



高等院校应用型特色规划教材

冲压工艺 与模具设计

张如华 赵向阳 章跃荣 主 编
郑小民 邹晓晖 陈 艳 黄良华 参 编
孙卫和 主 审



清华大学出版社

高等院校应用型特色规划教材

冲压工艺与模具设计

张如华	赵向阳	章跃荣	主编
郑小民	邹晓晖	陈 艳	参编
	孙卫和		主审

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对以板料为加工对象的冲压工艺基本方法与冲模设计基础知识作了系统论述。全书分为 8 章,第 1 章主要讲述金属塑性成形原理、常用板料、常用冲压设备;第 2、3、4 章分别讲述冲裁、弯曲、拉深工序的工艺设计;第 5 章讲述常用成形工序(胀形、翻边、扩口、缩口)的工艺设计;第 6 章讲述冲压工艺过程设计;第 7 章讲述以冲裁、弯曲、拉深方式为主的简单模、复合模、级进模的(结构)设计,以及模具零件设计、模具材料、冲模安全设计、初步的冲模 CAD/CAM;第 8 章讲述特种冲模;附录介绍本课程应开设的实验和课程设计,并提供了设计计算和绘图实例。第 2、3、4 章分别列有习题。

本书是作为本专科层次高等工科学校和高等职业技术学院材料成型及控制工程(塑性成形工艺及设备方向)专业、数控技术与现代模具设计(模具设计与制造)专业的教材而编写的,也可供从事板料冲压的工程技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

冲压工艺与模具设计/张如华,赵向阳,章跃荣主编.郑小民,邹晓晖,陈艳,黄良华参编;孙卫和主审.
—北京:清华大学出版社,2006.3

(高等院校应用型特色规划教材)

ISBN 7-302-12341-1

I. 冲… II. ①张… ②赵… ③章… ④郑… ⑤邹… ⑥陈… ⑦黄… ⑧孙… III. ①冲压—工艺—高等学校:技术学校—教材 ② 冲模—设计—高等学校:技术学校—教材 IV. TG38
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 000798 号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn 邮 编:100084
社 总 机:010-62770175 客 户 服 务:010-62776969

组稿编辑:刘建龙

文稿编辑:桑任松

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印 张:20.5 字 数:489 千字

版 次:2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-12341-1/TH·190

印 数:1~4000

定 价:28.00 元

前 言

当代社会的不少领域,工业产品已经相对过剩。于是,人们不断更新的消费需求,已经转移,消费者不仅需要产品内在质量优秀,而且讲求外观雅致。这就是推动制造业不断发展的无穷动力。

以冲压方法为主制造的零件,比较有代表性且与人们日常生活密切相关的有汽车覆盖件、搪瓷与不锈钢器皿、各种家用电器的外壳(罩)等,它们带来了产品层出不穷的外观变化。不仅如此,冲压方法也能制造不少产品内部的某些零件,甚至是关键零件,如链轮、轮毂、汽车大梁、支架等。同时,在制件尺寸大小、制件复杂程度等方面,冲压方法都有非常大的适应范围。冲压件与塑料件结合起来,适应的范围就更宽。据文献介绍,冲压方法的增值率达原材料的3~12倍,具有明显的综合技术经济优势。所以,冲压工艺得到了最广泛的应用,几乎遍及国民经济各个部门。

从模具角度看,模具是现代制造业不可缺少的工艺装备,发达国家的模具总产值早已超过了工作母机(机床)的总产值,其中为冲压工艺服务的冲模约占模具总量的40%。而冲模在很大范围内涵盖了其他模具(冷锻模、塑料模、压铸模、粉末冶金模等)的共同内容,掌握冲模技术之后,不难触类旁通。

可见,学习掌握冲压工艺与模具设计知识具有非常重要的意义。

针对现代学生获得感性认识的机会不多,缺乏生产实践体验,基础知识正在逐步掌握之中,越来越多其他专业的学生选修本课程等特点,在立足于教学大纲的同时,本书在编写中注意把握以下几点。

(1) 基础性

在论述各冲压工序方法时,注重讲清基本原理、变形过程、基本工艺知识和工艺特点。选材比较考究,文字力求浅显易懂,内容详略有别、循序渐进,介绍典型模具结构和工艺示意图等尽量配立体图。书后列出的参考文献为深入探寻者提供了指引。

