

# 悬空特征结构件电弧增材制造成形及算法优化

王天琪, 杨 壮, 李亮玉, 何俊杰  
(天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

**摘 要:** 将增材制造技术与弧焊机器人相结合, 针对具有悬空特征预制件增材制造焊接工艺进行研究. 首先针对预制件成形尺寸预测进行算法优化, 实现对成形高度及宽度预测; 针对悬空焊缝下淌现象, 研究焊枪倾斜角度对焊缝成形影响, 确定最优焊枪倾斜角度范围, 并设计试验对成形方法进行验证, 有效改善悬空焊缝表面成形质量, 然后在此基础上提出焊枪倾斜角度预测算法, 实现对悬空焊过程中焊枪倾斜角度的预测. 最后焊制具有悬空特征预制件验证预测算法及成形方法的准确性. 结果表明, 预制件表面成形质量较好, 成形尺寸误差小于 1 mm.

**关键词:** 弧焊机器人; 增材制造; 悬空特征; 尺寸预测; 焊枪倾斜角度

**中图分类号:** TG455      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400317

## 0 序 言

在船舶和航空等领域, 存在具有复杂形状及不易加工的曲形表面薄壁零部件如叶轮、叶盘及轮毂等, 采用传统方式不易加工、成本高且效率低<sup>[1-3]</sup>. 快速成形技术 (rapid prototyping, RP) 通过计算机辅助设计软件对零件三维模型进行离散化分层处理, 并与焊接机器人技术相结合实现电弧增材制造, 对材料进行层层堆积, 以降维手段直接生产样件, 相比于传统制造工艺更高效、材料利用率更高<sup>[4-7]</sup>.

Jayaprakash 等人<sup>[8]</sup>利用 MATLAB 代码实现了对预制件三维模型的切片处理及成形路径的生成, 并建立数学模型实现了对预制件成形高度的预测. 熊俊等人<sup>[9]</sup>进行了电弧增材制造特征零件的研究, 对悬垂熔池的受力进行了分析, 并讨论了送丝速度及焊接速度对倾角的影响. 国内学者在电弧增材制造 (WAAM) 方面的研究较多, 但是对具有悬空特征的预制件成形方法及焊接工艺方面的研究较少.

文中针对具有悬空特征的薄壁件成形进行研究. 首先在传统算法的基础上进行优化, 实现了在特定工艺参数下, 对预制件成形尺寸及悬空焊过程

中焊枪倾斜角度的预测; 然后研究了悬空焊过程中焊枪倾斜角度对预制件成形的影响, 对悬空焊缝进行路径规划, 改善了金属熔融液体下淌现象, 提高了预制件悬空焊缝处成形质量, 并设计试验对成形方法的有效性进行验证. 最后通过焊制具有悬空特征的薄壁零件验证成形方法及预测算法的准确性.

## 1 算法优化

薄壁件增材制造过程中由于成形形状的不同, 会存在部分焊缝层需采用悬空焊的方式进行堆积. 此时由于电弧压力、重力等作用力的存在, 导致焊缝在成形过程中会出现一定的尺寸误差, 因此通过建立数学预测模型, 对悬空焊过程中的焊枪倾斜角度及预制件成形尺寸进行预测并加以分析. 文中以如图 1 所示预制件成形过程中  $y=0$  截面焊接路径为例进行算法优化.

由于焊接过程中的不稳定性, 所以进行以下假设.

(1) 单位时间内焊丝熔化量相同, 且单焊道截面形状视为理想抛物线.

(2) 忽略熔池内浮力、表面张力以及洛伦兹力对焊缝层成形的影响.

(3) 由于电弧压力和重力等原因, 导致焊缝层出现上半部成形金属比下半部少, 但对模型计算的误差影响较小, 所以忽略此现象并假设焊缝成形截面曲率相同.

