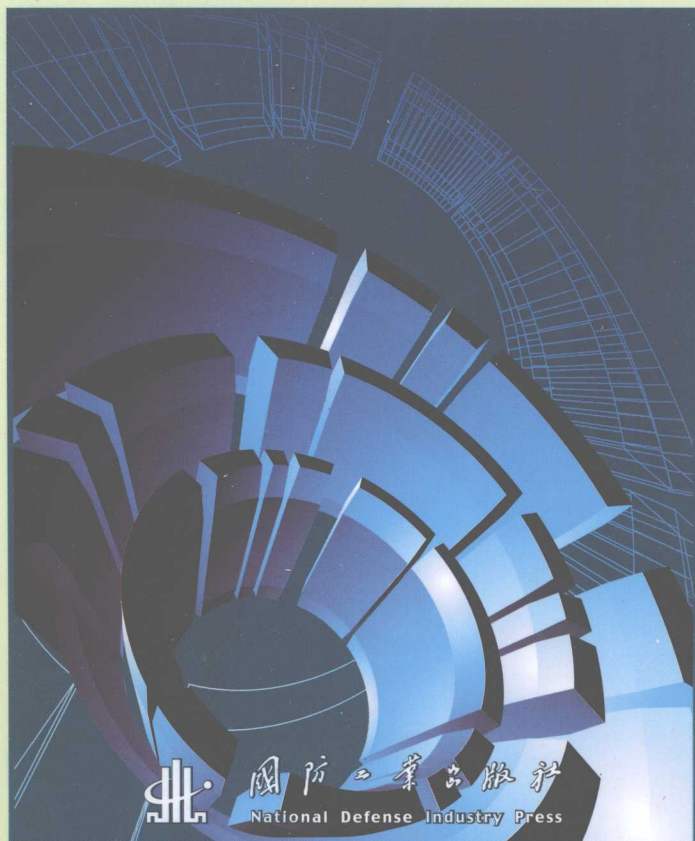


# 电解加工与复合电解加工

Electrochemical Machining and  
Composite Electrochemical Machining

范植坚 李新忠 王天诚 等著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 电解加工与复合电解加工

Electrochemical Machining and  
Composite Electrochemical Machining

范植坚 李新忠 王天诚 等著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电解加工与复合电解加工/范植坚等著. —北京:国防工业出版社, 2008. 10

ISBN 978-7-118-05646-4

I. 电... II. 范... III. 电解加工 IV. TG662

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 041714 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 12 字数 304 千字

2008 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 42.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

## 国防科技图书出版基金

### 评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

(按姓氏笔画排序)

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 刘世参

## 前 言

金基荣出中国对外科技

电解加工生产率高、表面质量好、无应力以及无工具损耗的优点使之成为制造技术的重要手段,目前其应用范围正逐步拓宽,特别是国防建设对该电解加工技术的需求呈增长趋势。从制造业的发展趋势看,电解加工由于加工机理本身的特点使之面临着新的发展机遇,同时极需在技术层面上进一步提高。近几年,间或有业内外人士垂询有关电解加工工艺、装置设计方面的问题,深感社会上需要一本指导电解加工实践的书;在与工厂有关工程技术人员合作开发和进行项目协作时,在多年指导研究生和本科毕业设计的工作中都看到,无论是方案、思路还是具体的结构设计、机理分析,缺少该方向的参考书;在介绍电解加工的应用情况时,已有的书比较侧重型面电解加工。计算机的应用、复合电解加工和微细加工像是异军突起,为电解加工的发展注入了新的活力,这些领域的研究以及国内外本行业前沿的进展令人鼓舞。

