

旁路耦合微束等离子弧焊增材制造的热过程

 $余淑 <math>{\overline{x}}^{1, \boxtimes}$ 程能 ${\hat{x}}^{1}$ 黄健 ${\hat{x}}^{2}$ ${\hat{x}}^{2}$ ${\hat{x}}^{2}$ ${\hat{x}}^{2}$ ${\hat{x}}^{2}$

1 兰州理工大学机电工程学院,兰州 730050

2 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室 兰州 730050

针对旁路耦合微束等离子弧焊电弧增材制造中的热物理过程 利用 K 型热电偶测量堆垛过程中不同焊接速度、不同旁路电流和不同堆垛顺 序下的热循环曲线,分析研究堆垛成型时各参数对热过程的影响。结果表明:随着焊接速度的增大,母材热输入减小;在合适的旁路电流区间内, 增加旁路电流,母材热输入减少;且同向堆垛散热性要优于往复堆垛。精确控制旁路电流、合理规划堆垛路径可较好地控制旁路耦合微束等离子 弧焊电弧增材制造的热过程。

关键词 电弧增材制造 旁路耦合微束等离子弧焊 热过程 中图分类号: TG475 文献标识码: A

Thermal Process of Additive Manufacturing Double-electrode Micro-plasma Arc Welding

YU Shurong $^{1,\boxtimes}$, CHENG Nengdi 1 , HUANG Jiankang 2 , LI Nan 2 , FAN Ding 2

1 School of Mechanical and Electrical Engineering , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050

2 State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metals , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050

The thermal physical process of bypass coupling micro plasma arc welding in additive manufacturing process was studied. Concretely , the thermal cycle curves were measured by K type thermocouple at various welding speeds , bypass currents and stacking sequences in stacking forming. And the influence of each parameter on the thermal process was analyzed. The results show that the heat input of the base metal declines with the increase of welding speed. In appropriate range of bypass current , enlarging the bypass current can reduce the heat input of the base metal. Meanwhile , the unidirectional stacking shows better heat dissipation than reciprocating stacking. The control of thermal process of bypass coupling micro plasma arc welding in additive manufacturing can be realized by precise control of bypass current and reasonable plan of stacking path.

Key words wire arc additive manufacture , double-electrode micro-plasma arc welding , thermal process

0 引言

电弧增材制造(Wire arc additive manufacture, WAAM) 技 术是一种利用电弧将焊丝熔积成型的新型制造方法,基本原 理是"分层制造 逐层堆积"。该技术首先建立零件模型 接 着将其分层处理,设置好每一层的焊接路径,最后使用电弧 焊接方法 沿着设定路径将焊丝熔积成型^[1]。WAAM 成型件 致密度高、生产效率高、成本低 特别是在制备低精度的大型 件时其具有不可比拟的优势 但堆垛过程中的反复热循环造 成较大的残余应力与变形 影响了制备零件的成型精度。因 此,WAAM 热过程成为当前学术界研究的热点。Mughal 等[25]采用有限元模拟的方法研究了以电弧为热源的单层沉 积制造中热应力分布及其变形,并进一步分析比较了气体保 护焊(Gas metal arc welding, GMAW) 成型时间隔冷却和连续 沉积的热量积累和变形情况。张广军等^[6-7]对 GMAW 堆积 时的温度场和应力场分布进行了有限元模拟 研究了堆积长 度、道间间隔时间、不同堆积顺序等过程参数对堆积过程的 影响规律,分析了不同堆积方向下的热循环特点。这些研究 更注重于数值分析方面,对于试验研究,特别是使用何种电 弧方法来进行增材制造讨论较少 因此有必要对电弧增材制 造的热过程进行更进一步的试验研究。

本实验在张裕明教授所发明的旁路耦合电弧焊(Double-

electrode gas metal arc welding ,DE-GMAW)^[8-9]的基础上 提出 了旁路耦合微束等离子弧焊(Double-electrode micro-plasma arc welding ,DE-MPAW)方法来进行电弧增材制造的研 究^[10]。在利用 K型热电偶测量 DE-MPAW 热特性的基础 上,针对电弧增材制造过程中的单道多层的堆垛顺序,即同 向堆垛和往复堆垛的热特性进行了试验测量,分析了堆垛顺 序、旁路电流对增材制造热过程的影响,获得了 DE-MPAW 在增材制造过程中的热物理特性。