收稿日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1733125); 国家自然科学基金资助项目 (51875408); 天津市自然科学基金项目 (18JCYBJC18700); 天津市教委科研项目 (2017KJ080)

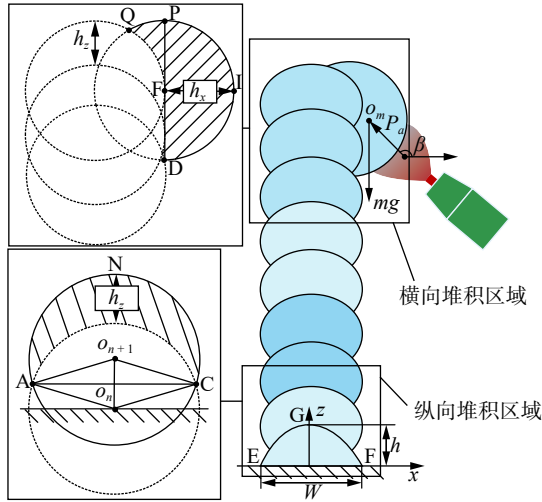


图 1 预制件尺寸预测模型

Fig. 1 Preform size prediction model

### 1.1 焊缝截面尺寸预测

由于单位时间内焊丝熔化量相同, 因此在  $y=0$  截面的焊缝截面面积均相同. 且由于焊缝成形表面假设为理想抛物线, 因此第一层焊缝截面面积可以通过式 (1) 进行计算, 即

$$S_{EFG} = 2 \times \int_0^{\frac{W}{2}} -\frac{4h}{W^2}x^2 + hdx \quad (1)$$

式中:  $h$  为第一层焊缝余高;  $W$  为第一层焊缝熔宽.

由于焊缝截面面积相同, 因此可知

$$S_{ANC} = S_{EFG} = 2 \times \int_0^{\frac{W}{2}} -\frac{4h}{W^2}x^2 + hdx \quad (2)$$

$$S_{ANC} = \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} -\frac{4h}{W^2}x^2 + h + h_z - (-\frac{4h}{W^2}x^2 + h)dx \quad (3)$$

整理上式, 可求得预制件在高度方向 ( $z$ ) 上每层焊缝的堆积高度  $h_z$ , 即

$$h_z = \frac{2h}{3} \quad (4)$$

然后对预制件悬空部分的成形宽度进行计算. 首先根据截面面积相同, 可知

$$S_{QPF} + S_{PFDI} = S_{EFG} \quad (5)$$

且由于  $AC, PD$  均为增材制造过程中焊缝堆积而出现的层间融合线, 因此可知  $Q$  点在  $x$  轴的位置

$$x_Q = \frac{o_n o_{n+1}}{2} = \frac{h_z}{2} = \frac{h}{3} \quad (6)$$

式中:  $o_n$  为第一层焊缝中心点;  $o_{n+1}$  为第二层堆积焊缝中心点.

可以计算出  $S_{QPF}, S_{PFDI}, S_{PFI}$  如下式所示, 即

$$S_{QPF} = \int_{\frac{h}{3}}^{\frac{W}{2}} \frac{4hx}{W} - hdx \quad (7)$$

$$S_{PFDI} = 2 \times \int_0^{\frac{W}{2}} -\frac{4h}{W^2}x^2 + hdx - \int_{\frac{h}{3}}^{\frac{W}{2}} \frac{4hx}{W} - hdx \quad (8)$$

$$S_{PFI} = \int_{\frac{W}{2}}^{x_I} -\frac{4h}{W^2} \left(x - \frac{W}{2}\right)^2 dx \quad (9)$$

联立式 (7) ~ 式 (9), 可以计算出  $I$  点在  $x$  轴的位置  $x_I$ , 然后计算预制件悬空焊缝堆积宽度  $h_x$ .

$$h_x = x_I - \frac{W}{2} \quad (10)$$

### 1.2 焊枪倾斜角度预测

由于焊缝截面面积相同, 因此悬空焊缝重力可以由式 (11) 进行表示, 即

$$G = \lim_{y \rightarrow 0^+} \int_0^y \rho \cdot g \cdot \left(2 \times \int_0^{\frac{W}{2}} -\frac{4h}{W^2}x^2 + hdx\right) dy \quad (11)$$

式中:  $\rho$  为熔融液体密度, 文中采用的焊丝材料为低碳钢, 因此取值为  $7.85 \text{ g/cm}^3$ ;  $g$  为重力加速度, 取值为  $9.8 \text{ m/s}^2$ .

