

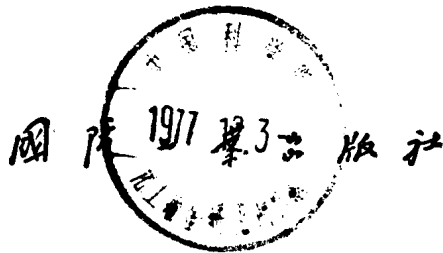
81.31  
174  
0.2

# 电 解 加 工

——根据国外资料编译——

《电解加工》编译组 编译

2011/6



## 前 言

电解加工是问世于五十年代后期、六十年代迅速发展起来的一门新工艺，目前已被世界上不少国家广泛地应用于机械、造船、航空、宇航等工业部门，以加工管件、膛线、叶片、齿轮、花键、型孔、型腔、深小孔，并用于套料、车、铣、抛光、去毛刺等方面。近几年，随着电解加工应用范围的不断扩大，其设备和自动控制系统日趋完善，理论研究工作也有了一定的进展。

我国是应用电解加工较早的国家之一。

在毛主席无产阶级革命路线的指引下，我国电解加工技术得到了很快的发展。特别是无产阶级文化大革命以来，从事电解加工工作的广大工人、工程技术人员和科研人员的阶级斗争和路线斗争觉悟有了很大提高，更加自觉地贯彻执行毛主席的“独立自主、自力更生”方针，高举《鞍钢宪法》的旗帜，广泛实行三结合，使电解加工的应用范围日益扩大，技术理论水平相应地也有了较大提高。

为了加速我国电解加工事业的发展，使之为农业、工业、国防和科学技术现代化发挥更大作用，我们遵循毛主席关于“洋为中用”的教导，根据国外近年的有关资料，编写了这本《电解加工》。

在编写过程中，由于时间仓猝以及资料来源的限制，我们没有能够将目前国外电解加工状况完全反映于本书。同时，国外资料多数偏重于理论性的探讨，这些理论中有不少不切合实际之处；对于工艺应用情况的介绍则比较零星和肤浅。因此，这本书中，理论与实际结合得不够密切。此外，为了力求如实反映国外电解加工的现状，我们在应用的篇章中，对于那些处于实验阶段，有的甚至比较陈旧的东西，仍予以保留，没有完全摒弃。

鉴于国外资料引用的材料名称、牌号很不统一，我们仍按原文标出，而注明已查到的材料成分或国内相应品种的材料牌号。对于电解加工中常用的主要专业术语、名词和符号初步作了统一。

