

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.01.015

电弧熔丝增材制造复合填充路径规划算法

方力¹ 侯智文¹ 黄俊润¹ 邓庆文² 武建祥² 秦训鹏^{1,3}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 武汉, 430070; 2. 湖北三环锻造有限公司, 武汉, 430070;
3. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉, 430070)

摘要:合理的路径规划可以提高电弧熔丝增材制造成形零件的表面质量和强度。针对电弧熔丝增材制造的特点,将多种增材制造路径规划算法相结合,提出了一种复合路径规划算法,实现了单空洞截面的填充,并进一步讨论了其他类型截面的路径规划方法。在填充截面过程中,内外表面采用轮廓偏置路径填充,保证了零件的表面质量;零件内部采用改进的扫描线算法进行填充,减少了空行程,提高了成形效率。实验验证了本文算法填充复杂截面轮廓的可行性。

关键词:增材制造;路径规划;电弧熔丝

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2019)01-0098-07

Composite Filling Path Planning Algorithm for Wire and ARC Additive Manufacturing

FANG Li¹, HOU Zhiwen¹, HUANG Junrun¹, DENG Qingwen², WU Jianxiang², QIN Xunpeng^{1,3}

(1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070, China;

2. Hubei Sanhuan Forging Co., LTD, Wuhan, 430070, China;

3. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology of Automotive Components, Wuhan, 430070, China)

Abstract: Reasonable path planning can improve the surface quality and strength of the formed parts of Wire and Arc additive manufacturing. Aiming at the characteristics of arc fuse to add material manufacturing, varieties of material manufacturing path planning algorithms are combined, and a compound path planning algorithm is proposed. The single hollow section fill is realized, and the other types of cross section of path planning method is further discussed. In the process of filling section, the inner and outer surface is filled with the contour offset path to ensure the surface quality of the parts. The improved scanning line algorithm is used to fill the parts, reduce the empty stroke and improve the forming efficiency. The complex section profile can be filled and the feasibility of the algorithm is verified by experiments.

Key words: additive manufacturing; path planning; arc fuse

电弧熔丝增材制造技术是一种快速成形技术。在零件成形过程中,需要将零件模型分成若干层,逐层堆积,累加成形。在填充每一层时,焊枪按既定的路径,堆焊成形零件的一个截面。该增材制

造方法最大优点是成形效率高、零件制造周期短,可以获得高性能的成形产品,具有十分广阔的应用前景^[1]。金属高性能增材制造技术被业内普遍看作是最直接的可服务于装备制造业的成形技术^[2]。

基金项目:2017年国家级大学生创新创业训练计划(20171049707013)资助项目;湖北省自然科学基金(2016CFA077)资助项目;高性能中重型汽车前桥轻量化技术开发及应用(CXZD2017000281)资助项目。

收稿日期:2017-10-30;**修订日期:**2018-03-09

通信作者:秦训鹏,男,教授,博士生导师,E-mail:qxp915@hotmail.com。

引用格式:方力,侯智文,黄俊润,等. 电弧熔丝增材制造复合填充路径规划算法[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(1):98-104. FANG Li, HOU Zhiwen, HUANG Junrun, et al. Composite Filling Path Planning Algorithm for Wire and ARC Additive Manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(1):98-104.

目前基于电弧堆焊的增材制造技术研究还不够深入,在如下两个方面表现比较突出^[3-4]:(1)由于堆焊工艺中弧坑塌陷造成的成形尺寸不精确;(2)成形零件表面粗糙度无法满足使用要求。目前,国内外解决堆焊成形的弧坑塌陷问题,主要是通过优化成形路径解决^[5]。扫描路径的方式不同,会对成形件的精度、表面质量和内部微观组织性能以及成形的速度有着重大的影响^[6]。目前主要的扫描路径方式有:

