

电解加工技术 及其研究方法

范植坚 王天诚 编著

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

电解加工技术及其 研究方法

范植坚 王天诚 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电解加工技术及其研究方法/范植坚,王天诚编著.
北京:国防工业出版社,2004.10

ISBN 7-118-03571-8

I. 电... II. ①范...②王... III. 电解加工
IV. TG662

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 074445 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)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7% 186 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 16.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:68428422 发行邮购:68414474

发行传真:68411535 发行业务:68472764

内 容 简 介

这是一本实用技术和理论分析并重的电解加工专著。第1章和第2章阐述了电解加工的特点和电化学原理;第3章和第4章介绍了深孔、膛线、深异形孔、键槽电解加工的工艺及应用实例,计算机控制及模糊控制的方法;第5章介绍磁场复合电解加工技术;第6章从电化学角度对阴极结构设计、提高加工精度的工艺措施的机理进行了分析,介绍和探讨了电解加工试验研究方法。

本书基于作者“八五”、“九五”、“十五”的研究成果,工程特色突出,并系统介绍了与电解加工有关的电化学理论。可作为工科院校本科生、研究生的教材或教师教学参考书,对相关研究所、工程技术人员的科研、生产、工艺技术改进有参考价值。

前 言

这不是一本全面的电解加工书籍。本书着重介绍近几年电解加工科研和生产中的成果和经验,内容包括深孔膛线、深异形孔、键槽及现场计算机控制,加磁场的复合电解加工技术,电解加工的试验研究方法等。深孔和膛线电解加工是我国,也是世界上最先研制成功的电解加工技术,在一些工业生产中已成为不可取代的定型工艺,并以其独到的优势继续扩展着应用空间,特别是国防建设对该电解加工技术的需求呈增长趋势。除了1965年出版的《电解加工》外,近十几年出版的电解加工书籍有关深孔、膛线电解加工的内容仅仅散见于个别章节,较少涉及该领域的最新研究成果,较少涉及深异形孔等加工难题的解决方法。

电解加工进行材料去除是以离子溶解的形式进行的,这种去除方式使电解加工具有微细加工的可能。微细加工,包括电化学微细加工,是目前世界制造业关注的一个重要方向。双电层和动力学的深入研究,揭示了传统电化学过程的本质,对电解加工这一高速电化学过程的机理研究也有实质性的影响。因此,从电化学理论的角度探讨电解加工机理及工艺措施问题,对促进电解加工进一步向“深、大、精密、微细”发展有重要意义。

目前多个高校的研究生和博士生介入该领域课题,本科的《机械制造基础》或《金属工艺学》课程也涵盖了这方面内容,有的学校还专为本科加开了《特种加工》选修课。因此,有必要出版一本反映最新研究成果,兼顾实践和理论的电解加工新书。为了便于学生学习,本书加强了理论的阐述和分析。

本书作者一生从事电解加工,得益于西安昆仑机械厂和西安

工业学院提供的良好生产实践和科学实验的基地——一个富含实战品种和充满对工艺进步追求的基地。本书力求紧密结合实际,为工程服务,力求选材与近几年出版的其他电解加工书籍少重复,对所选的内容增加深度。

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,撰写过程得到金庆同教授的悉心指导和审查,本书的出版得到西安工业学院和国防工业出版社的支持,在此一并表示深切的谢意。

第5章第5.2节和第5.3节由钟玲编写,其余由范植坚和王天诚撰写,全文由王天诚校对。第3章至第6章的部分内容涉及的研究工作还有冯延军、孙立庭、李福援、徐泽华、罗元丰、王岗罡等参加。全书插图分别由陈林、蒋宝庆、贾建利、钟玲、范庆明绘制。

由于作者水平有限,不当之处敬请专家、读者批评指正。

编著者

序

电解加工是制造技术领域中的一项重要的单元技术,由众多技术集成,受众多学科支持。其应用范围正逐步拓宽,技术内涵也日益丰富。近十几年来,一些高难度的工艺关键,如异形深孔和复杂膛线的电解加工技术取得了长足的进展,进而深化了人们对电解加工机理的认识,为开拓电解加工的新技术,促进电解加工的进一步发展奠定了基础。

