

高 等 学 校 教 材

材料加工实验教程

夏 华 主 编



化学工业出版社

高等学校教材

材料加工实验教程

夏 华 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是为加强材料加工专业实验教学而编写的一本专业实验教材, 包含基本实验和提高实验两部分。

基本实验包含 13 个实验, 内容包括与专业课程联系较为紧密的板料成形、体积成形、塑料成形和模具加工等方面实验教学。提高实验包含 6 个实验, 使学生了解本专业模具数字化制造技术、激光扫描与反求技术等先进技术。

本书适宜材料专业本科学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

材料加工实验教程 / 夏华主编. —北京: 化学工业出版社, 2007.7

高等学校教材

ISBN 978-7-122-00594-6

I. 材… II. 夏… III. 工程材料-加工-实验-高等学校-教材 IV. TB3-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 082782 号

责任编辑: 邢 涛 刘丽宏

文字编辑: 颜克俭

责任校对: 顾淑云

装帧设计: 韩 飞

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 装: 北京兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 9¼ 字数 227 千字 2007 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: 19.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书是为了加强材料加工专业实验课程教学而编写的一本专业实验教材，内容包括基本实验和提高实验两部分。

基本实验部分包括 13 个实验，学生必做，共计 24 学时，内容包括与专业课程联系较为紧密的板料成形、体积成形、塑料成形和模具加工等方面的实验教学。基本实验的目的是使学生熟悉和掌握科学实验和科学研究的基本方法，提高学生对所学专业知识的综合应用能力，努力培养高素质应用型专业技术人才。

提高实验部分包括 6 个实验，学生选做，共计有 48 个学时的实验，学生根据教学大纲的要求，选做其中的部分实验，在第 8 学期 1~6 周内完成。提高实验的目的是使学生了解模具数字化制造技术、激光扫描与反求技术和快速原型技术等先进技术，使学生熟悉和掌握本专业领域的分析软件、造型软件和加工软件的应用以及大型、精密先进设备的应用，进一步拓展学生知识领域，提高学生的就业能力和就业水平。

本教程是在重庆工学院材料加工实验室全体人员的共同努力下完成的，由夏华主编，陈元芳、代兵副主编，胡红军、陈康、刘春、黎勇、盛旭敏、刘峰参编，全书由夏华统稿。本书在编写过程中得到了重庆工学院材料加工专业广大同仁的大力支持，在此表示感谢。

由于时间较紧，加之作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作 者
2007 年 5 月

目 录

上篇 基本实验

实验一	电火花成形与线切割加工实验	1
实验二	金属板料成形性能实验	7
实验三	冲裁间隙与冲裁件质量和冲裁力实验	10
实验四	模具结构与拆装实验	17
实验五	曲柄压力机结构与拆装实验	25
实验六	热塑性塑料流变性能测试实验	33
实验七	塑料中空吹塑成型实验	36
实验八	热塑性塑料的注射成型实验	39
实验九	圆环镦粗法测定摩擦系数实验	46
实验十	造型材料的选用及原材料性能实验	49
实验十一	金属熔炼炉前检测及铸造性能实验	56
实验十二	铸造热应力动态测定实验	62
实验十三	压力铸造工艺及设备控制实验	64

下篇 提高实验

实验十四	Moldflow 模拟分析与注射成型工艺实验	71
实验十五	DEFORM 与体积成形技术综合实验	85
实验十六	Dynaform 板料成形模拟与冲压工艺分析综合性实验	93
实验十七	扫描反求与三维建模技术	110
实验十八	三维建模与 RP 技术	124
实验十九	模具数字化制造技术	132

上篇 基本实验

实验一 电火花成形与线切割加工实验

一、实验目的

本实验是在学生学习了《模具制造技术》或《特种加工技术》课程后，培训学生灵活应用电火花成形加工知识和电火花线切割知识的一项综合实验。

二、实验原理

1. 电火花成形加工

(1) 电火花成形加工的基本原理

早在 19 世纪，人们就发现电器开关的触头在使用过程中会烧损，电火花加工正是基于这种脉冲放电的蚀除原理，如图 1-1 所示。放电蚀除的物理过程是电磁学、热力学、流体力学等的综合作用过程，大致可分为电离、放电、热熔、金属抛出和消电离等阶段。

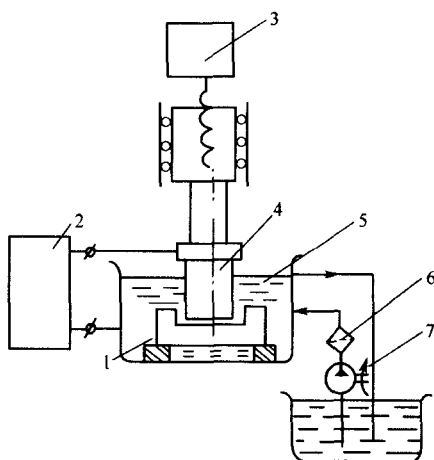


图 1-1 电火花加工原理

1—工件；2—脉冲电源；3—自动进给装置；4—工具；5—工作液；6—过滤器；7—工作液泵

工件 1 与工具 4 分别连接脉冲电源的两个输出端。脉冲电源 2 使工具电极和工件间经常保持一个很小的放电间隙。电极的表面是凹凸不平的，当脉冲电压加到两电极上时，当时条件下某一相对间隙最小处或绝缘强度最低处的工作介质将最先被电离为负离子和正离子而被击穿，形成电通道，电流随即剧增，在该部产生火花放电，瞬间高温使工件和工具表面都被蚀除掉一小部分金属，单个脉冲经过上述过程，完成了一次脉冲放电，而在工件表面留下一