我们对编写工作，经验不足，水平有限，缺点和错误在所难免，希望广大读者批评指正。

《电解加工》编译组

32858

# 目 录

本书所用主要符号 .....7

## 第一篇 电解加工基本原理

### 第一章 电解加工的电化学原理 .....12

第一节 电解和法拉第定律 .....12

第二节 电极电位 .....14

一、电极电位的产生 .....14

二、溶解电位和析出电位 .....15

三、标准电位和平衡电位的计算 .....16

第三节 电极的极化和超电压 .....21

一、浓差超电压 .....22

二、活化超电压 .....23

三、电阻超电压 .....24

第四节 电解加工时的电极反应 .....25

第五节 阳极的活化溶解、钝化和超钝化 .....27

一、阳极极化的特点 .....27

二、钝化和活化 .....28

三、超钝化 .....33

第六节 极化曲线的测定方法 .....35

### 第二章 加工速度和加工间隙 .....39

第一节 加工速度和电流效率 .....39

一、加工速度 .....39

二、合金的加工速度 .....41

三、电流效率 .....43

第二节 加工间隙 .....45

一、加工间隙的过渡过程 .....45

二、平衡间隙 .....48

三、加工间隙与加工余量 .....50

四、加工间隙与加工精度 .....51

五、底面间隙、侧面间隙和法向间隙 .....53

六、变截面加工间隙及其修整 .....55

第三节 阳极产生钝化时的加工速度与

加工间隙 .....57

一、阳极产生钝化时的加工速度 .....57

二、阳极产生钝化时的加工间隙 .....58

三、加工速度与加工间隙的关系 .....59

第四节 电解液电导率变化对加工

间隙的影响 .....60

一、电解液温度的影响 .....60

二、氢气泡的影响 .....62

三、液温上升与产生氢气泡的综合效果 .....65

四、考虑温升与气泡率影响的平衡间隙 .....66

### 第三章 电解液的流动 .....68

第一节 电解液流动对加工过程的影响 .....68

一、向加工间隙供给电解液的方法 .....68

二、确定电解液流速应考虑的因素 .....69

三、确定电解液进口压力应考虑的因素 .....73

四、电解液流动状态对间隙内电流

密度分布的影响 .....76

第二节 电解液流动的均匀性 .....77

一、圆形通液孔 .....77

二、狭缝形通液孔 .....81

三、通液孔的布局与液流均匀性的关系 .....82

第三节 电解加工间隙内的流动过程 .....83

一、侧流条件下间隙内的流动过程 .....84

二、正流与反流条件下间隙内的流动过程 .....85

三、变截面加工时间隙内的流动过程 .....86

### 第四章 电解液 .....87

第一节 概述 .....87

一、电解液的作用 .....87

二、对电解液的要求 .....87

三、电解液的特性 .....89

第二节 电解液成分的选择 .....95

一、电解液分类 .....95

二、几种常用电解液比较 .....96

三、电解液中的添加剂 .....98

四、多成分复合电解液 .....101

五、几种金属材料用电解液 .....103

第三节 电解液的浓度和温度 .....112

一、电解液的浓度、温度与比重的关系 .....112

二、电解液浓度和温度对电导率的影响 .....113

三、电解液浓度和温度对电流效率的影响 .....115

四、电解液浓度和温度的选择 .....116

第四节 加工过程中电解液的变化 .....118

一、电导率的变化 .....118

二、pH值的变化 .....118

三、电解液浓度的变化 .....121

四、粘度的变化 .....121

第五节 电解液的寿命和净化 .....121

一、电解液的寿命 .....	121
二、电解液的净化 .....	123
<b>第五章 混气电解加工 .....</b>	<b>125</b>
<b>第一节 混气电解加工的特点 .....</b>	<b>125</b>
一、在电解液中混入气体的作用 .....	125
二、混气电解加工的工艺特性 .....	127
<b>第二节 混气电解加工的气液混合比 .....</b>	<b>131</b>
<b>第三节 混合腔结构 .....</b>	<b>132</b>
一、混合腔的结构型式 .....	132
二、混合腔与喷口之间的距离 .....	134
三、工具阴极通液孔设计 .....	134
<b>第六章 电解加工的表面质量 .....</b>	<b>136</b>
<b>第一节 电解加工表面质量的特点 .....</b>	<b>136</b>
<b>第二节 电解加工的表面光洁度 .....</b>	<b>137</b>
一、表面粗糙度的整平原理 .....	137
二、表面粗糙度形成的机理 .....	138
三、阳极的极化和表面光洁度 .....	139
<b>第三节 电解加工的表面缺陷 .....</b>	<b>141</b>
一、选择性腐蚀 .....	142
二、晶界腐蚀 .....	145
三、条纹 .....	146
四、短路烧伤 .....	147
五、化学腐蚀和其他 .....	148
<b>第四节 影响表面质量的因素 .....</b>	<b>149</b>
一、材料的性质 .....	149
二、电解液 .....	151
三、工艺参数 .....	152
四、电流波形 .....	154
<b>第五节 电解加工对材料性能的影响 .....</b>	<b>155</b>
一、拉伸强度和延伸率 .....	155
二、疲劳强度 .....	155
三、摩擦系数和耐磨性 .....	158
四、耐腐蚀性和高温抗氧化性 .....	159
<b>参考资料 .....</b>	<b>160</b>

## 第二篇 电解加工设备

<b>第七章 电解加工机床 .....</b>	<b>164</b>
<b>第一节 机床总体布局的选型 .....</b>	<b>164</b>
一、机床总体布局的一般形式 .....	164
二、总体布局与机床刚度的关系 .....	169
三、机床总体布局与加工精度的关系 .....	174
四、机床总体布局与操作维护的关系 .....	175
<b>第二节 机床的部件设计方案 .....</b>	<b>176</b>
一、主轴头的设计方案 .....	176
二、工作台及工作箱的设计方案 .....	193

<b>第八章 自动控制系统 .....</b>	<b>196</b>
<b>第一节 电解加工自动控制系统的要求及方案选择 .....</b>	<b>196</b>
一、极间间隙的控制 .....	196
二、短路保护 .....	199
三、程序控制 .....	200
<b>第二节 间隙控制系统及典型线路、典型元件 .....</b>	<b>201</b>
一、电导率控制系统 .....	201
二、进给系统的调速和稳速 .....	208
三、电流密度控制系统 .....	209
四、直接控制间隙方案的探讨 .....	210
<b>第三节 程序控制试验方案 .....</b>	<b>211</b>
一、电解加工自适应控制的程序控制系统 .....	211
二、加工深度的数字控制装置 .....	214
三、构造及动作 .....	214
四、液压进给的数字控制系统 .....	216
<b>第九章 振动进给、脉冲电源 .....</b>	<b>218</b>
一、概述 .....	218
二、试验设备及控制系统实例 .....	219
<b>第十章 电源 .....</b>	<b>228</b>
<b>第一节 硅整流直流电源 .....</b>	<b>228</b>
一、硅整流直流电源的概况 .....	228
二、短路保护系统的一般情况 .....	229
三、典型的短路保护方案 .....	235
四、理想的短路保护系统 .....	245
<b>第二节 电解加工的特殊电源 .....</b>	<b>246</b>
一、设计特殊电源的目的 .....	246
二、特殊电源的原理和加工效果 .....	246
<b>第十一章 电解液系统 .....</b>	<b>248</b>
<b>第一节 电解液槽 .....</b>	<b>248</b>
一、附属于机床的电解液槽 .....	248
二、多种电解液的组合槽 .....	249
三、“游泳池”式电解液槽 .....	250
<b>第二节 电解液的净化 .....</b>	<b>250</b>
一、沉淀法 .....	251
二、过滤法 .....	254
三、离心法 .....	255
四、三种净化方法的优缺点 .....	255
<b>第三节 电解液参数的控制 .....</b>	<b>255</b>
一、控制电解液参数的概念 .....	255
二、应予控制的电解液参数 .....	256
<b>第四节 电解液泵的选择 .....</b>	<b>257</b>
一、泵在电解加工时的作用 .....	257
二、泵的选择原则 .....	258
三、选择泵的计算方法 .....	260

