

高等学校试用教材

冲压工艺学

华中理工大学 肖景容 主编
武汉工学院 姜奎华

机械工业出版社



TG386

X38

431601

高等学校试用教材

冲压工艺学

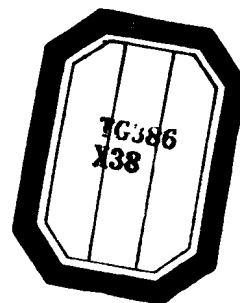
华中理工大学 肖景容 主编
武汉工学院 姜奎华



00431601



机械工业出版社



0116/63

本书对冲压工艺的基本问题作了系统的论述。全书共八章,介绍了冲裁、弯曲、拉深、胀形和翻边、板料的冲压成形性能与成形极限,冲压工艺设计、冲模结构与设计。每章末附有习题。

本书是高等学校锻压专业教材,也可供从事冲压的技术人员参考。

冲 压 工 艺 学

(重排本)

华中理工大学 肖景容 主编
武汉工学院 姜奎华

*
责任编辑:周衍康 王霄飞 责任校对:李秋荣
责任印制:路琳 版式设计:吴静霞

*
机械工业出版社出版(北京市百万庄大街22号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京机工印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 787×1092¹/₁₆·印张 15.75·字数 379 千字

1999年5月第1版第5次印刷

印数 28 301—31 300·定价:22.00元

*
ISBN 7-111-02018-9/TG·509 (课)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

本书系根据 1983 年全国锻压专业教材分编审委员会讨论通过的《冲压工艺学》课程教学大纲，以华中理工大学编写的《板料冲压》和武汉工学院编写的《冲压工艺学》为基础，经过重新编写而成。全书由华中理工大学肖景容和武汉工学院姜奎华主编。由西安交通大学储家佑教授主审。参加本书编写的有肖景容（第一、四章）、姜奎华、曹宏深（第五、六章）、周士能（第三、七、八章）、肖祥芷（第二章）和赵子明（习题）。

编审委员会曾委托储家佑教授、吴诗惇教授和郑可煌副教授对《板料冲压》和《冲压工艺学》进行了评审，提出了许多宝贵意见。重新编写的《冲压工艺学》于 1988 年 5 月召开了审稿会，参加审稿会的有西安交通大学储家佑教授、重庆大学孙伦宝副教授、江西工学院包忠诩副教授、合肥工业大学汪富钧副教授、湘潭大学彭炎荣副教授和洛阳工学院高济副教授等，对他们热情指导表示衷心感谢！由于编者水平有限，本书错误之处，敬希读者不吝指正。

编者 1988 年 7 月

目 录

前言	
第一章 绪论	1
第二章 冲裁	5
一、冲裁变形机理	5
1. 剪切区力态分析	5
2. 冲裁过程	6
3. 裂纹的形成与发展	8
4. 剪切力行程曲线	8
5. 剪切断面分析	8
二、模具间隙	9
1. 间隙对冲裁件质量的影响	9
2. 间隙对冲裁力的影响	11
3. 间隙对模具寿命的影响	11
4. 凸、凹模间隙值的确定	12
三、凸、凹模刃口尺寸的计算	16
1. 尺寸计算原则	16
2. 尺寸计算方法	17
四、冲裁力的计算及降低冲裁力的方法	20
1. 冲裁力的计算	20
2. 降低冲裁力的方法	21
3. 卸料力及推件力的计算	22
五、排样	23
1. 材料的经济利用	23
2. 排样方法	23
3. 搭边	24
六、精密冲裁	25
1. 整修	25
2. 光洁冲裁	29
3. 齿圈压板冲裁 (俗称精冲法)	30
4. 对向凹模冲裁	39
5. 上、下冲裁	39
七、其它冲裁法	40
1. 聚氨酯冲裁	40
2. 锌基合金模冲裁	41
3. 硬质合金模冲裁	42
第二章 习题	45
第三章 弯曲	46
一、板料的弯曲现象及其原因	46
1. 弯曲件的弹性回跳	47
2. 中性层位置的内移	47
3. 弯曲区板料厚度的变薄	49
4. 板料长度的增加	49
5. 板料横截面的畸变、翘曲和拉裂	49
二、窄板弯曲和宽板弯曲时的应力应变	
状态分析	50
1. 窄板弯曲	50
2. 宽板弯曲	51
三、宽板弯曲时的应力 (σ_θ 、 σ_ρ 、 σ_ϕ)	
和弯矩的计算	51
1. 近似简化计算	51
2. 按宽板弯曲的平面应变状态计算变	
形区的应力数值	52
四、弯曲力计算和设备选择	56
1. 自由弯曲力	56
2. 校正弯曲力	57
3. 冲压设备选择	58
五、弯曲件毛坯长度计算	58
1. 弯曲角为 90° 的毛坯展开长度	58
2. 弯曲件尺寸标注在外侧的毛坯	
长度计算	58
3. 弯曲件尺寸标注在内侧的毛坯	
长度计算	59
4. 板料弯曲角 α 大于或小于 90° 时	
的毛坯长度	59
5. 卷圆弯曲的毛坯长度	59
6. 外缘 90° 弯曲件的毛坯展开尺寸	60
7. 内缘 90° 弯曲件的毛坯展开尺寸	61
8. 折弯件的展开尺寸	61
六、最小相对弯曲半径 $r_{\min}/t$ 的确定	61
1. 最小相对弯曲半径 $r_{\min}/t$ 的近似	
理论计算	62
2. 影响最小相对弯曲半径 $r_{\min}/t$	
的因素	62
3. 最小相对弯曲半径 $\frac{r_{\min}}{t}$ 的经	

