

普通高等教育“十二五”规划教材

全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

特种加工

南京航空航天大学 刘志东 主编

基础理论与工程实践相结合
微观机理与宏观应用相结合
国内与国外研究及应用相结合
随书赠高清特种加工实例视频



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材
全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

特种加工

南京航空航天大学 刘志东 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书结合作者在特种加工、精密加工及微细加工领域近三十年的教学、科研及生产经验,阐述了特种加工工艺方法的原理、基本规律、设备构成、加工特点及主要应用。全书共分为8章,包括绪论、电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工、高能束流加工、快速成形技术、微细特种加工技术和其他特种加工方法。

本书为高等工业院校机械专业特种加工课程教材。也可供机械制造、精密仪器、机电一体化、模具设计与制造等专业的本科生和研究生选用,同时可供从事特种加工生产方面的工程技术人员及技术工人作为培训、学习的参考。

本书配套发行了一张多媒体DVD光盘,介绍了特种加工方法在实际生产中的最新应用;为方便教师授课,DVD光盘中还结合本书教学内容,提供了一份参考教学课件。

图书在版编目(CIP)数据

特种加工/刘志东主编. —北京:北京大学出版社,2013.1

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-21447-3

I. ①特… II. ①刘… III. ①特种加工—高等学校—教材 IV. ①TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第265515号

书 名: 特种加工

著作责任者: 刘志东 主编

策划编辑: 童君鑫 宋亚玲

责任编辑: 宋亚玲

标准书号: ISBN 978-7-301-21447-3/TH·0322

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电子信箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 22印张 510千字

2013年1月第1版 2013年1月第1次印刷

定 价: 50.00元(附赠光盘)

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

前 言

随着特种加工工艺方法在工业生产中的广泛应用,特种加工的新技术、新工艺不断涌现,尤其是近年来电加工技术(包括电火花成形加工、电火花高速穿孔加工、电火花线切割加工及电化学加工)作为先进制造技术中的新工艺、新技术在航天、航空等国防工业和汽车、模具等民用工业部门、乡镇企业和民营企业中的广泛应用,以及微细特种加工技术在 MEMS 及硅半导体加工方面的广泛应用。为适应特种加工技术的迅速发展和应用的需求,本书以尽可能全面、专业、直观的角度介绍了各种特种加工方法的机理、工艺规律及工程应用。力求做到:基础理论与工程实践相结合;国外与国内特种加工研究与应用的成果相结合;微观机理分析与宏观加工应用相结合。

本书的主要内容包括电火花成形加工、电火花高速穿孔加工、电火花线切割加工、电化学加工、高能束流加工、快速成形技术、微细特种加工、超声加工以及最新出现的喷射电沉积、短电弧加工、电火花诱导烧蚀加工等特种加工方法的基本原理、工艺规律、工艺特点及应用范围。本书配套发行了一张多媒体 DVD 光盘,收集了国内外先进的特种加工工艺方法的应用实例,对于提高学生、读者对特种加工的感性认知和深化理性认识,加深对特种加工方法应用的了解,丰富教师的教学内容,提高教学效果均可起到积极的作用。此外为方便教师授课,DVD 光盘中还结合本书教学内容,提供了一份参考课件。

本书为高等工科院校机械专业或其他相近专业的特种加工课程教材,也可以作为研究生课程教材,同时也可作为相关工程技术人员及技术工人培训和学习的参考用书。

本书由中国机械工程学会特种加工分会电火花线切割专业委员会副主任委员、江苏省特种加工学会第六届理事长、南京航空航天大学博士生导师刘志东教授主编,具体章节编写如下:刘志东教授(第 1~3 章);赵建社副教授(第 4 章电解加工部分);沈理达副教授(第 4 章电沉积部分及第 5 章);田宗军教授(第 6 章);邱明波讲师(第 7、8 章);全书由刘志东教授统稿并进行多媒体光盘资料的收集及编辑。

本书编写过程中,参阅了国内外同行有关资料,得到了特种加工界许多专家和朋友的支持与帮助,刘志东教授课题组的研究生们也参与了大量的书稿编辑和整理工作,在此表示衷心的感谢。

由于本书涉及的内容广泛,但编者收集的资料有限及水平所限,以及技术的迅速发展,书中难免有不少疏漏和不妥之处,望读者批评指正,编者的电子邮箱为 liutim@nuaa.edu.cn。

编 者
2012 年 11 月

北京大学出版社教材书目

- ◇ 欢迎访问教学服务网站 www.pup6.cn, 免费查阅下载已出版教材的电子书(PDF 版)、电子课件和相关教学资源。
- ◇ 欢迎征订投稿。联系方式: 010-62750667, 童编辑, 13426433315@163.com, pup_6@163.com, 欢迎联系。

