

DOI:10.11784/tdxbz201909064

Tandem-GMAW 电弧增材制造基层成型宽度 研究及热过程分析

石俊彪^{1,2}, 赵 昀^{1,2}, 陈树君^{1,2}, 迟 杏³

(1. 北京工业大学机械工程及应用电子技术学院, 北京 100124;

2. 北京工业大学汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心, 北京 100124;

3. 贵州装备制造职业学院机械系, 贵阳 550008)

摘 要: 电弧增材制造网格壁板以逐层堆积的方式直接在基板上沉积网格结构, 能够极大地提升生产效率并降低成本。在网格壁板的成型过程中, 基层的成型和整体的热过程决定了上层是否能成功完成成型。本文针对不同板厚作为基板的基层成型不规律问题, 利用不同环境因素下的试验得到其成型熔宽及余高数据, 根据得到的数据建立有限元填充模型。采用有限元模拟方式研究基板厚度、预热温度、距边缘距离等关键参数对电弧增材制造网格壁板的影响规律。试验结果表明: 随着基板厚度的增加, 基层成型宽度明显减小; 随着预热温度的升高, 在 80 ℃ 温度以内宽度增加不明显, 当预热温度超过 120 ℃, 基层成型宽度出现明显的增加; 在边缘距离大于 20 mm 时, 边缘距离对成型宽度基本没有影响; 边缘距离小于 20 mm 时, 随着边缘距离的减小, 成型宽度逐渐加大, 在边缘距离为 10 mm 时整个边缘基板的温度达到 500°, 基板塌陷倾向明显。最后通过上述试验结果, 应用热力学理论构建基层成型数学模型, 结合统计学最小二乘法, 辅助确定热源参数后采用有限元模拟的方法可以进行不同工艺参数及板厚的热过程研究, 这种创新性结合热力学解析解、统计学方法和简单实测解, 可以有效地减少电弧增材基层热过程分析时间, 提升成型研究效率。

关键词: 电弧增材制造; 热过程分析; 基层宽度; 热过程解析解

中图分类号: TG4

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2020)09-0910-07

Base-Layer Research on the Forming Width and Thermal Process for Tandem-GMAW Wire Arc Additive Manufacturing

Shi Junbiao^{1,2}, Zhao Yun^{1,2}, Chen Shujun^{1,2}, Chi Xing³

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Components, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Mechanical Department of Guizhou Equipment Manufacturing Vocational College, Guiyang 550008, China)

Abstract: The method for manufacturing grid panels that deposits material directly on the substrate layer by layer can considerably improve the production efficiency and reduce cost. In the process of forming grid panels, the formation of the base layer and the entire thermal process determine whether the upper layer can be successfully formed. The parameters of the finite element heat source model were generated by measuring the morphology of the base layer for wire arc additive manufacturing through different plate thickness experiments. The influence of substrate thickness, preheating temperature, and distance from the edge on the width of the base layer for wire arc additive manufacturing

收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2019-11-04.

作者简介: 石俊彪 (1987—), 男, 博士研究生, shibeard@emails.bjut.edu.cn.

通信作者: 陈树君, sjchen@emails.bjut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805013); 北京市教委科技一般项目 (KM201910005034).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51805013), the General Project of Science and Technology of Beijing Municipal Education Commission (No. KM201910005034).

was investigated by finite element simulation. The experimental results show that with the increase in the thickness of the substrate, the forming width of the base layer decreases significantly. With the increase in the preheating temperature, the width does not increase significantly when the temperature is within 80°C , whereas the width increases significantly when the temperature exceeds 120°C . The decrease in the distance from the edge has only a slight effect on the forming width beyond the range of 20 mm and gradually increases the forming width within the range of 20 mm. When the distance from the edge is 10 mm, the temperature of the entire edge base plate reaches 500°C , and the collapse tendency of the base plate becomes obvious. On the basis of the results of the experiments, the mathematical model of the formation of the base layer is established according to the thermodynamic theory to help determine the heat source parameters and combined with the statistical least square method. This novel prediction method can be extended to the analysis and study of the heating process of wire arc additive manufacturing with different process parameters and plate thicknesses.

