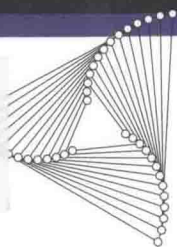




现代机械制造技术丛书

电火花加工



Electro-discharge Machining

曹凤国 主编

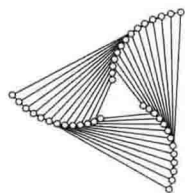


化学工业出版社



现代机械制造技术丛书

电火花加工



Electro-discharge Machining

曹凤国 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

电火花加工 / 曹凤国主编. —北京: 化学工业出版社, 2014.6

(现代机械制造技术丛书)

ISBN 978-7-122-19870-9

I. ①电… II. ①曹… III. ①电火花加工
IV. ①TG661

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 035049 号

责任编辑: 王 烨 张兴辉

文字编辑: 谢蓉蓉

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 25 字数 678 千字 2014 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

《电火花加工》编委会

主 任 曹凤国

副主任 翟力军 桂小波

委 员 曹凤国 翟力军 桂小波 康凯敏

胡绛梅 黄 建 曹世杰 李言辰

张利苹

前言

FOREWORD

新的加工技术推动了历次工业革命。现代制造技术是新经济、新技术发展的重要推动力。随着生产的需要和科学技术的高速发展,新材料不断涌现,同时对工件的加工精度要求越来越高,传统的机械加工已很难满足需求。电火花加工技术以其独特的加工机理(工具和工件间非接触加工,无宏观切削力)和良好、稳定的加工性能成为现代制造技术不可缺少的最重要的加工手段之一。其特有的“以柔克刚、精密微细、仿形逼真”三大特点,在难加工材料、复杂型面、精细表面、低刚度零件和模具等制造领域中占有极其重要的地位,经过半个世纪的发展,已广泛应用于航空、航天、仪器仪表、汽车、模具、电子、石油、地质等领域。为适应企业及学院科研、生产、教学、培训的需要,我们集多年科研与实践经验,编写了《电火花加工》一书。该书不仅汇集了世界上电火花加工机理的各种学派的理论,而且还反映了世界最新的电火花加工技术和装备,是一部既有理论基础,又有先进的技术和工艺实践的综合性书籍。

本书共5篇,包括电火花加工的基本原理、电火花成形加工、高速走丝电火花线切割加工、低速走丝电火花线切割加工、其他电火花加工及复合加工。

本书由曹凤国研究员主编,翟力军、桂小波副主编,康凯敏、胡绛梅、黄建、曹世杰、李言辰参加编写。其中,曹凤国编写绪论,第1篇第1章;桂小波编写第2篇第3章,第3篇第8章、第9章,第4篇第13章、第14章;康凯敏编写第3篇第10章、第11章、第12章,第4篇第15章、第16章、第17章;胡绛梅编写第1篇第2章;黄建编写第2篇第4章;曹世杰编写第2篇第6章、第7章;李言辰编写第2篇第5章;翟力军编写第5篇第18章、第19章。在成稿过程中,胡绛梅、张利苹做了大量组织和文稿处理工作。

在本书编写过程中,参阅了国内外同行有关资料,得到了电加工界许多专家和同仁的支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

本书可供从事电火花加工的工程技术人员使用,也可供从事电火花加工设备操作的技工工人学习使用,还可作为机械制造、精密仪器、机电一体化、模具设计与制造、自动化等专业的教学参考用书。

由于编者水平所限,以及技术的迅速发展,书中不足之处在所难免,望读者批评指正。

《电火花加工》编委会

目 录

CONTENTS

绪论

0.1 我国电火花加工发展概况	1
0.2 电火花加工的特点和用途	6
0.3 电火花加工实现的基本条件	6
0.4 电火花加工的名词术语和符号	7
0.5 电火花加工工艺方法的分类	9

第 1 篇 电火花加工的基本原理

Chapter 01 第 1 章 电火花加工的物理本质

1.1 单次放电腐蚀模型	12
1.1.1 电离准备阶段	13
1.1.2 放电热蚀阶段	13
1.1.3 消离抛出阶段	14
1.2 重复放电腐蚀模型	14
1.2.1 放电诸现象及其相互关系	14
1.2.2 加工速度模型	15
1.2.3 电极低损耗模型	16
1.3 电腐蚀机理的主要学说	16
1.3.1 腐蚀过程	17
1.3.2 抛出过程	20

