

责任编辑：王建兰

封面设计：唐源设计

智能制造基础技术系列教材

机械设计基础

机械制造基础

AutoCAD 应用教程

模具数字化设计与制造

钳工技能实训

冲压工艺与模具设计

电子产品生产工艺

3D打印技术

数控设备维护与装调

数控机床故障诊断与维修

数控加工工艺

数控加工编程与操作

制造执行系统（MES）

可编程控制技术

人工智能控制技术

人工智能基础及应用

变频器原理与应用技术

变频与伺服控制技术

传感器与自动检测系统设计

金属材料焊接工艺制定与评定

液压与气压传动技术

智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

冲压工艺与模具设计

主编◎林彩梅 黎一强 刘海庆

航空工业出版社

智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

冲压工艺与模具设计

主编◎林彩梅 黎一强 刘海庆

CHONGYA GONGYI YU MUJU SHEJI

中航出版传媒有限责任公司
CHINA AVIATION PUBLISHING & MEDIA CO., LTD.
www.aviationnow.com.cn



定价：56.00元

航空工业出版社

智能制造基础技术系列教材
“互联网+”新形态一体化教材

冲压工艺与模具设计

主编◎林彩梅 黎一强 刘海庆

CHONGYA GONGYI YU MUJU SHEJI

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书以高技术技能人才综合职业能力培养为主线,采用模块式体例安排教学内容,系统地介绍了冲压工艺与模具设计知识,分模块重点讲述了冲压工艺概述、冲裁工艺与模具设计、弯曲工艺与模具设计、拉深工艺与模具设计、多工位级进模具设计、其他成形工艺与模具设计、冷挤压工艺与模具设计、冲压工艺设计等冲压模具设计方法与过程,以培养学生的专业能力。通过模具设计实例、实践练习、拓展阅读板块,促进学生对所学知识的巩固及实现其职业迁移能力的培养。

本书可作为高职高专机械类专业模具课程教材,以及相关培训学校模具技术培训用书,亦可作为从事冲压生产和科研工作的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

冲压工艺与模具设计 / 林彩梅, 黎一强, 刘海庆主

编. -- 北京: 航空工业出版社, 2024. 12. -- ISBN

978-7-5165-3936-1

I. TG38

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20243G6U33 号

冲压工艺与模具设计

Chongya Gongyi yu Muju Sheji

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区京顺路 5 号曙光大厦 C 座四层 100028)

发行部电话: 010-85672666 010-85672683 读者服务热线: 010-85672635

中煤(北京)印务有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2024 年 12 月第 1 版

2024 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 473 千字

印张: 18.5

定价: 56.00 元

前言

党的二十大报告提出：“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”，“推进新型工业化，加快建设制造强国”和“推动制造业高端化、智能化、绿色化发展”。冲压技术在工业生产中广泛应用，冲压模具是完成冲压工作不可缺少的工艺装备，冲压模具设计与制造技术已引起各产业部门的重视，模具制造水平已成为衡量一个国家制造业水平的重要标志。技术工人队伍是支撑中国制造、中国创造的重要力量，模具设计与制造人才相当紧缺，大力培养冲模方面人才是服务新质生产力发展的需要。

本书构思新颖，以高技术技能人才综合职业能力培养为主线，以模块化结构安排教学内容，结构合理、图文并茂、针对性强，注重实际应用。本书按照模具设计与制造岗位职业标准和典型工作任务要求，吸收高职高专院校近年来模具设计与制造专业的教学改革和课程建设的成果，系统地介绍了冲压工艺与模具设计知识，分模块重点讲述了冲压工艺概述、冲裁工艺与模具设计、弯曲工艺与模具设计、拉深工艺与模具设计、多工位级进模具设计、其他成形工艺与模具设计、冷挤压工艺与模具设计、冲压工艺设计等冲压模具设计方法与过程，以培养学生的专业能力。本书自然渗透课程思政内容和党的二十大精神，以学生为中心，将教学内容和思想政治教育有机结合起来。本书具体引入工程实例和思政案例，采用多样化的教学手段，将思政元素融入课程教学之中，实现课程教学向课程思政转化、专业教育向专业育人转化，实现知识传授、能力培养与价值引领的有机统一，注重学生专业精神、职业精神、工匠精神的培养，教育学生坚定理想信念、厚植家国情怀、弘扬工匠精神、践行使命担当。通过模具设计实例、实践练习、拓展阅读板块，促进学生对所学知识的巩固及实现其职业迁移能力的培养。

本书内容紧扣行业发展趋势以及社会发展对人才的需求。全书基于工作过程和典型任务，在论述冲压成形理论及冲压工艺的基础上，应用冲压模具设计案例，详细叙述了冲压工艺与模具设计的基本知识、技术和技能。按照学习者的学习曲线，将全书编排为8个模块。

模块1 介绍冲压工艺的特点、冲压工序、冲压设备、塑性变形的力学基础等内容。

模块2 实施冲裁工艺与模具设计案例。完成该案例后，读者可以掌握简单冲裁模具的设计技能，包含冲裁工件工艺性分析、间隙值确定、冲裁力计算、压力中心确定、冲裁模具结构识读、冲裁模具零件设计等。

模块3 实施弯曲工艺与模具设计案例。完成该案例后，读者可以掌握弯曲模具的设计技能，包含弯曲工件工艺性分析、弯曲力计算、弯曲坯料展开尺寸计算、弯曲模具结构识

读、弯曲模具零件设计等。

模块 4 实施拉深工艺与模具设计案例。完成该案例后，读者可以掌握拉深模具的设计技能，包含拉深的变形过程、工件工艺性分析、拉深次数确定、压边力计算、拉深模具结构识读、拉深模具零件设计等。

模块 5 实施多工位级进模具设计案例。完成该案例后，读者可以掌握多工位级进模的排样设计与工位安排、多工位级进模中载体形式的确定、多工位级进模的典型结构和工作零件设计等。

模块 6 实施胀形、翻边、缩口等案例。完成案例后，读者可以掌握胀形、翻边、缩口等的工艺计算及模具设计技术。

模块 7 介绍冷挤压工艺分类、冷挤压金属变形特点、冷挤压的工艺计算及模具设计等。

模块 8 介绍冲压工艺设计的主要内容，包括工艺文件的编写、模具类型及结构形式的确定等。

本书可作为高职高专机械类专业模具课程教材，以及相关培训学校模具技术培训用书，亦可作为从事冲压生产和科研工作的工程技术人员的参考用书。对于冲模爱好者，本书也有较好的参考价值。

本书配有授课 PPT、案例素材、习题答案等丰富的学习资源。如有需要可致电教学助手 13810412048 或发邮件至 2393867076@qq.com 进行咨询。

由于编者水平有限，书中存在的疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者
2024 年 7 月

目 录

模块 1 冲压工艺概述	001
1.1 冲压工艺特点	003
1.2 冲压基本工序	004
1.2.1 按变形性质分类	004
1.2.2 按基本变形方式分类	006
1.2.3 按工序组合形式分类	006
1.3 冲压材料	006
1.3.1 冲压材料的工艺要求	006
1.3.2 冲压常用材料	007
1.3.3 冲模零件的材料选用	009
1.4 冲压设备	010
1.4.1 冲压设备的种类	010
1.4.2 曲柄压力机	011
1.5 塑性变形的力学基础	016
1.5.1 点的应力与应变状态	016
1.5.2 屈服准则（塑性条件）	018
1.5.3 塑性应力与应变的关系	018
1.5.4 冷冲压成形中的硬化现象	019
1.6 冲压常用标准及技术发展	020
1.7 冲压技术和冲模的发展	020
1.8 冲压材料选择实例	021
模块 2 冲裁工艺与模具设计	022
2.1 冲裁变形过程及断面特征	024
2.1.1 冲裁变形过程	024
2.1.2 冲裁切断面分析	025
2.1.3 提高冲裁件质量的途径	026
2.2 冲裁工艺设计	026
2.2.1 冲裁工艺性分析	026

2.2.2	冲裁工艺方案确定	029
2.3	冲裁工艺计算	030
2.3.1	排样设计	030
2.3.2	搭边	033
2.3.3	条料宽度尺寸的确定	035
2.3.4	冲压力与压力中心计算	037
2.4	冲裁模的分类及结构	042
2.4.1	冲压模具的分类	042
2.4.2	常用冲裁模具的类型	042
2.5	凸、凹模刃口尺寸的确定	051
2.5.1	冲裁间隙	051
2.5.2	凸、凹模刃口尺寸计算的依据和原则	056
2.5.3	刃口尺寸计算方法	057
2.6	冲裁模零部件设计	062
2.6.1	工作零件设计	062
2.6.2	定位零件设计	074
2.6.3	卸料装置零件的设计与标准的选用	082
2.6.4	导向装置	086
2.6.5	固定及紧固零件的设计与标准	088
2.7	冲裁模设计实例	092
模块 3	弯曲工艺与模具设计	102
3.1	弯曲变形过程	104
3.1.1	弯曲过程与特点	104
3.1.2	弯曲变形时材料的流动情况	105
3.1.3	弯曲变形区的应力与应变状态	107
3.2	弯曲件质量分析	108
3.2.1	最小弯曲半径	108
3.2.2	回弹	110
3.2.3	偏移	116
3.3	弯曲件的工艺性和工序安排	117
3.3.1	弯曲件的工艺性	117
3.3.2	弯曲件的工序安排	119
3.4	弯曲件的工艺计算	120
3.4.1	弯曲件坯料尺寸的计算	120
3.4.2	弯曲力的计算	122

3.5 弯曲模的设计要求及典型结构	124
3.5.1 弯曲模的设计要求	124
3.5.2 弯曲模典型结构	124
3.6 弯曲模零件设计	132
3.6.1 工作零件的设计	133
3.6.2 定位零件设计	136
3.6.3 压料、卸料、送料零件的设计	136
3.6.4 固定零件设计	136
模块 4 拉深工艺与模具设计	138
4.1 圆形件拉深的变形过程	140
4.1.1 拉深变形的过程及特点	140
4.1.2 拉深时坯料内的应力与应变状态	142
4.1.3 拉深时凸缘变形区的应力分布与起皱	144
4.1.4 筒壁传力区的受力分析与拉裂	147
4.2 直壁旋转体零件拉深工艺计算	149
4.2.1 无凸缘圆筒形件拉深工艺计算	149
4.2.2 有凸缘圆筒形件拉深工艺计算	157
4.2.3 阶梯圆筒形件	161
4.3 盒形件的拉深工艺计算	163
4.3.1 盒形件拉深变形特点	163
4.3.2 盒形件拉深毛坯形状与尺寸确定	164
4.3.3 盒形件拉深的成形极限	166
4.3.4 方形盒拉深工序形状和尺寸确定	167
4.4 非直壁类旋转体件的拉深	168
4.4.1 非直壁旋转体零件拉深的特点	169
4.4.2 非直壁旋转体零件的拉深方法	170
4.5 压边装置与压边力的确定	172
4.5.1 压边力的确定	172
4.5.2 压边装置（压边圈）.....	173
4.5.3 拉深力确定与压力机的选取	175
4.6 拉深件的工艺性	176
4.6.1 对拉深件形状的要求	176
4.6.2 对拉深件圆角半径的要求	176
4.6.3 对拉深件精度的要求	176
4.7 拉深模的典型结构	177
4.7.1 拉深模类型及典型结构	177

4.7.2 拉深模零件设计	180
4.8 拉深中的辅助工序	183
4.8.1 润滑	183
4.8.2 热处理	184
4.8.3 酸洗	184
4.9 拉深模设计实例	185
4.9.1 工艺性分析	185
4.9.2 工艺方案确定	185
4.9.3 工艺计算	186
4.9.4 模具工作部分尺寸设计	186
模块 5 多工位级进模具设计	188
5.1 多工位级进模的概述	190
5.1.1 多工位级进模的特点	190
5.1.2 多工位级进模的类别	190
5.1.3 多工位级进模的送料方式	190
5.2 多工位级进模的排样设计与工位安排	190
5.2.1 多工位级进模的排样设计	190
5.2.2 多工位级进模的工位设计	192
5.2.3 冲切刃口外形设计	193
5.2.4 多工位级进模中载体的形式	195
5.2.5 多工位级进模排样时应考虑的其他因素	197
5.3 多工位级进模的典型结构	197
5.3.1 多工位级进冲裁模具	198
5.3.2 多工位级进冲裁拉深模	199
5.3.3 落料复位成形多工位级进模	200
5.4 多工位级进模主要零件设计	201
5.4.1 工作零件设计	201
5.4.2 定位零件设计	206
5.4.3 卸料装置	209
5.4.4 限位装置	211
5.4.5 加工方向的转换机构	212
5.4.6 安全检测装置	212
5.5 多工位级进模的图纸绘制	214
5.5.1 装配图的绘制要求	214
5.5.2 零件图的绘制要求	214

模块 6 其他成形工艺与模具设计	217
6.1 胀形	219
6.1.1 胀形的变形特点	219
6.1.2 平板坯料的起伏成形	219
6.1.3 空心毛坯的胀形	222
6.1.4 胀形模设计实例	226
6.2 翻边	227
6.2.1 内缘翻边	228
6.2.2 外缘翻边	232
6.2.3 非圆孔翻边	234
6.2.4 翻边模设计实例	235
6.3 缩口	235
6.3.1 缩口变形特点	236
6.3.2 缩口系数	236
6.3.3 坯料尺寸计算	237
6.3.4 缩口模设计实例	238
6.4 校平与整形	240
6.4.1 校平	240
6.4.2 整形	241
6.5 旋压	241
6.5.1 普通旋压工艺	242
6.5.2 变薄旋压工艺	242
模块 7 冷挤压工艺与模具设计	244
7.1 冷挤压的分类及冷挤压的特点	245
7.1.1 冷挤压的分类	245
7.1.2 冷挤压的特点	246
7.2 冷挤压的金属变形	247
7.2.1 正挤压变形分析	247
7.2.2 反挤压变形分析	248
7.2.3 复合挤压变形分析	249
7.2.4 冷挤压变形程度	249
7.3 冷挤压原材料与毛坯的准备	251
7.3.1 冷挤压原材料	251
7.3.2 冷挤压毛坯的形状及尺寸	251

7.3.3	冷挤压毛坯的加工方法	253
7.3.4	挤压毛坯的表面处理和润滑	253
7.4	冷挤压力的计算与设备选择	254
7.4.1	冷挤压力与行程的关系	254
7.4.2	挤压力及其影响因素	254
7.4.3	冷挤压力的确定	256
7.4.4	冷挤压力机的选用	260
7.5	冷挤压的工艺设计	262
7.5.1	挤压件的结构工艺性分析	262
7.5.2	冷挤压工艺方案的制订	263
7.5.3	不同冷锻工序的一次成形范围	264
7.6	冷挤压模具设计	266
7.6.1	典型冷挤压模具结构	267
7.6.2	冷挤压凸模、凹模结构设计	268
7.6.3	预应力组合凹模的设计	271
7.6.4	凸模和凹模的紧固方法	274
7.6.5	冷挤压模设计实例	275
模块 8	冲压工艺设计	277
8.1	冲压工艺设计过程	278
8.1.1	冲压工艺设计的原始资料	278
8.1.2	冲压工艺设计的主要内容及一般步骤	279
8.1.3	编写工艺文件及设计计算说明书	279
8.2	冲压工艺方案的拟订	280
8.2.1	工序性质	280
8.2.2	工序数量	280
8.2.3	工序顺序	281
8.2.4	工序的组合方式	281
8.3	模具设计	281
8.3.1	模具类型及结构形式的确定	281
8.3.2	模具零件的选用、设计和计算	282
8.3.3	绘制模具总装配图	282
8.3.4	模具零件图绘制	283
参考文献		284