个带有凸边的小凹坑，这样以很高频率连续不断地重复放电，工具电极不断向工件进给，就可将工具的形状复制在工件上，加工出所需的零件。

(2) 基本概念

脉冲电源：电火花加工为瞬间放电的腐蚀加工，需要图 1-2 的脉冲电源形式， t_i 为脉冲宽度， t_0 为脉间宽度， t_p 为脉冲周期， u_i 为空载电压。

正极性加工：工件电极接脉冲电源正极的加工方式。

负极性加工：工件电极接脉冲电源负极的加工方式。

加工速度：单位时间内蚀除金属的质量或体积。

电极相对损耗：工具电极的蚀除速度与工件电极的蚀除速度之比值。不同的极性、不同的脉冲速度，电极的相对损耗不同，如图 1-3。正极性加工，相对电极损耗中等；负极性加工，长脉冲时相对电极损耗小，短脉冲时相对电极损耗大。

(3) 放电蚀除的极性效应

在电火花加工过程中，无论是正极或负极，都会受到不同程度的腐蚀，但往往两极的腐蚀速度是不一样的，人们把这种效应叫作极性效应。在生产中，通常把工件接脉冲电源正极的加工叫正极性加工，反之叫负极性加工。

产生极性效应的主要原因是：正负两极表面分别受到电子和正离子的轰击，由于电子的质量轻、惯性小，容易获得很高的加速度和速度，在击穿放电的初始阶段就有大量的电子奔向正极，并轰击正极表面而蚀除金属。正离子则因质量和惯性大，启动较慢，在击穿发电的初期，大量的正离子尚未来得及到达负极表面，所以传递给负极的能量要远远小于电子传递给正极的能量。在用短脉冲加工时，负离子（电子）很快到达并轰击正极表面蚀除金属，而正离子因速度低尚未到达负极表面，此时，工件应接正极；反之，在长脉冲加工时，工件接负极。

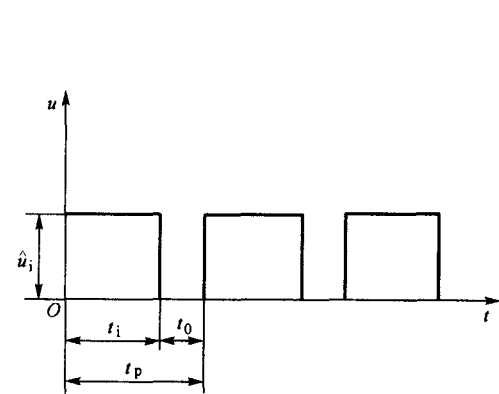


图 1-2 脉冲电源电压波形

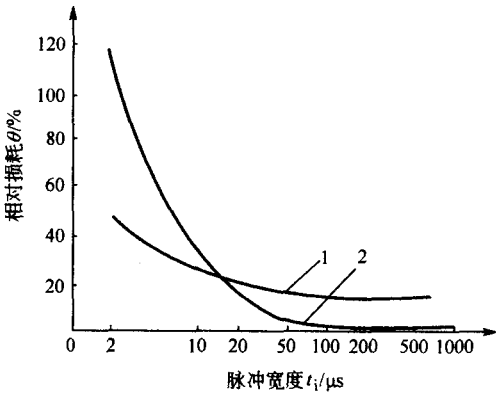


图 1-3 电极相对损耗于极性加工

1—正极性加工；2—负极性加工

(4) 电火花成形加工电极设计与制造

电极尺寸应小于工件型腔断面尺寸一个放电间隙值。尺寸计算公式为：

$$a = A \pm Kb$$
$$b = S_L + H_{\max} + h_{\max}$$

式中 a ——电极水平尺寸；

A ——型腔图样尺寸;

K ——与型腔尺寸标注方式相关的系数, 直径方向(双边) $K=2$, 半径方向(单边) $K=1$;

b ——电极单边缩量(包括平动量);

S_L ——电火花加工时的单边加工间隙;

$H_{\max}$ ——前一规准加工时表面微观不平度最大值;

$h_{\max}$ ——本规准加工时表面微观不平度最大值;

