

电化学加工技术

曹凤国 主编



 北京科学技术出版社

电化学加工技术

曹凤国 主编

 北京科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

电化学加工技术/曹凤国主编.-北京:北京科学技术出版社,2007.10
ISBN 978-7-5304-3535-9

I.电… II.曹… III.电解加工 IV.TG662

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第054786号

电化学加工技术

主 编:曹凤国

责任编辑:李可亮

封面设计:樊润琴

出 版 人:张敬德

出版发行:北京科学技术出版社

社 址:北京西直门南大街16号

邮政编码:100035

电话传真:0086-10-66161951(总编室)

0086-10-66113227(发行部) 0086-10-66161952(发行部传真)

电子信箱:postmaster@bkjpress.com

网 址:www.bkjpress.com

经 销:新华书店

印 刷:三河市国新印装有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:419千

印 张:16.5

版 次:2007年10月第1版

印 次:2007年10月第1次印刷

ISBN 978-7-5304-3535-9/T·573

定 价:33.00元



京科版图书,版权所有,侵权必究。

京科版图书,印装差错,负责退换。

《电化学加工技术》编委会

主 编 曹凤国

副主编 蒋亨顺 张勤俭

编 委 曹凤国 蒋亨顺 张勤俭 叶书强

卢学军 胡绛梅

前 言

随着科学技术的不断发展,各种高熔点、高硬度、高强度、高韧性的材料不断涌现,具有各种复杂结构和特殊工艺要求的工件也越来越多,采用传统的机械加工方法有时是难于加工或无法加工的。电化学加工是解决这些问题的一种很好的途径。

电化学加工技术中最重要的一种工艺方法是电解加工技术,它问世于 20 世纪 50 年代中期,目前已广泛用于难加工材料及形状复杂的型腔、型面的加工,在宇航、航空和汽车、拖拉机、造船等工业中发挥了重要的作用。

电镀加工技术和电铸加工技术也是主要的电化学加工技术。电镀技术诞生于 1800 年,它是最有效的表面处理技术之一,在国民经济中发挥了突出的作用。电铸技术于 1838 年问世,是一种具有极高复制精度、适用范围广、制品性能可控的制造方法。

为了及时总结近年来电化学加工技术的最新研究和应用成果,促进其更快速的发展,我们特编写《电化学加工技术》一书,该书系统阐述了电化学加工技术的基本理论和方法。本书在编写时,主要考虑了新颖性、启发性和应用性,力求做到详略得当。本书可作为高等工科院校机械工程专业教材使用,也可供从事电化学加工的科研、生产人员及高、中级技术人员参考。

全书共设五篇 11 章,主要内容有电化学加工技术的基本理论,电解加工和电解磨削,电镀和电铸加工,电化学表面处理和电化学抛光,电化学复合加工等内容。

本书由曹凤国任主编,负责全书的构思、组稿和审稿,蒋亨顺、张勤俭任副主编。参加编写的有蒋亨顺(绪论、第 1~4 章、第 8 章、第 10 章和第 11 章)、叶书强(第 5~7 章)和卢学军(第 9 章)。在本书成稿过程中,胡绛梅做了大量组织工作。

本书编写时参阅了有关院校、科研院所和生产单位的书籍和文献资料,得到了专家同行的支持和帮助,在此一并表示感谢。

编者

2007年6月

目 录

绪 论

0.1 电化学加工技术的主要内容	1
0.2 电化学加工技术的发展现状和趋势	2
0.2.1 电解加工技术的发展现状和趋势	2
0.2.2 电镀加工技术的发展现状和趋势	6
0.2.3 电铸加工技术的发展现状和趋势	8

第一篇 电化学加工技术的理论基础

第 1 章 电解质溶液

1.1 导体	12
1.2 电解质溶液的导电机理	12
1.2.1 化学能与电能的转化	12
1.2.2 电解质溶液的导电机理	14
1.3 法拉第电解定律	14
1.4 电导	15
1.5 离子的迁移	16
1.5.1 离子的迁移数	16
1.5.2 电解池中通过的电量与离子迁移数的关系	18