模块 3

弯曲工艺与模具设计

模块概述 >

本模块需要掌握弯曲变形原理，弯曲工艺计算，弯曲模具设计。以案例形式，从弯曲件工艺分析、关键尺寸计算、模具设计、模具结构图识读等内容展开论述。弯曲模具广泛应用于汽车、航空、建筑建造等行业，“鲲鹏展翅”，铸造冬奥。2022年北京冬奥会国家会议中心二期的“群鸟”造型幕墙，外立面幕墙采用凹凸的异形珐琅板，超7米的超大规格板型已是当时世界上最大的珐琅板，对工艺要求极高，设计团队经过长期调研测试，最终选取模具铸造冲压工艺来制作“鸟窗”，以确保材料成形精度和制造效率。

学习目标

知识目标

- (1) 掌握弯曲变形过程及特点。
- (2) 掌握弯曲回弹的方法与减少回弹的措施。
- (3) 掌握弯曲坯料尺寸计算。
- (4) 了解弯曲模典型结构。

能力目标

- (1) 能分析弯曲工艺性与确定工艺方案。
- (2) 能设计弯曲模工作零件及弯曲模具。

素质目标

- (1) 培养创新意识和思维。
- (2) 树立坚定的科技自信。

任务引入

弯曲是使材料产生塑性变形，形成一定的角度和一定的曲率的冲压工序。弯曲是冲压加工的基本工序之一，属于成形工序，在冲压生产中应用广泛，可用于制造大型结构零件，如汽车的纵梁、各种电器零件的支架、自行车车把、门窗铰链等。在实际生产中，弯曲所用的毛坯有板料、棒料、型材、管材等，如图 3-1 所示。

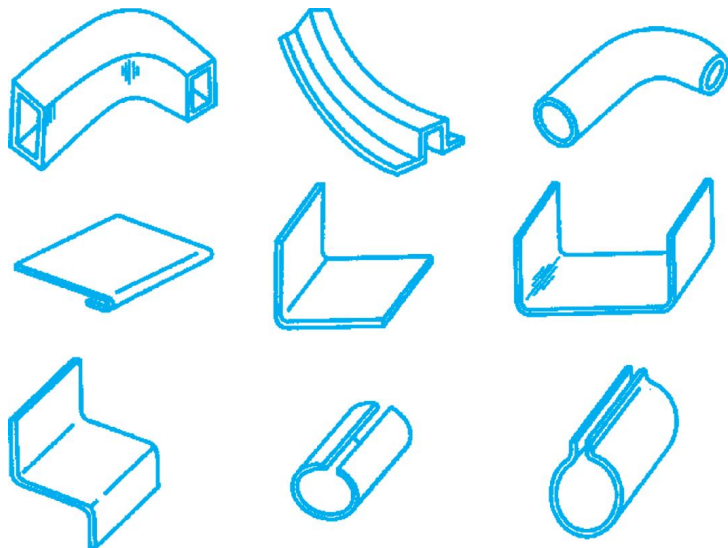


图 3-1 典型的弯曲零件

根据弯曲成形所用的模具及设备不同，弯曲方法可分为压弯、拉弯、折弯、滚弯、辊压等，如图 3-2 所示。

弯曲所用的模具是弯曲模，它是弯曲过程必不可少的工艺装备。

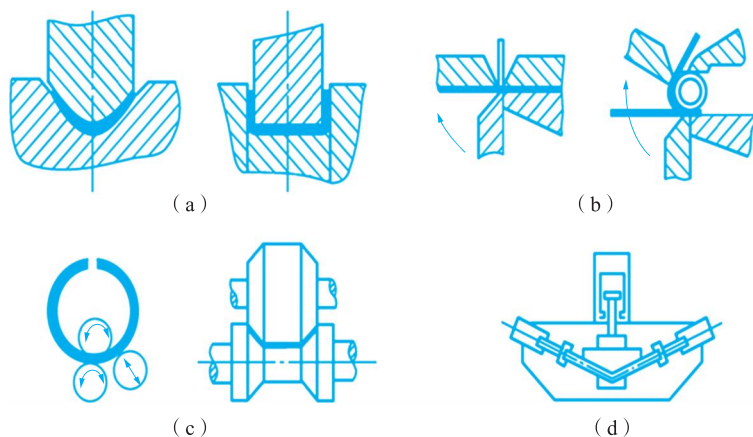


图 3-2 弯曲零件的成形方法

(a) 压弯；(b) 折弯；(c) 滚弯；(d) 拉弯

本模块以图 3-3 所示的弯曲件弯曲模具设计为载体，提升读者设计弯曲模具的初步能力。该弯曲件所用材料为 10 钢，弯曲件材料宽度 $b=20$ mm，批量为 20000 件/年。

通过本模块的实施，掌握弯曲模具的典型结构及结构组成、坯料长度的确定、弯曲模具零部件结构的设计与工作部分尺寸的计算等知识。

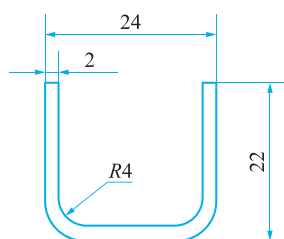


图 3-3 弯曲件

3.1 弯曲变形过程

任务一：试分析图 3-3 弯曲件变形区横断面的变形情况，确定其最小弯曲半径及相对弯曲半径。

3.1.1 弯曲过程与特点

V 形弯曲是最基本的弯曲变形，任何复杂弯曲都可看成由 n 个 V 形弯曲组成。所以以 V 形弯曲为代表分析弯曲变形过程。图 3-4 所示为一副常见的 V 形弯曲模。

图 3-5 所示为板料在 V 形件弯曲模中受力变形的基本情况。凸模对板料在作用点变形可以分为弹性变形阶段、塑性变形阶段和校正弯曲阶段，如图 3-6 所示。

弯曲分为自由弯曲和校正弯曲。自由弯曲是指弯曲终了时，凸模、凹模和坯料三者贴合后，凸模不再下压；校正弯曲是凸模、板料与凹模三者完全压合后，继续对弯曲件施压，使其直边、圆角与凸模全部靠紧。

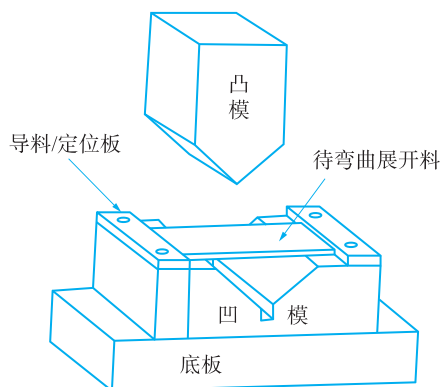


图 3-4 V 形件弯曲模

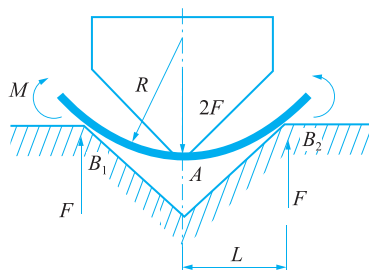


图 3-5 V 形件的弯曲

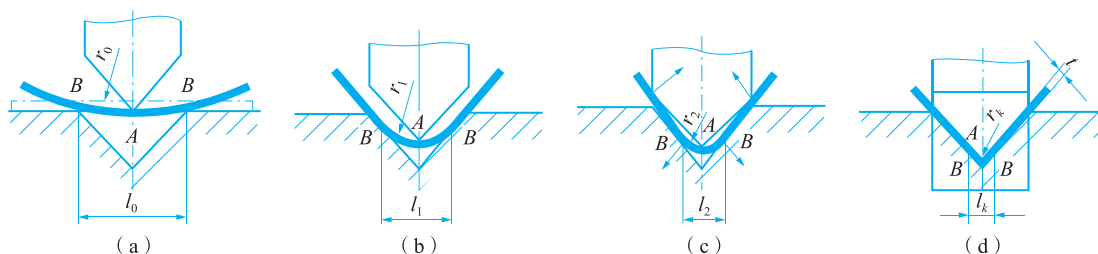


图 3-6 V 形件弯曲过程的分解

(a) 弹性弯曲变形阶段；(b)、(c) 塑性弯曲变形阶段；(d) 校正弯曲变形阶段

弯曲过程中，毛坯先产生弹性变形，变形可恢复，随着凸模下压，坯料变形区内、外表面的应力分量满足塑性条件，进入塑性变形状态。凸模进一步下行，塑性变形由表面向中心逐步扩展，板料与凹模表面逐渐靠紧，同时曲率半径和弯曲力臂逐渐变小，即 $r_0 > r_1 > r_2 > r_k$ ， $l_0 > l_1 > l_2 > l_k$ ，仍属自由弯曲。

3.1.2 弯曲变形时材料的流动情况

为了分析弯曲变形规律，以 V 形件为例，观察工件侧边的坐标网格及断面形态在弯曲前后的变化情况，如图 3-7 所示。

1. 弯曲圆角部分是弯曲变形的主要区域

位于弯曲圆角部分 ($abcd$ 区域) 内的网格发生了显著的变化，由正方形变成了扇形，中心角以外的直边部分基本不变形。

2. 弯曲变形区存在应变中性层

板料内侧水平方向的网线长度缩短，愈靠近内侧愈短，说明内侧材料受压缩，而在板料外区材料受拉伸。

应变中性层是指在变形前后金属纤维的长度没有发生改变的那一层金属纤维。

3. 变形区材料厚度变薄的现象

内区材料受压缩，长度方向缩短，因此厚度增厚；外区材料受拉伸，厚度变薄。在整个厚度上，因为厚度增厚量小于变薄量，因此材料厚度有变薄现象，使中性层位置发生内移。

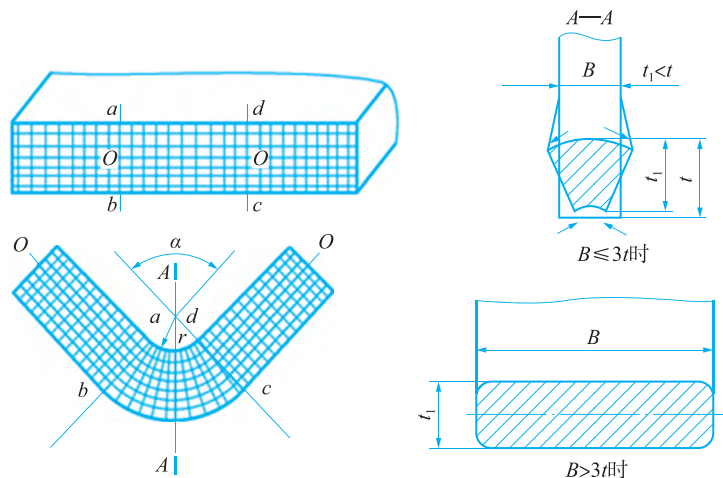


图 3-7 板料弯曲前后的网格及断面形态的变化

4. 变形区横断面的变形

变形区横断面形状尺寸发生改变称为畸变，主要影响因素为板料的相对宽度。

一般将相对宽度 $B/t > 3$ 的板料称为宽板，相对宽度 $B/t \leq 3$ 的称为窄板，如图 3-8 所示。

对于宽板来说，板料在宽度方向的变形会受到相邻金属的限制，横断面几乎不变；因窄板宽度方向不受约束，断面变成了内宽外窄的扇形。生产中，一般为宽板弯曲。

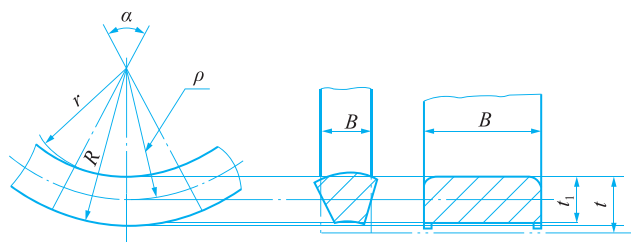


图 3-8 窄、宽板的变形

5. 弯曲后的畸变

对于型材、圆材等，变形时断面会发生畸变，如图 3-9 所示。这种现象是因为径向压应力 σ_r 所引起的。另外，在薄壁管的弯曲中，还会出现内侧面因受压应力 σ_θ 的作用而失稳起皱的现象。因此弯曲时管中心应加填料或芯棒。

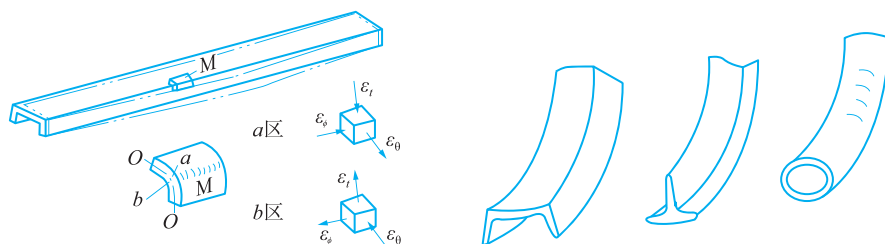


图 3-9 型材、圆材在弯曲时断面的畸变

3.1.3 弯曲变形区的应力与应变状态

由于板料的相对宽度 B/t 直接影响板料沿宽度方向的应变，进而影响应力。因而，随着 B/t 的不同，板料具有不同的应变状态和应力状态。

1. 应变状态

(1) 长度方向 ϵ_1 。外侧为拉伸应变，内侧为压缩应变。切向应变为绝对值最大的主应变。

(2) 厚度方向 ϵ_2 。根据塑性变形体积条件可知，沿着板料的厚度方向，必然产生与 ϵ_1 符号相反的应变。在板料的外侧，长度方向主应变 ϵ_1 为拉应变，所以厚度方向 ϵ_2 为压应变；在板料的内侧，长度方向主应变 ϵ_1 为压应变，所以厚度方向 ϵ_2 为拉应变。

(3) 宽度方向 ϵ_3 。弯曲窄板 ($B/t \leq 3$) 时，材料在宽度方向可以自由变形，故外侧应变为和长度方向主应变 ϵ_1 符号相反的压应变，内侧为拉应变；弯曲宽板 ($B/t > 3$) 时，材料之间的变形相互制约，材料的流动受阻，故外侧和内侧沿宽度方向的应变 ϵ_3 近似为零。

2. 应力状态

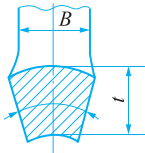
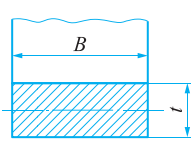
(1) 沿长度方向。外侧受拉应力，内侧受压应力。切向应力为绝对值最大的主应力。

(2) 沿厚度方向。在弯曲过程中，材料有挤向曲率中心的倾向，越靠近板料外表面，其切向拉应力 σ_1 越大，材料挤向曲率中心的倾向越大。这种不同步的材料转移，使板料在厚度方向产生了压应力 σ_2 。在板料的内侧，板厚方向的拉应变 ϵ_2 受到外侧材料向曲率中心移近所产生的阻碍，也产生了压应力 σ_2 。

(3) 沿宽度方向。弯曲窄板 ($B/t \leq 3$) 时，材料在宽度方向可以自由变形，故外侧和内侧的压应力均为零；弯曲宽板 ($B/t > 3$) 时，外侧材料在宽度方向收缩受阻，故产生拉应力，内侧宽向拉伸受阻，产生压应力。

材料弯曲的应力状态与应变状态如表 3-1 所示。就应力而言，宽板的应力状态是立体的，窄板的应力状态是平面的；对应变来说，窄板变形是立体状态，宽板变形是平面状态。

表 3-1 弯曲变形区的应力状态与应变状态图

板厚	窄板 $B/t \leq 3$		宽板 $B/t > 3$	
内侧				
外侧				

3.2 弯曲件质量分析

根据弯曲变形特点,弯曲件可能产生的质量问题通常有弯裂、回弹、偏移、翘曲、变形区变薄和毛坯长度增加等。

3.2.1 最小弯曲半径

1. 最小弯曲半径概念

最小弯曲半径 $r_{\min}$ 是指在弯曲时板料外侧表面不产生裂纹的条件下,所能弯成零件内表面的最小圆角半径,用它来表示弯曲时的成形极限。

当弯曲变形达到一定程度时,将会使变形区外层材料沿板宽方向产生拉伸裂纹而导致破坏,称为弯裂。产生弯裂的原因是弯曲变形程度超出被弯曲板料的成形极限。因此,只要限制每次弯曲时的变形程度,就可以避免弯裂,而弯曲变形程度与板料的相对弯曲半径有关。

