并不会影响其他部位的模拟计算。当热源移动到焊道某一单元上时,该部位的单元将被激活并参与模拟分析。

## 3 模拟分析及实验验证

### 3.1 模拟结果

通过 ANSYS 软件可以计算分析 ER50-6 焊丝在焊接熔覆过程中的温度场变化。焊接结束冷却 70 s 时基板的温度场分布如图 4 所示,由图 4 可知,在基板冷却散热过程中,温度沿焊道两侧方向逐渐降低,且大致呈对称分布,最高温度为  $56.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,位于焊道中心。

### 3.2 温度随位置变化的规律

如图 5(a) 所示,在焊缝与基板相交的边缘线  $R_1$  上每隔 5 mm 等间距选取 9 个节点,对比观察焊接结束以及焊后冷却 70 s 时的温度变化。由

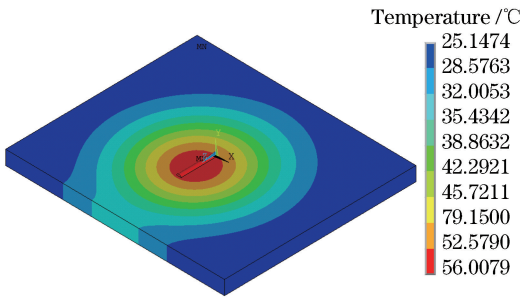


图 4 焊后冷却 70 s 时基板的温度分布云图  
Fig. 4 Temperature distribution of plate for 70-s cooling after welding

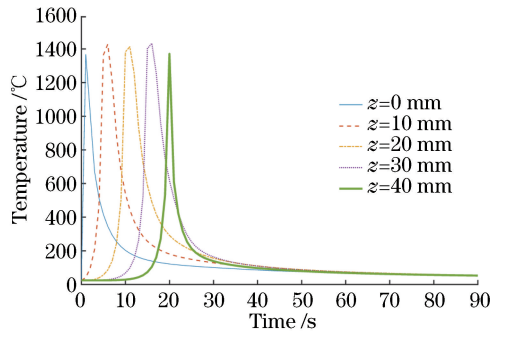


图 6 焊缝边缘各点温度随时间的变化  
Fig. 6 Variation in temperature at each edge point of weld with time

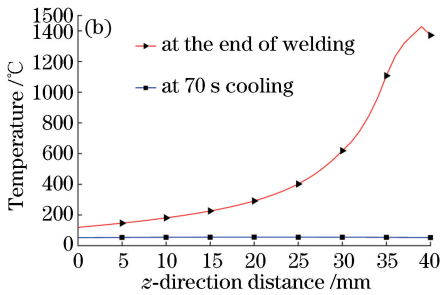
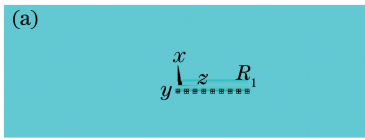


图 5 节点选取以及不同时刻各点的温度分布图。  
(a) 节点的选取; (b) 焊接结束及焊后冷却 70 s 时的温度  
Fig. 5 Node selection and temperature distribution at different time. (a) Node selection; (b) temperature after welding and temperature for 70-s cooling after welding

图 5(b) 可知, 焊接结束时, 焊道边缘处的最高温度达到 1428.1 °C, 而焊接起始处由于基板和空气的冷却散热已经降到 200 °C 以下。对比图中各点在焊后冷却 70 s 时的温度变化, 可以计算得到 15 mm 厚度 45 钢基板的散热速率。

### 3.3 温度随时间变化的规律

同样在焊缝与基板相交的边缘线  $R_1$  上, 分别在  $z=0$  mm、 $z=10$  mm、 $z=20$  mm、 $z=30$  mm、 $z=40$  mm 处取 5 个节点, 观察焊道不同位置处节点的温度随时间变化的规律。由图 6 可以看出: 当热源移动到各个节点时, 该点的温度急剧升高; 当热源移走后, 温度先在短时间内迅速降低, 降到一定程度后缓慢下降, 一段时间后各节点的温度基本趋于一致。由各节点的温度曲线可知: 焊接开始后, 由于热量的积累, 基板的最高温度逐渐上升; 由于焊道两端与基板对流换热作用明显, 因此热源消失后温度下降的

速率明显比中间节点快。由图 6 能够计算得到基板的升温速率和降温速率, 根据模拟结果还可以直观地看出焊接结束 10 s 左右时基板的整体温度降到了 200 °C 以下。

### 3.4 实验验证

根据上文建立的单焊道焊接模型得到了焊接及冷却过程中的温度场分布规律, 现将实验测得的焊道边缘上特征点的温度变化曲线与模拟结果进行对比。实验采用 Fluke Ti400 红外热像仪对增材制造过程中的温度场进行测量, 在 SmartView 软件中选取与  $R_1$  线段相同位置处的温度数据, 将测量温度与模拟温度进行对比, 如图 7 所示。由图 7(a) 可以看出, 焊道边缘处的最高温度在 1383.3 °C 左右, 实际