西安昆仑机械厂是我国率先开创电解加工工艺并稳定用于生产的企业,西安工业学院与之紧密合作,共同完成了多项“九五”及“十五”国家重点电解加工课题,尤其是在异形深孔和复杂膛线的电解加工方面取得了突破性成果,并结合课题的试验研究对磁场复合电解加工技术进行了开拓性研究。本书正是在此基础上,由长期主持课题研究,在电解加工第一线耕耘一生、具有深厚电化理论基础范植坚教授(西安工业学院)和王天诚研究员(西安昆仑机械厂)两位专家精心撰写的。

本书的特点:一是十分重视理论与实践的结合,在详尽论述电解加工机理的基础上,研究分析电解加工的工艺关键,并在分析工艺过程中进一步揭示电解加工的内部规律。二是抓住难点,指导一般,从重点分析异形深孔和复杂膛线的电解加工难点入手,使读者从难点分析中掌握到一般电解加工的工艺规律,收到举一反三的效果。三是立足现在,放眼未来,既介绍了当今的电解加工工艺技术,又论述了磁场复合电解加工等一些前沿性课题的最新成果,以便读者能拓宽视野进行创新性的科研实践。为此,本书带有一定的专著色彩,具有鲜明的创新特色。

我衷心支持本书的出版。它将为工科院校相关专业的本科生、研究生及工程技术人员提供一本颇具创新意识,能给予颇多启迪的参考书籍。相信该书的出版,对促进电解加工技术的发展,将会产生积极的作用。

金庆同

2004年6月于南京

金庆同先生为著名电加工专家,西北工业大学和南京航空航天大学教授,第三届全国电加工学会理事长。

书中主要符号

英文字母

A	相对原子量	f	脉冲频率
B	磁感应强度, 阴线宽	ΔG	活化能
b	宽度	g	重力加速度
B_g	气隙磁感应强度	H	磁场强度; 高度; 水头; 蚀除深度
B_m	磁铁中磁感应强度	H_0	微分磁导率
B_r	剩磁	H_C	矫顽力
B_s	材料饱和磁感应强度	H_{Cb}	磁感矫顽力
C	电解液浓度; 离子浓度; 电容	H_{Ci}	内禀矫顽力
c	比热容	H_g	永磁铁的气隙磁场强度
D	直径	h	加工余量; 高度
D_h	水力直径	S	面积
D_i	i 为离子的浓度系数	S_m	磁路截面积
D_s	面元矢量 ds 的模	I	电流强度
d	距离, 内径	i_0	电流密度
E	电场强度, 电子能量	J_m	磁极化强度
E'	非标准状态下的平衡电极电位	u	流速
E°	标准电极电位	j_m	磁偶极矩
E_F	费米能级	K	修正值, 玻尔兹曼常数
e	电子, 偏心距	k	质量电化当量
F	法拉第常数; 点磁极间的作用力	L	电感; 距离; 距离矢量
		L_c	阴极长度

L_M	轴向长度	r	半径
l	长度;增液槽长度	V	体积去除量
M	磁矩;磁化强度;体积克分子浓度;磁能尺寸比例系数	J	离子电迁移的稳态流量
T		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	时间
M_g	气隙比例系数	U	加工电压;线圈激励电压
M_s	材料饱和磁化强度	U_R	欧姆压降
m	质量克分子浓度	v_L	金属沿进给方向去除速度
N	退磁因子;当量浓度	u_1	电解液流速
n	原子价;转度	V_m	磁势
P	压力	v	阴极进给速度
P_1	电解液压力	v_a	金属阳极溶解速度
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	ΔV	磁介质中包围某一点的小体积
Q_g	气体流量	Z	气相混合比;阻抗;膛线条数
Q_m	总磁极强度	w_{AB}	外力对磁极 q_m 做的功
q_m	磁极强度		
R	电阻;气体常数;半径		
R_m	磁阻		

希腊字母

α	温度系数;离子活度;还原反应传递系数;阴极工作齿半角	比密度
β	侧壁斜角;气泡率;氧化反应传递系数;工作齿半锥角	ψ 两液面间电位差;分散层电位
γ	材料退磁曲线隆起程度;	Δ 加工间隙;加在其他物理量前时表示增量
		Δ_b 底面平衡间隙

