



特种加工成形手册 [上]

王至尧 主编

TEZHONG
JIA GONG
CHENGXING
SHOU CE



化学工业出版社

《特种加工成形手册》是材料特种加工专业工具书。内容包括电火花成形加工技术、数控电火花线切割技术、电化学加工技术、高能束流加工技术、快速原型与快速制造、电加工机床质量控制与检测等。本书在取材上以“基础、通用、先进、应用工程化”为原则，从特种加工成形的科学基础、加工工艺与设备、生产质量管理与检测以及国内外最新技术应用等方面作了全方位论述，全面、系统地反映了我国特种加工成形的成就与经验，介绍了国内外特种加工的先进技术和研究动向。

本书主要供从事特种加工成形科技人员查阅使用，也可供研究人员、管理人员和高等院校师生参考。

特种加工成形手册

王至尧 主编

化学工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

特种加工成形手册. 上/王至尧主编. —北京: 化学工业出版社, 2009.6
ISBN 978-7-122-05317-6

I. 特… II. 王… III. 特种加工-成型-技术手册
IV. TG76-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 057691 号

责任编辑: 段志兵 周国庆
责任校对: 陶燕华

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京蓝海印刷有限公司

装订: 三河市前程装订厂

880mm×1230mm 1/16 印张 37 字数 1703 千字 2009 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 120.00 元

版权所有 违者必究

前 言

特种加工成形是制造业材料成形的主要组成部分，是航天、航空、电子、兵器、船舶、汽车、电力、钢铁、石化、装备等支柱产业零部件加工的主要手段之一，涵盖了现代制造业中去除成形加工、受迫成形加工、离散/堆积成形加工、生长成形、极端制造等加工方法。

中国目前已成为特种加工成形大国。进入 21 世纪，中国的特种加工成形迎来了持续发展的大好局面，同时也面临着国外制造强国高品位、高精度、高自动化、高智能化等严峻挑战。只有向世界先进水平看齐，提高整体集成技术和创新水平，中国的特种加工才能在世界市场激烈的竞争中保持和发扬优势，这也是我国特种加工成形工作者面临的紧迫和艰巨的任务。本书在此形势和任务需求条件下应运而生。

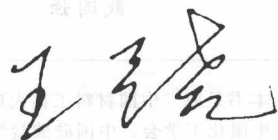
本书是中国机械工程学会特种加工分会首次组织编写的，是我国迄今篇幅最大、涵盖内容最新、最全的特种加工专业工具书。本书内容包括概论、电火花成形加工技术、数控电火花线切割技术、电化学加工技术、高能束流加工技术、快速原型与快速制造、电加工机床质量控制与检测等 7 篇约 400 万字。参加本书编写的有全国著名制造企业、研究所和大学等各方面专家、教授共 50 余名。参加编写的主要单位有北京控制工程研究所、清华大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学、北京航空制造工程研究所、苏州电加工机床研究所、北京市电加工研究所、苏州三光科技集团、上海同济大学、大连理工大学、西北工业大学、江苏镇江大学、首都航天机械公司等。由王至尧负责统稿。编写工作历时 4 年完成。各篇主编如下。

第 1 篇 概论	齐从谦教授
第 2 篇 材料电火花成形加工技术	刘晋春教授 白基成教授 郭永丰教授
第 3 篇 材料数控电火花线切割技术	李明辉教授
第 4 篇 材料电化学加工技术	徐家文教授
第 5 篇 材料高能束流加工技术	王亚军教授
第 6 篇 快速原型与快速制造	颜永年教授
第 7 篇 电加工机床质量控制与检测	连克仁教授

本书全面、系统地反映了我国特种加工成形的成就与经验，介绍了国内外特种加工的先进技术和研究动向，具有较强的“科学性、先进性和实用性”。在编写过程中强调以“全而精、新而准、实用便查”为特点，在整体设计上既立足全局，又突出重点。从特种加工成形的科学基础、加工工艺与设备、生产质量管理与检测，以及国内外最新技术应用等方面作了全方位论述；在取材上以“基础、通用、先进、实用”应用工程化为原则。其中第 6 篇快速原型与快速制造的部分章节，美国卡布雷教授 (Dr. J. Keverian) 参与了编写，并提供相关资料，在此表示感谢。

本书主要供从事特种加工成形科技人员查阅使用，也可供研究人员、管理人员和高等院校师生参考。

由于编写时间紧迫和编者水平有限，不当之处在所难免，恳请读者指正。



编辑委员会^①

顾问：师昌绪 严东生 李恒德 何光远 陆燕荪 徐匡迪 李学勇 栾恩杰

王淀佐 朱道本 颜鸣皋 黄培云 周廉 左铁镛

主任：路甬祥

副主任：李成功（常务） 钟群鹏 干勇 黄伯云 江东亮 徐滨士 王占国

潘健生 杜善义 胡正寰 柳百成 徐祖耀 陈立泉

总策划：宋天虎 黄远东

总编辑：李骏带

秘书长：黄远东（兼）

委员（按姓氏笔画排列）：

丁辛	丁传贤	干勇	于月光	才鸿年	马世宁	马冲先	马济民	马眷荣
马福康	王占国	王务同	王尔德	王永岩	王亚军	王至尧	王克光	王克俭
王高潮	王淀佐	王琦安	王新林	王德志	方禹之	尹志民	邓炬	左铁钊
左铁镛	石力开	石春山	卢世刚	叶小玲	叶光斗	田志凌	田荣璋	史耀武
冯涤	冯稷	冯春祥	宁远涛	邢建东	师昌绪	吕炎	吕反修	同继锋
曲文生	朱万森	朱如瑾	朱绍华	朱道本	仲维卓	任家烈	华林	刘明
刘正才	刘世参	刘占阳	刘邦津	刘作信	刘其贤	刘郁丽	刘治国	刘建章
刘晋春	刘清友	刘献明	齐从谦	闫洪	江东亮	许祖泽	许祖彦	阳明书
孙坚	孙加林	杜善义	杨合	杨武	杨乃宾	杨才福	杨鸣波	杨忠民
杨晓华	杨海波	杨焕文	杨德仁	李强	李晋	李楠	李长久	李龙土
李成功	李光福	李志刚	李明哲	李明辉	李学勇	李虹霞	李恒德	李贺军
李海军	李骏带	李鹤林	严东生	连克仁	肖亚庆	吴行	吴昆	吴诚
吴永声	吴伟仁	吴性良	吴科如	吴恩熙	吴谊群	吴智华	吴德馨	何光远
何季麟	佟晓辉	邱勇	邱冠周	邱德仁	余金中	邹广田	汪明朴	沈真
沈万慈	沈德忠	宋天虎	张力	张扬	张华	张杰	张金	张崢
张子龙	张用宾	张立同	张永俐	张吉龙	张旭初	张佐光	张晋远	张康侯
张道中	张新民	陆燕荪	陈琦	陈文哲	陈世朴	陈立泉	陈运远	陈志良
陈国钧	陈治明	陈南宁	陈祝年	陈晓慈	陈涌海	陈祥宝	陈超志	林慧国
欧阳世翥	卓尚军	易建宏	罗祥林	罗豪甦	果世驹	周廉	周伟斌	周国庆
郑有焯	柳玉起	柳百成	胡玉亭	胡正寰	南策文	赵万生	赵有文	赵国群
赵金榜	赵梓森	赵慕岳	钟群鹏	施东成	施剑林	姜不居	姜晓霞	祖荣祥
姚燕	贺守华	耿林	聂大钧	贾成厂	顾冬红	夏巨湛	夏志华	俸培宗
徐匡迪	徐廷献	徐建军	徐祖耀	徐家文	徐跃明	徐滨士	殷树言	翁宇庆
郭会光	郭景杰	高瑞萍	栾恩杰	唐仁政	唐汝钧	唐志玉	唐昌世	益小苏
涂善东	黄勇	黄天佑	黄玉东	黄本立	黄远东	黄伯云	黄校先	黄培云
曹勇家	曹湘洪	龚七一	崔健	康喜范	梁齐	梁军	梁志杰	屠海令
隋同波	韩凤麟	彭艳萍	葛子干	董瀚	董汉山	董首山	董祖珏	董湘怀
蒋力培	蒋建平	傅绍云	储君浩	谢邦互	谢里阳	谢建新	鄢国强	雷天民
路甬祥	解应龙	解思深	雍歧龙	蔡义	漆玄	谭抚	熊守美	靳常青
樊东黎	黎文献	颜永年	颜鸣皋	潘正安	潘叶金	潘振甦	潘健生	燕瑛
戴国强								