Chapter 02 第 2 章 影响材料放电腐蚀的主要因素

2.1 极性效应	24
2.2 覆盖效应	24
2.3 间隙效应	26
2.3.1 间隙距离 h 与间隙电压 u 的关系	26

2.3.2	间隙距离 h 与加工速度 v_w 和电极损耗 θ 的关系	26
2.4	面积效应	26
2.5	脉冲放电特性	27
2.6	介质效应	29
2.7	电极与工件材料特性	31

第2篇 电火花成形加工

Chapter 03 第3章 电火花成形加工脉冲电源

3.1	弛张式脉冲电源	35
3.1.1	RC 型脉冲电源	36
3.1.2	RLC 型脉冲电源	38
3.2	晶闸管式脉冲电源	39
3.2.1	晶闸管式电源主回路	39
3.2.2	晶闸管触发电路	40
3.3	双极型晶体管式脉冲电源	42
3.3.1	脉冲发生器(主振级)及典型电路	43
3.3.2	前置放大级及典型电路	46
3.3.3	功率放大级	48
3.4	场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管脉冲电源	49
3.4.1	两种功率管的工作特点	49
3.4.2	常用驱动电路	50
3.4.3	常用功率场效应晶体管脉冲电源类型	53
3.4.4	节能型绝缘栅双极型晶体管(IGBT)脉冲电源	54
3.5	输出不同波形的脉冲电源	55
3.5.1	矩形波派生的脉冲电源的波形与特点	55
3.5.2	不同波形迭加的脉冲电源的波形与特点	56
3.6	其他形式的电火花成形加工脉冲电源	57
3.6.1	高精度镜面加工电源	57
3.6.2	智能化控制脉冲电源	58

Chapter 04 第4章 电火花成形加工自动控制系统

4.1	伺服控制系统	62
4.1.1	伺服控制系统的作用、要求及分类	62
4.1.2	伺服控制系统的基本组成	63
4.1.3	伺服控制系统工作范围的调整	67
4.1.4	伺服控制系统的类型	68
4.2	加工过程参数控制系统	73
4.2.1	加工过程参数控制系统的作用	73
4.2.2	加工过程参数控制的方法	73

4.2.3	加工过程参数自适应控制系统	75
4.3	电火花成形加工的数控系统	79
4.3.1	数控系统软、硬件结构	80
4.3.2	数控系统的插补技术	84
4.3.3	数控系统的加工控制技术	87

Chapter 05 第5章 电火花成形加工机床

5.1	电火花成形加工机床主机	90
5.1.1	机床的分类及结构形式	90
5.1.2	机床各部件名称和传动轴方向定义	93
5.1.3	机床主机各部分的结构及其作用	94
5.1.4	机床主要精度和技术指标检验	99
5.2	电火花成形加工机床用附件	106
5.2.1	机床通用附件	107
5.2.2	机床专用附件	109
5.3	电火花加工用工作液过滤系统	116
5.3.1	主要组成部分和作用	116
5.3.2	工作液过滤系统设计的要求	117
5.3.3	工作液的选择	120

Chapter 06 第6章 电火花成形加工的基本工艺规律

6.1	影响加工速度的主要因素	123
6.1.1	电参数对加工速度的影响	123
6.1.2	非电参数对加工速度的影响	125
6.2	影响电极损耗的主要因素	127
6.2.1	电参数对电极损耗的影响	128
6.2.2	非电参数对电极损耗的影响	130
6.3	影响表面粗糙度和加工精度的主要因素	132
6.3.1	表面粗糙度	132
6.3.2	影响表面粗糙度的主要因素	133
6.3.3	加工精度	135
6.3.4	影响加工精度的主要因素	135
6.4	电火花加工后表面层状态	138
6.4.1	表面变化层	138
6.4.2	表面变化层的力学性能	139