序号	书 名	标准书号	主 编	定价	出版日期
1	机械设计	978-7-5038-4448-5	郑 江, 许 瑛	33	2007.8
2	机械设计	978-7-301-15699-5	吕 宏	32	2009.9
3	机械设计	978-7-301-17599-6	门艳忠	40	2010.8
4	机械设计	978-7-301-21139-7	王贤民, 霍仕武	49	2012.8
5	机械原理	978-7-301-11488-9	常治斌, 张京辉	29	2008.6
6	机械原理	978-7-301-15425-0	王跃进	26	2010.7
7	机械原理	978-7-301-19088-3	郭宏亮, 孙志宏	36	2011.6
8	机械原理	978-7-301-19429-4	杨松华	34	2011.8
9	机械设计基础	978-7-5038-4444-2	曲玉峰, 关晓平	27	2008.1
10	机械设计课程设计	978-7-301-12357-7	许 瑛	35	2012.7
11	机械设计课程设计	978-7-301-18894-1	王 慧, 吕 宏	30	2011.5
12	机电一体化课程设计指导书	978-7-301-19736-3	王金娥 罗生梅	35	2012.1
13	机械工程专业毕业设计指导书	978-7-301-18805-7	张黎骅, 吕小荣	22	2012.5
14	机械创新设计	978-7-301-12403-1	丛晓霞	32	2010.7
15	机械系统设计	978-7-301-20847-2	孙月华	32	2012.7
16	机械设计基础实验及机构创新设计	978-7-301-20653-9	邹旻	28	2012.6
17	TRIZ 理论机械创新设计工程训练教程	978-7-301-18945-0	蒯苏苏, 马履中	45	2011.6
18	TRIZ 理论及应用	978-7-301-19390-7	刘训涛, 曹 贺 陈国晶	35	2011.8
19	创新的方法——TRIZ 理论概述	978-7-301-19453-9	沈萌红	28	2011.9
20	机械 CAD 基础	978-7-301-20023-0	徐云杰	34	2012.2
21	AutoCAD 工程制图	978-7-5038-4446-9	杨巧绒, 张克义	20	2011.4
22	工程制图	978-7-5038-4442-6	戴立玲, 杨世平	27	2012.2
23	工程制图	978-7-301-19428-7	孙晓娟, 徐丽娟	30	2012.5
24	工程制图习题集	978-7-5038-4443-4	杨世平, 戴立玲	20	2008.1
25	机械制图(机类)	978-7-301-12171-9	张绍群, 孙晓娟	32	2009.1
26	机械制图习题集(机类)	978-7-301-12172-6	张绍群, 王慧敏	29	2007.8
27	机械制图(第2版)	978-7-301-19332-7	孙晓娟, 王慧敏	38	2011.8
28	机械制图	978-7-301-21480-0	李风云, 张 凯等	36	2013.1
29	机械制图习题集(第2版)	978-7-301-19370-7	孙晓娟, 王慧敏	22	2011.8
30	机械制图	978-7-301-21138-0	张 艳, 杨晨升	37	2012.8
31	机械制图习题集	978-7-301-21339-1	张 艳, 杨晨升	24	2012.10
32	机械制图与 AutoCAD 基础教程	978-7-301-13122-0	张爱梅	35	2011.7
33	机械制图与 AutoCAD 基础教程习题集	978-7-301-13120-6	鲁 杰, 张爱梅	22	2010.9
34	AutoCAD 2008 工程绘图	978-7-301-14478-7	赵润平, 宗荣珍	35	2009.1
35	AutoCAD 实例绘图教程	978-7-301-20764-2	李庆华, 刘晓杰	32	2012.6
36	工程制图案例教程	978-7-301-15369-7	宗荣珍	28	2009.6
37	工程制图案例教程习题集	978-7-301-15285-0	宗荣珍	24	2009.6
38	理论力学	978-7-301-12170-2	盛冬发, 闫小青	29	2012.5
39	材料力学	978-7-301-14462-6	陈忠安, 王 静	30	2011.1
40	工程力学(上册)	978-7-301-11487-2	毕勤胜, 李纪刚	29	2008.6
41	工程力学(下册)	978-7-301-11565-7	毕勤胜, 李纪刚	28	2008.6
42	液压传动	978-7-5038-4441-8	王守城, 容一鸣	27	2009.4

