

职业教育与成人
教育规划教材

模具设计

徐炜炯 主编

MOJU SHEJI



中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

模具设计/徐炜炯主编. —北京:中国轻工业出版社,
2006.8

职业教育与成人教育规划教材

ISBN 7-5019-0781-1

I. 模… II. 徐… III. 模具-专业学校-教材 IV. TG760.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 05166 号

责任编辑:王 淳

责任终审:滕炎福 封面设计:杨焰龙 责任监印:吴京一

*

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

印 刷:三河市世纪兴源印刷有限公司

经 销:各地新华书店

版 次:2006年8月第1版第13次印刷

开 本:787×1092 1/16 印张:15.25

字 数:370千字

书 号:ISBN 7-5019-0781-1/TS·0510 定价:20.00元

读者服务部邮购热线电话:010—65241695 85111729 传真:85111730

发行电话:010—85119817 65128898 传真:85113293

网 址:<http://www.chlip.com.cn>

Email:club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

60688J4C113ZBW

前 言

本书是根据轻工部教育司审定的中等专业学校工科机械类专业教学计划的要求，为“模具设计”课程编写的。

在编写本书时注意了以下几点：

1. 为了加强基础理论，对内容作了适当的充实。
2. 为了适应科学技术的发展，拓宽知识面，书中除编入主要类型的模具设计基本内容外，还对其它模具作了适当介绍。
3. 为帮助学生掌握设计要领，主要章节附有模具设计计算的实例。
4. 全书采用国家颁布的计量单位名称与符号及国际惯用符号。
5. 为使学生尽快掌握书中内容、各章都附有思考练习题。
6. 本书分冷冲压工艺及模具设计与塑料成型工艺及模具设计两大部分，供不同学校、不同专业选用。

参加本书编写的有南京机电学校密哲民；长春轻工业学校宋绪涛；上海轻工业学校周岳祥；上海市二轻机械学校徐炜炯、周瑞钧、夏立戎、葛岚群；常州轻工业学校戴宗德等同志，由徐炜炯同志担任主编。其中第一章由密哲民编写；第二章由宋绪涛编写；第三章由周岳祥编写，第四、五章由徐炜炯、夏立戎、周瑞钧编写；第六章由戴宗德编写；第七、八章由葛岚群编写。

本书由上海模具技术研究所张质良同志担任主审，周瑞钧同志参审。在编写过程中，得到不少学校与工厂的支持、帮助，编者对此深表感谢。

本书虽在试用讲义的基础上由全体编者和主审经过多次讨论和修改，但由于水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，热忱欢迎广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一篇 冷冲压工艺及冲模设计

第一章 冷冲压的基本知识	1
第一节 冷冲压概述.....	1
第二节 冷冲压工件所用材料.....	3
第三节 冷冲压模具所用材料与热处理.....	4
第四节 冷冲压设备及其使用.....	4
第五节 金属塑性变形的基本概念.....	9
思考练习题	18
第二章 冲裁工艺及冲裁模设计	19
第一节 普通冲裁的基本原理	19
第二节 冲裁间隙	21
第三节 冲裁模刃口尺寸计算	24
第四节 冲压力及压力中心	31
第五节 冲裁件的排样方法	36
第六节 冲裁件的工艺性	39
第七节 冲裁模的基本形式与结构	42
第八节 冲裁模主要零部件设计	48
第九节 其它冲裁方法简介	67
第十节 冲裁模设计	72
第十一节 冲裁件质量分析	78
思考练习题	80
第三章 弯曲工艺及弯曲模设计	82
第一节 弯曲的基本原理	82
第二节 弯曲件的质量分析	85
第三节 弯曲件的工艺性	90
第四节 弯曲件毛坯尺寸的计算	93
第五节 弯曲力的计算	95
第六节 弯曲件的工序安排	96
第七节 弯曲模的基本结构	98
第八节 弯曲模工作部分的设计.....	104
第九节 弯曲模设计实例.....	106
思考练习题.....	109

第四章 拉深工艺及拉深模设计	110
第一节 圆筒形件拉深的基本原理.....	110
第二节 旋转体拉深件毛坯尺寸计算.....	113
第三节 圆筒形件拉深系数.....	116
第四节 圆筒形件拉深工艺计算.....	118
第五节 拉深件的工艺性.....	127
第六节 压边力和拉深力.....	128
第七节 拉深模结构.....	129
第八节 拉深模工作部分尺寸确定.....	130
第九节 其它拉深工艺简介.....	134
第十节 拉深件的质量分析.....	137
思考练习题.....	138
第五章 其它冲压方法和模具	140
第一节 局部成型.....	140
第二节 冷挤压.....	146
第三节 简易模具.....	151
第四节 冷冲压工艺的发展方向.....	156
思考练习题.....	157

