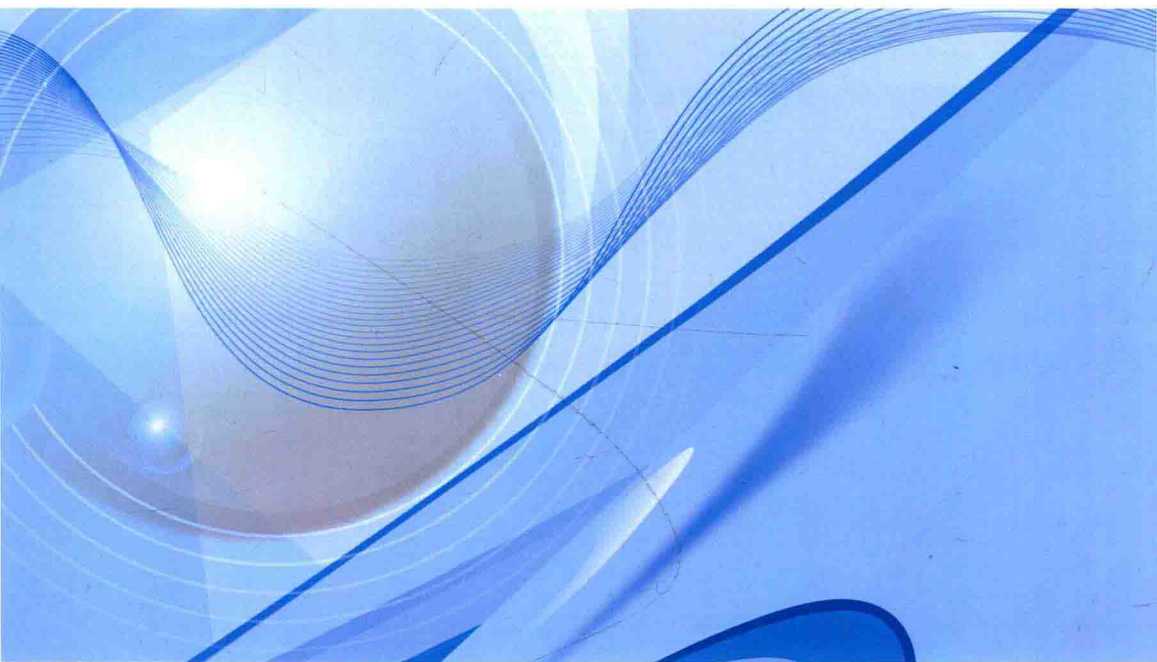


微细电火花加工技术研究

WEIXI DIANHUOHUA JIAGONG JISHU YANJIU

欧阳波仪 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

微细电火花加工技术研究

欧阳波仪 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是以试验研究为主的微细电火花加工技术专著,主要研究微小尺寸($\phi \geq 100 \mu\text{m}$)结构的电火花加工,包括加工介质选择、电极材料选择、工艺参数选择、电极尺寸确定等方面的试验研究,并对微细电火花加工技术研究和基础理论进行了系统介绍。

本书可对相关研究所以及工程技术人员的科研、生产、工艺技术改造提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

微细电火花加工技术研究 / 欧阳波仪著. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2017.11

ISBN 978-7-5124-2591-0

I. ①微… II. ①欧… III. ①电火花加工—研究
IV. ①TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 271046 号

版权所有,侵权必究。

微细电火花加工技术研究

欧阳波仪 著

责任编辑 孙兴芳

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京建宏印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:6.75 字数:136 千字

2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5124-2591-0 定价:28.00 元

前 言

电火花加工技术因具有非接触式加工、无宏观切削力、对工具的强度和刚度要求低、材料适用范围广及可加工异型腔模等特点,近年来呈现出强大的微尺度制造潜能,并已逐渐成为航空航天、能源动力、运载及医疗等领域核心装备中微小特征结构制造的关键技术。但是,电火花加工具有脉冲放电频率高、放电间隙狭小、微细电极损耗严重、蚀除产物排出困难、噪声干扰严重等缺点,导致在加工过程中难以开展准确有效的控制,致使加工过程极不稳定、加工效率低下,严重地限制了电火花加工技术向高精度、微细化方向发展。因此,提高其效率,保障其高效高质量地进行,是提高微细电火花加工技术能力,进而提升精微加工领域整体制造水平的关键途径。