Keywords: wire arc additive manufacturing; analysis of the thermal process; width of the base layer; analytical solution of the thermal process

航空航天结构中应用的铝合金网格壁板采用传统减材制造方式,产生了极大的材料和时间的浪费。电弧增材制造这一新兴的制造方式能极大地减少材料去除率,降低生产成本和周期,获得了广泛的关注和研究。

单壁墙结构作为网格结构壁板的基本组成单元成为研究者关注的对象^[1]。通过研究发现,在增材制造过程中,同一组工艺参数在上层能产生稳定的熔宽。但是在贴近基板的基层成型宽度产生了很大的变化,这使得连续成型的增材制造过程在靠近基板的基层出现了缩颈,缩颈行为得不到后续处理,往往会直接导致成型失败。

目前,大部分学者的研究主要采用统计学方法来拟合电弧增材基层成型工艺参数与成型尺寸之间的关系。统计学的方式通常没有涉及到成型热过程,只是在特定的试验环境下通过一系列主要参数试验数据之间的关系来拟合成型关系,往往只适用于相类似的环境温度场和热过程条件^[2-3]。这一方法对于热积累响应不明显的铁基材料非常适合,对于热积累非常敏感的铝合金材料并不适用。热环境的改变对于铝合金成型尺寸具有非常大的影响,然而目前对于网格壁板结构基层成型宽度预估和热过程分析的研究还鲜见报道^[4]。

另一类方法通常采用有限元模拟方式进行精确的计算和热影响过程分析,对于近焊缝区以及熔池内部的计算结果与实际情况相符。模拟过程包括建立三维模型、划分有限元网格、进行精确的有限元计算、热源模型与实际成型的校核等。模拟过程中时间和计算成本非常高,基本上以天为单位。对于还需要进行机加工处理的铝合金电弧增材制造进行基层宽度计算和热过程分析时间成本太高。现在尚无对于

基层成型宽度进行快捷计算和热过程分析的有效解决办法,这一问题严重制约了电弧增材制造后续研究的进行。

本文采用 Tandem-GMAW 的方法进行电弧增材制造,能满足网格壁板对于成型墙体宽度的要求,并且极大地降低了轨迹规划的难度。针对铝合金双丝脉冲 MIG 电弧增材制造,本文探究了基板厚度、预热温度、边缘距离这 3 个温度场关键影响因素对网格壁板基层成型宽度的影响。同时,本文采用能完全反映热过程的热力学解析计算法构建宽度预估模型,结合简单有限元模拟的方式分析基层成型热过程,实现了对于基层宽度快捷预估计算,将获得基层宽度成型工艺参数的时间从以天为单位减少到以小时为单位。这一方法可以扩展到不同工艺参数及基板厚度下电弧增材制造基层成型宽度预估和基层成型热过程的分析。

1 试验方法及有限元建模

1.1 试验设计

试验采用双丝脉冲 MIG 焊接电源及 IGM 机器人,基板板厚分别为 5 mm、6 mm、8 mm、10 mm。不同板厚应用相同的工艺参数成型基层焊道以及预热试验。

所用堆积工艺参数如表 1 所示,后续计算及模拟都采用表 1^[5]所示试验参数。

1.2 双椭球热源模型

热计算采用双椭球热源模型作为模拟热源,该热源模型已被学者证实能够满足计算及使用要求。该模型的电弧中心前端和后端的能量密度分布计算表达式^[6]为

表 1 试验工艺参数

Tab.1 Process parameters for the experiments

基板规格/(mm × mm × mm)	电弧电压/V	电弧电流/A	送丝速度/(m · min ⁻¹)	堆积速度/(cm · min ⁻¹)	效率因子
300 × 300 × 5	18.9	111	5.1	60	0.85
300 × 300 × 6	18.9	111	5.1	60	0.85
300 × 300 × 8	18.9	111	5.1	60	0.85
300 × 300 × 10	18.9	111	5.1	60	0.85

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}qf_f}{\pi\sqrt{\pi}a_fbc} \exp\left[-3\left(\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right] \quad (1)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}qf_r}{\pi\sqrt{\pi}a_rbc} \exp\left[-3\left(\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right] \quad (2)$$

式中: $q = \eta UI$, q 为焊接热输入, η 为热源有效系数, $\eta = 0.85$, U 为电弧电压, I 为堆积电流; a_f 为前端的半轴长度; a_r 为后端的半轴长度; b 为热源宽度; c 为热源深度; f_f 、 f_r 为热量分布函数, $f_f = 0.6$, $f_r = 1.4$.