43	液压与气压传动	978-7-301-13179-4	王守城, 容一鸣	32	2012.10
44	液压与液力传动	978-7-301-17579-8	周长城等	34	2010.8
45	液压传动与控制实用技术	978-7-301-15647-6	刘忠	36	2009.8
46	金工实习(第2版)	978-7-301-16558-4	郭永环, 姜银方	30	2012.5
47	机械制造基础实习教程	978-7-301-15848-7	邱兵, 杨明金	34	2010.2
48	公差与测量技术	978-7-301-15455-7	孔晓玲	25	2011.8
49	互换性与测量技术基础(第2版)	978-7-301-17567-5	王长春	28	2010.8
50	互换性与技术测量	978-7-301-20848-9	周哲波	35	2012.6
51	机械制造技术基础	978-7-301-14474-9	张鹏, 孙有亮	28	2011.6
52	机械制造技术基础	978-7-301-16284-2	侯书林, 张建国	32	2012.8
53	先进制造技术基础	978-7-301-15499-1	冯宪章	30	2011.11
54	先进制造技术	978-7-301-20914-1	刘璇, 冯凭	28	2012.8
55	机械精度设计与测量技术	978-7-301-13580-8	于峰	25	2008.8
56	机械制造工艺学	978-7-301-13758-1	郭艳玲, 李彦蓉	30	2008.8
57	机械制造工艺学	978-7-301-17403-6	陈红霞	38	2010.7
58	机械制造工艺学	978-7-301-19903-9	周哲波, 姜志明	49	2012.1
59	机械制造基础(上)——工程材料及热加工工艺基础(第2版)	978-7-301-18474-5	侯书林, 朱海	40	2011.1
60	机械制造基础(下)——机械加工工艺基础(第2版)	978-7-301-18638-1	侯书林, 朱海	32	2012.5
61	金属材料及工艺	978-7-301-19522-2	于文强	44	2011.9
62	金属工艺学	978-7-301-21082-6	侯书林, 于文强	32	2012.8
63	工程材料及其成形技术基础	978-7-301-13916-5	申荣华, 丁旭	45	2010.7
64	工程材料及其成形技术基础学习指导与习题详解	978-7-301-14972-0	申荣华	20	2009.3
65	机械工程材料及成形基础	978-7-301-15433-5	侯俊英, 王兴源	30	2012.5
66	机械工程材料	978-7-5038-4452-3	戈晓岚, 洪琢	29	2011.6
67	机械工程材料	978-7-301-18522-3	张铁军	36	2012.5
68	工程材料与机械制造基础	978-7-301-15899-9	苏子林	32	2009.9
69	控制工程基础	978-7-301-12169-6	杨振中, 韩致信	29	2007.8
70	机械工程控制基础	978-7-301-12354-6	韩致信	25	2008.1
71	机电工程专业英语(第2版)	978-7-301-16518-8	朱林	24	2012.10
72	机械制造专业英语	978-7-301-21319-3	王中任	28	2012.10
73	机床电气控制技术	978-7-5038-4433-7	张万奎	26	2007.9
74	机床数控技术(第2版)	978-7-301-16519-5	杜国臣, 王士军	35	2011.6
75	自动化制造系统	978-7-301-21026-0	辛宗生, 魏国丰	37	2012.8
76	数控机床与编程	978-7-301-15900-2	张洪江, 侯书林	25	2012.10
77	数控铣床编程与操作	978-7-301-21347-6	王志斌	35	2012.10
78	数控技术	978-7-301-21144-1	吴瑞明	28	2012.9
79	数控加工技术	978-7-5038-4450-7	王彪, 张兰	29	2011.7
80	数控加工与编程技术	978-7-301-18475-2	李体仁	34	2012.5
81	数控编程与加工实习教程	978-7-301-17387-9	张春雨, 于雷	37	2011.9
82	数控加工技术及实训	978-7-301-19508-6	姜永成, 夏广岚	33	2011.9
83	数控编程与操作	978-7-301-20903-5	李英平	26	2012.8
84	现代数控机床调试及维护	978-7-301-18033-4	邓三鹏等	32	2010.11
85	金属切削原理与刀具	978-7-5038-4447-7	陈锡渠, 彭晓南	29	2012.5
86	金属切削机床	978-7-301-13180-0	夏广岚, 冯凭	28	2012.7
87	典型零件工艺设计	978-7-301-21013-0	白海清	34	2012.8
88	工程机械检测与维修	978-7-301-21185-4	卢彦群	45	2012.9
89	特种加工	978-7-301-21447-3	刘志东	50	2013.1

