



中等职业教育课程改革新教材

ZHONGDENG ZHIYE JIAOYU KECHENG GAIGE XINJIAOCAI

冲压工艺及设备

CHONGYA GONGYI
JI SHEBEI

钟全雄◎主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书是为配合教育部“以服务为宗旨，以就业为导向”的新一轮职业教育教学改革和教材建设工作的深入开展，按照中等职业教育模具设计和制造专业的基本要求，结合编者多年教学和生产实践的经验编写而成的。本书以理论与实践相结合为指导思想，一切从实用出发，力求深入浅出，通俗易懂。

本书共分8章，系统地介绍了冲压模具设计的原理、冲压工艺计算及工艺分析等内容，着重叙述了冲裁、弯曲、拉深三大冲压工艺，并对冲压材料、模具材料及提高模具寿命的措施等也作了一定的介绍。

本书是中等职业教育机械制造、模具制造、数控加工等专业的教学用书，也可供从事相关工作的工程技术人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

冲压工艺及设备/钟全雄主编. —北京：机械工业出版社，2010.3

中等职业教育课程改革新教材

ISBN 978-7-111-28767-4

I. 冲… II. 钟… III. ①冲压—工艺②冲压机 IV. TG38

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第022544号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：崔占军 责任编辑：王佳玮 版式设计：霍永明

封面设计：王伟光 责任校对：刘志文 责任印制：洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷（三河市胜利装订厂装订）

2010年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11印张·271千字

0001-3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-28767-4

定价：19.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者服务部：(010)68993821

前 言

本书是根据中等职业教育机电类专业教学研讨及教材建设会议制定的“冲压工艺及设备”课程的基本要求和教材编写大纲，遵循“理论联系实际，体现应用性、实用性、综合性和先进性，激发创新”的原则，结合编者多年教学和生产实践的经验编写而成的。

本书的参考学时为 60 学时，其主要内容包括冲压基础知识、冲裁、弯曲、拉深和其他冲压成形工艺及其模具设计，同时还讲述了冲压模具的寿命、材料及安全措施，冲压工艺规程的制订等内容。在讲述冲压成形基本理论的基础上，选编了大量实例进行分析，供读者参考。

在中等职业教育的教学体系中，“冲压工艺及设备”课程是模具类专业的一门重要的专业课，具有较强的综合性和实用性。通过本书的学习，可以使学生掌握冲压工艺编排和冲压模具设计的基本知识、基本理论和基本方法，具备冲压工艺编排的能力和中等难度冲压模具设计的能力。本书以应用为目标，对一般理论，以“实用、够用”为度，着重讲述常用冲压工艺模具的设计方法和设计步骤，选用较为简单的实例，以方便教师的讲解和学生的掌握，降低了学习难度，突出了中等职业教育的实用性和针对性。本书知识体系完整，有助于培养学生分析问题和解决问题的能力。

本书由烟台工程职业技术学院钟全雄主编，谭晓鹏任副主编。全书共 8 章，第 1 章、第 2 章部分内容、第 4 章、第 8 章由钟全雄编写，第 3 章由邹吉华编写，第 2 章部分内容、第 7 章由谭晓鹏编写，第 5 章、第 6 章由胥锴编写。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点与不足，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 冲压加工的概念及特点	1
1.1.1 冲压相关基本概念	1
1.1.2 冲压加工的特点	1
1.2 冲压的基本工序及模具	2
1.2.1 冲压的基本工序分类	2
1.2.2 冲压模具	3
1.3 冲压技术的现状和发展方向	4
1.4 本课程的学习方法	6
思考练习题	7
第2章 冲压基础	8
2.1 金属塑性变形的基本概念	8
2.1.1 弹性变形与塑性变形	8
2.1.2 金属的塑性与变形抗力	8
2.1.3 影响金属塑性的主要因素	8
2.2 金属塑性变形的基本规律	9
2.2.1 最小阻力定律	9
2.2.2 加工硬化及卸载弹性恢复规律	10
2.2.3 塑性变形时的体积不变规律	11
2.3 冲压材料及其冲压成形性能	11
2.3.1 冲压材料	11
2.3.2 材料的冲压成形性能	12
2.3.3 冲压工艺对材料的基本要求	12
2.3.4 冲压材料的合理选用	13
2.4 冲压设备	14
2.4.1 冲压设备的分类	14
2.4.2 冲压设备的型号表示方法	14
2.4.3 曲柄压力机	16
2.4.4 液压机	19
思考练习题	22
第3章 冲裁	24
3.1 冲裁变形过程分析	24
3.1.1 冲裁变形过程	24
3.1.2 冲裁件的质量及其影响因素	25
3.2 冲裁件的工艺性	27
3.2.1 冲裁件的结构与尺寸	27