为了优化基层成型过程温度场计算,作出如下假设:材料热物理性能参数统一采用基板材料参数;材料在熔化和凝固时相变潜热相同;试验过程中对基板与工作台进行隔离,忽略基板底层的热传导;采用复合散热系数综合考虑堆积层及基板与周围环境的热辐射和对流作用;模拟过程中热源模型不变;由于基体金属对基层熔池流动的限制作用,忽略熔池流动对成型形貌的影响^[7].

1.3 热源模型校核

为验证模型的合理性,根据表 1 的工艺参数及成型结果设置热源模型参数进行模拟,同时采用热电偶测量距离焊缝边缘 5 mm 处热循环曲线. 在软件中采集相同位置处的模拟结果,结果如图 1 所示. 由结果可知,在升温到最高温度的过程中,两条曲线很好地重合,说明热源模型能很好地反映在熔化成型过程中的热源特性,但是模拟的最高温度比测量温度高. 热源模型是通过实际测量焊缝成型形貌参数来获得热源模型参数,并且试验结果显示,热源模型完全覆盖

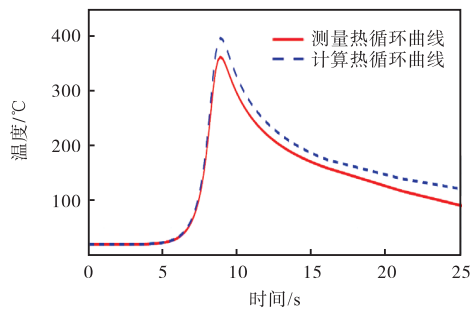


图 1 电弧增材制造基层成型计算及实测热循环曲线

Fig.1 Thermal cycle curves of the simulation and experiment of the base layer for wire arc additive manufacturing

焊缝模型,整体的成型趋势与实际情况下起弧点不能完全铺展、收弧点完全铺展并且熔深相对较深完全相符. 在冷却过程中由于实际基板热过程对流散热比较多,而在模拟的过程中忽略了对基板的热传导,所以实测的温度相对较低. 但是对较大的基板来说,对焊缝宽度的影响并不很大,因此相对来说仿真的热源模型是准确的^[8].

1.4 网格划分及材料热物理参数

图 2 所示为基层成型网格模型,图形上方是堆积层的网格划分,为兼顾计算精度和计算时间,采用等网格划分方式,在计算的时候将堆积层及热影响区的网格密度设置为 2 级细化,为 0.5 mm,单元类型为八节点六面体单元.

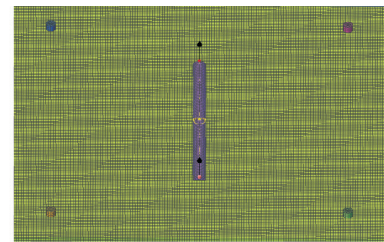


图 2 基层成型网格模型

Fig.2 Mesh model of the formation of the base layer

试验所用焊丝牌号为 ER 2319,直径为 1.2 mm,基板为 6060 铝合金,其熔点为 659 °C. 在所用软件 simufact-welding 中给出了材料参数,材料密度为 2.7 mg/mm³,泊松比为 0.330. 不同温度下的热导率及比热容参数曲线如图 3 所示.

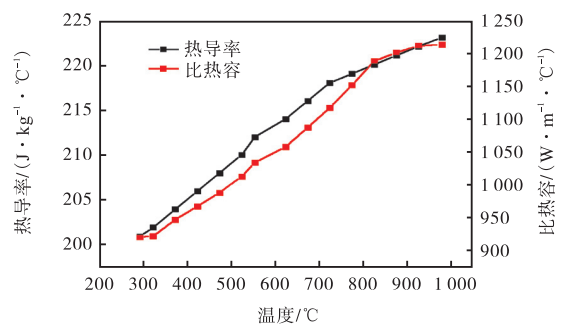


图 3 材料热物理参数

Fig.3 Material thermophysical parameters

2 试验结果及分析

2.1 基板厚度对基层成型宽度的影响

试验采用 4 种常用厚度基板成型基层焊缝, 采用激光位移传感器测量焊缝不同位置处的熔宽和余高并取平均值, 所得到的熔宽及余高数值如图 4 所示. 由图 4 可以看到, 不同厚度基板可以产生不同形貌的焊道. 随着基板厚度的增加, 熔宽减小, 余高增大. 在整个热传导的过程中, 主要的热传导方向是垂直基板厚度方向. 基板厚度较小时, 热积累比较严重, 更多的两相熔合区温度上升到熔化温度以上, 熔宽明显增加, 相应的焊道余高减小.