90	精密与特种加工技术	978-7-301-12167-2	袁根福, 祝锡晶	29	2011.12
91	逆向建模技术与产品创新设计	978-7-301-15670-4	张学昌	28	2009.9
92	CAD/CAM 技术基础	978-7-301-17742-6	刘 军	28	2012.5
93	CAD/CAM 技术案例教程	978-7-301-17732-7	汤修映	42	2010.9
94	Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 实用教程	978-7-5038-4437-X	黄卫东, 任国栋	32	2007.7
95	Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 实例教程	978-7-301-12359-1	张选民	45	2008.2
96	Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 曲面设计实例教程	978-7-301-13182-4	张选民	45	2008.2
97	Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 实用教程	978-7-301-16841-7	黄卫东, 郝用兴	43	2011.10
98	Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 实例教程	978-7-301-20133-6	张选民, 徐超辉	52	2012.2
99	SolidWorks 三维建模及实例教程	978-7-301-15149-5	上官林建	30	2009.5
100	UG NX6.0 计算机辅助设计与制造实用教程	978-7-301-14449-7	张黎骅, 吕小荣	26	2011.11
101	Cimatron E9.0 产品设计与数控自动编程技术	978-7-301-17802-7	孙树峰	36	2010.9
102	Mastercam 数控加工案例教程	978-7-301-19315-0	刘 文, 姜永梅	45	2011.8
103	应用创造学	978-7-301-17533-0	王成军, 沈豫浙	26	2012.5
104	机电产品学	978-7-301-15579-0	张亮峰等	24	2009.8
105	品质工程学基础	978-7-301-16745-8	丁 燕	30	2011.5
106	设计心理学	978-7-301-11567-1	张成忠	48	2011.6
107	计算机辅助设计与制造	978-7-5038-4439-6	仲梁维, 张国全	29	2007.9
108	产品造型计算机辅助设计	978-7-5038-4474-4	张慧姝, 刘永翔	27	2006.8
109	产品设计原理	978-7-301-12355-3	刘美华	30	2008.2
110	产品设计表现技法	978-7-301-15434-2	张慧姝	42	2012.5
111	产品创意设计	978-7-301-17977-2	虞世鸣	38	2012.5
112	工业产品造型设计	978-7-301-18313-7	袁涛	39	2011.1
113	化工工艺学	978-7-301-15283-6	邓建强	42	2009.6
114	过程装备机械基础	978-7-301-15651-3	于新奇	38	2009.8
115	过程装备测试技术	978-7-301-17290-2	王毅	45	2010.6
116	过程控制装置及系统设计	978-7-301-17635-1	张早校	30	2010.8
117	质量管理与工程	978-7-301-15643-8	陈宝江	34	2009.8
118	质量管理统计技术	978-7-301-16465-5	周友苏, 杨 飒	30	2010.1
119	人因工程	978-7-301-19291-7	马如宏	39	2011.8
120	工程系统概论——系统论在工程技术中的应用	978-7-301-17142-4	黄志坚	32	2010.6
121	测试技术基础(第2版)	978-7-301-16530-0	江征风	30	2010.1
122	测试技术实验教程	978-7-301-13489-4	封士彩	22	2008.8
123	测试技术学习指导与习题详解	978-7-301-14457-2	封士彩	34	2009.3
124	可编程控制器原理与应用(第2版)	978-7-301-16922-3	赵 燕, 周新建	33	2010.3
125	工程光学	978-7-301-15629-2	王红敏	28	2012.5
126	精密机械设计	978-7-301-16947-6	田 明, 冯进良等	38	2011.9
127	传感器原理及应用	978-7-301-16503-4	赵 燕	35	2010.2
128	测控技术与仪器专业导论	978-7-301-17200-1	陈毅静	29	2012.5
129	现代测试技术	978-7-301-19316-7	陈科山, 王燕	43	2011.8
130	风力发电原理	978-7-301-19631-1	吴双群, 赵丹平	33	2011.10
131	风力机空气动力学	978-7-301-19555-0	吴双群	32	2011.10
132	风力机设计理论及方法	978-7-301-20006-3	赵丹平	32	2012.1

目 录

第 1 章 绪论	1	2.4.2 机床主机各部分的 结构及其作用	29
1.1 特种加工的产生	2	2.4.3 脉冲电源	33
1.2 特种加工的分类	5	2.4.4 自动进给机构	36
1.3 特种加工对制造工艺技术的 影响及发展	8	2.4.5 伺服控制系统的类型	38
思考题	10	2.4.6 电火花成形加工控制 系统	40
第 2 章 电火花加工	11	2.4.7 电火花加工过程中的 参数控制	43
2.1 电火花加工的概念及分类	12	2.5 电火花成形加工工艺	44
2.1.1 电火花加工的基本概念	12	2.5.1 电极的制作	44
2.1.2 电火花加工的特点	13	2.5.2 工件的准备及装夹定位	48
2.1.3 电火花加工应具备的 条件	14	2.5.3 冲抽油方式的选择	49
2.1.4 电火花加工的类型及 适用范围	15	2.5.4 加工规准的选择	49
2.2 电火花放电的微观过程	16	2.5.5 平动量的分配	52
2.2.1 极间介质的电离、击穿， 形成放电通道	16	2.6 电火花加工方法	53
2.2.2 介质热分解、电极材料 熔化、气化热膨胀	18	2.6.1 电火花穿孔加工方法	53
2.2.3 电极材料的抛出	18	2.6.2 电火花型腔加工方法	54
2.2.4 极间介质的消电离	18	2.6.3 电火花铣削加工	56
2.3 电火花加工的基本规律	19	2.7 电火花加工安全防护	57
2.3.1 电火花加工的极性效应	19	2.7.1 电气安全	57
2.3.2 影响电火花加工蚀除 速度的因素	20	2.7.2 火灾的防止	57
2.3.3 蚀除(加工)速度和电极 损耗的关系	23	2.7.3 有害气体的防护	58
2.3.4 影响电火花加工精度的 主要因素	25	2.8 其他电火花加工及复合加工 方法	58
2.3.5 电火花加工的表面质量	26	2.8.1 电火花高速小孔加工	58
2.4 电火花成形加工机床	28	2.8.2 电火花小孔及深孔磨削	62
2.4.1 电火花成形加工机床的 结构及组成	28	2.8.3 电火花共轭回转加工与 跑合加工	62
		2.8.4 金属电火花表面强化和 刻字	63
		2.8.5 非导电材料电火花加工	65
		2.8.6 电火花机械复合磨削	68
		2.8.7 短电弧加工技术	68