(1)扫描线填充路径。如图 1 所示,该填充路径用往复直线填充模型内部结构,该方法的填充路径结构简单,焊枪在路径中间速度均匀,消除了由于焊接过程中起弧和断弧造成的焊接缺陷,使同一层内堆焊过程一次性完成^[7]。但缺点也较为明显,当焊枪遇到路径拐角处时,焊枪加速度变化较大,可能出现过堆积或欠堆积。对于外部轮廓为曲线的零件,如圆形或椭圆形,在边缘处易形成阶梯效应,轨迹搭接宽度越大,锯齿状越明显,且轮廓尖角位置无法分辨,严重影响零件轮廓精度和形状。

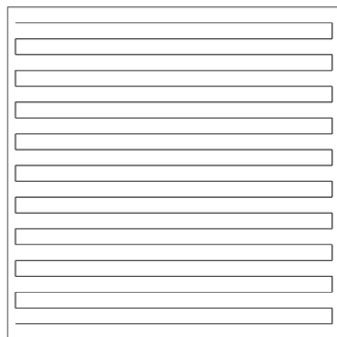


图 1 扫描线填充路径
Fig. 1 Scan-line filling path

(2)轮廓偏置路径。如图 2 所示,该算法一般以模型的外轮廓为主要参考对象,向内偏置,形成新的包络轮廓线。这种扫描方式精度高,翘曲变形的应力也较小,但是轮廓偏移算法复杂,运算占用大量时间和内存,而且算法在处理过程中不稳定,易遗漏某些区域,影响模型的整体强度^[8]。

(3)分形线填充路径。如图 3 所示,该算法采用 Hilbert 曲线填充零件截面,这种堆焊轨迹避免了轮廓偏置中可能出现的自交问题,但这种路径中存在大量的 90°拐角,焊枪在拐角处速度急剧变化,可能造成大量的过堆积和欠堆积。并且路径之间没有连接,这导致零件内部结构强度不够,整体强度下降^[9]。

填充形状复杂的截面,采用单一的扫描方式往

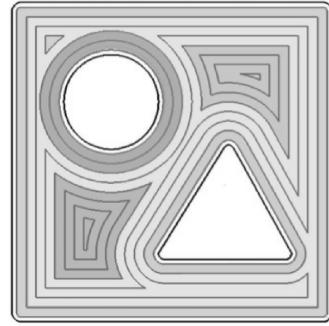


图 2 轮廓偏置填充路径
Fig. 2 Offset contour filling path

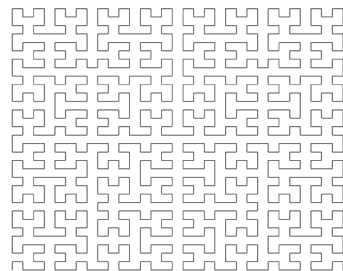


图 3 分形线填充路径
Fig. 3 Hilbert filling path

往不能保证好的成形质量,而应该采用复合填充路径对截面进行填充。现在介绍一种新的复合填充路径生成算法,该算法综合考虑了扫描线填充算法与轮廓偏置填充算法的优缺点:零件的内外轮廓采用轮廓偏置算法规划路径,到内外轮廓相交时停止偏置,在轮廓相交区域内采用改进的扫描线填充算法。这样既可以保证零件具有较好的表面质量,又能减少焊枪起弧引弧的次数和空行程,具体算法描述如图 4 所示。针对性地解决了单空洞截面的路径规划问题,随后进一步讨论单连通截面和多空洞复杂截面的路径规划方法。

