

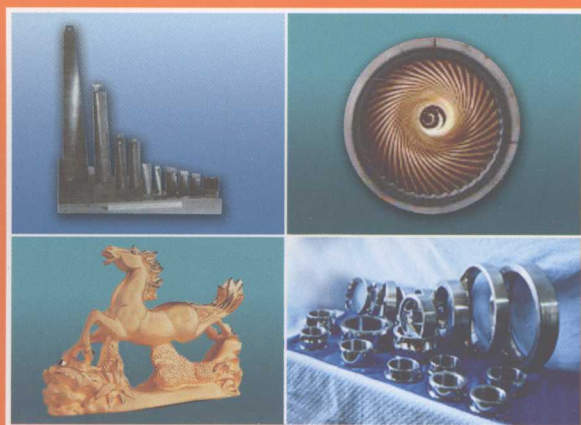
Electrochemical Machining Technique

电化学加工技术

原理·工艺及应用

ELECTROCHEMICAL MACHINING TECHNIQUE

徐家文 云乃彰 王建业
田继安 徐文骥 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

电化学加工技术 ——原理·工艺及应用

徐家文 云乃彰 王建业 等编著
田继安 徐文骥

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是在《电解加工原理及应用》和《中国材料工程大典》第4篇的基础上以及增加了一些新内容而编写成的。其内容包括:电解加工的理论基础、工艺基础,电解加工设备,电解加工应用,电解加工新技术,复合电解加工,电铸成形和电刷镀加工,并展望了电化学加工技术的发展趋势。

参加本书编写的人员来自全国各地高校、研究所、工厂共15个单位,他们都是电化学加工技术领域第一线从事研究和应用并有所造诣的科技工作者,以他们对某个专业领域的深刻理解和丰富的实践经验完成了相应章节的编写工作。

本书可供从事电化学加工科研和应用领域的工程技术人员阅读,也可供相应专业的大学教师及大学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电化学加工技术:原理、工艺及应用 / 徐家文等编著.

北京:国防工业出版社,2008.6

ISBN 978-7-118-05604-4

I. 电... II. 徐... III. 电解加工 IV. TG662

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第022707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)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 22¼ 字数 537 千字

2008年6月第1版第1次印刷 印数 1—4000 册 定价 46.00 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

序

我欣喜地为《电化学加工技术——原理、工艺及应用》一书作序。之所以欣喜,一是因为这本书涵盖了电化学加工技术领域,包括电解加工、电解磨削、电解研磨、电铸、电刷镀以及其他电化学复合加工,全书内容丰富,介绍产品工程化成果颇多;二是因为参加本书的编著人员是“产、学、研、用”四结合,来自全国高校、研究所、工厂电化学加工技术领域从事研究和应用的专家、学者,其中不乏年轻博士。以上既说明我国电化学加工技术的日益发展,事业后继有人,而且也显示了本书编写的权威性和代表性,显示了我国电化学加工技术研究和应用的主要领域和所达到的水平。

本书的编著人员都是电化学加工技术领域一线的科技工作者,既有深厚的基础理论功底,又有丰富的工程实践经验,有的还有着较长时间在国外学习、合作研究的经历,因此本书吸收了大量国内外新的研究和应用成果,注意在理论与实践的结合上阐述问题;论述加工原理既抓住本质又深入浅出,归纳工艺规律条理清晰、主次分明,介绍的应用实例成熟、典型。细读本书,不是让读者去寻找具体答案,而是给读者以参考借鉴,开阔眼界,启迪思维。

本书的另一个重要特点是作者力求从创新发展的角度编写材料。从科学技术自身的发展规律(综合集成)、社会需求(市场驱动)、与自然界和谐(生态化)三大视角来观察制造工程的发展历程,值得注意的是近几年来制造业正以综合—专业分化—再综合的螺旋循环方式发展,这也是科学技术发展的规律之一。而创新是科学技术发展的推动力,一本好书不应该只限于对过去成就的总结,还应该展示未来的发展。本书在内容选取、结构安排、写作思路上都注意突出技术创新、综合集成、社会需求这一主线,既有专门章节介绍新技术,在各章也都安排了发展方向的综合描述,对产品一些具体结构、具体应用、材料的选用注意了技术的前瞻、先进、合理、实用。