相对弯曲半径 r/t 是指弯曲终了时,内侧半径与厚度的比值。 r/t 值越小,变形程度越大,当 r/t 值小到一定程度后,板料的外侧表面将产生裂纹。

2. 影响最小弯曲半径的因素

(1) 材料的力学性能。弯曲破坏主要是因为变形区外层材料受拉伸变形而开裂,材料的塑性越好,塑性变形的稳定性越强,许可的最小弯曲半径就越小。

对于冷作硬化导致材料塑性降低从而出现开裂时,可采用退火工序恢复其塑性。对镁合金、钛合金等低塑性材料常需加热弯曲。

(2) 板料表面和侧面的质量。弯曲毛坯一般采用剪床下料或落料,断面粗糙且有毛刺,并有硬化现象产生。弯曲时如将毛刺等缺陷置于弯曲变形区的外侧,则会因应力集中容易开裂。另外,坯料表面如果粗糙或有划伤、裂纹等,在弯曲时同样易引起开裂。铝质钢板的这种现象特别严重。

(3) 弯曲线方向。当工件的弯曲线与板料的纤维方向垂直时,可以用最小的弯曲半径。反之,工件的弯曲线与板料的纤维平行时,其最小弯曲半径就大。

生产中,当弯曲件的 r/t 值较小时,应注意毛坯排样设计,要注明板料轧制方向,尽可能使其垂直于弯曲线。而多向弯曲时,可使折弯线与轧制方向成一定的角度,如图 3-10 所示。

(4) 弯曲中心角 α 。弯曲中心角 α 是指弯曲终了时,变形区内圆弧部分所对的圆心角。理论上认为变形区仅限于弯曲区中心角 α 的区域内,直边不参与变形。实际上,由于材料的相互牵制作用,靠近圆角附近的直边材料参与了变形,使变形区外层的拉应力有所缓解,同时也分散了集中在圆角部分的拉伸应变。弯曲中心角 α 越小,圆角变形的直边缓解作用就越大,同时 r/t 值越小,如图 3-11 所示。

(5) 板料厚度。当弯曲半径 r 相同时,板厚 t 越小,则变形区外表层的伸长应变就越小,即板料越薄,弯曲开裂的危险性就越小,所允许的 $r_{\min}/t$ 值比厚板要小。

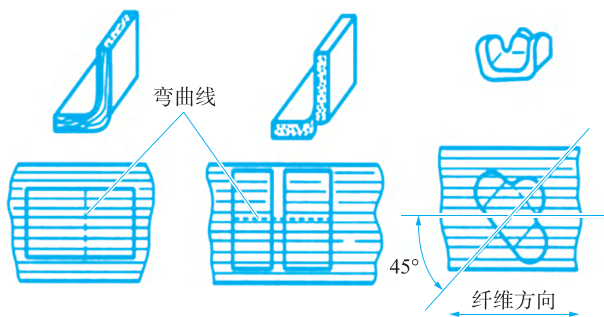


图 3-10 弯曲线方向对 $r_{\min}$ 的影响

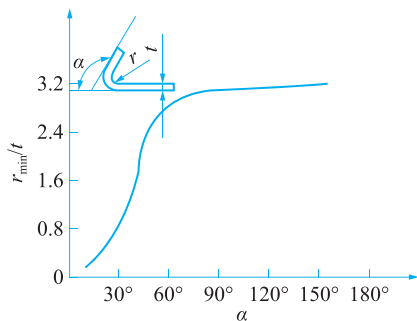


图 3-11 弯曲中心角 α 对弯曲变形程度的影响

3. 最小弯曲半径的数值

由于上述各种因素的综合影响十分复杂，所以最小弯曲半径的数值一般用试验方法来定，各种金属材料在不同状态下的最小弯曲半径 $r_{\min}$ 如表 3-2 所示。

4. 提高弯曲极限变形程度的方法

一般情况下，不宜采用最小弯曲半径。当工件半径小于表 3-2 所列数值时，为提高弯曲极限变形程度，常采取以下措施。

(1) 经冷变形硬化的材料，可采用热处理的方法恢复其塑性，再进行弯曲。

(2) 对于厚料，如结构允许，在圆角处先开槽后弯曲，如图 3-12 所示。

(3) 对于低塑性的材料或厚料，可采用加热弯曲。

(4) 切去材料表面硬化层或滚光毛坯表面的毛刺，当毛刺较小时，也可以使用有毛刺的一面处于弯曲变形区的内侧，以免应力集中而开裂。

(5) 采取两次弯曲的工艺方法，即第一次弯曲采用较大的弯曲半径，然后退火；第二次再按图纸要求的弯曲半径进行弯曲，这样就使变形区域扩大，减少了变形程度。

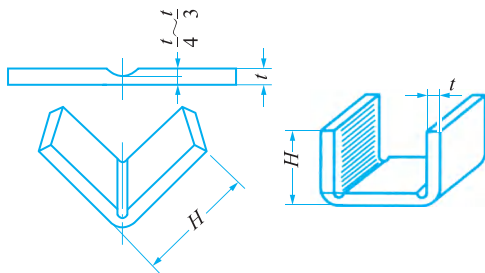


图 3-12 在圆角处先开槽后弯曲



任务一 解答

表 3-2 最小弯曲半径 $r_{\min}$

材料	退火或正火		冷作硬化	
	弯曲方向			
	垂直纤维	平行纤维	垂直纤维	平行纤维
08、10	0.1 <i>t</i>	0.4 <i>t</i>	0.4 <i>t</i>	0.8 <i>t</i>
15、20	0.1 <i>t</i>	0.5 <i>t</i>	0.5 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>
25、30	0.2 <i>t</i>	0.6 <i>t</i>	0.6 <i>t</i>	1.2 <i>t</i>
35、40	0.3 <i>t</i>	0.8 <i>t</i>	0.8 <i>t</i>	1.5 <i>t</i>
45、50	0.5 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>	1.7 <i>t</i>

续表

材料	退火或正火		冷作硬化	
	弯曲方向			
	垂直纤维	平行纤维	垂直纤维	平行纤维
55、60	0.7 <i>t</i>	1.3 <i>t</i>	1.3 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>
65Mn、T7	1.0 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>	3.0 <i>t</i>
Cr18Ni9	1.0 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>	4.0 <i>t</i>
硬铝（软）	1.0 <i>t</i>	1.5 <i>t</i>	1.5 <i>t</i>	2.5 <i>t</i>
硬铝（硬）	2.0 <i>t</i>	3.0 <i>t</i>	3.0 <i>t</i>	4.0 <i>t</i>
磷铜	—	—	1.0 <i>t</i>	3.0 <i>t</i>
半硬黄铜	0.1 <i>t</i>	0.35 <i>t</i>	0.5 <i>t</i>	1.2 <i>t</i>
软黄铜	0.1 <i>t</i>	0.35 <i>t</i>	0.35 <i>t</i>	0.8 <i>t</i>
紫铜	0.1 <i>t</i>	0.35 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>
铝	0.1 <i>t</i>	0.35 <i>t</i>	0.5 <i>t</i>	1.0 <i>t</i>
镁合金	加热到 300~400 ℃		冷作硬化	
MA1-M	2.0 <i>t</i>	3.0 <i>t</i>	6.0 <i>t</i>	8.0 <i>t</i>
MA8-M	1.5 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>	5.0 <i>t</i>	6.0 <i>t</i>
钛合金 BT ₁	1.5 <i>t</i>	3.0 <i>t</i>	6.0 <i>t</i>	8.0 <i>t</i>
钛合金 BT ₄	3.0 <i>t</i>	2.0 <i>t</i>	5.0 <i>t</i>	6.0 <i>t</i>
钨合金	加热到 400~500 ℃		冷作硬化	
<i>t</i> ≤2 mm	2.0 <i>t</i>	3.0 <i>t</i>	4.0 <i>t</i>	5.0 <i>t</i>

注：本表用于材料厚度 $t < 10\text{ mm}$ ，弯曲角 $\alpha \geq 90^\circ$ ，剪切断面良好的情况。

3.2.2 回弹

任务二：试分析图 3-3 所示的 U 形弯曲件的回弹情况，不改变弯曲件结构的前提下，提出减少回弹的措施。

弯曲件在凸模压力作用下产生的弯曲变形由塑性变形和弹性变形两部分组成。当弯曲过程结束，外力去除后，塑性变形留存下来，而弹性变形则完全消失。弯曲变形区外侧因弹性恢复而缩短，内侧因弹性恢复而伸长，产生弯曲件的弯曲角度和弯曲半径与模具相应尺寸不一致的现象称为回弹，如图 3-13 所示。

这种回弹大大加剧了工件形状和尺寸的改变，所以和其他工序相比，弯曲过程的回弹现象是一个非常重要的问题，它直接影响工件的尺寸精度。

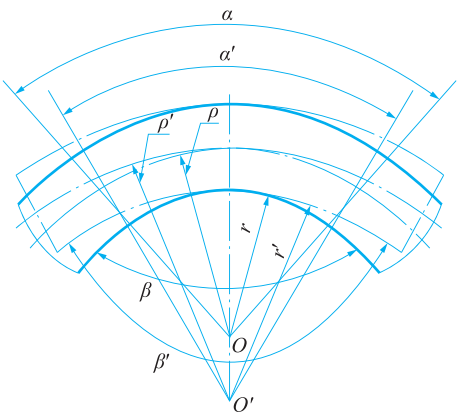


图 3-13 弯曲回弹的表现形式

1. 回弹的表现形式

弯曲回弹的表现形式有以下两个方面,如图 3-13 所示。

(1) 曲率减小。卸载前弯曲中性层的半径 ρ , 卸载后增加至 ρ' , 曲率则由卸载前的 $1/\rho$ 减少至卸载后的 $1/\rho'$ 。如以 ΔK 表示曲率的减小量, 则有

$$\Delta K = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'} \quad (3-1)$$

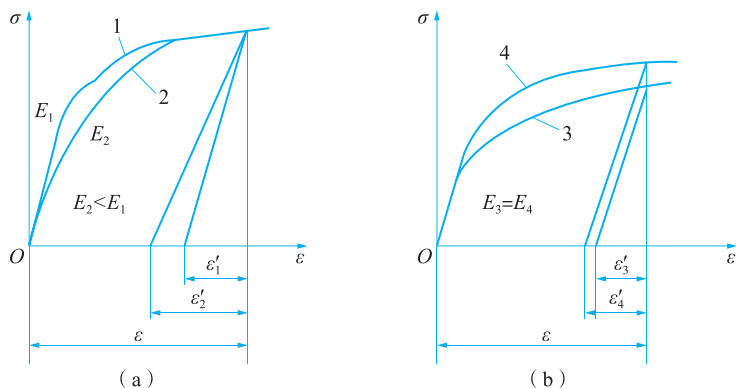
(2) 弯曲中心角减小。卸载前弯曲变形的弯曲中心角 α , 卸载后减小至 α' , 所以弯曲中心角的减小值 $\Delta\alpha$ 为

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha' \quad (3-2)$$

弯曲角的增大量为 $\Delta\beta$, ΔK 与 $\Delta\alpha$ (或 $\Delta\beta$) 即为弯曲件的回弹量。

2. 影响回弹的因素

(1) 材料的力学性能。由图 3-14 可知, 卸载时弹性应变量与材料的屈服极限 σ_s 成正比, 与弹性模量 E 成反比, 即屈服极限 σ_s 愈大, 回弹量愈大。如图 3-14 (a) 所示的两种材料, 屈服极限 σ_s 基本相同, 但弹性模量不同 ($E_1 > E_2$), 在弯曲变形程度相同的条件下, 退火软钢在卸载时的弹性回复变形小于软锰黄铜, 即 $\epsilon'_1 < \epsilon'_2$ 。又如图 3-14 (b) 所示, 两种材料的 E 基本相同, 而屈服极限 σ_s 不相同, 在弯曲变形程度相同的条件下, 卸载后, σ_s 值较高的经冷作硬化的软钢的回弹量将大于 σ_s 值较低的退火软钢的量, 即 $\epsilon'_4 > \epsilon'_3$ 。若 E 不大, 应尽量选用 σ_s 小、 n 值小的材料, 以便获得形状规则、尺寸精确的弯曲件。



1、3—退火软钢；2—软锰黄铜；4—经冷作硬化的软钢。

图 3-14 材料的力学性能对回弹值的影响

(2) 相对弯曲半径 r/t 。 r/t 越小, 则回弹值也越小。 r/t 减小时, 因为总的变形程度增大, 塑性变形在总变形中的比例增大, 相应地弹性变形所占的比例减小。由图 3-15 可知, 当总的变形程度为 ϵ_1 时, 弹性变形所占的比例为 ϵ'_1/ϵ_1 。当总的变形程度增大到 ϵ_2 时, 弹性变形程度所占的比例为 ϵ'_2/ϵ_2 。显然, $\epsilon'_1/\epsilon_1 > \epsilon'_2/\epsilon_2$ 。即随着总的变形程度增加, 弹性变形所占的比例相反地减小了。所以, r/t 越小, 回弹值越小, 相反, r/t 越大, 变形程度越小, 毛坯大部分处于弹性变形状态, 回弹值越大。

(3) 弯曲方式及校正力的大小。校正弯曲可增加圆角处的塑性变形程度, 因而采用校正弯曲时, 工件的回弹小。

(4) 弯曲中心角。弯曲中心角 α 越大, 表明变形区的长度越长, 故回弹的积累值越大, 其回弹角越大。

(5) 弯曲件形状。工件的形状越复杂, 一次弯曲所成形的角度数量越多, 各部分的回弹相互牵制, 回弹减小, 如 W 形工件比 V 形工件的弯曲回弹小。

(6) 模具间隙。在压弯 U 形件时, 凸、凹模之间的间隙对回弹影响较大。间隙大, 材料处于松动状态, 回弹就大; 间隙小, 材料被挤压, 回弹就小。

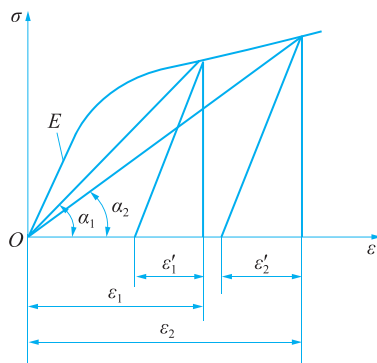


图 3-15 相对弯曲半径对回弹的影响

3. 回弹值的确定方法

为得到一定形状与尺寸精确的工件, 应当确定回弹值。由于影响回弹的因素很多, 在设计及制造模具时, 往往先根据经验数值和简单的计算来初步确定模具工作部分尺寸, 然后在试模时进行修正。

(1) 小变形程度 ($r/t \geq 10$) 自由弯曲时的回弹值。当相对弯曲半径 $r/t \geq 10$ 时, 卸载后弯曲件的角度和圆角半径都较大, 回弹值可按下式计算, 然后在生产中进行修正。

$$r_p = \frac{r}{1 + 3 \frac{\sigma_s r}{Et}} \quad (3-3)$$

$$\alpha_p = \frac{r}{r_p} \alpha \quad (3-4)$$

式中:

r_p ——凸模工作部分的圆角半径, 单位为 mm;

r ——弯曲件的圆角半径, 单位为 mm;

σ_s ——弯曲件材料的屈服强度, 单位为 MPa;

E ——弯曲件材料的弹性模量, 单位为 MPa;

α_p ——凸模圆角部分的中心角, ($^\circ$);

α ——弯曲件的弯曲中心角, ($^\circ$);

t ——弯曲件材料厚度, 单位为 mm。

(2) 大变形程度 ($r/t < 10$) 自由弯曲时的回弹值。当相对弯曲半径 $r/t < 10$ 时, 卸载后弯曲件圆角半径的变化是很小的, 可以不予考虑, 而仅考虑弯曲中心角的回弹变化。单角自由弯曲 90° 时的角度回弹值 $\Delta\alpha$ 如表 3-3 所示, 单角校正弯曲时的角度回弹值 $\Delta\alpha$ 如表 3-4 所示, U 形件弯曲的角度回弹值 $\Delta\alpha$ 如表 3-5 所示。