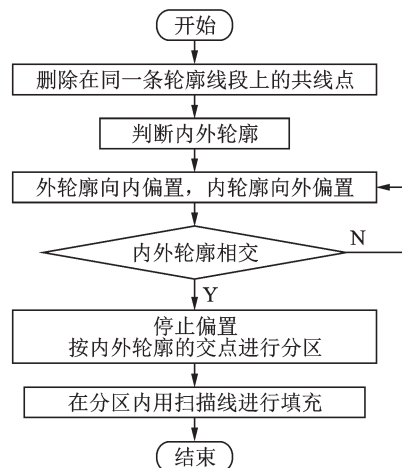


图 4 复合填充算法流程图
Fig. 4 Flow chart of compound filling algorithm

1 单空洞截面路径规划

1.1 删除共线点

模型的截面轮廓是一个多边形,由于光固化立体造型术(Stereolithography, STL)文件的特点,在分层切片之后多边形的边长上会存在许多共线点。这些共线点不能进行轮廓偏置的计算,同时这些共线点是不包含截面几何信息的“冗余点”,影响算法的执行效率。因此在进行轮廓偏置之前,首先要删除多边形上的共线点,只保留多边形的顶点。

设轮廓线中的一个顶点为 N_i ,沿轮廓线的顺时针方向看,其前一个点为 N_{i-1} ,后一个点为 N_{i+1} ,向量 $V_1 = N_i - N_{i-1}$, $V_2 = N_{i+1} - N_i$, V_1 和 V_2 的夹角为 θ ,可知

$$\cos\theta = \frac{V_1 \cdot V_2}{|V_1| |V_2|} \quad (1)$$

若 $\cos\theta = 0$,则说明 N_{i-1}, N_i, N_{i+1} 三点共线,从轮廓线中删掉 N_i 点。以此类推,沿顺时针方向遍历轮廓线,删去所有共线点。

1.2 区分判断内外轮廓

用 MATLAB 自带的 Inpolygon 函数来区分判

断截面的内轮廓和外轮廓。Inpolygon 函数可以判断一个点位于一个封闭轮廓的内部还是外部,其数学思想为:封闭轮廓的数据点为 $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$,待判断的点为 p 点, $pc_i = p - c_i$, $pc_{i+1} = p - c_{i+1}$,计算特征行列式 $|pc_i, pc_{i+1}|$ 的值。如果这个值恒为正,则 p 点在封闭轮廓的内部;否则,这个点在封闭轮廓的边界上或外部。

在轮廓 1 上取一顶点与轮廓 2 进行运算,若该点位于轮廓 2 的内部,则轮廓 1 是内轮廓,向外进行偏置;轮廓 2 是外轮廓,向内进行偏置。否则,轮廓 1 是外轮廓,轮廓 2 是内轮廓。

1.3 轮廓偏置

根据堆焊使用的焊丝材料、焊接电流和焊接电压等参数,设置廓偏置间距 d 。将外轮廓 $P_1\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 上的顶点沿顺时针方向排序,依次取 $p_{i-1}(X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1})$, $p_i(X_i, Y_i, Z_i)$, $p_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1})$ 三点。向量 $V_1 = p_i - p_{i-1}$, $V_2 = p_{i+1} - p_i$,若 $V_1 \times V_2$ 的 Z 坐标值为负,则 p_i 点为凸顶点,由几何关系可知^[10]

$$\overline{p_i p'_i} = V_1 + V_2 = \left(\frac{\overline{p_i p_{i-1}}}{|p_i p_{i-1}|} + \frac{\overline{p_i p_{i+1}}}{|p_i p_{i+1}|} \right) |V_1| \quad (2)$$

$$X'_i = X_i + \frac{(X_{i-1} - X_i)d\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}{|(X_{i-1} - X_i)(Y_{i+1} - Y_i) - (X_{i+1} - X_i)(Y_{i-1} - Y_i)|} + \frac{(X_{i+1} - X_i)d\sqrt{(X_{i-1} - X_i)^2 + (Y_{i-1} - Y_i)^2}}{|(X_{i-1} - X_i)(Y_{i+1} - Y_i) - (X_{i+1} - X_i)(Y_{i-1} - Y_i)|} \quad (3)$$

$$Y'_i = Y_i + \frac{(Y_{i-1} - Y_i)d\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}{|(X_{i-1} - X_i)(Y_{i+1} - Y_i) - (X_{i+1} - X_i)(Y_{i-1} - Y_i)|} + \frac{(Y_{i+1} - Y_i)d\sqrt{(X_{i-1} - X_i)^2 + (Y_{i-1} - Y_i)^2}}{|(X_{i-1} - X_i)(Y_{i+1} - Y_i) - (X_{i+1} - X_i)(Y_{i-1} - Y_i)|} \quad (4)$$