$\pm$ ——按电极的缩放原理选择。

实验例图 1-4 为塑料模凹模、型腔尺寸以及设计电极的结构尺寸。选机床平动量为 0.15mm, 放电间隙为 0.05mm。

根据电极设计相关知识, 电极尺寸如图 1-5 所示。

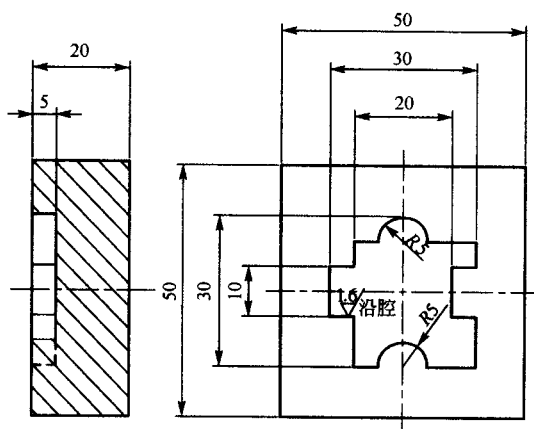


图 1-4 塑料模凹模、型腔尺寸以及设计电极的结构尺寸

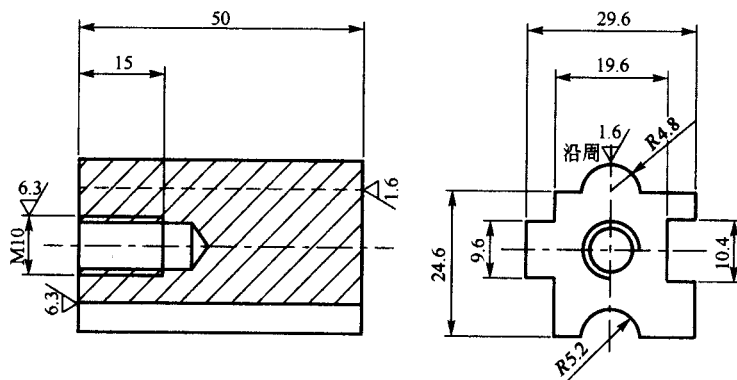


图 1-5 电极尺寸

(5) 电火花成形加工电规准选择

在电火花成形加工中, 电规准主要有电流、电压、间隙、脉冲宽度等。粗加工时, 选用长脉冲、大电流。精加工时, 选用短脉冲、小电流。不同的加工材质, 电规准选择也不一样。图 1-6 是脉冲宽度、电流峰值与表面粗糙度。图 1-7 为脉冲宽度、电流峰值与单边间隙。平动功能有利于提高加工件的表面粗糙度。