1 实验

1.1 DE-MPAW 原理

图 1 为旁路耦合微束等离子弧焊方法示意图 ,其中 I_m 为 母材电流 J_p 为旁路电流 J 为总电流 ,其关系为 I = I_m + I_p ,即 总电流为母材电流与旁路电流之和。在焊接过程中 ,微束等 离子焊枪与工件间产生主路电弧 ,旁路焊丝与焊枪间产生旁 路电弧。这样电流从焊机工件正极流出后 ,一部分流入母 材 ,另一部分经过电流分配器通过旁路焊丝分流。通过调节 电流分配器 ,来改变旁路电流 I_p 在总电流不变的情况下 ,实 现母材电流 I_m 可调 ,从而有效控制母材热输入。试验中 ,焊 机采用 LHM-50 等离子弧焊机 ,旁路送丝机选用 WF-007A 送 丝机 ,电流分配器选用 AMR-300 型变阻器。

This work was financially supported by the Natural Science Foundation of China (51665034) .

基金项目: 国家自然科学基金(51665034)

旁路耦合微束等离子弧焊增材制造的热过程/余淑荣等



图1 DE-MPAW 原理图

Fig.1 Schematic diagram of DE-MPAW

1.2 DE-MPAW 的增材制造过程

在旁路耦合微束等离子弧焊的试验基础上,利用其来进 行电弧增材制造的研究,开展如图2所示的DE-MPAW堆垛 过程分析,其堆垛过程为:利用微束等离子弧熔化填充焊丝, 使其沿着设定路径逐层堆积,最终得到所需试样,在堆垛过 程中,每层会经历复杂的热循环作用,测量堆垛成型时温度 的变化,研究其热物理过程。



图 2 DE-MPAW 堆垛过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of DE-MPAW stacking process

试验中利用高速摄像拍摄了焊接过程的电弧形态和熔 滴过渡图像,并进行分帧处理,如图3所示。从图3可以看 出,电弧呈"柱状",且能量集中;熔滴过渡属于自由过渡,熔 滴在各种力的综合作用下,沿着顺时针方向过渡到熔池中。



图 3 电弧形态和熔滴过渡图 Fig.3 Arc shape and droplet transition diagram

1.3 电弧增材制造中热过程测试

图 4 为旁路耦合微束等离子弧焊试验系统,利用该试验 系统来进行单道试样及单道多层试样的堆焊。该系统是利 用传感器将焊接中电流、电压信号传输到采集卡上,再由采 集卡将数据传到电脑上;视频采集则是由 CCD 摄像机、采集 卡和视频采集软件共同完成;而热信号的采集系统由热电 偶、温度采集模块、采集卡及相应的采集软件共同构成。计 算机用于控制工作台的移动、调节焊接中工艺参数,同时收 集并记录堆垛过程中的热循环数据。



图 4 DE-MPAW 试验系统 Fig.4 Test system of DE-MPAW

图 5 为热过程测试实物图,测量热循环曲线时,在母材 上选择合适的测温特征点,采用焊偶仪将 K 型热电偶焊接在 特征点处,焊接开始后,利用测温软件 Adam.net Utility 采集 温度数值并保存。图 6 为堆垛成型时测温特征点的位置示 意图,其中,A、B、C 三点距焊缝中心线分别为 10 mm、20 mm、 30 mm。



图 5 热过程测试实物图 Fig.5 Physical diagram of thermal process test



图 6 测温点位置示意图

Fig.6 Schematic diagram of points or temperature measurement

试验中,选择离子气流量1 L/min,保护气流量10 L/ min 其他工艺参数根据不同试验目的作出相应改变。旁路

163

材料导报(A) 2019 33(1):162-166

耦合微束等离子弧焊试验所用基板为 304 不锈钢,尺寸为 200 mm×100 mm×3 mm。试验前,用砂纸将基板表面打磨光 亮,并用丙酮清洗。试样是以直径为 0.8 mm 的 ER304L 不锈 钢焊丝为成形材料,其成分如表1 所示。

表1 焊丝化学成分(质量分数/%)

Table 1	Chemica	l composit	tion (mas	s fraction	/%) of w	elding wi	e
С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Fe
Max	Max	1.00	Max	Max	8.00	18.5	
0.06	0.20	—	0.02	0.02	—	—	Margin
0.06	0.50	2.00	0.05	0.02	11.00	19.00	