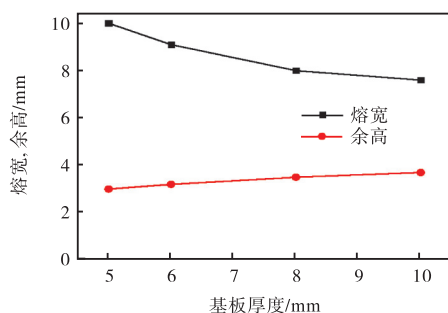


图 4 不同厚度基板成型熔宽和余高

Fig.4 Bead width and penetration of weld bead formed on substrates with different thicknesses

2.2 预热温度对基层成型宽度的影响

采用的预热试验设备如图 5 所示, 在 8 mm 厚基板上进行不同预热温度的试验, 进行 3 次试验得到熔宽和余高数据取均值. 试验结果如图 6 所示. 由试验结果可以看到基层堆积宽度是随着预热温度增加逐渐增加的, 考虑到成型过程中熔池液态金属受表面张力的影响成型并不均匀, 将 0.5 mm 的增加量作为一个实际的参考阶段. 可以看到: 在有预热的情况下, 当预热温度在 80 °C 以下时, 熔宽变化不大, 120 °C 以上时熔宽增加 1 mm, 出现明显的增加. 这表明在预热温度达到 120 °C 这一温度区间内, 在散热方向上温度梯度快速下降, 热输入不能快速散失, 热积累快速



图 5 预热试验设备

Fig.5 Experimental setup for preheating

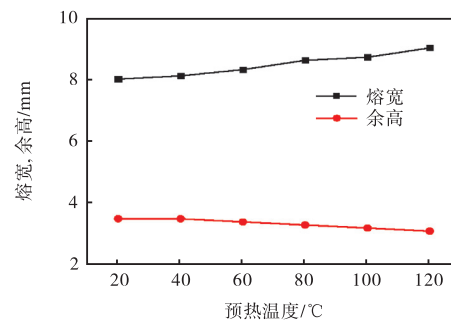


图 6 不同预热温度时的熔宽和余高

Fig.6 Bead width and penetration at different preheating temperatures

导致焊道外层的熔合层熔化, 从而达到一个新的动态热平衡状态.

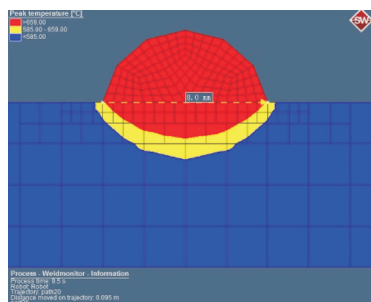
通过预热试验得到可参考的熔宽和余高数据, 对沉积层进行填充金属模型构建、网格划分和有限元模拟, 得到热过程模拟结果如图 7 所示. 由图 7 可见, 在 80 °C 以下的预热温度中, 焊缝整体的形貌变化不大, 在 80 ~ 120 °C 之间, 熔宽和熔深在缓慢增加, 到 120 °C 预热温度整个的截面变化已经比较明显. 对于连续成型的电弧增材制造过程, 参考这一预热温度可以对整个网格壁板成型过程的路径规划具有指导作用, 通过规避温度高于 120 °C 的温度场区域, 可以有效地控制整个基层成型的形貌一致性, 提升整个增材成型的成型质量.

