

# 管电极电解铣削加工 316 不锈钢的实验研究

冯瑞,刘洋,曲宁松

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**采用金属管电极进行射流电解铣削加工,研究了 316 不锈钢材料在不同电压、初始间隙、进给速度等工艺参数下电解铣削沟槽的加工特性以及在不同跨距、走刀轨迹下电解铣削加工平面的加工特点。实验表明:工艺参数对沟槽和平面加工有较大的影响。

**关键词:**316 不锈钢;管电极;射流电解铣削;实验研究

**中图分类号:**TG54 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)01-0019-04

## Experimental Study on Electrochemical Machining of 316 Stainless Steel with Tube Electrode

FENG Rui, LIU Yang, QU Ningsong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The metal tube electrode was used for jet electrochemical milling. The machining characteristics of electrochemical milling grooves of 316 stainless steel at different voltage, initial clearance and feed rate, and the machining characteristics of the surface of electrochemical milling under different span and tool path were studied. Experiment results show that the process parameters have great influence on groove and plane.

**Keywords:** 316 stainless steel; tube electrode; jet electrochemical milling; experimental study

## 0 引言

在机械零件、汽车配件、化工、医疗器械、太阳能电池基板<sup>[1]</sup>等工业领域以及近年来快速发展的航空航天、武器装备等领域,不锈钢都被广泛使用。不锈钢的材料特性主要是具有较强的耐腐蚀性、较强的硬度以及耐热性等。不锈钢包括铁素体不锈钢、奥氏体不锈钢和马氏体不锈钢等,其中铬镍奥氏体不锈钢的综合性能最好,它有最多的牌号和最大的产量,使用范围最广<sup>[2]</sup>。316 不锈钢属于铬镍奥氏体不锈钢,因添加了 Mo,其耐蚀性、耐大气腐蚀性和高温强度特别好,其制造的零部件可在海洋环境和侵蚀工业气体中长时间工作<sup>[3]</sup>。316 不锈钢属于难加工材料,采用机械加工会存在加工效率低、刀具磨损严重、易变形等问题;而电火花加工也有一些缺陷,例如:会形成热影响区和重铸层、表面有较大裂纹等,这些缺陷会影响工件疲劳寿命<sup>[4]</sup>,并且电火花加工过程中会对电极造成损耗,降低加工效率<sup>[5]</sup>。

电解加工是利用金属的电化学阳极溶解原理将工件加工成形的一种特种加工技术,它具有加工生产率高、工件不损耗、被加工材料不受本身力学性能限制、加工表面无毛刺与残余应力等特点,已成为航空航天等领域难切削加工材料的一种重要制造技术<sup>[6]</sup>。但传统拷贝式电解加工通常需要设计制造结构复杂的工具和工装夹具,加工通用性较差。

电解铣削加工技术不同于传统的电解加工,它采用简单形状的工具阴极,由计算机控制系统控制阴极运动,通过对指定区域的电化学溶解去除材料,最终形成加工表面。电解铣削加工特点主要是成本低,加工柔性高,可以解决不锈钢、钛合金等难加工材料机械加工中成本高、加工效率低等问题。使用管电极射流电解铣削加工时,只有电解液射流液柱之下的区域电流密度高,加工定域性好。

WANG X D 等<sup>[7]</sup>使用管电极电解铣削加工,研究了加工工艺参数、管电极加工面出液形状和加工出的凹槽两侧杂散腐蚀之间的关系,通过优化出液形状,较为明显地减弱了凹槽两侧的杂散腐蚀。RAJURKAR K P 等<sup>[8]</sup>在 16% 硝酸钠溶液中,使用管电极平动的方式进行电解加工研究,电极平动可以让电解液在间隙内均匀流动,通过转移空穴区,从而使沟槽状溶解消失,大大提高了加工的尺寸精度。

本文采用金属管电极进行电解加工,首先研究了工艺参数对加工沟槽的影响,得到沟槽加工形貌、材料去除率与工艺参数之间的关系。在此基础上,研究不同运动轨迹对加工平面的影响,得到平面加工形貌、材料去除率与运动轨迹之间的关系。