小结——机床参数的选择 .....	261	第一节 齿轮电解加工 .....	311
一、选择参数的步骤和方法 .....	261	一、齿轮电解成形 .....	311
二、机床、电源、电解液系统和控制系统 之间的关系 .....	262	二、螺旋齿轮电解成形 .....	314
参考资料 .....	265	三、齿轮的电解抛光及修整 .....	316
<b>第三篇 电解加工的应用</b>		第二节 花键电解加工 .....	317
<b>第十二章 电解加工的应用范围及其</b>			
<b>加工条件的选择</b> .....268			
第一节 电解加工的应用范围 .....	268	一、梯形花键孔整形加工 .....	318
第二节 电解加工的经济性 .....	269	二、螺旋花键电解加工 .....	321
一、型腔加工的经济性 .....	270	<b>第十六章 型孔、套料电解加工</b> .....323	
二、型孔加工的经济性 .....	272	第一节 型孔电解加工 .....	323
第三节 加工条件的选择 .....	272	一、棱角型孔的加工 .....	324
一、加工精度 .....	272	二、阶梯孔的加工 .....	325
二、加工条件的选择 .....	275	三、热锻模型孔加工 .....	325
<b>第十三章 工具阴极的设计和制造</b> .....285			
第一节 阴极的分类及其结构、材料			
的选择 .....			
一、阴极的分类 .....	285	四、多位型孔加工 .....	326
二、阴极类型、结构与材料的选择 .....	286	五、喷嘴锥孔加工 .....	326
三、绝缘材料 .....	287	六、喷气发动机零件卵形锥孔加工 .....	327
第二节 特殊结构阴极简介 .....	288	第二节 套料电解加工 .....	328
一、工作头可装卸的阴极 .....	288	一、电解套料的阴极及装置 .....	328
二、通液口处电压高的阴极 .....	289	二、电解加工套料实例 .....	329
三、旋转供液阴极 .....	289	<b>第十七章 叶片、锻模电解加工</b> .....331	
四、液压推动旋转供液的阴极 .....	289	第一节 叶片电解加工 .....	331
五、带振动片的阴极 .....	290	一、概述 .....	331
六、工作面镀层的阴极 .....	291	二、用固定式阴极分次加工叶片 .....	335
七、带阳极保护的阴极 .....	291	三、整体叶轮电解加工 .....	336
八、电解液流周期换向的阴极 .....	291	第二节 模腔电解加工 .....	338
九、加工型腔的辅助件 .....	292	一、概述 .....	338
第三节 工具阴极的设计 .....	293	二、用分块阴极电解加工模腔 .....	340
一、 $\cos \theta$ 法 .....	293	<b>第十八章 深小孔电解加工</b> .....342	
二、考虑实际电镀过程的半实验设计法 .....	296	第一节 深小孔普通电解加工 .....	342
三、考虑电解液流动的半实验设计法 .....	299	一、加工装置和工具阴极 .....	343
四、关于电场对工具阴极设计的影响问题 .....	299	二、加工过程中的几个有关问题 .....	348
第四节 工具阴极的制造 .....	300	第二节 深小孔电液束加工 .....	349
一、机械加工方法 .....	300	一、加工装置 .....	350
二、电解加工反拷法 .....	301	二、喷嘴构造及阴极位置 .....	350
三、数控加工法 .....	302	三、加工实例 .....	351
<b>第十四章 管件电解抛光</b> .....304			
第一节 用硫酸、磷酸和铬酐等复合电解液			
电解抛光 .....			
一、内表面电解抛光 .....	304	<b>第十九章 电解加工的其他应用及</b>	
二、外表面电解抛光 .....	307	<b>发展趋势</b> .....353	
第二节 用氯化钠电解液电解抛光 .....	309	第一节 电解车 .....	353
<b>第十五章 齿轮、花键电解加工</b> .....311			
		一、薄盘件加工 .....	353
		二、发动机定子整流叶片加工 .....	354
		第二节 电解铣 .....	355
		第三节 电解切割 .....	355
		第四节 管件内腔电解扩孔 .....	357
		第五节 电解去除折断工具 .....	357
		第六节 电解去毛刺与倒角 .....	357
		第七节 电解加工的发展趋势 .....	360
		参考资料 .....	362

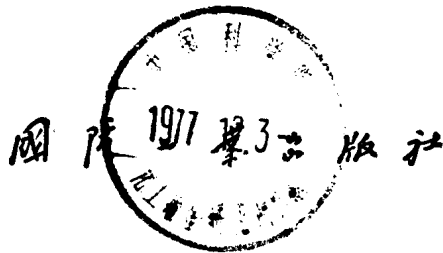
81.31  
174  
0.2

# 电 解 加 工

——根据国外资料编译——

《电解加工》编译组 编译

2011/6



## 内 容 简 介

本书系根据国外近年的有关资料编译而成。全书分三篇：电解加工原理、电解加工设备与控制系统以及电解加工的应用。

书中比较系统地反映了国外电解加工的技术状况，并阐述了阳极溶解机理、加工间隙、电解液及其流动、混气电解加工、加工表面质量以及加工条件选择和工具阴极设计等问题，对于机床、电解液系统以及自动控制、短路保护等方面也进行了详细的介绍。此外，还以相当篇幅叙述了电解加工的应用情况，如：管件抛光，齿轮、花键、型孔、套料、模腔、叶片以及深小孔加工等。

本书可供从事电解加工的工人、工程技术人员、科研人员和院校师生参考。

## 电 解 加 工

——根据国外资料编译——

《电解加工》编译组 编译

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 22<sup>3</sup>/<sub>4</sub> 528 千字

1977年7月第一版 1977年7月第一次印刷 印数：00,001—13,000册

统一书号：15034·1538 定价：2.35 元

## 前 言

电解加工是问世于五十年代后期、六十年代迅速发展起来的一门新工艺，目前已被世界上不少国家广泛地应用于机械、造船、航空、宇航等工业部门，以加工管件、膛线、叶片、齿轮、花键、型孔、型腔、深小孔，并用于套料、车、铣、抛光、去毛刺等方面。近几年，随着电解加工应用范围的不断扩大，其设备和自动控制系统日趋完善，理论研究工作也有了一定的进展。

我国是应用电解加工较早的国家之一。

在毛主席无产阶级革命路线的指引下，我国电解加工技术得到了很快的发展。特别是无产阶级文化大革命以来，从事电解加工工作的广大工人、工程技术人员和科研人员的阶级斗争和路线斗争觉悟有了很大提高，更加自觉地贯彻执行毛主席的“独立自主、自力更生”方针，高举《鞍钢宪法》的旗帜，广泛实行三结合，使电解加工的应用范围日益扩大，技术理论水平相应地也有了较大提高。

为了加速我国电解加工事业的发展，使之为农业、工业、国防和科学技术现代化发挥更大作用，我们遵循毛主席关于“洋为中用”的教导，根据国外近年的有关资料，编写了这本《电解加工》。

在编写过程中，由于时间仓猝以及资料来源的限制，我们没有能够将目前国外电解加工状况完全反映于本书。同时，国外资料多数偏重于理论性的探讨，这些理论中有不少不切合实际之处；对于工艺应用情况的介绍则比较零星和肤浅。因此，这本书中，理论与实际结合得不够密切。此外，为了力求如实反映国外电解加工的现状，我们在应用的篇章中，对于那些处于实验阶段，有的甚至比较陈旧的东西，仍予以保留，没有完全摒弃。

鉴于国外资料引用的材料名称、牌号很不统一，我们仍按原文标出，而注明已查到的材料成分或国内相应品种的材料牌号。对于电解加工中常用的主要专业术语、名词和符号初步作了统一。