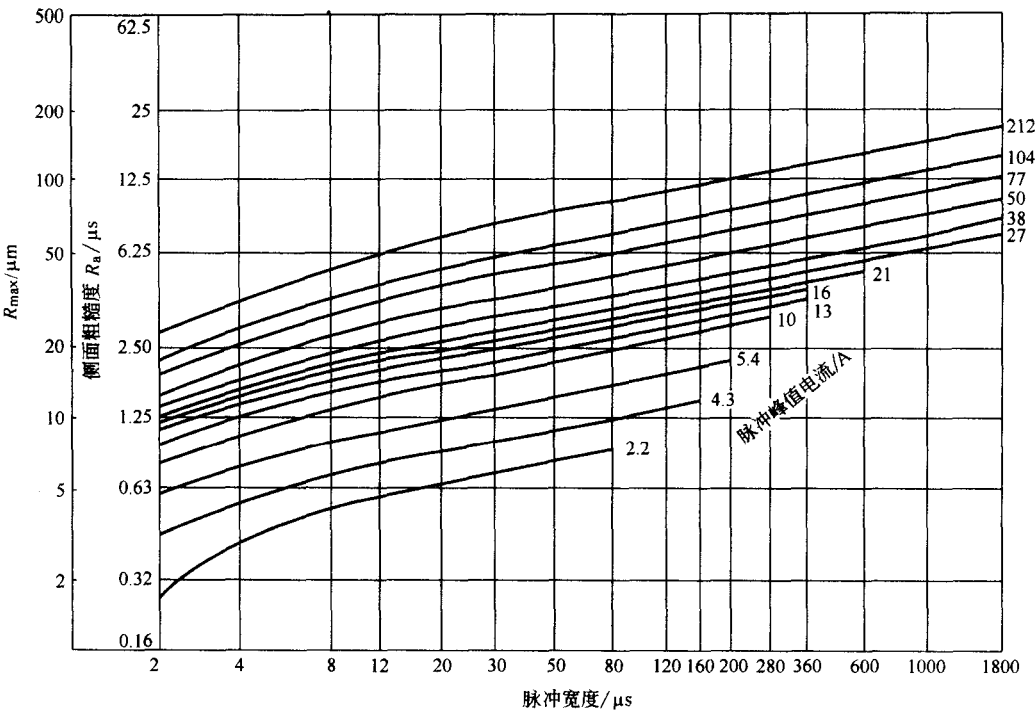


图 1-6 表面粗糙度与脉冲宽度和脉冲峰值电流的关系曲线

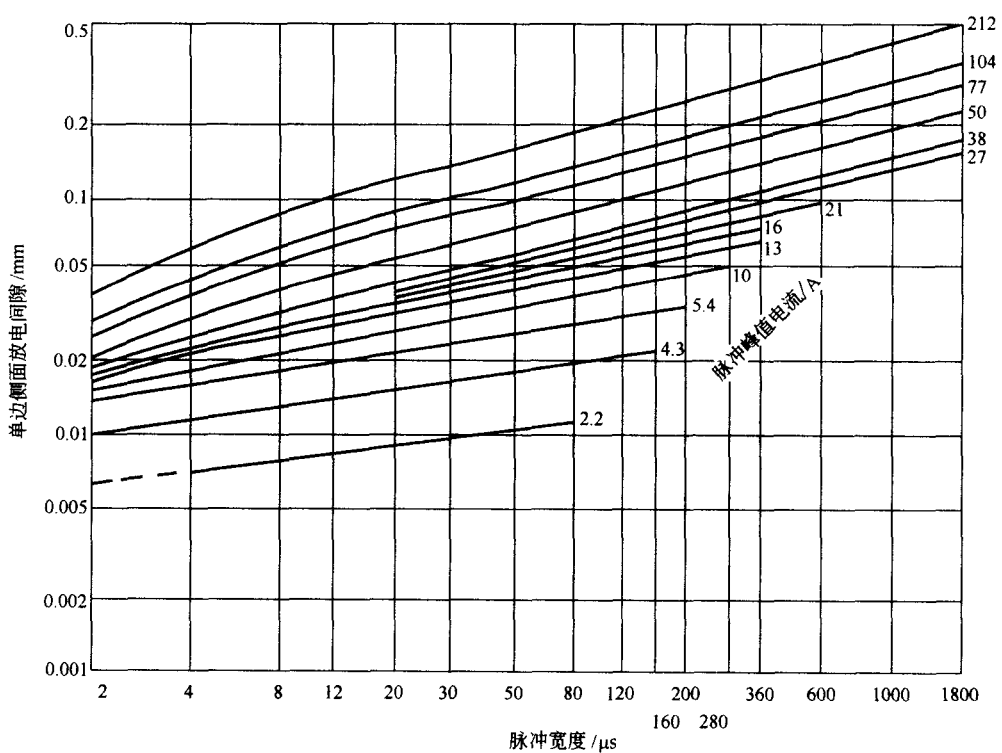


图 1-7 单边间隙与脉冲宽度和脉冲峰值电流的关系曲线

2. 电火花线切割加工

(1) 线切割加工原理

电火花线切割与电火花成形加工原理相同, 利用电极间的放电火花产生高温, 使金属熔化进行加工, 不同的是这里的工具电极是丝状的, 工作原理如图 1-8 所示。

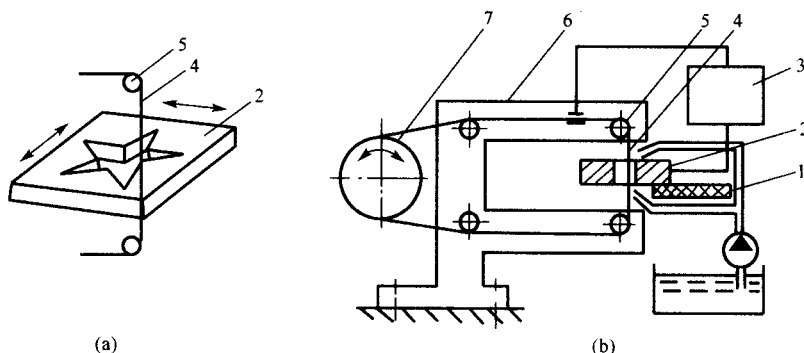


图 1-8 电火花线切割原理

1—绝缘板; 2—工件; 3—脉冲电源; 4—钼丝; 5—导向轮; 6—支架; 7—储丝筒

(2) 3B 程序编写

线切割加工程序可用 G 代码编写, 也可用 3B 格式编写, 目前应用较多的还是 3B 格式, 下面介绍 3B 编程方法。

3B 编程格式: BxBjBjGZ。

B 为分隔符号。因为 x 、 y 、 j 均为数字, 需用分隔符将其分开。

x 、 y 为加工要素坐标值, 单位 μm 。加工圆弧时, x 、 y 为圆弧起点坐标, 坐标原点为圆心。加工直线时, x 、 y 为直线终点坐标, 坐标原点为直线起点。 x 、 y 可同时放大或缩小。

j 为计数长度, G 为计数方向。加工直线时, 以起点为原点, 若终点坐标 $x > y$, 则取 $j = x$, G 为 G_y , 若终点坐标 $x < y$, 则取 $j = y$, G 为 G_x 。加工圆弧时, 以圆心为坐标原点, 若终点坐标 $x > y$, 计数方向取 G_y , 计数长度为圆弧在 y 轴上投影总和; 终点坐标 $x < y$, 计数方向取 G_x , 计数长度为整个圆弧在 x 轴上的投影总和。

Z 为加工指令。共 12 种。加工直线时, 以起点为坐标原点, 若直线在 I、II、III、IV 象限, 分别记作 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 。加工圆弧时, 以圆心为坐标原点, 圆弧起点在 I、II、III、IV 象限, 若顺时针加工, 分别记作 SR_1 、 SR_2 、 SR_3 、 SR_4 , 若逆时针加工, 分别记作 NR_1 、 NR_2 、 NR_3 、 NR_4 。

以图 1-5 为例, 编写 3B 加工程序。假定线切割坯料的尺寸为 32 宽的条料, 厚度为 50, 起点在工件左下角距离边缘 A 处, 沿轮廓逆时针切割。分析计算得出各段的尺寸如图 1-9 所示。程序为:

```
BBB003200GYL2;
BBB004600GXL1;
B5195B20B010000GYSR2;
BBB009600GXL1;
BBB009600GYL2;
BBB005000GYL3;
```

BBB010400GYL2;
 BBB005000GXL1;
 BBB004600GYL2;
 BBB010000GXL3;
 B4795B200B010000GYNR4;
 BBB005000GXL3;
 BBB005000GYL4;
 BBB005000GXL3;
 BBB009600GYL4;
 BBB005000GXL1;
 BBB010000GYL4;
 BBB003200GYL4.