① 本书是原《中国材料工程大典》其中的一卷。《中国材料工程大典》由中国机械工程学会、中国材料研究学会组织编写，中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会及中国复合材料学会参加组织编写。本编辑委员会即为《中国材料工程大典》编委会。

目 录

第1篇 概论	1
第1章 材料特种加工及其在现代制造业中的作用	3
1.1 特种加工的定义和特点	3
1.1.1 特种加工的定义	3
1.1.2 特种加工的特点	3
1.2 特种加工的产生和发展	4
2.1 特种加工的产生	4
2.2 增材加工——特种加工的新进展	4
2.3 特种加工的分类及工艺性能比较	5
3.1 特种加工的分类	5
3.2 特种加工工艺性能比较	7
第2章 材料特种加工成形工程的特点与要求	8
2.1 特种加工对结构工艺性等的影响	8
2.2 现代制造业的发展对特种加工的新要求	8
2.1 模具加工指标的微细化对特种加工的新要求	8
2.2 微电子机械系统对特种加工的新要求	9
2.3 航空航天工业对特种加工的新要求	10
2.4 纳米技术对特种加工的新要求	10
第3章 材料成形特种加工技术在工程中的应用	11
3.1 特种加工在现代制造业中的作用	11
1.1 特种加工在现代模具制造工业中的作用	11
1.2 特种加工技术在航天发动机制造中的应用	11
3.2 快速原型与制造技术在材料成形工程中的应用	12
2.1 新产品开发过程中的设计验证与功能验证	12
2.2 基于快速原型的快速制造工艺	12
3.3 RP技术在航天工业中的应用	16
3.4 橡皮垫板成形技术及其在工程中的应用	17
4.1 橡皮垫板成形技术的起源与发展	17
4.2 橡皮垫板成形装备技术和应用	17
3.5 热等静压/粉末冶金(HIP/PM)技术	18
5.1 热等静压/粉末冶金技术的起源和发展	18
5.2 热等静压/粉末冶金技术的应用	18
第4章 材料特种加工成形工程的技术发展动态和趋势	19
4.1 特种加工技术的发展动态	19
1.1 总的发展态势	19
1.2 特种加工技术发展状况	19
4.2 材料特种加工成形工程展望	23
2.1 特种加工技术向微细化方向发展	23
2.2 特种加工技术向高精度方向发展	23
2.3 特种加工技术向信息化方向发展	24
2.4 特种加工技术向智能化方向发展	25
2.5 特种加工技术向集成化方向发展	27
参考文献	28
第2篇 材料电火花成形加工技术	29
第1章 概述	31
1.1 电火花加工的特点	31
1.2 电火花加工的工艺类型及适用范围	31
1.3 电火花加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响	32
第2章 电火花加工的基本原理和机理	33
2.1 电火花加工常用术语和符号	33

2 电火花加工的基本原理	35
3 电火花加工的机理	36
第3章 电火花加工中的基本规律	39
3.1 影响放电蚀除量的主要因素	39
1.1 极性效应的影响	39
1.2 电参数对电蚀量的影响	39
1.3 金属材料热学物理常数对电蚀量的影响	40
1.4 工作液对电蚀量的影响	40
1.5 影响电蚀量的一些其他因素	41
3.2 电火花加工的加工速度和工具电极的损耗速度	41
2.1 加工速度	41
2.2 工具电极相对损耗速度和相对损耗比	41
3.3 影响电火花加工精度的主要因素	42
3.4 电火花加工的表面质量	43
4.1 表面粗糙度	43
4.2 表面变质层	43
4.3 表面机械性能	44
第4章 电火花加工工艺参数及其曲线图表	46
4.1 电火花加工的工艺参数	46
4.2 材料、脉宽、峰值电流与表面粗糙度的关系	54
4.3 材料、脉宽、峰值电流与单边放电间隙的关系	54
4.4 材料、脉宽、峰值电流与蚀除速度的关系	54
4.5 材料、脉宽、峰值电流与电极损耗率的关系	55
4.6 正确选择电火花加工工艺参数规准的方法	55
第5章 电火花成形加工机床	56
5.1 电火花成形加工机床主机及配件	56
1.1 电火花成形加工机床主机	57
1.2 电火花成形加工机床用附件	71
5.2 电火花加工用的工作液过滤系统	76
2.1 工作液过滤系统的主要组成部分和作用	77
2.2 工作液过滤系统设计和使用时的事项	77
2.3 对过滤器结构的要求和选择	78
2.4 工作液的作用和选择	79
5.3 电火花加工用的脉冲电源	81
3.1 概述	81
3.2 脉冲电源的脉冲波形及分类	82
3.3 RC线路脉冲电源	83
3.4 可控硅(又称晶闸管)式脉冲电源	83
3.5 晶体管式脉冲电源	84
3.6 精密数控电火花成形机床的脉冲电源	86
3.7 智能化脉冲电源及脉冲电源的发展趋势	87
5.4 电火花加工用的伺服进给系统	88
4.1 概述	88
4.2 伺服进给系统的放电间隙检测环节	90
4.3 步进电动机伺服进给系统	91
4.4 直流伺服电动机自动伺服进给调节系统	92
4.5 交流伺服电动机伺服进给调节系统	93
4.6 直线电动机自动进给调节系统	94
第6章 电火花穿孔加工工艺	96
6.1 电火花简单穿孔、套料加工	96
1.1 打去断入工件中的钻头、丝锥	96
1.2 电火花套料加工	96
1.3 电火花加工拉丝模	97
1.4 电火花加工特殊型孔零件	98