## 1 实验原理

管电极射流电解铣削加工是采用中空金属管作为工具阴极,利用电化学阳极溶解原理进行材料蚀除,通过计算机控制系统使管电极在工件表面做扫描运动,从而在工

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2018YFB1105900)

**第一作者简介:**冯瑞(1995—),男,山西运城人,硕士研究生,研究方向为电解铣削加工技术。

件表面加工出一定形状和尺寸特征的加工技术。管电极电解铣削加工原理如图 1 所示。

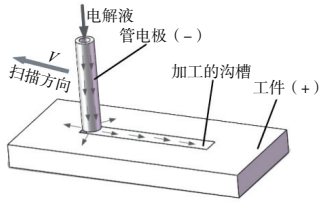


图 1 管电极电解铣削加工原理图

## 2 管电极电解铣削加工实验设置

本实验所用电解液为 20% NaCl 溶液,旨在保证一定加工效率的前提下,研究不同进给速度、加工电压、初始间隙对加工沟槽的影响,以及不同电极跨距  $S$ 、阴极走刀轨迹对加工平面的影响。采用单因素变量法,不考虑不同因素之间的交互作用,仅在其他参数一定的情况下研究单一变量对加工形貌以及表面质量的影响。

加工开始前,通过电子天平称重工件并记录。加工结束后,将工件清洗干净烘干后再次称重,计算材料去除质量并测量表面形貌。表面形貌采用基恩士 3D 轮廓测量仪 VR-5000 进行测量。加工参数如表 1、表 2 所示。

表 1 管电极电解铣削加工实验参数

项目	数值
电压/V	20,30,40,50,60
扫描速度/(mm/min)	1,3,6,9,12,15
初始间隙/mm	0.1,0.2,0.3

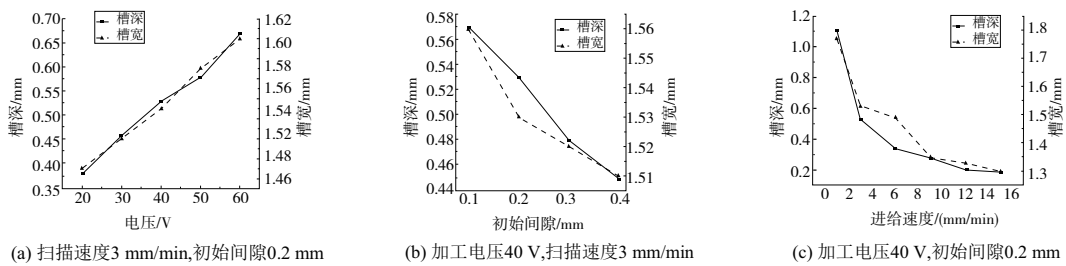


图 3 20%NaCl 溶液中不同加工参数下工件形貌尺寸

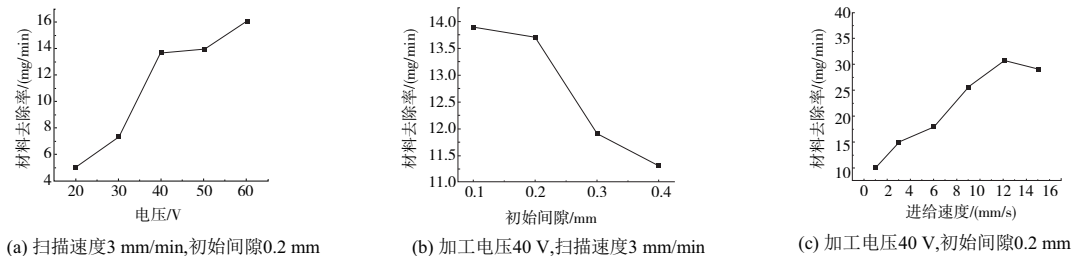


图 4 20%NaCl 溶液中不同加工参数下工件材料去除率

表 2 加工平面实验参数

项目	数值
跨距 $S$ /mm	0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.2
不同走刀方式 加工平面	往复行切走刀、由内向外环切走刀、由外向内环切走刀

3 种走刀轨迹如图 2 所示。表 2 中电极跨距  $S$  为图 2(a) 所示,方向是机床  $y$  方向。研究不同电极跨距  $S$  对加工平面影响时, $x$  方向运动长度为 6mm, $y$  方向均进给 7 次,走刀轨迹如图 2(a) 所示。