3.2.2 冲裁件的精度与断面表面粗糙度 ...	29
3.2.3 冲裁件材料的选用	30
3.3 冲裁间隙	30
3.3.1 间隙对冲裁件质量的影响	30
3.3.2 间隙对冲裁力的影响	31
3.3.3 间隙对模具寿命的影响	31
3.3.4 间隙值的确定	31
3.4 凸模和凹模刃口尺寸的确定	33
3.4.1 冲裁模刃口尺寸的计算	34
3.4.2 计算举例	36
3.5 冲裁件的排样	38
3.5.1 材料利用率	38
3.5.2 排样方法	39
3.5.3 搭边和料宽	40
3.6 冲裁力、卸料力及推件力的计算	43
3.6.1 冲裁力的计算	43
3.6.2 降低冲裁力的方法	43
3.6.3 卸料力及推件力的计算	44
3.7 冲裁模的典型结构	45
3.7.1 冲裁模的分类	45
3.7.2 冲裁模的结构组成	46
3.7.3 典型冲裁模的结构分析	46
3.8 冲裁模主要零部件的结构设计与标准件的 选用	51
3.8.1 冲裁模零部件的分类	51
3.8.2 成形零件的结构设计	52
3.8.3 卸料及压料零件的结构设计	56
3.9 精密冲裁	60
3.9.1 整修	60
3.9.2 半精密冲裁	60
3.9.3 精密冲裁	62
3.9.4 精密冲裁模具结构	62
思考练习题	64

第4章 弯曲

4.1 概述	67
4.2 弯曲变形分析	68
4.2.1 弯曲变形过程	68

4.2.2 弯曲变形的特点	69	5.4.1 盒形件的拉深特点	117
4.2.3 弯曲变形区的应力应变特点	70	5.4.2 盒形件拉深的工序计算	117
4.3 最小相对弯曲半径	71	5.5 拉深模工作零件的设计	117
4.3.1 弯曲变形程度与最小弯曲半径	71	5.5.1 拉深模工作部分结构参数的 确定	117
4.3.2 影响最小相对弯曲半径的因素	72	5.5.2 拉深模典型结构	120
4.3.3 最小相对弯曲半径的确定	74	5.6 拉深工艺设计	122
4.3.4 提高弯曲极限变形程度的方法	75	5.6.1 拉深件的工艺性	122
4.4 弯曲件的常见缺陷及其预防措施	75	5.6.2 压边装置与压边力	123
4.4.1 弯裂及其预防措施	75	5.6.3 拉深力的确定及设备的选用	125
4.4.2 截面畸变及其预防措施	75	5.6.4 拉深工艺的辅助工序	126
4.4.3 翘曲及其预防措施	75	5.7 拉深模设计实例	127
4.4.4 弯曲回弹及其预防措施	76	思考练习题	129
4.5 弯曲力的计算	83	第6章 其他冲压成形	132
4.5.1 自由弯曲力	83	6.1 翻边	132
4.5.2 校正弯曲力	83	6.1.1 内孔翻边	133
4.5.3 顶件力和压料力	84	6.1.2 非圆形孔的内孔翻边	137
4.5.4 压力机公称压力的确定	84	6.1.3 外缘翻边	138
4.6 弯曲件的毛坯长度计算	84	6.2 胀形	139
4.6.1 中性层位置的确定	84	6.3 缩口	139
4.6.2 弯曲件坯料尺寸的计算	85	6.4 扩口	141
4.6.3 铰链式弯曲件	85	6.5 校平和整形	141
4.7 弯曲件的工艺性及工序安排	87	6.6 级进模	142
4.7.1 弯曲件的精度	87	6.6.1 多工位级进模	142
4.7.2 弯曲件的材料	87	6.6.2 多工位级进模的分类	143
4.7.3 弯曲件的结构	87	思考练习题	143
4.7.4 弯曲件的工序安排	90	第7章 冲压模具的寿命、材料及安全 措施	145
4.8 弯曲模工作部分的设计	91	7.1 冲压模具寿命	145
4.9 弯曲模的典型结构	96	7.1.1 冲压模具的工作条件及失效 形式	145
思考练习题	98	7.1.2 影响冲压模具寿命的因素及提高其 寿命的措施	146
第5章 拉深	101	7.2 冲压模具材料	147
5.1 拉深变形分析	101	7.2.1 对冲压模具材料的要求	147
5.1.1 拉深变形过程	102	7.2.2 冲压模具材料的种类与特性	148
5.1.2 拉深制件的质量分析	103	7.2.3 冲压模具材料的选用及热处理	149
5.2 直壁旋转制件的拉深	105	7.3 冲压生产的安全措施	149
5.2.1 坯料尺寸计算	105	7.3.1 冲压生产发生事故的原因	150
5.2.2 无凸缘圆筒形件的拉深	108	7.3.2 冲压生产安全保护的主要措施	150
5.2.3 有凸缘圆筒形件的拉深	111	思考练习题	150
5.2.4 阶梯形制件的拉深	114	第8章 冲压工艺规程的制订	151
5.3 其他旋转体制件的拉深	115		
5.3.1 球面制件的拉深	115		
5.3.2 锥形制件的拉深	116		
5.3.3 抛物线形件的拉深	117		
5.4 盒形件的拉深	117		

8.1 制订工艺规程的步骤	151	附录 B 屈服比、板厚方向性系数与板平面	
8.2 实例分析	156	方向性	167
思考练习题	165	附录 C 机械压力机的列、组代号	168
附录	166	参考文献	170
附录 A 冲压常用金属材料的力学性能	166		