第二篇 塑料成型工艺及模具设计

第六章 塑料成型基本知识	158
第一节 塑料概论.....	158
第二节 塑料制品设计原则.....	166
第三节 注射成型概述.....	178
思考练习题.....	181
第七章 注射成型模具	182
第一节 注射成型模具基本结构及分类.....	182
第二节 型腔分型面及浇注系统.....	185
第三节 注射成型模具零部件的设计.....	195
第四节 注射成型模具的设计.....	220
思考练习题.....	224
第八章 其它塑料成型模具简介	226
第一节 压塑成型模具.....	226
第二节 挤塑成型模具.....	227
思考练习题.....	229
附录	230

第一篇 冷冲压工艺及冲模设计

第一章 冷冲压的基本知识

第一节 冷冲压概述

冷冲压是在常温下,利用冲模在压力机上对板料或坯料施加压力,使其产生塑性变形或分离,从而获得零件所需的形状、尺寸的一种压力加工的方法。

冷冲压的应用范围很广,它可以冲压黑色金属及有色金属材料,也可以冲压非金属材料如纸板、皮革、塑料板等。工件的尺寸,大到汽车的覆盖件,小到钟表的元件。目前在汽车、电机、电器、仪表及轻工业日用品工业中,它是一种很重要的加工工艺。

冷冲压与其它加工工艺相比较,具有如下特点:

- (1) 生产率高,特别适用于大批量生产。
- (2) 工件的成本低。
- (3) 工件的表面质量好,尺寸精度较高,一般可达到 IT9~10 级,精冲可达 IT7~8 级,而且尺寸稳定,互换性好。
- (4) 和切削加工比较,冷冲压的材料利用率高,特别是冷挤压等方法,材料节省更为显著。

冷冲压的主要缺点是:模具制造的成本较高、周期较长,冲压生产过程中噪音大,因此,在小批量生产中受到一定的限制。

由于冷冲压加工的工件形状、尺寸、精度要求、批量大小、原材料性能等的不同,所采用的冷冲压工艺方法也是多种多样的。概括起来可以分为两大类:

1. 分离工序

主要包括剪裁,冲裁等。其特点是板料受外力后,应力超过材料的强度极限,使板料发生剪裂或局部剪裂。目的是使板料沿一定轮廓相互分离,分离的断面质量,也要满足一定的要求。

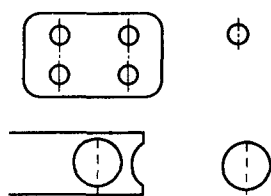
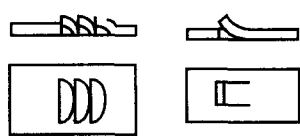
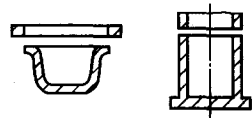
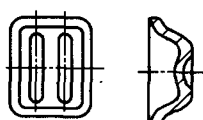
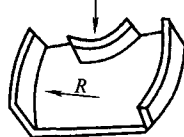
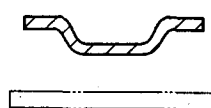
2. 成型工序

主要包括弯曲,拉深及成型等。其特点是坯料受外力后,应力超过了材料的屈服极限,在坯料不破坏的条件下,经塑性变形后成为一定形状及尺寸精度要求的工件或半成品。

为了进一步提高冷冲压生产效率,有时常常把两个以上的基本工序合并成一个工序,称为复合工序。表 1-1 中列出了部分基本工序的名称、特点及应用范围。

表 1-1

冷冲压的基本工序

工序性质	工序名称		工 序 简 图	特点及应用范围
分离 工 序	剪裁 (切断)			用剪刀或冲模切断板材, 切断线不封闭
	冲裁	落料 冲孔		用冲模沿封闭线冲切板料, 冲下来的部分为工件 用冲模沿封闭线冲切板料, 冲下来的部分为废料
	切口			在坯料上沿不封闭线冲出缺口, 切口部分发生弯曲, 如通风板
	切边			将工件的边缘部分切掉
成型 工 序	弯曲			把板料弯成一定的形状
	拉深			把平板形坯料制成空心工件
	成型	起伏		将板料局部冲压成凸起和凹进形状
		翻边		将板料上的孔或外缘翻成一定角度的直壁, 或将空心件翻成凹缘
复合工序				压力机冲压一次可完成两道或多道不同工序的冲压方法

第二节 冷冲压工件所用材料

一、对冷冲压工件所用材料的要求

冷冲压工件所用材料，不仅要满足设计的技术要求，还应当满足冲压工艺要求，冷冲压的工艺要求主要是：

(1) 要求有较高的延伸率或断面收缩率，较低的屈服极限 σ_s 和较高的强度极限 σ_b ，这样，在变形工序中其允许的变形程度大，冲压加工所需的变形力小，有利于冲压工艺的稳定性及变形均匀性。从而减少工序以及中间退火的次数，提高工件的尺寸精度，并可延长模具的寿命。

(2) 要求有光洁平整无缺陷损伤的表面状态。金属表面有缺陷损伤的材料，冲压加工时除改变材料变形中的应力状态使塑性变坏外，还会产生应力集中现象，使材料过早破裂，金属表面状态好的材料，冲压时不易破裂，也不容易擦伤模具，工件表面质量也好。