Δ_n	法向间隙	ρ	密度;电阻率
Δ_0	截至加工间隙;初始间隙	σ	电导率;速度滑移比;表面残余应力
δ	误差,厚度投影	ν	流体运动粘度系数
δ_B	边界层厚度	ω	体积电化当量;角频率
δE	阴、阳极电极电位总和($\Delta E = E_a + E_b $)	Φ	磁通量
δE_0	分解电压	$\Delta\Phi$	绝对电极电位(内电位差)
ΔE	超电压	ϕ	电场电位;内电位(伽伐尼电位)
η	电流效率	ϕ_n	通过曲面 S 的磁通量
κ	电导率	ξ	电导率温度系数
λ	当量电导;阻力系数	τ	粘性剪切力;时间常数
μ	流体动力粘度;化学位;磁导率	θ	进给方向与工件表面的夹角
μ_0	真空的磁导率	Λ	当量电导
μ_d	气隙中的磁场	χ	介质在该点的磁化率
μ_r	相对磁导率		

其他下标

a	阳极	l	液体;电解液
c	阴极	n	法线方向
e	出口处	s	侧面
g	气体	B	底面
o	初始状态;进口处;切断状态		

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 。

注②: 本表未包括书中出现的电化学专用符号 $\vec{P}$ 、 $\vec{P}^0$ 、 $\vec{K}$ 、 $\vec{K}$ 、 $\Delta \vec{G}^0$ 、 $\Delta \vec{G}^0$ 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 绪论	1
1.1 电解加工的原理、特点和分类.....	1
1.2 电解加工技术的发展现状	4
第 2 章 电解加工的电化学原理	8
2.1 电化学的研究对象	8
2.2 电化学系统的装置原理	9
2.2.1 原电池和电解池是两类电化学装置	9
2.2.2 电解加工装置与一般电解池的异同点.....	12
2.3 法拉第定律和电流效率.....	14
2.3.1 法拉第定律.....	14
2.3.2 电流效率.....	17
2.4 电极和电极电位.....	17
2.4.1 电极.....	17
2.4.2 电极电位.....	18
2.4.3 电极的极化.....	26
2.4.4 电解加工的电极.....	31
2.5 电解加工电解液.....	31
2.5.1 电解加工电解液应具备的性质.....	31
2.5.2 非线性电解液的提出.....	32
2.5.3 实用电解液配方.....	37
第 3 章 深孔和膛线电解加工及计算机控制	40
3.1 深孔电解加工.....	40
3.1.1 固定式深孔电解加工.....	40

3.1.2	移动式深孔电解加工	42
3.1.3	深孔推式进给阴极的改进和适用场合	47
3.1.4	变截面深孔电解加工实例分析	49
3.2	膛线电解加工	54
3.2.1	膛线电解加工概述	54
3.2.2	固定式膛线电解加工	56
3.2.3	移动式膛线电解加工	57
3.3	深孔和膛线电解加工电解液及工艺参数	67
3.4	计算机在深孔膛线电解加工中的应用	69
3.4.1	身管混合膛线加工及阴极设计方案	70
3.4.2	计算机实时控制炮管内孔电解加工	74
3.4.3	膛线电解加工阴极运动轨迹的数控	77
3.4.4	膛线加工电参数与阴极运动轨迹的 同步控制	79
3.5	对电解加工过程进行模糊控制和模糊神经网络控制 方法的研究	86
3.5.1	概述	86
3.5.2	模糊控制技术用于减小电解加工型孔侧 壁锥度	87
3.5.3	深孔电解加工模糊神经网络控制方法的 探讨	92
第4章	异形深孔和键槽电解加工技术	99
4.1	大径比身管方孔电解加工的实例	99
4.1.1	加工对象两例	99
4.1.2	阴极成型面设计	100
4.1.3	实心拉杆及其移动时的密封装置	103
4.1.4	伸缩式冷却套	103
4.1.5	方孔电解加工工艺参数	105
4.2	H62 梅花形深孔电解加工实例分析	105
4.2.1	加工对象	105