我们对编写工作，经验不足，水平有限，缺点和错误在所难免，希望广大读者批评指正。

《电解加工》编译组

32858



# 目 录

本书所用主要符号 .....7

## 第一篇 电解加工基本原理

### 第一章 电解加工的电化学原理 .....12

第一节 电解和法拉第定律 .....12

第二节 电极电位 .....14

一、电极电位的产生 .....14

二、溶解电位和析出电位 .....15

三、标准电位和平衡电位的计算 .....16

第三节 电极的极化和超电压 .....21

一、浓差超电压 .....22

二、活化超电压 .....23

三、电阻超电压 .....24

第四节 电解加工时的电极反应 .....25

第五节 阳极的活化溶解、钝化和超钝化 .....27

一、阳极极化的特点 .....27

二、钝化和活化 .....28

三、超钝化 .....33

第六节 极化曲线的测定方法 .....35

### 第二章 加工速度和加工间隙 .....39

第一节 加工速度和电流效率 .....39

一、加工速度 .....39

二、合金的加工速度 .....41

三、电流效率 .....43

第二节 加工间隙 .....45

一、加工间隙的过渡过程 .....45

二、平衡间隙 .....48

三、加工间隙与加工余量 .....50

四、加工间隙与加工精度 .....51

五、底面间隙、侧面间隙和法向间隙 .....53

六、变截面加工间隙及其修整 .....55

第三节 阳极产生钝化时的加工速度与

加工间隙 .....57

一、阳极产生钝化时的加工速度 .....57

二、阳极产生钝化时的加工间隙 .....58

三、加工速度与加工间隙的关系 .....59

第四节 电解液电导率变化对加工

间隙的影响 .....60

一、电解液温度的影响 .....60

二、氢气泡的影响 .....62

三、液温上升与产生氢气泡的综合效果 .....65

四、考虑温升与气泡率影响的平衡间隙 .....66

### 第三章 电解液的流动 .....68

第一节 电解液流动对加工过程的影响 .....68

一、向加工间隙供给电解液的方法 .....68

二、确定电解液流速应考虑的因素 .....69

三、确定电解液进口压力应考虑的因素 .....73

四、电解液流动状态对间隙内电流

密度分布的影响 .....76

第二节 电解液流动的均匀性 .....77

一、圆形通液孔 .....77

二、狭缝形通液孔 .....81

三、通液孔的布局与液流均匀性的关系 .....82

第三节 电解加工间隙内的流动过程 .....83

一、侧流条件下间隙内的流动过程 .....84

二、正流与反流条件下间隙内的流动过程 .....85

三、变截面加工时间隙内的流动过程 .....86

### 第四章 电解液 .....87

第一节 概述 .....87

一、电解液的作用 .....87

二、对电解液的要求 .....87

三、电解液的特性 .....89

第二节 电解液成分的选择 .....95

一、电解液分类 .....95

二、几种常用电解液比较 .....96

三、电解液中的添加剂 .....98

四、多成分复合电解液 .....101

五、几种金属材料用电解液 .....103

第三节 电解液的浓度和温度 .....112

一、电解液的浓度、温度与比重的关系 .....112

二、电解液浓度和温度对电导率的影响 .....113

三、电解液浓度和温度对电流效率的影响 .....115

四、电解液浓度和温度的选择 .....116

第四节 加工过程中电解液的变化 .....118

一、电导率的变化 .....118

二、pH值的变化 .....118

三、电解液浓度的变化 .....121

四、粘度的变化 .....121

第五节 电解液的寿命和净化 .....121

一、电解液的寿命 .....	121
二、电解液的净化 .....	123
<b>第五章 混气电解加工 .....</b>	<b>125</b>
<b>第一节 混气电解加工的特点 .....</b>	<b>125</b>
一、在电解液中混入气体的作用 .....	125
二、混气电解加工的工艺特性 .....	127
<b>第二节 混气电解加工的气液混合比 .....</b>	<b>131</b>
<b>第三节 混合腔结构 .....</b>	<b>132</b>
一、混合腔的结构型式 .....	132
二、混合腔与喷口之间的距离 .....	134
三、工具阴极通液孔设计 .....	134
<b>第六章 电解加工的表面质量 .....</b>	<b>136</b>
<b>第一节 电解加工表面质量的特点 .....</b>	<b>136</b>
<b>第二节 电解加工的表面光洁度 .....</b>	<b>137</b>
一、表面粗糙度的整平原理 .....	137
二、表面粗糙度形成的机理 .....	138
三、阳极的极化和表面光洁度 .....	139
<b>第三节 电解加工的表面缺陷 .....</b>	<b>141</b>
一、选择性腐蚀 .....	142
二、晶界腐蚀 .....	145
三、条纹 .....	146
四、短路烧伤 .....	147
五、化学腐蚀和其他 .....	148
<b>第四节 影响表面质量的因素 .....</b>	<b>149</b>
一、材料的性质 .....	149
二、电解液 .....	151
三、工艺参数 .....	152
四、电流波形 .....	154
<b>第五节 电解加工对材料性能的影响 .....</b>	<b>155</b>
一、拉伸强度和延伸率 .....	155
二、疲劳强度 .....	155
三、摩擦系数和耐磨性 .....	158
四、耐腐蚀性和高温抗氧化性 .....	159
<b>参考资料 .....</b>	<b>160</b>

## 第二篇 电解加工设备

<b>第七章 电解加工机床 .....</b>	<b>164</b>
<b>第一节 机床总体布局的选型 .....</b>	<b>164</b>
一、机床总体布局的一般形式 .....	164
二、总体布局与机床刚度的关系 .....	169
三、机床总体布局与加工精度的关系 .....	174
四、机床总体布局与操作维护的关系 .....	175
<b>第二节 机床的部件设计方案 .....</b>	<b>176</b>
一、主轴头的设计方案 .....	176
二、工作台及工作箱的设计方案 .....	193