2 冲模电火花加工的要点	99	2 电火花磨削加工	156
2.1 冲模电火花加工的基本工艺方法	99	2.1 薄壁低刚度工件(蜂窝结构)的电火花磨削	157
2.2 简单方孔冲模的电火花加工	102	2.2 成形表面的电火花磨削	158
2.3 电机转子冲孔落料模加工	103	2.3 窄槽类零件电火花加工工艺	159
2.4 钟表齿轮精密冷模加工	103	2.4 薄肋类零件电火花加工工艺	160
3 小孔、小深孔、异形小孔、多孔、微孔等电火花加工	104	2.5 深小通孔的电火花磨削	161
3.1 小孔电火花加工	104	2.6 轧辊电火花毛化	162
3.2 小深孔的电火花加工	105	2.7 低刚度细长锥杆电火花磨削	162
3.3 异形小孔的电火花加工	107	3 双轴共轭回转式和展成回转式电火花加工新技术	163
3.4 多孔的电火花加工	108	3.1 双轴共轭回转式电火花加工	163
3.5 微孔电火花加工	109	3.2 展成回转式电火花加工	168
4 超声波电火花复合加工小孔	109	3.3 回转式电火花加工的技术特点和适用面	171
4.1 复合加工装置组成及原理	109	3.4 实现精密级电火花加工的技术条件	172
4.2 超声电火花复合加工的主要规律	110	3.5 回转式电火花加工典型工艺实例分析	173
第7章 电火花成形加工工艺	112	3.6 回转式电火花加工典型机床	178
1 电火花成形加工工艺方法	112	4 特殊材料和非导电材料的电火花加工	179
1.1 单工具电极直接成形法	112	4.1 聚晶金刚石等超硬材料的电火花加工	180
1.2 单工具电极平动(摇动)加工法	113	4.2 非导电材料的电火花加工	181
1.3 手动侧壁修光法	114	5 电火花表面强化改性及沉积技术	184
1.4 分解工具电极法	114	5.1 气体中电火花表面强化(改性)	184
1.5 多工具电极更换法	115	5.2 气体中电火花刻字工艺及装置	185
2 单轴数控电火花成形加工工艺及加工实例	115	5.3 气体中放电沉积堆积造型	185
2.1 对开模(无毛边模具)加工实例	115	5.4 钛合金水中电火花放电着色	185
2.2 洗衣机调节螺母注塑模加工实例	116	5.5 油中电火花放电沉积表面改性处理	186
2.3 锥齿轮精锻模加工实例	116	6 气体介质中电火花加工	188
2.4 塑料叶轮注塑模加工实例	117	6.1 气体介质中电火花加工原理	189
2.5 高精度压胶型腔模加工实例	118	6.2 气体介质中电火花三维形状加工	189
2.6 用平动(摇动)功能加工内螺纹	120	6.3 气体介质中电火花加工特性	189
3 多轴数控电火花成形加工工艺及加工实例	120	6.4 气体介质中电火花加工特点	191
3.1 NCEDM(数控电火花加工)的多坐标系设定技术	121	7 微弧氧化表面处理技术	191
3.2 NCEDM 先进的自动定位技术和在机检测技术	121	7.1 微弧氧化后的表面陶瓷层的功能和作用	191
3.3 NCEDM 的多功能、多方式的摇动技术	125	7.2 微弧氧化表面处理技术的工艺特点	191
3.4 NCEDM 编程使用的基本指令介绍	129	7.3 微弧氧化工艺及设备的原理	191
3.5 NCEDM 的多种加工方式	129	7.4 微弧氧化过程的机理——电极间的反应	192
3.6 加工规准的选择、转换,摇动(平动)量的分配和电极尺寸的设计	132	7.5 微弧氧化技术在铝、镁、钛等合金中的应用前景	192
3.7 多轴数控电火花成形加工实例	137	第9章 电火花加工中的防火、技术保安及无害化	193
3.8 数控电火花成形加工机床的编程和选择规准举例	141	1 我国对电火花加工机床的安全和对环境影响的国家强制标准	193
4 电火花铣削加工技术	143	2 电火花加工中的技术保安及防火	194
4.1 电火花铣削加工技术的产生及特点	143	2.1 电火花加工中的技术安全规程	194
4.2 电火花铣削加工中的电极损耗补偿技术	144	2.2 正确执行电火花加工安全操作规程	194
4.3 基于分层制造的电极等损耗电火花铣削加工技术	145	2.3 做到岗位责任制和文明生产的各项要求	195
5 微细电火花加工技术	148	3 电火花加工的无害化及绿色制造	196
5.1 微细电火花加工的特点与实现条件	148	参考文献	197
5.2 微细电极的在线制作	149	第3篇 材料数控电火花线切割技术	199
5.3 电火花加工装置的微型化	150	第1章 概论	201
5.4 微细电火花加工的应用举例	151	1 电火花加工的分类	201
第8章 其他电火花加工技术	153	2 电火花线切割加工原理	201
1 混粉大面积镜面光整电火花加工	153	2.1 电火花线切割加工基本原理	201
1.1 大面积电火花镜面加工的探索 and 难点	153	2.2 电火花线切割加工物理过程	202
1.2 混粉电火花镜面加工的原理和机理	153	2.3 电极丝动态特性	203
1.3 混粉大面积电火花镜面加工试验研究	154	3 电火花线切割加工的特点及分类	207
1.4 新型混粉电火花镜面加工装置的研制	154	3.1 电火花线切割加工特点	207
1.5 混粉大面积电火花镜面光整加工实例	155	3.2 电火花线切割加工的应用范围	207

4 电火花线切割技术的研究现状及发展趋势	210	1.3 各工艺指标之间的关系	309
4.1 电火花线切割技术的研究现状	210	2 影响切割速度的主要因素	310
4.2 我国电火花线切割技术的近期进步	212	2.1 脉冲参数对切割速度的影响	311
4.3 我国电火花线切割技术的发展趋势及主要任务	213	2.2 非电参数对切割速度的影响	312
第2章 数控电火花线切割设备	215	3 影响加工精度的主要因素	316
1 概述	215	3.1 加工尺寸精度	316
1.1 基本组成	215	3.2 形位精度	318
1.2 型号规格及参数标准	215	4 影响加工表面质量的主要因素	319
1.3 机床精度标准及检验方法	216	4.1 影响加工表面粗糙度主要因素	319
1.4 使用规则及维护保养	222	4.2 影响切割条纹的主要因素	320
2 机床本体	223	4.3 影响加工表面组织变化层的主要因素	320
2.1 机床结构	223	5 影响电极丝损耗的主要因素	321
2.2 运丝系统	227	5.1 脉冲参数	321
2.3 锥度切割装置	232	5.2 脉冲波形	322
2.4 电火花线切割机的自动穿丝系统	233	5.3 电极丝材料及移动速度	322
2.5 进电方式	233	5.4 工作液	323
2.6 工作液及其循环系统	234	第5章 数控电火花线切割加工工艺及应用	324
3 脉冲电源	236	1 基本工艺路线及工艺分析	324
3.1 基本要求及组成	236	1.1 线切割加工基本工艺路线及应用场合	324
3.2 高速走丝脉冲电源电路分析	240	1.2 零件图纸工艺分析	324
3.3 低速走丝脉冲电源	242	1.3 影响正常加工的主要因素	325
3.4 适应控制电源	243	1.4 工序安排	326
4 数控装置与机床电气	244	1.5 编程的工艺性	327
4.1 数控功能要求、结构与分类	244	2 电火花线切割加工前的工艺准备	330
4.2 伺服进给	245	2.1 工件备料	330
4.3 机床电气	246	2.2 工件装夹	332
第3章 电火花线切割机控制系统及编程	248	2.3 数控电火花线切割机床的调整	336
1 插补原理	248	2.4 加工参数设置与调整	340
1.1 逐点比较法插补原理	248	3 电火花线切割加工多次切割工艺	343
1.2 双判别进给插补原理	251	3.1 电火花线切割加工的工艺类型	343
2 锥度加工原理	254	3.2 多次切割的必要性及其应具备的条件	345
2.1 控制基本原理	254	3.3 电极丝的空间形位变化	345
2.2 颠倒锥度加工	255	3.4 多次切割工艺及其效果	347
2.3 锥度加工插补方法	257	4 大厚度工件电火花线切割	348
3 上下异形加工原理	262	4.1 切缝中工作液的流动状态	348
3.1 直纹面构造的几何机理	262	4.2 实现大厚度工件稳定切割的途径	349
3.2 工件上下面轨迹线性化处理	263	4.3 大厚度工件线切割工艺	350
3.3 上下线架投影轨迹计算	265	4.4 大厚度工件切割实例	351
3.4 一种上下异形比例插补方法	266	5 电火花线切割加工工艺应用实例	351
3.5 四轴联动编程简要算法框图及计算实例	267	5.1 冲裁模加工	351
3.6 上下线架图形轨迹联动简介	269	5.2 一次同时加工出凸模与凹模	352
4 程序格式及编程方法	272	5.3 超行程工件的加工	353
4.1 程序格式	272	5.4 锥度零件的加工	354
4.2 基本编程方法	276	5.5 零件加工实例	356
5 单板与单片机控制器部分电路分析	281	第6章 现代制造技术在电火花线切割中的应用	358
6 基于PC机大线切割控制与接口技术	285	1 现代制造技术	358
6.1 PC机编程与控制	285	1.1 概述	358
6.2 串行通信	288	1.2 WEDM中的现代制造技术研究内容	359
6.3 PC机接口技术	290	2 电火花线切割的计算机仿真	364
7 自动编程	294	2.1 电火花线切割加工计算机仿真技术概述	364
7.1 语言式微机编程	294	2.2 电火花线切割加工神经网络模型	366
7.2 绘图式自动编程系统	296	2.3 高速走丝电火花线切割加工工艺效果仿真系统	368
7.3 切割编程	298	2.4 大厚度切割仿真系统	370
7.4 自动编程系统的其他功能	304	2.5 其他仿真方法在电火花线切割中的应用	372
第4章 电火花线切割加工的基本规律	307	3 电火花线切割加工CAD/CAM系统	372
1 电火花线切割加工的工艺指标及测试方法	307	3.1 概述	372
1.1 主要工艺指标	307	3.2 电火花线切割加工的CAD/CAM系统	373
1.2 常用的测试方法	307	4 电火花线切割智能加工系统	377

