DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.01.048

变电压电解加工对槽侧壁锥度的改善研究

陆嘉文,朱栋,任明珠,张晓博 (南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:槽结构是双极板的主要结构,电解加工是槽结构的主要加工方式之一。由于杂散腐蚀 等原因,电解加工槽结构存在侧壁锥度问题。采用变电压的方法,开展单槽的电解加工仿真和 实验,以改善槽的侧壁锥度。以14 V 为中心电压,开展线性变电压仿真和线性变电压振动电 解加工实验。研究结果表明:变电压能改善槽的侧壁锥度,在10~18 V 线性变电压时可加工出 比较垂直的槽。 关键词:槽;变电压;锥度;电解加工

中图分类号:TH16 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2022)01-0188-04

Research on Improvement of Opposite-slot-sidewall Taper by Variable Voltage Vibratory Electrochemical Machining

LU Jiawen, ZHU Dong, REN Mingzhu, ZHANG Xiaobo

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China) **Abstract**: Slot structure is the main structure of the bipolar plate, and one of its main processing methods is electrochemical machining. To address the taper defects of sidewall caused by stray corrosion and other factors in the electrochemical machining slot structure, the method of variable voltage is used to carry out electrochemical machining simulation and experiment of a single cell to improve the taper of the side wall of the slot. With 14 V as the center voltage, linear variable voltage simulation and electrochemical machining experiment on linear variable voltage vibration are conducted. The research results show that the variable voltage can improve the taper of the slot sidewall, and a relatively vertical slot can be processed with linearly voltage at 10–18 V. **Keywords**: slot; variable voltage; taper; electrochemical machining

0 引言

质子交换膜燃料电池是一种将燃料中的化学能直接 转化为电能的发电装置,具有能量转化效率高,无污染等 特点,在新能源汽车等方面有着广泛的应用^[1-2]。双极板 是燃料电池的关键,金属双极板相比石墨双极板在强度、 延展性、加工工艺、导电导热性能等方面更具优势,具有很 大的发展前景^[3-4]。

槽结构是双极板的主要结构,双极板槽结构传统的成型方式主要有液压成型、冲压成型和铸造成型。电解加工因其加工效率高、表面质量好、无残余应力、无工具损耗等特点^[5-6]逐渐被应用于双极板槽结构的加工中。NATSUW等人利用射流电解加工的方法在304不锈钢表面加工出多槽结构^[7]。JIANG X C 等通过调整阴极沿流程方向的尺寸,减小了槽沿流程方向加工深度的变化^[8]。

电解加工在金属板槽结构方面的应用日趋成熟,但仍 有很多问题需要解决,如加工槽侧壁时产生的锥度问题。 本文针对电解加工 304 不锈钢槽结构时存在的锥度问题, 采用变电压的加工方法^[9-10],开展变电压单槽电解加工的 仿真和实验。

1 单槽变电压电解加工方法介绍

在单槽恒电压电解加工过程中,由于杂散腐蚀等原因,槽的侧壁存在锥度问题。通过调节加工过程中的电压 参数,来改变不同加工时间的材料溶解速度,以影响槽侧 壁的成形(图1)。



图1 槽的振动电解加工过程

线性变电压是加工过程中调节电压的主要方式之一, 在加工过程中易于实现。通过改变电压变化的范围,可得 到不同的线性变电压曲线(图2),进而控制电解加工的杂 散腐蚀,改变试件的侧壁锥度。

基金项目:国家自然科学基金广东联合基金项目(U1601201);中央高校基本科研业务费专项资金资助(NE 2017003);南航研究生创新基地(实验室)开放基金资助项目(kfjj20190510)

第一作者简介:陆嘉文(1995—),男,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为电解加工技术。



