|  |
| --- |
| **广东工业大学博士学位论文**模板射流电解加工微沟槽关键技术研究张三二○二○年五月二十五日注：1.请按模版的字体、行间距、图标、表名、公式、页眉等格式要求撰写，红色字体内容学生自行修改。2.学术型硕士生请将“硕士专业学位”替换成“硕士学位”；学术型博士生请将“硕士专业学位”替换成“博士学位”。 |
| 分类号： 学校代号：11845UDC： 密级： 学 号：**广东工业大学博士学位论文**模板射流电解加工微沟槽关键技术研究张三指导教师姓名、职称： 李四 教授 专业学位类别（领域）名称：工程（机械工程） 学 生 所 属 学 院： 机电工程学院 论 文 答 辩 日 期： 2020年5月25日 注：1.专业学位类别：工程、工商管理、工程管理、会计、翻译、社会工作、金融、艺术、电子信息、机械、材料与化工、资源与环境、能源动力、土木水利 2.学术型研究生请将“专业学位类别（领域）名称”替换成“一级学科（二级学科）名称”

|  |
| --- |
| A Dissertation Submitted to Guangdong University of Technology for the Master’s Degree of EngineeringInvestigation on masked jet electrochemical machining of micro groovesCandidate: Zhang SanSupervisor: Prof. Li SiMay 2020School of Electromechanical EngineeringGuangdong University of TechnologyGuangzhou, Guangdong, P. R. China, 510006 |

 |

摘要

微沟槽作为一种典型的表面微结构，在微传感器、微反应器、微流体器件以及微型燃料电池等产品核心零部件上发挥重要作用。如何实现复杂形状微沟槽的精密、高效、低成本制造成为研究的热点。目前，微沟槽的加工方法主要有微细机械切削加工、微细激光加工、微细电火花加工以及微细电解加工等加工方式。电解加工因具有无应力接触、无切削热、无工具电极损耗、可实现离子级别的材料去除等特点，在金属微结构加工方面优势明显。针对现有掩模电解加工中掩模制作工艺复杂、电解产物排除困难、沟槽长度方向尺寸一致性差等问题，本文提出一种模板射流电解加工微沟槽结构新方法。该方法将带有单个或单排微通孔结构的模板与金属喷嘴集成为一体，加工过程中保持模板与工件表面接触，电解液通过喷嘴高速喷入模板微通孔到达工件表面，通过控制喷嘴与工件之间的相对运动便可由点到线扫描加工出复杂曲线形或阵列微沟槽结构。本文的主要研究内容如下：

（1）提出模板射流电解加工方法，搭建电解加工微沟槽实验平台，完成模板喷嘴与工装夹具设计制作，开发基于LabVIEW软件的运动控制系统和数据采集系统，以满足实际加工实验需求。

（2）通过ANSYS电场仿真对模板射流电解加工微沟槽成形规律进行理论分析。分别完成了单点微坑和微沟槽成形过程模拟，通过计算电流密度变化过程分析了微沟槽加工首尾两端圆角形成过程，并将理论计算与实际加工微沟槽首尾两端形貌进行对比。研究了加工电压、模板尺寸与扫描速度参数对微沟槽仿真计算结果的影响，为进一步实验与工艺参数优化打下了基础。

（3）进行模板射流电解加工微沟槽工艺实验，研究了关键参数如脉冲频率、脉冲占空比、喷嘴扫描速度以及扫描次数与微沟槽加工定域性、材料去除率以及电流效率之间的关系。最终通过参数优选，在加工电压30 V，脉冲频率1000 Hz，占空比20%，扫描速度20 μm/s的条件下成功加工出槽宽90 μm，槽深20 μm的弯曲蛇形、直线和交叉阵列形以及阵列微缝等高质量微沟槽结构，验证了模板射流电解加工方法的可行性。

（4）为提高微沟槽模板射流电解加工定域性，提出采用金属模板代替绝缘模板进行电解加工。仿真结果表明，采用金属模板能够改变微沟槽加工区域电场分布，使模板孔边缘处电场削弱，从而减小侧向腐蚀。实验结果表明，相比于绝缘模板，采用金属模板加工侧向腐蚀系数*EF*从1.47直接增加至6.11。采用金属模板能够显著减小射流电解加工过切量，提高加工定域性。

关键词：电解加工；微沟槽；模板；射流

ABSTRACT

As a typical micro scale structure, micro grooves with a certain size and shape are widely used in micro sensors, micro reactors, micro fluidic devices and micro fuel cells. How to realize the precision, high efficiency and low cost manufacturing of micro grooves with complex shapes has become the focus of research. At present, the machining methods of micro groove mainly include mechanical micromachining, laser beam micromachining, electrical discharge micromachining and electrochemical micromachining. Electrochemical machining has obvious advantages in metal microstructure processing due to its features of stress-free contact, no cutting heat, no electrode tool wear, and ion level material removal. Aiming at the problems such as complex mask making process, difficult to eliminate electrolytic products, and poor consistency of groove size in traditional electrochemical machining, this paper proposed a novel approach of masked jet electrochemical machining for micro groove structure. A flexible insulated mask with micro through holes was covered on the head surface of a metallic nozzle. During machining, the mask on the modified nozzle was contacted with the workpiece, and the jetting electrolyte in the nozzle was divided into different machining regions by the micro-through-holes in the mask, then, the micro grooves could be generated by moving the workpiece with an effective voltage applied between the nozzle and workpiece. By controlling the relative motion between nozzle and workpiece, complex curved shape or array micro grooves can be processed from dot to line scanning. The main contents of this paper are as follows:

(1) A masked jet electrochemical machining method was proposed, and an experimental device for micro groove machining was built. The software development of motion control and data acquisition based on the LabVIEW platform was carried out to meet the requirements of the processing experiment.