4.1	智能制造技术概述	377	2.1	机床的构成及特点	444
4.2	电火花线切割智能加工系统	377	2.2	电解加工机床总体方案的制定	445
4.3	电火花线切割智能加工系统主要模块	380	2.3	机床主要部件的典型方案	447
参考文献		388	2.4	两类常用电解加工机床简介	452
第4篇 材料电化学加工技术		389	3	电解液系统	457
第1章 电解加工基本原理		391	3.1	电解液系统的功能及其特点	457
1	电解加工过程的电化学基础	391	3.2	两种典型的电解液系统	457
1.1	电解和电解加工	391	3.3	电解液系统各部件的选用原则	457
1.2	电极电位、电极反应及电极反应的顺序	392	4	电解加工电源及短路保护系统	461
1.3	外电场作用下电极的极化及实际电解加工过程的电极反应	394	4.1	电解加工电源的基本要求	461
1.4	电解去除量的计算——法拉第定律和电流效率	397	4.2	电解加工电源的基本类型	461
1.5	加工间隙的形成及其对电解加工成形的决定作用	399	4.3	快速短路保护的特点	467
2	电解加工间隙中的电场特性	399	4.4	两种有代表性的直流电源短路保护系统	468
2.1	电场的物理描述	399	5	电解加工自动控制系统	470
2.2	电解加工间隙中的电场分布	400	5.1	控制系统的组成、功能及控制模式	470
2.3	基于电场分布的电解加工成形规律研究	401	5.2	电解加工设备控制系统的典型方案及典型元件	471
3	电解加工间隙中的流场	402	6	电解加工工艺装备	474
3.1	电解加工间隙中的流动特性——气液两相流动	402	6.1	工艺装备的功能及特殊要求	474
3.2	基于流场分析的电解加工成形规律	404	6.2	特殊材料的选用及结构设计中的特殊问题	474
4	电解加工间隙及电解加工成形规律的综合分析	405	6.3	几种夹具结构的实例	475
4.1	加工过程的基本微分方程及应用	405	第4章 电解加工的应用		477
4.2	理想电解加工过程和成形规律	408	1	概述	477
4.3	非理想电解加工过程及其成形规律	408	1.1	电解加工应用概况	477
第2章 电解加工工艺基础		411	1.2	选用电解加工工艺的基本原则	477
1	电解加工工艺及工艺参数	411	2	模具型面加工	477
1.1	电解加工工艺特点	411	2.1	模具型面电解加工特点及应用范围	477
1.2	电解加工工艺参数及其对加工的影响	413	2.2	模具型面电解加工工艺	477
1.3	工艺参数的选择	414	2.3	典型应用实例	480
2	电解液	415	3	叶片型面加工	482
2.1	电解液的作用、要求及分类	415	3.1	叶片电解加工的应用特点、分类和范围	482
2.2	电解液选择原则及常用电解液	415	3.2	叶片电解加工工艺	484
2.3	混气电解加工及混气电解液	419	3.3	电解加工叶片的典型实例	486
3	电解加工的流场设计	420	4	深小孔、型孔电解加工	488
3.1	电解液流动形式	420	4.1	深小孔电解加工	488
3.2	电解液流速和进口压力	422	4.2	型孔电解加工	491
3.3	流场均匀性设计	424	5	枪、炮管膛线电解加工	493
3.4	混气电解加工气液混合器及其设计	426	5.1	膛线电解加工的特点和分类	493
3.5	电解加工流场设计实例	428	5.2	膛线电解加工工艺	494
4	电解加工精度	432	5.3	膛线电解加工新技术的应用实例	496
4.1	电解加工精度及加工误差	432	6	整体叶轮加工	498
4.2	影响电解加工精度的基本规律	432	6.1	等截面叶片整体叶轮电解套型加工	498
4.3	提高加工精度的工艺途径	438	6.2	变截面扭曲叶片整体叶轮加工	498
5	电解加工表面质量	439	6.3	应用实例	500
5.1	电解加工表面质量的特点	439	7	电化学去毛刺	500
5.2	电解加工表面粗糙度及其影响因素	439	7.1	概述	500
5.3	电解加工可能产生的表面缺陷及相应防止措施	439	7.2	电化学去毛刺的工艺特点	501
5.4	电解加工表面质量对零件疲劳强度的影响	440	7.3	电化学去毛刺的设备	502
第3章 电解加工设备		442	7.4	电化学去毛刺应用实例	502
1	电解加工设备的总体论述	442	7.5	电化学去毛刺的新发展	503
1.1	电解加工设备的组成和功能	442	第5章 电解加工新技术		505
1.2	电解加工设备的分类和选型	442	1	脉冲电流电解加工	505
1.3	电解加工设备的总体设计原则	442	1.1	脉冲电流电解加工的基本特征	505
2	电解加工机床	444	1.2	低频、宽频冲电流电解加工	507
			1.3	高频、窄脉冲电流电解加工	508
			2	数控展成电解加工	515
			2.1	数控展成电解加工系统组成	516
			2.2	旋转阴极展成电解加工	516
			2.3	“单直线刃”喷射式阴极展成电解加工	518