第 2 章 可逆电极过程

2.1 原电池的电动势	21
2.1.1 内电位与外电位	22
2.1.2 典型原电池	23
2.1.3 电极电势	24
2.1.4 液接电势	25

2.2 电极电位·····	26
2.2.1 电极的可逆性·····	26
2.2.2 可逆电极的电位·····	26

第3章 不可逆电极过程

3.1 双电层的结构·····	29
3.2 电极的极化·····	30
3.2.1 浓差极化·····	30
3.2.2 电化极化·····	30
3.3 分解电压与残余电流·····	31
3.4 金属的腐蚀与防护·····	32
3.4.1 金属的电化学腐蚀·····	32
3.4.2 金属的电化学防护·····	33
3.5 金属的钝化·····	34

第二篇 电化学去除加工

第4章 电解加工

4.1 电解加工的基本原理和特点·····	35
4.1.1 电解加工的基本原理·····	35
4.1.2 电解加工的特点·····	36
4.2 电解加工时的电极反应过程·····	37
4.2.1 电解液为 NaCl 水溶液时的电极反应·····	37
4.2.2 电解液为 NaClO ₃ 水溶液时的电极反应·····	38
4.3 电解加工的基本工艺规律·····	39
4.3.1 生产率及其影响因素·····	39
4.3.2 电解加工的精度和表面质量·····	41
4.4 提高电解加工精度的主要途径·····	42
4.5 混气电解加工·····	43
4.5.1 原理及其特点·····	43
4.5.2 气液混合比·····	44
4.5.3 混气电解加工实例·····	44
4.6 脉冲电解加工技术·····	45
4.7 电解加工设备·····	45
4.7.1 电解加工机床的基本构成与类型·····	45
4.7.2 机床主体·····	47

4.7.3	直流稳压电源·····	47
4.7.4	电解液系统·····	48
4.7.5	电解加工设备的维护与保养·····	49
4.8	电解加工用工具阴极设计·····	50
4.8.1	阴极的流场设计·····	50
4.8.2	阴极的尺寸设计·····	60
4.8.3	常用阴极材料、绝缘与导电等问题·····	64
4.9	电解液·····	67
4.9.1	电解加工对电解液的基本要求·····	67
4.9.2	电解液的类别与性能·····	67
4.9.3	电解液的选择原则·····	73
4.10	电解加工的应用·····	74
4.10.1	电解穿孔套切加工·····	74
4.10.2	型面和型腔加工·····	74
4.10.3	内花键、炮管膛线等内型面加工·····	75
4.10.4	电解去毛刺、倒圆角·····	77
4.10.5	电解刻蚀·····	79
4.10.6	电解车削·····	80
4.10.7	电解铣削·····	81
4.10.8	电解切割·····	81
4.10.9	管件内腔电解扩孔·····	83
4.10.10	电解取折断工具·····	83
4.10.11	在线电解修整磨削技术·····	85

第5章 电解磨削加工

5.1	电解磨削的基本原理和特点·····	88
5.1.1	基本原理及特点·····	88
5.1.2	电化学反应过程·····	89
5.1.3	电流效率的计算及其实际意义·····	90
5.2	影响电解磨削生产率和加工质量的因素·····	91
5.2.1	提高电解磨削加工效率的主要方法·····	91
5.2.2	影响电解磨削加工精度的主要因素·····	92
5.2.3	影响加工表面粗糙度的主要因素·····	94
5.3	电解磨削中电解液的选择及非加工表面保护·····	96
5.3.1	电解液的选择·····	96
5.3.2	电解液的过滤·····	99
5.3.3	非加工面的保护·····	100
5.4	导电磨轮的制作与应用·····	103
5.4.1	烧结式磨轮的主要结构特点与应用·····	103

5.4.2 其他种类磨轮的结构特点与应用	109
5.5 电解磨削设备及加工工艺	111
5.5.1 电解磨削设备组成及设备改造应遵循的原则	111
5.5.2 几种电解磨削的加工方式及加工工艺	112

