

# 基于堆焊-电解的复合3D加工技术

张 禹<sup>1</sup>, 罗 震<sup>1,2</sup>, 谈 辉<sup>1</sup>, 段 瑞<sup>1</sup>, 张成大<sup>3</sup>

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072; 2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240;  
3. 大庆油田有限责任公司第二采油厂, 大庆 163461)

**摘 要:** 建立了基于堆焊-电解的复合3D成形系统, 包括弧焊机器人、数字化焊机以及电解加工设备等。通过机器人堆焊对工件进行快速成形, 进而采用电解加工设备对其进行精密修形, 得到与预设三维实体模型尺寸一致的成品零件。提出了一种名为螺旋递进重熔的路径规划方式, 可以很好的解决堆焊成形中的塌陷问题。针对低碳钢与铝合金两大类材料进行3D成形工艺试验, 发现分别采用氯化钠电解液以及磷酸硝酸钠混合电解液进行电解加工可以得到表面光洁的零件。结果表明, 利用堆焊-电解复合3D加工系统可以在无模具的条件下制备尺寸精确、表面光洁的零件。

**关键词:** 弧焊机器人; 3D成形; 路径规划; 电解加工

**中图分类号:** TG 455 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)08-0039-04

## 0 序 言

国家高技术研究发展计划(863计划)将增材制造技术提升至国家层面的重视程度。而基于堆焊的3D成形方法具有其独特的优点, 突出地体现在低成本条件下得到组织致密的制品, 可选成形零件尺寸范围大, 力学性能优异等方面<sup>[1,2]</sup>, 因此国内外许多学者对其进行了研究。由于堆焊成形的工艺特点所致, 直接堆焊出的制品尺寸精度差、表面粗糙, 无法满足使用要求。在解决成形尺寸精度方面, 可以通过优化焊接的路径规划来解决。日本大阪大学的Katou等人<sup>[3]</sup>开发出了一种三维微焊接(3DMW)的堆焊成形工艺, 克服了常规工艺中单道焊缝起弧、收弧部位不对称造成的难于控制尺寸的问题, 同时每滴金属在过渡以后很快凝固使得制造形状更为复杂的零件成为可能。在解决表面粗糙度方面, 国内外学者开发出了将其它加工方法与焊接复合的堆焊成形技术, 以得到表面光洁的零件。例如, 武汉理工大学的Xiong等人<sup>[4]</sup>采用将等离子弧沉积与铣削复合的方法实现的航空用发动机叶片的精密3D成形。此外韩国科技学院的Songa等人<sup>[5]</sup>提出了将多丝三维焊接与数控铣削结合的工艺, 通过两个送丝机构交替送丝实现了具有梯度成分模具的制造。

采用堆焊-电解加工复合3D成形技术与堆焊

-铣削复合3D成形技术相比, 具有许多独特的优势。例如在铣削的过程中, 会给制品带来残余应力, 使其发生变形。而采用电解加工的方法不会产生机械切削力及残余应力, 提高了成形精度。此外电解加工的成形精度高, 可达到 $\pm 0.05 \sim 0.20 \mu\text{m}$ 。

文中的研究中建立了一个包含MOTOMAN HP6型机器人、电解加工设备以及数字化MIG焊机的3D成形系统, 可以在无模具的条件下直接制造出与预先设计的三维模型尺寸一致的金属零件。利用该系统, 对堆焊3D成形的工艺优化进行研究, 分别制造了以低碳钢和铝合金为原材料的金属零件。

## 1 堆焊-电解复合3D成形系统

### 1.1 系统组成

试验的堆焊3D成形系统如图1所示, 主要由两部分组成, 即机器人堆焊成形系统和电解加工后处理系统。堆焊成形系统包括一台主控计算机、MOTOMAN HP6型弧焊机器人、DB250型变位机、NX100型

