

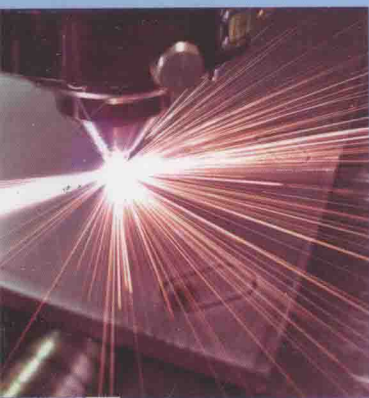


“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材配套用书

Non-Traditional Machining Experiment

特种加工实验教程

刘晋春 © 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材配套用书

特种加工实验教程

主 编 刘晋春
副主编 郭永丰 白基成
参 编 杨晓冬 王笑香 刘 华 凡银生
主 审 刘永红

机械工业出版社

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材的配套辅助教材。

本书内容包括电火花加工,电火花线切割加工,电化学加工,激光加工,电子束与离子束加工,超声加工,快速成形(3D打印),其他特种加工,特殊、复杂、典型、难加工零件的特种加工和精密微细加工的教学实验及科研实践,每个实验均由实验目的、实验器材及设备、实验内容及步骤、思考题及讨论题构成。此外,本书还讲解了教学实验及科研工作中仪表和仪器的使用,最后的附录列出了国内外常用特种加工机床的相关参数。本书的编写目的是让读者理论联系实际,提高实践动手能力。

本书可供本科机械专业的师生使用,对从事特种加工、电加工、模具加工的工程技术人员同样具有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

特种加工实验教程/刘晋春主编. —北京:机械工业出版社,2014.9
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材配套用书
ISBN 978-7-111-47643-6

I. ①特… II. ①刘… III. ①特种加工-实验-高等学校-教材 IV.
①TG66-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第183615号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘小慧 责任编辑:刘小慧 李超 任正一

版式设计:赵颖喆 责任校对:张薇

封面设计:张静 责任印制:刘岚

北京云浩印刷有限责任公司印刷

2014年11月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11印张·257千字

标准书号:ISBN 978-7-111-47643-6

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《特种加工》第6版的配套用书，是主教材主要编者根据30余年积累的特种加工教学经验和科研工作的实践经验编著而成的。本书对教学实验有指导作用，对科研实践也具有重要的参考价值。

本书中的每一个实验内容都包括实验目的、实验器材和设备、实验内容和步骤、思考题和讨论题，以启发和培养学生创新性及其科学发展观的思维能力。实验中努力贯彻特种加工课程中理论联系实际的宗旨，培养和提高学生在教学实验和科研工作中的动手和实践能力。

书中许多实验本着因陋就简、就地取材、自己动手的精神，教会师生自制教具和实验设备，以培养勤俭节约的优良作风。

本书编写的教学实验基本上对应于《特种加工》第6版教材的内容，分12章，共32个实验。

在第12章，编入了教学实验和科研工作中常用的万用表、示波器、电感测微仪和工具显微镜的基本使用方法，以期提高学生在教学实验和科研实践中正确使用仪表仪器的能力，同时尽量避免损坏仪表仪器。

由于各校在实验机床设备方面的条件并不一样，甚至存在很大差异，因此在本书中往往只填任意型号的特种加工（电火花加工）机床设备，为此书末附录中选登了国内外主要的特种加工、电加工生产商生产的主要机床（设备）及其附件等产品的相关参数，以供各院校参考或选购。

本书由哈尔滨工业大学刘晋春教授、博导任主编，郭永丰、白基成教授、博导任副主编，参加编写的有杨晓冬教授、博导，博士研究生凡银生及王笑香工程师和刘华工程师。全书由中国石油大学（华东）刘永红教授、博导主审。