第三篇 电化学沉积加工

第6章 电镀加工

6.1 电镀加工简介	121
6.1.1 电镀加工的基本概念	121
6.1.2 电镀层的分类	121
6.2 电镀基本原理及影响镀层组织的因素	123
6.2.1 金属的电沉积过程	123
6.2.2 金属离子从水溶液中阴极还原的可能性	125
6.2.3 电镀层在阴极表面的分布	127
6.2.4 影响镀层组织的因素	130
6.3 金属零件电镀前表面处理	136
6.3.1 金属零件电镀前表面处理的重要性	136
6.3.2 粗糙表面的机械处理	137
6.3.3 除油	137
6.3.4 浸蚀	138
6.3.5 金属制件电镀前表面处理的一些新工艺	139
6.3.6 电镀前表面处理的工艺流程	140
6.4 金属零件的电镀技术	140
6.4.1 概述	140
6.4.2 单金属电镀	141
6.4.3 贵重金属电镀	152
6.4.4 合金电镀	153
6.4.5 非晶态合金电镀	156
6.4.6 复合电镀与超硬材料电镀技术	157
6.4.7 脉冲电镀	162
6.4.8 熔盐电镀	162
6.4.9 电刷镀	163
6.4.10 摩擦电喷镀	166
6.5 非金属材料电镀	167
6.5.1 概述	167
6.5.2 非金属材料电镀前的表面处理	168

6.5.3	ABS 塑料电镀	169
6.5.4	石膏与木材的电镀	170
6.5.5	玻璃与陶瓷的电镀	171
6.6	电镀连接技术	173
6.6.1	钎合金的电镀连接	174
6.6.2	铍的电镀连接技术	174
6.7	其他镀膜技术	175
6.7.1	化学镀	175
6.7.2	化学气相沉积	175
6.7.3	真空镀膜	176
6.7.4	热喷镀	178

第 7 章 电铸加工

7.1	电铸加工的原理和特点	179
7.1.1	电铸加工的基本原理	179
7.1.2	电铸加工的特点	179
7.2	电铸设备及电铸工艺	180
7.2.1	电铸设备简介	180
7.2.2	电铸工艺流程	180
7.3	电铸制品的应用	181
7.4	电铸原模的设计与制作	181
7.4.1	电铸原模材料选择及设计原则	181
7.4.2	电铸原模的预处理	182
7.5	电铸金属与合金	184
7.5.1	对电铸溶液的基本要求	184
7.5.2	电铸镍	184
7.5.3	电铸铜	185
7.5.4	电铸铁	186
7.5.5	电铸镍钴合金	186
7.5.6	电铸后处理	187
7.6	电铸应用实例	188
7.6.1	精密微细喷嘴电铸	188
7.6.2	微孔电铸	188
7.6.3	链轮成型模电极电铸	188
7.6.4	薄壁圆筒的电铸	189
7.7	提高铸层质量的途径	189
7.7.1	射流电铸快速成型技术	189
7.7.2	脉冲电铸	192

第四篇 电化学表面加工

第 8 章 电化学表面处理

8.1 铝与铝合金表面处理	194
8.1.1 阳极氧化表面处理工艺流程	194
8.1.2 阳极氧化处理	195
8.1.3 铝制品的着色工艺	196
8.1.4 着色处理的工艺要点	197
8.2 铜及其合金的电化学着色	198
8.3 不锈钢的电化学着色	198
8.4 特殊的阳极氧化、着色工艺	199
8.4.1 宝石膜生成法	199
8.4.2 周期换向电流氧化	200
8.4.3 铝及铝合金阳极着云彩色工艺	201

第 9 章 电化学抛光

9.1 电化学抛光的基本原理	203
9.2 电化学抛光的基本规律	205
9.2.1 电解液成分	205
9.2.2 电流密度	205
9.2.3 电解液的温度	205
9.2.4 电化学抛光的持续时间	207
9.2.5 电化学抛光的工作条件	207
9.3 电化学抛光后表面的性能	208
9.3.1 机械性能	208
9.3.2 光学性能	209
9.3.3 耐蚀性	209
9.3.4 磁性	209
9.4 电化学抛光的工艺流程	209
9.4.1 电化学抛光的基本工艺流程	210
9.4.2 电化学抛光前零件的预处理	212
9.4.3 电化学抛光	213
9.4.4 电化学抛光后零件的加工	213
9.4.5 电化学抛光注意事项	213
9.5 电化学抛光设备	214