2.8.8 放电诱导可控烧蚀及电火花修整	70
思考题	72
第3章 电火花线切割加工	73
3.1 电火花线切割基本原理、特点及应用范围	74
3.1.1 电火花线切割加工的原理	74
3.1.2 电火花线切割加工的特点	75
3.1.3 电火花线切割加工的应用范围	75
3.2 电火花线切割机床分类	76
3.3 数控电火花线切割机床主机	77
3.3.1 高速往复走丝电火花线切割机床的基本组成	77
3.3.2 低速单向走丝电火花线切割机床	90
3.4 数控电火花线切割机床控制系统	96
3.5 数控电火花线切割加工脉冲电源	106
3.5.1 高速往复走丝电火花线切割加工脉冲电源	106
3.5.2 低速单向走丝电火花线切割加工脉冲电源	109
3.6 典型高速走丝机控制系统	112
3.7 线切割编程方法及仿形编程	113
3.7.1 线切割编程方法	113
3.7.2 仿形编程系统	115
3.8 电火花线切割加工基本规律	117
3.8.1 切割速度	117
3.8.2 表面粗糙度	123
3.8.3 加工精度	127
3.8.4 电极丝损耗及耐用度	130
3.8.5 电火花线切割加工工艺	131
3.8.6 电火花线切割加工的拓展	134
思考题	141

第4章 电化学加工	142
4.1 概述	143
4.1.1 电化学加工的概念	143
4.1.2 电化学加工的分类	151
4.1.3 电化学加工的特点	152
4.2 电解加工	152
4.2.1 电解加工原理及其特点	152
4.2.2 电解加工的基本规律	155
4.2.3 电解液	167
4.2.4 电解加工精度	171
4.2.5 电解加工设备	181
4.2.6 电解加工的应用	187
4.3 电沉积加工	195
4.3.1 电沉积原理及工艺	196
4.3.2 电镀加工	198
4.3.3 电铸加工	202
4.3.4 特殊形式电沉积	208
4.3.5 电沉积发展趋势	211
思考题	212
第5章 高能束流加工	213
5.1 激光加工	215
5.1.1 激光加工简介	216
5.1.2 典型激光器	217
5.1.3 常见激光加工技术	226
5.1.4 激光表面加工技术	237
5.1.5 其他激光加工技术	242
5.2 电子束加工	246
5.2.1 电子束加工简介	246
5.2.2 电子束加工特点	248
5.2.3 电子束加工设备	248
5.2.4 电子束加工应用	249
5.3 离子束加工	253
5.3.1 离子束加工基本原理	253
5.3.2 离子束加工特点	254
5.3.3 离子束加工设备	255
5.3.4 离子束加工应用	255
思考题	257

第 6 章 快速成形技术	259	7.2.2 光刻工艺流程	295
6.1 概述	260	7.3 硅微结构加工技术	296
6.1.1 快速成形技术的概念和原理	260	7.3.1 面微结构加工技术	297
6.1.2 快速成形技术的特点	262	7.3.2 体微结构加工技术	298
6.1.3 快速成形技术的发展历程	263	7.3.3 键合技术	300
6.2 快速成形技术的典型工艺与应用	264	7.4 LIGA 技术	302
6.2.1 光固化快速成形工艺	264	7.4.1 LIGA 技术原理	302
6.2.2 激光选区烧结快速成形工艺	267	7.4.2 准 LIGA 技术	303
6.2.3 叠层实体制造快速成形工艺	271	7.4.3 多层光刻胶工艺	304
6.2.4 熔融沉积制造快速成形工艺	273	7.5 微细电火花加工	306
6.2.5 三维打印快速成形工艺	277	7.5.1 微细电火花加工特点	306
6.2.6 其他快速成形工艺简介	279	7.5.2 微轴电极制造方法	306
6.3 激光快速制造技术	280	7.5.3 微细电火花加工关键技术	308
6.3.1 激光熔覆快速制造技术	280	7.5.4 微细电火花加工实例	310
6.3.2 激光选区烧结快速制造技术	282	7.6 微细电解加工	311
6.3.3 激光选区熔化快速制造技术	284	7.6.1 脉冲微细电解加工	312
6.3.4 激光金属板材叠加快速制造技术	285	7.6.2 微细电解线切割	312
6.4 快速成形技术在生物制造的应用	286	7.6.3 电液束流微细电解加工	313
6.4.1 生物制造概述	286	7.6.4 微小阵列结构电解加工	313
6.4.2 快速成形技术在生物制造的应用	287	思考题	315
思考题	290	第 8 章 其他特种加工方法	316
第 7 章 微细特种加工技术	291	8.1 超声复合加工	317
7.1 MEMS 系统简介	292	8.1.1 超声波加工原理	317
7.2 光刻技术	294	8.1.2 超声加工特点	318
7.2.1 光刻胶	295	8.1.3 常见超声复合加工	319
		8.2 气体切割	322
		8.2.1 气体切割原理	322
		8.2.2 气体切割特点	323
		8.2.3 应用气割的条件	323
		8.3 等离子体加工	325
		8.3.1 等离子体加工原理	325
		8.3.2 等离子弧切割	325
		8.3.3 等离子喷涂	326
		8.3.4 等离子电弧焊	327
		8.4 液体喷射加工	328
		8.4.1 液体喷射加工原理	328



8.4.2	液体喷射加工的特点	328	8.7.1	磨料流加工原理	333
8.4.3	液体喷射加工的应用	329	8.7.2	磨料流加工特点	334
8.5	磁化切削	330	8.8	激光预热辅助加工	334
8.5.1	磁化切削原理	330	8.9	爆炸成形加工	335
8.5.2	磁化切削的工艺效果	331	思考题		336
8.6	磁性磨料研磨加工	332	附录	符号说明	337
8.6.1	磁性磨料研磨加工原理	332	参考文献		339
8.6.2	磁性磨料研磨加工应用实例	332			
8.7	磨料流加工	333			