2 结果与分析

2.1 DE-MPAW 的热特性

为分析不同旁路电流、焊接速度对焊接热输入的影响, 在母材上进行单道试样的堆焊,同时测量其热循环曲线。表 2为确定的焊接工艺参数,分别采用 80 mm/min、100 mm/ min、120 mm/min 的焊接速度进行试验。图 7 为焊接速度为 120 mm/min 时各测温点的热循环曲线,可以看出,单道堆焊 的热循环曲线呈现单个波峰分布,当热源接近测温点时温度 快速上升,当到达与测温点平齐时温度升到最高,随后慢慢 降低;同时,测温点距热源越远,其热循环曲线越低。

表 2 不同焊接速度下的焊接工艺参数

Table 2 Parameters of welding process under diverse welding speeds					
Paran	neter	Total current I/A	Bypass current I/A	Wire feed rate $v_1 / (m \cdot min^{-1})$	
Valı	ıes	42	5	2	



图 7 各测温点的热循环曲线

Fig.7 The thermal cycle curves of each temperature measuring point



图 8 不同焊接速度下各点的峰值温度变化

Fig.8 Peak temperature variations of each welding point under diverse welding speeds

图 8 为不同焊接速度下各测温点的峰值温度变化曲线。 从图 8 中可以看出,随着焊接速度的提高,测温点峰值温度 逐渐降低。这是由于焊速越快,热源对母材作用时间越短, 母材热输入也相应减小;同时 图 8 中 A 点的降幅最大 ,B 点 次之 C 点最小 说明距离焊缝越远 ,焊接速度对其热输入的 影响在逐渐减弱。

为分析旁路电流对焊接热输入的影响,采用旁路电流分 别为0A、4A、9A、13A、15A进行单道堆焊,其余工艺参数 如表3所示。图9为所测得的不同旁路电流下各特征点的 峰值温度变化曲线。从图9中可以看出,在总电流保持不变 时,增大旁路电流,各点的峰值温度先是在小区间升高,随后 降低,即母材热输入减小。从整体趋势中可以看出,母材热 输入随着旁路电流增大而减小,这是由于旁路的分流作用, 使得流经母材电流减小,降低了母材电阻热,说明电阻热和 耦合电弧热对母材热输入减小的程度大于熔滴增加母材热 输入的程度。

表 3 不同旁路电流下的焊接工艺参数

Table 3 Parameters of welding process under diverse bypass currents

	8 P		- JI	
Parameter	Total current <i>I</i> /A	Wire feed rate $v_1 / (m \cdot min^{-1})$	Welding rate $v_2 / (\text{ mm } \cdot \text{min}^{-1})$	
Values	50	1.8	90	
60 0, 50 40 0, 20 0, 10 0, 10,			A point B point C point	
Peak				

$100 \ 0.0 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ I_p/I_m$

图 9 不同旁路电流下各点的峰值温度变化

200

Fig.9 Peak temperature variations of each welding point under diverse bypass currents

04

0 5

2.2 电弧增材制造堆垛过程的热分析

针对电弧增材制造过程,特别是 DE-MPAW 方法中的单 道多层堆垛的热过程,在母材上进行单道多层试样的堆垛, 并测量其热循环曲线。图 10 所示为典型堆垛试样。表 4 所 示为确定的工艺参数,变化的参数为旁路电流,分别为 4 A、 8 A、19 A。

表4 堆垛过程中的焊接工艺参数

Table 4 Parameters of welding process in stacking forming

Parameter	Total current <i>I</i> /A	Wire feed rate $v_1 / (m \cdot min^{-1})$	Welding rate $v_2 / (\text{ mm } \cdot \text{min}^{-1})$
Values	25	1.2	120



图 10 单道多层堆垛成形样: (a) 主视图; (b) 侧视图

Fig.10 Sample prepared by single-pass with multilayer stacking: (a) main view; (b) side view

图 11 为旁路电流为 4 A 时 A、B 两点的热循环曲线。从 图 11 中可以看出 ,A、B 两点的热循环曲线均由多个波峰和 波谷组成,且波谷的温度不断升高,表明在堆垛过程中,前一 层对后一层预热,后一层对前一层后热,波谷温度的升高说 明了预热温度在不断升高。同时 B 点的热循环曲线低于 A 点,这是由于 A 点距热源近的缘故。