验选用	63	2. 多凹模变薄拉深	110
七、弯曲回弹	64	十、覆盖件的拉深成形	112
1. 弯曲件回弹量的计算	64	1. 回弹	112
2. 影响弯曲件回弹量的因素	66	2. 起皱与拉裂	112
3. 减少回弹的措施	67	3. 工艺过程	113
八、弯曲模工作部分的尺寸计算	69	4. 拉深变形程度	113
1. 凸、凹模圆角半径	69	5. 毛坯的形状尺寸	114
2. 凸、凹模间隙 C	70	6. 压边面的形状和位置	114
3. 凸、凹模的宽度尺寸计算	70	7. 拉深筋	114
第三章 习题	71	8. 工艺切口	115
第四章 拉深	72	十一、其他拉深方法	115
一、圆筒件拉深的变形过程	73	1. 软模成形	115
1. 圆筒件拉深时的应力应变状态	73	2. 差温拉深	117
2. 圆筒件拉深的力学分析	73	3. 加径向压力的拉深	118
3. 影响圆筒件拉深过程的因素	79	4. 爆炸成形	118
4. 圆筒件拉深过程中出现的问题		5. 水电成形	119
及其防止措施	84	6. 电磁成形	119
二、圆筒件拉深工艺计算及其模具		7. 带料连续拉深	120
设计	88	8. 旋压成形	121
1. 拉深零件的毛坯尺寸	88	附录 变薄拉深的力学分析	122
2. 拉深系数和次数的决定	88	第四章 习题	125
3. 凸、凹模工作部分的尺寸	89	第五章 胀形与翻边	127
4. 凸、凹模尺寸及制造公差	91	一、胀形	127
5. 凸、凹模结构	91	1. 胀形成形特点	127
6. 拉深力计算	93	2. 胀形成形极限	129
7. 拉深功	93	3. 胀形工艺方法	129
三、带法兰圆筒件的拉深	94	二、圆孔翻边	137
1. 带法兰圆筒件拉深的特点	94	1. 圆孔翻边时的应力和应变	137
2. 拉深工艺的确定	94	2. 圆孔翻边时的成形极限	139
四、阶梯圆筒件的拉深	98	3. 圆孔翻边的毛坯计算	141
五、锥形零件的拉深	99	4. 圆孔翻边力计算	142
1. 锥形件的拉深方法	99	5. 翻边模设计	142
2. 锥形零件尺寸对拉深的影响	100	三、变薄翻边	143
六、球面零件的拉深	102	四、外缘翻边	146
七、抛物面件的拉深	104	1. 内曲翻边	146
八、盒形件的拉深	106	2. 外曲翻边	146
1. 盒形件拉深的变形特点	106	3. 外缘翻边方法	147
2. 毛坯尺寸的确定	107	五、非圆孔翻边	147
3. 盒形件初次拉深的极限变形程度	107	第五章 习题	148
4. 盒形件的多次拉深	108	第六章 板料的冲压成形性能与	
5. 凸、凹模尺寸设计	109	成形极限	150
九、变薄拉深	109	一、概述	150
1. 变薄拉深的变形特点	109		

二、冲压成形区域与成形性能的划分	151	2. 确定冲压件的最佳工艺方案	186
1. 冲压成形区域划分	151	3. 确定模具的结构型式	190
2. 冲压成形性能划分	154	4. 合理选择冲压设备	190
三、冲压成形性能试验方法与指标	155	5. 编写工艺文件和设计计算说明书	190
1. 胀形成形性能试验	155	二、冲压件工艺过程方案编制实例	190
2. 扩孔成形性能试验	155	1. 冲压件的工艺分析	190
3. 拉深成形性能试验	156	2. 确定工艺方案	190
4. 弯曲成形性能试验	157	3. 各工序模具结构型式的确定	194
5. “拉深—胀形”复合成形性能 试验	158	4. 计算各工序冲压力和选择冲压 设备	194
四、塑性拉伸失稳理论与失稳极限 应变	158	5. 编写工艺文件, 填写冲压工艺卡	196
1. 塑性拉伸失稳的概念和类型	159	第八章 冲模结构与设计	197
2. 颈缩条件	160	一、冲模的分类	197
3. 集中性颈缩方位	161	二、冲模的典型结构和特点	197
4. 失稳极限应变	162	1. 单工序模	197
五、板料的基本性能与冲压成形性能 的关系	164	2. 复合模	209
1. 屈服极限	164	3. 连续模	210
2. 屈强比	164	三、冲模主要零部件的结构和设计	217
3. 延伸率	165	1. 工作零件	217
4. 应变硬化指数	165	2. 定位零件	221
5. 塑性应变比	167	3. 卸料和压料零件	225
6. 凸耳参数	168	4. 导向零件	227
7. 晶粒度	168	5. 固定零件	229
8. 表面粗糙度	168	6. 弹簧和橡皮零件	231
9. 夹杂物和偏析	169	7. 冲模零件的材料选用	237
10. 应变速率敏感系数 m	169	四、模具设计的步骤和内容	239
六、成形极限图及其应用	171	1. 根据工艺分析选定模具种类, 确定模具结构型式	239
1. 成形极限图的概念和试验方法	171	2. 确定模具的压力中心	239
2. 成形极限图的应用	173	3. 确定模具闭合高度	240
七、方板对角拉伸试验及其研究	176	4. 凸、凹模和垫板等零件的强度 计算以及弹簧、橡皮等弹性零 件的计算和选用	241
1. 方板对角拉伸试验方法	176	5. 选择冲压设备	241
2. 研究现状及其成果	177	6. 绘制模具总图, 列出模具零件 明细表和标准件清单, 绘 制模具零件图, 提出各种 技术要求	241
八、高强钢板	178	参考文献	241
第六章 习题	179		
第七章 冲压工艺设计	180		
一、编制冲压工艺过程的主要内容 和步骤	180		
1. 对冲压件的工艺分析	180		