(2) In this paper, the forming process of micro grooves in masked jet electrochemical machining is theoretically analyzed by ANSYS electric field simulation. The simulation of single-point micro dimple forming process and the simulation of point-line micro groove forming process were completed respectively. The process of forming transition arcs at both starting and ending points of micro groove was analyzed by calculating the current density change, and the arc profiles of the theoretical calculation and the actual machining of micro groove at both starting and ending points were compared. The influence of pulse voltage, mask size and scanning speed on the simulation results of micro groove was studied.

(3) On the basis of the simulation results, the experimental verification was carried out. The relationship between the key parameters, such as pulse frequency, pulse duty cycle, scanning speed and scanning times, and the machining localization, material removal rate and current efficiency of the micro grooves was studied. Finally with the optimized parameters (pulse voltage 30 V, pulse frequency 1000 Hz, pulse duty cycle 20%, scanning speed 20 μm/s), serpentine, straight line, cross shape micro grooves and array microslit structure with the width of 90 μm, the depth of 20 μm were successfully generated, verified the feasibility of the masked jet electrochemical machining method.

(4) In order to improve the localization of processed micro groove, the conductive mask was used to replace the insulation mask for the simulation and experimental study. The simulation results showed that using conductive mask could change the electric field distribution in the micro groove processing area, reduce the electric field identity at the edge of the mask hole, and reduce the undercutting of the profile compared to that generated with insulated mask. In the experiment, the etch factor (*EF*) increased from 1.47 to 6.11 using conductive mask, which showed a low undercutting and high machining localization.