电化学加工技术首先在航空、航天、兵器等军工产品制造中得到重要应用,在解决难加工材料、复杂形状、特殊要求的加工中发挥了积极而独特的作用;然后又逐渐扩大应用于一般机械制造行业;而由于电化学加工是以离子或离子团形态进行电化学阳极溶解或电化学阴极沉积,它在微细精密制造甚至纳米制造中又显示了诱人的发展和应用空间;电化学加工在现代制造技术中,发挥着不可替代的作用,占有重要地位。我相信,本书的出

前 言

《电解加工原理及应用》(王建业、徐家文编著,国防工业出版社,2001年1月)已经出版七年了,据网上一般查询,在这七年间,在中文期刊上发表的有关电解加工的论文342篇,其中把《电解加工原理及应用》一书作为参考资料的有126篇,占36.8%,这说明该书已经得到同行科技人员的认可,已经在电解加工的研究和应用中发挥积极作用。为飨读者,国防工业出版社和作者都有修订再版的愿望,但考虑到七年来不仅电解加工,而且其他电化学加工都得到迅速的发展,如果在原书专论电解加工的基础上,再增加电铸、电解磨削、电解研磨及其他电化学复合加工的内容,编写一部电化学加工技术的专著岂不更好。正如2002年8月在昆明讨论《中国材料工程大典》特种加工卷的编写问题时,原电加工学会第四届理事长、哈尔滨工业大学刘晋春教授就建议,特种加工卷第4篇的篇名不用“电解加工技术”、而以“电化学加工技术”为宜;当时刘教授特别指出,由于国内还没有一部涵盖电化学加工领域的专著出版,从发展看,将来以这篇为基础,再经过适当的修订增减,可以作为一部专著出版。时间又过去五年了,在国防工业出版社的帮助下,这个愿望得以实现。今天,我们共17位参加过编著《电解加工原理及应用》及《中国材料工程大典》第24卷第4篇“材料电化学加工技术”(化学工业出版社,2006年1月)的人员,以《电解加工原理及应用》及《中国材料工程大典》第24卷第4篇为基础,着手完成了本书《电化学加工技术——原理、工艺及应用》的编写。全书不仅在结构、章节安排上作了些调整,文稿、图表也进行了修订,还增加了一些新的、发展的内容。

参加本书编写的人员都是在电化学加工技术领域第一线从事研究和应用并有所造诣的科技工作者,以他们对某个专业领域的深刻理解及丰富的实践经验,完成了相关章节的编写。其中绪论、第1章、第5章、第8章主要由徐家文教授编写和统稿,第2章、第7章主要由云乃彰教授编写和统稿,第3章主要由王建业教授编写和统稿,第4章主要由田继安研究员编写和统稿,第6章主要由徐文骥教授编写和统稿,最后全书由徐家文教授统稿,云乃彰教授也协助完成了大量审校和文稿、图表的整理工作。参与编写并提供初稿的人员还有:范植坚教授(1.1节),康敏博士、教授(1.2节),钱密博士、副教授(1.3节),朱永伟博士、副教授(1.4节、5.6节),陈远龙博士、副教授(2.2节、4.2节),张永俊博士、教授(2.3节),程小元高工(3.7节),王天诚研究员(4.5节),侯中一研究员(4.7节),干为民博士、教授(5.5节),任仲根教授(6.4节),曲宁松副教授(第7章小部分)。此外,刘晋春教授、第七届特种加工分会主任委员王至尧研究员、合肥工业大学朱树敏教授、第七届特

种加工分会干事长徐均良高工等教授、专家对本书的编写提出了许多有益的建议和支持，在此深表谢意。

参与本书的编写人员来自全国各地高校、研究所、工厂共 15 个单位，由于日常工作繁忙，再加上作者专业、写作以及认识水平的局限，书中难免存在错误和不足，恳切希望得到读者的批评指正；但作为这么多人的劳动成果，如果这本书能够对从事电化学加工技术研究和应用的人员有所启迪，有所帮助，能够对促进我国制造科学技术的发展起点作用，我们也就感到欣慰了。