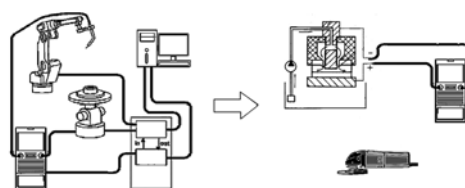


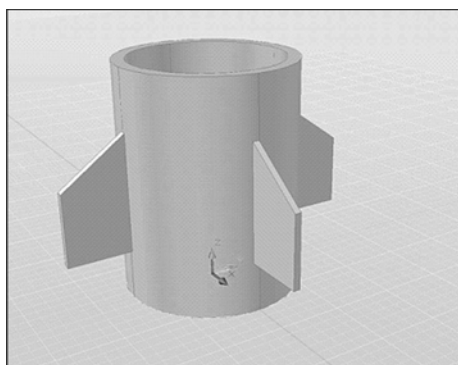
图1 堆焊-电解3D成形系统硬件连接示意图

Fig. 1 Schematic of hybrid processing system

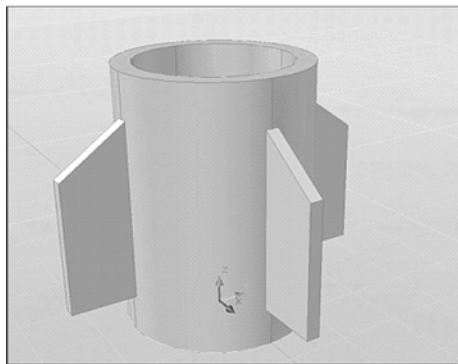
控制柜以及 TPS4000 型数字化焊机. 电解加工系统包括一部直流脉冲电源、电解液设备以及 PHEC-MC6132-750 型电解切削专用设备.

## 1.2 系统工作原理

首先应用堆焊成形系统对零件进行初步的成形. 如图 2 所示, 根据不同材料的堆焊特点, 利用 AutoCAD 的三维建模功能建立零件的实体模型, 并传输到主控计算机中. 利用快速成形软件对模型进行直接切片处理, 生成堆焊的路径文件. 随后将之前得到的焊接路径转化为机器人的作业文件. 机器人按照作业文件的指令, 堆焊出有一定余量的零件毛坯. 将得到的毛坯进行简单清理后, 应用电解加工系统对其精密修形. 在电解加工的过程中, 工件接在电源的正极, 加工阴极接负极. 由于工件表面微小突起的地方电流密度较高, 因此优先被腐蚀, 最终得到了光洁的表面. 通过主控计算机对阴极运动轨迹的控制<sup>[6]</sup>, 使其沿零件三维模型的轮廓运动, 可以得到尺寸精确的制品.



(a) 低碳钢零件



(b) 铝合金零件

图 2 零件三维实体模型

Fig. 2 Full-scale mock-up of parts

## 2 3D 成形的工艺优化

### 2.1 路径规划

堆焊成形路径是指堆焊成形过程中起弧、收弧

的顺序以及各焊道的时间与空间顺序. 不同的路径规划将会使零件在成形的过程中形成不同的温度场, 进而影响零件的残余应力、变形程度以及组织性能等重要指标.

常规的路径规划策略有  $xy$  连贯扫描方式、区域折线方式以及轮廓偏移方式等. 以上几种规划方式各有优缺点, 但都不能很好地解决由于焊缝起弧、收弧造成的尺寸误差. 因此在文中提出一种名为螺旋递进重熔的路径规划方式, 目的在于解决这一误差. 螺旋递进重熔的路径规划方式如图 3 所示, 在堆焊的过程中使焊枪的路径以螺旋线的方式递进, 最终起弧、收弧重叠在一处, 形成一道较为对称平直的焊缝. 同时在堆焊的过程中, 相邻的焊道会反复重熔, 在液态金属表面张力的作用下会使得焊缝表面变得较平整. 图 3 右侧画出了常规单道焊缝与优化路径规划后焊缝对比示意图. 优化路径规划后的焊缝更为平整对称有利于堆焊成形. 用这种平直对称的焊缝排布成需要的截面形状, 如图 4 所示, 只要控制好相邻焊缝之间的搭接量, 就可以很好的解决堆焊成形中的塌陷问题.

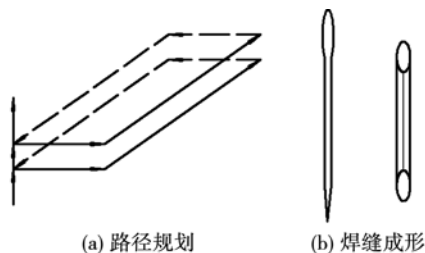


图 3 螺旋递进重熔路径规划及单道焊缝示意图

Fig. 3 Schematic of screw overlap path planning and single welding bead

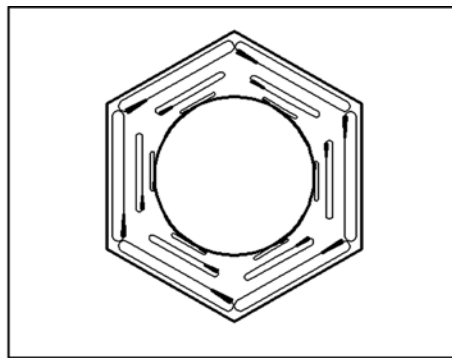


图 4 零件一个截面内的焊接路径

Fig. 4 Schematic of path planning within a cross-section of parts

### 2.2 其它工艺优化措施

改进了路径规划方法可以大幅提高堆焊成形的

尺寸精度,同时减少了制品内起弧收弧次数,从而降低夹杂、裂纹等缺陷出现的可能性.此外还可以通过其它改进工艺的措施提高制品的质量.首先在保证堆焊过程电弧稳定性的前提下要尽量减少热输入.热输入过大,会使得焊缝熔高增加,弧坑范围增大,最终使焊缝的弧坑塌陷变得明显.对于同一尺寸的制品,采用小电流多焊道成形,可以大幅改善成形的尺寸精度与内部应力分布情况.