2.4 整体叶轮的数控展成电解加工	520	第7章 复合电化学加工	550
3 小间隙电解加工	523	1 电解磨削	550
3.1 小间隙电解加工的工艺特点	523	1.1 电解磨削加工原理	550
3.2 设备保障条件	527	1.2 电解磨削工艺和设备	550
3.3 典型应用	527	1.3 电解磨削典型应用	552
4 小孔电液束加工	528	2 电解磨料光整加工	553
4.1 电液束加工工艺要点	528	2.1 电解磨料光整加工机理与特点	553
4.2 电液束加工的应用	529	2.2 工艺参数对光整加工质量的影响 及参数选择	554
5 电解擦削	530	2.3 典型应用与发展	556
5.1 电解擦削装置简介	530	3 超声-电解复合加工	557
5.2 电解擦削工艺要点	532	3.1 超声-电解复合加工原理及工艺特点	557
5.3 应用实例	533	3.2 研究现状和应用前景	560
6 微细电解加工	535	4 电解-电火花复合加工	560
6.1 微细电解加工的基础条件	535	4.1 电解-电火花复合加工原理及工艺特点	560
6.2 微细电解加工方法	536	4.2 电解-电火花复合加工的研究、应用和 发展	561
6.3 复合微细电解加工研究方向	537	第8章 电化学加工技术的发展趋势	565
第6章 电铸成形和电刷镀加工	538	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	565
1 电铸成形加工原理	538	1.1 高频、窄脉冲电流电解加工	565
1.1 加工原理	538	1.2 高速、高压、小间隙电解加工	565
1.2 电铸金属沉积质量的计算和电铸成形速度	538	1.3 数控电解加工	565
1.3 电场、流场设计	539	1.4 复合电化学加工	565
2 电铸工艺	541	2 计算机控制技术将得到更高水平的应用	566
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	541	2.1 电化学加工过程(参数)的自动控制	566
2.2 提高电铸速度、改进电铸质量的措施	541	2.2 CAD/CAM技术、数字化制造技术的应用	566
3 电铸的应用和发展	543	2.3 提高加工设备的计算机控制水平	566
3.1 电铸的典型应用	543	3 微细电化学加工技术探索	566
3.2 电铸技术的发展趋势	546	4 绿色电化学加工	567
4 电刷镀加工	547	参考文献	568
4.1 加工原理	547		
4.2 工艺要点	547		
4.3 电刷镀的典型应用	548		

第 1 篇

概 论

- 主 编 齐从谦
- 主 审 王至尧
- 编 写 齐从谦 王至尧

策上篇

新 聯

新 聯 策 上 篇

策 上 篇 新 聯

策 上 篇 新 聯 策 上 篇

第1章 材料特种加工及其在现代制造业中的作用

1 特种加工的定义和特点

1.1 特种加工的定义

人们熟悉的传统机械加工方法 (traditional machining), 大都是在机械力的作用下, 用比被加工材料还要硬的工具将工件材料去除、让其变形或改变其性能, 使其达到所需要的形状尺寸和表面质量要求。

随着社会的进步和科学技术的不断发展, 人们对社会产品的需求也越来越高。不仅产品更新换代的速度加快, 而且还要求产品具有很高的强度重量比和性能价格比, 使产品向高速度、高精度、高可靠性、高耐磨性、耐腐蚀性、耐高温高压以及尺寸更大或更小的两极分化方向发展。为此, 各种新材料、新结构以及形状复杂和微细结构的机械零件大量涌现, 给机械制造业提出了一系列亟待解决的难题。例如, 各种难切削材料的加工; 各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工; 薄壁、弹性元件、等刚度及特殊零件的加工等。对此, 采用传统加工方法十分困难, 甚至无法加工。于是, 人们一方面千方百计来完善和发展传统机械加工技术, 另一方面则借助于科学技术的发展, 创立有别于传统机械加工的特种加工方法。

所谓特种加工方法 (non-traditional machining), 有时也称为非传统加工方法, 是指那些在加工过程中不需要比工件更硬的工具, 也不需要加工过程中施加明显的机械力, 而是直接利用电能、热能、磁能、电化学能、化学能、声能、光能等或者是它们的组合, 使工件材料被去除、变形、改变性能、表面涂覆与堆积, 使其达到所需的形状尺寸和表面质量要求的各种加工方法的总称。

特种加工是随着科学技术的发展而不断产生和发展的一类新型加工方法。目前已成功开发应用的就有 100 余种, 其中主要有电火花加工 (电火花成形加工、电火花线切割加工等)、电化学加工 (电解加工、电化学抛光、电铸等)、化学加工 (化学铣削加工、照相腐蚀、光刻腐蚀等)、高能束流加工 (电子束加工、离子束加工、激光加工、高压流体喷射加工等)、电磁成形、超声波加工、快速原型 (RP) 等。

1.2 特种加工的特点

特种加工是直接利用电能、热能、磁能、电化学能、化学能、声能、光能以及某些特殊机械能等多种能量或它们的组合实现加工的, 在加工机理和方式上与传统的机械加工有很多本质上的不同, 并有着非常鲜明的特点和特色。

1) 与材料力学性能无关 特种加工方法主要不是靠机械能加工, 而是直接利用电能、热能、磁能、电化学能、化学能、声能、光能进行加工, 所以与工件材料的硬度和强度等力学性能无关。加上它的能量密度很高 (参见表 1.1-1), 适用于高熔点、高强度、高耐热、耐腐蚀、特殊性能的金属和非金属材料, 加工范围甚广。

表 1.1-1 各种加工方法的能量密度

平均能量密度 /W·cm ⁻²	特种加工方法	传统机械加工方法
10 ⁸	激光加工	
10 ⁷	电子束加工	

续表 1.1-1

平均能量密度 /W·cm ⁻²	特种加工方法	传统机械加工方法
10 ⁶	电火花成形加工/电火花线切割加工 电火花磨削 阳极机械切削 微波加工 高压接触加工 电解放电加工	超高速切削加工 冲击推出加工 超声波成形
10 ⁵	放电高速流体加工 高压 (水) 喷射加工 放电镀膜 超声波加工/超声波空化作用加工 放电烧结/放电冲击烧结 放电冲击镀膜/放电冲击压焊 等离子束加工	熔融加工
10 ⁴	电磁成形 放电冲击成形 放电高压处理 电解磨削 放电电解加热加工/放电电解扩散加工	喷射加工压焊
10 ³	离子束加工	切削加工
10 ²	高速电铸	
10 ¹	不良导体加工	磨光、抛光、研磨

2) 工具与工件不直接接触 特种加工的工具与工件在加工过程中一般都不直接接触, 有的甚至不需要工具。因此工件一般不承受明显的机械力。这不仅有助于实现以柔克刚, 而且有利于加工那些不能承受机械力作用的薄壁零件或弹性零件, 更适合于各种微细零件的加工及纳米级零件的加工。

3) 便于加工复杂型面 很多特种加工方法只需以简单的进给运动, 就可以加工出各种复杂的三维曲面, 所以特种加工现已成为复杂型面的主要加工方法之一。

4) 可以获得良好的表面质量 在特种加工工程中, 由于工件表面不像切削加工那样产生强烈的弹、塑性变形, 故许多特种加工方法都可以获得非常小的表面粗糙度, 其残余应力、冷作硬化、热应力、热影响区及毛刺等表面缺陷均比传统机械加工小很多。

5) 利用多种特种加工方法的复合应用 一些特种加工方法能够复合应用, 形成扬长补短的新型工艺方法, 更突出其优越性, 获得更好的综合加工效果, 也便于推广应用。

2 特种加工的产生和发展

2.1 特种加工的产生

传统的机械加工对人类的生产和物质文明起到了极大的推动作用。例如18世纪70年代就发明了蒸汽机,但由于当时制造不出高精度的蒸汽机汽缸,无法推广应用。直到有人创造出和改进了汽缸镗床,解决了蒸汽机主要部件的加工工艺,才使蒸汽机获得广泛应用,并进一步导致了世界性的第一次工业革命。