**Key words:** electrochemical machining; micro grooves; mask; jet

目录

摘要 I

ABSTRACT III

目录 V

CONTENTS VIII

第一章 绪论 1

1.1本课题研究背景及研究意义 1

1.2微沟槽电解加工国内外相关研究现状 3

1.2.1成型电极电解加工 3

1.2.2电解铣削加工 6

1.2.3掩模电解加工 8

1.2.4射流电解加工 12

1.3本课题研究目标和主要研究内容 15

1.3.1课题研究目标 15

1.3.2主要研究内容 15

1.4课题来源 16

1.5本章小结 16

第二章 模板射流电解加工实验平台搭建 17

2.1加工原理与实验平台 17

2.1.1加工原理 17

2.1.2实验平台 18

2.2实验平台运动控制系统 19

2.2.1运动控制系统功能要求 19

2.2.2运动控制系统整体架构 19

2.2.3基于DMC 5400A运动控制卡硬件组成 20

2.2.4基于LabVIEW上位机控制软件编写 22

2.3实验平台数据采集系统 29

2.3.1数据采集系统功能要求 29

2.3.2电流数据采集实现方法 29

2.3.3基于NI 9222数据采集卡采集系统 29

2.3.4电流数据采集LabVIEW程序编写 30

2.4一体化模板喷嘴制备 31

2.4.1模板材料选择与制备 31

2.4.2模板喷嘴设计制作 32

2.4.3模板喷嘴夹具制作 33

2.5本章小结 34

第三章 模板射流电解加工微沟槽成形规律 35

3.1微沟槽加工过程建模 35

3.2微沟槽加工成形过程动态仿真 36

3.2.1单点微坑成形过程模拟 36

3.2.2由点到线微沟槽成形过程模拟 41

3.2.3微沟槽首尾两端形貌对比分析 45

3.3微沟槽加工尺寸仿真结果分析 48

3.3.1微沟槽加工尺寸与加工电压关系 48

3.3.2微沟槽加工尺寸与模板尺寸关系 49

3.3.3微沟槽加工尺寸与扫描速度关系 51

3.4本章小结 52

第四章 模板射流电解加工微沟槽工艺实验 53

4.1微沟槽加工关键评价指标 53

4.1.1加工定域性 53

4.1.2加工材料去除率 54

4.1.3加工电流效率 54

4.2微沟槽加工实验参数选定 55

4.3脉冲参数对加工结果的影响 56

4.3.1脉冲频率对微沟槽加工结果的影响 56

4.3.2脉冲占空比对微沟槽加工尺寸与形貌的影响 56

4.3.3脉冲占空比对微沟槽加工材料去除率的影响 58

4.3.4脉冲占空比对微沟槽加工电流效率的影响 59

4.4扫描运动参数对加工结果的影响 61

4.4.1扫描速度对微沟槽加工结果的影响 61

4.4.2扫描次数对微沟槽加工结果的影响 62

4.5典型微沟槽结构加工实验 64

4.5.1弯曲蛇形微沟槽 65

4.5.2直线阵列形微沟槽 65

4.5.3交叉阵列形微沟槽 66

4.5.4阵列微缝结构 67

4.6本章小结 68

第五章 采用金属模板提高射流加工定域性的探索 69

5.1金属模板提高加工定域性理论分析 69

5.1.1金属模板加工区域电场分布规律 71

5.1.2金属模板加工结果仿真模拟 71

5.2金属模板与绝缘模板加工成形结果对比 73

5.2.1相同深度下加工结果对比 73

5.2.2不同深度下加工结果对比 74

5.3金属模板螺旋形微沟槽结构加工实验 76

5.4本章小结 77

结论与展望 79

参考文献 81

攻读学位期间取得与学位论文相关的成果 88

学位论文独创性声明 89

致谢 90

CONTENTS

ABSTRACT(IN CHINESE) I

ABSTRACT(IN ENGLISH) III

CONTENTS(IN CHINESE) V

CONTENTS(IN ENGLISH) VIII

Chapter 1 Introduction 1

1.1 Background and significance of research 1

1.2 Analysis of the research status at home and abroad 3

1.2.1 Shaped cathode electrochemical machining 3

1.2.2 Electrochemical milling 6

1.2.3 Through-mask electrochemical machining 8

1.2.4 Jet electrochemical machining 12

1.3 The research objectives and main contents of this subject 15

1.3.1 Research objectives 15

1.3.2 Research content 15

1.4 Project source 16

1.5 Chapter summary 16

Chapter 2 Experimental platform of masked jet electrochemical machining 17

2.1 Processing principle and experimental platform 17

2.1.1 Processing principle 17

2.1.2 Experimental platform 18

2.2 Development of motion control system for experimental platform 19

2.2.1 Functional requirements of motion control system 19

2.2.2 Overall architecture of motion control system 19

2.2.3 Hardware based on DMC 5400A motion control card 20

2.2.4 Software based on LabVIEW motion control program 22

2.3 Development of data acquisition system for experimental platform 29

2.3.1 Functional requirements of data acquisition system 29

2.3.2 Principle of data acquisition system 29

2.3.3 Hardware based on NI 9222 data acquisition card 29

2.3.4 Software based on LabVIEW data acquisition program 30

2.4 Integrated nozzle preparation 31

2.4.1 Material selection and preparation of mask 31

2.4.2 Design and manufacture of masked nozzle 32

2.4.3 Fixture design of masked nozzle 33

2.5 Chapter summary 34

Chapter 3 Simulation analysis of micro-groove processed by masked jet ECM 35

3.1 Modeling of micro-groove machining process 35

3.2 Dynamic simulation of micro-groove forming process 36

3.2.1 Simulation of single point dimple forming process 36

3.2.2 Simulation of point-line micro-groove forming process 41

3.2.3 Analysis of forming transition arcs at both starting and ending points 45

3.3 Simulation results of micro-groove processed by masked jet ECM 48

3.3.1 Effect of pulse voltage on micro-groove size 48

3.3.2 Effect of mask size on micro-groove size 49

3.3.3 Effect of scanning speed on micro-groove size 51

3.4 Chapter summary 52

Chapter 4 Experimental analysis of micro-groove processed by masked jet ECM 53

4.1 Evaluation index of micro-groove machining 53

4.1.1 Processing localization 53

4.1.2 Material removal rate 54

4.1.3 Current efficiency 54

4.2 Selection of experimental parameters for micro-groove machining 55

4.3 Pulse parameters analysis and optimization 56

4.3.1 Effect of pulse frequency on processing results of micro-grooves 56

4.3.2 Effect of pulse duty cycle on size and morphology of micro-grooves 56

4.3.3 Effect of pulse duty cycle on material removal rate of micro-grooves 58

4.3.4 Effect of pulse duty cycle on current efficiency of micro-grooves 59

4.4 Scanning parameters analysis and optimization 61

4.4.1 Effect of scanning speed on processing results of micro-grooves 61

4.4.2 Effect of scanning times on processing results of micro-grooves 62

4.5 Experiment of typical micro-groove machining 64

4.5.1 Curved serpentine groove 65

4.5.2 Linear array microgroove 65

4.5.3 Cross array microgroove 66

4.5.4 Array microslit structure 67

4.6 Chapter summary 68

Chapter 5 Using Conductive mask to improve the localization of masked jet ECM 69

5.1 Analysis of conductive mask improving localization of machining 69

5.1.1 Electric field distribution in conductive mask processing area 71

5.1.2 Simulation of conductive mask machining results 71

5.2 Comparison of forming results using conductive and insulation mask 73

5.2.1 Comparison of processing results at the same depth 73

5.2.2 Comparison of processing results at different depths 74

5.3 Experiments on machining spiral micro-groove of conductive mask 76

5.4 Chapter summary 77

Conclusion and prospect 79

References 81

Publication and patents during study 88

Statement of original authorship and copyright licensing declaration 89

Acknowlegements 90

第一章 绪论

1.1 本课题研究背景及研究意义

随着科学技术的进步，产品逐渐向精密化和高性能化发展，具有毫米及微米尺度微沟槽结构的金属零部件在国防军事、航空航天、新能源、新材料、生物医学、半导体器件等领域的高技术产品中扮演的角色愈加重要。