图 11 A、B 点的热循环曲线

Fig.11 Thermal cycle curves of A and B points

假设 t₁₀₀为测温点在每次热循环中从最高温度下降 100 ℃所需的冷却时间 根据图 11 的热循环曲线 得到图 12 所示 的 A 点在每次热循环中的冷却时间 t₁₀₀随堆垛层的变化情 况。随着堆积层数增高 ,冷却时间 t₁₀₀整体趋势逐渐延长 ,冷 却速率反而降低 ,这是由于堆垛得越高 ,热积累越严重 ,冷却 速率则越低。



图 12 冷却时间随堆垛层的变化 Fig.12 The change of cooling time with the stacking layer

图 13 为旁路电流分别为 8 A、19 A 时 A 点的热循环曲 线。从图 13 中可以看出,旁路电流为 8 A 的热循环曲线要高 于 19 A 的。这表明在堆垛过程中,随着旁路电流的增大,母 材热输入反而减小。这是由于后一层对前一层的后热作用, 热量不断传递到母材上,但热输入的减小仍说明母材电阻热 和耦合电弧热对其热作用减小的程度大于熔滴增加热输入 的程度。



图 13 不同旁路电流下 A 点的热循环曲线

Fig.13 Thermal cycle curve of A point under different bypass currents

根据图 13 所示的不同旁路电流的热循环曲线,得到测温点 A 在不同旁路电流的冷却时间 *t*100 的变化情况,如图 14

所示。从图 14 可以看到,旁路电流为 19 A 的曲线要高于 8 A 的 即 19 A 的冷却时间大于 8 A 的 则 19 A 的冷却速率要 小于 8 A ,说明当旁路电流从 8 A 升到 19 A 时 ,测温点的冷却 速率反而降低。



图 14 不同旁路电流的冷却时间比较

Fig.14 The comparison of cooling time under different bypass currents

在母材上进行同向式和往复式两种堆垛方式,选用工艺 参数如表4所示,旁路电流均为4A。图15为同向堆垛和往 复堆垛时A点的热循环曲线,可以看出同向堆垛的热循环曲 线要低于往复堆垛的,表明同向堆垛的散热性优于往复堆 垛。这是由于同向堆垛时,每次起弧是从温度较低侧开始 的,因此散热较好,而往复堆垛时,热量不断积累,造成散热 性变差。



图 15 不同堆垛顺序下 A 点的热循环曲线

Fig.15 Thermal cycle curves of A points in different stacking orders

根据图 15 所示的不同堆垛顺序下的热循环曲线,得到 测温点 A 在不同堆垛顺序时的冷却时间 t₁₀₀ 的变化曲线,如 图 16 所示。从图 16 可以看出,同向堆垛时的冷却时间曲线 高于往复堆垛,即同向堆垛时的冷却时间长于往复堆垛的, 那么同向堆垛时的冷却速率要低于往复堆垛的。这表明不 同的堆垛方式下,其测温点在每次热循环下的冷却速率也不同。



图 16 不同堆垛顺序的冷却时间比较

Fig.16 Comparison of cooling time in different stacking orders

图 17 为同向堆垛和往复堆垛时 A 点的峰值温度变化曲

材料导报(A) 2019 33(1):162-166

线,可以看出不管是同向式堆垛,还是往复式堆垛,随着堆垛 层数的增加,各测温点的峰值温度先是迅速升高,随后缓慢 升高,最后达到一个较为稳定的状态,并有缓慢降低的趋势。 这是由于焊接刚开始时,母材温度较低,热源与母材之间的 温差较大,导热速率大,所以母材升温较快。随着母材温度 的升高,热源与母材之间的温差减小,导热速率减小。同时 由于母材温度的升高,增大了其与周围环境的温差,散热作 用增强,所以温度升高较为缓慢;并且,随着堆垛层数增加, 热阻增大,热源对母材加热作用进一步减弱,当散热量超过 热输入量时,母材的峰值温度就会降低。



图 17 不同堆垛顺序下 A 点的峰值温度曲线

Fig.17 Peak temperature variation of A point in different stacking orders

在电弧增材制造单道多层堆垛过程中,合适的旁路电流 可有效减少热输入,堆垛顺序也可影响堆垛的热过程。因此 在零件制造中,要较精确地控制旁路电流和合理规划行走路 径。