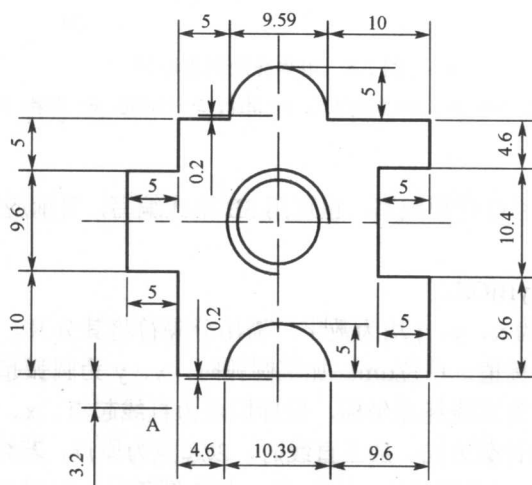


图 1-9 工件各段的尺寸

三、实验器材

SF200 精密电火花成形加工机床, 北京阿奇夏米尔工业电子有限公司制造, 如图 1-10 所示。

DK7740 线切割机床, 上海兆铭机床公司制造, 如图 1-11 所示。

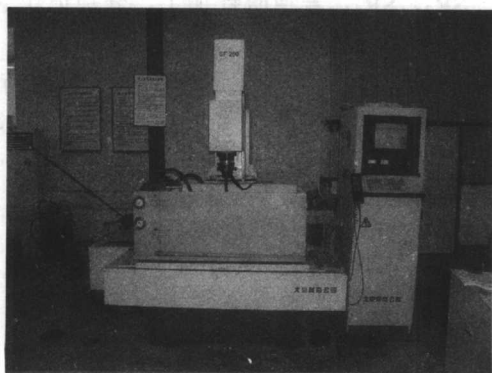


图 1-10 SF200 精密电火花成形加工机床

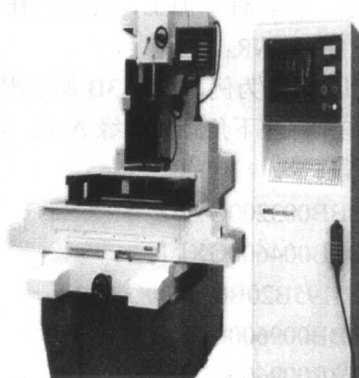


图 1-11 DK7740 线切割机床

紫铜电极材料, 尺寸 $\phi 20\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。

调质 45 钢板, 尺寸 $50\text{mm} \times 100\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。

手套、面纱、游标卡尺等。

四、实验方法与步骤

1. 电火花线切割加工

- ① 准备紫铜电极一件, 根据资料计算编写 3B 加工程序;
- ② 将编写好的加工程序认真校核, 输入电火花成形加工设备;
- ③ 选择线切割加工电规准, 装夹校正工件, 使钼丝处在程序的起点;
- ④ 开动机床, 进行加工, 在加工过程中, 认真观察加工过程;
- ⑤ 加工过程分为三个阶段, 第一阶段, 选用大电流加工; 第二阶段, 选用中等电流加工; 第三阶段, 选用小电流加工。每一阶段的加工长度为全长的 $1/3$, 并记录下每一阶段的加工时间和加工电流。

2. 电火花成形加工

- ① 准备好工件电极和工具电极, 启动机床, 使机床回到自身原点;
- ② 装夹校正工件, 确定加工原点;
- ③ 选择加工规准 1, 脉冲宽度 $200\mu\text{s}$, 脉冲间隙 $50\mu\text{s}$, 加工电流 10A, 加工 15min;
- ④ 选择加工规准 2, 脉冲宽度 $5\mu\text{s}$, 脉冲间隙 $10\mu\text{s}$, 加工电流 1A, 加工 15min;
- ⑤ 选择加工规准 3, 脉冲宽度 $20\mu\text{s}$, 脉冲间隙 $10\mu\text{s}$, 加工电流 5A, 加工 15min;
- ⑥ 选择加工规准 4, 脉冲宽度 $5\mu\text{s}$, 脉冲间隙 $10\mu\text{s}$, 加工电流 5A, 加工 15min;
- ⑦ 认真观察加工过程, 在每一个加工规准的后 5min 加入平动功能;
- ⑧ 测量并记录每一加工规准的加工零件深度、电极重量差、表面粗糙度等;
- ⑨ 加工结束, 关闭机床。

五、实验报告要求

实验报告的通用格式, 并应包含如下内容。

- ① 线切割加工三个不同阶段的表面质量, 计算出不同阶段的切割生产效率 (单位时间的切割面积)。
- ② 不同的电参数对加工质量、加工效率等的影响。
- ③ 分析比较 4 种不同的电火花成形加工规准蚀除效率, 加工质量。
- ④ 分析长脉冲加工和短脉冲加工的极性效应。

六、思考题

- ① 为什么粗加工用长脉冲, 精加工用短脉冲?
- ② 电火花加工能否加工非导电材料? 不导电的材料通常采用哪些特种加工方法?