Chapter 07 第7章 电火花成形加工工艺及应用

7.1	电火花成形加工工艺方法	142
7.1.1	单工具电极直接成形法	142
7.1.2	单工具电极平动法	143

7.1.3	单工具电极数控摇动法	143
7.1.4	多工具电极更换法	143
7.1.5	分解工具电极法	144
7.1.6	数控摇动成形法	145
7.1.7	数控多轴联动成形法	147
7.2	电火花成形加工工艺技术	147
7.2.1	零件图工艺分析及加工方法选择	148
7.2.2	电极的准备	148
7.2.3	工件的准备	157
7.2.4	电极的装夹与定位	158
7.2.5	加工规准的选择、转换	160
7.2.6	加工进给量和摇动(平动)量的确定	162
7.2.7	加工参数表和参数说明	163
7.2.8	工作液的处理	164
7.3	电火花成形加工实例	166
7.3.1	花纹模具的电火花加工实例	166
7.3.2	精锻模具的电火花加工	167
7.3.3	汽轮机高压喷嘴组零件的电火花加工	168
7.3.4	轮胎模具的电火花加工	169
7.3.5	螺纹及斜齿轮零件的电火花加工	170
7.3.6	精密微细小孔零件的电火花加工	172
7.3.7	注塑模的电火花加工	174
7.3.8	高精度压胶模的电火花加工	174
7.3.9	五轴联动的电火花加工	176
7.3.10	带冠式整体涡轮盘的多轴联动电火花加工	177
7.3.11	透平叶轮的多轴联动电火花加工	178
7.3.12	高效高精度镜面电火花加工实例	179

第3篇 高速走丝电火花线切割加工

Chapter 08 第8章 高速走丝电火花线切割加工脉冲电源

8.1	高速走丝电火花线切割加工脉冲电源的组成及特点	184
8.1.1	脉冲电源的基本组成	184
8.1.2	脉冲电源的特点	185
8.2	脉冲电源的典型电路	187
8.2.1	脉冲发生器典型电路	188
8.2.2	前置推动级及功率放大级典型电路	190
8.3	其他形式的脉冲电源	192
8.3.1	高频分组脉冲电源	192
8.3.2	阶梯波脉冲电源	193

8.3.3	双回路与多回路脉冲电源	193
8.3.4	自适应控制脉冲电源典型电路	194

Chapter 09 第 9 章 高速走丝电火花线切割加工控制系统

9.1	高速走丝电火花线切割机床控制系统的特性及组成	196
9.1.1	控制系统的特性	196
9.1.2	控制系统的组成	197
9.2	加工轨迹控制系统	197
9.2.1	光电跟踪控制系统	197
9.2.2	计算机数字控制系统	198
9.3	伺服进给控制系统	203
9.3.1	伺服进给速度的控制方法	203
9.3.2	伺服进给驱动电路	205
9.4	加工程序的编制方法	207
9.4.1	3B 代码程序编制方法	207
9.4.2	ISO 代码程序编制方法	208
9.4.3	计算机自动编程方法	212
9.5	基于 PLC 机床控制系统	213
9.6	中速走丝线切割加工技术	214
9.6.1	中速走丝线切割技术的起源	214
9.6.2	中速走丝线切割应具备的功能特点	214
9.6.3	中速走丝线切割控制技术概述	215

Chapter 10 第 10 章 高速走丝电火花线切割加工机床

10.1	机床的型号及主要技术参数	218
10.1.1	机床型号	218
10.1.2	主要技术参数	218
10.1.3	精度检验标准及检验方法	219
10.2	机床的结构组成	219
10.2.1	床身	219
10.2.2	X、Y 坐标工作台	220
10.2.3	运丝系统	224
10.2.4	工作液及循环过滤系统	229
10.2.5	锥度切割的丝架结构	231
10.2.6	多轴联动加工系统	232

Chapter 11 第 11 章 高速走丝电火花线切割加工基本工艺规律

11.1	加工工艺指标	233
11.2	基本加工工艺规律	234
11.2.1	电参数对工艺指标的影响	234

11.2.2	非电参数对工艺指标的影响	236
11.2.3	各因素对加工工艺指标影响的相互关系	241

Chapter 12 第 12 章 高速走丝电火花线切割加工工艺及应用

12.1	加工工艺方法	243
12.1.1	图样分析与方案确定	243
12.1.2	编制加工程序	245
12.1.3	工件的装夹、找正与加工	249
12.1.4	工件的检验	252
12.2	加工应用与实例	253
12.2.1	冷冲模具的加工	253
12.2.2	电动机转子复式冲模的加工	253
12.2.3	长窄型孔冲模或锻模的加工	254
12.2.4	超行程工件的加工	254
12.2.5	不闭合曲线工件的间隙补偿方法及加工	255
12.2.6	带锥度大行程、大厚度零件的加工	256
12.2.7	工艺美术制品零件的加工	256
12.2.8	复杂曲面旋转线切割加工的实例	257
12.2.9	大锥度冷冲模具加工的实例	257
12.2.10	中速走丝电火花线切割加工的应用	257