(2) 实践性

为尽量贴近实际,以利于培养学生基本技能,书中的工艺计算配有来自生产一线的实例,在冲裁、弯曲、拉深内容之后配有若干习题,附录中还给出了设计题及范例,提供了符合实际生产规范的工艺规程格式。为便于完成练习题和设计题,书中选列了学习阶段所需的部分设计资料,提供了查找模具标准件的线索。

本书融会了编写组主要成员从事本学科教学、科研、生产一线模具设计实践与管理等工作20多年的经验,包括创新点、行之有效的技巧、实用资料等。理论知识以够用为度,一般不作系统推导,直接引用结论性论述。

(3) 体系性

考虑课程门类不宜过多,又要尽量组成比较完整的知识体系,本书对金属塑性成形原理、常用冲压设备、常用板料、冲压辅助工序等有关方面的知识作了简要介绍,以利于直接与《机械制造基础》等课程对接。受教学课时限制时,部分内容可以由学生自学。第2、3、4、7章是本书的重点内容。按照现在的分类方法,冷挤压、压印、变薄拉深、变薄翻

边等均属于体积成形(锻造)的内容,本书未予介绍。应用不够广泛的旋压、扭曲、除胀形以外的管坯料成形,以及电磁成形、电液成形、爆炸成形等,也未作介绍。

(4) 先进性

冲压技术仍然在不断发展,本书努力吸收成熟的先进技术,特别是初学者应了解的新模具材料知识、冲模 CAD/CAM 基本知识等;由于级进模对中小冲压件生产具有突出的优越性和发展趋势性,本书对多工位级进模设计的基础内容作了专门介绍。

希望通过对本书的系统学习,并配合习题、实验、实习、课程设计等环节,使学生具备分析制件的冲压工艺性、编制冲压工艺规程、设计冲压模具、解决冲压生产中出现的实际问题的初步能力。

本书第 1 章和第 7.6 节由张如华编写,第 2、3、6 章及附录由赵向阳编写,第 4 章由赵向阳、张如华共同编写,第 5、7 章(不含 7.6 节)由章跃荣编写,第 8 章由章跃荣、赵向阳共同编写。黄良华协助编写第 2 章,邹晓晖、陈艳协助编写第 5、7 章,郑小民协助编写第 8 章。陈丽军绘制了部分插图。全书由张如华统稿、定稿。由深圳职业技术学院机电工程学院孙卫和教授主审。

本书的编写工作得到了南昌大学卢险峰教授、包忠诤教授、周天瑞教授的指导,还得到了蓝天职业技术学院、南昌理工学院、江西新亚大学、江西大宇学院、江西渝州科技学院、江西赣江职业技术学院、江西工业工程职业技术学院等单位的支持。

冲压工艺与模具设计方面的教科书版本非常多,本书尽量吸纳各版本的优点。通过借鉴参考文献中的成果和数据资料以及部分企业的标准和资料,丰富了本书的内容。在此一并表示衷心感谢。

因编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,欢迎广大师生和读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 综 论.....	1	2.4 冲裁间隙.....	53
1.1 冲压的定义	1	2.4.1 冲裁间隙对模具寿命的 影响	53
1.2 冲压工序分类	1	2.4.2 冲裁间隙对冲裁力及卸料力、 推件力、顶件力的影响.....	54
1.3 冲压工艺的特点及其应用	4	2.4.3 合理冲裁间隙的选用.....	55
1.4 冲压变形的理论基础.....	5	2.5 冲裁模工作部分尺寸的计算	58
1.4.1 金属塑性变形的概念	5	2.5.1 计算的原则	58
1.4.2 影响塑性及变形抗力 的主要因素	6	2.5.2 计算方法	59
1.4.3 金属塑性变形的力学条件.....	13	2.5.3 应用实例	63
1.4.4 冲压成形中的变形 趋向及其控制	19	2.6 冲裁件的排样.....	65
1.5 冲压用板料	21	2.6.1 排样原则	66
1.5.1 板料的冲压成形性能 和评定方法	21	2.6.2 排样方法	67
1.5.2 常用板料	26	2.6.3 搭边	69
1.6 冲压设备简介	30	2.6.4 送料步距与条料宽度.....	70
1.6.1 曲柄压力机	31	2.6.5 排样图	72
1.6.2 薄板拉深液压机	38	2.7 冲裁工艺设计.....	73
1.6.3 其他常用冲压设备	41	2.7.1 冲裁件工艺性分析.....	73
第 2 章 冲裁.....	43	2.7.2 冲裁工艺方案的确定.....	78
2.1 冲裁变形过程	43	2.7.3 应用实例	80
2.1.1 冲裁变形的 3 个阶段	43	2.8 精密冲裁.....	82
2.1.2 冲裁变形区及受力	44	2.8.1 精密冲裁的特点.....	82
2.1.3 冲裁断面的 4 个特征区.....	45	2.8.2 精密冲裁的机理.....	84
2.2 冲裁件的质量分析及控制.....	46	2.8.3 精密冲裁的过程.....	84
2.2.1 尺寸精度	46	2.9 半精密冲裁和整修.....	85
2.2.2 形状误差	48	2.9.1 半精密冲裁	85
2.2.3 断面质量	48	2.9.2 整修	86
2.2.4 毛刺高度	48	习题.....	88
2.3 冲裁力	49	第 3 章 弯 曲.....	90
2.3.1 冲裁力的计算	50	3.1 弯曲变形分析.....	90
2.3.2 降低冲裁力的措施	50	3.1.1 弯曲变形过程.....	90
2.3.3 卸料力、推件力和顶件力.....	51	3.1.2 弯曲变形的特点.....	90
2.3.4 总冲压力	52	3.1.3 弯曲变形时的应力应变 状态	92