(3) 材料厚度的公差应符合国家规定标准。因为一定的模具间隙，适应于一定厚度的材料，材料厚度的公差太大，不仅会影响工件的质量，还可能导致产生废品、损坏模具甚至损坏冲压设备。

二、冷冲压工件所用材料的种类和规格

在冷冲压生产中使用各种规格的金属材料及非金属材料，其中最常用的是金属板料。

金属板料分黑色金属和有色金属两种。

(一) 黑色金属板料

1. 普通碳素钢板

这类钢板按机械性能供应的有：A1，A2，A3，A4，A5 等牌号。按化学成分供应的有 B1，B2，B3，B4，B5 等牌号。

2. 优质碳素钢板

这类钢板的化学成分和机械性能都要保证，主要用于复杂变形的弯曲件和拉深件，有 08、10、15、20、35、45 及 50、10Mn₂、09Mn……等牌号。一般用于拉深的钢板按表面质量可分为三组：Ⅰ组——高质量表面；Ⅱ组——较高质量表面；Ⅲ组——一般质量表面。每类表面质量按拉深级别又分为三组：Z（最深拉深），S（深拉深），P（普通拉深）。

(二) 有色金属板料

1. 黄铜板（带）

铜锌合金称黄铜，它有很好的塑性和较高的强度及抗腐蚀性，焊接性能优良。常用的有 H68 和 H62。前者用于拉深，后者用于冲裁，弯曲，浅拉深。

2. 铝板（带）

比重小，导电、导热性与塑性良好，常用的有 L2、L3、L5 等。

非金属材料有纸板、胶木板、橡皮、毛毡、塑料板和纤维板等。冲压常用材料的机械性能见附表一。

第三节 冷冲压模具所用材料与热处理

冷冲模所用材料主要有碳钢、合金钢、铸铁、硬质合金、低熔点合金、聚氨酯橡胶等。由于凸模和凹模是在强压、连续使用和有很大冲击的条件下工作的，并伴有温度的升高，所以对凸凹模的材料要求有好的耐磨性与耐冲击性，在工艺性能方面则要求有好的热处理性和切削性。对于冷挤压模具，由于金属是在强烈的三向压应力状态下变形，因此要求模具工作部分的材料还应具备足够的抗回火稳定性能和高抗张强度及韧性。除此以外，要根据冲压件批量大小、冲压材料性质、工序种类以及冲模零件的工作条件和作用来选择模具材料，如导柱、导套要求耐磨和有较好的韧性，可以采用低碳钢表面渗碳淬火。

冷冲模常用材料及热处理要求与冷挤压常用模具材料见附表二。

第四节 冷冲压设备及其使用

在冷冲压生产中，为了适应不同的冲压工作情况，采用着各种不同类型的压力机，这些压力机都各具各自独特的结构形式及作用特点。

一、压力机分类和型号

压力机的种类繁多，按驱动滑块力的种类可分为机械的、液压的、气动的，其中机械传动的压力机在生产中最为常用。按滑块数可分为单动、双动、三动等；按驱动滑块机构的种类又可分为曲柄式、肘杆式、摩擦式。其中曲柄压力机在冲压生产中应用较多，按曲柄形式可分为偏心式、曲轴式；按连杆的数目不同，又可分为单连杆，双连杆与四连杆（通常分别称为单点、双点与四点压力机）；按机身结构形式可分为开式和闭式、单柱和双柱及可倾式和不可倾式。

二、常用压力机

（一）曲柄压力机

曲柄压力机包括各种结构的偏心冲床和曲轴冲床，它们的基本工作机构都是曲柄连杆机构，即驱动滑块机构是曲柄式的。

图 1-1 所示为偏心冲床机构简图。偏心轴 1 的右端装有大齿轮（飞轮）7，大齿轮由电动机 5 通过减速小齿轮 6 传动，并由操纵系统 10 控制离合器 8，实现与偏心轴 1 脱离和结合。当离合器结合时，偏心轴 1 与大齿轮（飞轮）7 一起旋转，偏心轴 1 前端的连杆 2 也被带动，而连杆 2 与滑块 3 铰接，由于连杆的运动，滑块即跟随作上下往复运动。当离合器脱离时，偏心轴由制动器 9 使其停止在上死点位置。

床身是所有运动部分的支承体，它将压力机的所有机构联结起来，并保证全机所要

求的精度和强度。偏心轴、连杆和滑块一起组成曲柄连杆机构。其中，滑块主要作安装固定上模用，大齿轮 7 不但起传动作用，而且起着飞轮的作用使压力机在整个工作周期里负荷均匀，使能量得到充分作用。