当弯曲件弯曲中心角不为 90° 时, 其回弹角可用下式计算:

$$\Delta\alpha = \frac{\alpha}{90} \Delta\alpha_{90} \quad (3-5)$$

式中:

$\Delta\alpha$ ——弯曲件的弯曲中心角为 α 时的角度回弹值, ($^\circ$);

α ——弯曲件的弯曲中心角, ($^\circ$);

$\Delta\alpha_{90}$ ——弯曲件的弯曲中心角为 90° 时的角度回弹值, ($^\circ$)。

表 3-3 单角自由弯曲 90° 时的角度回弹值Δα

材料	r/t	材料厚度/mm		
		<0.8	0.8~2	>2
软钢 $\sigma_b=350$ MPa	<1	4°	2°	0°
软黄铜 $\sigma_b\leq 350$ MPa	1~5	5°	3°	1°
钼、锌	>5	6°	4°	2°
中硬钢 $\sigma_b=400\sim 500$ MPa	<1	5°	2°	0°
硬黄铜 $\sigma_b=350\sim 400$ MPa	1~5	6°	3°	1°
硬青铜	>5	8°	5°	3°
硬钢 $\sigma_b>550$ MPa	<1	7°	4°	2°
	1~5	9°	5°	3°
	>5	12°	7°	5°
硬铝 2A12	<2	2°	3°	4.5°
	2~5	4°	6°	8.5°
	>5	6.5°	6°	14°
超硬铝 7A04	<2	2.5°	5°	8°
	2~5	4°	8°	11.5°
	>5	7°	12°	19°

表 3-4 单角校正弯曲时的角度回弹值Δα

材料	r/t		
	≤ 0.8	1~2	2~3
Q235	$-1^{\circ}\sim 1^{\circ}30'$	$0^{\circ}\sim 2^{\circ}$	$1^{\circ}30'\sim 2^{\circ}30'$
纯铜、铝、黄铜	$0^{\circ}\sim 1^{\circ}30'$	$0^{\circ}\sim 3^{\circ}$	$2^{\circ}\sim 4^{\circ}$

表 3-5 U 形件弯曲的角度回弹值Δα

材料	r/t	凸模与凹模的单边间隙 C						
		0.8 t	09 t	1.0 t	1.1 t	1.2 t	1.3 t	1.4 t
		角度回弹值 Δα						
2A12Y	2	-2°	0°	$2^{\circ}30'$	5°	$7^{\circ}30'$	10°	12°
	3	-1°	$1^{\circ}30'$	4°	$6^{\circ}30'$	$9^{\circ}30'$	12°	14°
	4	0°	3°	$5^{\circ}30'$	$8^{\circ}30'$	$11^{\circ}30'$	14°	$16^{\circ}30'$
	5	1°	4°	7°	10°	$12^{\circ}30'$	15°	18°
	6	2°	5°	8°	11°	$13^{\circ}30'$	$16^{\circ}30'$	$19^{\circ}30'$

续表

材料	r/t	凸模与凹模的单边间隙 C						
		0.8 t	09 t	1.0 t	1.1 t	1.2 t	1.3 t	1.4 t
		角度回弹值 $\Delta\alpha$						
2A12M	2	$-1^{\circ}30'$	0°	$1^{\circ}30'$	3°	5°	7°	$8^{\circ}30'$
	3	$-1^{\circ}30'$	$30'$	$2^{\circ}30'$	4°	6°	8°	$9^{\circ}30'$
	4	-1°	1°	3°	$4^{\circ}30'$	$6^{\circ}30'$	9°	$10^{\circ}30'$
	5	-1°	1°	3°	5°	7°	$9^{\circ}30'$	11°
	6	$-30'$	$1^{\circ}30'$	$3^{\circ}30'$	6°	8°	10°	12°
7A04Y	3	3°	7°	10°	$12^{\circ}30'$	14°	16°	17°
	4	4°	8°	11°	$13^{\circ}30'$	15°	17°	18°
	5	5°	9°	12°	14°	16°	18°	20°
	6	6°	10°	13°	15°	17°	20°	23°
	8	8°	$13^{\circ}30'$	16°	19°	21°	23°	26°
7A04M	2	-3°	-2°	0°	3°	5°	$6^{\circ}30'$	8°
	3	-2°	$-1^{\circ}30'$	2°	$3^{\circ}30'$	$6^{\circ}30'$	8°	9°
	4	-1°	-1°	$2^{\circ}30'$	$4^{\circ}30'$	7°	$8^{\circ}30'$	10°
	5	-1°	-1°	3°	$5^{\circ}30'$	8°	9°	11°
	6	0°	$-30'$	$3^{\circ}30'$	$6^{\circ}30'$	$8^{\circ}30'$	10°	12°
20 (已退火)	1	$-2^{\circ}30'$	-1°	$30'$	$1^{\circ}30'$	3°	4°	5°
	2	-2°	$-30'$	1°	2°	$3^{\circ}30'$	5°	6°
	3	$-1^{\circ}30'$	0°	$1^{\circ}30'$	3°	$4^{\circ}30'$	6°	$7^{\circ}30'$
	4	-1°	$30'$	$2^{\circ}30'$	4°	$5^{\circ}30'$	7°	9°
	5	$-30'$	$1^{\circ}30'$	3°	5°	$6^{\circ}30'$	8°	10°
	6	$-30'$	2°	4°	6°	$7^{\circ}30'$	9°	11°

4. 减少回弹的措施

(1) 改进弯曲件的设计。尽量选用弹性模量大、屈服极限小、力学性能稳定和板料厚度波动小的材料；尽量避免选用过大的 r/t ，如有可能，在弯曲区压制加强筋，如图 3-16 所示，以提高零件的刚度，抑制回弹。

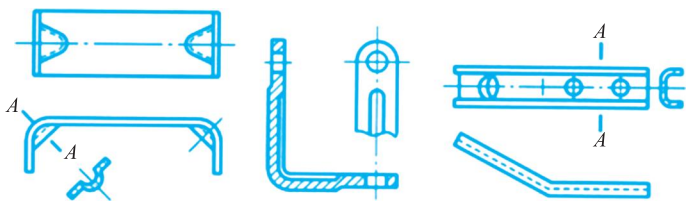


图 3-16 改变弯曲件局部结构

(2) 采取适当的弯曲工艺。采用校正弯曲代替自由弯曲。对冷作硬化的材料须先退火,使其屈服点 σ_s 降低。对回弹较大的材料,必要时可采用加热弯曲。采用拉弯工艺弯曲相对弯曲半径很大的弯曲件,如图 3-17 所示。

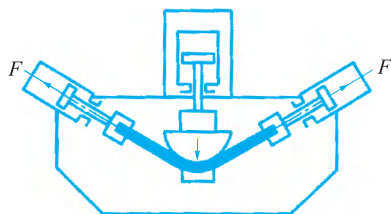


图 3-17 拉弯

(3) 从模具结构采取措施。

①校正法。可以改变凸模结构,使校正力集中在弯曲变形区,以便对弯曲变形区进行局部整形来减少回弹量,如图 3-18 所示。

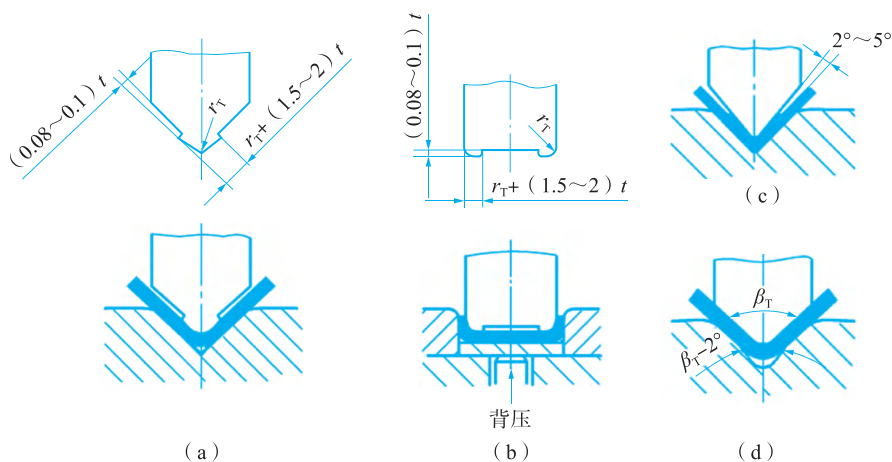


图 3-18 校正法

②补偿法。利用弯曲件不同部位回弹方向相反的特点,按预先估算或试验所得的回弹量,修正凸模和凹模工作部分的尺寸和几何形状,以相反方向的回弹来补偿工件的回弹量。

将凸模外壁做出等于回弹角的倾斜角度,或将凸模和顶板做成弧形面,如图 3-19 所示,这时工件的底平面就有局部弹性变形,当把工件从模具中取出时,由于弧形部分的弹性恢复,这个地方的回弹量补偿了工件两侧壁的回弹量,工件恰好变形到所需的形状。

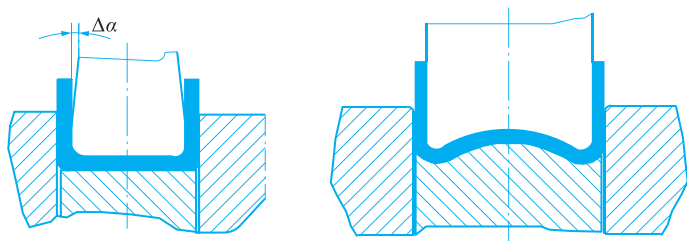


图 3-19 补偿法

③采用聚氨酯弯曲模。利用聚氨酯凹模(见图 3-20)代替刚性金属凹模进行弯曲。弯曲时金属板料随着凸模逐渐进入聚氨酯凹模,急增的弯曲力将会改变圆角变形区材料的应力应变状态,达到类似校正弯曲的效果,从而减少回弹。

④端部加压法。在弯曲过程完成后,利用模具的突肩在弯曲件的端部纵向加压,使弯

曲变形区横断面上都受到压应力，如图 3-21 所示，使回弹大为降低，并获得精确的弯曲高度。

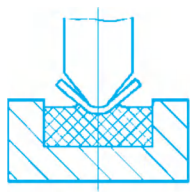


图 3-20 聚氨酯凹模弯曲

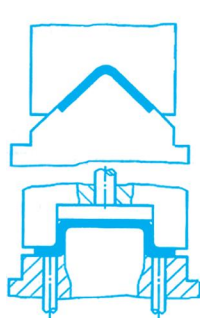
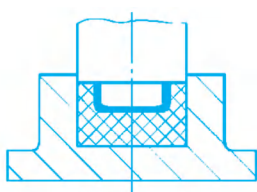
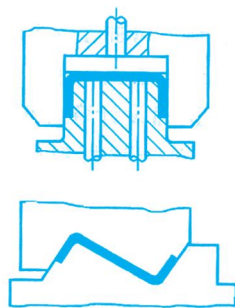


图 3-21 坯料端部加压弯曲



3.2.3 偏移

1. 偏移现象的产生

板料在弯曲过程中，当板料各边所受的摩擦阻力不等时，毛坯在弯曲过程中沿工件的长度方向产生移动，使工件两直边的高度不符合图样要求，这种现象称为偏移。

产生偏移的原因有：毛坯形状不对称，如图 3-22 (a)、图 3-22 (b) 所示；工件结构不对称，如图 3-22 (c) 所示；凸模与凹模的圆角不对称，如图 3-22 (d) 所示。此外，间隙不对称等都会导致弯曲件偏移。

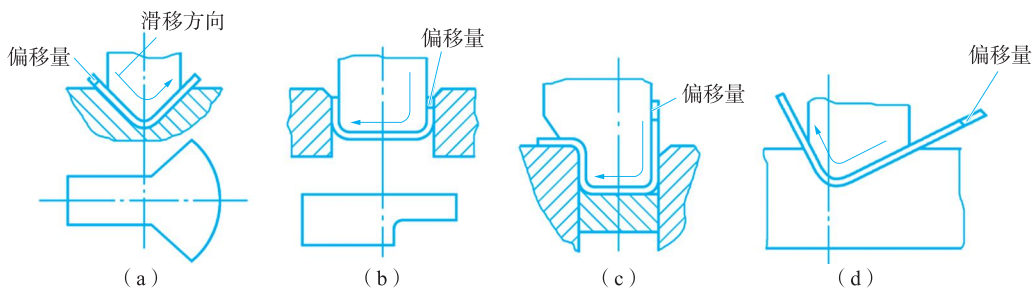


图 3-22 弯曲时的偏移现象

2. 克服偏移的措施

(1) 采用压料装置。使毛坯在压紧的状态下逐渐弯曲成形，从而防止毛坯的滑动，而且能得到较平工件，如图 3-23 (a)、图 3-23 (b) 所示。

(2) 定位后再弯曲。利用毛坯上的孔或设计工艺孔，用定位销插入孔内再弯曲，使毛坯无法移动，如图 3-23 (c)。

(3) 成对弯曲。将不对称形状的弯曲件组合成对称弯曲件进行弯曲，然后再切开，使板料弯曲时受力均匀，以防产生偏移，如图 3-23 (d)。

(4) 模具制造准确，间隙调整对称，使阻力对称分布。



任务二 解答

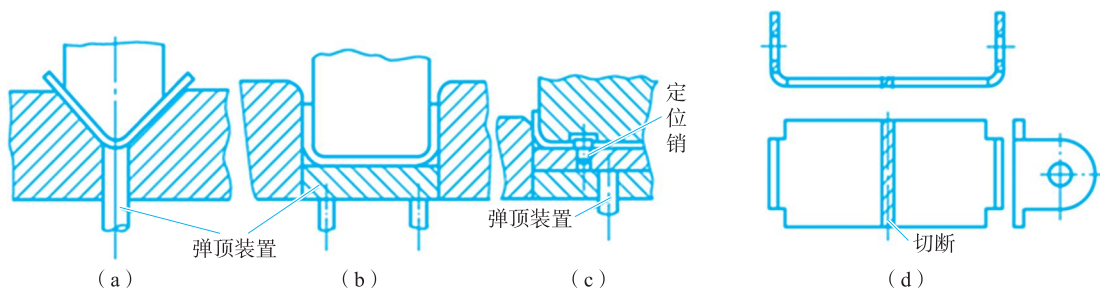


图 3-23 克服偏移的措施

3.3 弯曲件的工艺性和工序安排

任务三：对图 3-3 所示的 U 形弯曲件进行工艺性及结构性分析。

3.3.1 弯曲件的工艺性

弯曲件的工艺性是指弯曲件对弯曲加工的适应性。良好的工艺性不仅能提高弯曲件的精度，而且还能简化加工过程和模具设计，节约材料，降低生产成本。

1. 弯曲件的精度

弯曲件的精度受坯料定位、偏移、翘曲和回弹等因素的影响，弯曲的工序数目越多，精度也越低。一般弯曲件的尺寸公差不要高于 IT13 级，角度公差不小于 $15'$ 。如果成形精度要求过高，应增加弯曲后的整形工序。

2. 弯曲件材料

弯曲件材料具有足够的塑性、屈强比 σ_s/σ_b 小、屈服极限与弹性模量的比值 σ_s/E 小，则有利于弯曲成形和工件质量的提高。如软钢、黄铜和铝等材料的弯曲成形性能好；而脆性较大的材料，如磷青铜、铍青铜、弹簧钢等，最小相对弯曲半径 $r_{\min}/t$ 大、回弹大、不利于成形。

3. 弯曲件的结构工艺性

(1) 弯曲件形状。弯曲件的形状与尺寸应尽可能对称，高度也不应相差太大。当冲压不对称的弯曲件 [见图 3-24 (a)] 时，因受力不均匀，毛坯容易偏移，尺寸不易保证。

(2) 最小弯曲半径。弯曲件的弯曲半径必须大于最小弯曲半径，否则要采用工艺措施，如热弯、压槽 (见图 3-25)、多次弯曲等。

(3) 弯曲件直边高度。在弯曲 90° 时，为使弯曲有足够长的弯曲力臂，必须使弯曲边高度 $h > 2t$ 。若弯曲的直边高度过短 ($h < 2t$)，应压槽后弯曲，如图 3-26 所示，或增加直边长度，弯曲后再剪掉，如图 3-27 所示。