2.3 边缘距离对基层成型宽度的影响

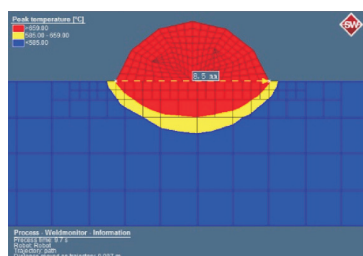
铝合金对热积累作用非常敏感, 在基板靠近边界位置, 与空气的热对流散热远远小于铝合金本身的热传导过程, 因此在基板边缘会产生热积累, 导致在边缘位置成型基层焊道熔宽增大, 严重时会使整个边缘结构出现过热下淌. 因此对于边界距离的控制也成为电弧增材基层成型一个重要的成型条件.

通过设计双边缘距离试验获得如图 8 所示的熔宽及余高关系图. 从两侧双边缘试验熔宽结果可以看到, 随着距离边缘距离减少, 在边缘距离大于 20 mm 时, 整个熔宽的增加并不明显; 在 20 mm 以下, 整个熔宽快速增大. 热模拟曲线如图 9 所示, 在 10 mm 边缘距离时, 整个边缘区域温度达到 500 °C.

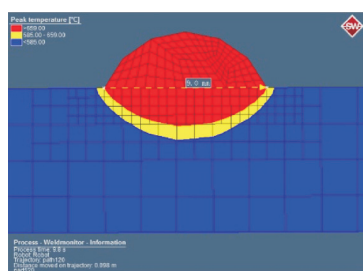
采集不同边缘距离有限元模拟距离焊道 5 mm 位置处的温度曲线如图 9 所示. 边缘距离越小的情况下, 所能达到的最高温度越高, 同时在整个计算周期中整体处于高温状态, 如边缘距离 10 mm 和 20 mm 情况. 在 20 mm 边缘距离以上时, 整个温度基本达到 400 °C 以下, 并且随边缘距离增大、冷却加快, 这之前进行的预热温度对熔宽的影响稍有不同.



(a) 室温 20 °C 成型截面



(b) 预热 80 °C 成型截面



(c) 预热 120 °C 成型截面

图 7 不同预热温度模拟截面

Fig.7 Simulated cross-sectional diagrams of different preheating temperatures

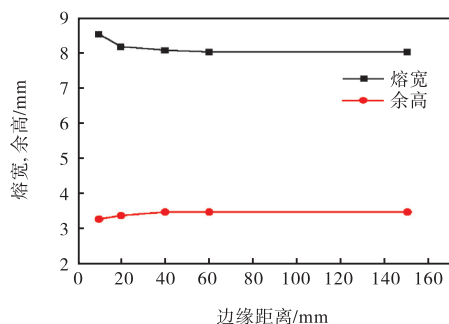


图 8 边缘距离对熔宽和余高的影响

Fig.8 Effect of edge distance on bead width and penetration

单边缘试验的结果与双边缘试验结果类似,在靠近边缘的一侧出现了热量的累积,导致了温度的升高,距离 5 mm 跟踪点的热循环曲线与双边缘距离相类似,相对于双边缘距离两侧高温区相对称的情况,单侧边缘一侧的高温区范围更大.但是单侧边缘冷却速度更快,如图 9 中单侧边缘 10 mm 热循环曲线

所示.这一热过程的分析清晰地界定电弧增材制造在边缘处工艺参数的制定以及路径设计极限位置^[9].

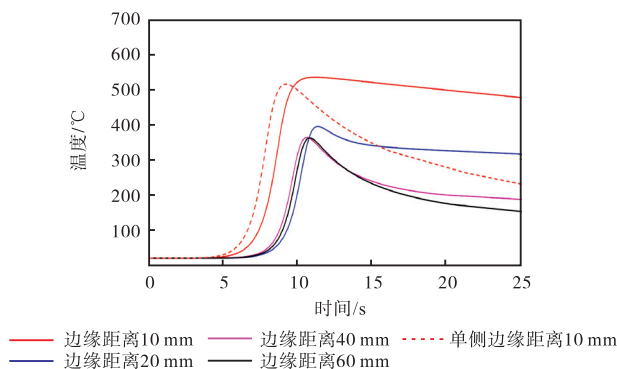


图 9 不同边缘距离热循环曲线

Fig.9 Thermal cycle curves of points with different edge distances

3 传热理论计算模型

有限元模拟能很好地预测熔宽数据,但是对于热源模型参数的依赖比较大.为了解决这一问题,从热力学基础理论出发,引入热过程解析解的方法来获得基本热源参数.热力学解析解的方程中包含了对于熔池周边温度场的热传导过程,但是一些假设的存在使得解出的结果对于熔池附近温度场的计算出现较大的偏差^[10-11].