第 1 章

绪 论



本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
特种加工的产生	掌握特种加工的特点	“电火花加工”方法的发明及特种加工产生的历史背景
特种加工的分类	熟悉主要特种加工方法采用的能量形式	一般按能量来源、形式以及作用原理划分特种加工的分类
特种加工对制造工艺技术的影响及发展	掌握特种加工对机械制造和零件结构工艺性产生的影响	特种加工对机械制造和结构工艺性产生的重大影响、不足及发展趋势

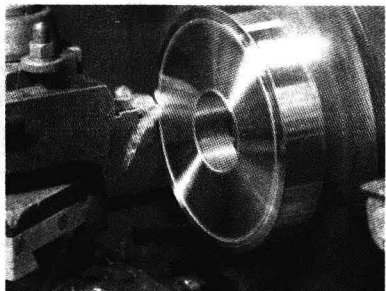


图 1.1 车削加工

同学们在金工实习时接触到的车、铣、刨、磨通常称为传统加工，传统加工必须比加工对象硬的刀具，通过刀具与加工对象的相对运动以机械能的形式完成加工，图 1.1 所示的用高速钢车刀对碳钢零件进行车削加工就属于传统加工。但目前难切削加工的材料越来越多，如硬质合金、淬火钢甚至目前世界上最硬的金金刚石，那么如何对它们进行加工？而对于这些难加工材料的加工正是特种加工的主要应用范畴之一。特种加工可以用比加工对象硬度低的工具甚至没有成形的工具，通过电能、化学能、光能、热能等形式对材料进行加工，并且特种加工的形式也很多，这就是本书要介绍的内容。

1.1 特种加工的产生

特种加工国外也称“非传统加工”(Non-Traditional Machining, NTM)或“非常规机械加工”(Non-Conventional Machining, NCM)，是指那些不属于传统加工工艺范畴的加工方法。它不同于使用刀具、磨具等直接利用机械能切除多余材料的传统加工方法，泛指用电能、热能、光能、电化学能、化学能、声能及特殊机械能等能量达到去除或增加材料的加工方法，从而实现材料的去除、变形、改变性能或被镀覆等工艺。特种加工中以采用电能为主要能量形式的电火花加工和电解加工应用较广，泛称电加工。

特种加工目前公认的起源是以 20 世纪 40 年代前苏联莫斯科大学教授拉扎连科夫妇 (Professors Dr. Boris Lazarenko and Dr. Natalya Lazarenko) 发现电火花放电原理为标志。当时随着电气化和自动化的快速发展，接触器、开关及继电器等许多电器产品都遇到了触点电腐蚀问题，严重影响了电气产品的可靠性和使用寿命，于是他们进行了“研究触点的电腐蚀机理及寻找解决的途径”这一课题的研究。拉扎连科进行了大量的研究工作，并在实验中把触点浸入油中(图 1.2)，希望可以减少火花导致的电蚀现象，实验虽未获成功，但发现浸入油中的触点产生的火花电蚀凹坑比空气中的更加一致并且大小可控，由此联想到可利用这种现象采用火花放电的方法进行材料的放电腐蚀。经过大量实验，一个崭新的“电火花加工”方法诞生了。1943 年拉扎连科夫妇正式获得了政府的发明证书，这一发明首先应用于取折断的钻头和丝锥方面。因为在苏德战争期间，许多武器装备的加工由于钻头或丝锥折断而报废，而用电火花加工方法取折断的钻头或丝锥则轻而易举，有效地解决了难题，由此他们在 1946 年还获得了政府颁发的最高奖赏——斯大林奖章。

而几乎与此同时，美国一家公司的 3 个电器工程师 Harold Stark、Victor Harding 和 Jack Beaver 也发明了一种用电火花加工方法以去除在铝制水阀上折断的钻头和丝锥的机器，而后他们又对这种方法进行了不断的改进并申请了专利。