料；冲压加工一般不产生切屑碎料，材料消耗较少、利用率高。

4) 冲压加工制品的尺寸范围大。冲压不仅可以制造钟表及仪器中的小型精密零件，也可以制造汽车、拖拉机等的大型覆盖件。

冲压在现代工业生产中应用广泛，尤其是在大批量生产中。越来越多的工业部门采用冲压方法加工产品，如汽车、机械、仪表、电子信息、交通、兵器、日用电器及轻工等产业都有冲压加工，且冲压产品的比重占 60% ~ 90%。

1.2 冲压的基本工序及模具

1.2.1 冲压的基本工序分类

生产中为满足冲压制件形状、尺寸、精度、批量大小、原材料性能的要求，冲压加工的方法是多种多样的。根据材料的变形特点可将冲压工序分为分离工序和成形工序两类。

分离工序是指冲压工件与板料沿要求的轮廓线相互分离的加工工序。分离工序的详细分类与特征见表 1-1。

成形工序是指在不破坏坯料的条件下发生塑性变形，获得所需形状、尺寸和精度的加工工序。成形工序的详细分类与特征见表 1-2。

表 1-1 冲压工艺的分离工序

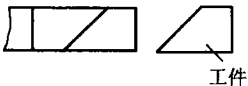
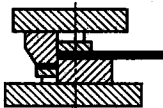
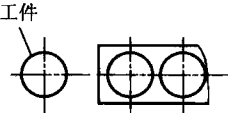
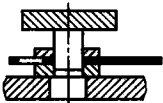
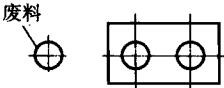
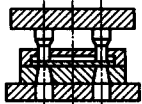
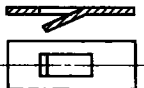
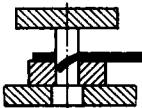
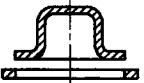
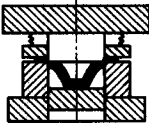
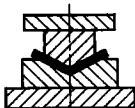
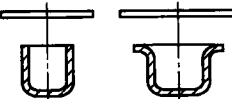
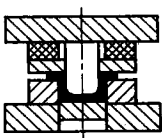
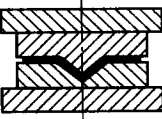
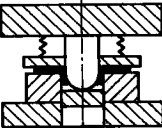
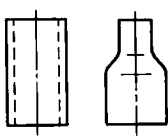
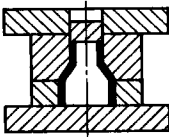
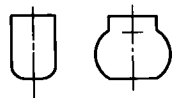
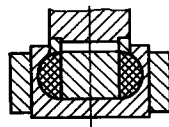
工序名称	工 序 简 图	模 具 简 图	工 序 特 征
切断			用剪刀或冲模切断板料，切断线不封闭
落料			用冲模沿封闭线冲切板料，冲下的部分为落料件
冲孔			用冲模沿封闭线冲切板料，冲下的部分为废料
切口			用模具将板料局部切开而不完全发生分离，切口部分材料发生弯曲
切边			用模具将工件边缘多余部分冲切下来

表 1-2 冲压工艺的成形工序

工序名称	工 序 简 图	模 具 简 图	工 序 特 征
弯曲			用模具使板料弯成一定形状或角度
拉深			用模具把板料制成任意形状的空心件
起伏 (压筋)			用模具将板料局部拉伸成凸起和凹陷形状
翻边			用模具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
缩口			用模具对空心件口部施加由外向内的径向压力, 使局部直径缩小
胀形			用模具对空心件施加由内向外的径向压力, 使局部直径增大
整形		同拉深模具	用模具将制件压成所需的正确形状

1.2.2 冲压模具

在实际生产中, 为兼顾效率和经济性, 常常在工艺上采用工序集中的方案, 即把两种或两种以上的单一工序集中在一副模具内完成, 称为组合工序。根据工序组合方法的不同, 可将冲压模具分为单工序模、复合模和连续模 (或级进模)。

1. 单工序模

只有一个工位、只完成一道工序的冲模称为单工序模。单工序模还可以进一步分为冲裁模、弯曲模、拉深模等。

2. 复合模

只有一个工位、在该工位上完成两种或两种以上冲压工序的模具称为复合模。按照组合

工序的不同,可进一步将其分为落料冲孔复合模、落料拉深复合模等。

3. 连续模 (或级进模)

具有两个或两个以上工位,在工作中按一定的顺序在模具的不同工位上完成两种或两种以上冲压工序的模具称为连续模。一副连续模中可包含冲裁、弯曲、拉深等冲压工序,一般用于成形精密复杂的冲压件。