实验二

金属板料成形性能实验

一、实验目的

- ① 掌握采用不同的试验条件得到板料拉深或胀形成形工程中拉深力-行程、拉深力-速度, 胀形力-行程、胀形力-速度等变化关系和变化曲线, 绘制并分析低碳钢板料实验曲线。
- ② 了解拉深和胀形过程中拉深系数 (或毛坯直径)、润滑、压边力、凸凹模间隙、拉深高度等因素对拉深件质量的影响, 了解胀形中金属流动方向。

③ 了解微机控制电液伺服压力试验机、材料杯凸试验机的工作原理与基本操作。

二、实验原理

板料加工阶段需要的加工的性能叫做冲压性，一般包括冲剪性、成形性和定形性三个方面，其中成形性是板材适应各种加工的能力，多数板料零件都需要成形工序，使平板毛料变成一定形状的零件。

板料成形方法很多，所以研究时可对成形方法进行分类，一般按材料再成形过程中所承受的变形方式来分类，可分为：弯曲变形、压延变形、胀形（还包括拉形、局部成形）、拉深成形（包括单向拉深、翻边、凹弧翻边等）、收缩变型（包括收边、管子缩颈、受口、凸翻边等）、体积成形（包括旋薄、变薄压延、喷丸成形、压印等）。

一般所谓的板料的成形性中最为重要的是成形极限的大小，板料成形过程中存在两种成形极限，一种是起皱，另一种是破裂。成形极限可以用“发生起皱前，材料能承受的最大变形程度”来表示，可理解为板料在发生破裂前能够得到的变形程度，也就是普通所谓的“塑性”。由于板料成形性能随变形程度、牌号、成形方式、生产方式等因素影响，所以评定一种板料成形性能的指数既要把各种主要因素考虑进去又要尽量少。

板料的成形性能，目前的主要研究是拉深和胀形两种方式。

对金属薄板冲压成形时，可对某些材料特性或工艺参数提出要求，它们统称为特定成形性能指标。

评定金属薄板的成形等级时，可对某种模拟的成形性能指标提出要求确定的试验有：

- ① 胀形性能指标；
- ② “拉深+胀形”复合成形性能；
- ③ 拉深性能指标。

三、实验器材

- ① 试验冲压成形模一副；材料杯凸试验机。
- ② 微机控制电液伺服压力试验机。
- ③ 胀形冲头一个、氮气弹簧数个、游标卡尺、棉纱、手套、煤油等。

四、实验方法与步骤

- ① 准备实验用工具和样件；
- ② 检查设备，了解设备使用方法，计算板料理论实验数据。

压边力的计算如下所述。

用预试验方法确定的压边力应大于抑制压边圈下面试样材料起皱的最小压边力 F_{cmin} ，但不大于 $1.75F_{\text{cmin}}$ 。

可以用经验公式估算最小压边力 F_{cmin} ：

$$F_{\text{cmin}} = 0.1F_{\text{pmax}} \left(1 - \frac{18t_0}{D_0 - D_d} \right) \left(\frac{D_0}{d_p} \right)^2 \quad (2-1)$$

$$F_{\text{pmax}} = 3(\sigma_b + \sigma_s)(D_0 - D_d - r_d)t_0 \quad (2-2)$$

式中 F_{pmax} ——最大拉深力，N；

t_0 ——板料基本厚度，mm；

D_0 ——试样直径，mm；

D_d ——凹模直径，mm；

- d_p ——凸模直径, mm;
 σ_b ——板料抗拉强度, Pa;
 σ_s ——板料屈服点, Pa;
 r_d ——凹模圆角半径, mm。

③ 安装拉深实验模具, 进行板料拉深性能研究, 掌握在不同成形条件下的金属板料的拉深性能。

- a. 进行预试验, 确定合理的压边力。
- b. 将经过润滑处理的试样置于试验装置中, 压紧后进行试验对试样进行拉深成形。
- c. 出现下述情况为无效试验:
 - ④ 试样破裂位置不在杯体底部圆角附近的壁部;
 - ⑤ 杯体形状明显不对称, 两个对向凸耳的峰值之差大于 2mm。
 - ⑥ 杯体口部或外表出现褶皱。

改变压边力的大小, 根据理论压边力的大小先后给板料大于、等于和小于三种情况下的拉深件的成形过程及金属流动方向; 改变成形模具圆角半径, 观察成形件的成形情况及金属流动方向, 对合适圆角半径和压边力的实验板料进行凸耳率计算。

④ 安装胀形实验模具, 进行板料胀形性能研究, 掌握在不同成形条件下的金属板料的胀形性能。

为了观察胀形件质量及金属流动方向, 测定试样的表面应变变量, 应在试样一侧表面制取一定数量的网格圆, 网格圆的数量和排列图案自行设计 (可附加某些必要的符号), 如图 2-1 所示的图案供参考。