本书着重介绍型孔、型腔、深孔、膛线电解加工的阴极工装结构设计和工艺方法,介绍电解—机械、电解—超声、电解—电火花、电解—磁场复合以及计算机应用方面的最新研究成果,编译了近几年国外微细电化学加工和激光辅助电化学加工的有关内容。希望本书能够成为已有的电解加工书<sup>[1-5]</sup>的补充。书中列举的应用实例,大部分取自作者的研究课题或经历过的生产件号,凡是从资料或兄弟单位获取的实例均标明了出处,以便读者日后一旦需要时垂询。

本书由西安工业大学联络其他单位同行共同完成。第4.3节、第4.4节、第5.2节、第5.4节由西安交通大学李新忠博士撰写,第6.1节、第6.2节由西安工业大学李福援教授撰写,第6.3

节由西北工业大学任中根教授撰写,第6.6节由西安工业大学宁生科教授撰写,第5.5节的3个实例分别由西安工业大学张丽娟、刘辰、唐霖撰写,第7.8节由西安工业大学赵刚刚编译,其余章节由西安工业大学范植坚教授和昆仑集团公司王天诚研究员撰写,全书由王天诚研究员校对。插图分别由陈林、张军、贾建利、刘辰、唐霖、钟玲、范庆明、侯文惠制作。

本书撰写的内容涉及的研究成果受总装备部、兵器工业集团公司“十五”、“九五”科研项目的资助以及西安工业大学的支持,撰写后得到金庆同教授的悉心指导和审查,计算机辅助阴极设计应用软件得到曹岩博士、白禹博士、刘红军博士的指导,本书的出版由国防科技图书出版基金资助,在此一并表示深切谢意。

由于作者水平有限,不当之处敬请专家、读者批评指正。

作者



# 书中主要符号

## 英文字母

$A$	相对原子量	$E^{\circ}$	标准电极电位
$A_{21}$	自发辐射爱因斯坦系数	$E_F$	费米能级
$a$	加速度	$e$	电子, 偏心距
$B$	磁感应强度, 阴线宽	$F$	法拉第常数; 点磁极间的作用力
$b$	宽度	$f$	脉冲频率; 工具进给量(光整加工中)
$B_g$	气隙磁感应强度	$\Delta G$	活化能
$B_m$	磁铁中磁感应强度	$g$	重力加速度
$B_r$	剩磁	$H$	磁场强度; 高度; 水头; 蚀除深度; 硬度
$B_s$	材料饱和磁感应强度	$H_0$	微分磁导率
$C$	电解液浓度; 离子浓度; 电容	$H_C$	矫顽力
$C_{DL}$	双电层电容	$H_{Cb}$	磁感矫顽力
$c$	比热容	$H_{Ci}$	内禀矫顽力
$D$	直径	$H_g$	永磁铁的气隙磁场强度
$D_e$	工具头直径	$h$	加工余量; 高度; 普朗克常量
$D_h$	水力直径	$I$	电流强度
$D_i$	离子的浓度系数	$I_m$	峰值电流
$D_s$	面元矢量 $ds$ 的模	$i$	电流密度
$D_w$	工件直径	$i_0$	交换电流密度
$d$	距离, 内径	$J$	离子电迁移的稳态流量
$E$	电场强度, 电子能量		
$E'$	非标准状态下的平衡电极电位		