第一章 绪 论

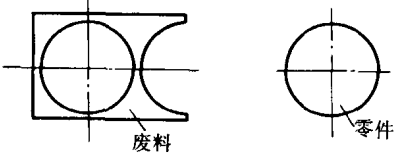
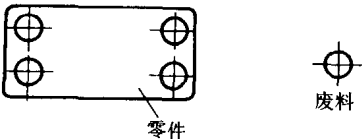
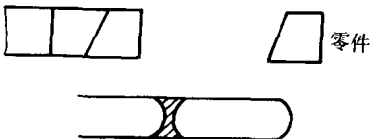
冷冲压是一种先进的金属加工方法，它是建立在金属塑性变形的基础上，利用模具和冲压设备对板料金属进行加工，以获得所需要的零件形状和尺寸。

冷冲压和切削加工比较，具有生产率高、加工成本低、材料利用率高、产品尺寸精度稳定、操作简单、容易实现机械化和自动化等一系列优点，特别适合于大量生产。

由于板料零件具有重量轻，有足够的强度和刚度，可以根据不同用途，采用不同材料加工成各种形状尺寸的零件，以满足产品需要。因此，现代汽车、拖拉机、电机、电器、仪器、仪表和各种民用轻工产品中，都大量使用冷冲压零件。国防方面，如飞机、导弹、枪弹、炮弹等产品中，采用冷冲压加工的零件比例也是相当大的。随着汽车和家用电器等的飞跃发展，许多先进工业国家，对发展冷冲压生产给予了高度的重视。例如，美、日等国模具工业的产值已经超过机床工业。美国 1982 年模具年产值为 57.70 亿美元，机床则为 55 亿美元。日本 1982 年模具年产值为 8600 亿日元，而机床则只有 7842 亿日元。在模具工业中冷冲模占的比例很大。因此可以看出冷冲压在国外的发展趋势。

冷冲压工艺大致可区分为分离工序与成形工序两大类。分离工序又可分为落料、冲孔和切割等，如表 1-1 所示。成形工序则可分为弯曲、拉深、翻孔、翻边、胀形、扩口、缩口和旋压等，如表 1-2 所示。根据产品零件的形状、尺寸精度和其他技术要求，可分别采用各种工序对板料毛坯进行加工，以获得满意的零件。

表 1-1 分离工序

工序名称	简 图	特点及应用范围
落 料		用冲模沿封闭轮廓曲线冲切，冲下部分是零件。用于制造各种形状的平板零件
冲 孔		用冲模按封闭轮廓曲线冲切，冲下部分是废料
切 断		用剪刀或冲模沿不封闭曲线切断，多用于加工形状简单的平板零件

(续)

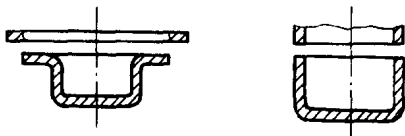
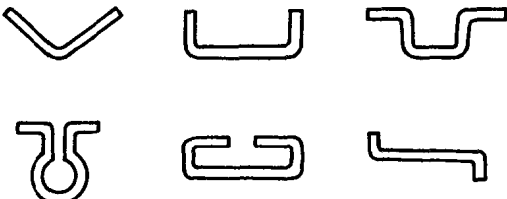
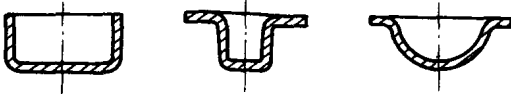
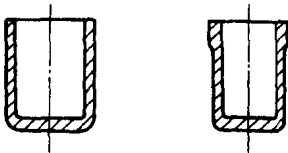
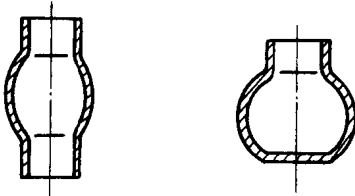
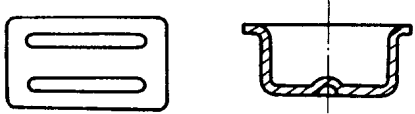
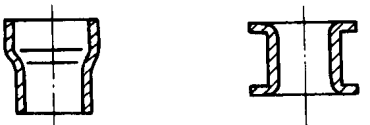
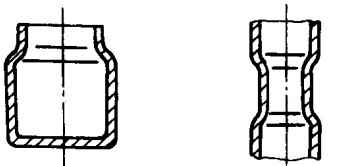
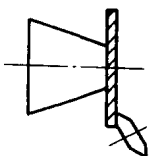
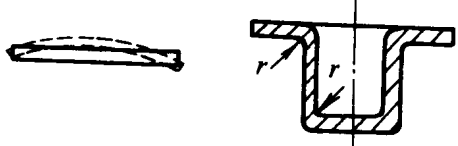
工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
切 边		将成形零件的边缘修切整齐或切成一定形状
剖 切		把冲压加工成的半成品切开成为二个或数个零件,多用于不对称零件的成双或成组冲压成形之后

表 1-2 成形工序

工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
弯 曲		把板料沿直线弯成各种形状,可以加工形状极为复杂的零件
卷 圆		把板料端部卷成接近封闭的圆头,用以加工类似铰链的零件
扭 曲		把冲裁后的半成品扭转成一定角度
拉 深		把板料毛坯成形制成各种空心的零件
变薄拉深		把拉深加工后的空心半成品进一步加工成为底部厚度大于侧壁厚度的零件
翻 孔		在预先冲孔的板料半成品上或未经冲孔的板料冲制成竖立的边缘
翻 边		把板料半成品的边缘按曲线或圆弧形成竖立的边缘