然而,从第一次产业革命以来,一直到第二次世界大战以前,在这段长达150多年的漫长年代里,制造业基本上都是靠机械切削加工(包括磨削加工)来达到加工目的。人们的思想一直仍还局限在自古以来传统的用机械能量和切削力来去除多余的金属,以达到加工的要求。

随着科学技术的发展,人们发现并认识到放电时会产生大量的热,可以使金属瞬时熔化和汽化,到19世纪末,美国科学家发明了用低压大电流施于加工电极与工件之间的方法来刻印文字和花纹;20世纪初,人们又发现在介电液中放电时会产生金属粉末;1943年,前苏联学者拉扎林柯夫妇则利用放电时的电腐蚀现象进行尺寸加工,从而开创和发明了电火花加工方法,用铜棒在淬火钢上加工出小孔,可用软的工具加工任何硬度的金属材料,首次在传统的切削加工方法之外,直接利用电能和热能来去除金属,获得“以柔克刚”的效果。

第二次世界大战之后,特别是20世纪50年代以来,随着生产的发展和科学实验的需要,很多工业部门,尤其是国防工业部门要求尖端科学技术产品向高精度、高速度、高温、高压、大功率、小型化等方向发展,所使用的材料愈来愈难加工,零件形状愈来愈复杂,表面精度、粗糙度和某些特殊要求也愈来愈高,对机械制造和材料加工成形提出了一系列新的要求。

1) 解决各种难加工材料的加工问题 如硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、宝石、石英以及锗、硅等各种高硬度、高强度、高韧性、高脆性的金属及非金属材料加工。

2) 解决各种特殊复杂表面的加工问题 如喷气涡轮机叶片和锻压模的立体成形表面,各种冲模冷拔模上特殊断面的型孔,喷油嘴、栅网、喷丝头上的小孔窄缝等的加工。

3) 解决各种具有特殊要求的零件的加工问题 如对表面质量和精度要求很高的细长零件、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工。

要解决上述一系列工艺问题,仅仅依靠传统的加工方法和切削工艺就很难实现,甚至根本无法实现。因此社会与生产的发展,引发了对新的加工方法的需求。人们相继探索研究新的加工方法,如何用软的工具加工硬的材料(例如,用石墨来加工钢材),不仅用机械能而且还采用电、化学、光、声等能量来进行加工,促进了特种加工的高速发展,并在各行各业得到了越来越广泛的应用。目前,我国各类特种加工设备的年产量已超过5万余台,年产值达20亿元人民币。特种加工成为我国制造业中一个不可缺少的重要组成部分。

当然,与其他制造学科技术的发展一样,特种加工的领域和内涵也是在其自身发展过程中不断扩展和延拓的。早期的特种加工主要是指电火花成形加工、电火花线电极切割加工和电解加工,而后者还兼具有电化学加工的含义。随着电加工技术在制造业得到越来越广泛的应用,尤其是在模具制

造行业中发挥了举足轻重的作用,逐渐形成了一门独立的学科,并衍生出一系列具有与电加工的“以柔克刚”、“以软制硬”性能相类似的材料成形加工方法,如电子束加工、离子束加工、高能束加工、电磁成形、超声波加工、水力加工、液力加工、激光加工及等离子加工等材料成形加工方式。显然,这些新的而且又区别于传统切削加工的材料成形加工技术已经大大超出了“电加工”的范围。于是,人们把以上这些在材料成形加工机理上有别于传统切削加工的材料成形加工方法统称为“特种加工”。特种加工在其技术上、学术上和方法上的内涵和外延都得到了进一步的拓展,并逐渐形成特种加工学科的系统性、先进性、新颖性、集成性、信息化等鲜明的特色。

2.2 增材加工——特种加工的新进展

上面所说的两类加工方法有一个共同之处,即都是通过在工作件上“去除”材料的方式来达到成形加工的目的,这就是通常所说的“减材加工”。

随着制造科学与技术、材料科学与技术的不断发展,并与信息科学技术的紧密结合,又产生了一种在成形方式上与前两类加工完全相反的特种加工类型——“增材加工”。

所谓“增材加工”是指采用从无到有、层层堆积的方法来达到材料成形的目的。这种加工方式在材料成形加工的理念上是对“减材加工”的突破,在技术上是一种创新,在控制方法上需要信息技术的支持,在材料使用上则是更明显优于“减材加工”。它所需要的材料仅仅取决于工件最终的几何形状和尺寸,而不像“减材加工”那样,把原始毛坯上多余的材料去除,被去除的材料往往就成了没有价值的废料(如铁屑、磨粒等)。

增材成形加工主要有电镀、电铸、电火花强化、等离子渗透及激光快速成形等类型,其典型代表是“激光快速成形”。其基本原理来自快速原型技术。

(1) 快速原型技术的原理

快速原型技术(Rapid Prototyping Technology, RP)是国外20世纪80年代中后期发展起来的一种通过特殊加工工艺实现设计物理模型的新技术。RP系统依据三维CAD模型数据、CT和MRI扫描数据和由三维实物数字化系统创建的数据,通过各种使能方法,把液体、粉末或者薄片等形态的材料堆积起来制造物理实物。它与虚拟制造技术(Virtual Manufacturing)一起,被称为未来制造业的两大支柱技术。快速原型技术对缩短新产品开发周期,降低开发费用具有极其重要的意义,有人称快速原型技术是继NC技术后制造业的又一次革命。目前RP技术已成为各国制造科学研究的前沿学科和研究焦点。

快速原型技术是综合利用CAD技术、数控技术、激光加工技术和材料技术实现从零件设计到三维实体原型制造一体化的系统技术。它采用软件离散-材料堆积的原理实现零件的成形,如图1.1-1所示。

其具体过程如下:首先利用高性能的CAD软件设计出零件的三维曲面或实体模型;再根据工艺要求,按照一定的厚度在Z向(或其他方向)对生成的CAD模型进行切面分层,生成各个棱面的二维平面信息;然后对层面信息进行工艺处理,选择加工参数,系统自动生成“工具”移动轨迹和数控加工代码;再对加工过程进行仿真,确认数控代码的正确性;然后利用数控装置精确控制激光束或其他工具的运动,在三维环境下的当前工作层上采用轮廓扫描,把材料加工出适当的截面形状;然后再铺上一层新的成形材料,进行下一次的加工,直至整个零件加工完毕。可以看出,快速原型技术是个由三维转换成二维(软件离散化),再由二维到三维(材料堆积)的工作过程。

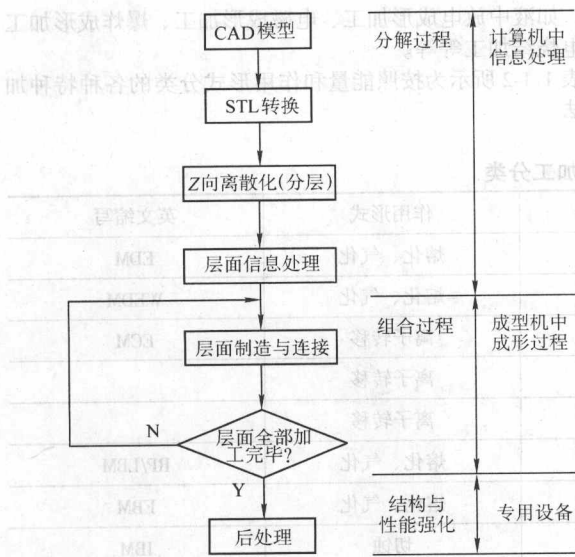


图 1.1-1 快速原型工作原理

快速原型方法不仅可用于原始设计中快速生成零件的实物，也可与反求工程相结合，用来快速复制实物（包括放大、缩小、修改和复制）。其工作过程是：用三维数字化仪采集产品或零件的三维实体信息，在计算机中通过 CAD 建模技术再还原生成实物的三维模型，必要时还可以用三维 CAD 软件对重建的 CAD 模型进行修改和缩放，然后采用专门的软件进行三维离散化，以生成 STL 格式的文件，再传送到快速成型机中生成实体产品或零件。