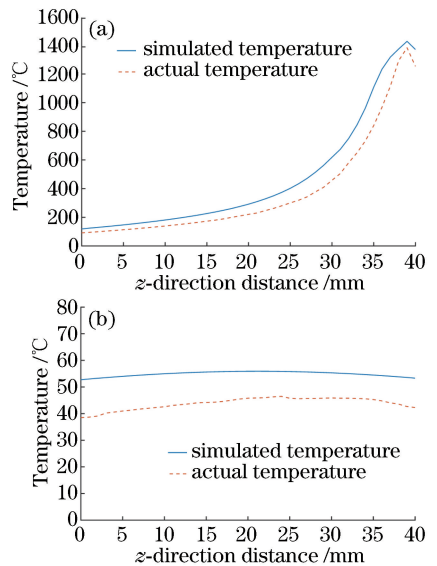


图 7 不同时刻焊道边缘的模拟温度与实际温度。  
(a) 焊接结束时; (b) 焊后冷却 70 s 时

Fig. 7 Comparison of simulated and actual temperatures of weld bead edge at different time. (a) After welding; (b) cooling for 70 s after welding



温度变化趋势与模拟结果基本吻合。由图 7(b)可知,实际焊接结束 70 s 时,基板温度约为 40 °C。由于模型误差以及模拟热物理参数的偏差,基板实际温度比模拟温度稍偏低。起弧点和熄弧点由于对流换热显著,偏差更为明显。图 8 为焊接终点温度随时间变化的模拟结果与实测结果,可以看出焊接结束后二者的冷却变化情况基本一致。

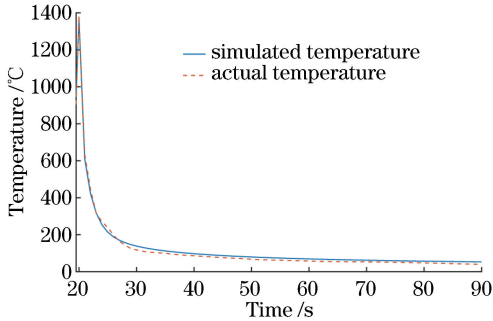


图 8 焊接终点温度随时间的变化

Fig. 8 Variation in temperature of welding end point with time

#### 4 基板厚度对堆积温度场的影响

采用上述数值模拟方法分析电弧增材制造温度场具有一定的可行性,因此本文运用该数值模拟方法进一步对相关温度场进行分析。

基板的厚度是电弧增材制造的重要参数之一,对冷却过程中的温度场有很大影响,因此探究不同厚度基板下电弧增材过程中温度的变化规律对成形件的组织、性能研究具有重大意义。本文采用上述实验参数,分别模拟了基板厚度为 5, 10, 15, 20, 25 mm 的增材制造过程中的温度场变化,以研究焊道边缘中心点处的温度随时间的变化规律。由图 9 可以看出,增材制造过程中基板厚度对温度的影响较小;在降温过程中,随着厚度增大,基板的导热速率增大,因此降温速率不断增大。由图 9 可知:当基板厚度为 5 mm 时,降温速率最小;当基板厚度为 10 mm 时,降温速率显著增大;当基板厚度达到 15 mm 后,降温速率增大得不明显。因此,15 mm 可以作为本文电弧增材时基板厚度的最优选择。

#### 5 单道多层增材制造过程中温度场的变化

采用上述实验参数在基板厚度为 15 mm 的 45 钢板上模拟单道堆焊 10 层的温度场变化。根据之前的研究可知,在单道多层堆积过程中,除第 1 层外,其他层的层高基本一致,且约为第 1 层层高的

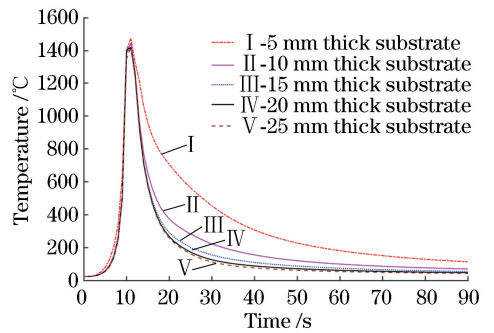


图 9 焊道边缘中点的温度随时间的变化

Fig. 9 Variation in temperature at the midpoint of weld bead edge with time

70%。在模型处理时,假设每层焊道的外轮廓都与第 1 层相同,只是将第 1 层焊道沿垂直方向上移焊道高度的 70%,则该实验参数下的焊道堆积模型如图 10(a)所示。焊道网格划分如图 10(b)所示,网格尺寸与单道模型相同。增材制造过程的扫描路径会对成形件尺寸精度有很大影响<sup>[13]</sup>,本文采用体生热热源,以成形精度较好的 S 型路径模拟焊道的堆积过程,每层焊道堆焊结束后冷却 30 s 再进行下一层堆焊。