4.2.2	阴极设计	106
4.2.3	梅花型深孔加工电解液的选择	110
4.2.4	工艺参数	111
4.2.5	阴极黑膜	112
4.3	花键、双键和四键电解加工	114
4.3.1	键槽的加工特点	114
4.3.2	三面进给式阴极的结构	115
4.3.3	三面进给式阴极的组成及其设计	118
4.4	深四键槽电解加工实例	124
4.4.1	加工对象	124
4.4.2	三面进给换流复合阴极	124
4.4.3	成型原理	127
4.4.4	推荐的工艺参数	128
4.5	薄壁异形花键电解加工实例	129
4.5.1	加工对象	129
4.5.2	阴极设计及加工工艺	129
4.6	电解加工零件的表面质量	130
4.6.1	表面疵病及其防止措施	131
4.6.2	电解加工零件表面粗糙度的特点及其影响因素	134
4.6.3	电解加工零件表层力学性能	137
4.6.4	部分电解加工键槽和深异形孔样件	138
第5章	磁场复合电解加工	141
5.1	课题的提出及磁场的工业应用和研究现状	141
5.2	磁场基本知识	144
5.3	复合电解加工的磁源	152
5.4	采用电流励磁的方法进行磁场复合电解加工	154
5.4.1	叠加垂直于阴极进给方向的磁场	154
5.4.2	叠加平行于阴极进给方向的磁场	155
5.5	采用永磁体作磁源进行磁场复合电解加工	157

5.5.1	永磁体磁场的工作点	157
5.5.2	减小电解加工杂散腐蚀的磁场复合电 加工	158
5.5.3	改善电解加工间隙流场的磁场复合电 加工	166
5.6	磁场复合电解加工机理	169
5.6.1	模拟实验	169
5.6.2	磁场对传质过程的影响	172
5.6.3	磁场对电子转移步骤的影响	176
5.6.4	磁场抑制电解加工杂散腐蚀机理探讨	177
第 6 章	电解加工的研究方法	181
6.1	引言	181
6.2	电解加工机理研究的核心问题	182
6.2.1	电极/溶液界面	182
6.2.2	电解加工的间隙	185
6.2.3	电解加工间隙不能均匀分布的电极过程 因素	186
6.2.4	电解加工电极表面电流密度的分布	187
6.3	阴极结构设计方案的电化理论解释	188
6.3.1	阴极结构设计方案的举例	188
6.3.2	阴极流场设计小结	190
6.3.3	加强电解液更新的内涵	192
6.4	改变间隙电场分布的工艺措施	196
6.5	电解加工的测试和实验方法	197
6.5.1	关于电流效率特性测试中的细节	198
6.5.2	对阳极膜的测量	202
6.5.3	在亚微米级微细电化学加工中电化学测 试的应用	205
6.5.4	脉冲电解加工移植微电极扫描技术进行测 试的方案	206

6.6 深孔电解加工在线测试系统的研究	208
6.6.1 深孔电解加工测控方法的发展概况	208
6.6.2 切片投影法和深孔内窥镜	208
6.6.3 在线检测方案	209
6.6.4 电涡流传感器用于电解加工的在线检测 试验研制情况	211
参考文献	216

第 1 章 绪论

1.1 电解加工的原理、特点和分类

电解加工(electrochemical machining, ECM)作为机械加工的补充手段走过了半个世纪。电解加工对难加工材料可以以柔克刚,对形状复杂的零件可以一次成型,并以表面质量好、生产率高、无工具损耗、无切削应力等独到的优点,成为先进制造技术中一支不可缺少的方面军,在制造业中发挥着重要作用。随着航空、航天、兵器、汽车、电子、模具以及新能源技术需求的增加,随着电子、计算机技术及相关学科的发展,电解加工的加工质量逐步提高、技术内涵逐步丰富、应用范围逐步扩大。

1. 电解加工原理

将电化学(electrochemistry)原理成功应用于制造业的技术有电镀(electroplate)、电铸(electroform)、电化学抛光(electrochemical polishing)和电解加工。电镀和电铸利用电化学阴极过程获得镀层和制品,电化学抛光利用阳极溶解过程改善零件的表面粗糙度和光泽度,电解加工也是利用金属在电解液中的电化学阳极溶解的原理,目的是获得具有一定尺寸精度的零件。西方各国称之为“电化学加工”(ECM),俄罗斯称之为“电化学尺寸加工”(ЭХРО),我国最早开展电解加工时称电解加工为“电液加工”,顾名思义,这是一种在高压、高流速条件下进行的电化学过程。电解加工区别于一般电化学过程的关键就在于电解液的高速流动,加工时,工件接电源的正极,工具接电源的负极,按照一般电化学过程,在电解液不流动或流速很小时,电流也很小,只有当极间