

机器人离线编程堆焊制字及增材制造研究

马骏, 高飞, 胡浩, 邹家生

(江苏科技大学焊接重点实验室, 镇江 212000)

摘要: 基于 KUKA 机器人及离线编程软件 Robotmaster 搭建弧焊机器人增材制造系统, 在离线编程软件中建立机器人工作场景与待加工零件模型, 保持机器人基坐标系、工件坐标系和工具坐标系与实际场景一一对应。对空心字符焊缝路径进行模拟仿真, 后处理生成机器人程序文件, 使用 MAG 焊进行堆焊制字工艺试验, 结果表明: Robotmaster 离线编程仿真程序安全可靠, 字形焊缝饱满圆润。在低热输入规范参数下, 进行弧焊机器人离线编程增材制造薄壁圆筒零件试验以及堆焊层高度方向硬度测试。结果表明: 三维零件模型与实际零件高度吻合; 在复杂的堆积过程中, 后续焊缝对先前焊缝起着焊后热处理的作用, 对焊缝组织、力学性能影响显著。

关键词: 机器人离线编程; Robotmaster; 堆焊制字; 增材制造

0 序言

在船舶舾装件带缆桩生产制造过程中, 常需在其表面标记产品安全工作负荷, 目前船舶企业普遍采用手工电焊条堆焊的方式标记负荷值, 不可避免地造成生产准备时间过长、生产效率低、工人工作强度大等的缺点, 产品焊缝成形质量也完全由焊工技术高低决定, 无法得到有效的保证。近年来, 随着工业机器人的应用范围不断扩大, 若将其应在船舶行业, 采用自动化工业机器人代替传统手工制造, 配合机器人离线编程软件, 则能很好地解决了传统制造精度低、效率低、复杂轨迹难以实现等问题^[1-3]。

本文研究了离线编程软件 Robotmaster 在 KUKA 机器人上的应用, 利用其高灵活性, 配合 MAG 焊接工艺, 搭建弧焊机器人离线编程增材制造系统, 实现复杂字形焊缝及薄壁圆筒零件增材制造^[4]。

1 试验设备及材料

出于空间可达性及精度方面的考虑, 本试验选用 KUKA KR16 机器人, 采用尺寸规格为 300mm×150mm×10mm 的碳素结构钢 Q235B, 选用昆山京雷焊材实心焊丝 GML-56, 直径 1.2mm, 该焊丝适用于较大的焊接电流范围, 且在低电流焊接环境下飞溅少, 焊缝成形美观, 焊缝金属气孔敏感度低。保护气体初步选用 80%Ar+20%CO₂ 混合气, 流量设定值为 13-15L/min。焊接过程中, 实心焊丝匹配混合

保护气, 可以有效细化熔滴过渡, 减少焊接气孔, 提高焊缝成形质量, 同时混合气体的经济成本相较于纯氩气得到很好的控制。

2 试验方法

2.1 机器人离线编程堆焊制字工艺试验

2.1.1 加工数模导入

鉴于离线编程软件 Robotmaster^[5, 6]本身支持多种格式的 CAD 模型, 本次试验利用 Solidworks 建立 300mm×150mm×10mm 的平板工件模型, 输入待焊字符“焊接”, 设置宋体, 字高 120mm, 使得封闭字形刚好占据整个工件上表面, 使用包覆指令, 将完整字形刻画在工件表面, “焊接”字形的外轮廓曲线即为本次试验的焊缝路径。将上述“焊接”零件模型的 SLDWORKS 文件导入 Mastercam 界面, 逐一选中“焊接”字形外轮廓的 9 条轨迹曲线创建边缘焊缝路径, 边缘角度为 90°, 保证焊枪垂直于金属板材表面向下。以工件的一个顶点作为基坐标系的原点, 用焊枪 TCP 测得工件原点位置相对于机器人世界坐标系的坐标为 (1513, 0, 857), 将该数值输入到 Robotmaster 基坐标系, 确定加工起点和终点, 即焊接过程中的起弧点和熄弧点, 焊缝路径规划如图 1 所示, 图中蓝色代表焊缝轨迹, 紫色代表编程路径中的点位, 黄色代表连续多段焊缝的起弧、熄弧时焊枪运动轨迹。确定基坐标系与世界坐标系的位置关系, 使得虚拟工作场景与实际工作环境保持一致, 完成机器人仿真环境的坐标系标