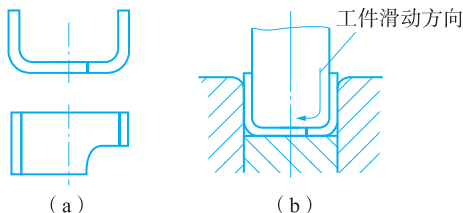


图 3-24 形状对称和不对称的弯曲件

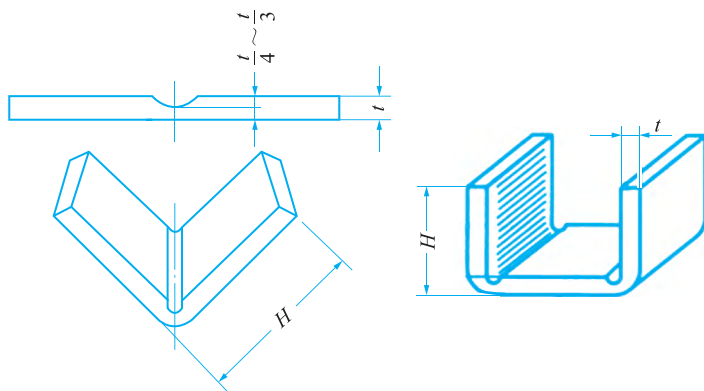


图 3-25 压槽后再进行弯曲

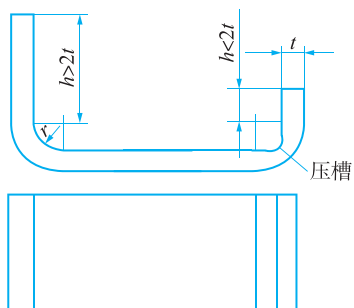


图 3-26 弯曲件的直边高度

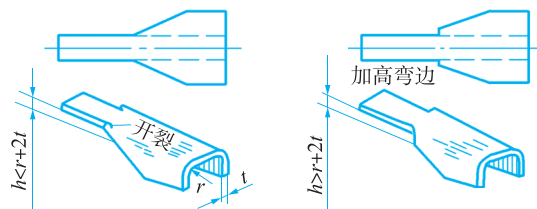


图 3-27 直边带有斜角的弯曲件

(4) 防止弯曲根部裂纹的工件结构。在局部弯曲某一段边缘时, 为避免在尺寸突变的尖角处弯裂, 应改变零件的形状, 使其退出弯曲线之外, 即 $b \geq r$, 如图 3-28 (a) 所示; 如果零件的长度不能改变, 应在弯曲部分与不弯曲部分之间切槽, $c \geq t$, 如图 3-28 (b) 所示; 或在弯曲前冲出 $d \geq t$ 的工艺孔, 如图 3-28 (c) 所示; 对于圆形弯曲件, 可在弯曲部分两侧切槽, 槽宽 $b \geq t$, 槽深 $h \geq t + r + \frac{b}{2}$, 如图 3-28 (d) 所示。

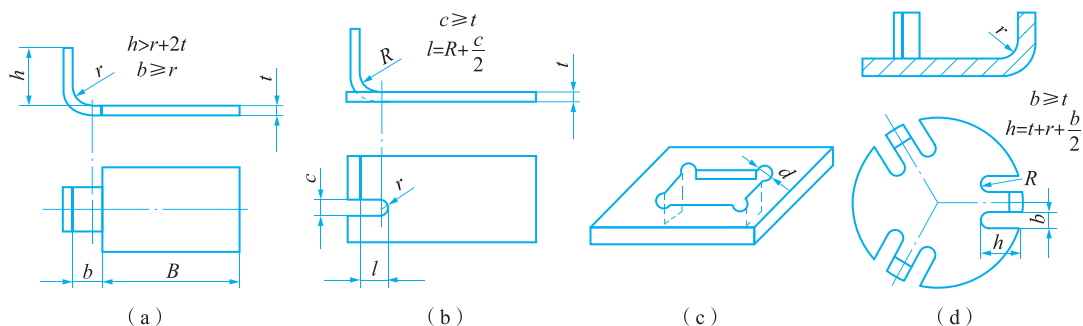


图 3-28 加冲工艺槽和孔

(5) 弯曲件孔边距离。带孔的板料在弯曲时, 如果位于弯曲变形区内, 则孔的形状会发生畸变。因此, 孔边到弯曲半径中心要保持一定的距离, 如图 3-29 (a) 所示, 当 $t < 2 \text{ mm}$ 时, $l \geq t$; 当 $t \geq 2 \text{ mm}$ 时, $l \geq 2t$ 。

如果不能满足上述条件,可采取在弯曲变形区冲出工艺孔,如图 3-29 (b) 所示,或冲凸缘形缺口或月牙槽的措施,以转移变形区,如图 3-30 所示。

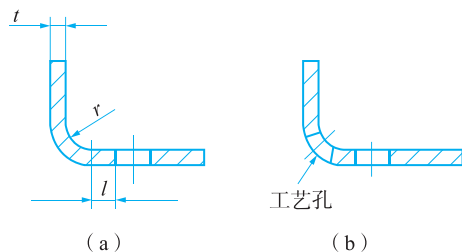


图 3-29 弯曲件孔边距



图 3-30 防止孔弯曲时变形的措施

(6) 增添连接带和定位工艺孔。边缘部分有缺口的弯曲件,若毛坯上先将缺口冲出,弯曲时会出现叉口,甚至无法成形。这时,必须在缺口外留有连接带,弯曲后再将连接带切除,如图 3-31 所示。

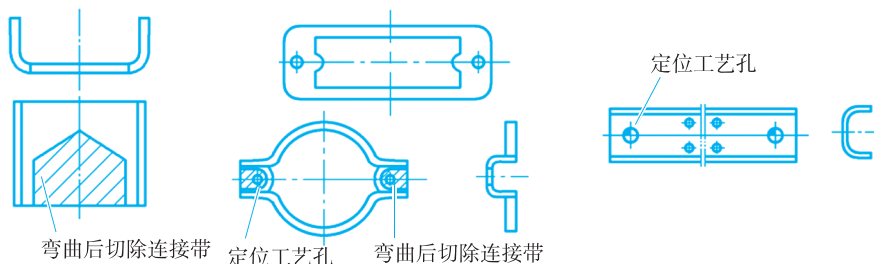


图 3-31 增添连接带和定位工艺孔的弯曲件

(7) 尺寸标注。尺寸标注对弯曲件的工艺性有很大的影响,如图 3-32 所示的弯曲件位置尺寸的三种标注法中,图 3-32 (a) 所示的标注,孔的位置精度不受坯料展开长度和回弹的影响,将大大简化工艺设计。因此,在不要求弯曲件有一定装配关系时,应尽量考虑冲压工艺的便利性来标注尺寸。

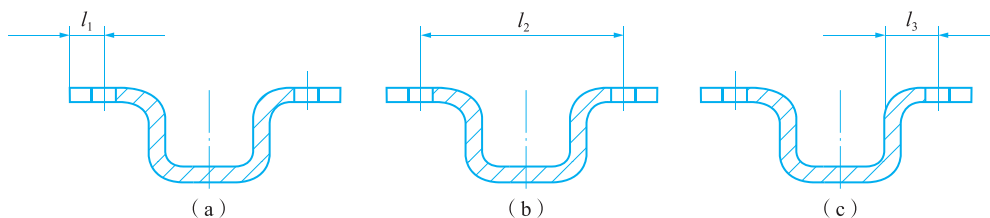


图 3-32 尺寸标注对弯曲工艺的影响

3.3.2 弯曲件的工序安排

安排的一般原则:先弯外角,后弯内角。前次弯曲要给后次弯曲留出可靠的定位,并保证后次弯曲不破坏前次已弯曲的形状。一般方法如下。

- (1) 形状简单的弯曲件:采用一次弯曲成形,如 U、V、Z 形工件。
- (2) 形状复杂的弯曲件:采用二次或多次弯曲成形,如图 3-33、图 3-34 所示。

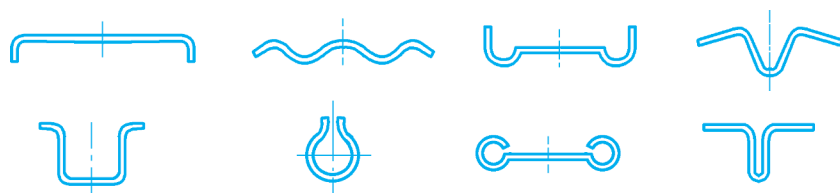


图 3-33 采用二道工序弯曲成形

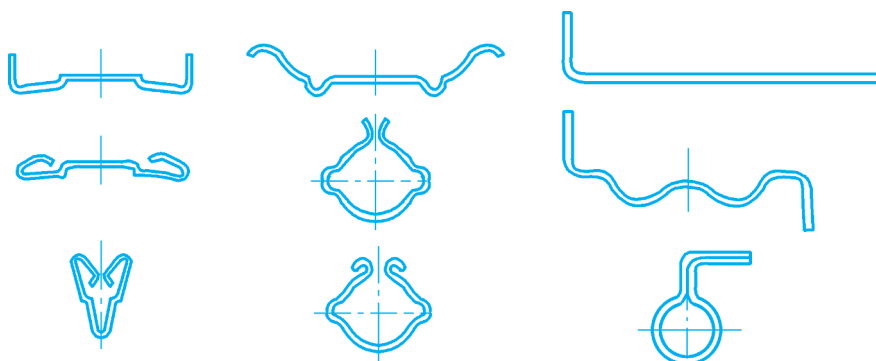


图 3-34 采用三道工序弯曲成形

- (3) 批量大而尺寸较小的弯曲件，尽可能采用连续模、专用模或复合模。
- (4) 弯曲件形状不对称时，尽量成对弯曲，如图 3-35 所示，然后再剖切。
- (5) 带孔的弯曲件，冲孔工序尽可能安排在弯曲工序之后进行，有利于保证孔形精度和位置精度。

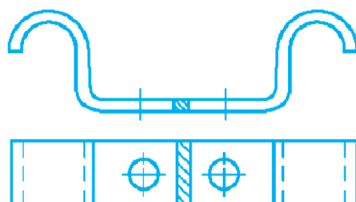


图 3-35 成对弯曲成形



任务三 解答

3.4 弯曲件的工艺计算

任务四：确定图 3-3 所示弯曲件的应变中性层及毛坯尺寸。

3.4.1 弯曲件坯料尺寸的计算

弯曲加工时，弯曲件毛坯尺寸是否合理，直接关系到工件的尺寸精度。根据弯曲时应变中性层在弯曲前后长度不变的特点，计算毛坯的长度尺寸。

1. 中性层位置的确定

根据中性层的定义，弯曲件的坯料长度应等于中性层的展开长度。中性层的位置以曲率半径表示（见图 3-36），通常用下面经验公式确定：

$$\rho = r + xt \quad (3-6)$$

式中：

ρ ——应变中性层的曲率半径，单位为 mm；

r ——零件的内弯曲半径，单位为 mm；

t ——板料的厚度，单位为 mm；

x ——中性层位移系数，从表 3-6 中选取。

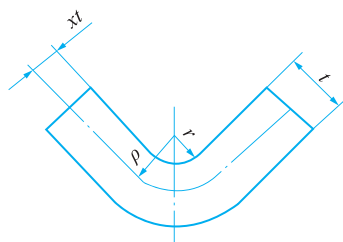


图 3-36 中性层的位置

表 3-6 中性层位移系数 x

r/t	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.2
x	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.30	0.32	0.33
r/t	1.3	1.5	2	2.5	3	4	6	7	≥ 8
x	0.34	0.36	0.38	0.39	0.40	0.42	0.46	0.48	0.5

2. 弯曲件坯料展开长度的计算

计算依据：变形区弯曲变形前后体积不变；应变中性层在弯曲变形前后长度不变。即弯曲变形区的应变中性层长度，就是弯曲件的展开尺寸。

计算方法：将零件划分为直线和圆角部分，直线部分的长度不变，而弯曲的圆角部分长度应按应变中性层相对移动后计算，各部分长度的总和即毛坯展开尺寸。对于形状复杂或精度要求高的弯曲件，在利用下述公式初步计算坯料后，还需反复试弯不断修正，才能最后确定坯料的形状和尺寸。

(1) 圆角半径 $r > 0.5t$ 的弯曲件。如图 3-37 所示，变薄不严重，按中性层展开的原理，坯料总长度应等于弯曲件直线部分和圆弧部分长度之和，即

$$L = \sum l_{\text{直边}} + \sum l_{\text{圆弧}} \quad (3-7)$$

$$l_{\text{圆弧}} = \frac{\pi\alpha}{180} \rho = \frac{\pi\alpha}{180} (r + xt) \quad (3-8)$$

式中：

L ——弯曲件坯料长度，单位为 mm；

$l_{\text{直边}}$ ——弯曲件直边各段长度，单位为 mm；

$l_{\text{圆弧}}$ ——弯曲件圆弧各段长度，单位为 mm；

α ——弯曲中心角，(°)。

由式 (3-7)、式 (3-8) 得图 3-37 的坯料展开长度计算公式为

$$L_z = l_1 + l_2 + \frac{\pi\alpha}{180} \rho = l_1 + l_2 + \frac{\pi\alpha}{180} (r + xt) \quad (3-9)$$

(2) 圆角半径 $r \leq 0.5t$ 的弯曲件。如图 3-38 所示，此类弯曲件不仅圆角变形区严重变薄，而且与其相邻的直边部分也变薄。应按变形

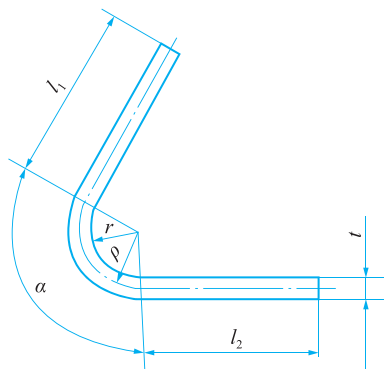


图 3-37 圆角半径 $r > 0.5t$ 的弯曲件

前后体积不变条件确定坯料长度。

图 3-38 中, 当弯曲角为 90° 时,

弯曲前体积: $V=Lbt$

弯曲后体积: $V'=(l_1+l_2)bt+\frac{\pi t^2}{4}b$

由 $V=V'$ 可得

$$L=l_1+l_2+0.785t \quad (3-10)$$

在弯曲变形时, 由于变形的连续性, 毛坯弯曲变形区的变薄会使与其相邻的两直边部分也相应地产生变薄, 因此, 对式 (3-10) 进行修正, 如下式所示:

$$L=l_1+l_2+x't \quad (3-11)$$

x' 为修正系数, 一般取 $x'=0.4\sim 0.6$ 。

(3) 铰链弯曲件。铰链弯曲件和一般弯曲件有所不同, 铰链弯曲件常用卷圆 (推卷) 的方法成形。在弯曲卷圆的过程中, 材料除了弯曲以外还受到挤压作用, 板料不是变薄而是增厚了, 中性层将向外侧移动, 因此其中性层位移系数 $x\geq 0.5$ 。