激光快速成形技术的主要工艺方法有以下几种：

- 1) 光固化立体造型 (Stereo Lithography Apparatus, SLA)；
- 2) 分层物件制造 (Laminated Object Manufacturing, LOM)；

- 3) 选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS)；
- 4) 熔融沉积造型 (Fused Deposition Modeling, FDM)。

直接利用 RP 工艺，结合相应的后处理工艺或快速精密铸造工艺不仅可以快速制造出各种形状复杂的零件，还可以直接实现模具的快速制造。其主要方法有：

1) 直接生成金属模具零件的方法 利用金属粉末烧结 (SLS) 制成的原型件，直接进行金属熔渗处理，形成金属模具零件。

2) 直接生成非金属模具零件的方法 利用 SLA、FDM 或 LOM 方法，直接制造树脂、ABS 塑料模具零件。

3) 直接生成消失模的方法 用 SLS 方法直接制造铸造用的消失蜡模，实现零件的快速精密铸造。

基于 RP 原型件，结合相应的特种加工工艺，可以间接实现模具制造：

1) 基于 RP 原型，与电铸工艺、金属喷涂、陶瓷涂覆工艺相结合，快速制造金属或陶瓷模具的工艺技术。

2) 基于 RP 原型，浇注硅橡胶、环氧树脂或聚氨酯等软材料，直接制造软模具。

基于 RP 原型，结合相应的特种加工工艺，快速制造电加工的电极，实现复杂模具零件的快速电火花成形加工。

1) 在原型或原型制作的母模上涂刷导电层，再电铸或电镀形成金属电极。

2) 直接在原型上进行金属冷喷涂形成金属电极。

3) 利用原型制造母模，充实粉末，再压实烧结形成电极。

4) 在原型制作的母模内充入石墨粉与黏结剂的混合物，

固化形成石墨电极。

5) 在原型制作的母模内充入环氧树脂与碳化硅粉的混合物，首先形成研磨模，再在专用振动研磨机上研磨出石墨电极。

(2) 快速原型和激光快速成型技术的特点

快速原型和激光快速成型技术作为材料成型特种加工的一种非常有效的工艺方法，具有一系列显著的特点和技术优势：

- 1) 更适合于形状复杂的、不规则零件的加工；
- 2) 减少了对熟练技术工人的需求；
- 3) 没有或极少废弃材料，是一种环保型制造技术；
- 4) 成功地解决了计算机辅助设计中三维造型“看得见，摸不着”的问题；
- 5) 系统柔性高，只需修改 CAD 模型就可生成各种不同形状的零件；
- 6) 技术集成，设计制造一体化；
- 7) 具有广泛的材料适应性；
- 8) 不需要专用的工装夹具和模具，大大缩短了新产品试制时间；
- 9) 零件的复杂程度与制造成本关系不大。

以上特点决定了快速原型法主要适合于新产品开发、快速单件及小批量零件制造、复杂形状零件的制造、模具设计与制造，也适合于难加工材料的制造、外形设计检查、装配检验和快速反求工程等。

关于快速原型和激光快速成形技术的具体内容，将在本书有关章节中予以详细介绍。

3 特种加工的分类及工艺性能比较

3.1 特种加工的分类

材料成型特种加工的分类可以按能量来源和作用原理分为如下几大类。

1) 电、热类 有电火花加工（其中包括电火花成型和电火花线切割加工）、电子束加工及等离子加工。

2) 电、机械类 有离子束加工、高能束加工。

3) 电化学类 有电解加工、电刷镀加工、电铸等。

4) 电化学、机械类 有电解磨削、阳极机械磨削加工等。

5) 声、机械类 有超声加工。

6) 光、热类 有激光加工、激光快速成型。

7) 化学类 有化学加工（化学铣削、照相腐蚀、光刻）。

8) 液流类 有高压（水）喷射加工、液力加工。

9) 液体、机械类 有磨料流动加工、磨料喷射加工。

这里应该说明的是，特种加工虽然在本质上与传统的机械加工有所不同，但并不排斥常规的机械加工，二者之间可以相互补充。特种加工在其发展过程中具有特种加工和常规机械加工的双重特点，从而形成了某些过渡性的工艺，往往是介乎二者之间的加工工艺和方法。例如在切削过程中引入超声振动或低频振动切削；在切削过程中通以低电压大电流的导电切削、加热切削以及低温切削等。这些加工方法是在传统的切削加工的基础上发展起来的，目的是改善切削条件，提高切削效率，虽然在本质上还属于切削加工，但已融入了特种加工的理念。

在特种加工范围内还有一些属于改善表面粗糙度或表面性能的加工工艺，前者如电解抛光、化学抛光、离子束抛光等；后者如电火花表面强化、镀覆、刻字、电子束曝光、离子束注入掺杂等。

随着半导体大规模和超大规模集成电路芯片生产发展的

需要,上面提到的电子束、离子束加工,就是最近十年来提出的超微量加工、纳米级加工,即在物理上达到所谓分子、原子单位的加工。

此外,特种加工还包括一些不属于尺寸加工的成形加工

方式,如液中放电成形加工、电磁成形加工、爆炸成形加工及放电烧蚀加工等等。

表 1.1-2 所示为按照能量和作用形式分类的各种特种加工方法。

表 1.1-2 材料成形特种加工分类

加工方法	主要能量形式	作用形式	英文缩写	
电火花加工	电火花成形加工	电、热能	熔化、气化	EDM
	电火花线切割加工	电、热能	熔化、气化	WEDM
电化学加工	电解加工	电化学能	离子转移	ECM
	电铸加工	电化学能	离子转移	
	涂镀加工	电化学能	离子转移	
高能束加工	激光束加工(含 RP)	光、热能	熔化、气化	RP/LBM
	电子束加工	电、热能	熔化、气化	EBM
	离子束加工	电、机械能	切蚀	IBM
	等离子弧加工	电、热能	熔化、气化	PAM (C)
物料切蚀加工	超声加工	声、机械能	切蚀	USM
	磨料流加工	机械能	切蚀	AFM
	液体喷射加工	机械能	切蚀	HDM
化学加工	化学铣切加工	化学能	腐蚀	CHM
	照相制版加工	化学、光能	腐蚀	
	光刻加工	光、化学能	光化学、腐蚀	PCM
	光电成形电镀	光、化学能	光化学、腐蚀	
	刻蚀加工	化学能	腐蚀	
	粘接	化学能	化学键	
	爆炸加工	化学、机械能	爆炸	
成形加工	粉末冶金	热、机械能	热压成形	PM
	超塑成形	机械能	超塑性	SPM
	快速成形	热、机械能	热熔化成形	RPM
复合加工	电化学电弧加工	电化学能	熔化、气化腐蚀	ECAM
	电解电火花机械磨削	电、热能	离子转移、熔化、切削	MEEC
	电化学腐蚀加工	电化学、热能	熔化、气化腐蚀	ECE
	超声放电加工	声、热、电能	熔化、切蚀	
	复合电解加工	电化学、机械能	切蚀	
	复合切削加工	机械、声、磁能	切削	