本书作者依托“高压喷嘴电火花加工工艺研究与生产转化”“微小三维零件微细电火花加工”“柴油机喷油器微小喷孔的电火花集成加工系统开发”等课题,对微小尺寸($\phi \geq 100 \mu\text{m}$)结构的电火花加工技术瓶颈开展研究,在分析微细电火花加工技术研究现状和基础理论的基础上,针对加工介质选择、电极材料选择、工艺参数选择、电极尺寸确定等关键性技术难题,开展了相关研究工作,并发表论文 5 篇,注册专利 2 项。其中,部分成果已得到生产转化,在生产实践中对提高效率和质量均收到较好的效果。

本书共 6 章,其中,第 1、2 章为理论研究部分,第 3~6 章为试验研究部分。

第 1 章为微细电火花加工研究综述,主要分析电火花加工技术的研究进展和实际应用,并指出其未来的发展方向是提高加工效率和加工精度,以及与其他精密加工技术进行复合或组合。

第 2 章为微细电火花加工基础理论,主要分析尺度效应与位错理论、电火花加工基本原理、电火花加工表层特性等基础理论,作为后续内容的基础。

第 3 章为加工介质选择的试验研究,针对蒸馏水、煤油及“蒸馏水+

煤油”混合液 3 种不同介质对电火花加工特性的影响进行试验研究,以此探究加工介质选择,以及“蒸馏水+煤油”混合液作为电火花加工介质的可行性。

第 4 章为电极材料选择的试验研究,将常用的紫铜、石墨和铜钨合金 3 种材料电极以不同工作液和脉冲电流进行试验,研究不同电极材料对微细电火花加工质量影响的问题。

第 5 章为工艺参数选择的试验研究,开展电火花工艺参数的优化组合、工艺参数对加工尺寸的影响两方面的试验研究,通过选择合理参数来提高加工速度,降低电极损耗,提高加工质量。

第 6 章为电极尺寸影响的试验研究,主要是通过对电极消耗、材料移除、扩孔量、放电裂纹、白层厚度、放电形貌、浅坑外形等表层特性的观察与测量,来确定合适的电极尺寸及加工参数。

本书可对相关研究所以及工程技术人员的科研、生产、工艺技术改造提供参考。

在本书出版之际,衷心感谢湖南省教育厅、中国南方航空工业(集团)有限公司、东莞市容大机械设备有限公司、湖南汽车工程职业学院等单位对相关研究课题的资助;感谢湖南科技大学、湘潭力源模具有限公司、株洲齿轮有限责任公司等单位在试验设备和技术方面的大力支持;感谢所有在课题研究过程中付出辛勤汗水的团队成员,以及帮助过我的老师、同学、朋友;同时,本书参考了大量文献,在此对这些参考文献的作者表示诚挚的谢意!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2017 年 9 月

目 录

第 1 章 微细电火花加工研究综述	1
1.1 微细电火花加工技术的背景	1
1.2 微细电火花加工技术的发展现状	3
1.2.1 微细电火花加工研究概况	3
1.2.2 微细电火花加工装置研究进展	4
1.2.3 微细电极制备研究进展	7
1.2.4 微细电火花加工工艺研究进展	10
1.3 本章小结	12
第 2 章 微细电火花加工基础理论	13
2.1 尺度效应与位错理论	13
2.1.1 尺度效应	14
2.1.2 位错理论	17
2.2 微细电火花加工	22
2.3 电火花加工表层特性	23
2.3.1 表面形貌	23
2.3.2 变质层特征	27
2.3.3 加工残余应力	29
2.4 本章小结	30
第 3 章 加工介质选择的试验研究	31
3.1 试验设计	31
3.1.1 试验量测值	32
3.1.2 “蒸馏水+煤油”混合液的配比	32
3.1.3 试验方案	33
3.2 试验结果及分析	35
3.2.1 材料去除率	35
3.2.2 电极损耗	38
3.2.3 表面粗糙度	40