图 2 线性变电压曲线

本文主要通过采用改变加工过程中电压的方法,对槽 的侧壁锥度进行改善。

2 变电压对槽锥度影响的电场仿真

以14V为中心电压,开展线性变电压的电场仿真研究,分析不同变电压参数对槽侧壁锥度的影响情况,验证 变电压改善槽侧壁锥度的可行性。

根据实际的加工初始状态构建单槽电解加工的二维 截面电场仿真模型(图 3)。工件阳极与工具阴极的初始 间隙取 0.1 mm,工具阴极的进给速度为 0.1 mm/min。双 极板槽的深度一般在 0.5 mm~2.5 mm 之间^[11-12],取工具 阴极进给量为 0.7 mm。工件表面不加工部分用绝缘块压 住,采用小间隙代替两重合的边界。



电极间隙内的电场分布满足拉普拉斯方程[13]:

$$\Delta^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0$$

式中:*φ* 为电极间的电势; *x*、*y* 为二维平面上的笛卡儿 坐标。

根据实际的加工参数设置仿真模型的边界条件(表1)。

表1 仿真模型边界条件

边界设置	边界	边界条件	
工件阳极边界	Γ1	$\varphi = U(t)$	
工具阴极边界	Γ7	$\varphi = 0$	
工具阴极绝缘边界	<i>I</i> 6 <i>J</i> 8	$\frac{\partial}{\partial n} = 0$	
自由边界	Γ2 Γ5 Γ9 Γ12	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} \approx 0$	
固定绝缘边界	Γ3 ,Γ4 ,Γ10 ,Γ11	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$	

以 14 V 为中心电压, 开展 16~12 V、14 V、12~16 V、 10~18 V以及 8~20 V 的线性变电压仿真, 得到在不同变 电压仿真下槽的截面轮廓(图4)。通过比对不同仿真参数下的槽侧壁轮廓,可以发现线性变电压对锥度改善有明显的效果。16~12V线性变电压时,锥度问题相对14V 恒压更加明显;12~16V线性变电压时,锥度问题相对于 14V恒压得到了改善;随着调压范围的增大,改善效果更 加明显,在8~20V线性变电压时,槽的下部宽度大于上部 宽度,出现了负锥度。



图 4 变电压仿真下槽的单侧轮廓线

仿真研究结果表明:采用线性变电压,通过调节加工 过程中的平衡间隙,可有效地改善槽的侧壁锥度。

3 变电压单槽振动电解加工实验

为了验证仿真结果的可靠性,开展以 14 V 为中心的 线性变电压单槽振动电解加工实验,研究线性变电压对槽 侧壁锥度的改善情况。

3.1 实验内容

实验在自主研制的振动电解加工机床上进行,实验采 用最大电流为5000A的稳压脉冲电源,通过斩波器来实 现电压与振动的耦合控制。夹具采用环氧树脂材料,其具 有良好的刚性和绝缘性。采用双入口进液的方式,确保加 工过程中流场的稳定。过滤系统和冷却系统能有效保证 加工过程中电解液浓度和温度的稳定性。通过加工系统 中的电流、电压、温度、压力和流量传感器,可实现对加工 过程中参数的实时监测(图5)。



实验所采用的工件和工具阴极使用材料为不锈钢 304(图6)。工件通过压板固定在阴极引电板上,加工过 程中绝缘压块通过弹簧紧贴在工件压板表面。工具阴极 宽度为2mm。侧壁进行绝缘处理,避免阴极侧壁对加工 槽锥度的影响,工具阴极随机床主轴做振动进给运动。



图 6 工件、阴极及其剖面示意图

采用的电解质溶液是质量分数为 20% 的硝酸钠溶 液,入口压力为 0.8 MPa,电解液温度控制在 30 ℃。实验 采用振动进给加工,振动频率为 10 Hz,振动幅度为 0.25 mm,机床主轴进给速度为 0.1 mm/min。加工初始间 隙为 0.1 mm,总进给量为 1 mm。单个振动循环的通电时 间占振动周期的 1/9。