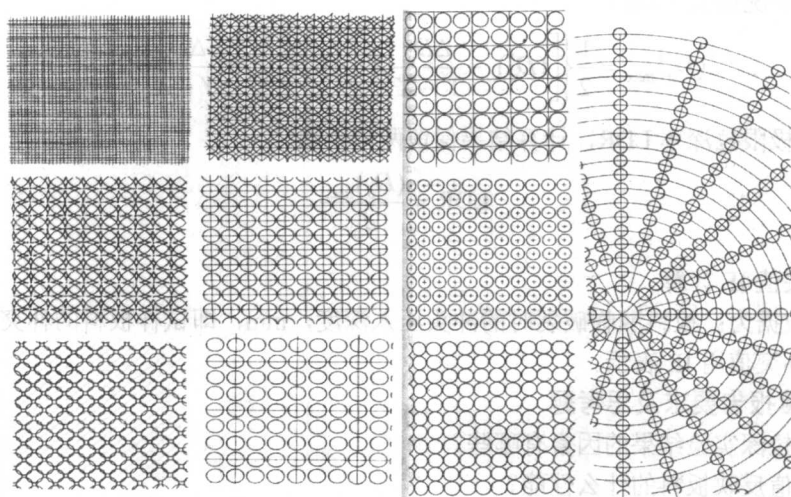


图 2-1 网格圆参考图案

- a. 进行预试验。
- b. 进行正式试验, 试验前放置试样时, 应将试样上制有网格圆的一面试样压紧, 试验时应保证试样压紧, 直到试样的凸包上某个局部产生颈缩和破裂为止。
- c. 以下情况为无效试验:
 - ① 试样的颈缩或破裂发生在凹模孔口附近;

① 使用不同宽度的试样时, 试样侧边发生撕裂;

③ 试样在拉深筋附近发生破裂;

④ 选不出合适的临界网格。

d. 取出试样进行测量。

然后, 改变压边圈 (分别是有拉深筋和无拉深筋), 进行胀形实验, 改变压边力的大小, 观察成形件的成形情况及金属流动方向。了解拉深和胀形实验的区别。

⑤ 安装胀形实验模具, 进行板料杯突实验, 进行杯突实验, 计算杯突值。

a. 试验应在规定温度下进行。

b. 试样厚度的测量应精确到 0.01mm。

c. 在试验前, 试样两面和冲头应轻微地涂以润滑油润滑。

d. 相邻两个试样的压痕中心距离不得小于 90mm, 任一压痕的中心至试样任一边缘的距离不得小于 45mm。

e. 试样放在压模和垫模之间压紧, 其压边力约为 1000kgf (10kN)。

f. 试验速度在 5~20mm/min 之间。试验结束时将速度降到接近下限, 以便使试验更精确。

g. 试验数据的提取。

⑥ 对各种实验进行比较和实验结果的汇总, 关闭实验设备, 整理实验台及设备清洁。

五、数据处理

(1) 拉深实验计算

① 最大试样直径 $(D_o)_{\max}$ 分下述两种情况确定:

a. 一组试样中, 破裂和未破裂的个数相等 (3 个) 时, 试样直径作 $(D'_o)_i$ 时, $(D_o)_{\max} = (D'_o)_i$

b. 其他情况按式 (2-3)

$$(D_o)_{\max} = \frac{1}{2} \left\{ \left[(D'_o)_i - \frac{\Delta D_o}{Y-X} X \right] + \left[(D'_o)_{i+1} + \frac{\Delta D_o}{Y-X} Z \right] \right\} \quad (2-3)$$

② 计算极限拉深率 LDR, 计算结果保留两位小数。

$$\text{LDR} = \frac{(D_o)_{\max}}{d_p} \quad (2-4)$$

(2) 杯突值 IE 计算

所测的数据为: 板料濒临破裂时的冲头压入深度, mm, 即试样板料的杯突值。应精确到 0.1mm, 杯突值用 IE 表示。

六、实验报告要求及思考题

① 影响拉深实验结果的因素有哪些?

② 杯突值反映板料的什么性能?

③ 冲压生产中, 如果遇到成形件大批破裂报废, 你将如何处理?

实验三 冲裁间隙与冲裁件质量和冲裁力实验

一、实验目的

冲裁间隙是冲压刃口类模具的重要参数, 对模具寿命、冲件质量、冲裁力等都有十分重要的影响。本实验是在学习《冲压工艺和模具设计》课程后的一个验证实验, 课时为 2 学时。

通过实验,检测冲裁零件的尺寸精度和断面质量(光亮带、断裂带、塌角、毛刺及端面斜度等)。测定不同冲裁间隙下冲裁力的大小。

二、实验原理

对于一给定的材料(即牌号、厚度、供货状态已知),若通过压力机、冲模加工成制件,要获得理想的冲裁质量,必须有一个由凸凹模刃口尺寸来加以保证的合理间隙。本实验所用材料为铝板,其厚度 $t=3\text{mm}$ 。实验冲模由一个凹模和多个刃口尺寸大小不同且能快速更换的凸模构成多组不同的冲裁间隙值。在每组间隙值下冲裁一个试件,以确定间隙对断面质量的影响。

间隙变化会影响冲裁力,间隙增大,冲裁力有所降低;间隙减小,冲裁力有所增加。本实验用电阻应变片电测法测定冲裁力的变化。

1. 冲裁过程

图 3-1 是一简单冲裁模。凸模 1 与凹模 2 都具有与工件轮廓一样形状的锋利刃口,凸、凹模之间存在一定的间隙。当凸模下降至与板料接触时,板料就受到凸、凹模的作用力,凸模继续下压,板料受剪而互相分离。