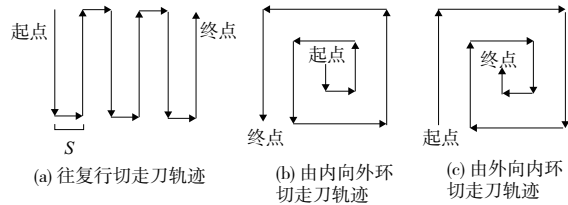


图 2 不同走刀轨迹路径

## 3 结果分析

### 3.1 加工参数对加工沟槽的影响

图 3 是不同加工参数下加工出的沟槽深度和宽度尺寸图。图 4 是不同加工参数下材料去除率图。实验中还研究了不同加工参数下沟槽底部轮廓形貌图,这里仅列出在初始间隙 0.2mm、加工电压为 40V 时不同扫描速度下的结果,如图 5 所示。

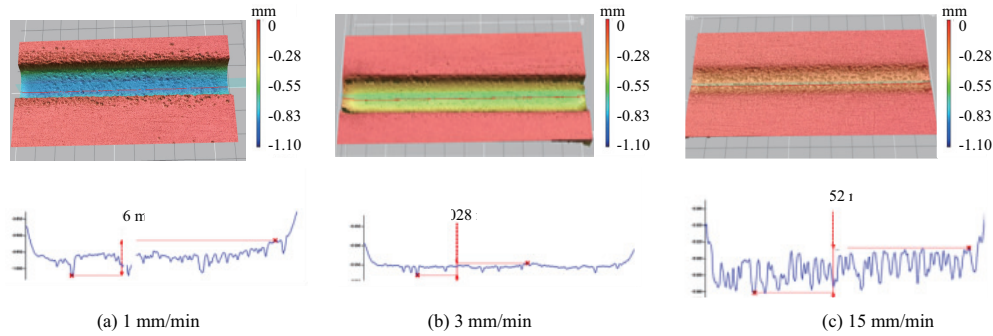


图 5 20%NaCl 溶液中不同进给速度下沟槽底部轮廓图

从图 3 中可以看出,随着电压的增大,加工电流增大,电流密度增大,沟槽深度和宽度增大,材料去除率增大,且在加工电压 30 V(电流密度为 300 A/cm<sup>2</sup>)~40 V(电流密度为 360 A/cm<sup>2</sup>)时变化率最大,因此要高效加工,可从 40 V 选起。

随着初始加工间隙的增大,加工电流增大,沟槽深度和宽度减小,材料去除率减小。在初始间隙为 0.1 mm 时,由于加工间隙较小,加工产物不能及时排除,容易出现短路、打火等现象;而在初始间隙为 0.4 mm 时,由于加工间隙变大,加工电流减小,导致材料去除率减小,加工不均匀,表面点蚀现象严重。电解加工中采用小间隙加工效果更好,为保证材料去除率以及加工质量,选取初始加工间隙为 0.2 mm。

随着进给速度的增大,沟槽深度和宽度减小,材料去除率先增大后减小。进给速度为 1 mm/min 时,由于进给速度很慢,电极在工件表面停留时间长,电解液会再次覆盖工件表面已经加工过的区域,再次受到杂散腐蚀的影响,其表面形貌较差,可在图 5 中看出。而在进给速度为

15 mm/min 时,由于进给速度过快,电极在工件表面停留时间过短,造成工间腐蚀不均匀的效果,并且虽然加工时间减小,但工件腐蚀效果小,导致进给速度由 12 mm/min 到 15 mm/min 时,材料去除率减小。观察沟槽底部的平整度,在 3 mm/min~12 mm/min 之内较好,其最高点和最低点垂直距离分别为 0.028 mm、0.043 mm、0.026 mm、0.026 mm。图 5 中列出进给速度为 3 mm/min 时的加工结果图。综合材料去除率以及希望一次性加工出较深的沟槽,选择 3 mm/min 进行后续实验。