1.2 微沟槽电解加工国内外相关研究现状

1.2.1 成型电极电解加工

采用与微沟槽结构形状对应的成型阴极，例如薄板阴极，片状阴极等，进行微沟槽电解加工，其特点是方便一次成型微沟槽形状。南京航空航天大学吕焱明等进行了大长宽比深窄槽电解加工阴极设计以及工艺试验研究[16]，其采用的镂空片状阴极结构内部带有加强筋增加刚度，外部非加工区需要绝缘处理。加工试验中片状阴极沿Z轴向下进给，电解液从内部正向流入，对TB6钛合金加工得到长宽比11:1、深宽比9:1、槽宽小于3 mm的直线、曲线深窄槽结构，如图1-4所示。

1.2.2 电解铣削加工

电解铣削是参照成熟的数控铣削加工，通常采用简单形状的微细工具电极，通过控制其运动轨迹，能够实现复杂微结构的电解加工。同时配合超短脉宽脉冲电流或者阴极辅助振动进给等技术后，可以很大程度上提高电解加工的溶解定域性[22]。

1.2.3 掩模电解加工

掩模电解加工（Through Mask Electrochemical Micromachining，TMEMM），其原理是在工件的表面涂敷一层光刻胶，经过光刻显影后，工件上形成具有一定图案的裸露表面，然后通过电化学反应选择性地溶解未被光刻胶保护的裸露部分，最终加工出所需形状[36]，如图1-14所示。掩模电解加工具有蚀除速度快，加工效率高，加工质量好，加工图案具有多样性的优点，是一种广泛使用的电解加工方式。

1.2.4 射流电解加工

1.3 本课题研究目标和主要研究内容

1.3.1 课题研究目标

电解加工相对于其它加工技术具有无工具损耗，无机械切削力，加工无毛刺等优势，但传统电解加工方式还存在一些关键技术问题亟待解决，如掩模电解加工中掩模制作工艺复杂、电解产物排除困难、沟槽长度方向尺寸一致性差；射流电解加工受到喷嘴孔径限制加工尺度受到制约，容易产生杂散腐蚀等问题。针对上述问题本文提出了一种模板射流电解加工微沟槽的新方法。该方法将带有单个或单排微通孔结构的模板与金属喷嘴集成为一体，加工过程中保持模板与工件表面接触，电解液通过喷嘴高速喷入模板微通孔到达工件表面，通过控制喷嘴与工件之间的相对运动便可由点到线扫描加工出复杂曲线形或阵列微沟槽结构。相比于传统电解加工方式，模板射流电解加工方法具有加工定域性高，尺寸一致性好，加工重复性高并且加工成本低的优势。

针对该方法开展仿真模拟与实验研究，最终实现平面直线型，交叉型，弯曲蛇型和螺旋形不同形状微沟槽结构高效、高精度、低成本电解加工，以满足微反应器、燃料电池双极板以及微光栅等加工需求。

1.3.2 主要研究内容

1.4 课题来源

本课题来源于国家自然科学基金（U1601201，51705089）以及广州市珠江科技新星专题项目（201906010099），并受以上基金资助。

1.5 本章小结

本章首先介绍了微沟槽结构的应用领域和场景，以及微沟槽结构加工制造的技术难点，然后对电解加工微沟槽国内外相关研究现状进行综述，分析了现有电解加工方法仍存在的不足之处，提出本文模板射流电解加工微沟槽课题研究目标和相关研究内容。

第二章 模板射流电解加工实验平台搭建

本章对模板射流微沟槽实验加工系统进行介绍，主要包括平台运动控制和数据采集系统软硬件搭建以及实验一体化模板喷嘴和工装夹具设计制作。实验平台的搭建是进行后续实验研究的必要条件。

2.1 加工原理与实验平台

2.1.1 加工原理

采用贴有绝缘模板的金属喷嘴在工件表面射流电解加工微沟槽结构，加工原理如图2-1所示。将带有单个或单排微通孔结构的模板与金属喷嘴集成为一体，加工过程中保持模板与工件表面接触，在喷嘴和工件间施加脉冲电压，电解液通过喷嘴高速喷入模板微通孔到达工件表面，进行模板微通孔约束下的电解腐蚀，同时通过控制喷嘴与工件之间的相对运动便可由点到线扫描加工出微沟槽结构。加工过程中将模板和工件紧密贴合，削弱沿模板孔宽度方向腐蚀从而达到电解加工的定域蚀除效果。改变模板孔径大小和数量即可加工出不同宽度的微沟槽阵列，通过编程控制模板喷嘴和工件的相对运动轨迹即可加工出不同形状微沟槽。

|  |  |
| --- | --- |
| E:\毕业论文\picture\2-1加工原理\加工原理图1.jpg | E:\毕业论文\picture\2-1加工原理\加工原理图2.jpg |
| （a）贴有模板的金属喷嘴示意图 | （b）由点到线扫描加工原理图 |
| 图2-1 模板射流电解加工微沟槽原理图 |
| Fig.2-1 Principle of masked jet electrochemical machining of micro grooves |

整个加工过程如图2-2所示。加工开始时，如图2-2（a）中带有绝缘模板的金属喷嘴沿Z轴竖直向下运动贴近工件。图2-2（b）模板喷嘴和工件贴合后电解液射流在模板约束下流向工件表面，工件接电源正极，金属喷嘴接电源负极，在电源输出电压下产生深度方向的电解腐蚀，同时模板喷嘴和工件相对运动，由点到线扫描加工出微沟槽，如图2-2（c）所示。加工完毕后关闭电源，停止通液，模板喷嘴沿Z轴抬起离开工件表面，完成微沟槽加工过程，如图2-2（d）所示。