采用不同的线性变电压参数(表 2),开展变电压振动 电解加工实验,分析不同变电压参数下槽的侧壁锥度情况。

表 2	变电压振动电解实验电压参数

实验次数	1	2	3	4	5
变电压/V	16~12	14	12~16	10~18	8~20

3.2 结果分析

电解加工槽结构不可避免地会出现加工圆角,为减小加工圆角对槽侧壁锥度的影响,在分析锥度时,去除圆角 对锥度的影响(图7),本文的锥度计算公式为

$$\theta = \arctan\left(\frac{H}{X}\right)$$

式中:H为去除加工圆角影响后的槽高度;X为去除圆角 影响后的槽侧壁单边跨距。图 7 中,R1为槽的顶部圆角, R2为槽的底部圆角; θ 为槽的锥度。 θ 越大,槽的锥度越 大: θ >90°时,槽为负锥度。



在工具显微镜下对不同变电压参数得到的试件进行 观察,获得加工后槽的截面轮廓(图8)。由图8可以看 出,14V恒电压加工条件下,槽的侧壁有明显的锥度;当电 压由16V线性减小到12V时,槽侧壁锥度明显减小;当 10~18V线性变电压加工时,槽的侧壁基本垂直,锥度改 善效果明显;当进一步扩大变电压范围时,线性变电压范 围为 8~20 V 时,槽侧壁甚至出现了负锥度。



(c) 8 20 V



提取变电压振动电解加工下槽的轮廓截面线(图9)。 从图9中可以看出,随着初始电压的减小,结束电压的增 大,槽侧壁锥度逐渐增加,实验结果与仿真结果相符。





通过锥度计算,获得试件的侧壁锥度值(图 10)。锥 度值随着加工前后电压差的增大而增大,合理调节线性变 电压的参数,能够改善由于杂散腐蚀等原因造成的锥度问 题,将槽的侧壁控制到近似垂直。在 10~18 V 线性变电压 振动电解加工时,槽的侧壁锥度值为 89.3°,接近于垂直。 由不同变电压参数加工出的槽侧壁锥度值可得,线性变电 压振动电解加工可以有效改善槽的侧壁锥度。



4 结语

本文针对 304 不锈钢开展变电压振动电解加工仿真 和实验,以改善槽的侧壁锥度。根据仿真和实验结果,可 以得出以下结论:

1) 开展变电压单槽电解加工电场仿真, 仿真结果表 明变电压能改善槽的侧壁锥度。

2) 开展变电压单槽振动电解加工实验,电压由 10~ 18 V线性变化时,能有效加工出侧壁近似垂直的槽。

参考文献:

- [1] STEELE B C, HEINZEL A. Materials for fuel-cell technologies [J]. Nature, 2001,414(6861):345-352.
- [2] WANG S Y, JIANG S P. Prospects of fuel cell technologies [J]. National Science Review, 2017,4(2):163-166.
- [3] BAR-ON I, KIRCHAIN R, ROTH R. Technical cost analysis for PEM fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109(1):71-75.
- [4] 黄乃宝,衣宝廉,侯明,等. PEMFC 薄层金属双极板研究进 展[J]. 化学进展,2005,17(6):963-969.
- [5] 徐家文, 云乃彰. 电化学加工技术: 原理・工艺及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [6] 朱荻. 国外电解加工的研究进展[J]. 电加工与模具,

2000(1):11-16.

- [7] NATSU W, IKEDA T, KUNIEDA M. Generating complicated surface with electrolyte jet machining[J]. Precision Engineering, 2007(2):101-104.
- [8] JIANG X C, LIU J, ZHU D, et al. Research on stagger coupling mode of pulse duration and tool vibration in electrochemical machining[J]. Applied Sciences, 2018,8(8):1296.
- [9] 许绝舞. 特殊结构的扩压器套料电解加工技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [10] 胡兴焱. 扩压器套料电解加工锥度改善方法基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [11] 张海峰,衣宝廉,侯明,等. 流场尺寸对质子交换膜燃料电池 性能的影响[J]. 电源技术,2004,28(8);494-497.
- [12] 陈磊, 郭朋彦, 张瑞珠, 等. 质子交换膜燃料电池流道尺寸对 电池性能的影响[J]. 河南科技, 2018(1):141-142.
- [13] FANG X L, QU N S, ZHANG Y D, et al. Improvement of hole exit accuracy in electrochemical drilling by applying a potential difference between an auxiliary electrode and the anode [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (3): 556-564.