<b>第八章 自动控制系统 .....</b>	<b>196</b>
<b>第一节 电解加工自动控制系统的要求及方案选择 .....</b>	<b>196</b>
一、极间间隙的控制 .....	196
二、短路保护 .....	199
三、程序控制 .....	200
<b>第二节 间隙控制系统及典型线路、典型元件 .....</b>	<b>201</b>
一、电导率控制系统 .....	201
二、进给系统的调速和稳速 .....	208
三、电流密度控制系统 .....	209
四、直接控制间隙方案的探讨 .....	210
<b>第三节 程序控制试验方案 .....</b>	<b>211</b>
一、电解加工自适应控制的程序控制系统 .....	211
二、加工深度的数字控制装置 .....	214
三、构造及动作 .....	214
四、液压进给的数字控制系统 .....	216
<b>第九章 振动进给、脉冲电源 .....</b>	<b>218</b>
一、概述 .....	218
二、试验设备及控制系统实例 .....	219
<b>第十章 电源 .....</b>	<b>228</b>
<b>第一节 硅整流直流电源 .....</b>	<b>228</b>
一、硅整流直流电源的概况 .....	228
二、短路保护系统的一般情况 .....	229
三、典型的短路保护方案 .....	235
四、理想的短路保护系统 .....	245
<b>第二节 电解加工的特殊电源 .....</b>	<b>246</b>
一、设计特殊电源的目的 .....	246
二、特殊电源的原理和加工效果 .....	246
<b>第十一章 电解液系统 .....</b>	<b>248</b>
<b>第一节 电解液槽 .....</b>	<b>248</b>
一、附属于机床的电解液槽 .....	248
二、多种电解液的组合槽 .....	249
三、“游泳池”式电解液槽 .....	250
<b>第二节 电解液的净化 .....</b>	<b>250</b>
一、沉淀法 .....	251
二、过滤法 .....	254
三、离心法 .....	255
四、三种净化方法的优缺点 .....	255
<b>第三节 电解液参数的控制 .....</b>	<b>255</b>
一、控制电解液参数的概念 .....	255
二、应予控制的电解液参数 .....	256
<b>第四节 电解液泵的选择 .....</b>	<b>257</b>
一、泵在电解加工时的作用 .....	257
二、泵的选择原则 .....	258
三、选择泵的计算方法 .....	260

小结——机床参数的选择 .....	261	第一节 齿轮电解加工 .....	311
一、选择参数的步骤和方法 .....	261	一、齿轮电解成形 .....	311
二、机床、电源、电解液系统和控制系统 之间的关系 .....	262	二、螺旋齿轮电解成形 .....	314
参考资料 .....	265	三、齿轮的电解抛光及修整 .....	316
<b>第三篇 电解加工的应用</b>		第二节 花键电解加工 .....	317
<b>第十二章 电解加工的应用范围及其 加工条件的选择</b> .....	268	一、梯形花键孔整形加工 .....	318
第一节 电解加工的应用范围 .....	268	二、螺旋花键电解加工 .....	321
第二节 电解加工的经济性 .....	269	<b>第十六章 型孔、套料电解加工</b> .....	323
一、型腔加工的经济性 .....	270	第一节 型孔电解加工 .....	323
二、型孔加工的经济性 .....	272	一、棱角型孔的加工 .....	324
第三节 加工条件的选择 .....	272	二、阶梯孔的加工 .....	325
一、加工精度 .....	272	三、热锻模型孔加工 .....	325
二、加工条件的选择 .....	275	四、多位型孔加工 .....	326
<b>第十三章 工具阴极的设计和制造</b> .....	285	五、喷嘴锥孔加工 .....	326
第一节 阴极的分类及其结构、材料 的选择 .....	285	六、喷气发动机零件卵形锥孔加工 .....	327
一、阴极的分类 .....	285	第二节 套料电解加工 .....	328
二、阴极类型、结构与材料的选择 .....	286	一、电解套料的阴极及装置 .....	328
三、绝缘材料 .....	287	二、电解加工套料实例 .....	329
第二节 特殊结构阴极简介 .....	288	<b>第十七章 叶片、锻模电解加工</b> .....	331
一、工作头可装卸的阴极 .....	288	第一节 叶片电解加工 .....	331
二、通液口处电压高的阴极 .....	289	一、概述 .....	331
三、旋转供液阴极 .....	289	二、用固定式阴极分次加工叶片 .....	335
四、液压推动旋转供液的阴极 .....	289	三、整体叶轮电解加工 .....	336
五、带振动片的阴极 .....	290	第二节 模腔电解加工 .....	338
六、工作面镀层的阴极 .....	291	一、概述 .....	338
七、带阳极保护的阴极 .....	291	二、用分块阴极电解加工模腔 .....	340
八、电解液流周期换向的阴极 .....	291	<b>第十八章 深小孔电解加工</b> .....	342
九、加工型腔的辅助件 .....	292	第一节 深小孔普通电解加工 .....	342
第三节 工具阴极的设计 .....	293	一、加工装置和工具阴极 .....	343
一、 $\cos \theta$ 法 .....	293	二、加工过程中的几个有关问题 .....	348
二、考虑实际电镀过程的半实验设计法 .....	296	第二节 深小孔电液束加工 .....	349
三、考虑电解液流动的半实验设计法 .....	299	一、加工装置 .....	350
四、关于电场对工具阴极设计的影响问题 .....	299	二、喷嘴构造及阴极位置 .....	350
第四节 工具阴极的制造 .....	300	三、加工实例 .....	351
一、机械加工方法 .....	300	<b>第十九章 电解加工的其他应用及     发展趋势</b> .....	353
二、电解加工反拷法 .....	301	第一节 电解车 .....	353
三、数控加工法 .....	302	一、薄盘件加工 .....	353
<b>第十四章 管件电解抛光</b> .....	304	二、发动机定子整流叶片加工 .....	354
第一节 用硫酸、磷酸和铬酐等复合电解液 电解抛光 .....	304	第二节 电解铣 .....	355
一、内表面电解抛光 .....	304	第三节 电解切割 .....	355
二、外表面电解抛光 .....	307	第四节 管件内腔电解扩孔 .....	357
第二节 用氯化钠电解液电解抛光 .....	309	第五节 电解去除折断工具 .....	357
<b>第十五章 齿轮、花键电解加工</b> .....	311	第六节 电解去毛刺与倒角 .....	357
		第七节 电解加工的发展趋势 .....	360
		参考资料 .....	362