若 $V_1 \times V_2$ 的 Z 坐标值为正,则 p_i 点为凹顶点,由几何关系可知^[10]

$$\overline{p_i p'_i} = V_1 + V_2 = \left(\frac{\overline{p_{i-1} p_i}}{|p_{i-1} p_i|} + \frac{\overline{p_{i+1} p_i}}{|p_{i+1} p_i|} \right) |V_1| \quad (5)$$

$$X'_i = X_i - \frac{(X_{i-1} - X_i)d\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}{|(X_{i-1} - X_i)(Y_{i+1} - Y_i) - (X_{i+1} - X_i)(Y_{i-1} - Y_i)|} - \frac{(X_{i+1} - X_i)d\sqrt{(X_{i-1} - X_i)^2 + (Y_{i-1} - Y_i)^2}}{|(X_{i-1} - X_i)(Y_{i+1} - Y_i) - (X_{i+1} - X_i)(Y_{i-1} - Y_i)|} \quad (6)$$

$$Y'_i = Y_i - \frac{(Y_{i-1} - Y_i)d\sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}}{|(X_{i-1} - X_i)(Y_{i+1} - Y_i) - (X_{i+1} - X_i)(Y_{i-1} - Y_i)|} -$$

$$\frac{(Y_{i+1} - Y_i)d\sqrt{(X_{i-1} - X_i)^2 + (Y_{i-1} - Y_i)^2}}{|(X_{i-1} - X_i)(Y_{i+1} - Y_i) - (X_{i+1} - X_i)(Y_{i-1} - Y_i)|} \quad (7)$$

从而计算出 p_i 点向内的偏置点 $p'_i(X'_i, Y'_i, Z'_i)$ 。遍历外轮廓 P_1 的每一个顶点, 计算所有的偏置点 $\{p'_1, p'_2, \dots, p'_n\}$, 生成外轮廓 P_1 向内进行偏置的填充路径 P_2 。在外轮廓偏置的过程中若出现自交, 按文献[11]中的方法来处理。

同样地, 将内轮廓 $Q_1\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 的顶点按顺时针方向排序, 依次取 $q_{i-1}(X_{i-1}, Y_{i-1}, Z_{i-1})$, $q_i(X_i, Y_i, Z_i)$, $q_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1}, Z_{i+1})$ 。向量 $V_1 = q_i - q_{i-1}$, $V_2 = q_{i+1} - q_i$, 若 $V_1 \times V_2$ 的 Z 坐标值为正, 则 q_i 点为凹顶点, 计算公式同外轮廓凸顶点; 若 $V_1 \times V_2$ 的 Z 坐标值为负, 则 q_i 点为凸顶点, 计算公式同外轮廓凹顶点, 得到 q_i 点向外的偏置点 $q'_i(X'_i, Y'_i, Z'_i)$ 。遍历内轮廓 Q_1 的每一个顶点, 计算出所有的偏置点 $\{q'_1, q'_2, \dots, q'_n\}$, 生成内轮廓 Q_1 向外进行偏置的填充路径 Q_2 , 如图5所示。

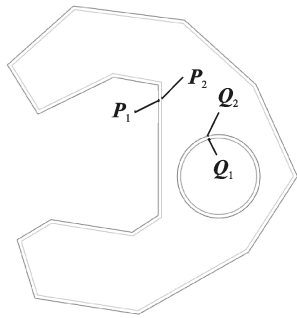


图5 轮廓偏置一次

Fig. 5 Offsetting the contour once

用 Inpolygon 函数来判断填充路径 P_2 和 Q_2 是否相交。若 P_2 上存在点在 Q_2 内部, 且 Q_2 上存在点在 P_2 外部, 说明 P_2 与 Q_2 已经相交, 停止偏置; 否则, 说明填充路径还未相交, 将 P_2 作为新的填充路径向内偏置, Q_2 向外偏置。以此类推, 直至轮廓线相交, 停止偏置。