定任务。

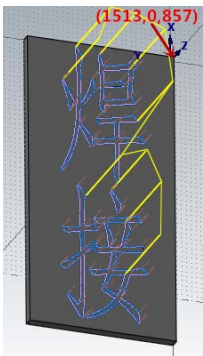


图 1 “焊接”焊缝路径规划图

2.1.2 变位机数模

将现场机器人焊接平台的模型数据导入离线编程软件中,在 Robotmaster 应用模块创建新的外部轴,选择对应的 KUKA 机器人,根据工装平台数模文件输入外部轴转台中心相对于六轴机器人底盘法兰中心的实际坐标值, X=1403.09436, Y=73.2906418, Z=-1.93799901, A=90.7501373, B=0.18735901, C=0.053988, 建立离线编程机器人单元模型,如图 2 所示。

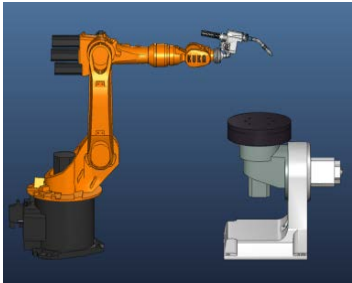
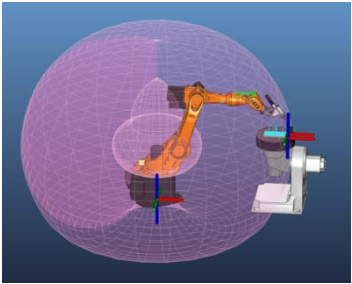


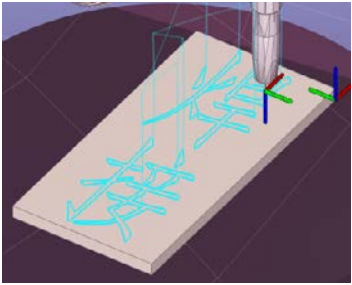
图 2 离线编程机器人单元模型

2.1.3 模拟仿真

在 Robotmaster 模拟仿真界面,从机器人库中选择本试验所用 KUKA KR16 机器人,工具为 Fronius 焊枪,根据机器人系统原备份文件输入机器人六轴上焊枪 TCP 坐标: X=1.42, Y=1.51, Z=411.026, A=-135°, B=-45°, C=0, 根据工件在转台上的摆放位置,输入工件原点坐标相对于基座标系的位置为(1513,0,857,0,0,0),在优化面板界面对上述 9 条焊缝路径进行优化计算,检测是否存在奇异点、轴限位、不可达或是干涉等问题,若出现报错,及时修正存在问题的编程点,“焊接”字形焊缝仿真界面如图 3 所示。



(a)机器人单元模拟仿真



(b) 焊枪运动轨迹

图 3 模拟仿真界面

2.1.4 机器人实际场景焊接

后置处理的目的是将离线编程系统生成的源代码程序编译为机器人控制系统能够识别的目标程序,本试验中,字形模型被固定在外轴焊接平台上,经过后处理计算及优化处理,平板堆焊制字的模拟仿真结果完全达到作业的要求后,在目标程序中激活工具加工命令,将该作业程序转换成目标机器人的控制程序和数 据,并通过通信接口下装到目标机器人控制柜,驱动机器人完成指定的任务。

在实际施焊之前,为了保证试验过程的安全性,先将字形焊缝的焊接程序命令在低速下运行一遍。运行无误后,机器人回到 home 点位置,打开焊接电源和保护气体,将机器人运行状态调整为自动,开始实际焊字,焊接工艺参数如表 1 所示,120mm 高度“焊接”字形焊缝焊接过程大约耗时 8min,最终的焊缝成形如图 4 所示。

表 1 字形焊缝焊接工艺参数

送丝速度	焊 焊 焊	焊接速度	是	保护气体	焊缝
$V_s/m\min^{-1}$	I/A U/V	$V_w/m\min^{-1}$			h/mm
2.4	98 16.7	0.4	否	80%Ar+20%CO ₂	2.6