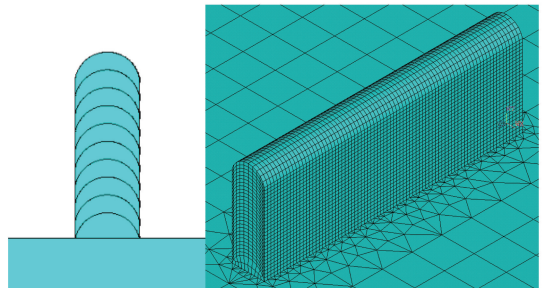


图 10 多层堆焊网格模型。(a)焊道模型;(b)焊道网格  
Fig. 10 Multi-layer welding grid model. (a) Model of weld bead; (b) grids of weld bead

#### 5.1 基板对多层堆积温度场的影响

增材制造完成后,在第 1 层焊道与基板相交的边缘线中点处测量该点的温度场随时间的变化规律,结果如图 11 所示。由该点的热循环曲线图可知:在增材制造前 4 层时,由于热源距离基板较近,影响明显,升温 and 降温速率均较大;随着堆积层数增多,热源与基板的距离增大,已堆焊层传递到基板上的热量逐渐减少,使得波峰温度不断降低,并且波峰间的温差不断减小;由于热积累效应波谷温度缓慢升高且趋于稳定。波峰与波谷的温差逐渐缩小,说明随着堆积层数增加,基板对堆焊层的影响逐渐减小。由图 11 可知,在第 4 层以后的堆焊中,热循环传递到第 1 层的热量不足以引起其微观组织和力学

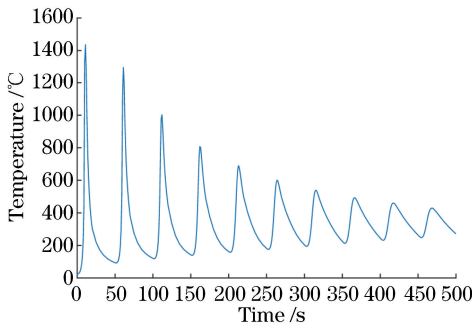


图 11 焊道边缘与基板交线中点的温度随时间的变化

Fig. 11 Variation in temperature at midpoint of intersection line of bead edge and substrate with time

性能的变化。因此,基板对前 4 层散热的影响最明显。

## 5.2 各层焊道温度场的变化规律

垂直于焊接方向,在第 2 层到第 5 层焊缝侧壁中心顶点处各取一点,其温度随时间的变化如图 12 所示。随着焊层增加,由于热积累效应,熔覆层的峰值温度逐渐升高,波谷温度缓慢升高。由图 12 可以看出后续熔覆层对已堆焊层温度的影响,在相同的冷却时间下,前几层的冷却速率较大,各层波谷温度基本一致,熔覆第 5 层以后不同焊层波谷温度相差逐渐明显,说明基板对前四层焊道的散热作用比较明显。当堆焊后一熔覆层时,前道焊层会再次被加热到熔化温度,形成熔池重熔,随着层数增加,各焊层波峰间的温度逐渐升高,且温差有缩小的趋势。由于堆焊高度增加,热量主要由上层缓慢向下层焊道及空气中传递,而基板的散热作用不断减小,热量堆积在各个焊层间。图 13 为堆焊 10 层时第 1 层到第 5 层各层波峰温度分布图,可知:在整个堆焊过程中,上层焊缝热循环中引起材料组织性能变化的峰值温度数量比下层多。熔覆第 10 层时热循环再加热效应使第 3 层微观结构发生再次结晶。通过上述

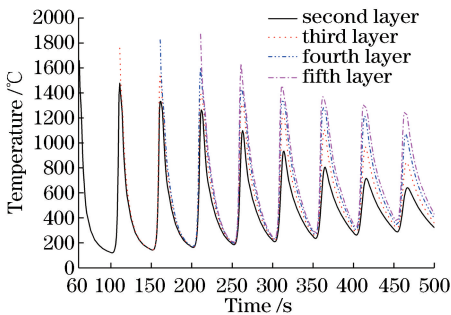


图 12 各焊层侧壁中心顶点处的温度随时间的变化

Fig. 12 Variation on temperature at peak of side wall center of each welding layer with time