MIG 电弧在忽略熔池表面变形的情况下, 电弧形状呈圆锥状. 且由于电弧中电流密度分布不均匀, 电弧中心区电流密度高于周边区域, 因此电弧压力可以看作围绕中心轴在各截面呈正态分布. 此时电弧压力可以由式 (12) 所表示.

$$F_a = \frac{\mu I^2 \lg(R_b - R_a)}{4\pi} \quad (12)$$

式中:  $F_a$  为电弧压力;  $R_a$  为 MIG 电弧锥形弧柱上底面半径;  $R_b$  为电弧锥形弧柱下底面半径;  $I$  为焊接电流;  $\mu$  为介质磁导率.

由于焊枪在悬空焊过程中具有一定的倾斜角度, 因此电弧压力的分力可以由式 (13), 式 (14) 表示. 在高度方向 ( $z$ ) 上的分力  $F_{az}$  为

$$F_{az} = \frac{\mu I^2 \lg(R_b - R_a)}{4\pi} \cdot \sin(\pi - \beta) \quad (13)$$

宽度方向 ( $x$ ) 上的分力  $F_{ax}$  为

$$F_{ax} = \frac{\mu I^2 \lg(R_b - R_a)}{4\pi} \cdot \cos(\pi - \beta) \quad (14)$$

在实际焊接过程中, 忽略焊缝表面由于工况而出现的些许误差, 焊缝截面形状可以视为抛物线, 但为简化预测模型, 更好的理解计算方法, 故将焊缝截面形状假设为正态分布曲线; 且由于电弧压力围绕中心轴呈正态分布, 因此各点作用力对金属熔融液体的作用效果近似相同, 所以文中仅以电弧中心轴处电弧压力计算焊枪倾斜角度.

电弧压力的分力  $F_{az}$  和  $F_{ax}$  对熔融液体分别起到沿 ( $z$ ) 轴正方向的上托和垂直于工件表面的压力

作用,为减少熔融液体的下淌,因此可建立如式(15)所示的力平衡方程.

$$\lim_{y \rightarrow 0^+} \int_0^y \rho \cdot g \cdot (2 \times \int_0^{\frac{w}{2}} -\frac{4h}{W^2} x^2 + h dx) dy = \frac{\mu I^2 l g (R_b - R_a)}{4\pi} \cdot \sin(\pi - \beta) \quad (15)$$

利用上式即可以由焊丝材料及焊接电流计算出悬空焊过程中焊枪倾斜角度 $\beta$ .

## 2 增材制造成形路径规划

### 2.1 焊枪倾斜角度对悬空焊成形影响

在带有悬空焊缝特征的预制件成形过程中,在长度( $y$ )方向上由于收弧点处电流会在短时间内发生变化,导致出现尾缩现象,因此在长度方向采用往复式焊接方式,对收弧点与起弧点之间的高度差进行补偿;而在高度方向( $z$ )上,由于熔池内金属熔融液体在冷却凝固过程中受到重力及电弧力等作用,当焊枪倾斜角度不准确时会导致焊缝出现下淌现象,致使焊缝成形不均匀,降低表面成形质量.

在高度( $z$ )方向上,随着焊枪角度的改变会出现如图2所示的三种情况.当焊枪角度 $\beta$ 大于 $180^\circ$ 时,由于电弧力与重力均指向( $-z$ )方向,导致焊缝层下半部分成形金属远多于上半部分;当焊枪角度 $\beta$ 等于 $180^\circ$ 时,电弧力垂直于高度( $z$ )方向,此时电弧力不会对熔融液体产生沿高度方向的分力,而重力依然指向( $-z$ )方向,因此焊缝下半部成形金属依然多于上半部;当焊枪角度 $\beta$ 小于 $180^\circ$ 且大于 $90^\circ$ 时,电弧力沿( $z$ )方向的分力对熔融液体起到上托作用,与重力相抵消,有效减少熔融液体的下淌量.