作者

2008 年 1 月于南京

目 录

主要符号	1
绪论	3
第1章 电解加工基本原理	6
1.1 电解加工过程的电化学特性	6
1.1.1 电解和电解加工	6
1.1.2 法拉第定律和电流效率	7
1.1.3 电极电位和电极反应的顺序	13
1.1.4 外电场作用下电极的极化	17
1.1.5 加工间隙的形成及其对电解加工成形的决定作用	20
1.2 电解加工间隙中的电场特性	20
1.2.1 电场的物理描述	21
1.2.2 电解加工间隙中的电场分布	23
1.2.3 基于电场分布的电解加工成形规律研究	24
1.3 电解加工间隙中的流场	28
1.3.1 电解加工间隙中的流动特性——气液两相流动	28
1.3.2 基于流场分析的电解加工成形规律	30
1.4 电解加工间隙及电解加工成形规律的综合分析	34
1.4.1 加工过程的基本微分方程及应用	34
1.4.2 理想电解加工过程和成形规律	38
1.4.3 非理想电解加工过程及其成形规律	40
第2章 电解加工工艺基础	43
2.1 电解加工工艺及工艺参数	43
2.1.1 电解加工工艺特点	43
2.1.2 电解加工工艺参数及其对工艺指标的影响	47
2.1.3 工艺参数的选择	49
2.2 电解液	50
2.2.1 电解液的作用、要求及分类	50
2.2.2 电解液选择原则及常用电解液	52
2.2.3 混气电解加工及混气电解液	57
2.3 电解加工的流场设计	60
2.3.1 电解液流动形式	60
2.3.2 电解液流速和入口压力	63

2.3.3	流场均匀性设计	67
2.3.4	混气电解加工气液混合器及其设计	71
2.3.5	电解加工流场设计实例	73
2.4	电解加工精度	80
2.4.1	电解加工精度及加工误差	81
2.4.2	影响电解加工精度的基本规律	82
2.4.3	提高加工精度的工艺途径	89
2.5	电解加工表面质量	91
2.5.1	电解加工表面质量的特点	91
2.5.2	电解加工表面粗糙度及其影响因素	91
2.5.3	电解加工可能产生的表面缺陷及相应防止措施	93
2.5.4	电解加工表面质量对工件疲劳强度的影响	95
第3章	电解加工设备	97
3.1	电解加工设备的总体论述	97
3.1.1	电解加工设备的组成和功能	97
3.1.2	电解加工设备的分类和选型	98
3.1.3	电解加工设备的总体设计原则	99
3.2	电解加工机床	103
3.2.1	机床的构成及特点	103
3.2.2	电解加工机床总体方案的制定	104
3.2.3	机床主要部件的典型方案	107
3.2.4	两类常用电解加工机床简介	117
3.3	电解液系统	124
3.3.1	电解液系统的功能及其特点	124
3.3.2	两种典型的电解液系统	125
3.3.3	电解液系统各部件的选用原则	127
3.4	电解加工电源及短路保护系统	130
3.4.1	电解加工电源的基本要求	131
3.4.2	电解加工电源的基本类型	131
3.4.3	快速短路保护的特点	142
3.4.4	两种有代表性的直流电源短路保护系统	144
3.5	电解加工自动控制系统	147
3.5.1	控制系统的组成、功能及控制模式	147
3.5.2	电解加工设备控制系统的典型方案及典型元件	148
3.6	电解加工工艺装备	154
3.6.1	工艺装备的功能及特殊要求	154
3.6.2	特殊材料的选用及结构设计中的特殊问题	154
3.6.3	几种夹具结构的实例	157
3.7	国内新型数控电解加工设备	159