偏心冲床的行程可在一定范围内调整，其调整机构如图 1-2 所示。

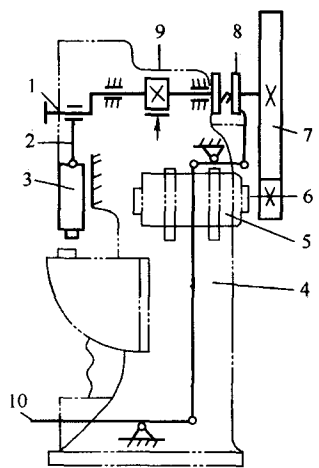


图 1-1 偏心冲床机构简图

- 1—偏心轴 2—连杆 3—滑块 4—床身 5—电动机 6—小齿轮
7—大齿轮（飞轮） 8—离合器 9—制动器 10—脚踏板操纵系统

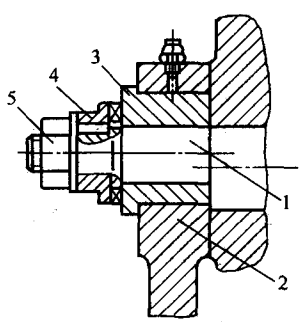


图 1-2 偏心冲床行程调节机构

- 1—偏心轴销 2—连杆 3—偏心套
4—结合套 5—螺母

在偏心轴 1 上套有一个偏心套 3，偏心套上的嵌牙与固定在轴端的结合套 4 上的嵌牙相结合。连杆 2 自由地套在偏心套上，这样偏心轴销的圆周运动便通过偏心套而变成连杆的上下运动，其运动距离（即行程）是偏心套与主轴中心之间距离的两倍。当松开螺母 5，使结合套的嵌牙与偏心套嵌牙脱开，转动偏心套便可改变偏心套中心与主轴中心的距离，因而可使滑块行程在一定范围内进行调整。

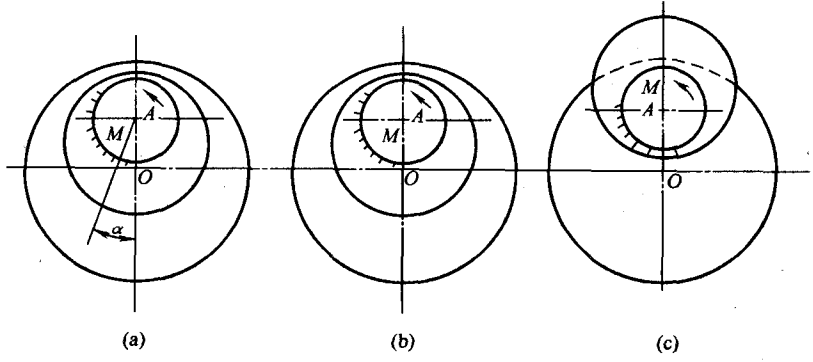


图 1-3 行程调节示意图

O—主轴中心 A—偏心轴销中心 M—偏心套中心

图 1-3 所示为偏心冲床行程调节示意图。图中 (a) 为任意行程，(b) 为最小行程，(c) 为最大行程。其行程值分别为：

任意行程：
$$S=2OM=2 \sqrt{OA^2+AM^2-2OA \times AM \cos \alpha}$$

最小行程: $S_{\min} = 2OM = 2(OA - AM)$

最大行程: $S_{\max} = 2OM = 2(OA + AM)$

曲轴冲床的结构和工作原理与偏心冲床基本相同, 见图 1-4。其区别主要在主轴, 偏心冲床的主轴为偏心轴, 而曲轴冲床的主轴为曲轴。

曲轴冲床行程较大, 它的行程等于曲轴偏心距的两倍, 行程不能调整。曲轴冲床在床身内有很多个轴承对称地支持着曲轴等部件, 冲床所受负荷较均匀, 故可以做成较大吨位的压力机。

曲柄压力机的驱动滑块机构——曲柄连杆机构属于刚性结构, 滑块运动为强制性的, 因此在超负荷时, 往往容易造成冲床损坏。为了防止由于超负荷造成冲床损坏, 在冲床的连杆和滑块的铰接处装有保险装置, 连杆通过保险装置将力传递给滑块, 在超负荷情况下, 保险装置首先切断, 使冲床不受到损坏。