# 本书所用主要符号

## 英文字母

$A$	原子量
$B$	宽度
$C$	电解液浓度
$c$	比热
$E$	电极电位
$E$	平衡电极电位
$E^{\circ}$	标准电极电位
$e$	电子
$F$	法拉第常数
$G$	单位电量所产生氢气的体积
$g$	重力加速度
$H$	高度; 水头
$h$	余量
$I$	电流
$i$	电流密度
$i_a$	临界电流密度
$k$	重量电化当量
$L$	工具阴极进给距离; 间隙通道 长度
$l$	长度
$M$	体积克分子浓度
$m$	重量克分子浓度
$N$	当量浓度
$n$	原子价; 转速
$p$	电解液压力
$Q$	电量; 流量
$R$	电阻; 气体常数
$r$	半径
$S$	面积
$T$	温度
$t$	时间
$U$	工作电压
$U_R$	欧姆压降

$u$	流速
$V$	体积去除量
$V'$	体积去除率
$v$	阴极进给速度
$v_j$	金属阳极溶解速度
$W$	重量去除量
$W'$	重量去除率

## 希腊字母

$\alpha$	温度系数
$\alpha_D$	流量系数
$\beta$	气泡率
$\gamma$	比重
$\Delta$	加工间隙
$\Delta_c$	临界间隙
$\delta$	误差; 偏差; 气泡层厚度
$\delta E$	分解电压
$\zeta$	超电压
$\eta$	电流效率
$\kappa$	电导率
$\lambda$	当量电导; 阻力系数
$\mu$	流体动力粘度
$\rho$	电阻率
$\sigma$	滑移比
$\nu$	流体运动粘度
$\omega$	体积电化当量

## 注 脚

$a$	阳极
$b$	平衡状态
$c$	阴极
$e$	出口处
$g$	气体
$l$	电解液
$n$	法线方向
$o$	初始状态; 进口处



# 第一篇 电解加工基本原理

电解加工是利用金属在电解液中可以发生阳极溶解的原理，将零件加工成形的。这一原理在机械工业中早已被用来作电镀和电抛光，但在电抛光时，工件和工具之间的距离较大，电解液在槽中一般是不流动的，因此，通过的电流密度很小（一般为  $0.01 \sim 5$  安/厘米<sup>2</sup>），金属去除率很低，只能对加工表面进行抛光，不能改变零件的原有形状。电解加工是在电抛光的基础上经过重大革新而发展起来的。如图 1<sup>(6)</sup>所示，加工时，工件接直流电源的正极，称谓阳极；工具接直流电源的负极，称谓阴极（两极之间的电压通常为  $5 \sim 20$  伏），保持一定的间隙（一般为  $0.02 \sim 1$  毫米）。具有一定压力（ $5 \sim 20$  公斤/厘米<sup>2</sup>）的电解液（常用  $10 \sim 20\%$  的 NaCl 水溶液）从两极间隙中快速流过，电流密度很高（一般为  $10 \sim 200$  安/厘米<sup>2</sup>，甚至达每平方厘米数百安），于是工件加工表面的金属按工具阴极的形状迅速溶解，并随即被高速的电解液冲走。工具阴极不断地向工件进给，工件的金属不断地溶解，直到工件的加工尺寸或形状符合要求为止。因此，电解加工既没有机械加工中的切削力和切削热的作用，也没有电火花加工中的热的影响<sup>(8)</sup>。

电解加工的优越性可归纳为以下几点：

1. 凡是导电的材料几乎均可进行加工，并与被加工材料的硬度、强度、韧性无关，加工后的材料金相组织基本上不发生变化。

2. 生产率高。复杂的立体型面可以在阴极直线进给下一次加工出来，且加工速度可以和电流密度成比例地增加，一般地说，在电流为  $10000$  安的机床上加工大多数钢的去速速度可达  $984$  厘米<sup>3</sup>/小时。在实际生产中，用来打孔或套料时，进给速度可达  $3 \sim 6$  毫米/分；加工锻模或叶片等型面时，进给速度为  $0.3 \sim 1.5$  毫米/分。因此，在某些条件下，电解加工的生产率可比机械加工提高数倍（见图 2 ~ 图 7<sup>(4)</sup>）。

3. 加工质量好。电解加工是用电解方法使金属阳极溶解，而不是用机械方法切削金属，所以不产生切削力所引起的种种影响；没有刀具切削痕迹；没有飞边毛刺；可以获得较高的精度和光洁度。加工误差一般可控制在  $\pm 0.025 \sim \pm 0.3$  毫米范围内；对于一般中、高碳钢和合金钢，加工光洁度可稳定地达到  $\nabla 7 \sim \nabla 9$ ，有的合金钢可达到  $\nabla 10 \sim \nabla 11$ 。

4. 由于工具阴极在加工过程中不与工件阳极相接触，故不产生加工变形和应力，加工薄壁零件效果显著。

5. 工具阴极没有消耗。由于工具是阴极，它在电解加工过程中的反应仅是析出氢气，而不发生溶解反应，所以不会有消耗（从理论上讲，一个工具阴极可以加工无数多个工件，但实际上由于产生火花、短路等现象而使阴极有所损伤）。用于不同加工形式的阴极使用