通过观察发现,在本实验研究范围内,进给速度对沟槽宽度和深度、材料去除率影响最大;其次是加工电压;再次是初始间隙。

### 3.2 不同电极跨距 S 对加工平面的影响

图 6 为不同电极跨距 S 对应的平面宽度和深度以及材料去除率变化图。不同电极跨距 S 对应平面轮廓图如图 7 所示。

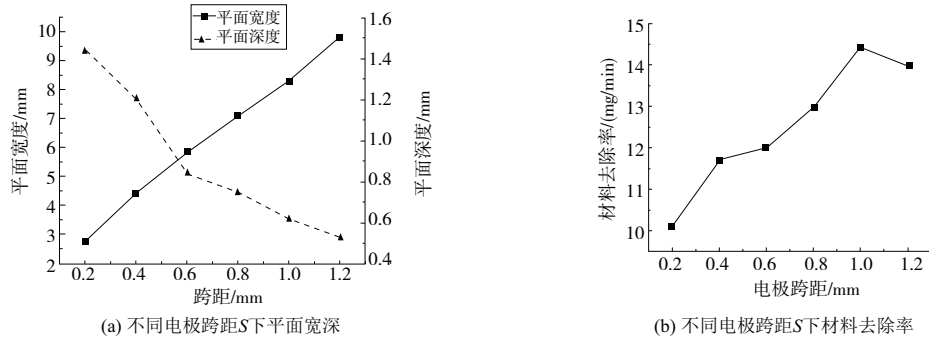


图 6 20%NaCl 溶液中不同横向跨距 S 下平面宽深和材料去除率图

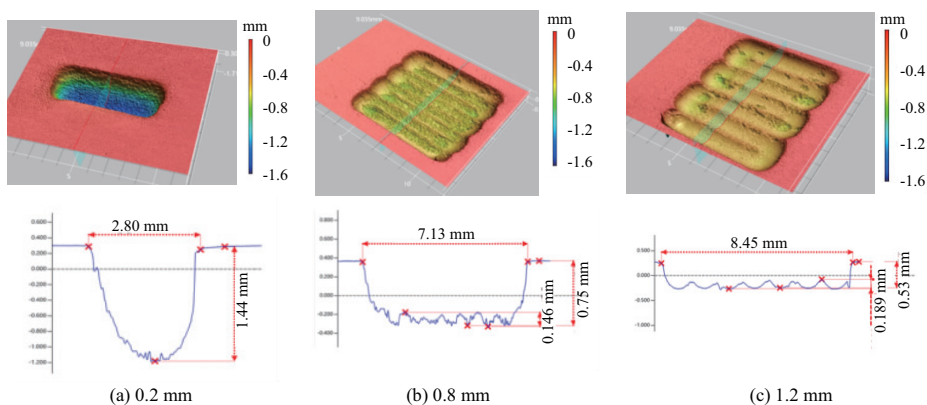


图 7 20%NaCl 溶液中不同横向跨距 S 下平面轮廓图

从图 7 中可以看出,  $S$  为 0.2 mm 和 0.4 mm 时, 加工出的平面宽度较小, 且其呈现出类似凹槽的形状, 材料去除率低, 加工较宽平面速度慢。

$S$  为 1.2 mm 时, 可以清晰地看出每道沟槽的形状, 这是由于  $y$  方向间距过大, 相邻加工区域重合度较小, 测量其最高点和最低点高度差为 0.189 mm, 平面度较差。

$S$  为 0.6 mm、0.8 mm 和 1.0 mm 时加工出的平面平整度较好, 且宽度较大。轮廓线上最高点和最低点垂直距离分别为 0.161 mm、0.146 mm、0.167 mm。故后续研究选择  $S$

为 0.8 mm 进行不同走刀轨迹实验研究。

### 3.3 不同走刀轨迹对加工平面的影响

3 种走刀轨迹相比, 由外向内环切平面平整度相对较差, 轮廓图如图 8 所示。由内向外环切轮廓线上最高点与最低点垂直距离为 0.147 mm, 由外向内环切为 0.166 mm, 往复行切走刀为 0.146 mm。往复行切走刀时会在平面边缘形成波浪状轮廓, 外环切和内环切均可以起到优化边缘的作用, 如图 9 所示。