3.3 试验结论·····	48
3.4 本章小结·····	48
第4章 电极材料选择的试验研究 ·····	49
4.1 试验设计·····	49
4.1.1 试验方案·····	49
4.1.2 表面粗糙度与加工极性的关系·····	50
4.2 试验结果及分析·····	52
4.2.1 表面粗糙度·····	52
4.2.2 表面形态·····	52
4.2.3 再铸层·····	53
4.3 试验结论·····	55
4.4 本章小结·····	55
第5章 工艺参数选择的试验研究 ·····	56
5.1 工艺参数优化组合的试验研究·····	56
5.1.1 试验设计·····	58
5.1.2 正交试验与分析·····	59
5.1.3 灰色关联度分析·····	59
5.1.4 验证性试验·····	63
5.1.5 试验结论·····	63
5.2 工艺参数对加工效果影响的试验研究·····	64
5.2.1 试验方案·····	64
5.2.2 试验结果及分析·····	66
5.2.3 试验结论·····	68
5.3 本章小结·····	69
第6章 电极尺寸影响的试验研究 ·····	70
6.1 试验设计·····	70
6.1.1 试验流程·····	70
6.1.2 试验工件材料·····	70
6.1.3 试验规划·····	73
6.1.4 电极制作·····	76
6.2 试验结果及分析·····	79
6.2.1 电极直径为10 mm的加工结果·····	79

6.2.2 电极直径为 5~0.5 mm 的加工结果	86
6.2.3 电极直径为 0.3 mm 的加工结果	88
6.3 试验结论	94
6.4 本章小结	95
参考文献	97
后 记	100

第1章 微细电火花加工研究综述

随着技术的进步和生产的需要,在各行各业的核心装备中,对微细结构的制造需求越来越大,微细加工现已成为制造业重要的发展方向之一。微细电火花加工是在电火花加工技术上发展起来的,是将电极与工件接在高频微能脉冲电源的正极和负极,靠极间放电产生的瞬间高温使工件材料迅速炼化,属于典型的非接触加工方式,这使得该技术应用非常广泛。

20世纪90年代至今,电火花加工技术向精密、微细方向发展得非常快,应用也越来越广泛。为发挥该项技术的加工潜能,本研究对目前国际上微细电火花加工技术现状及其发展趋势进行了探讨与借鉴,以期从中得出在我国开展此方面研究的切入点。

1.1 微细电火花加工技术的背景

微机械或微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)是20世纪80年代后期发展起来的一门新兴学科。对微型机械的尺寸,目前还没有统一的标准。一般认为,微机械按照其特征尺寸可以划分为1~10 mm的微小型机械、1 μm ~1 mm的微机械以及1 nm~1 μm 的纳米机械。微机械体积小、耗能低,能方便地进行精细操作,因此其广泛应用于航空航天、医疗、生物工程、精密仪器、半导体工业、军事等领域。它已经给国民经济、人民生活、国防、军事等带来深远的影响,被誉为世纪十大关键技术之一^{①②}。

微机械的研究1970年始于斯坦福大学,随后日本和西欧也相继将此研究列为重要发展领域,并取得突破性进展^{③④}。例如,斯坦福大学研制出直径为20 μm 、长度为150 μm 的铰链连杆机构,210 μm ×100 μm 的滑块机构,转子直径为200 μm 的静电电机和流量为20 mL/min的液体泵;加州大学伯克利分校试制出直径为60 μm 的静电电机,直径为50 μm 的旋转关节,以及齿轮驱动的滑块和灵敏弹簧;

① 王振龙. 微细加工技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005:1-16.