冲压模具的结构类型有很多种,几种常见冲压模具的结构简图如图 1-2 所示。

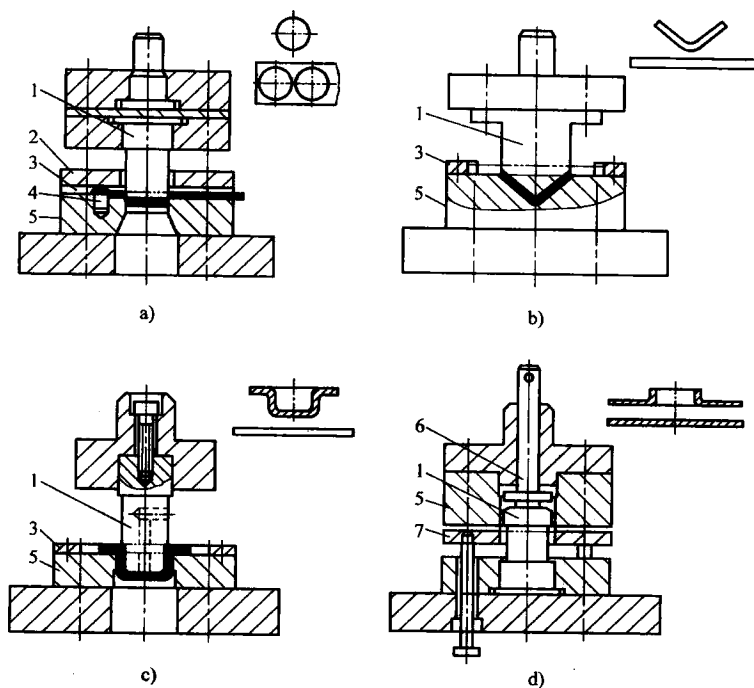


图 1-2 几种常见冲裁模的结构简图

a) 落料模 b) 弯曲模 c) 拉深模 d) 翻边模

1—凸模 2—卸料板 3—定位板 4—挡料销 5—凹模 6—顶料杆 7—压料板

1.3 冲压技术的现状和发展方向

随着科学技术的不断进步和工业生产的迅速发展,许多新技术、新工艺、新设备、新材料不断涌现,因而促进了冲压技术的不断革新和发展。其现状和发展方向主要体现在以下几个方面:

1. 冲压成形理论及冲压工艺方面

冲压成形理论的研究是提高冲压技术的基础。目前国内外对冲压成形理论的研究十分重视,在材料冲压性能研究、冲压成形过程应力应变分析、板料变形规律研究及坯料与模具之间的相互作用研究等方面均取得了较大的进展。特别是随着计算机技术的飞跃发展和塑性变形理论的进一步完善,国内外已开始应用塑性成形过程的计算机模拟技术,即利用有限元(FEM)等数值分析方法模拟金属的塑性成形过程,根据分析结果,设计人员可预测某一工

艺方案成形的可行性及可能出现的质量问题,从而通过在计算机程序中修改相关参数,达到优化设计工艺及模具的目的。这样既节省了昂贵的试模费用,也缩短了制模周期。

研究表明:推广能提高劳动生产率及产品质量、降低成本和扩大冲压工艺应用范围的各种冲压新工艺是冲压技术的发展方向之一。目前国内外相继涌现出了精密冲压工艺、软模成形工艺、高能高速成形工艺、超塑性成形工艺及无模多点成形工艺等精密、高效、经济的冲压新工艺。

2. 冲压模具设计与制造方面

冲模是实现冲压生产的基本条件。目前,冲模的设计和制造正朝着以下两方面发展:一方面,为了适应高速、自动、精密、安全等大批量现代生产的需要,冲模正向高效率、高精度、高寿命及多功能方向发展,与此相适应的新型模具材料及其热处理技术和各种高效、高精度、数控、自动化的模具加工机床及检测设备等也正在迅速发展;另一方面,为了适应产品更新换代和试制,或小批量生产的需要,锌基合金冲模、聚氨酯橡胶冲模、薄板冲模、钢带冲模、组合冲模等各种简易冲模及其制造技术也得到了迅速发展。

精密、高效的多工位及多功能连续模和大型复杂的汽车覆盖件冲模代表了现代冲模的技术水平。目前,50个工位以上的连续模步距精度可达 $2\mu\text{m}$,不仅可以完成冲压全过程,还可完成焊接、装配等工序。我国可以自行设计制造出达到国际先进水平的精密多工位连续冲模,如某机电一体化的铁芯精密自动化多功能连续模,其主要零件的制造精度达 $2\sim 5\mu\text{m}$,步距精度达 $2\sim 3\mu\text{m}$,总寿命达1亿次。我国主要汽车模具企业能生产成套轿车覆盖件模具,在设计制造方法、手段上基本达到了国际水平,模具结构、功能方面也接近国际水平,但在制造质量、精度、制造周期和成本控制方面与国外相比还存在较大的差距。

模具材料热处理及表面处理工艺对模具加工质量和寿命的影响很大,世界各主要工业国在此方面的研究取得了较大进展,开发了许多新钢种,其硬度可达70HRC以上,而变形只有普通钢材的 $1/2\sim 1/5$ 。我国研制的65Nb、LD和CD等新钢种具有热加工性能好、热处理变形小、抗冲击性能佳等特点。与此同时,还发展了一些新的热处理和表面处理工艺,主要有气体软氮化、离子氮化、渗硼、化学气相沉积(CVD)、物理气相沉积(PVD)、激光表面处理等,这些方法能提高模具工作表面的耐磨性、硬度和耐蚀性,使模具寿命大大延长。