其次在机器人的作业文件的语句中,在每行收弧前加入 TIMER 指令,控制机器人做一定时间的停顿,可以起到填弧坑的效果.这样可以在一定程度上减小单道焊缝的不对称性.

### 3 3D 成形试验

#### 3.1 焊接工艺参数与成形规律试验

在制造 3D 成形零件之前,首先要对焊接工艺参数对成形的影响进行试验研究.堆焊成形规律的研究分为两部分:(1)在  $\text{CO}_2$  气保护焊工艺下,用  $\phi 1.2 \text{ mm}$  的 H08Mn2Si 焊丝在厚度为 6 mm 的 Q235 钢板上堆焊.其中电极高度为 15 mm,气体流量为 12 L/min,预设焊接电流 110 A,焊接速度 10 mm/s,进行单道焊缝单壁墙体堆高试验,墙体如图 5 所示.(2)在 MIG 焊工艺下,用  $\phi 1.2 \text{ mm}$  的 5356 焊丝在 8 mm 厚的 6061 铝板上堆焊.其中电极高度为 15 mm,气体流量为 20 L/min,预设 150 A 电流,16.67 mm/s 焊接速度.堆焊出的单壁墙体如图 6 所示.

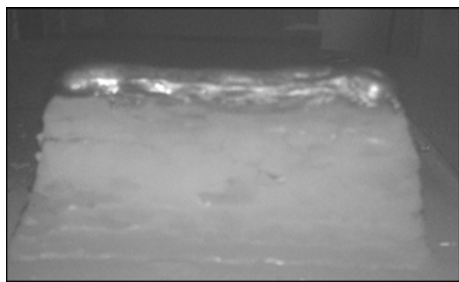


图5 低碳钢单壁墙体

Fig. 5 Build-up welding single panel of mild steel

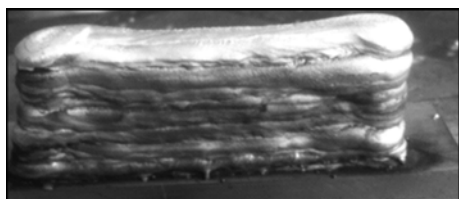
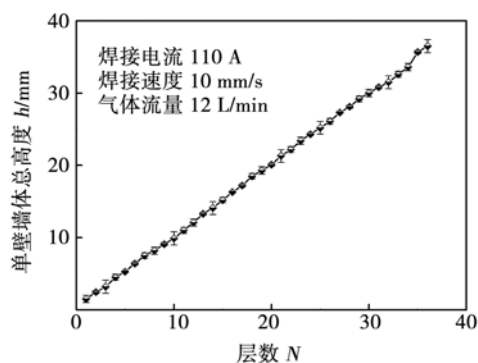


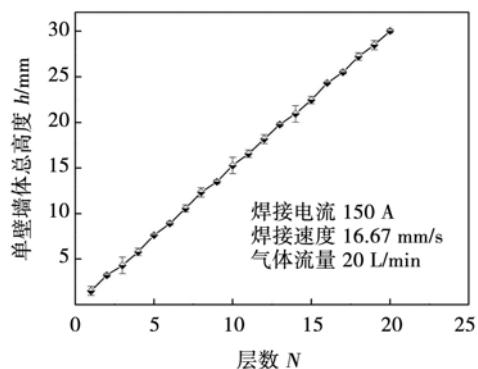
图6 铝合金单壁墙体

Fig. 6 Build-up welding single panel aluminum alloy

由试验结果可知,墙体的高度与堆焊的层数具有一定的线性关系,如图 7 所示.同时在试验中发现,在不做堆焊路径规划优化的条件下堆高的单壁墙体,会在收弧的一侧产生较严重的塌陷,影响成形的精度甚至造成后续堆焊难以进行.因此在堆焊成形的过程中采取螺旋递进重熔的规划方式可以很大程度上的减少弧坑塌陷,有利于提高制造精度.