第 4 篇 低速走丝电火花线切割加工

Chapter 13 第 13 章 低速走丝电火花线切割加工脉冲电源

13.1	低速走丝线切割加工脉冲电源的特点及分类	261
13.1.1	电源的特点	261
13.1.2	电源的分类	263
13.2	低速走丝线切割加工晶体管矩形波脉冲电源典型电路	263
13.2.1	典型电路原理图	263
13.2.2	间隙电压、电流波形图	263
13.3	低速走丝线切割加工并联电容脉冲电源	264
13.4	低速走丝线切割加工无电解作用脉冲电源	265
13.5	低速走丝线切割超高精加工脉冲电源	266

Chapter 14 第 14 章 低速走丝电火花线切割加工自动控制系统

14.1	低速走丝电火花线切割机床数控系统硬件构成	267
14.2	低速走丝电火花线切割机床主轴伺服控制系统	269
14.2.1	主轴运动方向控制系统	269
14.2.2	主轴运动速度控制	270

14.2.3	主轴电动机驱动及控制系统	270
14.3	低速走丝电火花线切割加工过程参数控制	271
14.4	低速走丝电火花线切割机床数控系统软件构成	272
14.5	低速走丝线切割机床控制指令代码	275

Chapter 15 第 15 章 低速走丝电火花线切割加工机床

15.1	机床型号及主要技术参数	278
15.1.1	机床型号	278
15.1.2	主要技术参数	278
15.1.3	精度检验标准及检验方法	278
15.2	低速走丝电火花线切割机床结构	278
15.2.1	床身、立柱	279
15.2.2	X、Y 坐标工作台	279
15.2.3	走丝系统	281
15.2.4	工作液系统	286
15.3	机床工装夹具	287

Chapter 16 第 16 章 低速走丝电火花线切割加工基本工艺规律

16.1	加工工艺指标	289
16.1.1	切割速度	289
16.1.2	表面质量	290
16.1.3	加工精度	291
16.2	基本加工工艺规律	293
16.2.1	电参数对工艺指标的影响	293
16.2.2	非电参数对工艺指标的影响	296

Chapter 17 第 17 章 低速走丝电火花线切割加工工艺及应用

17.1	低速走丝电火花线切割加工工艺	303
17.1.1	低速走丝电火花线切割加工工艺步骤	304
17.1.2	加工前的准备工作	305
17.2	加工工艺方法	310
17.2.1	多工位级进模具的加工工艺方法	310
17.2.2	几种特殊情况常用的处理方法	314
17.2.3	无芯切割的加工工艺方法	316
17.2.4	锥度切割的加工工艺方法	316
17.2.5	双丝切割的加工工艺方法	318
17.2.6	开开形状的加工方法	318
17.2.7	冲压模的加工方法	319
17.3	典型零件加工实例	319
17.3.1	小批量零件的加工实例	319

17.3.2	弹簧管零件的加工实例	320
17.3.3	齿轮的加工实例	321
17.3.4	大批量、高精度、复杂形状零件的加工实例	322
17.3.5	变偏移量、变锥度工件的编程实例	324
17.3.6	无芯切割及跳模加工编程实例	328