(续)

工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
拉 弯		在拉力与弯矩共同作用下实现弯曲变形，可得精度较好的零件
胀 形		在双向拉应力作用下实现的变形，可以成形各种空间曲面形状的零件
起 伏		在板料毛坯或零件的表面上用局部成形的的方法制成各种形状的突起与凹陷
扩 口		在空心毛坯或管状毛坯的某个部位上使其径向尺寸扩大的变形方法
缩 口		在空心毛坯或管状毛坯的某个部位上使其径向尺寸减小的变形方法
旋 压		在旋转状态下用辊轮使毛坯逐步成形的的方法
校 形		为了提高已成形零件的尺寸精度或获得小的圆角半径而采用的成形方法

随着科学技术的不断进步和工业生产的迅速发展,冷冲压技术也在不断革新和发展,主要表现在以下几个方面:

(1) 工艺分析计算方法的现代化。例如,生产汽车覆盖件的冲压工艺,传统方法系根据已有的设计资料和设计者的经验,进行对比分析,确定工艺方案和有关参数,然后设计试验模具,进行试冲,经过反复试验和修改,才能转入批量生产。近几年来,国外(如美国福特汽车公司中心研究室)已开始采用有限变形的弹塑性有限元法,对覆盖件成形过程进行应力应变分析和计算机模拟,以预测某一工艺方案对零件成形的可能性和将会发生的问题,将结果显示在图形终端上,供设计人员进行修改和选择。这样,不仅可以节省昂贵的模具试验费用,缩短新产品的试制周期。而且可以逐步建立一套能紧密结合生产实际的先进设计方法,既促进了冷冲工艺的发展,也将使塑性成形理论逐步达到对生产实际的指导作用。

(2) 模具设计制造技术现代化。为了加快机电产品的更新换代,缩短工装设计、制造周期,许多工业先进国家正在大力开展模具计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)的研究,并在生产中开始应用。模具CAD/CAM技术应用较早的领域便是冷冲模。根据国外经验,采用这一技术,一般可提高模具设计制造效率2~3倍,模具生产周期可缩短 $\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$,发展这一技术的最终目标,要达到模具CAD/CAM一体化,而模具图纸将只是作为检验模具之用。采用模具CAD/CAM后,还可提高模具质量,大大减少设计和制造人员的重复劳动,使设计者有可能把精力用在创新开发上。

(3) 冷冲压生产的机械化和自动化。为了满足大量生产的需要,冲压设备已由单工位低速压力机发展到多工位高速自动压力机。一般中小型冷冲件,既可在多工位压力机上生产,也可在高速压力机上采用多工位级进模加工,使冷冲压生产达到高度自动化。大型冲压件(如汽车覆盖件)可在多工位压力机上利用自动送料、取件装置,进行机械化流水线生产,从而减轻劳动强度和提高生产率。

(4) 为了满足产品更新换代快和生产批量小的发展趋势,发展了一些新的成形工艺(如高能成形和旋压等)、简易模具(如软模和低熔点合金模等)、通用组合模具、数控冲压设备和冲压柔性制造系统(FMS)等。这样,就使冷冲生产既适合大量生产,也同样适用于小批生产。

(5) 不断改进板料性能,以提高其成形能力和使用效果。例如,研制高强度钢板,用来生产汽车覆盖件,以减轻零件重量和提高其结构强度。

冲压工艺学是一门实用性很强的课程。对初学者来说,应在学习这门课程以前,对冲压工艺在生产中的应用范围和特点,具有初步感性知识,才能在学习时联系生产实际,容易引起兴趣和加深理解。由于这门课程安排在塑性成形原理之后和冲压工艺课程设计之前,因此,要求学生能将塑性成形理论的分析方法,具体运用到各个冲压工序的分析中去。并对板料毛坯在变形过程中的应力、应变分布及其影响因素,有一个比较清晰的概念,为制定正确的工艺方案和设计合理的模具结构打下基础。通过本课程学习和课程设计,能初步掌握分析、制订工艺方案和设计冷冲模具的方法。

第二章 冲 裁

冲裁是利用模具使板料产生分离的冲压工序,包括落料、冲孔、切口、剖切、修边等。用它制作零件或为弯曲、拉深、成形等工序准备毛坯。从板料冲下所需形状的零件(或毛坯)叫落料,在工件上冲出所需形状的孔(冲去的为废料)叫冲孔。图 2-1 所示垫圈即由落料与冲孔两道工序完成。

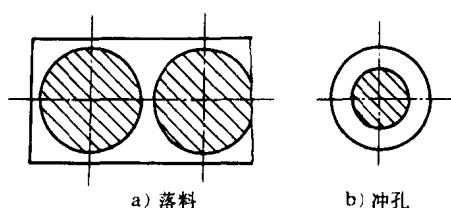


图 2-1 垫圈的落料与冲孔

一、冲裁变形机理

1. 剪切区力态分析

图 2-2 是模具对板料进行冲裁时的情形。当凸模下降至与板料接触时,板料就受到凸、凹模端面的作用力。由于凸、凹模之间存在间隙,使凸、凹模施加于板料的力产生一个力矩 M ,其值等于凸、凹模作用的合力与稍大于间隙的力臂 a 的乘积。力矩使材料产生弯曲,故模具与板料仅在刃口附近的狭小区域内保持接触,接触面宽度约为板料厚度的 $0.2 \sim 0.4$ 倍。因此,凸、凹模作用于板料的垂直压力呈不均匀分布,随着向模具刃口靠近而急剧增大(见图 2-2),该图表明了无压紧装置冲裁时板料的受力情况,其中:

$F_{垂1}$ 、 $F_{垂2}$ ——凸、凹模对板料的垂直作用力;

$F_{水1}$ 、 $F_{水2}$ ——凸、凹模对板料的侧压力;

$\mu F_{重1}$ 、 $\mu F_{重2}$ ——凸、凹模端面与板料间的摩擦力,其方向与间隙大小有关,但一般系指向模具刃口;

$\mu F_{水1}$ 、 $\mu F_{水2}$ ——凸、凹模侧面与板料间的摩擦力。

冲裁时,由于板料弯曲的影响,其剪切区的应力状态是复杂的,且与变形过程有关。对于无卸料板压紧材料的冲裁,其剪切区应力状态如图 2-3 所示,其中:

A 点——凸模下压引起轴向拉应力 σ_3 ,板料弯曲与凸模侧压力引起径向压应力 σ_1 ,而切向应力 σ_2 为板料弯曲引起的压应力与侧压力引起的拉应力的合成应力。

B 点——凸模下压及板料弯曲引起的三向压缩应力。

C 点——沿纤维方向为拉应力 σ_1 ,垂直于纤维方向为压应力 σ_3 。

D 点——凹模挤压板料产生轴向压应力 σ_3 ,板料弯曲引起径向拉应力 σ_1 和切向拉应力 σ_2 。

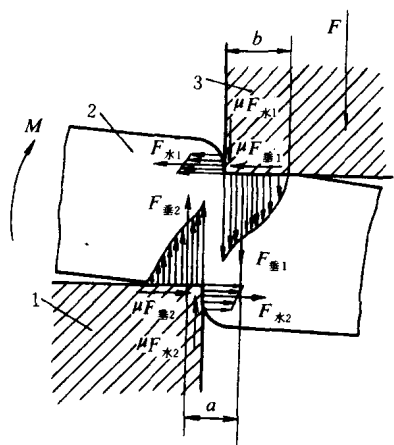


图 2-2 冲裁时作用于材料上的力

1—凹模 2—材料 3—凸模

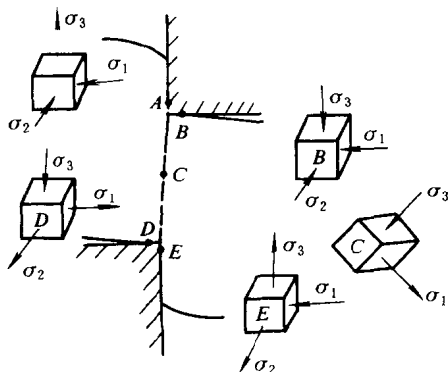
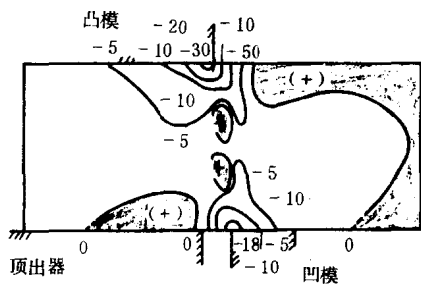
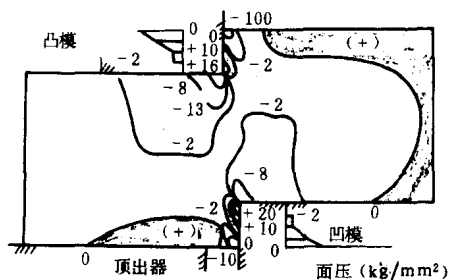


图 2-3 冲裁应力状态图

E 点——凸模下压引起轴向拉应力 σ_3 ，由板料弯曲引起的拉应力与凹模侧压力引起的压应力合成产生应力 σ_1 与 σ_2 ，该合成应力可能是拉应力，也可能是压应力，与间隙大小有关。

从 A、B、C、D 各点的应力状态可看出，凸模与凹模端面（即 B 与 D 点处）的静水压应力（球压张量）高于侧面（A、E 处）的，且凸模刃口附近的静水压应力又比凹模刃口附近的高。

这一结论与日本学者岩田一明用有限元法计算出的应力分布基本相符（见图 2-4、图 2-5）。图 2-4 是凸模行程比（即凸模压下深度与材料厚度之比）从 0% 至 3.76% 时变形区内的静水压应力分布图。图 2-5 是凸模行程比为 25% 时的静水压应力分布图。从图中可看出模具端面静水压应力比侧面高，而凸模端面处又比凹模端面处高。从图中还可看出随凸模行程的变化，中间由拉应力状态转入低静水压应力状态，而凹模侧面区是静水拉应力场。

图 2-4 静水压应力分布 (kgf/mm^2)[⊙]图 2-5 静水压应力分布 (kgf/mm^2)[⊙]

2. 冲裁过程

冲裁既是分离工序，工件受力时必然从弹、塑性变形开始，以断裂告终。当凸模下降接触板料，板料即受到凸、凹模压力而产生弹性变形，由于力矩 M 的存在，使板料产生弯曲，即从模具表面上挠起。随着凸模下压，模具刃口压入材料，内应力状态满足塑性条件时，产生塑性变形，由冲件断面腐蚀照片（图 2-6 可以看出，变形集中在刃口附近区域。图 2-7 为用视