如图6所示, 此时生成了一系列填充路径 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 和 $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$ 。外轮廓和内轮廓偏置的次数相同, 偏置至最内层的填充路径 P_n 可能与一个或多个内轮廓的填充路径相交, 采用删去部分内轮廓填充路径的方法进行处理。若填充路径 $Q_i (i=n, \dots, 4, 3, 2)$ 与外轮廓 P_n 相交, 删去路径 $Q_i, i=i-1$, 继续判断下一条路径, 直至 P_n 与填充路径 Q_i 不再相交时, 结束判定。如图7所示, 处理后的填充路径没有交点, 没有重合、相交的路径, 不会产生堆积。

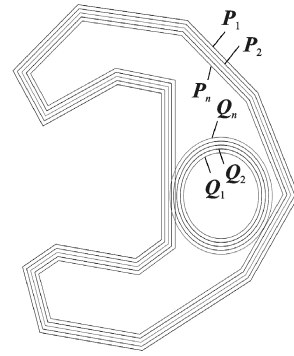


图6 内、外路径相交

Fig. 6 External path intersects with internal path

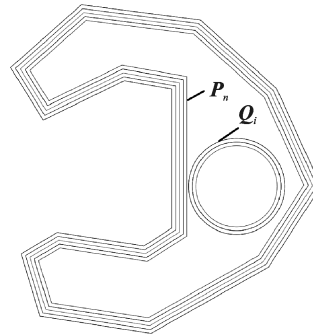


图7 处理后的路径

Fig. 7 Optimized path

1.4 交点分区

P_n 向内偏置距离 d 得到路径 P' , Q_i 向外偏置距离 d 得到 Q' , 根据 P' 和 Q' 的交点求出它们之间的“差”区域。如图8所示, 搜索偏置路径 P' 和 Q' 的所有交点, 得到交点集 $\{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ (n 为偶数, 交点沿顺时针方向排序)。相邻的两个交点属于同一个“差”区域, 根据交点可将两条相交的偏置路径划分为 $n/2$ 个区域。选取其中一个交点 k_i 作为起点, 在 P' 上沿该点所处边长方向, 向前延伸一个微小量 (在 P' 上, 顺时针方向为向前)。若延伸后的点位于 Q' 外部, 则 k_i 点与 k_{i+1} 点属于同一个“差”区域, 进行匹配; 否则, k_i 点与 k_{i-1} 点匹配。当全部交点匹配完毕后, 以交点 k_i 为起点, 顺时针方向取出 k_i 和匹配点 k_{i+1} 之间 P' 的顶点; 再以匹配点 k_{i+1} 为起点, 逆时针取出匹配点 k_{i+1} 和 k_i 之间 Q' 的顶点, 从而得到了一个封闭的“差”区域。以此类推, 依次划分出 P' 和 Q' 的各个“差”区域, 在“差”区域内采用改进的扫描线算法进行填充。