模具制造技术现代化是模具工业发展的基础。计算机技术、信息技术、自动化技术等先进技术正在不断向传统制造技术渗透、交叉、融合,形成了现代模具制造技术。其中高速铣削加工、慢走丝电火花切割加工、精密磨削及抛光技术等代表了现代冲模制造的技术水平。此外,激光快速成形技术(RPM)与树脂浇注技术在快速经济制模技术中得到了成功的应用。

模具CAD/CAM技术是改造传统模具生产方式的关键技术,它以计算机软件的形式为用户提供一种有效的辅助工具,使工程技术人员能借助计算机对产品、模具结构、成形工艺、数控加工及成本等进行设计和优化,从而显著缩短模具设计与制造周期,降低生产成本,提高产品质量。随着功能强大的专业软件和高效集成制造设备的出现,以三维造型为基础、基于并行工程(CE)的模具CAD/CAM技术正成为发展方向,它能实现制造和装配的设计、成形过程的模拟和数控加工过程的仿真,还可对模具可制造性进行评价,使模具设计与制造一体化、智能化。吉林大学汽车覆盖件成形技术研究所独立研制的汽车覆盖件冲压成形分析KMAS软件,华中理工大学模具技术国家重点实验室开发的注射模、汽车覆盖件模具和连续

模 CAD/CAE/CAM 软件, 上海交通大学模具 CAD 国家工程研究中心开发的冷冲模和精密冲裁研究中心开发的冷冲模和精密冲裁模 CAD 软件等在国内模具行业拥有不少的用户。

3. 冲压设备和冲压生产自动化方面

性能良好的冲压设备是提高冲压生产技术水平的基本条件, 高精度、高寿命、高效率的冲模需要高精度、高自动化的冲压设备相匹配。为了满足大批量高速生产的需要, 目前冲压设备也由单工位、单功能的低速压力机朝着多工位、多功能、高速和数控方向发展, 加之机械手乃至机器人的大量使用, 冲压生产的效率得到大幅度提高, 各式各样的冲压自动线 and 高速自动压力机纷纷投入使用。如在高速自动压力机上冲压电动机定、转子冲片时, 1min 可冲几百片, 并能自动叠成几十个定、转子铁芯, 生产效率比普通压力机提高几十倍, 材料利用率高达 97%。在多功能压力机方面, 日本会田公司生产的 2000kN 冲压中心采用 CNC 控制, 只需 5min 就可完成自动换模、换料和调整工艺参数等工作; 美国惠特尼 (Whitney) 公司生产的 CNC 金属板材加工中心, 生产能力为普通压力机的 4~10 倍, 并能进行冲孔、分段冲裁、弯曲和拉深等多种作业。

近年来, 为了适应市场的激烈竞争, 对产品质量的要求越来越高, 且产品更新换代的周期大为缩短。冲压生产为适应这一新的要求, 开发了多种适合小批量生产的工艺、设备和模具, 例如无需设计专用模具、性能先进的转塔数控多工位压力机、激光切割和成形机、CNC 万能折弯机等新设备已投入使用。近几年来在国外已经发展起来、国内亦开始使用的冲压柔性制造单元 (FMC) 和冲压柔性制造系统 (FMS) 代表了冲压生产发展的新趋势。冲压柔性制造系统以数控冲压设备为主体, 包括板料、模具、冲压件分类存放系统、自动上料与下料系统, 生产过程完全由计算机控制, 车间实现 24h 无人控制生产。

4. 冲压模具标准化及专业化生产方面

模具的标准化及专业化生产已得到模具行业的广泛重视。因为冲模属单件小批量生产, 冲模零件既具有一定的复杂性和精密性, 又具有一定的结构典型性, 因此只有实现了冲模的标准化, 才能使冲模和冲模零件的生产实现专业化、商品化, 从而降低模具成本, 提高模具质量和缩短制造周期。目前国外发达工业国家模具标准化程度已达 70%~80%, 模具厂只需设计制造工作零件, 大部分模具零件均从标准件厂购买, 使生产效率大幅度提高。

模具制造企业专业化程度越来越高, 分工越来越细, 这样更有利于提高模具的制造水平和缩短制造周期。我国冲模标准化与专业化生产近年来也有较大进展: 标准件专业化生产厂家和标准件品种都有较多的增加, 标准件的精度亦有提高。但总体情况还满足不了模具工业发展的要求, 模具标准化程度总体较低 (40% 以下), 标准件的品种和规格较少, 大多数标准件厂家未形成规模化生产, 标准件质量也还存在较多问题。另外, 标准件生产的销售、供货、服务等都还有待于进一步提高。

1.4 本课程的学习方法

冲压工艺与模具设计属于应用技术科学, 是一门实践性和应用性很强的主干专业课, 它以金属学与热处理、机械设计基础、金属塑性成形原理及许多其他技术学科为基础, 与冲压设备、模具制造工艺密切联系。在学习本门课程时应注意与这些相关课程的衔接。对初学者来说, 不但要注意系统学好本学科的基础理论知识, 而且要密切联系生产实际, 同时还要注意