② 苑伟政,马炳和. 微机械与微细加工技术[M]. 西安:西北工业大学出版社,2000:1-12.

③ 林忠华,胡国清,刘文艳. 微机电系统的发展及其应用[J]. 纳米技术与精密工程,2004,2(2):117-123.

④ 段润保,赵砚江,毛言理. 微机械(MEMS)与微细加工技术[J]. 河北理工学院学报,2004,26(2):34-40.

贝尔实验室开发出直径为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的齿轮^①。

日本 20 世纪 90 年代初启动了微机械研究计划,并取得重要进展^②。例如,东京大学工业研究院研制成 1 cm^3 的微型爬坡机械装置;早稻田大学机械工程系用形状记忆合金制作微型机器人;名古屋大学研制出不需要电缆的管道移动微型机器人,可用于小直径管检测和生物医学领域。

我国也正积极开展微机电系统的研究^{③④},微型驱动器、微型机器人开发已列入国家“863”计划,并取得了一些进展。例如,哈尔滨工业大学研制出电致伸缩陶瓷驱动的二自由度微型机器人,其位移为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,位移分辨率为 $0.01\text{ }\mu\text{m}$,另外,还将研制六自由度微型机器人;中国科学院上海光学与精密机械研究所研制出微型器件装配装置;上海冶金研究所研制出直径为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 的多晶硅齿轮、气动涡轮和微静电电机等。

微机械以其独特的优点正日益受到人们的关注。概括起来,微机械具有以下几个基本特点:

① 体积小、精度高、质量轻。其体积可小至亚微米级,尺寸精度可达纳米级,质量可轻至纳克。目前已经研制出细如发丝的齿轮、能开动的 3 mm 大小的汽车和花生大小的飞机。

② 性能稳定、可靠性高。由于微机械器件的体积极小,所以几乎不受热膨胀、噪声和挠曲等因素的影响,具有较高的抗干扰能力,可在较差的情况下稳定工作。

③ 能耗低、响应快、灵敏度高。当完成相同的工作时,微机械所消耗的能量仅为传统机械的十几分之一或几十分之一,而运作速度却可达传统机械的 10 倍以上。

④ 多功能化和智能化。许多微机械集传感器、执行器和电子控制电路于一体,特别是应用智能材料和智能结构后,更便于实现微机械的多功能化和智能化。

⑤ 适于大批量生产,制造成本低廉。微机械能够采用与半导体制造工艺类似的生产方法,像超大规模集成电路芯片一样,一次制成大量完全相同的零部件,因而可以大幅度降低制造成本。

目前,一些微机械、微机电系统已经进入实用阶段,在医药卫生、航空航天、国

① 潘洋宇,李迎,王拴虎.微型机械技术和应用前景[J].兵工自动化,2003,22(5):12-14.

② Xi-Qing S, Masuzawa T, Fujino M. Micro Ultrasonic Machining and its applications in MEMS[J]. Sensors and Actuators A, 1996, 57: 159-164.

③ 赵慧,韩俊伟,张尚盈,等.六自由度并联机器人动力学分析和计算[J].济南大学学报(自然科学版),2003,17(2):114-117.

④ 温诗柱,李娜.微型机械与纳米机械学研究[J].中国机械工程,1996,7(2):17-21.

防、信息、环境工程以及民生等方面发挥着重要作用,具有极其广阔的发展前景^{①②}。

微机械的发展离不开微细加工技术的进步。微细加工技术的产生和发展一方面是加工技术自身发展的必然,另一方面也是新兴的微型机械技术发展对加工技术需求的促进。所谓微细加工技术,就是指能够制造微小尺寸零件的加工技术的总称。微细加工技术是实现微机械产品的最基本技术,它已成为涉及机械、电子、化学、材料等多种学科的现代高技术。常用的微细加工方法有微细铣削、微细车削、MEMS 制造技术、微细激光加工、微细电化学加工、微细超声加工技术、微细线切割加工、微细电火花加工技术。