第 5 篇 其他电火花加工及复合加工

Chapter 18 第 18 章 其他电火花加工

18.1	电火花小孔加工	337
18.1.1	电火花小孔高速加工	337
18.1.2	精密多轴数控电火花小孔加工	339
18.1.3	小孔及深孔的电火花磨削	344
18.2	电火花回转加工与跑合加工	346
18.2.1	电火花回转加工	346
18.2.2	展成式精密电火花加工的应用	349
18.2.3	电火花跑合加工	350
18.3	金属电火花表面强化与刻字	351
18.3.1	金属电火花表面强化	351
18.3.2	电火花刻字	353
18.4	半导体与非导体的电火花加工	354
18.4.1	超硬材料的电火花加工	354
18.4.2	半导体的电火花加工	358
18.4.3	非导体的电火花加工	359
18.5	电熔爆加工	360
18.5.1	电熔爆加工的原理、特点	360
18.5.2	电熔爆加工设备	360
18.5.3	电熔爆加工的应用	361
18.6	电火花数控铣削加工	362
18.6.1	电火花数控铣削加工的原理与特点	362
18.6.2	影响加工的主要因素	362
18.6.3	采用数控电火花加工机床作为电火花数控铣削加工	364
18.6.4	电火花铣削展成加工的应用	364
18.7	阳极机械切割	365
18.7.1	阳极机械切割加工的原理及特点	365
18.7.2	阳极机械切割加工的应用	365
18.8	短电弧加工	368
18.8.1	短电弧加工技术的原理与特点	368
18.8.2	短电弧加工机床	369
18.8.3	短电弧加工的应用	369

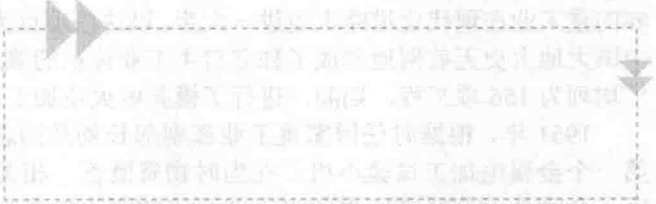
18.9	混粉电火花镜面加工	370
18.10	气体介质中电火花加工	370
18.10.1	气体介质中电火花放电加工的原理与特点	370
18.10.2	气体介质中电火花放电加工特性	371
18.10.3	高压电火花束流在天然金刚石微孔模光整加工中的应用	372

Chapter 19

第 19 章 电火花与其他加工技术的复合加工

19.1	超声电火花复合加工	374
19.1.1	超声电火花复合抛光	374
19.1.2	超声电火花复合打孔	376
19.2	电解放电复合加工	376
19.2.1	电解放电复合加工的原理及特点	376
19.2.2	电解放电复合加工在模具制造中的应用	377
19.2.3	电火花电解复合加工技术对太阳能硅片进行切割加工的应用	378
19.3	液体束流电火花微孔加工	379
19.3.1	液体束流电火花加工的原理	379
19.3.2	液体束流电火花加工的特点	380

参考文献	381
------------	-----



绪论

电火花加工 (electro-spark erosion) 又称放电加工 (electro-discharge machining) 和电蚀加工 (electroerosion machining), 在日本称为放电加工, 在前苏联称为电蚀加工。它是利用两极间脉冲放电时产生的电腐蚀现象, 对材料进行加工的方法。在学术上它属于电物理加工范畴。电火花加工技术是特种加工技术中最重要的部分之一。

电火花加工是与机械加工性质完全不同的一种新工艺、新技术。机械加工是通过机床部件的相对运动, 用比工件材料硬的刀具去切除工件上多余的部分, 来得到成品零件的。但随着工业生产的发展和科学技术的进步, 具有高熔点、高硬度、高强度、高脆性、高黏性、高韧性、高纯度等性能的新材料不断出现, 具有各种复杂结构与特殊工艺要求的工件越来越多, 仍然采用单独机械加工方法, 有时是难以加工或无法加工的。因此, 人们除了进一步发展和完善机械加工方法之外, 还努力寻求新的加工方法。电火花加工方法能够适应生产发展的需要, 并在应用中显出很多优异的性能, 因此得到了迅速发展和日益广泛的应用。

0.1 我国电火花加工发展概况

电火花加工是前苏联学者拉扎连柯夫妇 20 世纪 40 年代初发明的, 1950 年即传入中国, 从一开始取断丝锥、断钻头, 到现在广泛应用于机械制造行业中的各个领域, 包括汽车制造业、航空航天制造业、军品制造业、电子工业等, 走过了 60 多年曲折而快速的发展道路。我国的电加工技术和专业队伍, 也从无到有, 从小到大, 迅速发展。

据资料统计, 目前中国境内的电火花加工机床制造企业约 200 家, 从业人员约 20000 人。粗略估计, 2010 年全国低速走丝电火花线切割机床的产量约 2000 台, 高速走丝电火花线切割机床产量约 40000 台, 高速电火花小孔加工机床约为 3500 台, 电火花成形机床约 6000 台。这三种机床的总量约为 50000 多台, 其中高速走丝电火花线切割机床约占了 80% 之多。目前, 每年电火花加工机床产量以 10% 的速度增长。目前全国各类电火花加工机床保有量近百万台, 从业人员数十万人, 在我国经济飞速发展中, 起着越来越重要的作用。