收稿日期:2020-11-11

(上接第180页)

另一方面,在实验过程中还记录了每张图片提取位姿 所需要的时间,计算出平均处理一张图片时长为254ms, 即3.94帧/秒。表2中列出了其他已公开检测方法的文 献中说明的检测速度,可以直观地看出本文提出的方法在 检测速度上远远超过两种已公开的方法。

表 2 不同方法的检测速度对比

检测方法	检测速度/(帧/秒)
文献[6]方法	0.02
文献[13]方法	0.62
本文位姿检测方法	3.94

4 结语

针对机器人抓取不规则金属物料存在的抓取位姿检 测问题,提出基于轮廓和形心特征的抓取位姿判断方法, 以过形心的直线或射线与物料轮廓相交点的最短欧式距 离作为主要判断依据。该方法首先将物料分为形心在轮 廓内和形心在轮廓外两种类型。对于第一种物料,提出直 线求交法判断抓取位姿,对另外一种物料提出射线求交法 判断抓取位姿;确定最佳的抓取位姿;最后通过实际抓取 实验证明该算法可以实现对不规则的金属物料进行实时、 稳定、准确的抓取。搭建实验平台做抓取验证,并与基于 深度学习的抓取位姿检测结果作对比。结果表明:该算法 能够满足实时的检测图像中不规则废旧金属的最佳抓取 位姿,且不需要大量的训练和学习,非常适用于工业上分 拣抓取作业。

参考文献:

[1] 杨光, 侯钰. 工业机器人的使用、技术升级与经济增长[J].

中国工业经济,2020(10):138-156.

- MARTON Z C, PANGERCIC D, BLODOW N, et al. General 3D modelling of novel objects from a single view [C]//2010 IEEE/ RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2010:3700-3705.
- [3] 朱海波. 基于视觉引导的工业机器人工件搬运技术研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2013.
- [4] 郑晶怡,李恩,梁自泽.基于形状先验模型的平面型工件抓取 位姿检测[J].机器人,2017,39(1);99-110.
- [5] 林强强,金守峰,马秋瑞,等. 面向机器人抓取的零散工件识别与 测量方法[J]. 西安工程大学学报,2019,32(2):192-197.
- [6] LENZ I, LEE H, SAXENA A. Deep learning for detecting robotic grasps [J]. The International Journal of Robotics Research, 2015, 34(4/5):705-724.
- [7] 夏晶,钱堃,马旭东,等. 基于级联卷积神经网络的机器人平 面抓取位姿快速检测[J]. 机器人,2018,40(6):794-802.
- [8] SUZUKI K. Overview of deep learning in medical imaging [J]. Radiological Physics and Technology, 2017, 10(3):257-273.
- [9] 梁晓琴. 计算机图像处理技术的应用探讨[J]. 中国科技信息,2020(19):53,55.
- [10] YE J, FU G K, POUDEL U P. High-accuracy edge detection with Blurred Edge Model [J]. Image and Vision Computing, 2005,23(5):453-467.
- [11] 孙坤. 不规则轮廓的机器视觉检测算法研究[D]. 广州:华 南理工大学,2018.
- [12] TRUJILLO-PINO A, KRISSIAN K, ALEMÁN-FLORES M, et al. Accurate subpixel edge location based on partial area effect[J].Image and Vision Computing, 2013, 31(1):72-90.
- [13] PINTO L, GUPTA A. Supersizing self-supervision: learning to grasp from 50K tries and 700 robot hours [C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, Sweden: IEEE, 2016: 3406-3413.

收稿日期:2020-12-16