对于 $r=(0.6\sim 3.5)t$ 的铰链弯曲件, 如图 3-39 所示, 其坯料长度可按下式近似计算:

$$L_z=l+1.5\pi(r+xt)+r\approx l+5.7r+4.7x_1t \quad (3-12)$$

式中:

x_1 ——中性层位移系数, 可参考表 3-7 查取。

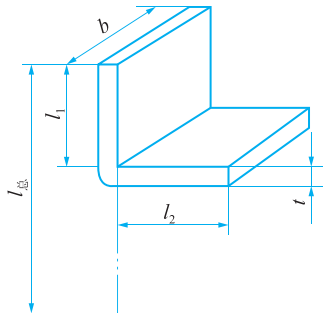


图 3-38 圆角半径 $r\leq 0.5t$ 的弯曲件

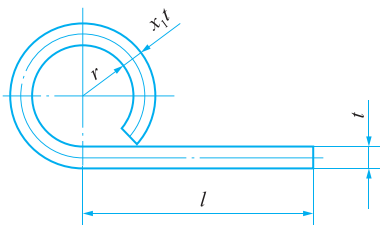


图 3-39 铰链弯曲件



任务四 解答

表 3-7 中性层位移系数 x_1

r/t	$>0.5\sim 0.6$	$>0.6\sim 0.8$	$>0.8\sim 1$	$>1\sim 1.2$	$>1.2\sim 1.5$	$>1.5\sim 1.8$	$>1.8\sim 2.0$	$>2.0\sim 2.2$	>2.2
x_1	0.76	0.73	0.7	0.67	0.64	0.61	0.58	0.54	0.5

3.4.2 弯曲力的计算

任务五：试计算图 3-3 所示弯曲件的坯料展开长度及冲压力。

在弯曲加工中, 凸模对工件毛坯施加的作用力称为弯曲力。当遇到工件板材厚度、材料强度、弯曲行程和弯曲变形程度等比较大的情况时, 可能会发生弯曲设备的吨位和功率不足的问题, 因此需要计算弯曲力以作为设计弯曲模和选择弯曲设备的依据。

弯曲力的大小受到毛坯形状尺寸、材料力学性能、弯曲方式、变形程度、模具结构形式、模具间隙等多种因素的影响。弯曲力的理论计算较复杂, 生产中通常采用经验公式估算弯曲力。

1. 自由弯曲时的弯曲力

V 形件弯曲力为

$$F_{\text{自}} = \frac{0.6KBt^2\sigma_b}{r+t} \quad (3-13)$$

U 形件弯曲力为

$$F_{\text{自}} = \frac{0.7KBt^2\sigma_b}{r+t} \quad (3-14)$$

式中:

$F_{\text{自}}$ ——自由弯曲在冲压行程结束时的弯曲力, 单位为 N;

B ——弯曲件的宽度, 单位为 mm;

t ——弯曲材料的厚度, 单位为 mm;

r ——弯曲件的内弯曲半径, 单位为 mm;

σ_b ——材料的抗拉强度, 单位为 MPa;

K ——安全系数, 一般取 $K=1.3$ 。

2. 校正弯曲时的弯曲力

校正弯曲力比自由弯曲力大得多, 因此若采用校正弯曲, 一般只需计算校正力, V 形件和 U 形件弯曲校正力都采用下式计算:

$$F_{\text{校}} = Ap \quad (3-15)$$

式中:

$F_{\text{校}}$ ——校正弯曲力, 单位为 N;

A ——校正部分投影面积, 单位为 mm²;

p ——单位面积校正力, 单位为 MPa, 其值可按照表 3-8 选取。

表 3-8 单位面积上的校正力 p

材料	材料厚度	
	<3 mm	3~10 mm
铝	30~40 MPa	50~60 MPa
黄铜	60~80 MPa	80~100 MPa
10、15、20	80~100 MPa	100~120 MPa
25、30、35	100~120 MPa	120~150 MPa

3. 顶件力或压料力

若弯曲模设有顶件装置或压料装置, 其顶件力 (或压料力) 可近似取自由弯曲力的 30%~80%, 且要在一定范围内根据实际情况进行调整。即

$$F_D = (0.3 \sim 0.8)F_{\text{自}} \quad (3-16)$$

式中:

F_D ——顶件力或压料力, 单位为 N;

$F_{\text{自}}$ ——自由弯曲力, 单位为 N;

4. 压力机公称压力的确定

对于有压料的自由弯曲为

$$F_{\text{压}} \geq F_{\text{自}} + F_D \quad (3-17)$$

式中：

$F_{\text{压}}$ ——压力机的公称压力，单位为 N；

$F_{\text{自}}$ ——自由弯曲力，单位为 N；

F_{D} ——顶件力或压料力，单位为 N。

对于校正弯曲：

$$F_{\text{压}} \geq F_{\text{校}} \quad (3-18)$$

式中：

$F_{\text{校}}$ ——校正弯曲力，单位为 N。



任务五 解答

3.5 弯曲模的设计要求及典型结构

3.5.1 弯曲模的设计要求

弯曲模的结构主要取决于弯曲件的形状及弯曲工序的安排。

弯曲模结构设计要点有以下几方面。

- (1) 弯曲毛坯的定位要准确、可靠，尽可能是水平放置。多次弯曲最好使用同一基准定位。
- (2) 结构中要能防止毛坯在变形过程中发生位移，毛坯的放置和制件的取出要方便、安全和操作简单。
- (3) 模具结构尽量简单，并且便于调整修理。
- (4) 对于回弹性大的材料弯曲，应考虑凸模、凹模制造加工及试模、修模的可能性以及刚度和强度的要求。

3.5.2 弯曲模典型结构

1. V 形件弯曲模

V 形件形状简单，能一次成形。V 形件的弯曲主要有两种：一种是沿弯曲件的角平分线方向弯曲，称为 V 形弯曲；另一种是垂直于一直边方向的弯曲，称为 L 形弯曲。

图 3-40 (a) 所示为简单 V 形件的弯曲模，其结构简单、通用性好，但弯曲时坯料容易偏移，影响工件精度。

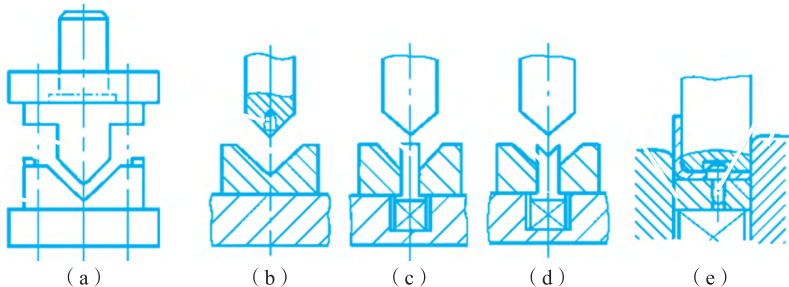


图 3-40 一般的 V 形件弯曲模

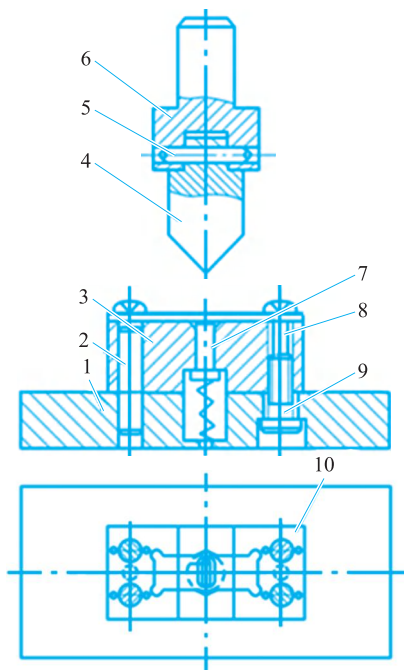
图 3-40 (b)、图 3-40 (c)、图 3-40 (d) 所示分别为带有定位尖、顶杆、V 形顶板的模具结构, 可以防止坯料滑动, 提高工件精度。

图 3-40 (e) 所示为有顶板及定料销的弯曲模, 可以有效防止弯曲时坯料的偏移, 边长偏差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。反侧压块的作用是平衡左边弯曲时产生的水平侧向力。

图 3-41 所示的 V 形件弯曲模结构简单, 在压力机上安装及调整方便, 对材料厚度的公差要求不严, 工件在冲程末端得到不同程度的校正, 因而回弹较小, 工作的平面度较好。该弯曲模的工作原理: 首先将坯料放在定位板 10 中定位, 上模下行, 凸模 4 与顶杆 7 将坯料压紧一起下压, 对板料进行弯曲, 回程时, 顶杆 7 在弹簧的作用下, 将弯曲件向上顶出, 同时还起到压料作用, 可防止材料的偏移, 适合一般 V 形弯曲件的弯曲。

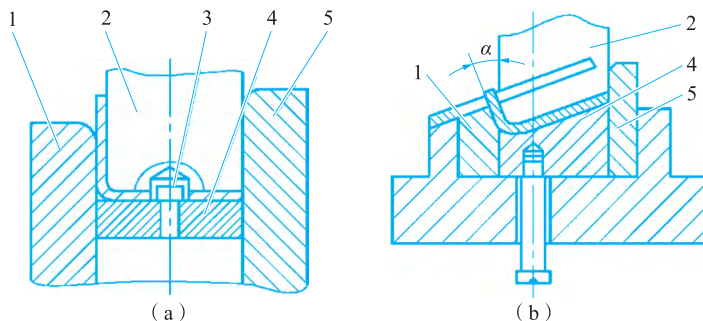
图 3-42 所示为 L 形件弯曲模, 用于弯曲直边长度相差较大的单角弯曲件。图 3-42 (a) 所示为基本形式的 L 形件弯曲模。弯曲件直边长的一边夹紧在凸模 2 与压料板 4 之间, 另一边沿凹模 1 圆角滑动而向上弯起。坯料上的工艺孔套在定位销 3 上, 以防止因凸模与压料板之间的压料力不足而产生坯料偏移的现象。但这种弯曲因竖边部分没得到校正, 所以回弹较大。为了平衡单边弯曲时产生的水平侧向力, 需设置一反侧压块。

图 3-42 (b) 所示为有校正作用的 L 形件弯曲模。由于凹模 1 和压料板 4 的工作面有一定的倾斜角 α , α 值为 $5^\circ \sim 10^\circ$, 竖直边能得到一定的校正, 弯曲后工件的回弹较小。



1—下模座; 2、5—圆柱销; 3—凹模; 4—凸模;
6—模柄; 7—顶杆; 8、9—螺钉; 10—定位板。

图 3-41 V 形件弯曲模



1—凹模; 2—凸模; 3—定位销; 4—压料板; 5—靠板。

图 3-42 L 形件弯曲模

图 3-43 所示为可转动凹模的 V 形件精弯模。弯曲时, 凸模 1 压住材料后下行, 迫使活动凹模 4 向内转动, 并沿支撑板 6 向下滑动, 使坯料压成 V 形。凸模回程时, 弹顶器使活动凹模 4 上行, 由于两活动凹模通过转轴 5 铰接, 所以在上升的同时向外转动张开, 恢复

到原来的原始位置。支架 2 控制回程高度，使两活动凹模成一平面。

该模具能够保证毛坯与凹模始终保持大面积接触，毛坯在活动凹模上不产生相对滑动和偏移。这种结构特别适用于有精确孔位的小零件，坯料不易放平稳的带窄条的零件以及没有足够压料面的零件。

2. U 形件弯曲模

(1) 一般 U 形件弯曲模。图 3-44 所示为一般的 U 形件弯曲模的几种结构形式。图 3-44 (a) 所示为开底凹模，用于底部不要求平整的制件。图 3-44 (b) 用于底部要求平整的弯曲件。图 3-44 (c) 用于料厚公差较大而外侧尺寸要求较高的弯曲件，其凸模为活动结构，可随料厚自动调整凸模横向尺寸。图 3-44 (d) 用于料厚公差较大而内侧尺寸要求较高的弯曲件，凹模两侧为活动结构，可随料厚自动调整凹模横向尺寸。图 3-44 (e) 为 U 形件精弯模，两侧的凹模活动镶块用转轴分别与顶板铰接。弯曲前顶杆将顶板顶出凹模面，同时顶板与凹模活动镶块成一平面，镶块上有定位销供工序件定位用。弯曲时工序件与凹模活动镶块一起运动，这样就保证了两侧孔的同轴。图 3-44 (f) 为弯曲件两侧壁厚变薄的弯曲模。

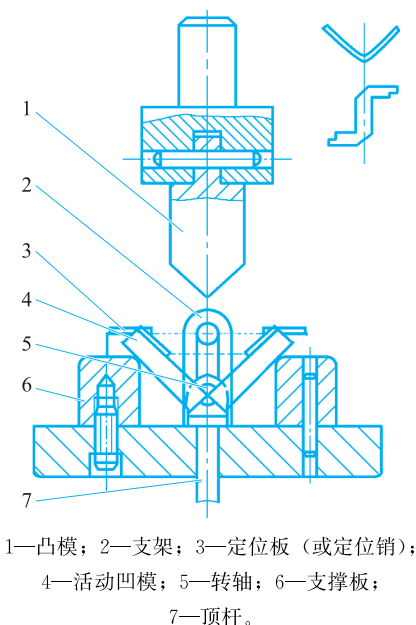


图 3-43 可转动凹模的 V 形件精弯模

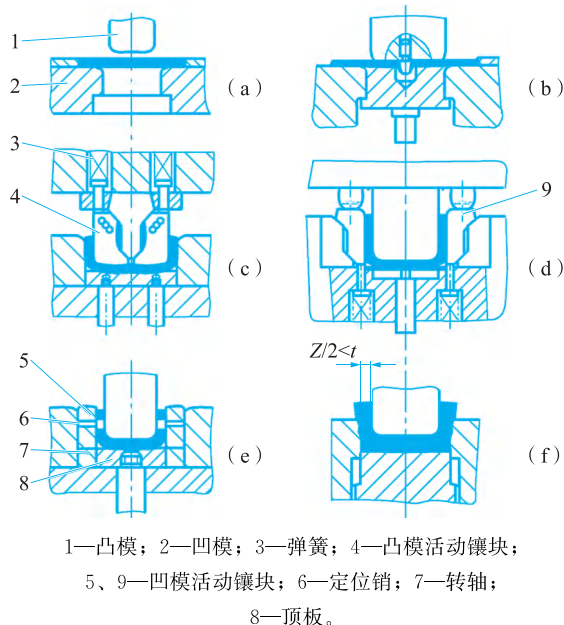


图 3-44 一般 U 形件弯曲模

凸模下行时，两端未被压住的材料沿凹模圆角滑动并弯曲，进入凸模与凹模的间隙。凸模回升时，压料板将工件顶出，一次行程中能同时完成两个角的弯曲。由于材料的回弹，工件一般不会包在凸模上。

(2) 锐角 U 形件弯曲模。图 3-45 所示为锐角 U 形件弯曲模，适用于弯曲较厚的材料。模具压弯时，凸模 1 首先将坯料弯曲成 U 形，当凸模继续下降到与凹模镶块接触时，两侧的转动凹模 3 使坯料最后压弯成弯曲角小于 90° 的 U 形件。凸模上升，弹簧使转动凹模复位，工件则由垂直图面方向从凸模上卸下。

3. Z 形件弯曲模

图 3-46 所示为活动凸模的 Z 形件弯曲模，可一次弯曲成形。工作前活动凸模 9 在橡胶的作用下与凸模 4 端面平齐。工作时活动凸模与顶板 1 将坯料夹紧，通过凸模托板 8、橡胶 7 的传导，推动顶板下移使坯料左端弯曲。当顶板与下模座 11 接触后，橡胶受到压力的作用而压缩，凸模相对于活动凸模下移将坯料右端弯曲成形。当压块 6 与上模座 5 相碰时，弯曲件得到矫正。这种模具有效地防止坯料偏移。侧压块 2 的作用是平衡上、下模水平方向的作用力，同时也可防止顶板 1 的窜动。此弯曲模适用于精度要求较高的零件。