3.7.1	新型数控电解加工设备的系统组成及高性能要求	159
3.7.2	DJW 型卧式深孔膛线数控电解加工设备	161
3.7.3	DJW 型 1.5 万 A 卧式单头数控电解加工设备	165
3.7.4	DJL 型立式数控电解加工设备	166
3.7.5	DJS 型卧式双头叶片电解加工设备	168
第 4 章	电解加工的应用	174
4.1	概述	174
4.1.1	电解加工应用概况	174
4.1.2	选用电解加工工艺的基本原则	174
4.2	模具型面加工	175
4.2.1	模具型面电解加工特点及应用范围	175
4.2.2	模具型面电解加工工艺	177
4.2.3	典型应用实例	180
4.3	叶片型面加工	182
4.3.1	叶片电解加工的应用特点、分类和范围	182
4.3.2	叶片电解加工工艺	185
4.3.3	电解加工叶片的典型实例	189
4.4	深小孔、型孔电解加工	191
4.4.1	深小孔电解加工	191
4.4.2	型孔电解加工	197
4.5	枪、炮管膛线电解加工	200
4.5.1	膛线电解加工的特点和分类	200
4.5.2	膛线电解加工工艺	202
4.5.3	膛线电解加工新技术的应用实例	205
4.6	整体叶轮加工	208
4.6.1	等截面叶片整体叶轮电解套形加工	208
4.6.2	变截面扭曲叶片整体叶轮加工	209
4.6.3	应用实例	212
4.7	电化学去毛刺	213
4.7.1	概述	213
4.7.2	电化学去毛刺的工艺特点	213
4.7.3	电化学去毛刺的设备	216
4.7.4	电化学去毛刺应用实例	217
4.7.5	电化学去毛刺的新发展	217
第 5 章	电解加工新技术	220
5.1	脉冲电流电解加工	220
5.1.1	脉冲电流电解加工的基本特征	220
5.1.2	低频、宽脉冲电流电解加工	223
5.1.3	高频、窄脉冲电流电解加工	226

5.2	数控展成电解加工	238
5.2.1	数控展成电解加工系统组成	239
5.2.2	旋转阴极展成电解加工	240
5.2.3	“单直线刀”喷射式阴极展成电解加工	243
5.2.4	整体叶轮的数控展成电解加工	247
5.2.5	闭式整体构件异形型腔数控电解加工	251
5.3	小间隙电解加工	256
5.3.1	小间隙电解加工的工艺特点	256
5.3.2	设备保障条件	263
5.3.3	典型应用	263
5.4	小孔电液束加工	265
5.4.1	电液束加工工艺要点	265
5.4.2	电液束加工的应用	268
5.5	电解擦削	269
5.5.1	电解擦削装置简介	270
5.5.2	电解擦削工艺要点	272
5.5.3	脉冲电流电解擦削	274
5.5.4	应用实例	275
5.6	微细电解加工	278
5.6.1	微细电解加工的基础条件	279
5.6.2	微细电解加工方法	280
5.6.3	复合微细电解加工研究方向	282
第6章	复合电解加工	284
6.1	电解磨削	284
6.1.1	电解磨削加工原理	284
6.1.2	电解磨削工艺和设备	285
6.1.3	电解磨削典型应用	290
6.2	电解磨料光整加工	290
6.2.1	电解磨料光整加工机理与特点	290
6.2.2	工艺参数对光整加工质量的影响及参数选择	292
6.2.3	典型应用与发展	296
6.3	超声—电解复合加工	298
6.3.1	超声—电解复合加工原理及工艺特点	298
6.3.2	研究现状和应用前景	302
6.4	电解—电火花复合加工	303
6.4.1	电解—电火花复合加工原理及工艺特点	303
6.4.2	电解—电火花复合加工的研究、应用和发展	305
第7章	电铸成形和电刷镀加工	311
7.1	电铸成形加工原理	311

7.1.1	电铸加工原理	311
7.1.2	电铸金属沉积质量的理论计算和电铸成形速度	312
7.1.3	电场、流场设计	314
7.2	电铸工艺	317
7.2.1	电铸工艺条件和工艺参数及其对电铸速度、质量的影响	317
7.2.2	提高电铸速度、改进电铸质量的措施	319
7.3	电铸的应用和发展	322
7.3.1	电铸工艺的典型应用	322
7.3.2	电铸技术的发展趋势	328
7.4	电刷镀加工	331
7.4.1	加工原理	331
7.4.2	电刷镀工艺要点	331
7.4.3	电刷镀的典型应用	334
第8章	电化学加工技术的发展趋势	337
8.1	基于电化学加工原理和复合加工原理而不断创新、发展新加工技术	337
8.1.1	高频、窄脉冲电流电解加工	337
8.1.2	高速、高压、小间隙电解加工	338
8.1.3	数控电解加工	338
8.1.4	复合电化学加工	338
8.2	计算机控制技术将得到更高水平的应用	339
8.2.1	电化学加工过程(参数)的自动控制	339
8.2.2	CAD/CAM 技术、数字化制造技术的应用	339
8.2.3	提高加工设备的计算机控制水平	340
8.3	微细电化学加工技术探索	340
8.4	绿色电化学加工	341
参考文献		342