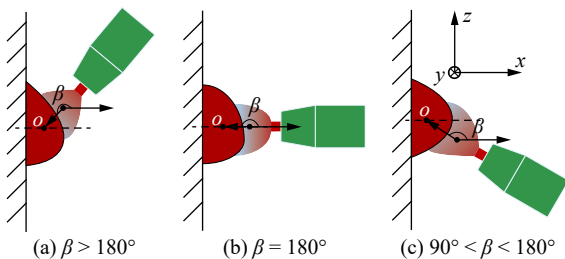


图2 焊枪倾斜角度对悬空焊缝成形影响

Fig. 2 Effect of inclination angle of welding torch on forming of suspension weld

综上所述,文中在长度( $y$ )方向选取往复焊接方式;在高度( $z$ )方向,焊枪倾斜角度 $\beta$ 范围选用

为 $90^\circ < \beta < 180^\circ$ ,此时可以有效改善悬空焊过程中熔融液体下淌现象,提高预制件表面成形质量.

### 2.2 成形方法验证试验

如图3所示为增材制造试验系统,该系统选用ABB公司IRB1410型机器人、福尼斯TPS4000焊机、保护气采用 $\text{CO}_2(82\%) + \text{Ar}(18\%)$ 混合气体,焊接方式选用冷金属过渡焊接(CMT),基板选用低碳钢板(Q235),焊丝牌号为ER50-6的G3Si1型号,直径1.2 mm.

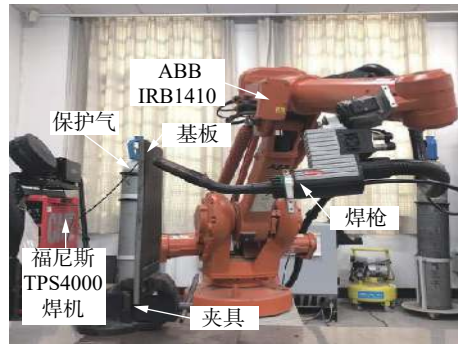


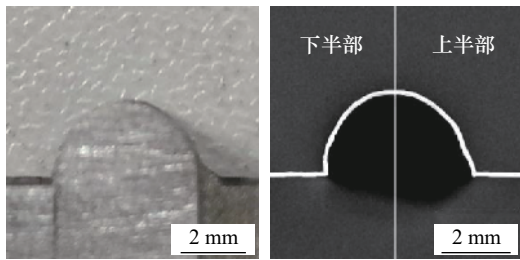
图3 CMT增材制造试验系统

Fig. 3 CMT additive manufacturing test system

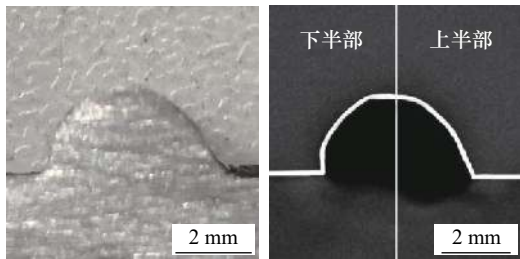
为验证悬空焊路径规划的有效性,设计了验证试验.试验过程中选取三组焊枪倾斜角度分别为 $135^\circ$ , $180^\circ$ 及 $225^\circ$ .且由于CMT焊接工艺的特殊两步法,因此对焊缝表面成形影响较大的部分工艺参数需要进行相关设置,该试验所采用的具体工艺参数如下,焊接电流 $I$ 为180 A,焊接电压 $U$ 为15.3 V,焊接速度 $v$ 为8 mm/s,送丝速度为5.5 m/min,起弧电流占比 $IS_1$ 为60%,起弧时间 $ts_1$ 为0.4 s,渐变时间 $SI_1$ 为0.3 s,渐变时间 $SI_2$ 为0.2 s,收弧时间 $ts_2$ 为0.6 s,收弧电流占比 $IS_2$ 为110%.