$J_m$	磁极化强度	$Q_m$	总磁极强度
$j_m$	磁偶极矩	$q_m$	磁极强度
$K$	修正值,玻耳兹曼常数	$R$	电阻;气体常数;半径
$K_\sigma$	均匀度;分散度	$Ra$	表面粗糙度
$k$	质量电化当量	$R_m$	磁阻
$L$	电感;距离;距离矢量	$Rz$	表面粗糙度
$L_c$	阴极长度	$r$	半径
$L_w$	工件长度	$S$	面积
$L_M$	轴向长度	$S_m$	磁路截面积
$l$	长度;增液槽长度	$T$	力矩;温度;脉冲周期
$l_g$	气隙长	$T_C$	居里温度
$l_m$	磁体长	$T_n$	加工结束时间
$M$	磁矩;磁化强度;体积克分子浓度;磁能尺寸比例系数	$T_{on}$	脉冲宽度
$M_g$	气隙比例系数	$t$	时间
$M_s$	材料饱和磁化强度	$u$	气体流速
$m$	质量克分子浓度	$u_1$	电解液流速
$N$	退磁因子;当量浓度	$U$	加工电压;线圈激励电压
$N_1$	基态原子	$U_R$	欧姆压降
$N_2$	激发态原子	$V$	体积去除量
$n$	原子价;转度	$V_m$	磁势
$n_e$	工具头转速	$v$	阴极进给速度
$n_w$	工件转速	$v_L$	金属沿进给方向去除速度
$P$	压力;法向载荷	$v_a$	金属阳极溶解速度
$P_1$	电解液压力	$v_f$	工具相对于工件的进给速度
$P_g$	气体压力	$v_i$	离子电迁移速度
$Q$	电量;流量	$v_n$	金属沿加工面法向去除速度
$Q_1$	电解液流量	$v_w$	工件外圆线速度
$Q_g$	气体流量	$\Delta V$	磁介质中包围某一点的小体积
		$w_{AB}$	外力对磁极 $q_m$ 做的功

$w$  锥度改善系数

$Z$  气相混合比;阻抗;膛线条数

### 希腊字母

$\alpha$  温度系数;离子活度;还原反应传递系数;阴极工作齿半角

$\lambda$  阻力系数;波长

$\beta$  侧壁斜角;气泡率;氧化反应传递系数;工作齿半锥角

$\mu$  流体动力黏度;化学位;磁导率

$\gamma$  材料退磁曲线隆起程度;比密度

$\mu_0$  真空的磁导率

$\mu_d$  气隙中的磁场

$\mu_r$  相对磁导率

$\Delta$  加工间隙;(正体)加在其他物理量前时表示增量

$O$  目标函数

$\rho$  密度;电阻率

$\Delta_b$  底面平衡间隙

$\sigma$  速度滑移比;表面残余应力

$\Delta_c$  加工某时刻侧面间隙

$\nu$  流体运动黏度系数

$\Delta_d$  加工某时刻径向深度

$\nu_{21}$  跃迁产生的光波频率

$\Delta_0$  截至加工间隙;初始间隙

$\xi$  电导率温度系数

$\Delta_n$  法向间隙

$\omega$  体积电化当量;角频率

$\Delta_{cb}$  阴极齿末端对应的膛线侧面间隙

$\omega_c$  工具头角速度

$\Phi$  磁通量

$\Delta_{cb}$  阴极齿末端对应的膛线径向间隙

$\Delta\Phi$  绝对电极电位(内电位差)

$\phi$  电场电位;内电位(伽伐尼电位)

$\delta$  误差,厚度投影

$\phi_h$  通过曲面  $S$  的磁通量

$\delta_B$  边界层厚度

$\varphi$  膛线的缠角

$\delta E$  阴、阳极电极电位总和  
( $\Delta E = |E_a| + |E_b|$ )

$\psi$  两液面间电位差;分散层电位;伏打电位

$\delta E_0$  分解电压

$\tau$  黏性剪切力;时间常数

$\varepsilon$  误差值

$\tau_s$  原子在激发态停留的时间

$\Delta E$  超电压

$\theta$  进给方向与工件表面的夹角;渐速膛线阴极工作齿两侧缩进角;工具相对损耗

$\eta$  电流效率

$\kappa$  电导率

$\Lambda$  当量电导

$\chi$  介质在该点的磁化率;表面电位

## 其他下标

<p>a 阳极</p> <p>c 阴极</p> <p>e 出口处</p> <p>g 气体</p> <p>o 初始状态;进口处;切断状态</p> <p>k 阴极计算机辅助设计中采用工作齿的宽度、长度下标</p>	<p>l 液体、电解液</p> <p>n 法线方向</p> <p>s 侧面</p> <p>B 底面</p> <p>theo 理论值</p> <p>cal 计算值</p>
--	--