为适应安装不同闭合高度的模具, 一般用途的曲柄压力机上的连杆长度是可以调节的, 用于调整滑块上下位置。

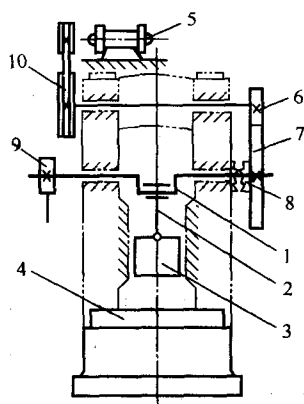


图 1-4 曲轴冲床机构简图

1—曲轴 2—连杆 3—滑块 4—工作台
5—电动机 6—小齿轮 7—大齿轮 8—离合器 9—制动器 10—皮带轮

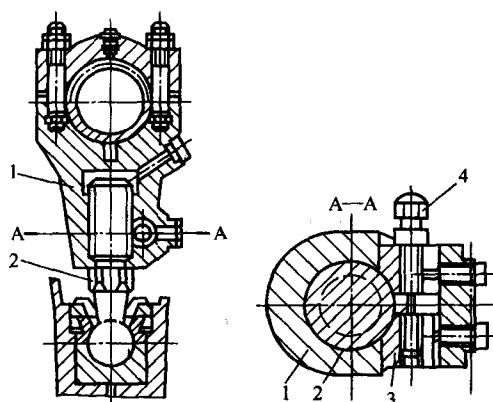


图 1-5 可调节长度的连杆

1—连杆套 2—调节螺杆 3—紧固套 4—紧固螺钉

连杆的调节方式为手动和机动调节两种。手动调节方式只适用于小型压力机, 在大、中型压力机里均采用机动调节。图 1-5 所示为手动调节连杆的结构图。

在调节螺杆 2 上有一段六方部分, 当松开紧固套后, 可直接用扳手旋转调节螺杆进行调节。机动调节连杆结构与图 1-5 相似, 只是旋转调节螺杆由一个单独的电机通过齿轮或蜗轮机构来进行。

在冲压工作中, 为从上模中顶出工件或废料, 在冲床的床身和滑块中装有打料装置, 如图 1-6 所示。

在滑块中部有一个矩形横向孔, 其中横放有挺杆 1, 模具的模柄内装有打杆 2, 在滑块回程中挺杆与床身制动螺杆相碰时, 通过打杆将工件或废料打出。

为了从下模中顶出工件, 压料或拉深中作为压边装置, 在冲压加工小尺寸工件的冲床上可装有由垫板、橡皮、千斤顶和支架等组成的顶出装置。图 1-7 所示为其工作

简图。

当滑块下降到下死点时，冲裁下来的工件（或废料）进入凹模内，通过凹模内顶板传到顶杆，使顶杆通过垫板进一步压缩已被千斤顶预压的橡皮，当滑块回程时，橡皮回弹推动垫板顶杆一起上升，将工件（或废料）从下模（凹模）中顶出，千斤顶的规格和橡皮的压缩量均可根据需要进行调节。但是要求垫板尺寸及千斤顶安放位置尺寸均小于冲床工作台孔径。

为了顶料，在冲压大尺寸工件时，有些冲床上装有气垫。图 1-8 为气垫工作简图。

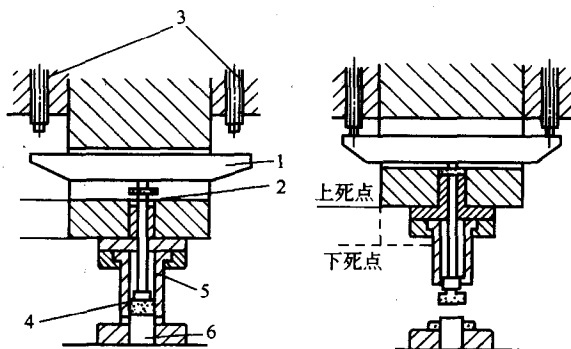


图 1-6 打料装置

1—顶杆 2—打杆 3—制动螺杆 4—工件（或废料） 5—上模 6—下模

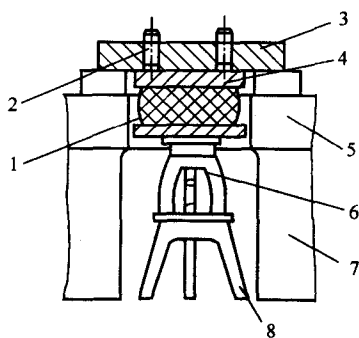


图 1-7 千斤顶压缩橡皮顶出装置工作简图

1—橡皮 2—顶杆 3—下模板 4—垫板 5—工作台 6—千斤顶 7—床身 8—支架

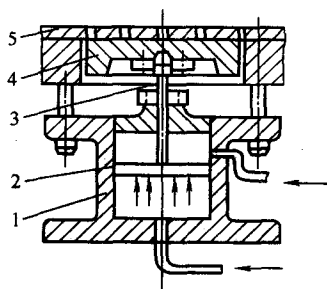


图 1-8 气垫

1—气缸 2—活塞 3—心轴 4—托板 5—垫板

气垫由气缸 1、活塞 2、心轴 3、托板 4 和顶杆等组成，用螺栓悬挂在工作台下面。工作时，压缩空气进入气缸，推动活塞，活塞与心轴和托板一起上升。托板尺寸小于工作台孔径，可以自由进入冲床工作台孔径内。托板上固定有顶杆（图中未画出），顶杆穿过垫板 5，将工件（或废料）从模具中顶出。