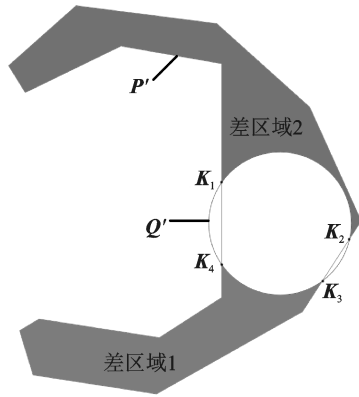


图 8 求解“差”区域

Fig. 8 Getting the “subtraction” areas

1.5 扫描线填充

经过改进的扫描线填充算法如下:设置扫描线的间距 dis , 求出待填充区域轮廓线的 y 坐标最小值 y_{min} 和最大值 y_{max} , 作扫描线 $y=y_{min} + dis/2 + dis \times i (i=0, 1, 2, \dots)$ 。若有区域轮廓顶点恰好位于扫描线上, 将轮廓点的 y 坐标值加上一个小于精度要求的极小值, 这样扫描线与轮廓线的交点数量为偶数, 便于后续计算。搜索扫描线与轮廓线的交点, 记录交点个数 m , 将交点按 x 坐标值从小到大排序后, 存储到一个数组。 $i=i+1$, 上移扫描线, 继续搜索与区域轮廓线的交点, 直至 m 的值发生变化, 这时开辟一个新的数组存储交点, 至 $y > y_{max}$ 搜索结束。这样每一个数组代表了“差”区域中划分出的一个区域。如图 9 所示, 根据扫描线与轮廓线交点的个数将“差”区域 1 划分为 5 个小区域。

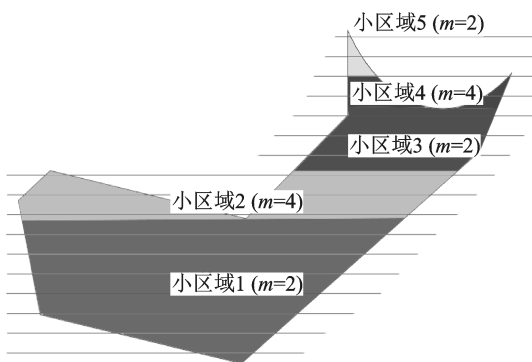


图 9 划分小区域

Fig. 9 Dividing the “subtraction” area to get smaller areas

小区域中, 在 y 方向上有多行交点, 每一行按交点 X 方向坐标值从小到大分别记为交点 1, 交点 2, \dots , 交点 $n (n=2, 4, 6, \dots)$ 。将每行第 1 个点与第 2 个点存储到新的数组 $Field_1$, $Field_1$ 数组中的点依次连接起来形成扫描线; 第 3 个点与第 4 个点存储

到新的数组 $Field_2$, $Field_2$ 数组中的点连接起来形成扫描线, 以此类推。如图 10 所示, 扫描线填充每个小区域, 最终将“差”区域 1 填充完毕。

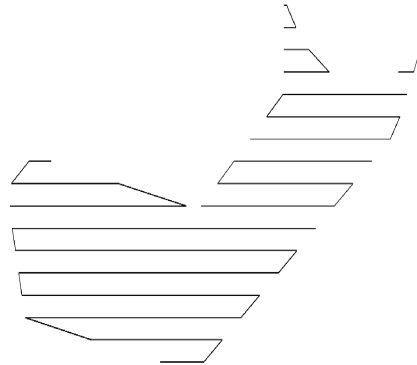


图 10 扫描线填充

Fig. 10 Filling area with scan-line

用同样的方法填充“差”区域 2, 如图 11 所示, 最后得到了整个截面的填充路径。

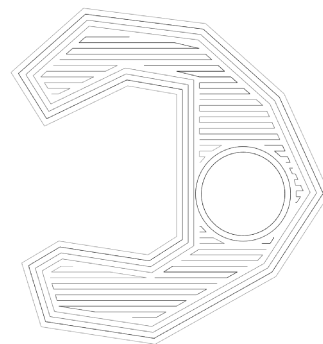


图 11 完整填充路径

Fig. 11 The final filling path

2 其他类型截面的路径规划

不包含空洞的单连通区域仍然可以采用本算法处理, 外轮廓向内偏置固定次数求得偏置路径, 然后内部采用扫描线填充生成扫描线路径。

当轮廓截面包含多个空洞时, 内外轮廓的区分判别、轮廓相交判断的难度会随着空洞的数量显著增加, 继续采用内外轮廓偏置至相交的方法计算量极大。可采用内外轮廓只偏置一次, 内部采用扫描线填充的方法进行处理。删除轮廓线上的共线点, 运用坐标极值法^[12]区分判断内、外轮廓, 然后将内、外轮廓分别只偏置一次得到偏置路径。再在偏置路径形成的新截面轮廓内用上述提到的扫描线填充算法进行填充。