注:① 矢量用粗体,比如表中的  $M$ ,当表示磁化强度时,记为  $\mathbf{M}$ ;表示体积克分子浓度、尺寸比例系数时,记为  $M$ 。

② 本表尚未包括书中出现的电化学专用符号  $\vec{i}^0$ 、 $\vec{i}^0$ 、 $\vec{K}$ 、 $\vec{K}$ 、 $\Delta \vec{G}^0$ 、 $\Delta \vec{G}^0$  等,在文中说明。其中  $\rightarrow$ 、 $\leftarrow$  分别为还原反应和氧化反应的标志。

# 目 录

第1章 电解加工基础	1
1.1 概述	1
1.1.1 电解加工原理和特点	1
1.1.2 电解加工系统的组成和分类	5
1.1.3 电解加工的工具和工作介质	8
1.2 电解加工的电化学基础	11
1.2.1 电化学系统	11
1.2.2 法拉第定律和电流效率	12
1.2.3 电极和电极电位	14
1.2.4 极化和电解加工电极反应的次序	16
1.3 电解加工的设备	20
1.3.1 电解加工设备应具备的条件和配置	20
1.3.2 电解加工设备的性能规格	23
1.4 电解加工的应用及发展	29
1.4.1 选择电解加工作为加工手段的原则	29
1.4.2 电解加工工序和方案	31
1.4.3 电解加工的应用现状和发展方向	32
第2章 电解加工的各类成型方法及工艺装置	36
2.1 端面进给衍生式成型	36
2.1.1 型孔电解加工	36
2.1.2 套料和套型电解加工	44
2.1.3 齿轮电解加工	46
2.2 侧面进给积分式深孔电解加工	47

2.2.1	固定式电解加工	47
2.2.2	移动式深孔电解加工	54
2.3	侧面进给积分式膛线电解加工	65
2.3.1	膛线电解加工概述	65
2.3.2	固定式膛线电解加工	68
2.3.3	移动式膛线电解加工	68
2.4	三面进给积分式电解加工	77
2.4.1	键槽类零件电解加工	77
2.4.2	异形深孔电解加工	90
2.5	全型复制式电解加工	101
2.5.1	模具型腔电解加工	101
2.5.2	其他型腔零件电解加工	109
2.5.3	型面电解加工	109
<b>第3章</b>	<b>电解加工工艺参数及工艺指标</b>	<b>112</b>
3.1	电解加工工艺参数和工艺指标概述	112
3.2	电解加工工艺参数	113
3.2.1	电源参数对工艺指标的影响	113
3.2.2	机床参数对工艺指标的影响	116
3.2.3	电解液参数对工艺指标的影响	120
3.2.4	材料及热处理规范对工艺指标的影响	125
3.2.5	加工间隙及工艺参数的选择	127
3.3	电解液	133
3.3.1	电解液的成分	133
3.3.2	钝性电解液	136
3.3.3	复合电解液	143
3.4	电解加工的主要工艺指标	150
3.4.1	电解加工的精度	150
3.4.2	电解加工的表面质量	156
<b>第4章</b>	<b>计算机在电解加工中的应用</b>	<b>161</b>
4.1	计算机控制深孔电解加工工艺参数	161