由于时间仓促，收集到的资料有限，书中可能存在疏漏与不妥之处，敬请广大读者批评指正，我们将在第2次印刷及再版中改进。

联系方式：电子邮箱 LIULLL@HIT.EDU.CN

编 者

本书所用主要符号

A 振幅, 加工面积	q_g 气化热
a 加速度, 离子的有效质量分数, 热扩散率	q_r 熔化热
B 宽度, 分隔符	R 电阻, 半径
b 宽度	S 火花放电间隙, 顺圆, 位移量
C 电容, 热容, 双曲线常数	S_B 最佳火花放电间隙
c 比热容, 波速	S_m 物理因素造成的机械间隙
C_B B 的浓度或称 B 的物质的量浓度	T 温度
D, d 直径	T_f 沸点
E 光子能量, 原子能级	T_r 熔点
e 电子电荷量	t 时间
F 偏差值, 作用力, 法拉第常数	t_c 充电时间
f 脉冲频率, 焦距	t_d 脉冲电压击穿延时时间
G 重力, 计数方向	t_e 放电时间, 电流脉冲宽度 (简称电流脉宽)
g 重力加速度	t_i (电压) 脉冲宽度 (简称脉宽)
H 磁场强度, 高度	t_0 脉冲间隔 (简称脉间)
h 深度, 高度, 厚度, 普克朗常数	t_p 脉冲周期
I 电流	u 电压
I_0 光强度	u_d 火花击穿电压
i 电流密度	u_e 火花放电维持电压
i_a 切断电流密度	\bar{u}_e 平均电压
i_e 放电电流, 加工电流	\hat{u}_i 开路电压, 空载电压或脉冲峰值电压
\hat{i}_e 脉冲电流幅值, 或称脉冲峰值电流	U 电位差
\bar{i}_e 平均放电电流	U_a 阳极电压
J 能量密度, 计数长度	U_c 阴极电压
K 质量电化学当量, 传热系数, 某种常数,	U_R 欧姆电压
腐蚀系数	U' 平衡电极电位
K_a, K_c, K_u 与工艺参数有关的常数	U^0 标准电极电位
K_R 与材料有关的常数	V 体积
L 电感, 长度	v 进给速度
l 长度	v_A 加工速度 (以长度表示)
m 质量	v_a 正 (阳) 极蚀除速度
\bar{P} 平均功率	v_c 阴极进给速度, 负 (阴) 极蚀除速度
p 压力, 能量密度	v_d 工具电极的进给速度
q 蚀除量, 流量	v_{dA} 空载时工具电极的进给速度
q' 单个脉冲蚀除量	v_{d0} 短路时工具电极的回退速度
q_a 正极 (阳极) 蚀除量	v_E 工具损耗速度
q_c 负极 (阴极) 蚀除量	v_m 加工速度 (以质量表示)
q_g 气体流量	v_g 工件蚀除速度
q_l 液体流量	v_n 法向进给速度

- v_s 走丝速度
- v_w 加工速度 (以体积表示)
- W 宽度, 能量, 功,
- W_M 单个脉冲能量
- Z 加工指令, 加工余量, 气液混合比
- Δ 加工间隙 (一般指电解加工)
- Δ_a 切断间隙 (电解加工)
- Δ_b 端面平衡间隙 (电解加工)
- Δ_f 端面间隙 (电解加工)
- Δ_n 法向间隙 (电解加工)
- Δ_0 起始间隙 (电解加工)
- Δ_s 侧面间隙 (电解加工)
- α 落料角, 两轴间夹角
- β 刃口斜度
- δ 放电间隙
- η 效率, 电流效率
- θ 工具电极的相对损耗, 角度, 旋转运动, 发散角, 入射角
- λ 波长, 热导率
- λ_0 中心波长
- $\Delta\lambda$ 光源的谱线宽度
- ρ 密度, 电阻率
- σ 电导率
- τ 时间常数
- ω 体积电化学当量, 角频率
- φ 有效脉冲利用率

目 录

前言

本书所用主要符号

第1章 概论	1
实验 1-1 特种加工样品观摩性实验	1
第2章 电火花加工教学实验及科研实践	9
实验 2-1 单脉冲电火花放电实验	9
实验 2-2 RC 电路脉冲电源制作和电火花加工实验	12
实验 2-3 电火花加工的极性效应和电极损耗规律实验	15
实验 2-4 电火花加工小孔、异形孔、多孔、坐标孔实验	18
实验 2-5 电火花加工浅花纹模、小型腔表面实验	21
实验 2-6 电火花加工表面粗糙度值样板实验	24
实验 2-7 电火花强化金属表面实验	28
实验 2-8 电火花加工时工具电极加装工频振动系统实验	31
实验 2-9 电火花加工小孔时加装工具电极回转装置实验	33
实验 2-10 电火花加工小孔时加装工具电极超声振动系统及电火花超声复合加工实验	36
第3章 电火花线切割加工教学实验及科研实践	39
实验 3-1 数控电火花线切割编程和加工实验	39
实验 3-2 数控电火花线切割扫描输入加工实验	43
实验 3-3 数控电火花线切割分度加工八角宝塔立体曲面实验	58
实验 3-4 数控电火花线切割手工编程加工落料凹凸冲模实验	64
实验 3-5 数控电火花线切割上下异形面实验	69
实验 3-6 优化调节电火花线切割最佳进给速度实验	72
实验 3-7 测量电火花、线切割机床实际脉宽、脉间、峰值电流实验	76
第4章 电化学加工教学实验及科研实践	79
实验 4-1 电极电位及原电池实验	79
实验 4-2 电解刻字实验	82
实验 4-3 电解加工模拟实验	84
第5章 激光加工教学实验及科研实践	88
实验 5-1 激光加工小孔实验	88
实验 5-2 激光加工方孔筛网实验	90
实验 5-3 激光打标和表面花纹蚀刻实验	93
第6章 电子束与离子束加工教学实验及科研实践	96
实验 6-1 电子束加工观摩性实验	96
实验 6-2 离子束加工观摩性实验	98
第7章 超声加工教学实验及科研实践	100
实验 7-1 超声加工小方孔、异形孔实验	100
实验 7-2 超声清洗实验	103