如图4所示为悬空焊缝成形方法有效性验证试验成形.为明显看出焊枪倾斜角度对悬空焊缝成形影响,试验过程中利用CMOS-Magview L磁光成像仪对焊缝截面形状进行提取,并通过MATLAB编写图像处理程序提取焊缝成形轮廓.如图4a所示当焊枪倾斜角度为 $135^\circ$ 时,电弧力沿( $z$ )方向的分力与重力在一定程度上相抵消,在焊接过程中电弧力对熔融液体起到上托作用,使成形焊缝中心轴上下部分成形均匀,中心轴下方无明显下淌现象;图4b所示当焊枪倾斜角度为 $180^\circ$ 时,此时电弧力沿( $x$ )方向对熔融液体产生垂直于基板表面的压力作用,此时熔融液体在( $z$ )方向上仅受重力作用,因此导致部分熔融金属出现下淌现象,焊缝截面中心

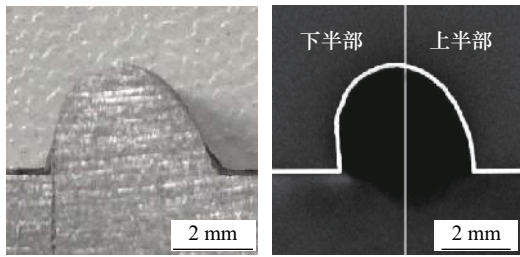
轴下半部成形金属较多; 图 4c 所示当焊枪倾斜角度为  $225^\circ$  时, 此时由于电弧力的分力与重力均沿 (-z) 方向, 此时电弧力对熔融液体起到下吹作用, 焊缝出现下淌现象, 致使中心轴下方成形金属明显增多且增大焊缝余高, 焊缝成形不均匀, 降低了表面成形质量。



(a) 焊枪倾斜  $135^\circ$



(b) 焊枪倾斜  $180^\circ$



(c) 焊枪倾斜  $225^\circ$

图 4 悬空焊缝成形试验

Fig. 4 Forming test of suspension weld

### 3 试验验证

#### 3.1 试验流程

增材制造试验过程主要包括建模、分层处理、选择工艺参数、尺寸预测、焊枪倾斜角度预测、提取路径以及编写 Rapid 程序, 最后进行成形试验. 具体试验流程如图 5 所示。

#### 3.2 成形试验

首先利用三维绘图软件 Solid works 建立预制件模型并对模型进行分层处理. 其次根据分层结果及预制件成形尺寸要求, 选择出焊接参数如下, 焊接电流 122 A、焊接电压 3.3 V、焊接速度 8 mm/s.

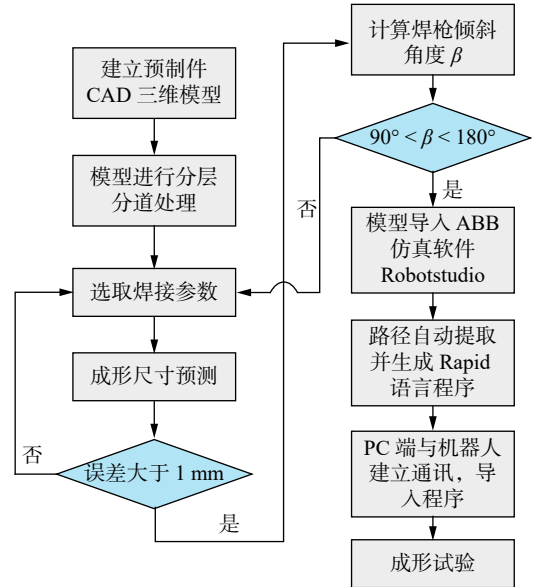


图 5 增材制造试验流程图

Fig. 5 Flow chart of test for adding material manufacturing

然后利用成形尺寸预测算法进行计算, 结果显示成形误差小于 1 mm. 由于试验成形预制件存在部分悬空焊缝, 所以采用焊枪倾斜角度预测算法计算出悬空焊过程中焊枪倾斜角度为  $32^\circ$ , 此时悬空部分焊缝成形质量较好. 最后将预制件模型导入 Robotstudio 进行成形路径自提取、生成路径程序, 并导入机器人示教器完成成形试验。