4.2	身管混合膛线计算机控制电解加工	166
4.2.1	混合膛线电解加工阴极设计和运动 轨迹的控制	166
4.2.2	膛线加工电参数与阴极运动轨迹的 同步控制	171
4.3	对电解加工过程进行模糊控制的研究	175
4.3.1	智能控制方法概述	175
4.3.2	模糊控制技术用于减小电解加工型 孔侧壁锥度	176
4.4	对电解加工过程进行模糊神经网络控制的 研究	181
4.4.1	神经网络技术	181
4.4.2	非线性系统的神经网络辨识	184
4.4.3	神经网络在线自学习模糊控制器	188
4.4.4	神经网络在线迭代学习算法	190
4.4.5	深孔电解加工模糊神经网络控制方法	192
<b>第5章</b>	<b>阴极型面的计算机辅助设计</b>	<b>198</b>
5.1	电解加工阴极设计的任务及存在问题	198
5.2	计算机仿真和数值模拟在电解加工中的应用	201
5.2.1	用有限单元逼近未知的电解加工系统 的思路	201
5.2.2	计算机仿真和数值模拟在电解加 工中的应用现状	203
5.3	电解加工数值模拟的基础——成型规律及阴极 修正原理	205
5.3.1	平板零件加工时的成型过程	206
5.3.2	型孔加工间隙的变化规律	210
5.3.3	变截面零件加工间隙的计算及阴极修正	212
5.3.4	电极过程的电流效率变化对成型规律 的影响	215

5.4	阴极型面模型及计算机辅助设计的算法	216
5.4.1	采用人工修正阴极型面的 $\cos\theta$ 法	217
5.4.2	等间隙设计阴极锥型及实验修正	218
5.4.3	基于反映间隙电场分布的模型——拉普拉斯方程	219
5.4.4	阴极设计的数值解法	222
5.4.5	应用 ANSYS 软件进行计算机辅助阴极设计	226
5.5	电解加工阴极计算机辅助设计应用实例	228
第6章	电解—机械(超声、电火花)复合加工及激光、 磁场辅助电化学加工技术	249
6.1	轴类零件电解机械复合光整加工	249
6.1.1	整平原理	249
6.1.2	工艺特点和应用范围	251
6.1.3	电解—机械复合加工中工艺参数及其对加工指标的影响	252
6.2	电解—超声复合光整加工	257
6.2.1	电解—超声复合光整加工的装置原理	257
6.2.2	电解—超声复合光整加工的超声器件	260
6.2.3	加工效果	261
6.3	电解—电火花复合加工	262
6.3.1	电解—电火花复合加工原理	262
6.3.2	电解—电火花复合加工的工艺特点	265
6.3.3	电解—电火花复合加工实验研究	266
6.4	激光辅助电化学加工	275
6.5	磁场辅助电解加工	281
6.5.1	磁场的研究和应用	281
6.5.2	在电解成型加工中采用的磁源	285
6.5.3	电流励磁磁场减小型孔电解加工杂散腐蚀	287



6.5.4	永磁体磁场减小型孔电解加工杂散腐蚀	290
6.5.5	永磁体磁场改善型孔电解加工间隙流场	298
6.5.6	多极渐变磁路及其组合强化间隙磁场	298
6.5.7	永磁体磁场改善型面电解加工流场	300
6.6	磁场在光整加工中的应用	303
<b>第7章</b>	<b>微细电化学加工技术</b>	<b>309</b>
7.1	微细加工技术的特点和分类	309
7.2	掩膜微细电化学加工	312
7.3	无掩膜微细电化学加工	316
7.3.1	纳秒级脉冲微细电化学加工	317
7.3.2	微细探针、微孔和窄槽的电化学加工	321
7.3.3	微细电解射流加工	324
7.4	LIGA 和准 LIGA 技术	325
7.5	EFAB 技术	329
7.6	电化学约束刻蚀剂层技术	331
7.7	电化学沉积	333
7.8	纳米加工技术	336
7.8.1	STM、AFM 和 SPM 技术的应用	336
7.8.2	聚焦离子束技术	337
7.8.3	纳米压印技术	339
7.8.4	阳极氧化和剥离技术	341
<b>附录</b>		<b>343</b>
I	三种常用电解液的理化性能	343
II	部分金属的电化学当量	345
III	部分元素的标准电极电位(25℃时)	346
IV	立式电解加工设备性能规格	347
V	实例目录	352
<b>参考文献</b>		<b>354</b>