意本学科与基础学科和相关学科知识间的联系，从而激发对本课程学习的兴趣。

【思考练习题】

1. 填空题

(1) 冲压工艺是在常温下，在压力机上利用模具对材料施加压力，使其产生_____或_____，从而获得所需零件的一种压力加工方法，也称_____。

(2) 根据材料的变形特点可将冲压工序分为_____和_____两大类。

(3) 在冲压零件的生产中，_____、_____和_____是构成冲压加工必不可少的三要素。

(4) 根据工序组合方法的不同，可将冲压模具分为_____、_____和_____。

2. 问答题

(1) 什么是冲压加工？冲压成形加工与其他加工方法相比有何特点？

(2) 冲压工序可分为哪几类？

(3) 简述分离工序和成形工序各包括哪几类？

(4) 说出5种以上的冲压产品名称。

第2章 冲压基础



【学习目标】

了解金属塑性变形的基本原理；掌握常用冲压材料的性能，合理选择冲压材料；了解压力机的工作原理、结构类型及主要参数，会选择与维护压力机。

2.1 金属塑性变形的基本概念

2.1.1 弹性变形与塑性变形

金属在外力作用下产生形状和尺寸的变化称为变形，变形分为弹性变形和塑性变形。

弹性变形是指物体在受到外力作用时产生变形或尺寸发生变化，去除外力后能完全恢复原有的形状和尺寸的变形。

塑性变形是指变形物体在外力去除后并不能完全恢复原有的形状和尺寸，这样的变形称为塑性变形。

变形的实质是原子间的距离发生变化。塑性变形和弹性变形都是在材料不被破坏的条件下进行的。金属材料在外力作用下，既能产生弹性变形，又能从弹性变形发展到塑性变形，是一种具有弹、塑性的工程材料。

2.1.2 金属的塑性与变形抗力

塑性是指固体材料在外力作用下发生永久变形而不破坏其完整性的能力。通常用塑性表示材料的塑性变形能力。不同材料的塑性是不一样的，同种材料在不同的变形条件下其塑性也不同，例如，在通常情况下金属铅具有良好的塑性，但在三向等拉应力的作用下极易破裂，不产生塑性变形；又如大理石，通常情况下是很脆的，但在三向压应力作用下具有良好的塑性。

变形抗力是指物体在一定变形条件下抵抗变形的能力。它反映材料产生塑性变形的难易程度，一般用金属材料产生塑性变形的单位变形力表示其大小。

塑性和变形抗力是两个不同的概念，简单地说，塑性反映材料塑性变形的能力，变形抗力则反映材料变形的难易程度。

2.1.3 影响金属塑性的主要因素

金属的塑性并不是固定不变的，影响金属塑性的因素很多，主要影响因素如下：

(1) 化学成分和组织对塑性的影响 一般情况下,组成金属材料的元素越少、晶粒越细小、组织分布越均匀,则金属的塑性越好,比如将合金元素加入钢中将使钢的塑性成形性能发生变化,主要表现为塑性降低,变形抗力增加;又如基体为面心立方晶格的 Al、Cu 等金属在相同成形条件下比体心立方晶格的 Cr、W 等金属的塑性要好。

(2) 变形时的应力状态对塑性的影响 金属变形时,在受压应力状态下其塑性较好,金属的完整性不易破坏;材料受拉应力时则加剧材料裂纹与缺陷的扩展,不利于发挥金属的塑性。

(3) 变形温度对塑性的影响 大多数金属的塑性随着温度的升高而增加,同时变形抗力降低,但也有某些金属材料在温度升高过程中的某些温度段,由于过剩相的析出或相变等原因使得金属的塑性降低。例如,碳钢加热至 $200 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 之间(蓝脆区)时,因为时效作用使塑性降低,变形抗力增加,脆性增大;在 $800 \sim 950^{\circ}\text{C}$ 范围(热脆区)内又会出现热脆,使塑性降低。因此选择加工碳钢时应避开蓝脆区和热脆区。总之,为了提高材料的塑性,减少变形抗力,应充分考虑加热对材料产生的不利影响,依据材料的“温度—力学性能”曲线合理选用加热温度。

(4) 变形速度对塑性的影响 变形速度是指单位时间内应变的变化量。由于在冲压生产中不便控制,故用压力机滑块的移动速度来近似反映金属的变形速度。变形速度对金属塑性的影响比较复杂,对大多数金属来说,塑性随变形速度变化的一般趋势如图 2-1 所示。

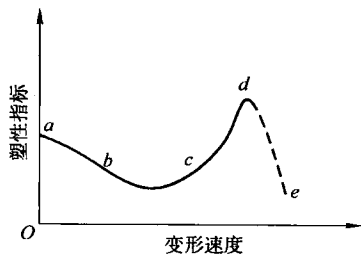


图 2-1 塑性随变形速度的变化趋势

目前常规冲压使用的压力及工作速度都较低,对金属塑性变形的影响不大,因此考虑速度因素时主要基于冲压件的尺寸和形状。对于小型件的冲压,一般可以不考虑速度因素,只需考虑设备的类型、标称压力和功率等;对于大型复杂件,由于冲压成形时坯料各部位的变形不均匀,易出现局部开裂或起皱,为了充分发挥金属塑性,宜采用低速成形。