2.1.2 实验平台

2.2 实验平台运动控制系统

2.2.1 运动控制系统功能要求

2.2.2 运动控制系统整体架构

2.2.3 基于DMC 5400A运动控制卡硬件组成

表2-1 DMC5400A运动控制卡主要技术指标

Table.2-1 DMC5400A main specifications

|  |  |
| --- | --- |
| 控制卡技术指标 | 具体参数 |
| 控制电机的脉冲信号频率范围 | 1 Hz～2 MHz |
| 控制电机的脉冲信号频率精度 | 0.0625 Hz |
| 脉冲信号输出最大电流 | 20 mA |
| 脉冲信号长度 | 28位有符号 |
| 直线插补精度 | ±0.8 pulse |
| 圆弧插补精度 | ±1.5 pulse |
| 支持的插补坐标系个数 | 2 |

2.3 本章小结

本章介绍了模板射流电解加工微沟槽的加工原理及实验平台，开发了基于LabVIEW软件的运动控制系统和数据采集系统，完成了模板喷嘴与工装夹具设计制作，为后续进行模板射流电解加工微沟槽实验打下了基础。

第三章 模板射流电解加工微沟槽成形规律

本章利用ANSYS有限元仿真平台进行模板射流电解加工微沟槽成形动态仿真，模拟微沟槽成形过程，从理论层面研究微沟槽成形规律，并通过仿真分析各参数对微沟槽加工尺寸的影响，为后续实验验证理论分析结果打下基础。

3.1 微沟槽加工过程建模

采用模板射流电解加工方法加工出的微沟槽结构示意图如图3-1所示。由于微沟槽为对称结构，为简化计算过程，将三维模型简化为二维模型，分别从微沟槽横截面YOZ与纵截面XOY两个平面进行单点微坑成形过程和微沟槽成形过程二维仿真计算。单点微坑仿真中电解加工计算时间*t*和微沟槽仿真中模板喷嘴扫描速度*v*之间满足如公式（3.1）所示关系，其中*d*代表模板孔径。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$t=d/v$$ | （3.1） |

根据欧姆定律，加工过程中工件表面电流密度*i*与电场强度*E*之间的关系为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$i=σE$$ | （3.2） |

其中*σ*是电解液电导率。

根据法拉第定律，加工过程中电解腐蚀速度*v*e可以表示为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$v\_{e}=ηωi$$ | （3.3） |

其中*η* 为电流效率，*ω*为材料的体积电化学当量。文献[76]采用质量称重法测定了电解加工过程中电流效率$η$和电流密度$i$之间的关系，如公式（3.4）所示

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$η=\frac{0.85}{1+e^{(10-i)/6}}-0.1$$ | （3.4） |

因此加工过程中电解腐蚀速度*v*e与电场强度*E*之间的关系可以表示为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$v\_{e}=ηωσE$$ | （3.5） |

则电解加工深度*h*与加工时间*t*之间的关系为

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | $$h=v\_{e}·t=ηωσEt$$ | （3.6） |

电解过程中加工区域的产物与焦耳热量在电解液的高速冲刷下可以被迅速带走，因此仿真过程中假设有以下几个前提条件：

（1）电解液电导率*σ*为常量。

（2）电解加工过程中温度*T*恒定。

（3）加工过程中电解液的浓度不变。

3.2 微沟槽加工成形过程动态仿真

3.2.1 单点微坑成形过程模拟

3.2.2 微沟槽成形过程模拟

3.2.3 微沟槽首尾两端形貌对比分析

3.3 微沟槽加工尺寸仿真结果分析

3.4 本章小结

本章通过ANSYS电场仿真对模板射流电解加工微沟槽进行了理论分析。首先建立了仿真理论模型，然后进行了单点微坑成形过程仿真计算，研究分析了加工区域电场分布对微坑加工结果的影响，进而引入由点到线微沟槽成形过程模拟，通过计算电流密度变化过程分析了微沟槽加工首端圆角形成、扩展延伸进而形成微沟槽的三个阶段，并对比分析了理论计算与实际加工微沟槽首尾两端形貌不同的原因。最后研究了加工电压、模板尺寸与扫描速度不同参数对微沟槽仿真计算结果的影响，为进一步实验与工艺参数优化打下了基础。

第四章 模板射流电解加工微沟槽工艺实验

本章在前文模板射流电解加工微沟槽成形规律研究的基础上进行微沟槽加工工艺实验。针对微沟槽加工定域性、材料去除率以及电流效率等关键指标对脉冲频率、脉冲占空比、扫描速度和扫描加工次数等工艺参数进行分析。最终采用优化后的参数组合加工出弯曲蛇形、直线和交叉阵列形以及阵列微缝等各种复杂形状微沟槽结构。