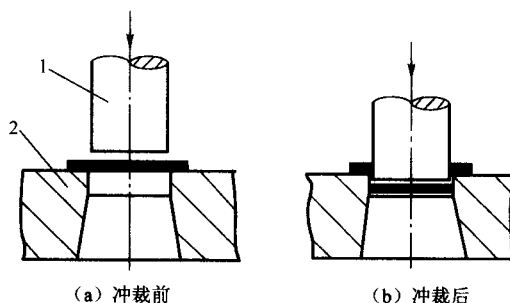


图 3-1 简单冲裁模

1—凸模; 2—凹模

板料的分离过程是在瞬间完成的。整个冲裁变形分离过程大致可分为 3 个阶段。

(1) 弹性变形阶段

冲裁开始时,板料在凸模的压力下,发生弹性压缩和弯曲。凸模继续下压,板料底面相应部分材料被挤入凹模孔口内。板料与凸、凹模接触处形成很小的圆角。由于凸、凹模之间有间隙存在,使板料同时受到弯曲和拉伸的作用,凸模下的板料产生弯曲,位于凹模上的板料开始上翘,间隙越大,弯曲和上翘越严重(图 3-2)。

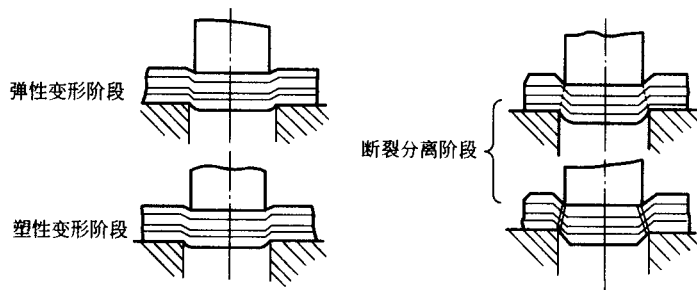


图 3-2 冲裁过程

(2) 塑性变形阶段

凸模继续下降，压力增加，当材料内部应力达到屈服点时，板料进入塑性变形阶段。此时凸模开始挤入板料，并将下部材料挤入凹模孔内，板料在凸、凹模刃口附近产生塑性剪切变形，形成光亮的剪切断面。在剪切面的边缘，由于凸、凹模间隙存在而引起弯曲和拉伸的作用，形成圆角。随着切刃的深入，变形区向板材的深度方向发展、扩大，应力也随之增加，变形区材料的硬化加剧，载荷增加，最后在凸模和凹模刃口附近达到极限应变与应力值时，材料便产生微裂纹，这就意味着破坏开始，塑性变形阶段结束。

(3) 断裂分离阶段

此时凸模继续压入，凸、凹模刃口附近产生的微裂纹不断向板材内部扩展，若间隙合理，上、下裂纹则相遇重合，板料被拉断分离。由于拉断的结果，断面上形成一个粗糙的区域。当凸模再下行，冲落部分将克服摩擦阻力从板材中推出，全部挤入凹模洞口，冲裁过程到此结束。

冲裁过程中，材料所受外力如图 3-3 所示（此为无压边装置冲裁）。

- 式中 F_p, F_d ——凸、凹模对板材的垂直作用力；
 F_1, F_2 ——凸、凹模对板材的侧压力；
 $\mu F_p, \mu F_d$ ——凸、凹模端面与板材间的摩擦力，其方向与间隙大小有关，但一般指向模具刃口。其中， μ 是摩擦系数，下同；
 $\mu F_1, \mu F_2$ ——凸、凹模侧面与板材间的摩擦力。

从此图中可看到，板材由于受到模具表面的力偶作用而弯曲，并从模具表面上翘起，使模具表面和板材的接触面仅局限在刃口附近的狭小区域，宽度约为板厚的 0.2~0.4。接触面间相互作用的垂直压力分布并不均匀，随着向模具刃口的逼近而急剧增大。

冲裁中，板材的变形是在以凸模与凹模刃口连线为中心而形成的纺锤形区域内最大，如图 3-4 (a) 所示，即从模具刃口向板料中心，变形区逐步扩大。凸模挤入材料一定深度后，变形区也同样可以按纺锤形区域来考虑，但变形区被在此以前已经变形并加工硬化了的区域所包围 [图 3-4 (b)]。

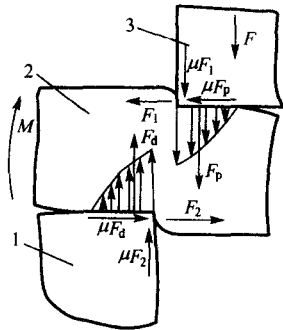


图 3-3 冲裁时作用于板材上的力
1—凹模；2—板材；3—凸模

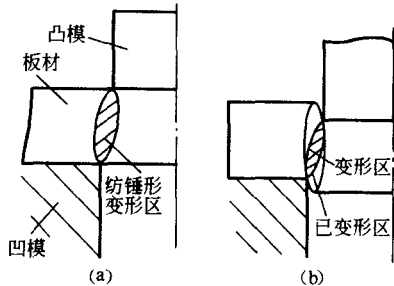


图 3-4 冲裁变形区图

由于冲裁时板材弯曲的影响，其变形区的应力状态是复杂的，且与变形过程有关。图 3-5 所示为无卸料板压紧材料的冲裁过程中塑性变形阶段变形区的应力状态，其中：

A 点（凸模侧面）—— σ_1 为板材弯曲与凸模侧压力引起的径向压应力，切向应力 σ_2 为