(a) 低碳钢单壁墙体高度与层数的规律



(b) 铝合金单壁墙体高度与层数的规律

图7 堆焊成形规律

Fig. 7 General forming rule of build-up welding

#### 3.2 堆焊-电解 3D 成形试验

针对试验中预设的导弹尾翼实体模型进行 3D 成形试验,目的在于验证复合 3D 加工系统是否能按照模型尺寸精确的制造出成品零件.其中弹体部分采用低碳钢与铝合金型材作为基体,弹翼部分分别用 H08Mn2Si 和 6061 焊丝堆焊形成.将预先准备好的型材用夹具固定在变位机上,启动机器人执行作业文件,进行预定零件的直接成形,得到具有加工余量的工件毛坯.

将堆焊后的工件毛坯表面的氧化皮进行简单清理后,利用电解加工系统对其精密修形.工艺参数选择如下:对于低碳钢制品,选择 0.5 mm 阴极间隙,20 V 电压,10 A 电流,采用氯化钠电解液;对于铝合金制品,选择 0.5 mm 阴极间隙,20 V 电压,16 A 电

流,采用磷酸与硝酸钠混合电解液. 工件堆焊成形后与精密修形后的效果对比见图 8. 经过电解修形后的成品零件尺寸精确,表面光洁且不含切削加工后的残余应力.

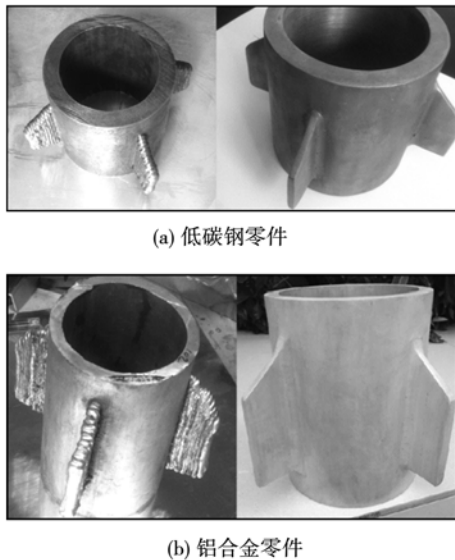


图 8 工件堆焊成形与精密修形后效果对比

Fig. 8 Contrast of parts after-build-up and after-electrolytic-machining

## 4 结 论

(1) 由堆焊成形与电解加工为主体搭建的复合 3D 加工系统可以在无模具的条件下制造与实体模型尺寸一致且表面光洁度良好的工件.

(2) 堆焊成形中的塌陷问题,主要是通过优化堆焊的路径规划,使焊道的起弧、收弧部位重合抵消误差来解决的. 采取螺旋递进重熔的路径规划方法,可以很好地解决低碳钢、铝合金制品在成形过程中的塌陷问题.

(3) 低碳钢与铝合金两大类材料的堆焊成形制

品采用相应电解液在合适的工艺参数下进行电解加工,可以得到光洁度良好的表面.

## 参考文献:

- [1] 刘一搏, 孙清洁, 姜云禄, 等. 基于冷金属过渡技术快速成形工艺[J]. 焊接学报, 2014, 35(7): 1-4.  
Liu Yibo, Sun Qingjie, Jiang Yunlu, *et al.* Rapid prototyping process based on cold metal transfer arc welding technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(7): 1-4.
- [2] 李玉龙, 张 华, 张光云, 等. 基于 TIG 堆焊技术的低碳钢零件精密快速成形[J]. 焊接学报, 2009, 30(9): 37-40.  
Li Yulong, Zhang Hua, Zhang Guangyun, *et al.* Precision rapid prototyping of steel parts using TIG deposition technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(9): 37-40.
- [3] Katou M, Janghwan O, Yoshinari M, *et al.* Freeform fabrication of titanium metal and intermetallic alloys by three-dimensional micro welding[J]. Materials and Design, 2007, 28(7): 2093-2098.
- [4] Xiong X H, Zhang H O, Wang G L, *et al.* Hybrid plasma deposition and milling for an aeroengine double helix integral impeller made of superalloy[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26: 291-295.
- [5] Songa Y A, Parka S, Chaeb S W. 3D welding and milling: part II—optimization of the 3D welding process using an experimental design approach[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(9): 1063-1069.
- [6] 冯胜强, 胡绳荪, 杜乃成. 基于 UG 的弧焊机器人离线编程系统的设备建模[J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 89-92.  
Feng Shengqiang, Hu Shengsun, Du Naicheng. Equipment modeling of off-line programming system of the arc welding robot based on UG[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(4): 89-92.

**作者简介:** 张 禹,男,1989 年出生,博士研究生. 主要从事先进焊接工艺与设备研究工作. Email: zhangyumse@163.com

**通讯作者:** 罗 震,男,教授,博士研究生导师. Email: lz@tju.edu.cn