第8章 快速成形(3D打印)教学实验及科研实践	105
实验8-1 光敏树脂液相固化成形(SL)实验.....	105
第9章 其他特种加工教学实验及科研实践	109
实验9-1 化学腐蚀加工印制电路板及浅花纹模工具电极实验.....	109
第10章 特殊、复杂、典型、难加工零件的特种加工教学实验及科研实践	113
实验10-1 电火花加工精密小方孔筛网实验.....	113
第11章 精密微细电化学加工教学实验及科研实践	119
实验11-1 纳米级精度微细电化学加工的探索实验.....	119
第12章 教学实验及科研工作中仪表和仪器的使用	124
实验12-1 正确使用万用表.....	124
实验12-2 学会使用示波器.....	128
实验12-3 学会使用精密量具、量仪——电感测微仪和工具显微镜.....	137
附录 国内外常用特种加工机床的相关参数	142
附录1 国内厂商及其产品.....	142
附录2 国外厂商及其产品.....	159
附录3 电火花加工主要附件、配件、消耗品和外围工艺设备及其生产厂.....	163

第 1 章 概 论

概论中可以不安排实验，但建议根据具体条件事先收集一些各种特种加工的工件样品，例如电火花加工出的小冲模、小花纹模、小型腔模、小深孔样品；数控电火花切割加工的二维、三维曲面零件样品，激光加工的小孔、多孔零件；激光打标蚀刻的商标图案；高速水流切割的各种样品；快速成形加工的各类复杂曲面塑料样品等，如图 1-1、图 1-2 和图 1-3 所示。这些样品零件很容易在工厂现场和机床或模具展览会上索取收集到。或者收集一些特种加工的样品零件图形、照片，有了这些样品零件（或样品零件的图形、照片），就可以组织学生进行现场观摩讨论，让学生思考、研究和讨论这些样品和零件是用什么工艺和设备加工出来的，分析特种加工的特点，讨论各种特种加工方法的优缺点和适用范围，并将其和特种加工概论的内容结合起来，对特种加工技术建立一些初步的认识。结合以上样品，可以开设以下观摩性实验。

实验 1-1 特种加工样品观摩性实验

1. 实验目的

- 1) 深化理解特种加工的概念，了解其特点和大致应用范围。
- 2) 观摩有关特种加工的样品，大致了解其加工方法和设备，为以后学习打下基础。
- 3) 通过思考及讨论，增加对学好特种加工课程的兴趣和动力，加强学好本课程的信心。

2. 实验器材和设备

- 1) 根据需要及可能，课题组收集到的一些特种加工的样品，或本校实验室自行加工出的一些特种加工的样品。
- 2) 如本校已有一些特种加工的机床设备，则此观摩性实验也可在实验室机床旁现场进行。

3. 实验内容和步骤

- 1) 可以将特种加工样品和学生分组，指定一名组长带领本组学生围绕样品进行观摩讨论。
- 2) 指导教师对学生讨论进行启发引导，最后进行总结。
- 3) 在讨论过程中，要多启发学生进行创新性思维和符合科学发展观的论述，要教导学生爱护样品，防止损坏及丢失。
- 4) 指导教师提出一些思考题及前瞻性的讨论题，让同学们以后进一步深入思考。
- 5) 指导教师拟定一个观摩实验报告，让学生总结所见所得，写出心得体会及意见建议。

4. 思考题和讨论题

- 1) 特种加工与传统常规的切削加工、磨削加工有何相同与不同之处？
- 2) 试论述特种加工（包括所用的机床设备）的优点和缺点及适用范围。

3) 在日常生活和工作中, 哪些零件、产品是用特种加工方法加工的?