⊙ $\text{kgf/mm}^2 \approx 1 \times 10^7 \text{Pa}$ 。

塑性法得出的变形区内等效应变分布图，不同的凸模行程，其变形程度不同，且凹模刃口附近变形大于凸模刃口附近的变形。由此可知，塑性变形从刃口开始，随着切刃的深入，变形区向板料的深度方向发展、扩大，直到在板料的整个厚度方向上产生塑性变形，板料的一部分相对于另一部分移动。力矩 M (见图 2-7) 将板料压向切刃的侧表面，故切刃相对于板料移动时，这些力将表面压平，在切口表面上形成光亮带。当切刃附近材料各层中达到极限应变与应力值时，便产生微裂，裂纹产生后，沿最大剪应变速度方向发展，直至上、下裂纹会合，板料就完全分离。

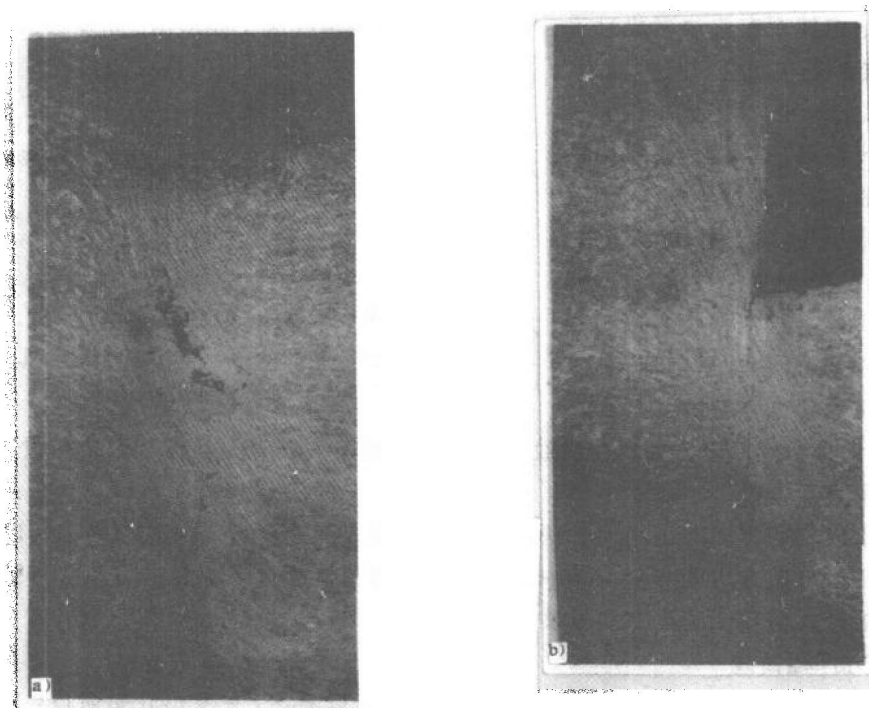


图 2-6 $\times 100$

a) 切入深度 0.86mm b) 切入深度 1.5mm 08 号钢，料厚 $t=2\text{mm}$

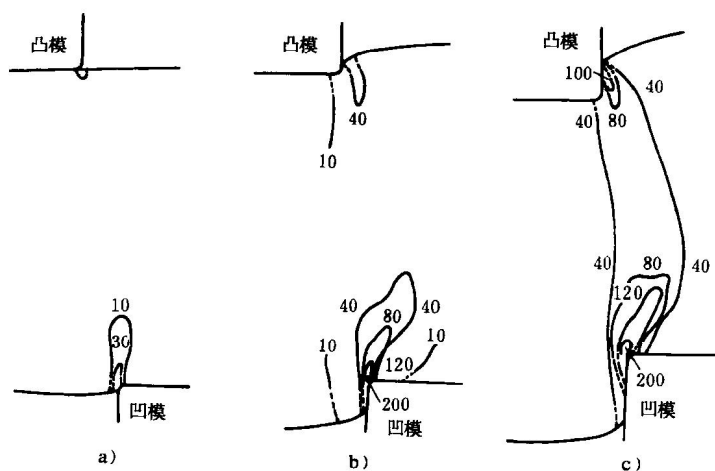


图 2-7 变形区内等效应变分布图

a) 凸模行程比 3% b) 凸模行程比 17% c) 凸模行程比 29%

3. 裂纹的形成与发展

金属一般都能承受一定的塑性变形而不破裂，同理，冲裁过程也必定是塑性变形增大到一定值时，断裂才能开始。这种极限塑性应变值（无裂纹）与应力状态及应力大小有关，随着静水压应力的增大而增加。冲裁时最大应变发生在刃口附近，由应力状态分析中得知，凸、凹模刃口侧面静水压应力低于端面静水压应力，且凹模刃口侧面的静水压应力最低，所以首先在凹模刃口侧面处板料中产生裂纹，继而才在凸模刃口侧面处产生裂纹，上、下裂纹会合后工件最后分离。因此，在裂纹形成时，就在冲裁件上留下了毛刺（见图 2-6）。图 2-8 为岩田一明用扫描电镜观察裂纹形成过程后，绘制的凹模侧裂纹成长模型图 [间隙 $Z = (0 \sim 16\%)$ 板厚 t]。裂纹首先在凹模刃口侧面发生，此时凸模的行程比为 20%。裂纹产生后先向废料侧（指落料）发展，主裂纹暂停发展，然后裂纹前端附近依次重新产生微小裂纹，微小裂纹的根部汇成主裂纹，直到主裂纹成长到凸模侧产生的裂纹会合而使板料断裂，微裂纹与主裂纹的方向是逐渐由废料侧转向成品侧的。间隙过大时 ($Z = 24.5\%t$)，只在凹模刃口侧面产生裂纹，且裂纹发展不大，直到凸模行程比超过 100%，板料才逐渐缩颈直至断裂。