回顾电火花加工在中国 60 多年的发展历程, 可以大致分为以下四个阶段。

(1) 第一阶段 (1950~1965 年)

从 1950 年电加工传入中国至 1965 年, 是新中国电加工事业艰难创业的起步阶段。这一时期, 电火花加工在生产中的应用和推广, 解决了很多当时生产技术条件下解决不了的老大难问题。

1953~1957年,新中国第一个五年计划,这是中国奠定工业化初步基础的重要时期。在这个时期,苏联帮助中国建设的156个工业项目,使中国以能源、机械、原材料为主要内容的重工业在现代化道路上迈进一大步。以这些项目为核心,以900余个大中型项目为重点,中国大地上史无前例地形成了独立自主工业体系的雏形。其中,原774厂、原718厂等军工工厂均列为156项工程,期间,进行了模具电火花加工技术的配套引进。

1951年,根据时任国家重工业部副部长刘鼎同志的指示,北京第一机床厂成立了中国第一个金属电加工试验小组,在当时物资匮乏、相关设备和技术条件极其落后的情况下,以一台刚从前苏联带回来的电火花强化装置为参考开始了研究工作,图0-1为1949年基纳普工厂生产的КИ-1型电火花强化装置的外观。北京第一机床厂先后研制了国内第一台电火花强花机,第一阳极机械磨刀机,用钻床改装了能进行穿孔、去除钻头、切割硬质合金的电火花机床,还进行了电解液淬火工艺试验与电镀硬铬设备的研制工作。

20世纪50年代,我国开始研究应用电火花加工技术,先应用电火花镀覆冲模刃口及其他工具,提高了模具使用寿命,同时用电火花穿孔、制模、切断、磨削和修理等,并于1954年研制了喷油嘴小孔加工的电火花机床。

1958年10月,营口电火花机床厂研制成功中国第一台58BI型电火花小孔加工机床。该机床是国内最先根据电火花放电蚀除金属的作用和原理研制成功的。

20世纪50年代末期,制成了D5540型电脉冲加工机床(因采用脉冲发电机,故称为电脉冲加工),逐步开始以电火花加工代替仿形铣和圆弧铣制造小型锻模。后来于1965年,研制成功D5570型电脉冲加工机床,解决了5t模锻锤以下的锻模加工,粗加工最大生产率达到 $2800\text{mm}^3/\text{min}$,比靠模铣加工提高加工效率2倍以上,接着又试制出D55120型大型电脉冲加工机床,为锻模电火花加工进一步推广和稳定使用打下了基础。1966年,采用脉冲发电机进行粗加工,用双闸流管脉冲电源以平动头进行半精和精加工,初步试验成功塑压模电火花加工方法,并在上海星火模具厂开始使用。

20世纪60年代中期,在电火花线切割加工中开始采用电子管式脉冲电源,加工速度比采用RC电源提高了3倍以上。电火花线切割机床的仿形控制基本上采用靠模控制。电火花成形机床的主轴头基本上采用机械式,这一时期,电火花加工的发明家苏联拉扎连柯对我国早期电加工的发展也作出过直接的贡献,1955年末,B.P.拉扎连柯教授应邀来华,作为中国科学院院长顾问并指导中国电加工的发展,历时两年。他帮助中国制定了科技发展12年远景规划,并亲自协助制定了《发展电能新应用》项目,开拓了中国和前苏联电加工领域中的科技合作,中国的电加工事业得以蓬勃发展。

为纪念拉扎连柯发明电火花加工50周年,1993年北京市电加工研究所于家珊、曹凤国研究员出席在俄罗斯莫斯科举行的纪念会议(图0-2),表达了中国电加工界对拉扎连柯教授的敬佩和感激之情。

总体来看,电火花加工技术在中国很早就得到了重视和发展,这一时期同国际水平相比差距不大。

(2) 第二阶段(1966~1980年)