4.1 微沟槽加工关键评价指标

4.1.1 加工定域性

4.1.2 加工材料去除率

4.1.3 加工电流效率

4.2 微沟槽加工实验参数选定

4.3 脉冲参数对加工结果的影响

4.4 扫描运动参数对加工结果的影响

表4-2 不同扫描次数下微沟槽加工尺寸

Table.4-2 The size of micro groove machining under different scanning times

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 扫描次数*n* | 扫描速度*v* (μm/s) | 微沟槽宽度*w* (μm) | 微沟槽深度*h* (μm) | 加工过切量*u* (μm) | 侧向腐蚀系数*EF* |
| 1 | 20 | 160.63 | 30.32 | 43.33 | 1.43 |
| 2 | 40 | 160.97 | 30.48 | 44.03 | 1.44 |
| 3 | 60 | 161.57 | 30.78 | 45.10 | 1.46 |
| 4 | 80 | 161.90 | 30.95 | 45.70 | 1.48 |

4.5 典型微沟槽结构加工实验

4.6 本章小结

本章在前文仿真计算结果分析的基础上进行实验验证，采用模板射流电解加工微沟槽方法，研究了影响加工结果的关键参数如脉冲频率、占空比以及喷嘴扫描速度和扫描次数与微沟槽加工尺寸、加工定域性、材料去除率以及电流效率之间的关系，得出的结论如下：

（1）脉冲占空比对加工微沟槽过切量和深度影响比较显著，而脉冲频率对加工尺寸影响不明显。当减小脉冲占空比时加工微沟槽过切量和深度均减小，20%占空比下加工微沟槽过切量最小。当脉冲占空比从20%增大到80%，相应的有效加工时间增加，但脉冲间隔时间减少，不利于加工过程中电解液更新和电解产物的排除，并且有效材料去除率和电流效率降低。优化后选用的脉冲参数为脉冲频率1000 Hz，占空比20%。

（2）喷嘴扫描速度与微沟槽加工槽深槽宽以及过切量呈反比关系，即扫描速度越快加工出的微沟槽宽度及过切量越小，但也会导致微沟槽加工深度过浅，相应的侧向腐蚀系数降低，即加工定域性降低。当扫描速度增加的同时进行多次扫描，在保持有效加工时间一致的条件下可以达到与较低速度扫描相同的加工结果。

（3）针对微反应器、微流控芯片、微型燃料电池双极板以及微光栅中微沟槽结构加工制造难题，采用模板射流电解加工方法，通过改变模板孔径和模板间距，并优选参数组合加工出弯曲蛇形、直线阵列形和交叉阵列形微沟槽，以及直线阵列微缝结构，为各种复杂形状微沟槽结构高精度高效低成本加工提供了新方法。

第五章 采用金属模板提高射流加工定域性的探索

本章首先采用金属模板完成单点微坑电解加工仿真计算，从理论层面分析其高加工定域性原因并进行实验验证，最后进行了金属模板射流电解加工微沟槽的实验探索。

5.1 金属模板提高加工定域性理论分析

5.1.1 金属模板加工区域电场分布规律

5.1.2 金属模板加工结果仿真模拟

5.2 金属模板与绝缘模板加工成形结果对比

5.2.1 相同深度下加工结果对比

5.2.2 不同深度下加工结果对比

5.3 金属模板螺旋形微沟槽结构加工实验

5.4 本章小结

为提高微沟槽模板射流电解加工定域性，本章采用金属模板代替绝缘模板进行相关仿真计算和实验研究。主要包括以下内容：

结论与展望

研究结论

微沟槽作为一种典型微结构在微传感器、微芯片、微流体器件以及微型燃料电池双极板等产品核心部件上发挥重要作用。在微沟槽加工方面电解加工具有无应力接触、无电极损耗，可实现离子级别的材料去除的优势。针对现有掩模电解加工中掩模制作工艺复杂、电解产物排除困难、沟槽长度方向尺寸一致性差等问题，本文提出一种模板射流电解加工微沟槽结构新方法，并进行相关理论和实验研究。论文完成的主要工作如下：

（1）提出模板射流电解加工方法，搭建电解加工微沟槽实验平台。完成模板射流电解加工喷嘴与工装夹具设计制作，开发基于LabVIEW软件的运动控制系统和数据采集系统，以满足实际加工实验需求。

（2）通过ANSYS电场仿真对模板射流电解加工微沟槽成形规律进行理论分析。分别完成了单点微坑成形过程仿真计算和由点到线微沟槽成形过程模拟，通过计算电流密度变化过程分析了微沟槽加工首尾两端圆角形成过程，仿真计算结果表明，微沟槽在15 s时首端圆角形成并达到最大加工深度。将理论计算与实际加工微沟槽首尾两端形貌进行对比，表明电解产物堆积是产生微沟槽首尾两端形貌不同的因素。研究了加工电压、模板尺寸与扫描速度参数对微沟槽仿真计算结果的影响。

（3）进行了模板射流电解加工微沟槽工艺参数优化。研究了影响加工结果的关键参数如脉冲频率、占空比以及喷嘴扫描速度和扫描次数与微沟槽加工尺寸一致性、加工定域性、材料去除率以及电流效率之间的关系。研究结果表明脉冲占空比是影响加工结果的重要因素而脉冲频率对加工结果影响不明显。最终通过参数优选，在脉冲电源电压30 V、脉冲频率1000 Hz，占空比20%，扫描速度20 μm/s的条件下成功加工出最小槽宽90 μm，最小槽深20 μm的弯曲蛇形、直线和交叉阵列形微沟槽结构，以及阵列微缝结构，可应用于微反应器、微流控芯片、微型燃料电池双极板以及微光栅等器件，验证了模板射流电解加工方法的可行性。