气垫在拉深中还可作为压边装置。

（二）双动冲床

双动冲床按驱动滑块力的方式有机械和液压的两种。双动冲床用于大型复杂零件的

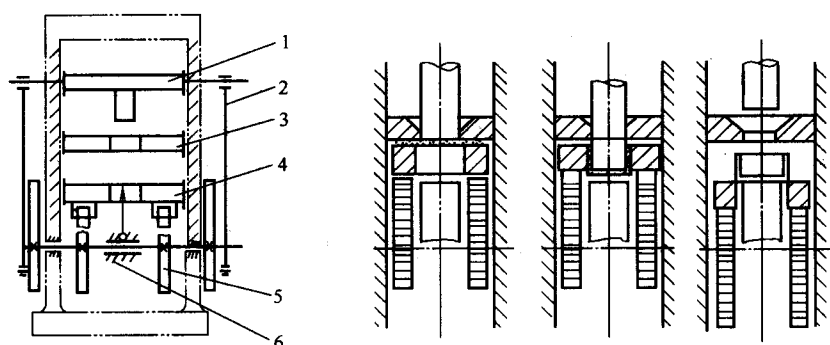


图 1-9 双动冲床结构简图及动作原理

1—拉伸滑块 2—连杆 3—压边滑块 4—工作台 5—凸模 6—主轴

拉深，其中机械传动的有上传动和底传动两种型式。图 1-9 所示是机械底传动双动冲床的结构简图及动作原理。

冲床工作时，拉深滑块由主轴 6 上的齿轮偏心销通过连杆 2 带动，工作台 4 由凸轮 5 传动。压边滑块 3 工作时是不动的，它与工作台面的距离可以通过丝杆调节。粗调节由电机完成，细调节由手轮完成。拉深时，坯料安放在工作台面的凹模上，随着凸模下降，还未伸出压边滑块之前，工作台依靠凸轮顶起，将坯料夹紧在凹模与压边滑块之间，并停留在这一位置，直至凸模继续下降，完成拉深工作为止。然后凸模上升，工件留在凹模内，接着凹模下降，利用固定在底座上的顶件装置把工件顶出凹模。

三、压力机的选用

压力机的选用是制定冲压工艺和制定模具设计方案的一项重要内容，它直接关系到设备的合理使用、冲压工艺的顺利实现、提高模具寿命、方便操作以及提高生产率等一系列重要问题。选用压力机的根据，主要是冲压工艺的性质，冲压件批量的大小，模具的尺寸和精度，变形力的大小及工厂现有设备等情况。压力机的选用包括选择压力机的类型和确定压力机的主要技术参数两项内容。

（一）压力机的主要技术参数

1. 公称压力（吨位）

曲柄压力机滑块的压力在全行程中不是一个常数，而是随曲柄转角的变化而不断变化的。图 1-10 所示为 63t 曲柄压力机的许用负荷曲线。

公称压力是指压力机在下死点前的某一位置时（曲柄离下死点约 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 处）滑块的压力。

2. 滑块行程

指滑块在曲柄旋转一次，从上死点到下死点所经过的距离。其数值一般是曲柄半径的两倍。

3. 闭合高度

是指滑块在下死点时, 滑块底面至压力机工作台面的距离。

4. 滑块每分钟冲击次数

5. 工作台面尺寸

6. 模柄孔尺寸

7. 电动机功率

(二) 确定压力机规格时应遵循的原则

(1) 压力机的公称压力应等于或稍大于冲压工序所需的压力。当进行弯曲或拉深时, 应注意所选用的压力机的许用负荷曲线在曲柄全部转角内高于冲压变形力曲线。

(2) 压力机滑块行程应满足工件在高度上能获得所需尺寸, 并在冲压后能顺利地从模具内取出来, 这对于弯曲、拉深工艺尤为重要。

(3) 压力机的闭合高度、工作台台面尺寸和滑块尺寸等应满足模具正确安装的要求。

(4) 滑块每分钟的冲压次数, 应满足生产率和材料变形速度的要求。

(5) 在一般情况下, 可不改变功率, 即在保证冲压力的情况下, 功率是足够的。但在有些情况下 (如斜刃冲裁), 将会发生压力足够而功率超载的现象, 这时必须使电动机的功率大于冲压时所需的功率。

常用压力机的技术参数见附表三。

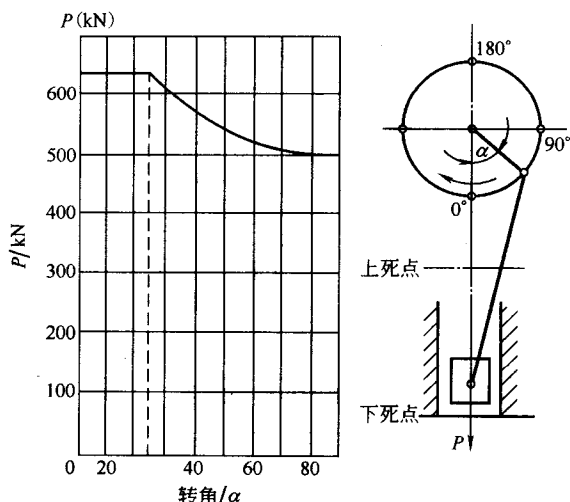


图 1-10 63t 曲柄压力机滑块许用负荷与曲柄转角的关系曲线

第五节 金属塑性变形的基本概念

一、金属的塑性变形与力学特征

(一) 金属的塑性变形

变形可以分为绝对变形、相对变形和对数变形。绝对变形表示任一线尺寸、角尺寸、截面面积或微元体表面的局部面积或整个物体的绝对变化。相对变形表示上述变形数值的相对变化。一般以任一参数的绝对变化量与此一参数的原始值之比来表示相对变形。