9.5.1 电源系统	214
9.5.2 电解液槽	215
9.5.3 阴极设计	216
9.5.4 夹具	218
9.6 电化学抛光在工业中的应用	218
9.6.1 零件的光整加工	219
9.6.2 精密零件的精加工	219
9.6.3 切削工具的电化学抛光	219
9.6.4 计量工具的电化学抛光	220
9.6.5 显现金属表面的缺陷	220
9.6.6 毛坯和半成品的电化学抛光	220
9.6.7 金相磨片的制备	221
9.7 电化学抛光中新技术、新工艺举例	221
9.7.1 深孔高效整平电解加工	221
9.7.2 脉冲电化学光整加工	225

第五篇 电化学复合加工

第 10 章 电化学机械复合加工

10.1 电化学机械复合加工的特点	228
10.2 电化学机械复合加工的方式	229
10.2.1 电解珩磨	229
10.2.2 电解研磨	229
10.2.3 电解机械复合抛光	230
10.2.4 电解砂带磨削	232

第 11 章 其他电化学复合加工

11.1 电解电火花复合加工	236
11.1.1 电源及电解液对加工精度的影响	236
11.1.2 工艺参数对加工精度的影响	237
11.2 电解超声复合加工	238
11.2.1 电解超声复合加工的基本原理和特点	238
11.2.2 电解超声复合抛光	238
11.3 振动电镀	240
11.3.1 振动电镀的基本特征	240
11.3.2 振动电镀的优点	240

11.4 超声化学镀·····	241
11.5 激光电化学加工·····	242
11.5.1 激光电镀·····	242
11.5.2 激光化学镀·····	243
11.5.3 激光电化学刻蚀·····	243
11.6 激光辅助电解液流加工·····	244
11.7 脉冲电流往复电解加工·····	244
11.8 电化学磁力复合加工·····	245
参考文献·····	247

绪 论

0.1 电化学加工技术的主要内容

电化学是物理化学的重要组成部分，它不仅与无机化学、有机化学、分析化学等学科有关，还渗透到环境科学、能源科学、生物学和金属工业、加工制造业等诸多领域。

电化学加工是电化学理论在制造领域的工业应用，已成为制造业不可缺少的实用技术。

电化学加工是通过电化学反应对工件材料进行去除或光整加工，或在其上镀覆金属、合金或复合材料，或利用金属离子阴极电沉积原理制取产品的特种加工。

电化学加工的主要内容分为下面几个部分：

①电解加工和电化学机械加工。电解加工是利用金属在电解液中产生阳极溶解的原理去除工件材料的特种加工。其主要应用有穿孔套切加工，型面和型腔加工，内花键、炮管膛线等内型面加工，电解去毛刺、倒圆角，电解刻蚀，电解车削、电解铣削、电解切割、电解扩孔、电解取折断工具等。

电化学机械加工是电化学腐蚀与磨料的机械刮削作用相结合的一种加工技术。主要包括电解磨削、电解珩磨、电解研磨等。其中电解磨削技术的应用最广泛，可以实现工件外圆、内圆、平面的加工，刀具刃口的加工。

②电镀加工和电铸加工。电镀加工是用电化学方法在固体表面上沉积一薄层金属、合金或复合材料的过程。包括金属零件的电镀、贵重金属的电镀、合金电镀、化学镀、复合电镀和非金属材料电镀等。

电铸加工是利用金属离子阴极电沉积原理，在导电原模（芯模）上沉积金属、合金或复合材料，并将其与原模分离以制取制品的过程。利用该技术可以制备镍、铜、铁等金属，块体纳米晶材料和复合材料。

③电化学抛光。电化学抛光是利用电化学原理去除切削加工表面残留的微观不平度，以降低零件表面粗糙度、提高亮度的一种方法。它可以实现零件的光整加工，精密零件的精加工，切削工具、计量工具的电化学抛光，金属表面缺陷的显现，毛坯和半成品的电化学抛光，金相磨片的制备等。