主要符号

英文字 母

A	相对原子质量
b	宽度
C	电解液浓度;离子浓度;电容
c	比热容
D	脉冲占空比
D_h	水力直径
E	电极电位;极间电位差
E	电场强度
E'	平衡电极电位
E^0	标准电极电位
e	电子
F	法拉第常数;滑枕承载力
f	脉冲频率
G	单位电量所产生氢气体积
g	重力加速度
H	高度;水头;工作台面开度;蚀除深度
h	余量
I	电流
i	电流密度
i_0	切断电流密度;间隙进口处电流密度
k	质量电化当量
L	间隙通道长度;电感;孔深;滑枕行程
l	长度
M	体积摩尔克分子浓度
m	质量摩尔克分子浓度
N	当量浓度
n	原子价;转速
P	压力
P_1	电解液压力
p_g	气体压力

Q	电量;总体积流量
Q_1	液相体积流量
Q_g	气相体积流量
R	电阻
r	半径
S	面积
T	温度;脉冲周期
t	时间
t_p	脉冲宽度
t_o	脉间宽度
U	加工电压
U_R	欧姆压降
u	流速
u_1	电解液流速
u_g	气体流速
V	体积去除量
V'	体积去除率
v	阴极进给速度
v_a	金属阳极溶解速度
v_1	沿阴极进给方向金属去除速度
v_n	沿加工面法向金属去除速度
W	质量去除量
W'	质量去除率
Z	气液混合比

希腊字母

α	温度系数;离子活度
α_D	流量系数
β	气泡率
γ	相对比密度
Δ	加工间隙

Δ_b	底面平衡间隙
Δ_n	法向间隙
Δ_0	截止加工间隙;初始间隙
δ	误差;气泡层厚度
δE_0	分解电压
δE	阴、阳极电极电位值总和 ($\delta E = E_a + E_c $)
ΔE	过电位(也称超电压)
η	电流效率
κ	电导率
λ	当量电导;阻力系数
μ	流体动力黏度
ρ	密度;电阻率
σ	速度滑移比;表面残余应力
ν	流体运动黏度系数
ω	体积电化当量

ϕ	电场电位
ξ	电导率温度系数
τ	黏性剪切力
θ	阴极进给方向与工件表面法向的夹角

下 标

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

绪 论

电化学加工(Electrochemical Machining, ECM)是指基于电化学作用原理而去除材料(电化学阳极溶解)或增加材料(电化学阴极沉积)的加工技术。为叙述问题方便,将某些基于电化学和其他物理、化学复合作用原理的复合电化学加工方法也归为电化学加工技术进行介绍。按其加工原理和主要加工作用的不同,主要电化学加工方法列于表1。

表1 主要电化学加工方法

序号	加工方法	加工原理	主要加工作用
1	电解加工	电化学阳极溶解	从工件(阳极)去除材料
2	电铸成形	电化学阴极沉积	向芯模(阴极)沉积而增材成形
3	电刷镀	电化学阴极沉积	向工件(阴极)表面沉积材料
4	电解磨削	电解与机械磨削的复合作用	从工件(阳极)去除材料或表面光整加工
5	电化学—机械复合研磨	电解与机械研磨的复合作用	对工件(阳极)表面进行光整加工
6	超声电解	电解与超声加工的复合作用	改善电解加工过程以提高加工精度和表面质量,对小间隙加工复合作用更突出
7	电解—电火花复合加工	电解液中电解去除与放电蚀除的复合作用	力求综合达到高效率、高精度的加工目标

早在1833年,英国科学家法拉第(Faraday)就提出了有关电化学反应过程中金属阳极溶解(或析出气体)及阴极沉积(或析出气体)物质质量与所通过电量的关系,即创建了法拉第定律,奠定了电化学学科和相关工程技术的理论基础。但是,直到百年之后,即20世纪30年代,才开始出现电解抛光,以及后来的电镀。随着科学技术的发展,首先是航空发动机、枪炮等关键零件制造的需要,在20世纪50年代、60年代,相继发明了能够满足零件几何尺寸、几何形状和精度加工需要的电解、电解磨削、电铸成形等工艺技术。从此,作为一门先进制造技术,电化学加工技术得到不断的发展、应用和创新。