图4 “焊接”焊缝成形

由图4可以看出封闭字形的焊缝轨迹方正圆润,字形饱满美观,无明显飞溅,焊接规范参数合理,焊接过程一气呵成,验证了Robotmaster 离线编程仿真程序安全可靠。与此同时,机器人离线编程堆焊刻字的方式与传统手工堆焊刻字相比,生产效率提高了50%以上。但不难发现,由于字形焊缝为封闭轨迹,每一条焊缝的起弧点也即为熄弧点,这就导致在焊缝的起弧点、熄弧点以及字形转折处位置存在熔敷金属突出过高。初步分析,考虑两种原因导致这种问题,其一由于焊枪在焊缝转折处的运动并非简单的line 直线运动,而是略带圆弧运动,从而导致转折处的焊接速度整体偏小,导致余高略微偏大。另一方面,焊枪在起弧和熄弧的位置停留时间略长也会导致焊缝余高增大。为了减小起弧点熄弧点重叠带来的焊缝余高过大影响,在后续的机器人程序处理中,将每一条焊缝的熄弧点提前至倒数第二个轨迹编程点,减小熄弧位置的金属熔敷量,利用电弧熔滴的扩散作用形成最终的封闭焊缝。另一方面,在转折点程序中添加新的焊接速度值,适当提高笔划转折编程点处的焊接速度,以保证焊缝字形的整齐划一。

2.2 薄壁圆筒增材制造试验

为了验证弧焊机器人离线编程在增材制造领域^[7]的应用,本试验选取薄壁圆筒零件作为增材对象。首先在Solidworks 三维软件中建立80mm×80mm×10mm 的Q235B 试验基板模型,在母材模型上建立直径50mm,高度60mm 的圆筒零件模型,保存数模类型为SOLIDWORKS,将模型导入到Robotmaster 离

线编程软件3D 打印模块中,每2mm 堆积1 层,共计30 层,弧焊弧焊机器人增材制造仿真如图6 所示。依据6.1 小节试验,为避免单向逐层堆积引起的零件成形不规则,本次试验中薄壁圆筒的增材制造采用螺旋式上升的路径规划,每焊完一层,焊枪略微提升1mm,逐层堆积直至30 层收弧处。由图可知,模拟仿真环境中焊枪与零件模型发生了干涉,实质上模型为增材制造后的理想零件,实际试验过程并不会发生干涉的问题。

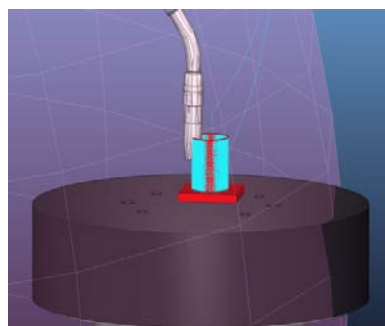


图5 弧焊弧焊机器人增材制造仿真

薄壁圆筒零件增材制造试验中,每层焊道期望高度值为2mm,焊缝熔宽为3mm,考虑到过大的热输入可能会导致堆积层塌陷或是零件变形较大,为了保证零件成形精度,试验中采用较小的焊接工艺规范,工艺参数如表2 所示。

表2 薄壁圆筒零件增材制造工艺参数

焊接 电流 I/A	焊接 电压 U/V	送丝速度 $V_s/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	焊接速度 $V_b/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	保护气 $Q/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$
78	15.4	1.9	0.3	13

零件三维模型与实际零件成形如图6、图7 所示。

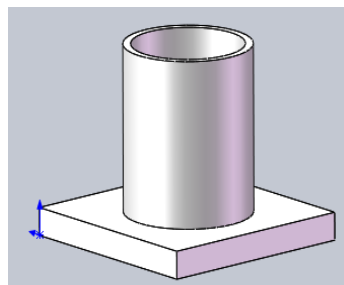


图6 零件三维模型



图7 实际零件

直径 50mm、高度 60mm 的薄壁圆筒零件堆焊增材制造耗时 26min。经测量，圆筒零件实际高度为 58mm，熔敷层平均层高为 1.93mm，与模型层高 2mm 的误差率为 3.5%，表明弧焊增材制造工艺参数相对合理，实际零件达到了零件三维模型的精度要求。由图 6.7 可知，在薄壁圆筒最底部几层，堆积层次较为清晰明了，然而随着层数的增加，圆筒零件的表面成形质量越来越粗糙，分析考虑是由于机器人精度方面的缺陷，实际焊枪角度并非垂直于母材基体表面，随着堆积层数越高，焊枪偏移量逐渐增加导致堆积高度方向发生熔敷金属侧面流淌。另外，逐层腹肌过程中热输入过大也会导致堆积金属发生塌陷或流淌的现象。综上，考虑采用 CMT 冷金属焊接工艺或添加脉冲的方式有效控制焊接过程的热输入量，并且对最终零件表面还需进行一定的机加工处理。