3 实验验证与分析

为验证所提出复合路径填充算法的可行性, 用

该算法生成的填充路径堆焊成形一个三维模型,通过成形件的精度和质量来验证算法的可行性,如图12所示,模型的外边界尺寸为70 mm×70 mm,内边界尺寸为35 mm×35 mm,高度为30 mm。

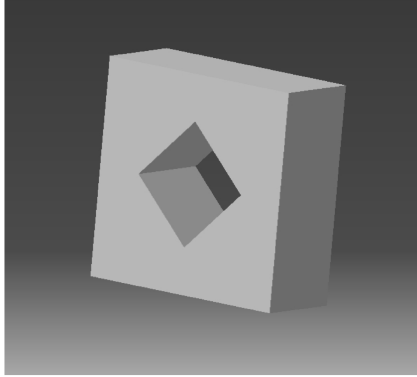


图12 堆焊成形件三维模型

Fig. 12 3D model of bead weld deposits

3.1 实验条件

实验中所用焊丝型号为AWS ER 7s-6,直径

为1.2 mm,实心焊丝,主要成分为Fe,还包含C 0.06%~0.15%, Si 1.4%~1.85%, Ni≤0.15%, Cr≤0.15%。弧焊过程中所用保护气的成分为82%Ar和18%CO₂,其流量控制在15 L/min;焊丝伸出焊枪长度控制在15 mm;在200 mm×50 mm×10 mm的45钢平板上进行堆焊。首先由实验确定了一组合适的焊接电流、电压和焊接速度等参数,如表1所示,测得焊道宽度为6.0 mm,层高为3.0 mm,其成形情况如图13所示。

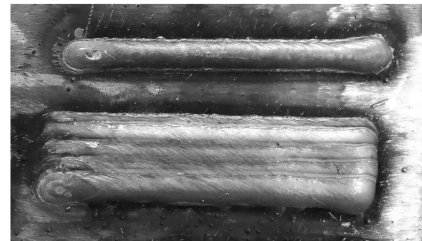


图13 成形情况

Fig. 13 Weld bead's morphology

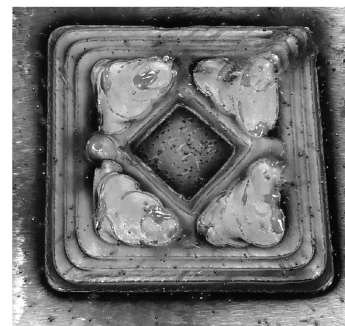
表1 选定的焊接工艺参数及成形焊道参数

Tab.1 Selected welding process parameters and formed weld bead parameters

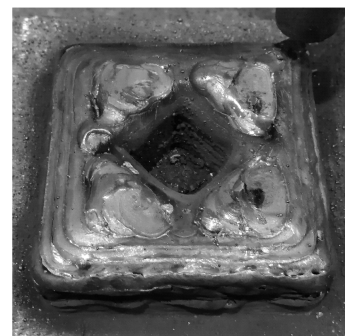
弧焊模式	焊接电压/ V	焊接电流/ A	送丝速度/ (m·min ⁻¹)	焊接速度/ (mm·s ⁻¹)	焊道宽度/ mm	焊道搭接率/ %	层高/ mm
直流	19.3	125	3.2	7	6	50	3.0