图 1-1 各种特种加工的零件样品举例

<p style="text-align: center;">奔马</p>  <p>电火花数控线切割加工的二维曲线图形：奔马，这是用图形扫描直接输入的，省去了繁琐的数控编程工作 (7)</p>	<p style="text-align: center;">电火花线切割加工的矩形截面弹簧</p>  <p>在普通线切割加工机床上增加一个数控回转工作台，夹持工件（弹簧钢管）成某倾斜角回转，电极丝作直线移动，就可切割出矩形截面弹簧。 (8)</p>
<p style="text-align: center;">和平鸽</p>  <p>这是著名画家毕加索画的和平鸽，也可用图像通过扫描仪直接输入自动编程，然后进行线切割加工。 (9)</p>	<p style="text-align: center;">红色娘子军</p>  <p>这是线切割加工的舞剧红色娘子军剧照。把图形分解成直线和圆弧后，用手工编程，穿孔纸带输入进行加工，代表我国20世纪70年代的水平。 (10)</p>
<p style="text-align: center;">红桃草花上下异形面样品</p>  <p>图中通过镜子看出的是数控线切割加工的一头红桃、一头草花、上下颠倒的异形面样品。其原理是切割前对上下端面分别进行编程，然后合成切割。 (11)</p>	<p style="text-align: center;">三叶蝶形垫圈冲压模具</p>  <p>图中三叶蝶形垫圈的凹凸压膜是在普通线切割机床上附加数控回转台加工出的。垫圈的周边是三个正弦曲线波形。 (12)</p>

图 1-1 各种特种加工的零件样品举例 (续 1)



图 1-1 各种特种加工的零件样品举例 (续 2)

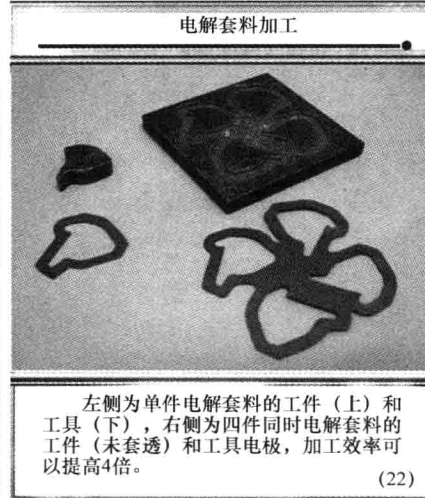


图 1-1 各种特种加工的零件样品举例（续 3）

<p>激光打标机加工的龙图案</p>	<p>水射流加工的花朵图形</p>
	
<p>用小功率的激光可以在金属或非金属的表面进行刻蚀打标记。</p> <p>(25)</p>	<p>这是用水射流加工的郁金香花形图案，材料为不锈钢，花长178mm，板厚3mm，整个切割时间约2min。</p> <p>(26)</p>
<p>水射流加工的片状零件</p>	<p>水射流加工石材</p>
	
<p>当在高压水中添加磨料和液体添加剂时，可以提高切割速度和增强防锈效果。</p> <p>(27)</p>	<p>高速高压的水从小孔中喷射出来，可切割二维图形或下料。</p> <p>(28)</p>
<p>三芯球镂空雕</p>	<p>三叶螺旋桨</p>
	
<p>这是激光断层扫描选择性液相固化（也可用粉末烧结）快速成形加工的三层空心球体（立体三芯镂空雕刻）样品。</p> <p>(29)</p>	<p>这是激光液相固化快速成形加工的三叶螺旋桨模型。</p> <p>(30)</p>