对数变形为相对变形的演变形式, 它以微元体或整个物体变形后尺寸与变形前尺寸之比的对数值来表示。

假如作用于物体的外力卸去后, 由外力引起的变形消失了, 物体恢复了自己的原始形状和尺寸, 则这样的变形称为弹性变性。假如作用于物体的外力卸去后, 物体并不恢复自己的原始形状和尺寸, 则这样的变形称为塑性变形 (永久变形)。

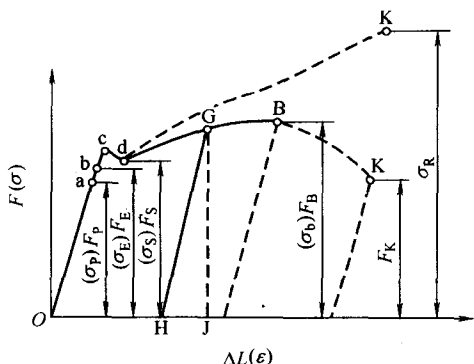


图 1-11 低碳钢的拉伸图或条件应力—应变曲线

以上所述，可以在低碳钢试样上施加拉力时，拉力与伸长的关系曲线上看到。低碳钢的拉伸曲线如图 1-11 所示。

(1) 如果作用力小于 F_E 时，待力去掉后，那么拉力与伸长的关系沿 cb 可逆地返回，最后伸长消失。则这样的变形称为弹性变形， Ob 呈直线，为弹性阶段。

(2) 当作用力增加到稍大于 F_E 达到 F_S 时，即使作用力不再增加，试样也会继续变形，在曲线上出现屈服平台，所以 cd 称为屈服变形阶段。大多数塑性金属没有明显的屈服平台。

(3) 当作用力增加到超过 F_S 后，试样的伸长量与作用力又将成曲线关系上升；如果外力不增加，则变形不能继续进行。如果作用力加到 G 点，然后卸载，这时已有伸长量为 OJ 的试样将沿着 GH 线（与 Ob 平行）弹性回复一段距离 HJ ，剩下永久变形量 OH 。这说明金属的塑性变形只是在应力超过弹性极限时产生的，因此金属的塑性变形只有当金属已有弹性变形时才能发生，也就是说在塑性变形时，一定会有弹性变形存在，这就是塑性变形时弹性变形共存定律。加载时的全伸长量包括弹性伸长和塑性伸长两部分。 dB 曲线为均匀塑性变形阶段。 F_B 是产生最大塑性变形时的作用力。

(4) 当作用力达到 F_B ，试样将产生“缩颈”现象。此时，变形只限制在“缩颈”的局部地区进行，故 BK 曲线称为不均匀塑性变形阶段。冲压成形一般都希望在试样拉伸图中的均匀塑性变形阶段内进行，而尽量避免在不均匀塑性变形阶段内进行。

所以金属的塑性是指任何固体物质得到不可逆的永久变形而不被破坏的能力。

下面介绍材料的另一个特性——包申格效应，见图 1-12 所示。

试验研究表明，单向拉伸和单向压缩试验的初始屈服极限绝对相等，均为 σ_s 。但当试样在一方向加载（例如拉伸）超过屈服点到达 A 点后，卸载到零（ B 点），然后再在反方向加载（即压缩）。则发现反向加载时的屈服点 C 的应力 σ'_s 不但比 A 点的 σ'_s 小，而且小于初始的屈服极限 σ_s 。这一随加载路线和方向不同，屈服极限降低的现象，称包申格效应（或反载软化现象）。在弯曲工序中我们可以利用反载软化现象使材料的屈服极限降低，减少回弹，但此时材料的疲劳极限也降低了，所以对于弯曲中的弹性零件要慎重。

由于塑性变形的结果，金属密度的变化很微小。这种微小的变化在解决应力和应变有关的问题中没有什么实际意义，所以一般认为物体塑性变形前的体积等于其变形后的体积。

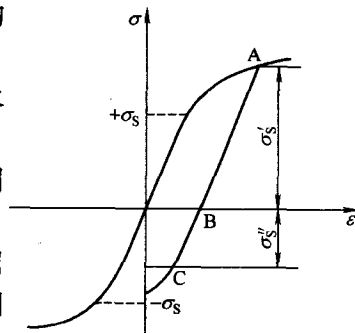


图 1-12 包申格效应

设六面体棱为 X 、 Y 、 Z ，体积 $V=XYZ$ ，变形的主轴方向与 X 、 Y 、 Z 的方向一致，棱 X 、 Y 、 Z 的长度变化为 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 。小变形时，可以认为只有正应变才引起边长和体积的变化，因此变形后六面体的体积。

$$V+\Delta V=(X+\Delta X)(Y+\Delta Y)(Z+\Delta Z)\text{或}$$

$$V+\Delta V=X(1+\epsilon_1)Y(1+\epsilon_2)Z(1+\epsilon_3)$$

六面体的体积变化率为

$$\frac{\Delta V}{V}=\epsilon_1+\epsilon_2+\epsilon_3+\epsilon_1\epsilon_2+\epsilon_2\epsilon_3+\epsilon_3\epsilon_1+\epsilon_1\epsilon_2\epsilon_3$$