电火花加工方法的发明，使人类首次摆脱了传统的以机械能和切削力并且利用比加工

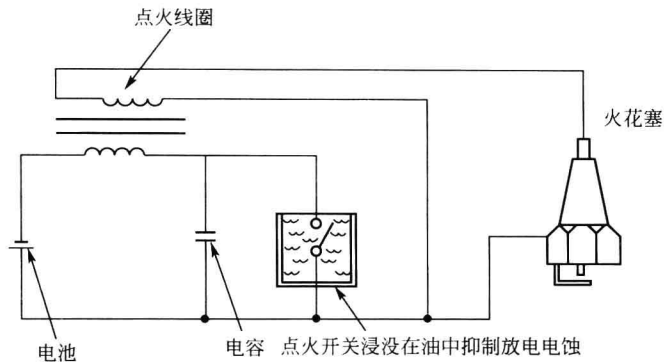


图 1.2 拉扎连科夫妇试验用的钨开关自动点火系统

材料硬度高的刀具来去除多余金属的历史，进入了利用电能和热能进行“以柔克刚”加工材料的时代。

第二次世界大战以后，特别是进入 20 世纪 50 年代以来，由于材料科学、高新技术的发展和激烈的市场竞争、发展尖端国防及科学研究的急需，不仅新产品更新换代日益加快，而且产品要求具有很高的强度重量比和性能价格比，并正朝着高速度、高精度、高可靠性、耐腐蚀、高温高压、大功率、尺寸大小两极分化的方向发展。为此，各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现，对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。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、弹性元件等低刚度、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，人们一方面通过研究高效加工的刀具和刀具材料、自动优化切削参数、提高刀具可靠性和在线刀具监控系统、开发新型切削液、研制新型自动机床等途径，进一步改善切削状态，提高切削加工水平，并解决了一些问题；另一方面，则冲破传统加工方法的束缚，不断地探索、寻求新的加工方法，于是一种本质上区别于传统加工的特种加工便应运而生，并不断获得发展。人们就从广义上来定义特种加工，即将电能、光能、化学能、电化学能、声能、热能及机械能或其组合施加在工件的被加工部位上，从而实现材料被去除、变形、改变性能或被镀覆等的非传统加工方法统称为特种加工。

因此特种加工有别于传统加工的特点体现在如下几方面。

(1) 加工时主要用电、化学、电化学、声、光、热等能量形式去除多余材料，而不是主要靠机械能量切除多余材料；

(2) “以柔克刚”，特种加工的工具与被加工零件基本不接触，加工时不受工件的强度和硬度的制约，故可加工超硬脆材料和精密微细零件，甚至工具材料的硬度可低于工件材料的硬度；

(3) 加工机理不同于一般金属切削加工，不产生宏观切屑，不产生强烈的弹、塑性变形，故可获得很低的表面粗糙度，其残余应力、冷作硬化、热影响度等也远比一般金属切削加工小；

(4) 适合微细加工，有些特种加工，如超声、电化学、水喷射、磨料流等不仅可加工尺寸微小的孔或狭缝，还能获得高精度、极低粗糙度的加工表面；



(5) 两种或两种以上的不同类型的能量可相互组合形成新的复合加工形式, 加工能量易于控制和转换, 加工范围广, 适应性强。

特种加工技术的广泛应用主要始于 20 世纪 50 年代。当时出现了第一台商业化的电火花加工机床, 并且也相继发明了能满足零件几何尺寸、几何形状和精度要求的电解、电解磨削及电铸成形等工艺技术。60 年代, 半导体工业的振兴为电火花加工的发展提供了良机, 提高了电火花成形机床的可靠性, 而且加工表面质量也得到改善。在这个时期, 电火花线切割开始起步。60 年代末 70 年代初, 数控技术的介入使加工更加精确, 同时使电火花线切割加工技术前进了一大步。通过几十年的努力, 电火花加工电源技术、自动化技术以及控制功能都得到了极大的提高。

中国第一台电火花加工机床诞生于 1954 年。1958 年研制成功的 DM5540 型电火花机床具有效率高、电极损耗小的优点, 从而开始了电火花加工机床进入以模具加工为主的时期。1965 年出现的晶体管脉冲电源 D6140 电火花成形机床拓宽了电火花加工在型腔模具加工中的应用。晶闸管电源和晶体管电源的电火花加工机床, 在 70 年代得到了较大的发展, 它们与不断完善的平动头相结合, 使型腔模电火花加工平动工艺日趋成熟。

约在 1960 年, 苏联科学院中央电工实验室首先研制出第一台低速单向走丝靠模仿形电火花线切割机床, 以后二三年中, 从靠模仿形又发展到光电跟踪。1962 年前后瑞士阿奇公司开始研究电火花线切割加工的数字控制技术, 五六年后达到了实用化程度。我国科学院电工研究所于 1964 年研制出光电跟踪电火花线切割机床, 较大地提高了切割速度、缩短了制造周期并降低了加工成本, 增加了切割更复杂型面的可能性, 提高了工艺的适应性和“柔性”。

第一代电火花线切割机床的走丝速度很低, 在煤油介质中切缝较窄, 排屑不畅, 所以切割速度也很低, 只有 $2\sim 5\text{mm}^2/\text{min}$, 且电极丝一次性使用也很浪费。我国上海电表厂张维良工程师对此进行了创新性改进, 在阳极机械切割工艺和线锯机床的基础上, 采用了往复、高速走丝和乳化液为加工介质的方式, 使切割速度获得成倍、数十倍提高, 且可进行大厚度切割。此后上海机床电器厂又和复旦大学数学系联合研制出线切割简易数控系统, 后经用户、生产厂、科研院所、高校等技术工人和科技人员多方面改进和完善, 形成了具有我国自主知识产权和中国特色的数控高速往复走丝电火花线切割机床。

目前电火花加工机床的生产企业在发达国家主要分布在日本及欧洲地区, 而美国及美洲地区很少, 其主要原因是因为日本在第二次世界大战中基础工业设施遭受到毁灭性的重创, 因此对于电火花加工这种新型的加工方式十分愿意接纳, 同时也投入了相当的精力促成了电火花加工业在日本的发展; 同样在欧洲电火花加工业借助于前苏联研究成果也迅速进行了推广; 而对于美国而言, 由于第二次世界大战并没有触及到其工业基础, 因此直到现在对电火花加工产业的接受仍然需要一定的过程。