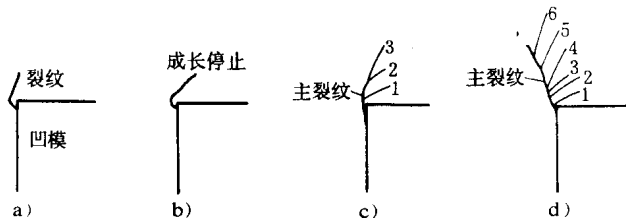


图 2-8 典型裂纹成长模型图

a) 产生第一微裂纹 b) 第一微裂纹成长停止
c) 产生 2、3 微裂纹 d) 主裂纹的成长

上述裂纹成长的方向与由视塑性法求出的最大剪应变速度方向大致相同，所以归结起来说冲裁时由于刃口附近应变与应力集中，加上拉应力的作用造成了裂纹的产生与扩展，裂纹产生后大致沿最大剪应变速度方向发展。

4. 剪切力行程曲线

图 2-9 为冲裁时冲裁力—凸模行程曲线。从曲线可以看出，在变形开始阶段，力增加较慢（此时，毛坯受压，并由切刃嵌入毛坯形成变形区），然后迅速增加（一部分相对于另一部分移动的过程）。在切刃深入到一定深度时，虽然承受剪切力的板料面积减少了，但受材料加工硬化的影响，所以力仍缓慢上升。当剪切面积减小与硬化增加两种影响相等时，剪切力达最大值，以后剪切面积减少的影响超过加工硬化的影响，于是剪切力下降。塑性材料（曲线 2）是剪切力达到最大值，然后缓慢下降一段后才发生裂纹，直至断裂，冲裁力急剧下降。这类似于拉伸试验，即塑性材料在应力达到最大剪切应力后，先产生缩颈然后才断裂。而低塑性材料断裂前不出现缩颈。

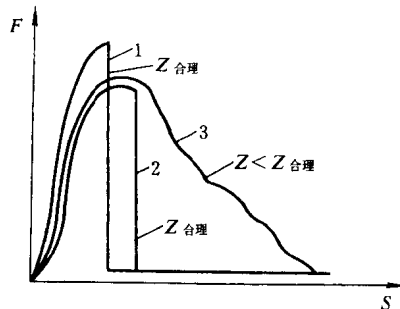


图 2-9 力与凸模行程关系曲线
1—低塑性材料 2、3—塑性材料

5. 剪切断面分析

由于冲裁变形的特点，使冲出的工件断面明显地分成三个特征区，即圆角带、光亮带与断裂带（图 2-10）。圆角带是冲裁中刃口刚压入材料时，刃口附近材料产生弯曲和伸长变形的结果，软材料比硬材料的圆角大。影响圆角带（塌角）大小的因素除材料性质以外，还有工

件轮廓形状,凸模与凹模的间隙等。光亮带是材料塑剪变形时,在毛坯一部分相对另一部分移动过程中,模具侧压力将毛坯压平而形成的光亮垂直的断面。通常,光亮带占全断面的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 。塑

性好的材料,其光亮带大,同时还与凸、凹模间隙及模具刃口的磨损程度等加工条件有关。断裂带是由刃口处的微裂纹在拉应力作用下不断扩展而形成的撕裂面,断面粗糙,且有斜度。塑性差的材料,断裂带大。圆角带、光亮带、断裂带三部分在冲裁件断面上所占的比例随材料的机械性能、凸与凹模间隙、模具结构等不同而变化。要想提高冲裁件切断面的光洁程度与尺寸精度,可通过增加光亮带的高度或采用整修工序来实现。增加光亮带高度的关键是延长塑性变形阶段,推迟裂纹的产生。这可以通过增加金属塑性和减少刃口附近的变形与应力集中来实现。

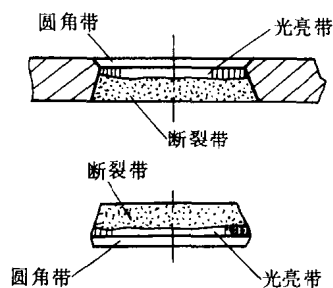


图 2-10 冲裁零件的断面

二、模具间隙

模具间隙系指凸、凹模刃口间缝隙的距离,用符号 c 表示,俗称单面间隙。而双面间隙用 Z 表示。间隙对冲裁件质量、冲裁力、模具寿命的影响很大,是冲裁工艺与模具设计中的一个极其重要的问题。

1. 间隙对冲裁件质量的影响

冲裁件质量是指切断面质量、尺寸精度及形状误差。切断面应平直、光洁,即无裂纹、撕裂、夹层、毛刺等缺陷。零件表面应尽可能平整,即穹弯小。尺寸应保证不超出图纸规定的公差范围。影响冲裁件质量的因素有:凸、凹模间隙大小及分布的均匀性,模具刃口状态、模具结构与制造精度,材料性质等,其中间隙值大小与均匀程度是主要因素。

(1) 间隙对冲裁件切断面质量的影响

从冲裁机理分析中得知,冲裁时,裂纹不一定从两刃口同时发生,上下裂纹是否重合与凸、凹模间隙值的大小有关。当把凸、凹模间隙控制在一定的合理值范围内时,由凸、凹模刃口沿最大剪应力方向产生的裂纹将互相重合。此时冲出的制件(或孔)断面虽有一定斜度,但比较平直、光洁,毛刺很小(图 1-11b),且所需冲裁力小。

间隙过小时,由凹模刃口处产生的裂纹进入凸模下面的压应力区后停止发展。当凸模继续下压时,在上、下裂纹中间将产生二次剪切,制件断面的中部留下撕裂面(图 2-11a),而两头为光亮带,在端面出现挤长的毛刺。毛刺虽有所增长,但易去除,且制件穹弯小,断面垂直,故只要中间撕裂不是很深,仍可应用。