将上式中之微小值忽略不计，则得

$$\frac{\Delta V}{V}=\epsilon_1+\epsilon_2+\epsilon_3 \quad (1-1)$$

根据假设塑性变形时金属体积不发生变化，由此可得出体积不变的条件如下

$$\epsilon_1+\epsilon_2+\epsilon_3=0 \quad (1-2)$$

由此可见，塑性变形时的三个应变之代数值为零。根据体积不变条件，可以分析主应变之间存在着的一定的关系，可以正确地计算变形金属在各工序间的尺寸变化，并根据要求的工件尺寸计算毛坯尺寸。

(二) 塑性金属的力学特征

1. 条件应力应变曲线与真实应力应变曲线

图 1-11 拉伸图讨论的 $F-\Delta L$ 曲线仅仅反映变形的过程，实际上拉伸图上载荷 P 与伸长量不仅同试样的材料性能有关，还同试样的尺寸有关。为消除试样尺寸的影响，需采用应力应变图。如将图的纵坐标 F 除以试样原始断面积 A ，得到条件应力 $\sigma=\frac{F}{A}$ 。将

图的横坐标 ΔL 除以试样标距长度 L_0 ，得到相对伸长 $\epsilon=\frac{\Delta L}{L}$ ，即可由拉伸图作出条件应力应变曲线。如果比例适当，则作出的条件应力应变曲线和原来的拉伸图完全一致。

应当指出，上面讨论的应力和应变实际上不是真实的应力和应变，因为试样在拉伸过程中截面积是不断变化的。因此应力 σ 并不能代表真实的瞬时应力。真实的瞬时应力是瞬时的截面积除瞬时的负荷。同样， ϵ 也不是真实的应变，真实的应变应该以试样瞬时的长度来除瞬时的伸长量。我们以 σ_{zh} 代表真实应力，则

$$\sigma_{zh}=\frac{F}{A} \quad (1-3)$$

式中 F ——瞬时负荷；

A ——试样瞬时断面积。

相对伸长

$$\epsilon=\frac{\Delta L}{L_0}=\frac{L_1-L_0}{L_0}$$

式中 L_0 ——试样原始标距长度；

L_1 ——拉伸后标距的长度。

若以 e 代表真实应变，则瞬时真实应变

$$de = \frac{dL}{L} \quad (1-4)$$

式中 dL ——试样瞬时伸长量；

L ——试样瞬时长度。

当试样从 L_0 拉伸至 L_1 时总的真实应变为

$$e = \int_{L_0}^{L_1} de = \int_{L_0}^{L_1} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_1}{L_0} \quad (1-5)$$

真实的相对变形 e 与 ϵ 之间的关系为

$$e = \ln \frac{L_1}{L_0} = \ln \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = \ln(1 + \epsilon) \quad (1-6)$$

根据体积不变条件有 $\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0}$ ，可得真实应力与条件应力的关系如下

$$\sigma_{zh} = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} (1 + \epsilon) = \sigma (1 + \epsilon) \quad (1-7)$$

按照真实应力 σ_{zh} 与真实应变 e 作出的拉伸曲线称为真实应力应变曲线。真实应力应变曲线可用图 1-11 中的虚线表示，实线为相应的条件应力应变曲线。

实验证明，大多数金属材料的真实应力应变曲线可用下列经验公式表示

$$\sigma_{zh} = K e^n \quad (1-8)$$

式中 K ——与材料有关的常数；

n ——变形硬化指数。

在屈服变形以前，由于试样的截面积变化很小，因此应力、应变与真实应力、真实应变几乎相等，在屈服变形以后，这个差别就逐渐显著，名义强度极限 σ_b 要比真实强度极限 σ_R 小得多。这说明材料抵抗塑性变形的能力随应变的增加而增加，即不断地产生硬化，所以真实应力-应变曲线有时也称硬化曲线。

2. 塑性条件

材料进入并保持塑性状态的条件称为塑性条件，它反映了塑性变形时应力之间的关系。金属试样在单向拉伸时，材料受单向拉应力作用，在应力达到屈服极限 σ_s 时，材料开始塑性变形，屈服极限 σ_s 对于一定的金属，在一定的变形条件（变形速度、温度、变形程度）之下是不变的。

下面讨论受复合应力，即既有正应力又有剪应力作用的材料，在应力达到什么值时开始塑性变形的的问题。

在一般情况下，材料某点的应力状态是一个复合应力，即既有正应力又有剪应力。如果选取主正应力的方向为坐标轴位置，则决定材料一点的应力状态可由三个主正应力的关系来表示。换句话说，对于任意倾斜截面上一点的应力状态能用该点的三个主应力的关系来表示。如果在三个互相垂直的平面上仅有正应力而无剪应力，这三个应力叫做主正应力也叫主应力，所作用的平面叫做主平面。这些主应力按应力大小以 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示。

对于剪应力有极值的切面叫做主剪力平面，面上作用的剪应力叫做主剪应力。