20 世纪 60 年代末,荷兰 Philips 研究所用电火花加工技术成功加工出直径为 $\phi 30\ \mu\text{m}$ 、精度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的微孔^③。但由于在当时条件下尚无法解决微细电极的在线制作问题,使得其加工效率偏低,加工精度一致性较差,导致这一成果并未引起人们足够的重视。20 世纪 80 年代末,日本东京大学增泽隆久教授发明了线电极电火花磨削(Wire Electrode Discharge Grinding, WEDG)技术^④,成功地解决了电极在线制作这一瓶颈问题,使得微细电火花加工技术进入了实用化阶段,并成为微细加工领域的热点研究内容之一。

1.2 微细电火花加工技术的发展现状

1.2.1 微细电火花加工研究概况

1943 年,苏联拉扎林科(Lazarenko)夫妇成功地研制了加工过程可控的电火花加工设备,在金属件上加工出小孔,成为电火花加工技术诞生的标志^⑤。

20 世纪 90 年代后期,很多学者开展了将微细电火花加工技术引入到三维微细结构件的制造中的研究。1996 年,日本汤泽隆等人成功地制作出最小尺寸为

① 洪永强,蒋红霞.微电子机械系统及微机械加工工艺[J].电子加工工艺,2003,24(5):185-188.

② 潘洋宇,李迎,王拴虎.微型机械技术和应用前景[J].兵工自动化,2003,22(5):12-14.

③ Heeren P H, Reynaerts D, Van B H. Micro-Structuring of Silicon by Electro-discharge Machining (EDM)-part I: Theory[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 1997, 60(5): 212-218.

④ Masuzawa I, Fujino M, Kobayashi K. Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining[J]. Annals of the CIRP, 1985, 34(1): 431-434.

⑤ 李明辉.电火花加工理论基础[M].北京:国防工业出版社,1989.

270 μm 的齿轮铸模^①。

进入 21 世纪,美国 UNL 大学研究出加工三维微小型腔的技术^②,欧洲比利时鲁文天主教大学研制加工出 $\phi 1\text{ mm}$ 的微型涡轮叶盘^③。

20 世纪 80 年代初,我国学者开始对微细电火花加工开展研究。并在其后的研究工作中得到了一系列成果。例如,哈尔滨工业大学开发了微细电火花加工样机,成功加工出 8 μm 的微孔^④。董颖怀等人成功加工出直径为 0.15 mm 的半球以及微型燃气轮机润轮盘、微小球冠、微型润轮、微传感等结构^⑤。

微细电火花加工技术研究和机床研制技术的日益成熟,逐渐使其具有成本低廉、加工简单、易于实现复杂微三维结构等优点,微细电火花加工技术正沿着实用化方向快速发展。

1.2.2 微细电火花加工装置研究进展

设备是微细电火花加工的前提和保证,被很多研究机构高度重视,德国柏林技术大学,日本松下精机、Sodick,瑞士阿奇(AGIE)、Sarix 等研究机构和企业都成功研制了高精度的微细电火花加工机床;哈尔滨工业大学、中国工程物理研究院机械制造工艺研究所在这方面的研究也取得了突破性进展。

图 1-1 所示为日本松下精机生产的 MG-ED82W,它是一种高精度的微细电火花加工机床,该机床是微细孔、槽和复杂形状工件加工的专用微型电火花加工机床,主轴的进给和回退步距为 0.1 μm ,加工的表面粗糙度可达 $Ra 0.1\text{ }\mu\text{m}$ ^⑥。

图 1-2 所示为瑞士阿奇公司研制的 AGIE Compact 1,它属于一款典型的微细电火花加工机床,可加工 1 mm 以下的微小三维结构,并能获得 $Ra 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 的表面粗糙度^⑦。

图 1-3 所示为瑞士 Sarix 公司研制的微细电火花机床 SX-100-HPM,运动

① 汤泽隆,真柄卓司,今井祥人,等.小径电极を用いた微细创成放电加工(第2报)[J].型技术,1997,12(8):104-105.