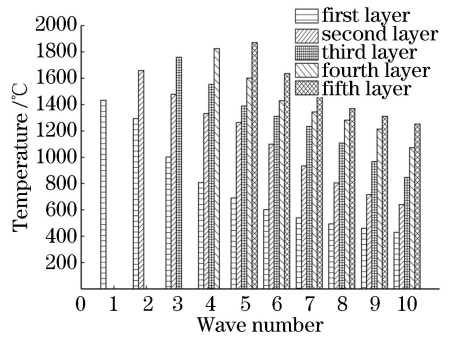


图 13 各层波峰温度分布图

Fig. 13 Temperature distribution of wave peaks in each layer

分析得到的多层堆积温度变化规律可为增材制造过程中层间等待时间的选取提供理论依据。

## 6 结 论

本文建立了 TIG 焊接过程中单焊道温度场的数值模型,采用生死单元法模拟了电弧增材制造过程中温度场的分布及变化规律,通过实验对比分析得到如下结论。

1) 通过模拟与实验相结合,验证了经过简化的物理模型以及修正的金属热物理参数能在一定精度上很好地应用于金属材料的有限元热力学分析,可以应用该方法进行多层多道电弧增材制造过程中温度场、应力场的模拟。

2) 通过对比分析基板厚度对电弧增材制造温度场的影响规律,得出 15 mm 可作为基板厚度的最优选择。

3) 分析多层焊道的温度场分布及变化规律后发现,基板散热对前 4 层焊道的影响比较明显,随着堆焊层数增加,上层熔覆层对已堆焊层的热影响范围增大。

上述增材制造过程温度的变化规律能够为碳钢材料在电弧增材工艺与锻、铣工艺一体化快速成形研究中,借助增材后余温选择合适的锻打时机来改善成形件的组织、性能提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Tofail S A M, Koumoulos E P, Bandyopadhyay A, *et al.* Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities [J]. *Materials Today*, 2018, 21(1): 22-37.
- [2] Yang Y Q, Chen J, Song C H, *et al.* Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts [J]. *Laser & Optoelectronics*

- Progress, 2018, 55(1): 011401.
- 杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011401.
- [3] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, *et al.* Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 39: 32-42.
- [4] Zeng Q, Zhu S W, Fu Z H. Effects of different welding processes on microstructure and mechanical properties of SUS301L-MT stainless steel joints[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031405.
- 曾强, 朱绍维, 付正鸿. 不同焊接工艺对 SUS301L-MT 不锈钢接头组织和力学性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031405.
- [5] Rodriguez N, Vázquez L, Huarte I, *et al.* Wire and arc additive manufacturing: a comparison between CMT and TopTIG processes applied to stainless steel [J]. Welding in the World, 2018, 62(5): 1083-1096.
- [6] Fan D, Huang Z C, Huang J K, *et al.* Three-dimensional numerical analysis of interaction between arc and pool by considering the behavior of the metal vapor in tungsten inert gas welding[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(10): 108102.
- 樊丁, 黄自成, 黄健康, 等. 考虑金属蒸汽的钨极惰性气体保护焊电弧与熔池交互作用三维数值分析[J]. 物理学报, 2015, 64(10): 108102.
- [7] Ding J, Colegrove P, Mehnen J, *et al.* Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts[J]. Computational Materials Science, 2011, 50(12): 3315-3322.
- [8] Ding J, Colegrove P, Mehnen J, *et al.* A computationally efficient finite element model of wire and arc additive manufacture [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70: 227-236.
- [9] Li S H. Numerical simulation on stress and deformation of TIG surfacing specimen based on SYSWELD[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(17): 145-147, 150.
- 李少海. 基于 SYSWELD 的 TIG 堆焊试件应力及变形数值模拟分析[J]. 热加工工艺, 2012, 41(17): 145-147, 150.
- [10] Hönnige J R, Williams S, Roy M J, *et al.* Residual stress characterization and control in the additive manufacture of large scale metal structures [M]// Holden T M, Muránsky O, Edwards L. Residual stresses 2016 ICRS-10. Materials research proceedings. USA: MRF, 2017, 2: 455-460.
- [11] Deshpande A, Xu L, Sun W, *et al.* Finite-element-based parametric study on welding-induced distortion of TIG-welded stainless steel 304 sheets [J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2011, 46(4): 267-279.
- [12] Ji Q, Xing Y F, Xu S. Numerical simulation of temperature field of Al/steel sheet CMT welding based on SYSWELD[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(21): 196-200.
- 冀晴, 邢彦锋, 徐岫. 基于 SYSWELD 的铝钢薄板 CMT 焊接温度场数值模拟[J]. 热加工工艺, 2017, 46(21): 196-200.
- [13] Ge Y N, Wu M P, Mao Y Y, *et al.* Effect of scanning strategy on forming precision of titanium alloy by selective laser melting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 091403.
- 葛亚楠, 武美萍, 冒浴沂, 等. 激光选区熔化扫描策略对钛合金成形精度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 091403.