④电化学复合加工。根据电化学加工表面平整度高、加工效率高的特点，人们在生产实践中将其与其他加工工艺结合起来，针对生产中碰到的困难，开发出一系列的电化学复合加工技术，如电化学机械加工、电解电火花复合加工、电解砂带磨削加工、电解超声复合加工、振动电镀、超声化学镀、激光电化学加工、激光辅助电解液流加工、脉冲电流往复电解加工和电化学磁粒光整加工等。

0.2 电化学加工技术的发展现状和趋势

电解加工、电镀加工和电铸加工是电化学加工技术的主要工艺方法，因此这里以这三种加工技术为主阐述电化学加工技术的现状和发展趋势。

0.2.1 电解加工技术的发展现状和趋势

金属在一定的条件下会产生阳极溶解，这是电解加工的根本依据。阳极溶解的基本定律是法拉第在 1833 年发现的，这一定律直到 20 世纪 50 年代前，只用于电镀、电铸、电冶和电抛光，未能成为加工方法。在 1929 年左右，曾有人设想将金属阳极溶解原理用于零件的加工，但因当时这种设想本身不完善和缺乏大容量直流电流，以及机械加工技术还能满足工程材料和零件的设计要求，所以未能实现。直到 20 世纪 50 年代中期，以阳极溶解为加工原理的电解加工方法才应用于生产。

我国在该项加工技术的研究上起步较早。1957 年左右，我国开始进行电解加工炮管膛线的研究，很快便用于生产。此外，电解加工技术在深孔的扩孔及长键槽的加工中也取得了显著成效。

进入 20 世纪 60 年代以后，我国在电解加工技术的研究和应用上均有长足的进步。20 世纪 60 年代初期，电解加工用于航空发动机叶片型面及锻模型腔制造的技术得到了迅速发展和应用，并于 1968 年开始进行混气电解加工的研究，在气液混合腔的设计、气液混合比的确定、工艺参数的优化等方面均取得了突破性的进展。该方法一方面能提高加工的复制精度和整平能力，另一方面能提高加工的生产率、稳定性和加工精度，如混气电解加工被用于汽车、拖拉机等大型连杆模具的加工，从而使电解加工真正稳定地应用于模具生产。20 世纪 60 年代末，电解加工已成为航空发动机叶片生产的定型工艺，广泛应用于涡轮叶片、钛合金叶片、大型叶片的生产。到了 20 世纪 70 年代，电解加工已扩展到了民用工业，如汽轮机和内燃机叶片的电解加工。与此同时，在航空工业中，电解加工对小型整体叶轮的加工也取得了突破，随后进一步扩大到对汽轮机大型整体叶轮的加工、航空发动机上变截面扭转叶型整体叶轮的加工和钛合金整体叶轮的加工等。

这一期间，电解加工技术在国外的发展也很迅速。20 世纪 60 年代中期，电解去除毛刺技术已广泛应用于汽车制造业。20 世纪 70 年代以后，电解加工技术在军工产品特别是航空发动机的加工中得到了进一步的发展。如英国的罗尔斯 - 罗伊斯 (Rolls - Royce) 航空发动机公司对高温涡轮的深小孔采用电解加工而获得理想的效果；美国的 P & W 航空发动机公司则成功地将电解加工技术应用于 F100 涡轮发动机钛合金部件的加工。同期，法国、美国、意大利、日本等国纷纷将电解加工技术运用于模具制造领域。电解加工技术在德国的发展也很快，电解机床被广泛应用于蒸汽涡轮、凸轮、汽车、液压、工具等加工中。与此同时，前苏联在应用技术及机理方面也开展了大量的试验研究。

20 世纪 80 年代以后，电解加工发展较为迟缓，应用范围未能进一步扩大，主要原因是其加工精度不够高。20 世纪 90 年代以后，随着对电解加工认识的不断深入以及相关学科的发展，电解加工技术有了新的进展，在微精化、柔性化方面呈现新的发展趋势，其应用范围也得到了拓宽。在微精加工领域，脉冲电解加工的发展已见成效。荷兰飞利浦制造技术中心应用脉冲电源产生极窄的加工脉冲并配以其他措施进行电解加工，精度已达到了微米级水平。计算机控制技术在电解加工领域中的成功应用，为电解加工在自动化、柔性化方面的发