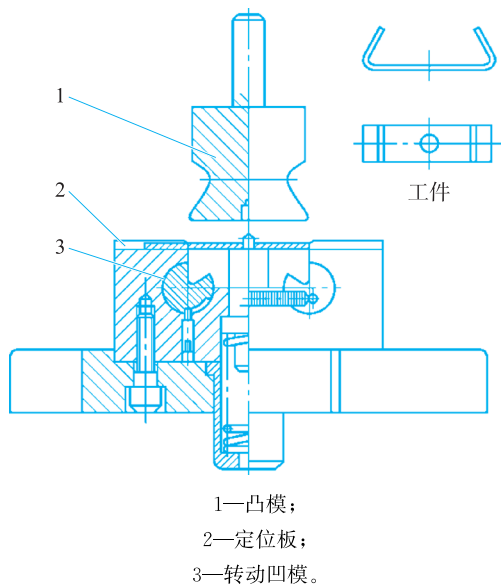


图 3-45 锐角 U 形件弯曲模

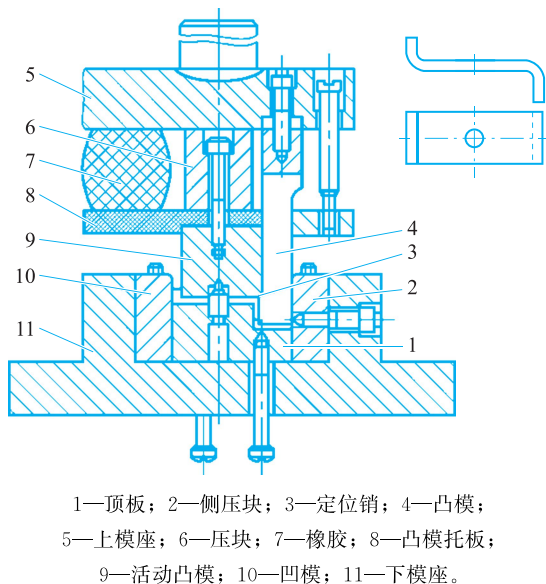


图 3-46 Z 形件弯曲模

4. 帽罩形件弯曲模

帽罩形件又叫四角形件，如图 3-47（a）所示，有四个角需弯曲成形。这种弯曲件可以两次弯曲成形，也可以一次弯曲成形。图 3-47（b）、图 3-47（c）所示结构为两次弯曲成形的弯曲模。

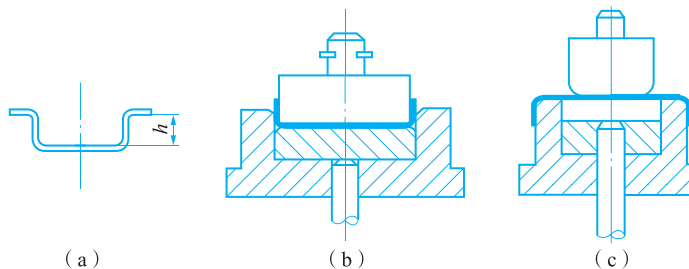


图 3-47 帽罩形件和帽罩形件弯曲模（两次弯曲成形）

图 3-48 所示为一次弯曲成形的帽罩形件弯曲模，在弯曲过程中，由于外角处的弯曲线位置在弯曲过程中是变化的，因此材料在弯曲时有拉长现象，如图 3-48（b）所示，脱模后，其外角形状不准，并有竖直边变薄的现象，如图 3-48（c）所示。

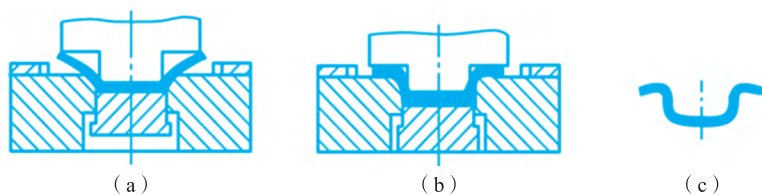
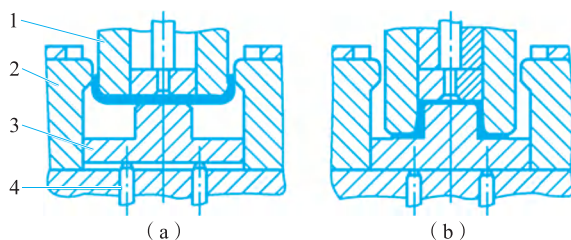


图 3-48 帽罩形件弯曲模（一次弯曲成形）

图 3-49 所示的弯曲模为帽罩形件分步弯曲模，即在一副模具中完成两次弯曲的帽罩形件弯曲模。坯料放在凹模上，由定位板定位。开始弯曲时，凸凹模 1 下行，先弯外角，使坯料凹模压弯成 U 形，如图 3-49 (a) 所示。随着凸凹模继续下行，到行程终了时将 U 形工件压成四角形件。这种结构需要凹模下腔空间较大，以方便工件侧边的转动。



1—凸凹模；2—凹模；3—活动凸模；4—顶杆。

图 3-49 帽罩形件分步弯曲模

图 3-50 所示为带摆块的帽罩形件分步弯曲模，先弯曲内侧两角，后弯曲外侧两角。板料放在活动凸模 2 顶面上，靠两侧的挡板定位。上模下行时，活动凸模 2 和凹模 1 利用弹顶器的弹力弯出工件的两个内角，使坯料弯成 U 形。上模继续下行，凹模的底部迫使活动凸模 2 压缩弹顶器向下运动。这时铰接在凸模侧面的一对摆块 3 向外摆动，完成两个外角的弯曲。

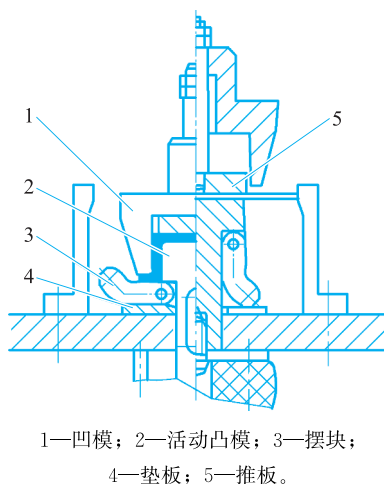
5. 铰链件弯曲模

铰链有两种不同形式的铰链结构，需要两次弯曲成形。铰链一般采用卷圆工艺，如图 3-51 (a) 为常见的铰链件形式和弯曲工序的安排。

预弯模如图 3-51 (b) 所示，卷圆的原理通常是推圆法。图 3-51 (c) 是立式卷圆模，结构简单。图 3-51 (d) 是卧式卷圆模，有压料装置，工件质量较好，操作方便。

6. 圆形件弯曲模

圆形件弯曲的方法根据圆直径的不同而不同。对于圆形件直径 $d \geq 20$ mm 的大圆形件，其弯曲方法可以由一次、二次、三次弯曲而成。图 3-52 所示为大圆三次弯曲模，可分三道工序将坯料弯成大圆。这种模具生产效率低，适用于材料较厚零件的弯曲。



1—凹模；2—活动凸模；3—摆块；
4—垫板；5—推板。

图 3-50 带摆块的帽罩形件
分步弯曲模

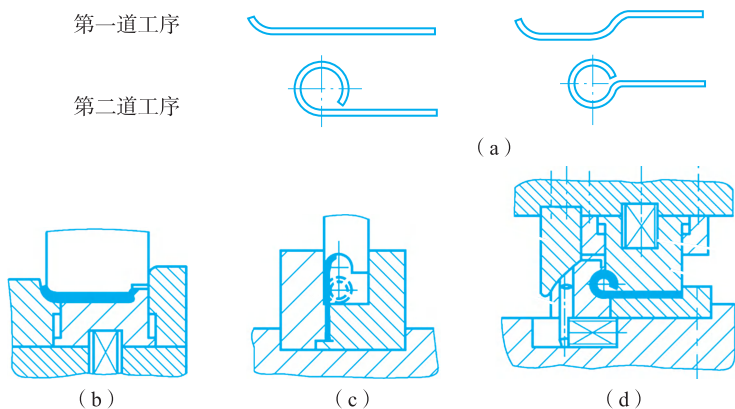


图 3-51 铰链件弯曲模

(a) 铰链件形式和弯曲工序的安排；(b) 预弯模；(c) 立式卷圆模；(d) 卧式卷圆模

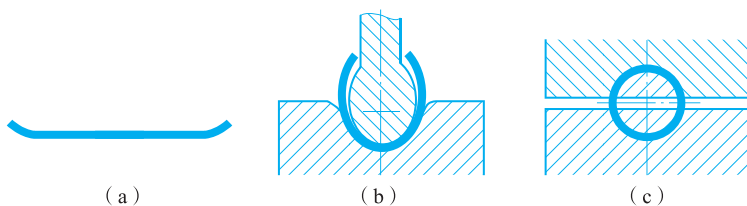
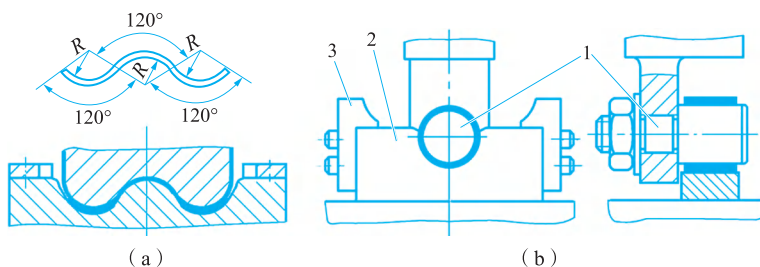


图 3-52 大圆三次弯曲模

(a) 首次弯曲；(b) 二次弯曲模；(c) 三次弯曲模

图 3-53 所示为大圆二次弯曲模，先将坯料预弯成三个 120° 的波浪形，如图 3-53 (a) 所示，然后放置在图 3-53 (b) 所示的二次弯曲模中，凸模 3 往内推动波浪形件的外半圆向内弯曲，上模下行，凹模 2 压紧工件使凸模 1 的圆弧成形面将波浪形再弯成圆，并包在芯轴上。弯曲完毕后，工件套在芯轴凸模 1 上，可顺凸模横向取出工件。



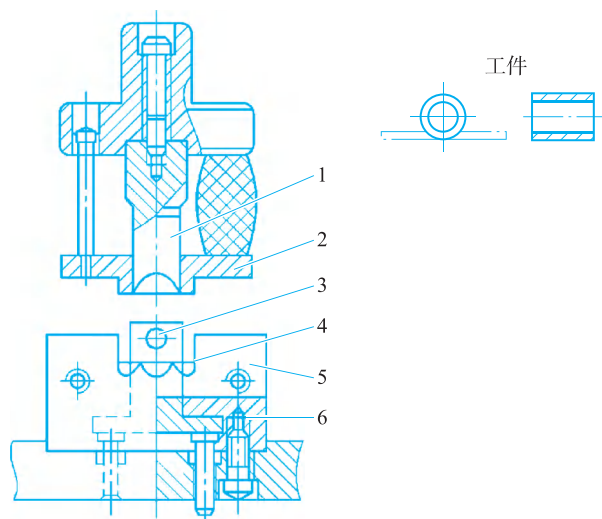
1—芯轴凸模；2—凹模；3—凸模。

图 3-53 大圆二次弯曲模

(a) 首次弯曲；(b) 二次弯曲

对于圆形件直径 $d \leq 5 \text{ mm}$ 的小圆形件，一般的弯曲方法是先弯成 U 形件，再由 U 形件弯成圆形件。有时由于工件小，分两次弯曲操作不便，并且当弯曲件精度较高时，可以采用图 3-54 所示的小圆一次弯曲模。坯料由下凹模 5 定位，当上模下行时，压料板 2 压住支架 6 下行，从而带动芯轴凸模 3 与下凹模 5 首先将坯料变成 U 形。上模继续下行，上凹模 1 使芯轴凸模 3 的圆弧成形面将 U 形再弯成圆，并包在芯轴上。当对工件精度要求较高

时,可旋转工件连冲几次,以获得较好的圆度。上模回程后,工件留在芯轴凸模上,由垂直图面的方向从芯轴凸模上取出。



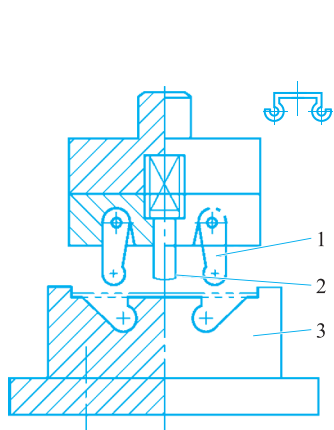
1—上凹模；2—压料板；3—芯轴凸模；4—毛坯；5—下凹模；6—支架。

图 3-54 小圆一次弯曲模

7. 其他形状弯曲模

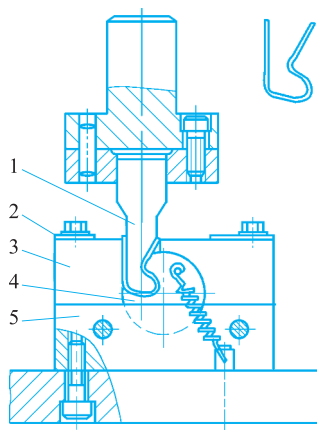
(1) 带摆动凸模弯曲模。图 3-55 所示为带摆动凸模弯曲模。放在凹模 3 上的坯料由凹模 3 定位,上模下行时,压料杆 2 将坯料压紧在凹模 3 上。上模继续下行,带动摆动凸模 1 沿凹模的斜槽运动,将工件压弯成形,上模回程后,工件留在凹模上,向后推出工件,从后方取出工件。

(2) 滚轴式弯曲模。图 3-56 所示为滚轴式弯曲模。工件放在定位板 2 上定位。上模下行,凸模 1 和凹模 3 将工件先弯成 U 形,然后进入滚轴 4,从而弯曲成所需要的工件。上模回程,滚轴在弹簧的拉力作用下回转,工件随着上模一起上行,然后将工件由前向后推出,取出工件。



1—摆动凸模；2—压料杆；3—凹模。

图 3-55 带摆动凸模弯曲模



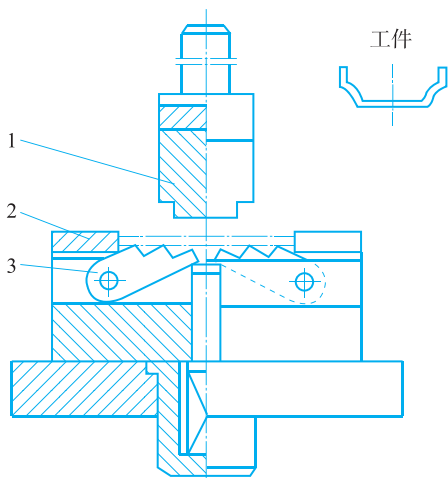
1—凸模；2—定位板；3—凹模；4—滚轴；5—挡板。

图 3-56 滚轴式弯曲模

(3) 摆动凹模弯曲模。图 3-57 所示为摆动凹模弯曲模，可以弯曲多个角的工件。板料放在摆动凹模上由定位板定位。凸模 1 下行，与摆动凹模 3 将板料一次弯曲成所需要的工件。上模上行，摆动凹模在顶杆的作用下向上摆动，从而顶出工件。

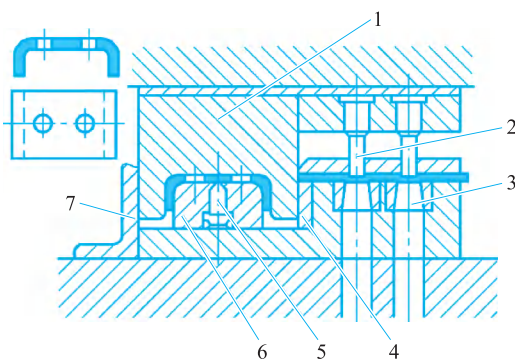
8. 连续模

对于大批量、尺寸较小的弯曲件，为了提高生产率，可以采用连续模进行冲裁、弯曲、切断连续工艺。图 3-58 所示为冲孔、切断、弯曲的连续模。坯料从右端送入，在第一工位上由冲孔凸模 2 和冲孔凹模 3 冲孔，上模上行，坯料往左送进，挡料块 7 挡料定位，工序件在第二工位上首先由凸凹模 1 和下剪刀 4 将板料剪断，凸凹模进一步下行，进行弯曲成形。上模上行后，由顶件销 5 将工件顶出。