(5) 尺寸因素对塑性的影响 同一种材料,在其他变形条件相同的情况下,尺寸越大塑性越差,因为材料尺寸越大,组织和化学成分越不均匀,应力分布也不均匀。例如厚板冲裁时的相对挤入深度(产生剪裂纹时凸模挤入板料的深度与板料厚度的比值)比薄板冲裁时小,塑性也比薄板差。

2.2 金属塑性变形的基本规律

2.2.1 最小阻力定律

最小阻力定律是指:在塑性变形过程中,如果金属质点有向几个方向移动的可能,则金属各质点将向阻力最小的方向移动。最小阻力定律符合力学的一般原则,它是塑性成形加工中最基本的规律之一,在冲压加工中有十分灵活和广泛的应用,能正确指导冲压工艺及模具设计,解决实际生产过程中出现的质量问题。

例如,将一块方形板料拉深成圆筒形制件,当凸模将板料拉入凹模时,距凸模中心越远

的地方（即方形料的对角线处），流动阻力越大，越不易向凹模洞口流动，拉深变形后，凸缘形成弧状而不是直线边，如图 2-2 所示。最小阻力定律说明了在冲压生产中金属板料流动的趋势，控制金属流动就可控制变形的趋向性。影响金属流动的因素主要是材料本身的特性和应力状态，而应力状态与冲压工序的性质、工艺参数和模具结构参数（凸模、凹模工作部分的圆角半径，摩擦和间隙等）有关。

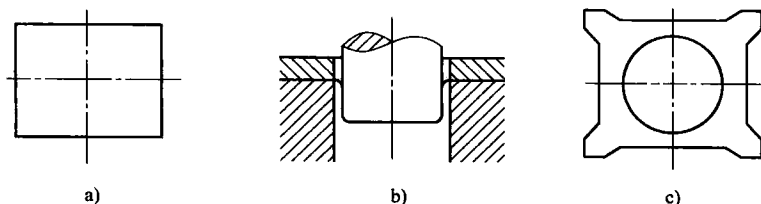


图 2-2 方形板料拉深实验
a) 坯料 b) 拉深 c) 制品

冲压成形必须正确控制金属流动。当坯料某处需要金属流入而不能流入时，坯料该局部将变薄，甚至出现断裂；相反，当坯料某处不需要金属流入而流入金属时，多余的金属就会使该处起皱。控制金属流动的措施有改变凸模与凹模工作部分的圆角半径、配合间隙、应力性质等。

2.2.2 加工硬化及卸载弹性恢复规律

金属在常温下随着变形量的增加变形抗力增大，塑性和韧性下降的现象称为加工硬化。图 2-3 所示为金属的应力—应变曲线，在弹性变形范围内卸载后没有残留的永久变形，应力、应变按照同一直线回到原点，如图 2-3 所示 OA 段。当变形超过屈服点 A 进入塑性变形范围后，达到 B 点时的应力与应变分别为 σ_b 、 ε_b ，再减小载荷，应力—应变的关系将按另一直线 BC 回到 C 点，不再重复加载曲线经过的路线。加载时的总变形量 ε_b 可以分为两部分，一部分 ε_1 因弹性恢复而消失，另一部分 ε_2 保留下来成为塑性变形， $\varepsilon_b = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ 。

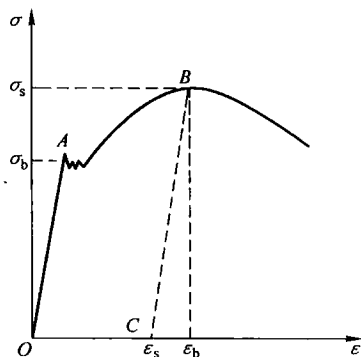


图 2-3 应力—应变曲线

如果卸载后再重新加载，应力—应变关系将沿直线 CB 逐渐上升，到达 B 点，应力 σ_b 使材料又开始屈服，随后应力—应变关系仍按原加载曲线变化，所以 σ_b 又是材料在变形程度为 ε_b 时的屈服点。

硬化曲线可以用函数式表达为：

$$\sigma = A\varepsilon^n \quad (2-1)$$

式中 σ ——实际应力（MPa）；

A ——与材料有关的系数（MPa）；

ε ——应变；

n ——硬化指数。

A 与 n 决定于材料的种类和性能, 可通过拉伸试验求得, 不同材料的 A 与 n 值见表 2-1。硬化指数是表明材料冷变形硬化的重要参数, 对板材的冲压成形性能及制件的质量都有较为重要的影响。硬化指数大, 表明变形时硬化显著, 对后续变形不利。例如, 20 钢和奥氏体不锈钢的塑性都很好, 但是奥氏体不锈钢的硬化指数较大, 变形后再变形的抗力比 20 钢大得多, 所以其塑性成形性也较 20 钢差。