② Rahman M, Lim H S, Neo K S, et al. Tool based Nano-Finishing and Micromachining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006(160):1-15.

③ Heeren P H, Reynaerts D, Van B H, et al. Microstructuring of silicon by electro-dischargemachining (EDM)-II: applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1997, 61(1-3):379-386.

④ 李文卓,刘加光,于云霞.微细电火花加工机床关键技术[J].机械工程学报,2007(1):170-175.

⑤ 董颖怀.一种微型满轮发动机的设计及其关键制造技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.

⑥ 李文卓.微细电火花加工系统及其相关技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002:68.

⑦ 李刚.基于直线电机的微细电火花加工系统及其关键技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002:12.

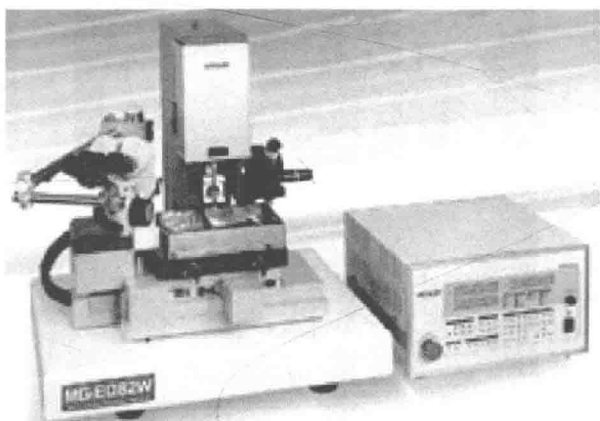


图 1-1 松下精机研制的 MG-ED82W



图 1-2 瑞士阿奇公司研制的 AGIE Compact 1

分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$, 位置精度为 $\pm 1\ \mu\text{m}$, 最优表面粗糙度可达 $Ra 0.1\ \mu\text{m}$ ^①。

德国柏林技术大学生产技术研究中心在 2004 年成功研制了图 1-4 所示的多功能微细电火花加工中心, 该设备是在夏米尔公司的 Robofil 2000 五轴线切割机床的基础上改进研制的, 其扩展了微细电火花成型功能, 还在工件夹紧系统上安装了回转装置, 非常适合加工各种复杂型面^②。

① Rahman M, Lim H S, Neo K S, et al. Tool-based Nano-finishing and Micromachining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006(160):1-15.

② Zhang Y, Wang ZH L, Li ZH Y. Study on key techniques of micro-EDM equipments[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004(4):23-27.

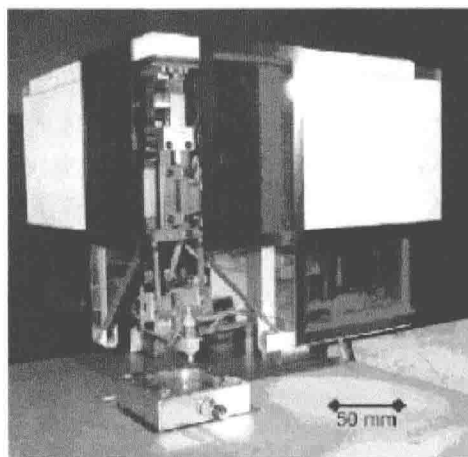


图 1-3 瑞士 Sarix 公司研制的 SX-100-HPM

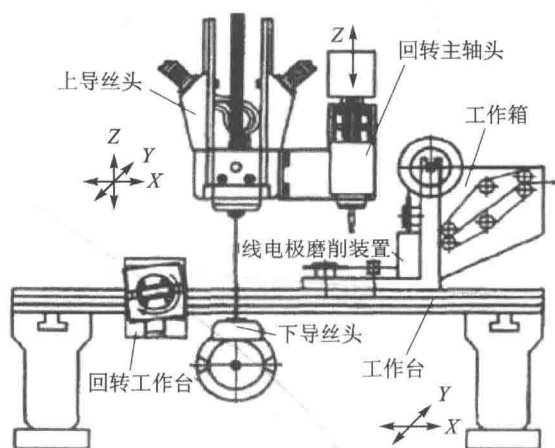


图 1-4 多功能微细电火花加工中心

图 1-5 所示为哈尔滨工业大学于 2005 年研制的多功能微细加工机床。该机床集成了线电极磨削(WEDG)装置、超声波换能器及微细电解循环液模块,可进行微细电火花、微细超声和微细电解的复合加工,其三轴联动分辨率高达 $0.1 \mu\text{m}$ ^①。