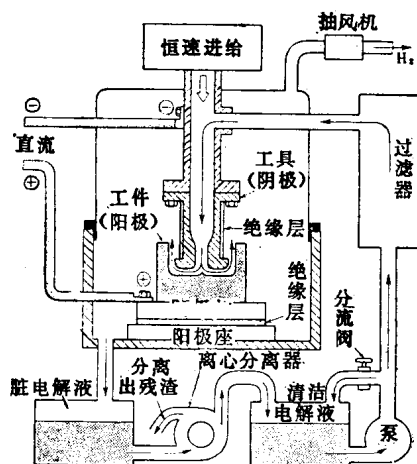


图 1 电解加工系统图

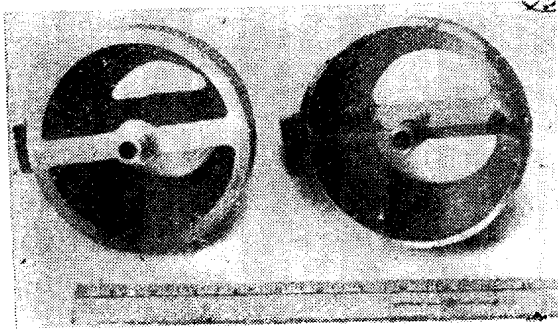


图2 90毫米无座力炮尾药室

左图为锻件毛坯，右图为电解加工后的零件。电解加工时间仅30分钟，而机械加工需要6小时。

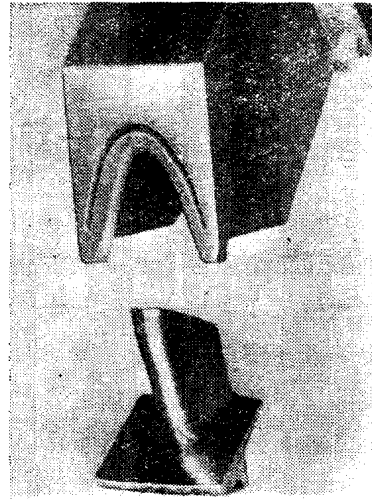


图3 喷气发动机零件的复杂曲面

用电解加工在6分钟内加工出来，而用机械加工至少需120分钟。

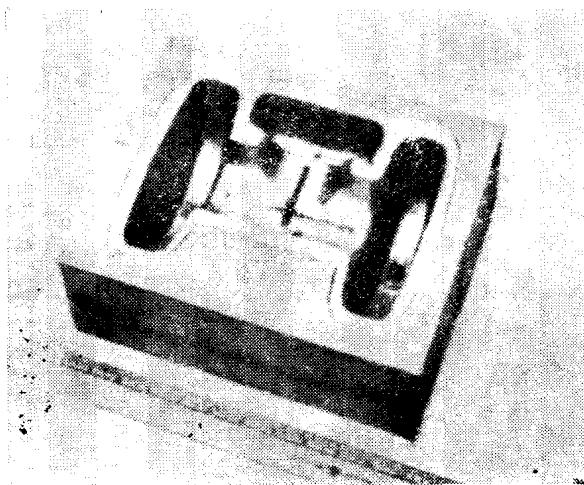


图4 电解加工的阀体锻模

加工时间为110分钟，若用机械加工至少需40小时。

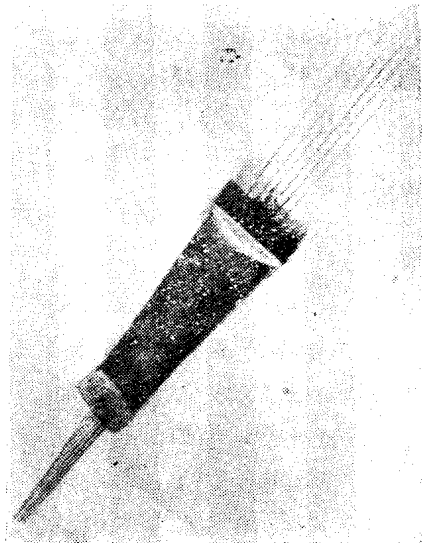


图5 电解加工深小孔

叶片的六个不平行深小孔，直径为1.27毫米，深度为152毫米，在62分钟内同时加工出来。

寿命可参考表1<sup>(10)</sup>。

6. 工装简单，操作方便，不要求高等级的操作工人。

但是，事物总是一分为二的，电解加工既然是一项新的工艺，而且还处于发展提高阶段，人们对它的规律性还没有完全认识和掌握之时，就不可能不遇到这样或那样的问题。同时，电解加工的出现，是机械加工的一种补充。它绝不是“全能者”，相反，还具有较大的局限性。其局限性表现在：

1. 加工精度还不够高。电解加工的精度首先取决于被加工零件的几何形状，若形状比较简单，容许用打孔或套料方式进行加工。且阴极侧面绝缘可靠，则加工误差可以保持在 $\pm 0.05 \sim \pm 0.025$ 毫米。若形状复杂，如加工叶片型面和锻模型腔时，误差要保持在

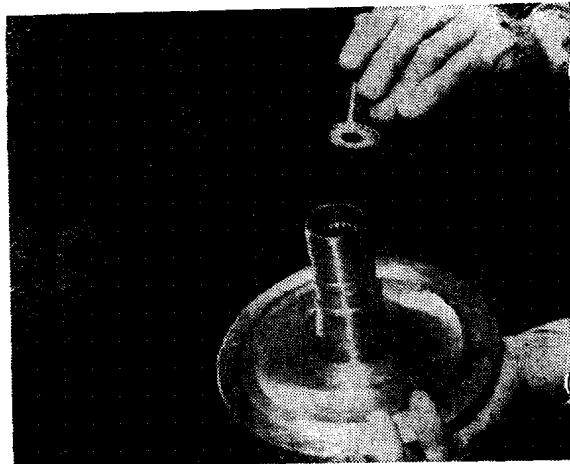


图6 去毛刺和倒角  
电解加工仅以15秒钟完成一件。

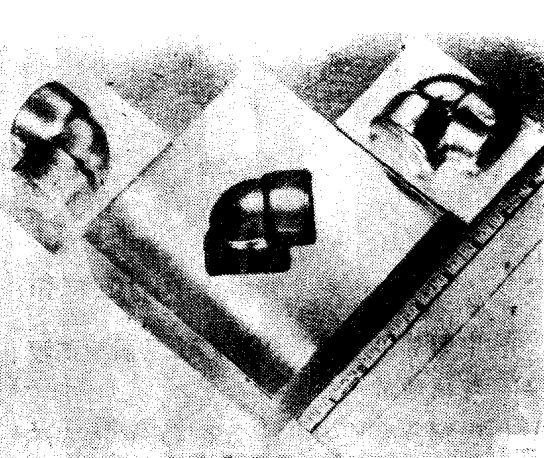


图7 电解加工管接头锻模  
加工时间不到10分钟,而机械加工需14小时,  
电火花加工需4小时。

表1 电解加工用阴极的使用寿命

工 序	阴 极 材 料	阴极大致使用寿命(加工件数)
打小孔(深度50毫米)	黄铜、不锈钢、钛合金	300~500
平面、型腔加工	黄铜、不锈钢	400~500
叶片成形加工	不锈钢	500~550
通孔电解车	黄铜、铜	600~750
外表面电解车	黄铜、铜、不锈钢	600~700