3 结论

(1)在旁路耦合微束等离子弧焊增材制造时,当提高焊接速度,母材热输入减小,且距离堆焊中心越远,焊接速度对热输入的影响逐渐减弱。

(2) 在总电流保持不变时 增大旁路电流,各点的峰值温度先是在小区间升高,随后降低,即母材热输入减小。从整



Shurong Yu graduated from Harbin Institute of Technology in 1991, and was assigned to serve in Lanzhou University of Technology in the same year. During this period, she obtained the master degree from Lanzhou University of Technology in 2000 and the doctor degree in 2007. She has published more than 40 journal papers as the first author, applied 4 national invention patents and 2 of them were authorized. The main research direction includes: material laser processing; Wire Arc Additive

 $Manufacture(\ WAAM)$, welding process control and by-pass coupling arc welding technology and so on. More than 10 scientific research projects have

体趋势看,母材热输入随着旁路电流增大而减小。且不同的 旁路电流使得母材的冷却速率也不同,同时随着堆积层数增加,母材冷却速率降低,说明该方法较适合电弧增材制造。

(3)同向堆垛、往复堆垛等堆垛顺序可影响堆垛的热过 程 不管是同向堆垛,还是往复堆垛,随着堆垛层数的增加, 各测温点的峰值温度先是迅速升高,随后缓慢升高,最后达 到一个较为稳定的状态,并有缓慢降低的趋势。一般情况 下,同向堆垛的散热性要优于往复堆垛,但同向堆垛时,测温 点冷却速率低于往复堆垛。

(4) 在旁路耦合微束等离子弧焊增材制造中,选择合适的旁路电流、规划合理的堆垛路径都可有效控制热输入,提高堆垛质量。

参考文献

- 1~ Geng H B , Xiong J T , Huang D , et al. Welding & Joining 2015(11) , 17(in Chinese) .
- 耿海滨 熊江涛 黄丹 痔.焊接 2015(11) ,17.
- 2 Mughal M P , Fawad H , Mufti R. Acta Mechanica 2006 ,183(1-2) 61.
- 3 Mughal M P , Fawad H , Mufti R. Numerical Heat Transfer A ,2006 ,49 (1) 95.
- 4 Mughal M P , Fawad H , Mufti R A. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part C: Journal of Mechanical Engineering Science , 2006 220(6) 875.
- 5 Mughal M P , Fawad H , Mufti R A , et al. Modelling Simulation Materials Science and Engineering 2005 ,13 ,1187.
- 6 Zhao Huihui, Zhang Guangjun, Fan Qing, et al. Transactions of The China Welding Institution 2011 32(2) A5(in Chinese).
 赵慧慧 张广军 范庆 等.焊接学报 2011 32(2) A5.
- 7 Zhao H H , Li H C , Zhang G J , et al. Review on Advanced Material Science 2013 33 402.
- 8 Li K H , Chen J S , Zhang Y M. Welding Journal 2007 86(8) 231.
- 9 Li K H , Zhang Y M , Xu P , et al. Welding Journal 2008 \$7(3) 57.
- Huang J K, Yang M H, Li T, et al. Journal of Shanghai Jiaotong University 2016 50(15), 1906(in Chinese).
 黄健康 杨茂鸿 李挺 等. 上海交通大学学报 2016 50(15), 1906.

(责任编辑 谢 欢)

been accomplished by her , including the National Science Foundation project and the international cooperation project of the Ministry of Education. She has guided over 20 master's degree students and over 100 undergraduates.

余淑荣, 兰州理工大学教授, 硕士研究生导师。1991 年毕业于哈尔 滨工业大学, 同年分配至兰州理工大学任教至今, 期间于 2000 年获兰州 理工大学硕士学位, 2007 年获博士学位。在国内外学术期刊上发表论 文 40 余篇, 申请国家发明专利 4 项, 其中授权 2 项。课题组主要研究方 向包括: 材料激光加工; 电弧增材制造、焊接过程控制及旁路耦合电弧焊 接技术等。负责完成科研项目 10 多项, 包括国家自然基金项目和教育 部国际合作项目。已培养出硕士研究生二十余名, 本科生百余名。