3.2 弯曲力的计算	92	4.2.4 时效开裂	129
3.3 弯曲件坯料展开	93	4.3 压边方式设计	129
3.3.1 弯曲中性层位置	93	4.3.1 压边装置与压边圈形式	130
3.3.2 弯曲件坯料展开长度	94	4.3.2 压边力的计算	133
3.4 弯曲件的质量问题及分析	96	4.4 拉深力与拉深功	133
3.4.1 弯裂	96	4.5 筒形件拉深模工作部分设计	135
3.4.2 回弹	98	4.5.1 凹模圆角半径和凸模 圆角半径	135
3.4.3 偏移	101	4.5.2 拉深间隙	136
3.4.4 翘曲	102	4.5.3 凸模和凹模工作部分 的尺寸及制造公差	137
3.4.5 截面畸变	102	4.5.4 凸模和凹模的结构	138
3.5 弯曲工艺设计	103	4.6 拉深件的坯料与工序件尺寸	140
3.5.1 弯曲件工艺性分析	103	4.6.1 坯料尺寸计算	140
3.5.2 弯曲工序安排	105	4.6.2 筒形件中间各次拉深 的工序尺寸	141
3.5.3 应用实例	106	4.7 有凸缘筒形件与阶梯筒形件 的拉深	142
3.6 弯曲模工作部分设计	109	4.7.1 有凸缘筒形件的拉深	142
3.6.1 弯曲凸模的圆角半径	109	4.7.2 阶梯筒形件的拉深	148
3.6.2 弯曲凹模的圆角半径 及其工作部分的深度	109	4.8 曲面旋转体制件的拉深	149
3.6.3 弯曲凸模和凹模之间 的间隙及宽度尺寸	111	4.8.1 曲面旋转体制件拉深 的特点	149
3.7 弯曲的其他形式	112	4.8.2 球面制件的拉深	150
3.7.1 辊弯	112	4.8.3 抛物面制件的拉深	152
3.7.2 辊形	114	4.8.4 锥形制件的拉深	152
习题	115	4.9 盒形件的拉深	154
第4章 拉深	116	4.9.1 盒形件拉深的特点	154
4.1 筒形件的拉深变形分析	116	4.9.2 盒形件首次拉深的极限 变形程度	155
4.1.1 筒形件的拉深变形过程	116	4.9.3 盒形件的坯料形状与尺寸	156
4.1.2 筒形件拉深过程中坯料 的应力应变状态	118	4.9.4 高盒形件的拉深方法	160
4.1.3 筒形件拉深变形 的力学分析	119	4.9.5 盒形件拉深模工作 部分设计	163
4.1.4 筒形件的拉深系数 与拉深次数	121	4.10 非旋转体曲面制件拉深 成形的特点	164
4.2 筒形件拉深的主要质量问题 及防止措施	127	4.11 拉深的辅助工序	164
4.2.1 起皱	127	4.11.1 润滑	165
4.2.2 拉裂	128	4.11.2 退火	166
4.2.3 拉深凸耳	129		