还可以从学科的角度来对特种加工进行分类。例如世界电加工学会和中国机械工程学会特种加工分会就把特种加工分为如下五个专业委员会:

- 1) 电火花成形加工;
- 2) 电火花线切割加工;
- 3) 电解成形加工;
- 4) 三束(电子束、高能束及等离子束)加工;
- 5) 激光快速成形加工。

这些专业委员会每年都围绕着各自的专题举办各种形式的研讨会、学术交流会,开展学术交流和成果展示及应用推广工作,各专业委员会之间既有分工,又有学术上的交叉、交流和协作。

特种加工技术和工艺还可以用于石油钻井工程。钻井实

质上就是破碎岩石,并从井下排除岩屑的过程。在石油钻井中当前主要沿用钻头加压旋转切削或疲劳破坏的传统方法来破碎岩石。其破岩速度慢,尤其是破硬岩时更慢。然而,现代石油工业对钻井速度、深度和油井走向等方面要求越来越高,如目前钻井深度已超过一公里,为增强采油效率,有时还有在打好的竖井下再打一段水平井。所有这些都使得现有钻头旋转钻井工艺难以应付,并导致转盘钻井机械及设备愈来愈庞大和复杂。为此,近年来人们一直在试图利用现代科技的最新成就,开辟新的钻井方法。新的钻井方法大致可分为四类:①采用电弧法或激光法将岩石加热到 $1\ 100\sim 2\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上使之熔化或气化;②热膨胀法,它是把岩石加热到 $370\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时所产生的热应力使岩石表面呈片状剥落,可采用电解法、强制火焰法达到这一目的;③化学腐蚀

法,即使用高度活性的化学剂(如氟)来蚀除岩石,称氟钻井法;④机械诱导应力法,它是利用瞬时冲击作用产生的强大冲击力来破碎岩石,如高压水射流法、爆炸法等。

上述几种新的钻井方法大都吸收了特种加工在现代制造业和材料成型中的成功经验,其共同特点是抛弃了传统的钻头加压旋转切削破岩的原理。由此可见,特种加工工艺和方法在很多领域内是大有用武之地的。

3.2 特种加工工艺性能比较

1) 电火花加工 电火花加工是通过工件和工具电极间的放电而有控制地去除工件材料,以及使材料变形、改变性能或被镀覆的特种加工。其中成形加工适用于各种孔、槽、模具,还可用于刻字、表面强化、涂覆等;切割加工适用于各种冲模、粉末冶金模及工件,各种样板、磁钢及硅钢片的冲片,钨、钨、半导体或贵金属。

2) 电化学加工 电化学加工是通过电化学反应去除工件材料或在其上镀覆金属材料等的特种加工。其中电解加工适用于深孔、型孔、型腔、型面、倒角去毛刺、抛光等。电铸加工适用于形状复杂、精度高的空心零件,如波导管;注塑用的模具、薄壁零件;复制精密的表面轮廓;表面粗糙度样板、反光镜、表盘等零件。涂覆加工可针对表面磨损、划伤、锈蚀的零件进行涂覆以恢复尺寸;对尺寸超差产品进行涂覆补救。对大型、复杂、小批工件表面的局部镀防腐层、耐腐层,以改善表面性能。

3) 高能束加工 高能束加工是利用能量密度很高的激光束、电子束或离子束等去除工件材料的特种加工方法的总称。其中激光束加工主要应用有打孔、切割、焊接、金属表面的激光强化和微调等。电子束加工有热型和非热型两种。热型加工是利用电子束将材料的局部加热至熔化或汽化点进行加工的,适合打孔、切割槽缝、焊接及其他深结构的微细加工;非热型加工是利用电子束的化学效应进行刻蚀、大面

积薄层等微细加工等。离子束加工主要应用于微细加工、溅射加工和注入加工。等离子弧加工适用于各种金属材料的切割、焊接、热处理,也可制造高纯度氧化铝、氧化硅和工件表面强化,还可进行等离子弧堆焊及喷涂。

4) 超声加工 超声加工是利用超声振动的工具在有磨料的液体介质中或于磨料中,产生磨料的冲击、抛光、液压冲击及由此产生的气蚀作用来去除材料,以及超声振动使工件相互结合的加工方法。超声加工适用于成形加工、切割加工、焊接加工和超声清洗。

5) 液体喷射加工 液体喷射加工是利用水或在水中添加剂的液体,经水泵及增压器产生高速液体束流,喷射到工件表面,从而达到去除材料的目的,可加工薄、软的金属及非金属材料,去除腔体零件内部毛刺,使金属表面产生塑性变形。磨料喷射加工适用于去毛刺加工、表面清理、切割加工、雕刻、落料及打孔等。

6) 化学加工 化学加工是利用化学溶液与金属产生化学反应,使金属腐蚀溶解,改变工件形状、尺寸的加工方法。化学加工用于去除材料表层,以减重;有选择地加工较浅或较深的空腔及凹槽;对板材、片材、成形零件及挤压成形零件进行锥孔加工。

7) 复合加工 复合加工是指同时在加工部位上组合两种或两种以上的不同类型能量去除工件材料的特种加工。

尽管特种加工优点突出,应用日益广泛,但是各种特种加工方法的能量来源、作用形式、工艺特点却不尽相同,其加工特点与应用范围自然也不一样,而且各自还具有一定的局限性。为了更好地应用和发挥各种特种加工的最佳功能及效果,必须依据工件材料、尺寸、形状、精度、生产率、经济性等情况作具体分析,区别对待,合理选择特种加工方法。

表 1.1-3 所示为材料成形特种加工领域内各种加工方法的综合比较。

表 1.1-3 材料成形特种加工领域内各种加工方法的综合比较

加工方法	可加工材料	工具损耗率 /% 最低/平均	材料去除率 /mm ³ ·min ⁻¹ 平均/最高	可达到尺寸精度/mm 平均/最高	可达到表面粗糙度 R _a /μm 平均/最低	主要适用范围	
电火花成形加工	任何导电的金属材料。如:硬质合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、及钛合金等	0.1/10	30/3 000	0.03/0.003	10/0.04	从数微米的孔、槽到数米的超大型模具、工件等	
电火花线切割加工		较小(可补偿)	40/325 ^① mm ² ·min ⁻¹	0.02/0.002	5/0.32	切割各种冲模、塑料模、粉末冶金等二维及三维直纹面	
电解加工		不损耗	100/1 000	0.1/0.01	1.25/0.16	从细小零件到上吨重的超大型工件及模具	
电解磨削		1/50	1/100	0.02/0.001	1.25/0.04	硬质合金等难加工材料的磨削,如硬质合金工具、轧辊	
超声加工		任何脆性材料	0.1/10	1/50	0.63/0.005	加工切割脆硬材料,如玻璃、石英、宝石、金刚石等	
激光加工		不损耗(三束加工无成型工具)	任何材料	瞬时去除率很高,受功率限制,平均去除率很低 ^②	10/1.25	/0.01	精密小孔、窄缝及成型切割、刻蚀,还可进行焊接、热处理
电子束加工							在各种难加工材料上打微孔、切缝、蚀刻,曝光以及焊接等
离子束加工						对零件表面进行超精密、超微量加工、抛光、刻蚀、掺杂等	

① 线切割加工的金属去除率按惯例均用 mm²/min 为单位。

② 这类工艺主要用于精微和超精微加工,不宜单纯比较材料去除率。