由于电弧增材制造对于整个热源及成型宽度的要求精度并不高,因此在微分方程解的基础上对计算结果进行修正,可以实现对于熔池尺寸和热源参数的预估.理论解析解是通过求解热传导微分方程而获得连续的精确解,其优势在于解析公式中每个变量具有其直观物理意义,计算时间短,本文采用传统热力学解析解假设.

依据傅里叶定律和能量守恒定律建立热传导微分方程^[12-13],即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

通过傅里叶变换以及假设铝合金高速焊接情况下的初始条件,求解微分方程得

$$T(r, t) = \frac{q}{vh(4\pi c_p t)^{1/2}} \exp \left[-\left(\frac{r^2}{4at} + bt \right) \right] \quad (4)$$

当 $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 时, $\frac{r^2}{4at_m} = \frac{1}{2} + bt_m$.

为简化计算,暂不考虑表面散热,则将 $t_m = \frac{r^2}{2a}$ 代入式(4)解得^[11]

$$T_m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{q}{vc\rho hr} = \frac{0.242q}{vc\rho hr} \quad (5)$$

根据传热学理论结合焊接条件推导出最高温度解析式(5). 由式(5)可以解得基层宽度的一半 r 的表达式如式(6)所示. 由理论解析解计算得到的数据与实测数据和模拟数据如表 2 所示. 由表 2 可见解析解的理论有较大偏差. 将解析解取为自变量, 实测值取为因变量, 利用最小二乘法求得自变量和因变量之间误差的最小平方和. 对熔宽进行拟合参数的求解^[14-15], 获得修正后计算宽度公式如式(7)所示.

$$r = \frac{0.242q}{vc\rho hT_m} \quad (6)$$

$$r = \frac{0.107q}{vc\rho hT_m} + 10.16 \quad (7)$$

式中: r 为基层宽度的一半; $q = \eta UI$, η 为功率因子, U 为电弧电压, I 为堆积电流; v 为堆积速度; c 为比热容; ρ 为密度; h 为板厚; T_m 为熔点温度.

表 2 3 种方式得到的成型宽度结果

Tab.2 Forming width results of three methods mm

基板宽度	解析解	实测值	数值解
5	11.69	10.0	10.2
8	7.30	8.0	8.1
10	6.00	7.5	7.4

通过拟合修正可以得到直接用于计算的简捷可用宽度预估公式, 可以直接用来计算在不同板厚及热输入线能量情况下的成型宽度^[11]. 通过这个成型宽度的判定可以初步确定有限元模拟的基本热源模型参数 b . a_r 、 a_f 对熔深和熔宽的影响很小, a_r 、 a_f 则按文献[16]的建议取值, 即 $a_r = 2b$, $a_f = b/2$. c 的初值为 $h/2$, 取值范围为初值的 $\pm 20\%$. 根据不同的工艺方式进行简单的一次工艺试验进行校核^[14]. 这一估算方式可以用较简单的方法得到电弧增材制造基层的成型工艺参数和直观的成型热过程, 帮助工艺制定者摆脱实际工艺试验和过往经验积累的方式来确定整个热过程.

4 结 论

不同基板结构下, 电弧增材制造第 1 层的成型宽度有很大的不同, 通过热力学解析解的方式可以得到在不同工艺条件下基层的成型宽度, 参考成型宽度可以调整有限元分析的热源模型及相关系数. 准确的热源模型对于基层成型信息、温度场分布、增材热过程的研究提供研究方法. 本文获得主要的结论如下.

(1) 单组试验结果表明, 随着基板厚度的增加, 基层成型宽度明显减小, 相应的余高逐渐加大. 预热

温度大于 120°C 的情况下, 基层成型宽度逐渐增加.

(2) 焊道距离、基板边缘距离极大地影响了热传导和温度场. 在文中所研究的情况下, 双侧边缘距离减小到 20 mm 时已经对基层成型宽度有较大影响, 整个基板温度处于 500°C 高温状态. 单侧靠近边缘的情况相对热传导较大, 达到最高温度后相对冷却更快速.