4.11.3 酸洗	166	组合方式	229
4.12 拉深工艺设计	167	7.3 冲模零件与模具材料	230
4.12.1 拉深件工艺性分析	168	7.3.1 冲模零件分类	230
4.12.2 拉深工序设计	169	7.3.2 凸模组件	232
4.12.3 应用实例	170	7.3.3 凹模与凸凹模	234
习题	171	7.3.4 镶拼式凸、凹模	237
第 5 章 其他冲压成形方法	173	7.3.5 定位零件	239
5.1 胀形	173	7.3.6 卸料与出件装置	246
5.1.1 胀形变形特点	173	7.3.7 弹簧和橡胶板的选用	250
5.1.2 平板坯料局部胀形	174	7.3.8 模架与模柄	254
5.1.3 空心坯料胀形	176	7.3.9 冲模的组合结构	258
5.2 翻边	179	7.3.10 冲模材料及热处理要求	259
5.2.1 圆孔翻边	179	7.4 冲模总体设计要点	261
5.2.2 外缘翻边	182	7.4.1 冲模结构形式的确定	262
5.2.3 非圆孔翻边	184	7.4.2 冲模的压力中心	263
5.3 扩口	185	7.4.3 模具的轮廓尺寸与 压力机的关系	265
5.3.1 扩口变形特点与扩口系数	185	7.4.4 冲模的安全措施	266
5.3.2 扩口坯料尺寸和制件精度	186	7.5 多工位级进模	267
5.3.3 扩口力的计算	187	7.5.1 多工位级进模排样图设计	267
5.4 缩口	188	7.5.2 带料连续拉深模	272
5.4.1 缩口变形特点及缩口系数	189	7.5.3 多工位级进模结构设计	274
5.4.2 缩口模基本结构	189	7.5.4 多工位级进模实例	280
5.4.3 缩口工艺计算	190	7.6 冲模 CAD/CAM 简介	281
第 6 章 冲压工艺过程设计	192	7.6.1 冲模 CAD/CAM 系统 的功能与内容	281
6.1 冲压工艺过程设计步骤	192	7.6.2 冲模 CAD 系统	282
6.2 冲压工艺方案的确定	193	7.6.3 冲模 CAM	285
6.2.1 工序性质的确定	193	7.6.4 冲模 CAE	286
6.2.2 工序数目的确定	194	7.6.5 冲压产品数据管理(PDM)	286
6.2.3 工序顺序的安排	197	第 8 章 特种冲压模具	288
6.2.4 工序件/半成品形状与尺寸	197	8.1 低熔点合金冲模	288
6.3 冲压工艺过程设计实例	198	8.1.1 低熔点合金的特性	288
第 7 章 冲模结构设计	206	8.1.2 低熔点合金拉深模	288
7.1 冲模分类	206	8.1.3 锌基合金冲裁模的设计	290
7.2 冲模的基本结构类型	207	8.1.4 锌基合金冲裁模的结构 与制模方法	291
7.2.1 冲裁模	208		
7.2.2 弯曲模	217		
7.2.3 拉深模	224		
7.2.4 复合模、级进模的多工序			

8.2 聚氨酯橡胶冲模.....	293	8.3.3 薄板凹模的制造.....	300
8.2.1 聚氨酯橡胶性能及应用.....	293	8.3.4 卸料板、导料板及凹模垫板	
8.2.2 聚氨酯橡胶冲模的设计.....	294	的加工	301
8.3 薄板冲模	298	附录 A 课程实验与课程设计	302
8.3.1 薄板冲模的基本结构	298	参考文献	315
8.3.2 薄板冲模凸模			
的计算与制造	300		

第 1 章 综 论

1.1 冲压的定义

冲压是利用冲模在冲压设备上对板料施加压力(或拉力),使其产生分离或变形,从而获得一定形状、尺寸和性能的制件的加工方法。冲压加工的对象一般为金属板料(或带料)、薄壁管、薄型材等,板厚方向的变形一般不侧重考虑,因此也称为板料冲压,且通常是在室温状态下进行(不用加热,显然处于再结晶温度以下),故也称为冷冲压。