预制件模型在高度 (z) 方向共分为 45 层, 悬空焊缝处在宽度 (x) 方向共分为 20 层. 试验成形结果如图 6 所示. 预测尺寸如下, 总高度为 90 mm, 悬空焊缝宽度为 40 mm, 总长度为 100 mm. 实际成形总高度为 90.5 mm, 悬空焊缝宽度为 40.7 mm, 总长度为 100.4 mm, 实际成形误差小于 1 mm, 在允许范围之内, 焊缝层间冷却时间为 40 s, 总耗时 3 h. 可以明显看出, 针对悬空焊缝成形过程的焊枪倾斜



图 6 悬空特征预制件试验验证成形

Fig. 6 Forming chart of prefabricated parts with suspended characteristic validated by test

角度的优化算法具有一定的准确性,提高了预制件表面成形质量,有效改善了悬空焊缝在增材制造过程中的金属熔融液体下淌现象。

## 4 结 论

(1) 针对具有悬空焊缝特征的预制件成形尺寸预测进行算法优化,实现了对预制件成形高度及宽度的预测;并在此基础上引入了悬空焊过程中焊枪倾斜角度预测算法,实现了在不同焊接参数下对悬空焊缝堆积过程中焊枪倾斜角度的准确预测。

(2) 针对悬空焊过程中金属熔融液体下淌现象进行了研究,分析了焊枪倾斜角度对焊缝成形的影响,指出当焊枪倾斜角度  $\beta$  的选择范围为  $90^\circ < \beta < 180^\circ$  时,能有效改善悬空焊缝下淌现象,并设计了成形方法验证试验,将磁光成像及 MATLAB 图像处理技术相结合提取了单悬空焊缝成形轮廓并对结果进行了分析,验证了成形方法的有效性;最后焊制了具有说明性的预制件,验证了预测算法及成形方法的准确性,结果表明成形尺寸误差小于 1 mm,悬空焊缝成形质量较好,焊枪倾斜角度预测准确。

### 参考文献:

- [1] Abe T, Mori D, Sonoya K, *et al.* Control of the chemical composition distribution in deposited metal by wire and arc-based additive manufacturing[J]. Precision Engineering, 2019, 55: 231 – 239.
- [2] 高 东. 金属零件三维焊接快速成型工艺研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2018.
- [3] 张晓鸿, 陈静青, 张 康, 等. 不同电流密度下的 TIG 焊电弧行为分析 [J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 77 – 80.  
Zhang Xiaohong, Chen Jingqing, Zhang Kang, *et al.* Analysis of TIG arc behavior under different current densities[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(12): 77 – 80.
- [4] 温斌和. 薄壁构件等离子弧增材制造成形特性及尺寸控制 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [5] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, *et al.* A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 34: 8 – 19.
- [6] Iván Taberero, Paskual A, Pedro Álvarez, *et al.* Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing[J]. Procedia Cirp, 2018, 68: 358 – 362.
- [7] Hoefler K, Mayr P. 3DPMD-arc-based additive manufacturing with titanium powder as raw material[J]. China Welding, 2019, 28(1): 11 – 15.
- [8] Jayaprakash S P, Suryakumar S. Manufacture of complex thin-walled metallic objects using weld-deposition based additive manufacturing[J]. Robotics and Computer – Integrated Manufacturing, 2018, 49: 194 – 203.
- [9] Xiong J, Lei Y, Chen H, *et al.* Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 397 – 403.

第一作者简介: 王天琪, 男, 1981 年出生, 博士, 讲师. 主要研究方向为焊接自动化, 电弧增材制造. 已发表论文 20 余篇. Email: wtq0622@163.com