（4）采用金属模板进行了提高射流加工定域性的仿真计算和实验研究。仿真结果表明采用金属模板能够改变微沟槽加工区域电场分布，使模板孔边缘处电场显著削弱，从而减小侧向腐蚀。相同加工深度下绝缘模板和金属模板加工对比实验结果表明，相比于绝缘模板，采用金属模板加工侧向腐蚀系数*EF*从1.47直接增加至6.11。采用金属模板能够减小射流加工微沟槽侧向腐蚀过切量，显著改善加工定域性。

未来研究展望

本文针对模板射流电解加工微沟槽进行了初步的理论分析和实验研究，由于本课题涉及的范围广泛，加上时间和能力有限，未能进行更加详细和深入的研究。后续可以从以下几个方面进行进一步研究：

（1）本文采用模板射流电解加工方法加工出平面微沟槽结构，通过改进实验加工装置增加运动轴数，可以考虑进行数控曲面微沟槽加工。

（2）实际电解加工需要综合考虑电场、流场以及电化学溶解速度场等多场因素，本文仅针对电场进行微沟槽成形过程仿真，后续可以进一步探索微沟槽多场耦合理论仿真分析。

（3） 针对更广范围内的微沟槽结构比如刀具表面阵列沟槽形微织构进行加工实验，探索阵列沟槽形表面微织构的摩擦磨损特性。

参考文献

1. Antunes R A, Oliveira M C L, Ett G, et al. Corrosion of metal bipolar plates for PEM fuel cells: A review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(8):3632-3647.
2. Jang J H, Yan W M, Shih C C. Numerical study of reactant gas transport phenomena and cell performance of proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2006, 156(2):244-252.
3. 马利, 李刚, 文东辉, 等. 微型燃料电池双极板的研究现状[J]. 电源技术, 2014, 38(7):1380-1383.
4. 郑文书, 郭钟宁, 罗红平, 等. 化学微蚀刻法和微细电镀法制备微流控芯片金属模具工艺对比研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(03):264-268.
5. 葛琪林, 柳建华, 张良, 康盈. 微通道换热研究进展综述[J]. 制冷技术, 2012, 40(9):76-80.
6. 刘涛. 超临界CO2制冷循环的应用与研究[J]. 制冷与空调, 2007, 21(4):38-40.
7. 刘志兵, 王西彬, 解丽静, 等. 微小型结构件的微细切削技术[J]. 工具技术, 2008, 42(3):19-23.
8. 赵万生, 李志勇, 王振龙, 等. 微三维结构电火花铣削关键技术研究[J]. 微细加工技术, 2003(3):49-55.
9. 朱荻, 王明环, 明平美, 等. 微细电化学加工技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(2):151-155.
10. 陈远龙, 张正元. 电解加工技术的现状与展望[J]. 航空制造技术, 2010(5):47-50.
11. 吕焱明, 赵建社, 范延涛, 等. 大长宽比深窄槽电解加工阴极结构设计[J]. 航空制造技术, 2018, 61(3):46-53.
12. 王峰, 赵建社, 干为民, 等. 阴极复合进给窄缝电解加工精度的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(3):16-22.
13. Wang F, Zhao J S, Liu D M, et al. Experimental Research on Electrochemical Machining of an Arc-Shaped Slot Array[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13(10):9466-9480.
14. Chang D-Y, Shen P-C, Hung J-C, et al. Process Simulation-Assisted Fabricating Micro-Herringbone Grooves for a Hydrodynamic Bearing in Electrochemical Micromachining[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2011, 26(12):1451-1458.
15. Lee Y M, Lee S J, Lee C Y, et al. The multiphysics analysis of the metallic bipolar plate by the electrochemical micro-machining fabrication process[J]. Journal of Power Sources, 2009, 193(1):227-232.
16. Liu G X, Zhang Y J, Deng Y, et al. The tool design and experiments on pulse electrochemical machining of micro channel arrays on metallic bipolar plate using multifunctional cathode[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1-4):407-416.
17. 余宏兵, 曾永彬, 刘勇, 等. 镍基高温合金微细电解铣削加工实验研究[J]. 中国机械工程, 2010(11):1353-1356.
18. Kock M, Kirchner V, Schuster R. Electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses - a versatile method with lithographical precision[J]. Electrochimica Acta, 2003, 48(20):3213-3219.
19. Ghoshal B, Bhattacharyya B. Electrochemical micromachining of microchannel using optimum scan feed rate[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 23:258-268.
20. Rathod V, Doloi B, Bhattacharyya B. Influence of electrochemical micromachining parameters during generation of microgrooves[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(1-4):51-60.
21. Anasane S S, Bhattacharyya B. Experimental investigation into micromilling of microgrooves on titanium by electrochemical micromachining[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 28:285-294.
22. Nguyen M D, Rahman M, Wong Y S. Enhanced surface integrity and dimensional accuracy by simultaneous micro-ED/EC milling[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2012, 61(1):191-194.
23. Nguyen M D, Rahman M, Wong Y S. Transitions of micro-EDM/SEDCM/micro-ECM milling in low-resistivity deionized water[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 69:48-56.
24. Liu Y, Zhu D, Zeng Y B, et al. Experimental Investigation on Complex Structures Machining by Electrochemical Micromachining Technology[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(5):578-584.
25. 吴修娟, 曾永彬, 曲宁松, 等. 基于Ag纳米线的微纳电解加工研究[J]. 电加工与模具, 2014(01):24-27.