图 1-1 各种特种加工的零件样品举例（续 4）

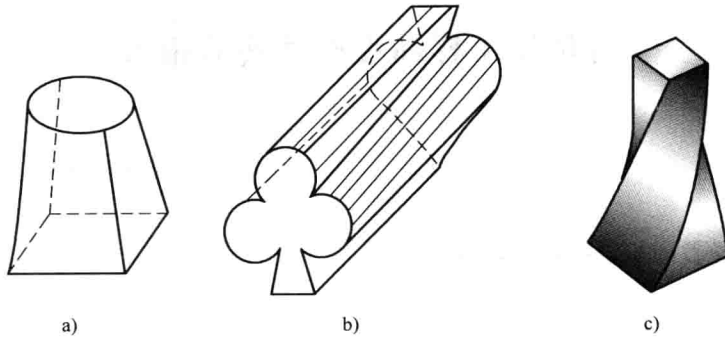


图 1-2 线切割加工的上下异形面和上下旋转面工件

a) “天圆地方”上下异形面 b) 红桃草花异形截面 c) “天旋地转”的四方锥台外形

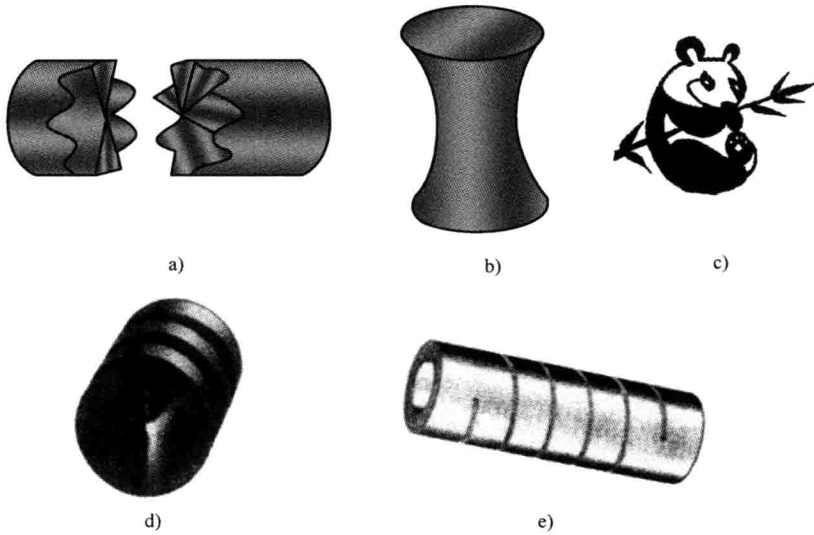


图 1-3 线切割加工样品

a) 端面为正弦曲面体的外形 b) 双曲面体外形 c) 熊猫啃竹子
d) 螺旋曲面体外形 e) 具有窄螺旋槽的挠性接头外形

特种加工样品观摩性实验报告

班级：

姓名：

学号：

实验日期：

年 月 日

实验所在学校及地点：

具体可由指导教师拟定报告及表格内容。

第 2 章 电火花加工教学实验及科研实践

实验 2-1 单脉冲电火花放电实验

1. 实验目的

- 1) 了解如何产生单个电脉冲。
- 2) 观察单个脉冲在空气中和水等液体中火花放电的现象。
- 3) 观察正、负极金属表面遭受单个电火花蚀除后的情况。

2. 实验用具和设备 (实验条件)

- 1) 规格为 $0.1\mu\text{F}$ 、 $1\mu\text{F}$ 、 $5\mu\text{F}$ 、 $10\mu\text{F}$ ，耐压大于 300V 的电容器。
- 2) 工作电流为 1A，耐压 500V 的整流二极管。
- 3) 废电子打火机或煤气炉电子点火器。
- 4) 放大镜、工具显微镜或生物显微镜。
- 5) 导线及鳄鱼夹等。
- 6) 指针式万用表。

注：也可采用 HIT-Spark 型便携式电火花加工机床（见附录 1 末）。该机床上有附加的 CCD 等，可用以直观地观察电火花加工时的光、声和电蚀产物小气泡及炭黑扩散等现象。

3. 实验内容和步骤

1) 按动废电子打火机或煤气炉电子点火器，使其发出单个或连续的电脉冲，产生高压、小电流，击穿空气间隙而火花放电，并发出“拍、拍”的放电声。很难用万用表测量其放电击穿电压及极性，需用示波器进行测量。

2) 用导线及鳄鱼夹分别夹住电容器的两端，然后用 220V 的交流电源经二极管单向整流后向电容器充电，如图 2-1 所示。

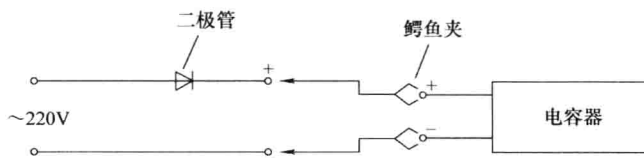


图 2-1 对电容器充电示意图

3) 将夹持电容器两端的鳄鱼夹接触短路放电，观察其放电效果，电容量越大，其放电爆炸声和火花也越大越亮。

4) 将上述充电后的鳄鱼夹两端浸入纯水或蒸馏水或煤油或豆油中短路放电，观察比较与在空气中放电的异同，用放大镜或显微镜观察鳄鱼夹上放电蚀除凹坑的大小及形貌。