3.2 实验结果

用MATLAB编写的程序处理该模型的STL文件,得到路径数据,再生成对应的机器人执行代码,导入机器人增材制造系统中进行堆焊实验。实验选在下午进行,温度、湿度稳定,以消除堆焊各层时的温度差异。每堆焊完一层,清理焊渣,再进行下一层的堆焊,最终实验结果如图14所示。考虑到电弧熔丝增材制造成形的零件一般要经过铣削加工再使用,将零件轮廓线作为第1条堆焊路径,因此最终成形零件内外边界尺寸略大于三维模型的尺寸,为76.6 mm×77.2 mm,高28.6 mm。可以看出,内外边界采用轮廓偏置路径进行填充,零件外表面质量较好,路径平整,同时限制了进行扫描线填充时,熔池向四周流淌;内部采用扫描线路径进行填充,成形良好,证明了所提出复合路径填充算法的可行性。



(a) Weld a layer of welding wire



(b) Finish welding

图14 堆焊成形情况

Fig. 14 Process of bead welding

4 结 论

对于复杂截面轮廓,采用单一的填充路径往往无法得到好的成形质量。通过研究包含一个空洞的截面路径规划问题,使用改进的扫描线算法,与轮廓偏置算法相结合,提出了一种复合填充路径算法。复合填充路径算法不仅保证了成形零件的表面质量,同时在内部使用改进的扫描线进行填充,可以减少焊枪起弧引弧的次数和行进过程中的空行程,从而提高增材制造效率。通过成形实验,验证了复合填充路径算法的可行性。

参 考 文 献:

- [1] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展[J].机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.
LU Bingheng, LI Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology [J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4.
- [2] 黄卫东.如何理性看待增材制造(3D打印)技术[J].新材料产业,2013(8):9-12.
- [3] 徐健宁,张华,胡璐华,等.熔焊快速成型中焊接工艺参数与焊缝几何尺寸的关系[J].焊接技术,2008,37(4):10-13.
XU Jianing, ZHANG Hua, HU Ronghua, et al. Relationship between the parameters of rapid prototyping welding and welding seam sizes [J]. Welding Technology, 2008, 37(4): 10-13.
- [4] WANG H, JIANG W, OUYANG J, et al. Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(1):93-102.
- [5] 张禹,王世龙,罗震,等.基于机器人堆焊增材制造工艺与方法研究[J].制造业自动化,2013,35(11):145-147.
ZHANG Yu, WANG Shilong, LUO Zhen, et al. A study of additive manufacturing's method and processing based on welding robot [J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(11): 145-147.
- [6] 张连重.基于机器人堆焊的快速再制造成分层路径规划研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2013.
ZHANG Lianchong. Research on the slicing and path planning of robot welding rapid remanufacturing forming [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013.
- [7] ZHANG Y M, CHEN Y, LI P, et al. Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2/3):347-357.
- [8] YANG Y, LOH H T, FUH J Y H, et al. Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing [J]. Rapid Prototyping Journal, 2002, 8(1):30-37.
- [9] 欧立松.面向三维打印的几何模型后处理技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2015.
OU Lisong. Research on post-processing technology of geometric model for 3D printing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [10] 毛立坤,高峰,袁自钧,等.选择性激光熔化成型的二维轮廓填充算法[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2017,40(3):420-424.
MAO Likun, GAO Feng, YUAN Zijun, et al. Filling algorithm of two-dimensional contour in selective laser melting molding [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(3): 420-424.
- [11] 黄常标,江开勇,林俊义.平面轮廓线的偏置及干涉消除算法研究[J].机电工程技术,2007,36(10):75-77,90.
HUANG Changbiao, JIANG Kaiyong, LIN Junyi. Research on algorithm for contour lines offset and interference elimination [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2007, 36(10): 75-77, 90.
- [12] 段黎明,叶勇,张霞,等.面向快速原型的工业CT图像内外轮廓自适应判别方法[J].强激光与粒子束,2013,25(4):1017-1020.
DUAN Liming, YE Yong, ZHANG Xia, et al. Self-adaptive method to distinguish inner and outer contours of industrial computed tomography image for rapid prototype [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(4): 1017-1020.

(编辑:陈璐)