在我国经济持续发展的背景下, 作为特种加工最重要工艺方法的电火花加工在生产中已日益获得广泛的应用, 发展极为迅速, 在航空航天、军工、家电、建材等相关行业尤其是乡镇工业和家庭作坊式个体企业获得了广泛的应用, 应用领域已经从传统的模具加工及特殊零件的试制加工发展到中小批量零件的加工生产。近年来电火花加工机床产量有了飞速的增长。20 世纪末我国各种电火花加工机床年总产量在 1 万台左右, 目前其年产量已经增长到 5 万台左右, 产量及拥有量均居世界前列。其中电火花线切割机床(WEDM)产量占

到电火花加工机床的90%以上,已成为国内外冲压模具制造及零部件生产中不可缺少的重要装备。在我国电火花线切割机床分为高速往复走丝电火花线切割机床(HSWEDM)和低速单向走丝电火花线切割机床(LSWEDM)两大类,HSWEDM有部分产品具有多次切割功能,业内习惯称这种具有多次切割功能的HSWEDM为“中走丝”机床。目前电火花加工机床的生产企业主要集中在江苏、浙江及北京地区,但绝大部分企业生产的产品仍然是技术含量低、售价和利润也很低的低端高速往复走丝电火花线切割机床,高档及精密的低速单向走丝电火花线切割机床和数控电火花成形机床还需要从国外进口。

1.2 特种加工的分类

特种加工的分类目前还没有明确的规定,一般按能量来源及形式以及作用原理进行划分,常用特种加工方法分类见表1-1。

表1-1 常用特种加工方法分类

特种加工方法		能量来源及形式	作用原理	英文缩写
电火花加工	电火花成形加工	电能、热能	熔化、气化	EDM
	电火花高速穿孔加工	电能、热能	熔化、气化	EDM-D
	电火花线切割加工	电能、热能	熔化、气化	WEDM
	短电弧加工	电能、热能	熔化	
	放电诱导烧蚀加工	电能、化学能、热能	燃烧、熔化、气化	
电化学加工	电解加工	电化学能	金属离子阳极溶解	ECM
	电解磨削	电化学、机械能	阳极溶解、磨削	EGM(ECG)
	电解研磨	电化学、机械能	阳极溶解、研磨	ECH
	电铸	电化学能	金属离子阴极沉积	EFM
	涂镀	电化学能	金属离子阴极沉积	EPM
激光加工	激光切割、打孔	光能、热能	熔化、气化	LBM
	激光打标记	光能、热能	熔化、气化	LBM
	激光处理、表面改性	光能、热能	熔化、相变	LBT
电子束加工	切割、打孔、焊接	电能、热能	熔化、气化	EBM
离子束加工	蚀刻、镀覆、注入	电能、动能	原子撞击	IBM
等离子弧加工	切割(喷涂)	电能、热能	熔化、气化(涂覆)	PAM
超声加工	切割、打孔、雕刻	声能、机械能	磨料高频撞击	USM



(续)

特种加工方法		能量来源及形式	作用原理	英文缩写
化学加工	化学铣削	化学能	腐蚀	CHM
	化学抛光	化学能	腐蚀	CHP
	光刻	光、化学能	光化学腐蚀	PCM
快速成形	液相固化法	光、化学能	增材法加工	SL
	粉末烧结法	光、热能		SLS
	纸片叠层法	光、机械能		LOM
	熔丝堆积法	电、热、机械能		FDM

特种加工在发展过程中也形成了某些介于常规机械加工和特种加工工艺之间的过渡性工艺。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。这些加工方法是在切削加工的基础上发展起来的,目的是改善切削的条件,基本上还属于切削加工。在特种加工范围内还有一些属于减小表面粗糙度或改善表面性能的工艺,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,激光表面处理、改性,电子束曝光,离子镀、离子束注入掺杂等。

随着半导体大规模集成电路生产发展的需要,上述提到的电子束、离子束加工就是近年来提出的超精微加工,即所谓原子、分子单位的纳米加工方法。

此外,还有一些不属于尺寸加工的特种加工,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结等,本书只进行简单介绍。

电火花、电解、激光、超声、电子束、离子束、快速成形及微细特种加工等加工方法的综合比较见表 1-2。

表 1-2 常用特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) 平均/最高	加工尺寸精度/mm 平均/最高	加工表面粗糙度 Ra/ μ m 平均/最高	主要适用范围
电火花成形加工	导电金属材料	0.1/10	30/3000	0.03/0.003	10/0.04	1. 穿孔加工:加工各种冲模、挤压模、粉末冶金模、各种异形孔及微孔等 2. 型腔加工:加工各类型腔模及各种复杂的型腔零件 3. 约占电火花机床总数的 20%
电火花高速穿孔加工		30/50	30~60 mm/min ^①	孔径 ϕ 0.02~3		1. 线切割穿丝预孔 2. 深径比很大的小孔,如喷嘴等 3. 约占电火花机床总数的 5%