图 1-6 所示为中国工程物理研究院机械制造工艺研究所成功研制的十六轴 $\mu\text{EM}-200\text{CDS2}$ 型微细组合电加工机床。该机床进给分辨率高达 $0.05 \mu\text{m}$,主轴重复定位精度为 $1.5 \mu\text{m}$,光栅尺分辨率为 1 nm ,可以满足精密微小特征零件及微

① 贾宝贤, 多功能微细特种加工系统及加工技术的研究[D], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005: 20-34.

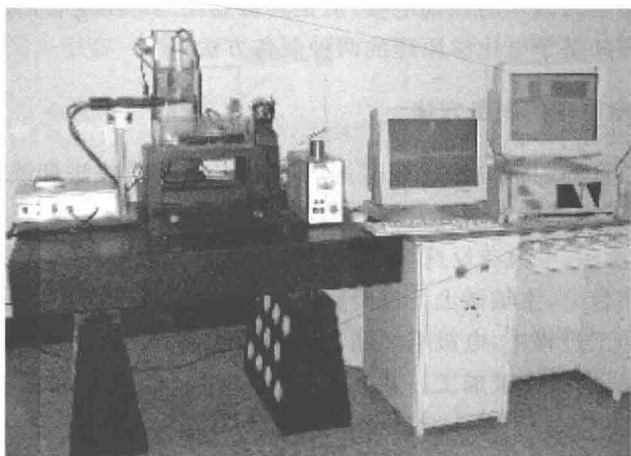


图 1-5 哈尔滨工业大学于 2005 年研制的多功能微细加工机床



图 1-6 十六轴 $\mu\text{EM}-200\text{CDS2}$ 型微细组合电加工机床

小群特征零件的精密高效加工需求^①。

另外,近年来清华大学和南京航空航天大学在微细电火花机床方面的研究也取得了很好的成效。

1.2.3 微细电极制备研究进展

微细电极的制备有离线和在线两种方式,为了实现与后续的微细加工工艺相匹配,通常使用在线制备。传统车削、磨削、研磨和 LIGA 等精密制造方法虽然能

^① 陈飞,王宝瑞,施威,等. 微细电火花加工技术研究现状概述[J]. 电加工与模具,2015(S1):6-10.

够制造出直径小至几微米的微细电极,但是其研究应用却不是很广泛,目前主要采用基于放电原理和基于电化学原理的两种制备方法。

1. 基于放电原理的制备方法

基于放电原理的制备方法比较普遍的有电火花反拷块法和线电极放电磨削法,后者是在前者的基础上研究发展的。

如图 1-7 所示,电火花反拷块法是将电极毛坯安装在电火花机床主轴上,反拷块安装在工作台上,主轴做上下进给运动的同时做回转运动,然后加工出所需尺寸的电极。在加工过程中,电极毛坯随主轴旋转运动、往复运动,反拷块随工作台做横向进给运动,完成电极加工。

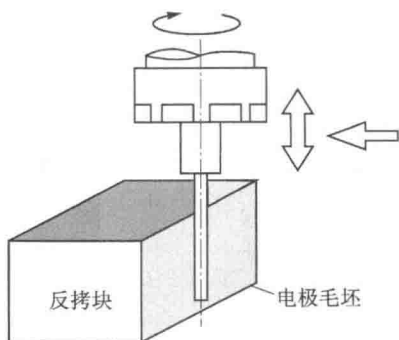


图 1-7 电火花反拷块法

日本 Sodick 公司生产的 API/MARKZOP 机床可以加工 $\phi 15 \mu\text{m}$ 的轴和 $\phi 23 \mu\text{m}$ 的孔^①。广东工业大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学等研究机构也成功加工出直径小于 $\phi 50 \mu\text{m}$ 的电极。