26. Chen C C, Li J Z, Zhan S C, et al. Study of Micro Groove Machining by Micro ECM[J]. Procedia CIRP, 2016, 42:418-422.
27. Liu G, Li Y, Kong Q, et al. Silicon-based tool electrodes for micro electrochemical machining[J]. Precision Engineering, 2018, 52:425-433.
28. Wang Y K, Wang H, Zhang Y X, et al. Micro Electrochemical Machining of Array Micro-Grooves Using In-Situ Disk Electrode Fabricated by Micro-WEDM[J]. Micromachines, 2020, 11(1):14.
29. Chauvy P F, Hoffmann P, Landolt D. Electrochemical micromachining of titanium using laser oxide film lithography: excimer laser irradiation of anodic oxide[J]. Applied Surface Science, 2003, 211(1-4):113-127.
30. Landolt D, Chauvy P F, Zinger O. Electrochemical micromachining, polishing and surface structuring of metals: fundamental aspects and new developments[J]. Electrochimica Acta, 2003, 48(20-22):3185-3201.
31. Schonenberger I, Roy S. Microscale pattern transfer without photolithography of substrates[J]. Electrochimica Acta, 2005, 51(5):809-819.
32. Nouraeiz S., Roy S. Electrochemical process for micropattern transfer without photolithography: a modeling analysis[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155(2):97-103.
33. Zhou X, Qu N S, Hou Z B, et al. Electrochemical micromachining of microgroove arrays on phosphor bronze surface for improving the tribological performance[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(7):1609-1618.
34. Yuan S H, Huang W, Wang X L. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces[J]. Tribology International, 2011, 44(9):1047-1054.
35. 王艳萍, 徐文骥. 微沟槽电解加工试验研究[J]. 电加工与模具, 2015(1):21-24.
36. 王哲, 钱双庆, 曹红蓓, 等. 金属双极板流道的电解转印加工试验研究[J]. 机械设计与制造, 2017(s1):37-40.
37. Hao X Q, Wang L, Wang Q D, et al. Surface micro-texturing of metallic cylindrical surface with proximity rolling-exposure lithography and electrochemical micromachining[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(21):8906-8911.
38. 钱双庆, 朱荻, 曲宁松, 等. 活塞环表面微坑电解加工技术的基础研究[J]. 内燃机学报, 2010(2):173-179.
39. Natsu W, Ikeda T, Kunieda M. Generating complicated surface with electrolyte jet machining[J]. Precision Engineering, 2007, 31(1):33-39.
40. Mitchell-Smith J, Speidel A, Clare A T. Advancing electrochemical jet methods through manipulation of the angle of address[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 255:364-372.
41. Hackert-oschätzchen M, Meichsner G, Zinecker M, et al. Micro machining with continuous electrolytic free jet[J]. Precision Engineering, 2012, 36(4):612-619.
42. Guo C, Qian J, Reynaerts D. Electrochemical Machining with Scanning Micro Electrochemical Flow Cell (SMEFC)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 247:171-183.
43. Liu Z, Nouraei H, Spelt J K, et al. Electrochemical slurry jet micro-machining of tungsten carbide with a sodium chloride solution[J]. Precision Engineering, 2015, 40:189-198.
44. Kunieda M, Mizugai K, Watanabe S, et al. Electrochemical micromachining using flat electrolyte jet[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60(1):251-254.

攻读学位期间取得与学位论文相关的成果

发表和投稿与学位论文相关学术论文

1.**张三**, 李四, 等. Jet electrochemical machining of micro dimples with conductive mask. Journal of Materials Processing Technology. 2018, 257:101-111. (SCI Impact Factor 3.647, WOS:000431161400010)

2. 李四,**张三**, 王五, 等. Electrochemical direct-writing machining of micro- channel array. Journal of Materials Processing Technology. 2019, 265:138-149. (SCI Impact Factor 3.647, WOS:000451935100014)

申请发明专利

1. 李四，张三，王五. 一种微流道电解加工装置. 发明专利申请号：201810467763.5.

学位论文独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是我个人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明，并表示了谢意。本人依法享有和承担由此论文所产生的权利和责任。

 论文作者签名： 日期：

**学位论文版权使用授权声明**

本学位论文作者完全了解学校有关保存、使用学位论文的规定：“研究生在广东工业大学学习和工作期间参与广东工业大学研究项目或承担广东工业大学安排的任务所完成的发明创造及其他技术成果，除另有协议外，归广东工业大学享有或特有”。同意授权广东工业大学保留并向国家有关部门或机构送交该论文的印刷本和电子版本，允许该论文被查阅和借阅。同意授权广东工业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、扫描或数字化等其他复制手段保存和汇编本学位论文。保密论文在解密后遵守此规定。

 论文作者签名： 日期：

 指导教师签名： 日期：

致 谢

行文至此，感慨万千。