2.3 成形零件显微硬度测试

对薄壁圆筒零件的高度方向进行分层处理，由下至上每隔 1.83mm 选取测试点，即平均每堆积 3 层进行维氏硬度测试，测试结果如图 8 所示。

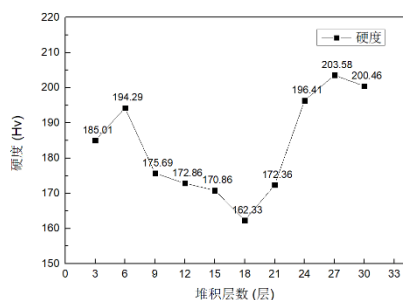


图8 堆焊层硬度与堆积层数的关系

由图 8 可知，零件堆积层的硬度随着堆积

层数的增加总体呈现先降低后增加的趋势，中间层部分硬度较低，顶端硬度较大。在单层多道焊过程中，随着熔敷金属的逐层堆积，后续焊缝对先前焊缝起着焊后热处理的作用，因此焊缝金属冷却较慢，堆积层硬度降低。而堆焊层顶端焊后在空气中冷却速度较快，容易产生脆硬组织，实心焊丝 H08Mn2SiA 碳当量较高，其单道焊缝为针状马氏体组织，导致堆焊层顶端的硬度突然增高。

3 结论

(1) 基于 KUKA KR16 机器人以及 Fronius TPS5000 数字化焊接电源，采用直径 1.2mm 实心焊丝 ER50-6、送丝速度 $2.4\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 、焊接电流 96A、焊接速度 $0.4\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 、保护气 80%Ar+20%CO₂ 的机器人焊接工艺参数组合在 10mm 厚度的平面钢板上焊接能够得到成形较为良好的字形焊缝。相较于传统手工堆焊刻字，机器人离线编程堆焊刻字焊接过程稳定，焊缝轨迹方正圆润，字形饱满美观，无明显飞溅，字形焊缝成形质量、生产效率都得到了明显提高，同时劳动力成本大大降低，达到了降本增效的目的。

(2) 搭建了一套机器人离线编程增材制造系统，研究了不同增材方向对增材制造零件成形的影响，结果表明：往复逐层增材有助于零件规则成形。在低热输入规范参数下，进行了弧焊机器人离线编程增材制造薄壁圆筒零件试验以及堆焊层高度方向上的硬度测试，结果表明：该增材系统下的三维零件模型与实际零件高度吻合；在复杂的堆积过程中，后续焊缝对先前焊缝起着焊后热处理的作用，对焊缝组织、力学性能影响显著。

参考文献：

- [1] H. M. Chen, Z. Y. Xiong, P. Liu. Design and Implementation of the Off-line Programming System for Arc Welding Robot[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008:152-154.
- [2] C. S. Kim, K. S. Hong, Y. S. Han, *et al.* PC-based off-line programming using VRML for welding robots in shipbuilding[C]// IEEE Conference on Robotics, Automation & Mechatronics. 2004:88-89.
- [3] W. Dong, H. Li, X. Teng. Off-line programming of Spot-weld Robot for Car-body in White Based on Robcad[C]// International Conference on Mechatronics & Automation. 2007:25-27.

- [4] 陈树君, 赵昀, 肖珺,等. 铝合金电弧熔积成形机器人增材制造系统[J]. 焊接, 2016(4):9-12.
- [5] 尚传妮. 焊接机器人离线编程及仿真作业系统研究[D]. 济南: 山东大学硕士学位论文. 2017:18-19.
- [6] 王光建, 廖志勇, 陈雪华. 机器人写字技术及其运动参数[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(12):6-9.
- [7] 关桥. 焊接/连接与增材制造(3D 打印)[J]. 焊接, 2014(5):1-8.

作者简介: 马骏, 男, 1994 年出生, 江苏科技大学硕士研究生; Email: 15695212511@163.com.

通讯作者: 高飞, 1970 年出生, 副教授; 主要从事机器人焊接方面的研究工作; Email: fei.gao88@126.com.

仅供交流



江苏船舶微信公众号



江苏船舶网上投稿系统