电解加工(Electrochemical Machining, ECM),是对作为阳极的金属工件在电解液中进行阳极溶解而去除材料,实现工件加工成形的工艺过程。电解加工系统包括机床、直流电源(或脉冲电源)、输液系统及控制系统共4部分。工件(阳极)接直流电源的正极,工具(阴极)接电源的负极,两极之间施加直流电压(一般8V~24V),控制工具阴极型面与工件阳极被加工面之间保持小间隙(通常0.1mm~1mm),连续向加工间隙输送电解液并高速(5m/s~30m/s)从间隙中流过。保持上述条件,则两极之间有大电流通过(一般电流密度10A/cm²~100A/cm²,对某些特殊的加工则高达几百安每平方厘米),这时工件对应表面(被加工面)被阳极溶解(电解),且电解产物和电解液的焦耳热由高速流动的电解液带走,随着工具向工件的进给运动(进给速度0.2mm/min~2.0mm/min),则逐渐将工件电解成形。

由电解加工原理,即电化学阳极溶解的特点所决定,电解加工具有以下工艺特点。

(1) 加工范围广。可以加工各种难切削金属材料,包括淬火钢、不锈钢、高温耐热合金、硬质合金,不受材料强度、硬度和韧性的限制;可以加工各种复杂的型腔、型面、深小孔,既可以采用成型阴极、单向送进运动复制式成形加工,也可采用简单阴极或近成型阴极、进行数控展成型面加工。

(2) 加工效率高。加工效率随加工电流密度和总加工面积的增大而增大,一般能达到数百立方毫米每分,甚至高达 $10\,000\text{mm}^3/\text{min}$,约为通常电火花成形加工的(5~10)倍,对于难切削金属材料、复杂的型腔、型面、深小孔加工,比一般机械切削加工效率高出(5~10)倍。

(3) 加工表面质量好。由于材料去除是以离子状态电化学溶解,属冷态加工过程,因此加工表面不会产生冷作硬化层、热再铸层以及由此而产生的残余应力和微裂纹等表面缺陷。当电解液成分和工艺参数选择得当,加工表面粗糙度可以达到 $R_a = (0.8 \sim 1.25)\mu\text{m}$,而人们普遍担心的晶间腐蚀深度在合适的工艺条件下不超过 0.01mm ,甚至不会产生。

(4) 工具无损耗。作为阴极的工具,在电解加工过程中,始终与作为阳极的工件保持一定的间隙,不会产生溶解(阴极一边只有氢气析出);如果加工过程正常,即与阳极不发生火花、短路烧蚀,工具阴极不会产生任何损耗;其几何形状、尺寸保持不变,可以长期使用。这是电解加工能够在批量生产条件下保证成形加工精度、降低加工成本的基本原因之一。

(5) 不存在机械切削力。电解过程不会产生机械切削力,因此也不会产生由此而引起的残余应力和变形,不会产生如机械切削加工所产生的飞边毛刺。由于不存在机械切削力,故电解加工特别适用于薄壁零件、小刚性零件的加工。

由于电解加工的上述优点,使得它首先在枪炮、航空、航天等制造业中得到成功的应用,以后又逐渐推广应用到汽车、拖拉机、采矿机械的模具制造中,成为机械制造业中具有特殊作用的工艺方法。

但是,电解加工也存在下列缺点和不足,从而又影响了其发展和应用。对此,在选用电解加工时应特别注意考虑。

(1) 加工精度还不够高。一般电解加工还难以达到高精度:三维型腔、型面的加工精度为 $(0.2 \sim 0.5)\text{mm}$,孔类加工精度为 $(\pm 0.02 \sim \pm 0.05)\text{mm}$,没有电火花成形加工精度高,尤其是加工过程不如电火花加工稳定。这是因为影响电解加工精度的因素多且复杂,理论上定量掌握其影响规律并进行控制还比较困难,往往需要经过大量工艺试验研究才能解决。

(2) 设备一次投资大。由于设备组成复杂,除一般机床设备的要求外,还要解决电解液输送、防泄漏、抗腐蚀、导电、绝缘等一系列问题,材料特殊,制造工作量大,造价高。国产的从十余万元一台(小型)到几十万元一台(大型)不等,而进口一台设备则需人民币几百万元(中型)到千余万元(大型、高自动化程度)。