实践表明,反拷块法虽然能加工出微细电极,但是其表面质量不是很高、长径比也不够大,不适合精加工。

1985 年,日本教授增泽隆久等人在图 1-7 所示的电火花反拷块法加工微细电极的基础上,成功研制了线电极电火花磨削法(WEDG)加工微细电极^②。如图 1-8 所示,在 WEDG 加工过程中,线状电极在导丝轮上连续移动,导丝轮沿工具电极的径向做微进给运动,工具电极在随主轴旋转的同时做轴向进给运动,从而完成工具电极的加工。应用该方法不仅能够成功地加工出精密的圆柱形微电极,而且还能够获得多边形、螺旋形的微细电极。日本研制的微机床 MG-ED82W 可

① 赵万生,韦红雨,狄士春,等.微细电火花加工的新进展[J].仪器仪表学报,1996,17(1):65-69.

② Masuzawa I, Fujino M, Kobayashi K. Study on micro-hole drilling by EDM-automatic electrode forming with traveling wire[J]. Bulletin of Japan Society of Precision Engineering, 1986, 20(2):117-120.

稳定地加工出 $\phi 2.5\ \mu\text{m}$ 的微细电极^①。

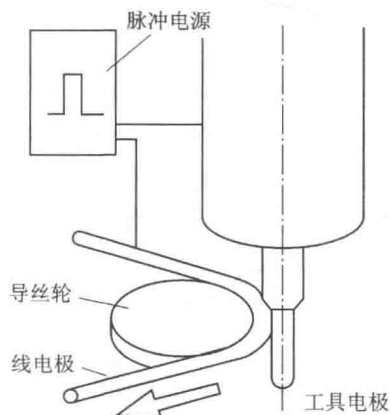


图 1-8 线电极在线磨削法

南京航空航天大学的高长水、宋小中、刘正坝等人于 1997 年应用研制的 WEDG 机构成功加工出直径为 $\phi 35\ \mu\text{m}$ 、长 $0.2\ \text{mm}$ 的微细电极^②，清华大学、哈尔滨工业大学等单位应用 WEDG 法成功研制出高精度微细电极。

2. 基于电化学原理的制备方法

如图 1-9 所示，电化学溶液腐蚀法是利用圆柱形金属材料阳极溶解的原理加工微细电极。电化学溶液腐蚀法加工微细电极具有加工精度高、加工效率高、表面质量好、加工范围广等优点，因而被广泛研究与应用。

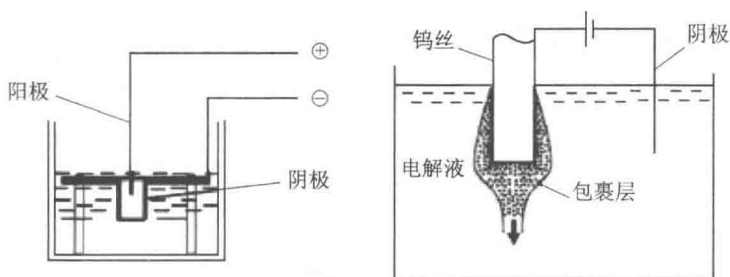


图 1-9 电化学溶液腐蚀法加工原理

2004 年，韩国国立首尔大学利用电化学溶液腐蚀法成功加工出 $\phi 50 \sim \phi 1\ \mu\text{m}$

① Yeol S H. Balon S A P. Fabrication of micro-cylindrical parts based on a novel grinding apparatus [J]. Journal of Engineering Manufacture, 200, 214: 245-249.

② 高长水, 宋小中, 刘正坝, 等. 电火花线电极磨削机构设计研究[J]. 电加工, 1997(3): 17-19.