(3) 通过热力学理论以及数学方法可以得到简捷的计算公式来估算电弧增材制造基层成型宽度及相关热源参数, 这一方法可以应用于电弧增材制造不同工艺参数及板厚情况.

参考文献:

- [1] Shi Junbiao, Li Fang, Chen Shujun, et al. Effect of in-process active cooling on forming quality and efficiency of Tandem GMAW-based additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5/6/7/8): 1349-1356.
- [2] Shi Junbiao, Li Fang, Chen Shujun, et al. T-GMAW based novel multi-node trajectory planning for fabricating grid stiffened panels: An efficient production technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 238(20): 117919.
- [3] 胡建文. GMAW 快速成形熔敷焊道尺寸神经网络建模和参数预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Hu Jianwen. Weld Bead Size Modeling and Parameter Prediction for GMAW-Based Rapid Manufacturing Through a Neural Network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).
- [4] Li Fang, Chen Shujun, Shi Junbiao, et al. Evaluation and optimization of a hybrid manufacturing process combining wire arc additive manufacturing with milling for the fabrication of stiffened panels[J]. Applied Sciences, 2017, 7(12): 1233.
- [5] 许芙蓉, 杨立军, 李 桓, 等. 焊接参数对铝脉冲 MIG 焊亚射流过程控制的影响[J]. 天津大学学报 2009, 42(10): 855-860.
Xu Furong, Yang Lijun, Li Huan, et al. Influence of welding parameters on process control of meso-spray transfer in pulsed-MIG welding of aluminum[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(10): 855-860 (in Chinese).
- [6] 赵慧慧. GMAW 再制造多重堆积路径对质量影响及优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Zhao Huihui. Path Influence on Quality and Path Optimization Method in Multiple Deposition of GMAW Re-

- manufacturing[D]. Harbin : Harbin Institute of Technology, 2012(in Chinese).
- [7] 李 力, 胡绳荪, 殷凤良, 等. 等离子弧焊接熔池温度场的三维数值模拟[J]. 天津大学学报, 2007, 40(10): 126-130.
- Li Li, Hu Shengsun, Yin Fengliang, et al. 3-D numerical simulation of temperature field in moltenpool of plasma arc welding[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(10): 126-130(in Chinese).
- [8] 柏久阳, 王计辉, 林三宝. 铝合金电弧增材制造焊道宽度尺寸预测[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 87-90.
- Bai Jiuyang, Wang Jihui, Lin Sanbao, et al. Width prediction of aluminium alloy weld additively manufactured by TIG arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(9): 87-90 (in Chinese).
- [9] 陈翠欣, 李午申, 王庆鹏, 等. 焊接温度场的三维动态有限元模拟[J]. 天津大学学报, 2005, 38(5): 466-470.
- Chen Cuixin, Li Wushen, Wang Qingpeng, et al. Three-dimensional dynamic FEM simulation of temperature distribution for welding process[J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(5): 466-470(in Chinese).
- [10] 张文钺. 焊接传热学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- Zhang Wenyue. Welding Heat Transfer[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989(in Chinese).
- [11] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299-305.
- [12] Geng H, Li J, Xiong J, et al. Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2016, 22(6): 1-12.
- [13] Rosenthal D. The theory of moving source of heat and its application to metal treatments[J]. Transactions of the ASME, 1946, 43(11): 849-866.
- [14] 张修智, 黄时鸿. 薄板高强铝合金脉冲焊接热计算分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1982(1): 98-109.
- Zhang Xiuzhi, Huang Shihong. A study on heat distribution in pulsed arc welding process on high-strength aluminium alloy thin plate[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1982(1): 98-109(in Chinese).
- [15] Wu B, Ding D, Pan Z, et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in wire arc additive manufacturing of Ti6Al4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250: 304-312.
- [16] 顾 颖, 李亚东, 强 斌, 等. 基于 ANSYS 优化设计求解双椭球热源模型参数[J]. 焊接学报, 2016, 37(11): 15-18.
- Gu Ying, Li Yadong, Qiang Bin, et al. Parameter optimization of double ellipsoidal heat source model by ANSYS[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(11): 15-18(in Chinese).

(责任编辑: 金顺爱)