(3) 处理不当,对周围环境可能产生污染。在某些条件下,电解加工过程会产生少量有害工人健康的气体,如 Cl_2 气;对某些加工材料,在某些特定条件下,也可能产生对人体有害的亚硝酸根离子 NO_2^{-} 、6价铬离子 Cr^{6+} 。对此,基本要求必须控制排放方式和排放量;而高标准则需要采取措施变有害为无害,例如将 Cr^{6+} 降为低价无害的铬离子,如 Cr^{3+} ;同时将电解产物进行回收处理,变废为利。电解加工从开始产生至今天的稳定应用,已经有40余年的历史,对于电解废物处理、防止污染环境已经有成熟技术和规程可循,但无论如何,对此问题必须引起重视和采取措施解决。先进的电解液系统,包括净化、回收、处理装置,成本约占全套电解设备成本的1/3。如果说在20世纪80年代至90年代由于电解液的处理问题而影响了电解加工的

应用;而从 20 世纪末、21 世纪初的近 10 余年来,由于电解产物的回收和防污染问题的解决,包括美国、英国等发达工业国家,电解加工技术的创新发展和扩大应用又进一步得到了重视。

综上所述,电解加工对难切削材料、复杂形状零件的批量生产无疑是一项高效率、高表面质量、低成本的工艺技术。如果加工对象选择得当,技术经济分析合理,发挥电解加工的长处,克服其缺陷和不足,就能够获得良好的技术经济效益。至今,电解加工已经成功地应用于航空发动机叶片型面、机匣凸台、凹槽、炮管膛线、深小孔、花键槽、模具型面、型腔、去毛刺等加工领域。为满足现代科学技术发展的需要,提高加工精度,稳定加工过程,探索、开发其在整体构件加工领域、微细加工领域的应用前景,是电解加工研究、发展和应用的重要方向,科研人员、工程师正在为此进行不懈努力。

电铸成形(Electroforming, EF)是电化学加工技术中的一项精密、增材制造技术。其原理与电解加工过程、即电化学阳极溶解过程相反,是电铸液中的金属正离子在电场力的作用下沉积到阴极表面的过程,简称之为电化学阴极沉积过程,即在作为阴极的原模(芯模)上,不断还原、沉积金属正离子而逐渐成形电铸件。当达到预定厚度时,设法将电铸成形件与原模分离,就得到与原模相复制的成形零件。

基于上述加工原理,电铸成形加工具有如下工艺特点:

(1) 能准确、精密复制复杂型面和细微纹路。几何精度高(μm 级),表面粗糙度低(R_a 为 $0.1\mu\text{m}$),采用同一原模成形的电铸件重复精度高,特别适用于批量精密成形加工。

(2) 基于电铸复制成形的原理,可以像翻拍、印制照片那样,利用石膏、石蜡、环氧树脂、甚至橡皮泥等作为原模材料,将难以电铸成形的零件复杂内表面复制为外表面,然后在此外表面上电铸复制与零件复杂内表面完全一致的电铸成形件。

(3) 控制电流密度等电铸工艺参数,或采用高频脉冲电流等工艺措施,可以得到晶粒微细、甚至纳米晶粒的电铸层,可以获得优异的电铸层特性。

电铸成形已经在精密微细加工中得到大量应用:如复制非常精密的图形、花纹;以样件、标准件为原模,电铸成形能复制样件、标准件的模具;采用“翻拍、印制方法”,制造形状复杂且精度高的空心零件和薄壁零件等。但是,电铸成形加工的速度很低,一般电铸金属层的厚度只能达到 $(0.02 \sim 0.5)\text{mm/h}$,精密、高速电铸工艺还在不断研究中。另外,总的电铸层厚度也不能太大,一般为 $(0.05 \sim 5)\text{mm}$ 。因此,电铸成形加工还只是在精密、微细加工领域应用较多。

作为电化学加工技术的拓展,复合电化学加工已经越来越引起人们的重视。如基于电解与机械磨削复合加工作用的电解磨削加工,基于电解和机械研磨复合作用的电解研磨复合抛光,在光整加工领域发挥了独特作用;还有超声—电解复合加工、电解—电火花复合加工,不同的加工作用相互补充,扬长避短,以求在加工精度和加工效率方面探索最佳效果,研究工作还在进行中。

电化学加工技术,作为特种加工技术的重要组成部分,已经并还将继续得到发展和扩大应用。