展拓宽了道路。数控仿形电解加工之后,又推出了数控展成电解加工。波兰华沙工业大学则将此技术成功地用于直升机旋翼座架型面的加工。此外,与其他加工方法结合而成的电解复合加工也成为研究热点,出现了电解电火花加工、电解超声复合加工、电解砂带复合加工等多种复合加工方法。

0.2.1.1 基于电解加工基本原理的新工艺、新技术的发展和应用

(1) 高频、窄脉冲电流电解加工

脉冲电流电解加工采用脉冲电源代替传统的直流电源,可以工作在比传统直流更高的电流密度和更小的加工间隙下,显著改善了加工的复制精度。脉冲电流电解加工提供了更多的可调参数,为过程控制提供了便利。

20世纪90年代国外开始对高频、窄脉冲电流电解加工进行基础实验研究,国内华南理工大学与北京航空工艺研究所合作也对此进行了研究。脉冲电源斩波器的工作电频率达 $100 \sim 1000\text{kHz}$,脉冲宽度为 $0.001 \sim 1\mu\text{s}$ 。试验研究表明,高频、窄脉冲电流的采用,在电解加工间隙中将产生特殊的物理、化学特性,使得高频、窄脉冲电流电解加工比一般直流电解加工及低频脉冲电流电解加工,在复制精度、重复精度、表面质量、加工效率和加工过程稳定性等方面都有显著提高,展示了其在微精加工领域的应用前景。

(2) 电解微细加工

电解加工技术已被成功地应用在电子工业中微小零件的电化学蚀刻加工中。与传统化学蚀刻相比,电化学方法更容易控制和维护,对环境的影响也小得多。

采用微动进给和金属微管电极,可在 0.2mm 厚的镍板上加工出直径 0.17mm 的小孔。电解加工也用在微细轴类零件的光整加工中。采用类似微细线电极电火花磨削的方式,用一运动的金属丝作为阴极,在阳极轴和阴极丝之间喷电解液,可使轴表面产生电化学微腐蚀。据报道,这种方法在直径数十微米小轴的抛光中已取得了非常好的工艺效果。这一技术的要点是蚀除量要采取有效措施加以严格控制。

德国科学家研究以纳秒计的超短脉冲电解加工新技术,成功地在纳米尺度上去除金属材料、加工微型机械,加工精度可以达到几百纳米。又如电动剃须刀静片(材料为不锈钢)厚度仅为 $30\mu\text{m}$,需加工其内外型面及其上的几十个微孔、窄槽,加工厚度误差小于 $2\mu\text{m}$,而且加工的微孔、窄槽既要保证尖边又要保证无毛刺。如何高质量、高效率、高合格率、低成本达到上述加工要求,是世界上电动剃须刀生产厂家都在力求解决的加工难题。荷兰飞利浦公司充分应用脉冲电流电解加工的特点,创建了计算机控制的全自动电解加工剃须刀静片的生产线,达到高质量、高效率加工的目的。这是电解加工在微精加工领域应用的典型实例,说明电解加工技术在微精加工领域具有广阔的应用前景。

0.2.1.2 计算机控制技术在电解加工中的应用

(1) 电解加工过程(参数)的控制

电解加工是一项综合电化学、流体力学、电磁学、机械学和自动控制等多学科交叉的加工工艺技术。其加工过程受到多因素、多参数的影响。采用计算机控制技术对电解加工过程的工艺参数进行模糊逻辑控制,建立电解加工工艺数据库优选工艺参数,或者最简单地对各主要参数进行单因素稳定控制,对于提高加工精度和改善表面质量都有积极作用,将继续在电解加工中得到发展和应用,其中模糊逻辑控制将可能成为主要研究方向。

(2) 阴极设计中 CAD/CAM 技术的应用

对一项电解加工应用来说,首先需要解决的是工具设计问题。早期对阴极设计的研究主