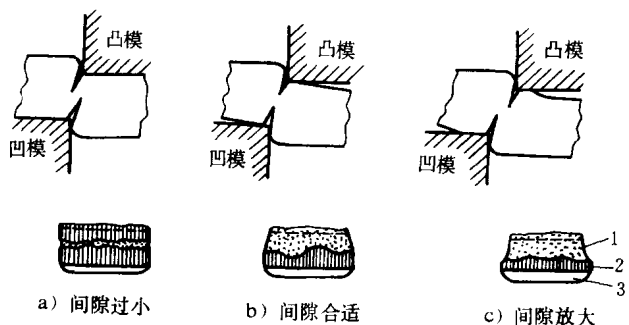


图 2-11 间隙大小对制件断面质量的影响

1—断裂带 2—光亮带 3—圆角带

间隙过大时,材料的弯曲与拉伸增大,拉应力增大,材料易被撕裂,且裂纹在离开刃口稍远的侧面上产生,致使制件光亮带减小,塌角(圆角带)与断裂斜度都增大,毛刺大而厚,难以去除。所以随着间隙的增大,制件断裂面的倾斜度与塌角增大,毛刺增高(图 2-12)。但从图(2-12c)中可见,间隙在一定范围内 $[Z = (14\% \sim 24\%)t]$ 变化时,毛刺高度小,且变化不大,这称为毛刺稳定区,可供选择合理间隙值时参考。

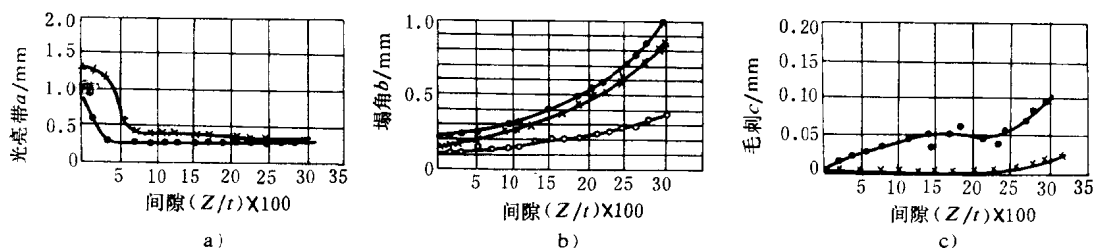


图 2-12 间隙对光亮带、塌角、毛刺的影响

落料——·——轧制方向 落料——×——垂直于轧制方向 冲孔——○——垂直于轧制方向 带钢 $t=1.6$

(2) 间隙对尺寸精度的影响

冲裁件的尺寸精度是指冲裁件的实际尺寸与基本尺寸的差值 (δ), 差值越小, 则精度越高。这个差值包括两方面的偏差, 一是冲裁件相对于凸模或凹模尺寸的偏差, 一是模具本身的制造偏差。

冲裁件相对于凸、凹模尺寸的偏差, 主要是工件脱离模具时, 材料在冲裁中所受的挤压变形、纤维伸长、穹弯都要产生弹性恢复造成的。偏差值可能是正的, 也可能是负的。影响这偏差值的因素有: 凸、凹模间隙; 材料性质; 工件形状与尺寸。其中主要因素是凸、凹模间隙。

当凸、凹模间隙较大时, 材料所受拉伸作用增大, 冲裁完后因材料的弹性恢复使落料尺寸小于凹模尺寸, 冲孔孔径大于凸模直径(图 2-13)。但因穹弯的弹性恢复方向与以上相反, 故偏差值是二者的综合结果。在间隙较小时, 由于材料受凸、凹模挤压力大, 故冲裁完后, 材料的弹性恢复使落料件尺寸增大, 冲孔孔径变小。此外, 尺寸变化量的大小还与材料性质、厚度、轧制方向等因素有关。软钢的弹性变形量较小, 冲裁后的弹性恢复量也就小。硬钢的弹性恢复量较大。

图中曲线与 $\delta=0$ 的横轴交点表明制件尺寸与模具尺寸完全一样, 交点右边表示制件与模具之间是松动的。若采用右边较大间隙值, 则制件与模具之间摩擦力小。但间隙大到一定值后, 由于穹弯引起的弹性恢复量大, 摩擦力减小将变得不显著。

上述因素的影响是在模具制造精度一定的前提下讨论的。若模具刃口制造精度低, 则冲

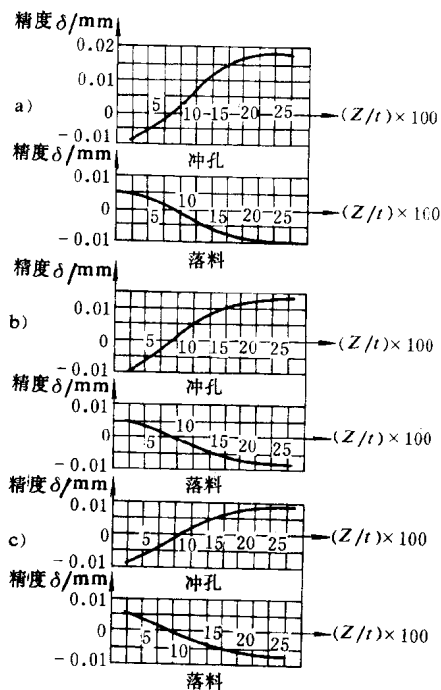


图 2-13 间隙对冲裁件精度的影响

a) 材料: 黄铜 料厚: 4mm

b) 材料: 15 钢 料厚: 3.5mm

c) 材料: 45 钢 料厚: 2mm