表 2-1 几种材料的 A 与 n 值

材 料	A/MPa	n
软 钢	710 ~ 750	0.19 ~ 0.22
黄 铜	760 ~ 820	0.39 ~ 0.44
磷 青 铜	1100	0.28
铜	420 ~ 460	0.27 ~ 0.34
银	470	0.31
铝	160 ~ 210	0.25 ~ 0.27
硬 铝	320 ~ 380	0.12 ~ 0.13

注: 1. 表中材料为退火状态。

2. 试验条件为室温和低变形速度。

2.2.3 塑性变形时的体积不变规律

体积不变规律是指: 金属材料在塑性变形前后体积保持不变。根据体积不变规律, 可以得出如下结论: 金属塑性变形时, 只有形状和尺寸的改变, 而无体积的变化。

2.3 冲压材料及其冲压成形性能

2.3.1 冲压材料

冲压所用的材料是冲压生产的三要素之一。冲压生产过程中只有先进的冲压工艺与模具技术加上冲压性能良好的材料, 才能制造出高质量的制品, 因此只有在冲压工艺及模具设计中合理地选用材料, 才能更好地发挥材料的潜能, 提高经济效益。

冲压材料有各种规格的板料、带料和块料。板料的尺寸较大, 一般用于大型零件的冲压, 对于中小型零件, 多数是将板料裁剪成条料后使用。带料 (又称卷料) 有多种规格的宽度, 展开长度可达几千米, 适用于大批量生产的自动送料, 材料厚度较小时也通常卷成卷状供应。块料只用于少数钢号和价格昂贵的非铁金属冲压。

冲压常用材料有以下几种:

(1) 钢铁材料 包括普通碳素结构钢、优质碳素钢、合金结构钢、碳素工具钢、不锈钢、电工硅钢等。对厚度在 4mm 以下的轧制薄钢板, 按国家标准 GB/T 708—2006 规定, 钢板的厚度精度可分为 A (高级精度)、B (较高精度)、C (普通精度) 级。对优质碳素结构冷轧薄钢板, 根据 GB/T 710—2008 规定, 钢板的表面质量可分二组:

I 较高级的精整表面

II 普通级的精整表面

每组按拉延级别又可分为三级：

Z 最深拉延级

S 深拉延级

P 普通拉延级

在冲压工艺资料和图样上，对材料的表示方法有特殊的规定，如 20 钢、厚度为 1.0mm 平面尺寸为 1000mm × 1200mm、较高级精度、较高级的精整表面、深拉延级的优质碳素结构钢冷轧钢板表示为

$$\text{钢板} \frac{1.0 \times 1000 \times 1200 - \text{GB708} - 2006}{20 - \text{I} - \text{S} - \text{GB710} - 2008}$$

近年来汽车工业广泛采用低合金高强度钢板（简称 HSLA，“high strength low alloy steel”的缩写）代替低碳钢板制造汽车覆盖件，以减轻车身重量，降低油耗，提高车辆寿命。

(2) 非铁金属 铜及铜合金、铝及铝合金、镁合金、钛合金等的板材和带材。

(3) 非金属材料 纸板、胶木板、塑料板、纤维板和云母等。

关于各类材料的牌号、规格和性能，可查阅有关手册和标准。部分常用冲压材料的力学性能见附录 A。

2.3.2 材料的冲压成形性能

材料的冲压成形性能是指材料对各种冲压加工方法的适应能力。材料的冲压成形性能好，就是指其便于加工，容易得到高质量和高精度的冲压件，生产效率高，模具消耗低，不易产生废品等。材料的冲压成形性能是一个综合性的概念，冲压件能否成形及成形后的质量取决于成形极限、贴模性和形状冻结性。

在冲压成形过程中，材料能达到的最大变形程度称为成形极限。对于不同的成形工艺，成形极限是采用不同的极限变形系数来表示的。可以认为，成形极限就是冲压成形时材料的抗破裂性。板料的冲压成形性能越好，其抗破裂性也越好，成形极限也就越高。

板料的贴模性是指板料在冲压成形过程中取得模具形状的能力，形状冻结性是指零件脱模后保持其在模内获得的形状的能力。影响贴模性的因素很多，成形过程发生的内皱、翘曲、塌陷和鼓起等几何缺陷都会使贴模性降低。形状冻结性影响的最主要因素是回弹，制件脱模后，常因回弹过大而产生较大的形状误差。

材料冲压成形性能中的贴模性和形状冻结性是决定零件形状精度的重要因素，而成形极限是材料开始出现破裂的极限变形程度。破裂后的制件无法修复使用，因此生产中以成形极限作为板料冲压成形性能的判定尺度，并用影响这种尺度的各种物理量作为评定板料冲压成形性能的指标。

2.3.3 冲压工艺对材料的基本要求

冲压工艺对材料的基本要求主要是：

1. 良好的冲压成形性能

为了有利于冲压变形和制件质量的提高，材料应具有良好的冲压成形性能，而冲压成形