±0.1毫米也不容易。同时,在某些加工条件下,由于电场、流场不易保证均匀,尖端效应无法克服,故不能加工出清棱清角的工件,如:用机械拉削的键槽,根部圆角半径可达0.2毫米,而电解加工的键槽圆角半径一般在0.3毫米左右。

2. 加工型面、型腔的阴极,其设计制造的工作量较大。这些阴极的外形和尺寸往往还要通过试验来逐步修整,所以当加工复杂形状的零件时,阴极的制造周期较长。

3. 要求被加工材料的金相组织均匀,碳化物以高度分散的状态存在,否则就不能获得良好的表面光洁度,如对普通铸铁和渗碳零件加工后的表面光洁度就很不理想。

4. 目前,绝大部分电解加工用的电解液是食盐水溶液或其他中性盐,如硝酸钠水溶液等。这些水溶液对机床设备都有腐蚀性,因而凡与电解液接触的部分,都要用不锈钢或其他耐蚀材料制造。一些机构的表面,如导轨、丝杠等要有防护措施,机床和电源电器要防止电解液蒸气侵蚀。为了防止对其他加工设备的侵蚀,电解加工机床和液压泵最好设置在单独房间里。这些都是一般金属切削机床所没有的问题,这样往往使电解加工机床造价昂贵,厂房布局困难,投资大。

但是,尽管电解加工还存在上述一些局限性,而其优越性仍是令人瞩目的。同时,近年来由于采用了具有非线性特性的电解液(如 $\text{NaClO}_3$ 、 $\text{NaNO}_3$ 水溶液),以及采取了混气、脉冲电源、振动进给等工艺措施,大大提高了电解加工精度和表面质量。若经过进一步研究和探索,电解加工的那些局限性是可以逐步转化的。因而可以认为,电解加工是很有发展前途的一门新工艺。正因为如此,目前世界各国对电解加工的研究相当重视,电解加工的应用范围亦越来越广泛。

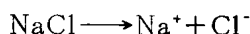


# 第一章 电解加工的电化学原理

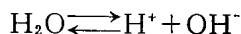
## 第一节 电解和法拉第定律<sup>[106][9][7][81]</sup>

电解加工时工件阳极和工具阴极都浸在电解液中，接上直流电源后，电极和电解液中就有电流通过。

电解质溶液导电和金属导电的方式不同。金属导电依靠自由电子的运动，而电解液导电则依靠荷电离子的定向运动。电解液通常是电解质（酸、碱或盐）在溶剂中的溶液。溶剂一般是水。在溶剂中，电解质分子离解为正离子和负离子，这种现象叫做电离。溶液中正离子所带的正电荷总数和负离子所带的负电荷总数相等，且在溶液中均匀分布，因此电解质溶液呈电中性。接上电源，在电场力的作用下，正离子朝阴极迁移，负离子朝相反方向，即朝阳极迁移。图 1-1 为电解池中离子迁移情况。以氯化钠（NaCl）水溶液导电为例，氯化钠电离为钠离子和氯离子：



氯化钠为强电解质，在水中几乎全部离解。水分子本身也有少量电离为氢离子和氢氧根离子：



在电场力的作用下，正离子  $\text{Na}^+$ 、 $\text{H}^+$  和负离子  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{OH}^-$  分别向阴极和阳极迁移。氯化钠水溶液就是由于这些离子的迁移传导电荷。除了这种电迁移外，还有两种向电极输送离子的运动方式——扩散和对流（自然对流和强制对流）。扩散是由于分子或离子的热运动，而使它们从高浓度处向低浓度处移动。对流是溶液中的分子、离子等物质粒子随着流动着的液体一起运动。离子的这两种运动形式对电解液的导电能力也有重大作用。

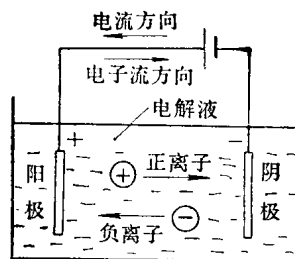


图 1-1 电解池中离子的迁移

电解液的导电能力与离子的浓度（即迁移电荷的离子数）及离子的运动速度有关。带较多电荷的、水化半径小的离子，在较强的电场力（即较大的电位梯度）作用下，在粘度系数小的溶液中，具有较大的运动速度。温度升高，可使电解液的粘度下降，导电能力增加；所以，电解液的电阻率具有负的温度系数。金属的电阻率则相反，它随温度的升高而增加。由于离子比电子大得多，运动速度较慢，因此电解液的电导率比金属要小得多。

电解液的导电能力与离子的浓度（即迁移电荷的离子数）及离子的运动速度有关。带较多电荷的、水化半径小的离子，在较强的电场力（即较大的电位梯度）作用下，在粘度系数小的溶液中，具有较大的运动速度。温度升高，可使电解液的粘度下降，导电能力增加；所以，电解液的电阻率具有负的温度系数。金属的电阻率则相反，它随温度的升高而增加。由于离子比电子大得多，运动速度较慢，因此电解液的电导率比金属要小得多。

当有电流通过时，溶液中的每一种离子都程度不同地参加了电迁移，每种离子所迁移的电流与离子的运动速度成正比。但并不是所有的离子都到达电极，也不一定参加电极反应。

在电流通过电极与溶液的界面时，电流的传导是由电子传导转化为离子传导，或相反。在这些变换传导方式的两相交界面处，有电化学反应（即电极反应）发生。在锌、铁、镍、镉、铅、铜、银和汞等金属盐的溶液中，有一定的电流通过时，溶液中的金属离子会在阴极上吸收电子并以金属形式析出。而在化学性活泼的金属——如碱金属（钾、钠等）和碱土金