1—凸模；2—定位板；
3—摆动凹模。

图 3-57 摆动凹模弯曲模



1—凸凹模；2—冲孔凸模；3—冲孔凹模；4—下剪刀；
5—顶件销；6—弯曲凸模；7—挡料块。

图 3-58 连续模弯曲

9. 复合模

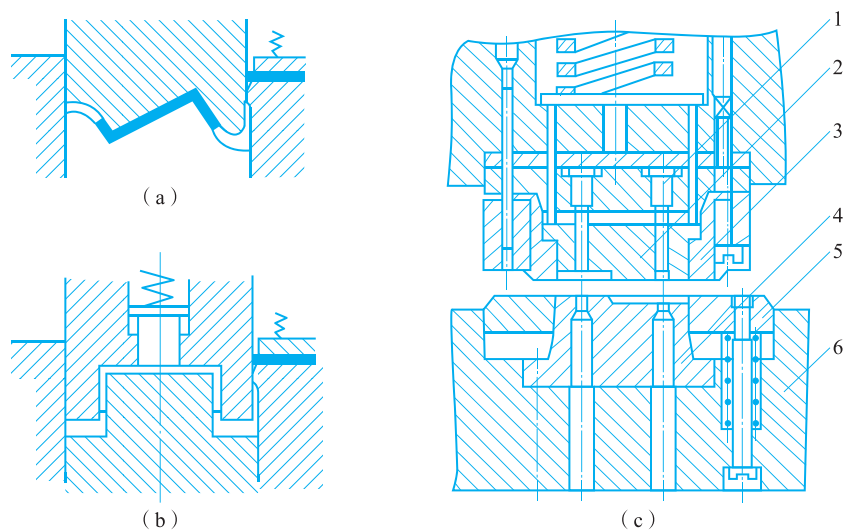
对于尺寸不大的弯曲件，可以采用复合模进行弯曲，即在压力机一次行程内，在模具的同一位置上完成落料、弯曲、冲孔等几种不同的工序。

图 3-59 (a)、图 3-59 (b) 所示为切断和弯曲复合模结构简图。这种模具结构简单，但工件精度较低。

图 3-59 (c) 所示为冲孔、落料和弯曲复合模结构图。该模具可在一个工位上同时完成落料、弯曲和冲孔三个工序，模具结构紧凑，工件精度高，但凸凹模修磨困难。弯曲力由上模中弹簧的弹力来完成，因而弹簧力必须大于弯曲力。

10. 通用弯曲模

小批量生产或试制生产的零件，产量小、品种多，并且零件的形状尺寸经常改变，大多数情况下采用通用弯曲模。通用弯曲模不仅可以制造一般的 V 形、U 形零件，经过多次弯曲，还可以成形一些精度要求不高的复杂形状的零件。图 3-60 所示为经多次 V 形弯曲成形制造复杂零件的例子。



1—冲孔凸模；2—弯曲凸模；3—落料凹模；4—凸凹模；5—卸料板；6—下模座。

图 3-59 复合模

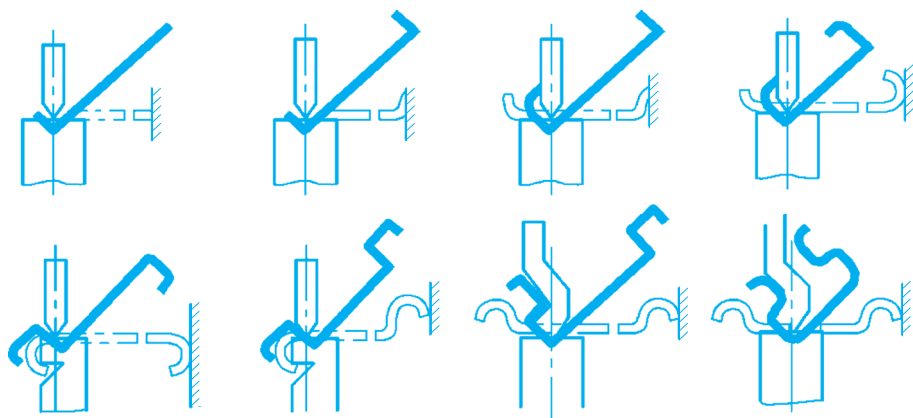


图 3-60 多次 V 形弯曲成形复杂零件

3.6 弯曲模零件设计

任务六：试对图 3-3 所示弯曲件进行模具工作零件设计。

设计弯曲模时应注意以下几点。

(1) 毛坯在模具中保证有正确可靠的定位。同时应设置压料装置压紧毛坯，以防止弯曲过程中毛坯的偏移。

(2) 当采用多道工序弯曲时，各工序尽可能采用同一定位基准。

(3) 模具结构要保证毛坯的放入和工件的取出顺利、安全和方便。

(4) 弯曲模的凹模圆角半径表面应光滑，大小应合适，凸、凹模之间的间隙要适当，

尽量减少工件在弯曲过程中的拉长、变薄和划伤等现象。

(5) 准确的回弹值需要通过反复试弯才能得到, 因此弯曲凸、凹模装配时要定位准确、装拆方便, 且新凸模的圆角半径应尽可能小, 以方便试模后的修模。

(6) 当弯曲过程中有较大的水平侧向力作用于模具上时, 应设计侧向力平衡挡块等结构予以均衡。

3.6.1 工作零件的设计

弯曲模工作零件包括凸模、凹模和凸凹模。弯曲凸、凹模的结构形式灵活多变, 完全取决于工件的形状, 下面主要介绍弯曲凸、凹模工作部分的尺寸设计, 凸、凹模固定部分的结构参考冲裁凸、凹模。图 3-61 所示是弯曲凸、凹模结构尺寸。

1. 凸模的圆角半径

当弯曲件的相对弯曲半径 r/t 较小时 ($r/t < 10$), 凸模的圆角半径 r_p 可以取弯曲件的弯曲半径, 但不能小于弯曲件的最小圆角半径。若 r/t 小于最小相对弯曲半径, 则可先弯成较大的圆角半径, 然后通过整形工序进行整形。

当弯曲件的相对弯曲半径 r/t 较大时 ($r/t \geq 10$), 凸模的圆角半径 r_p 应根据弯曲件的回弹值作相应的修正。

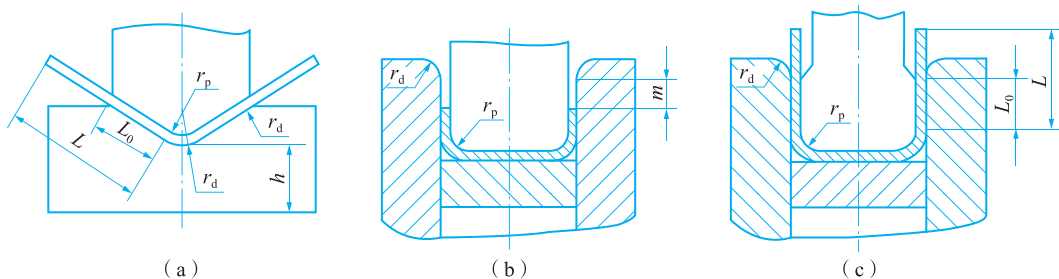


图 3-61 弯曲凸、凹模结构尺寸

2. 凹模的圆角半径

凹模的圆角半径 r_d 不能过小, 否则弯距的力臂减小, 坯料沿凹模圆角滑进时阻力增大, 从而增加弯曲力, 圆角处过于粗糙也会使工件通过时摩擦阻力增大, 毛坯表面刮伤, 增加弯曲力。两边的凹模圆角半径应一致, 否则弯曲时毛坯会产生偏移。

生产中, 按材料的厚度决定凹模圆角半径。当 $t \leq 2 \text{ mm}$ 时, $r_d = (3 \sim 6)t$; 当 $t = 2 \sim 4 \text{ mm}$ 时, $r_d = (2 \sim 3)t$; 当 $t > 4 \text{ mm}$ 时, $r_d = 2t$ 。

对于 V 形件弯曲凹模, 其底部可开退刀槽, 或取 $r_d = (0.6 \sim 0.8)(r_p + t)$ 。

3. 凹模深度

弯曲凹模深度 L_0 取值要适当, 如图 3-61 (a)、图 3-61 (c) 所示, 若 L_0 过小, 则工件两端的自由部分较长, 零件回弹大, 不平直; 若 L_0 过大, 则浪费模具钢材, 且需要冲床有较大的工作行程。

弯曲 V 形件时, 如图 3-61 (a) 所示, 凹模深度 L_0 和底部最小厚度 h 可按照表 3-9 取值, 但应保证凹模开口宽度 L_d 的值不能大于弯曲坯料展开长度的 0.8 倍。

表 3-9 弯曲 V 形件的凹模深度 L_0 及底部最小厚度 h

单位: mm

弯曲件边长	材料厚度					
	<2		2~4		>4	
	h	L_0	h	L_0	h	L_0
0~25	20	10~15	22	15	—	—
25~50	22	15~20	27	25	32	30
50~75	27	20~25	32	30	37	35
75~100	32	25~30	37	35	42	40
>100~150	37	30~35	42	40	47	50

弯曲 U 形件时, 对于弯边高度不大或要求两边平直的 U 形件, 凹模深度应大于零件高度, 属于校正弯曲, 如图 3-61 (b) 所示, 图中 m 值参见表 3-10。

表 3-10 弯曲 U 形件的凹模的 m 值

单位: mm

材料厚度	≤1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~10
m	3	4	5	6	8	10	15	20	25

对于弯边高度较大且对平直度要求不高的 U 形件, 可采用图 3-61 (c) 所示的凹模结构, 其中凹模深度 L_0 按照表 3-11 取值。

表 3-11 弯曲 U 形件的凹模深度 L_0

单位: mm

弯曲件边长 L	材料厚度				
	≤1	1~2	2~4	4~6	6~10
<50	15	20	25	30	35
50~75	20	25	30	35	40
75~100	25	30	35	40	40
100~150	30	35	40	50	50
150~200	40	45	55	65	65

4. 弯曲凸模和凹模之间的间隙

对于 V 形件, 凸模和凹模之间的间隙是由调节压力机的装模高度来控制的。

对于 U 形件, 凸模和凹模之间的间隙越大, 回弹越大; 间隙过小, 则零件的边缘变薄, 凹模摩擦加剧, 会降低凹模的使用寿命。

U 形件弯曲模的凸、凹模单边间隙可按下式计算:

$$Z=t_{\max}+ct=t+\Delta+ct \tag{3-19}$$

式中：
 Z ——弯曲模的凸、凹模单边间隙，单位为 mm；
 t ——工件材料厚度，单位为 mm；
 $t_{\max}$ ——工件材料的最大厚度，单位为 mm；
 Δ ——工件的公差，单位为 mm；
 c ——间隙系数，如表 3-12 所示。
当工件精度要求较高时，其间隙可以取 $Z=t$ 。

表 3-12 U 形件弯曲模的间隙系数 c

单位：mm

弯曲件高度	材料厚度								
	$b/H \leq 2$				$b/H > 2$				
	<0.5	$0.6 \sim 2$	$2.1 \sim 4$	$4.1 \sim 5$	<0.5	$0.6 \sim 2$	$2.1 \sim 4$	$4.1 \sim 7.5$	$7.6 \sim 12$
10	0.05	0.05	0.04	—	0.10	0.10	0.08	—	—
20	0.05	0.05	0.04	0.03	0.10	0.10	0.08	0.06	0.06
35	0.07	0.05	0.04	0.03	0.15	0.10	0.08	0.06	0.06
50	0.10	0.07	0.05	0.04	0.20	0.15	0.10	0.06	0.06
70	0.10	0.07	0.05	0.05	0.20	0.15	0.10	0.10	0.08
100	—	0.07	0.05	0.05	—	0.15	0.10	0.10	0.08
150	—	0.10	0.07	0.05	—	0.20	0.15	0.10	0.10
200	—	0.10	0.07	0.07	—	0.20	0.15	0.15	0.10

5. 凸、凹模宽度尺寸与公差

弯曲凸模和凹模宽度尺寸与工件尺寸的标注有关。如图 3-62（b）所示，工件标的是外表面尺寸，则模具要以凹模为基准件，间隙就取在凸模上；反之，如图 3-62（c）所示，工件标的是内表面尺寸，则模具要以凸模为基准件，间隙取在凹模上。

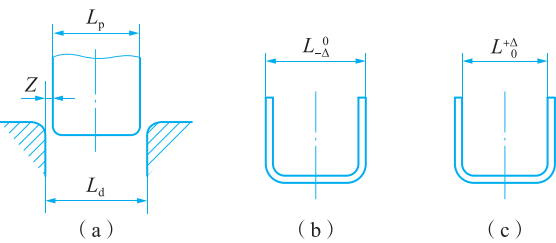


图 3-62 凸、凹模间隙与模具宽度尺寸

当工件上标注外形尺寸时：

$$L_d = (L_{\max} - 0.75\Delta)^{+\delta_d}_0 \tag{3-20}$$

$$L_p = (L_d - 2Z)^0_{-\delta_p} \tag{3-21}$$

当工件上标注内形尺寸时：

$$L_p = (L_{\min} + 0.75\Delta)^0_{-\delta_p} \tag{3-22}$$

$$L_d = (L_p + 2Z)^{+\delta_d}_{-0} \quad (3-23)$$

式中:

$L_{\max}$ 、 $L_{\min}$ ——弯曲件宽度的最大尺寸、最小尺寸,单位为 mm;

L_p 、 L_d ——凸模宽度和凹模宽度,单位为 mm;

δ_p 、 δ_d ——凸模和凹模的制造偏差,一般按 IT9 级选用;

Δ ——弯曲件宽度的尺寸公差,单位为 mm。

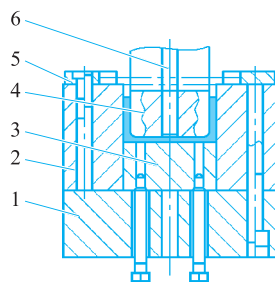


任务六 解答

3.6.2 定位零件设计

定位零件的作用是保证毛坯送到模具中的准确位置,由于送进弯曲模的毛坯是单个毛坯,因此弯曲模中使用的定位零件是定位板或定位销。

为防止弯曲件在弯曲过程中发生偏移现象,尽可能用定位销插入坯料上已有的孔或预冲的定位工艺孔中进行定位;若坯料上无孔且不允许预冲工艺定位孔,就需要用定位板对坯料的外形进行定位,此时应设置压料装置压紧坯料以防偏移发生,如图 3-63 所示。定位板和定位销的设计及标准的选用参见冲裁模。



1—下模座; 2—凹模; 3—顶件块;
4—凸模; 5—定位板; 6—打杆。

图 3-63 定位板定位的弯曲模

3.6.3 压料、卸料、送料零件的设计

压料、卸料、送料零件的作用是压住板料或弯曲结束后从模具中取出工件,由于弯曲是成形工序,在弯曲过程中不发生分离,因此弯曲结束后留在模具内的只有工件。

为减小回弹,提高弯曲件的精度,通常弯曲快结束时要求对工件进行校正,如图 3-63 所示,利用顶件块 3 与下模座 1 的刚性接触对弯曲件进行校正,校正的结果有可能使工件产生负回弹,所以此时工件在模具开启时需要防止其紧扣在凸模上。为此,该模具中设置了打杆 6,当模具开启后,若工件箍在凸模外面,则由打杆进行推件。

顶件块和打杆的设计参见冲裁模。

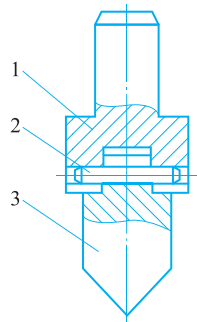
3.6.4 固定零件设计

固定零件的作用是将凸模、凹模固定于上、下模,并将上、下模固定在压力机上。固定零件包括模柄、垫板、固定板、上模座、下模座、螺钉、销钉等。

(1) 模柄。标准件,与冲裁模中的模柄相同,依据设备上的模柄孔选取。在简易弯曲模中可以使用槽形模柄,如图 3-64 所示,此时不需要上模座。

(2) 上、下模座。当弯曲模中使用导柱、导套进行导向时,可选用标准模座,当弯曲模中不使用导柱、导套导向时,可自行设计并制造上、下模座。

(3) 垫板、固定板、螺钉、销钉。其设计方法参见冲裁模。



1—模柄; 2—横销; 3—凸模。

图 3-64 槽形模柄

实践练习



实践练习

拓展阅读



拓展阅读