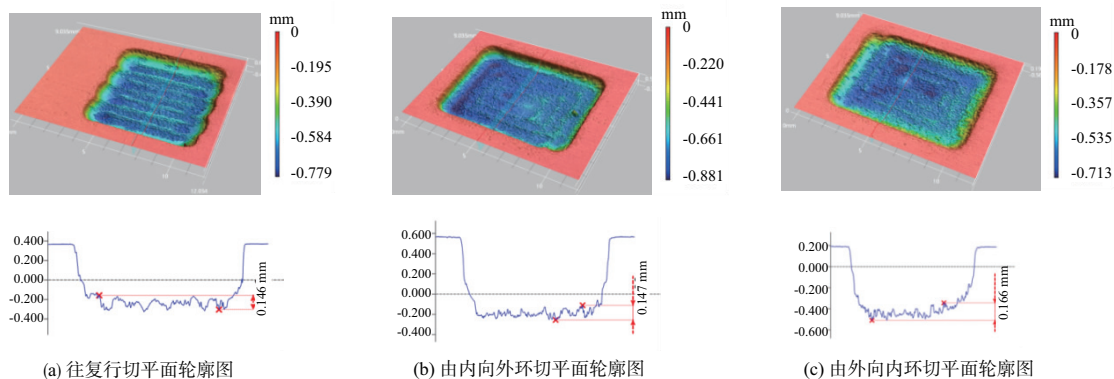


图 8 20%NaCl 溶液中不同走刀轨迹下平面轮廓图

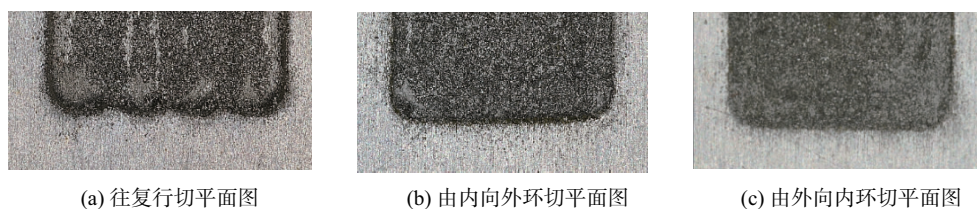


图 9 20%NaCl 溶液中不同走刀轨迹加工平面

## 4 结语

本文使用 20%NaCl 溶液对不锈钢 316 工件进行了管电极射流电解铣削加工研究。得到以下结论:

1) 不同电压、初始间隙、进给速度 3 种工艺参数对管电极射流电解铣削加工 316 不锈钢沟槽的宽度和深度以及材料去除率曲线。在本实验研究范围内, 进给速度的变化对沟槽宽度和深度、材料去除率影响最大, 其次是加工电压, 再次是初始间隙。

2) 在加工电压 40 V、初始间隙 0.2 mm、进给速度 3 mm/min 时, 电极跨距  $S$  为 0.6 mm、0.8 mm、1.0 mm 时, 平面平整度较好。

3) 通过由内向外环切和由外向内环切走刀可以改进往复行切走刀平面边缘的波浪状轮廓形貌。

### 参考文献:

[1] 陶杰, 何雪婷, 朱建平, 等. 柔性薄膜太阳能电池用不锈钢基板的成形技术[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(4): 1-4, 34.

- [2] 陆世英. 不锈钢概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [3] 刘坤坤, 孙伶俐, 何声馨, 等. 316 不锈钢电解抛光最佳参数试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 288-294.
- [4] MISHRA K, DEY D, SARKAR B R, et al. Experimental investigation into electrochemical milling of  $Ti_6Al_4V$ [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29: 113-123.
- [5] 赫全新. 数控电火花线切割加工技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [6] RAJURKAR K P, ZHU D, MCGEOUGH J A, et al. New developments in electro-chemical machining[J]. CIRP Annals, 1999, 48(2): 567-579.
- [7] WANG X D, QU N S, FANG X L. Reducing stray corrosion in jet electrochemical milling by adjusting the jet shape[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 240-248.
- [8] RAJURKAR K P, ZHU D. Improvement of electrochemical machining accuracy by using orbital electrode movement[J]. CIRP Annals, 1999, 48(1): 139-142.

收稿日期: 2020-12-10