晶闸管(可控硅)电源和晶体管电源的电火花加工机床,在20世纪70年代得到较大的发展,它们与不断完善的平动头相结合,使型腔模电火花平动工艺日趋成熟,促进了型腔模电火花加工的新发展。1969年,苏州第三光学仪器厂试制成功GDX-1型光电跟踪电火花线切割机床,用自动跟踪图线运动代替了靠模仿形控制。电火花加工技术的不断发展,使电火花加工在模具加工中所占比例逐步提高,电火花加工机床在模具工业的应用也越来越多。

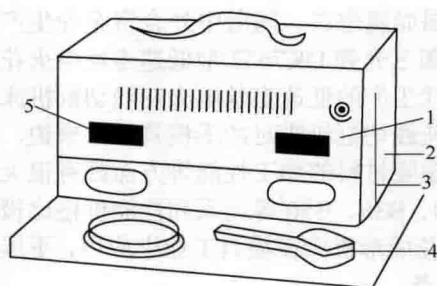


图 0-1 КИ-1 型电火花强化装置外观图

- 1—架身；2—供电电源导线的插座；3—振动器的插销；4—电磁振动器；5—不同加工规范时转换开关位置的标示板



图 0-2 纪念拉扎连柯发明电火花加工 50 周年

1965 年 10 月，营口电火花机床厂试制成功了 D6125 型电火花成形加工机床。它是国内最先采用液压伺服控制系统，以电子开关元件为脉冲电源的定型产品。这是国内最早出口外的电火花成形加工机床。

上海第八机床厂首先制成用于型腔模等加工用的 D6140A 型高频晶体管电火花成形加工机床，主要技术性能：总功率 4.5kW，最大加工电流 50A；脉冲宽度时间范围 2~2000μs；脉冲间隔时间范围：2~2000μs；脉宽系数 0.05~0.95；最大生产率不小于 400mm³/min；精加工 ($R_a=0.8\sim1.6\mu\text{m}$) 生产率 $\geq 8\text{mm}^3/\text{min}$ ；最小电极损耗小于 1%，使我国电火花加工脉冲电源进入一个新的阶段。1972 年，营口电火花机床厂制成 D6185 型电火花成形加工机床，可以加工 10t 以下模锻锤使用的锻模，粗加工用晶闸管脉冲电源，最高生产率达 4000mm³/min；精加工用晶体管脉冲电源表面粗糙度值达到 $R_a=1.6\sim3.2\mu\text{m}$ 。

20 世纪 60 年代中期，上海电表厂首先采用的“高速走丝”形式的数字程序控制的电火花线切割机床，为我国自己发展电火花线切割加工技术闯出了新路。通过上海复旦大学采取数控培训班形式总结推广，高速走丝数控电火花线切割机床如雨后春笋般地出现在全国各地。

这个时期，电火花成形机床使用的脉冲电源开始采用晶体管和晶闸管（可控硅）式，主轴头普遍采用电液式，电火花线切割机床普遍采用光电跟踪和数字程序控制。同时，由于零件或模具制造中的小孔或深孔加工越来越多，一般机械磨削方式难以胜任，电火花磨削工艺得到了普遍应用。例如，上海开关厂、手表厂、星火模具厂等许多工厂自制了立式电火花小孔磨床，都在生产上得到成功的应用。

20 世纪 70 年代，北京机床所研制的 JF-80 晶体管复合式脉冲电源，中国科学院电工所研制的 KD-01 晶闸管（可控硅）脉冲电源，苏州电加工所研制的 EDJ-50 晶体管脉冲电源对我国模具电火花加工技术的提高起到了重要推动作用。

(3) 第三阶段（1981~1995 年）

20 世纪 80 年代以后，国内外电加工的技术和装备都进入高速发展期。这一时期，高速走丝电火花线切割技术发展最快，特别是单板机、单片机数控电火花线切割加工机床达到年产上万台的数量，成为我国冲模加工制造的主要手段。电火花线切割加工的主要工艺指标已达到加工速度 120mm²/min，加工精度 0.02~0.03mm，加工表面粗糙度值 $R_a=2.5\mu\text{m}$ 。低速走丝电火花线切割也开始引进日本发那科技术，在国内小批量生产。1984 年 8 月，营口电火花机床厂试制成功 DK7740 型高速走丝电火花切割机床，这是中国规格最大、最早采用微机控制的线切割机床，是加工尺寸规格最大、线切割能力较全，带有锥度加工的大型线切割机床。

在国际机械加工行业，先进国家早在 20 世纪 80 年代就研制和生产低速走丝电火花线切