锻造和冲压合称为锻压,锻造加工的对象一般为金属棒料(或锭料),必须考虑长、宽、高 3 个方向的变形,且通常是在再结晶温度以上进行,故常称为热锻。基于通常要施加一定的压力才能完成加工的共性,锻造、冲压与轧制、挤压、拉拔等总称为金属压力加工;金属压力加工迫使加工对象发生塑性变形,既改变了尺寸、形状,又改善了性能,故还称为塑性加工。轧制、拉拔、挤压等方法是将钢锭加工成棒料、板料、管材、型材、线材等制品,但通常不制成零件,称为一次塑性加工;锻压加工则是在一次塑性加工的基础上,将棒料、板料、管材、线材等制成具有特定用途的制件(或零件),可称为二次塑性加工。20 世纪后期又流行将塑性加工称为塑性成形。

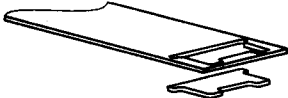
冲模、冲压设备和板料是构成冲压加工的 3 个基本要素。所谓冲模就是加压将金属或非金属板料或型材分离、成形或接合而得到制件的工艺装备。没有设计和制造水平很先进的冲模,先进的冲压工艺就无法实现。

1.2 冲压工序分类

为适应制件形状、尺寸、内外在质量、批量的不同,冲压工序的种类有很多。冲压工艺的基本工序可以分为分离工序与成形工序两大类。分离工序的共同目的是将坯料/工序件/半成品沿一定的轮廓相互分离;成形工序的共同目的是在材料不产生破坏的前提下使坯料/工序件/半成品发生塑性变形,成为所需制件。各工序简介见表 1.1 及表 1.2。

冲压生产除了基本工序外,还会涉及其他工序,如接合工序(如铆接等)、装配工序、修饰包装工序,等等,由于篇幅所限,本书不作展开。

表 1.1 冲压工艺中的分离工序

工序名称	示 意 图	说 明
落料		分离轮廓为封闭曲线,轮廓内为制件,轮廓外为废料,用于加工各种形状的平板型制件

续表

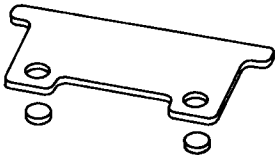
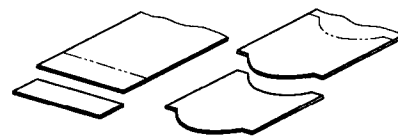
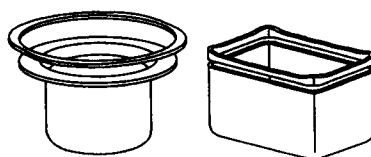
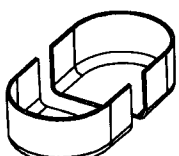
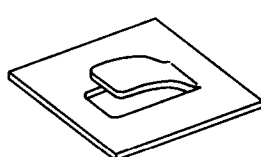
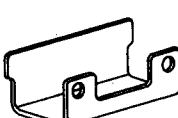
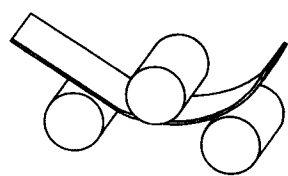
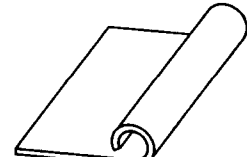
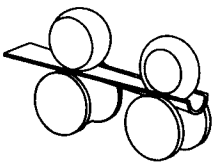
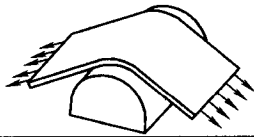
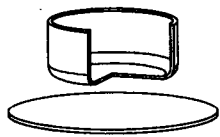
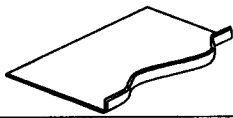
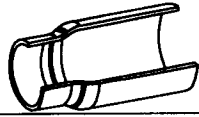
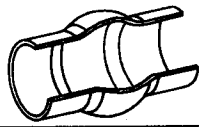
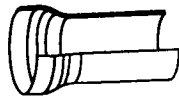
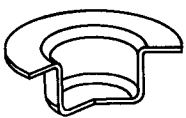
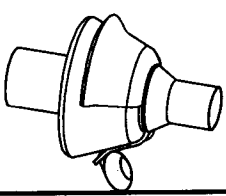
工序名称	示意图	说明
冲孔		分离轮廓为封闭曲线，轮廓内为废料，轮廓外为制件，用于在制件上加工各种形状的孔，落料与冲孔合称为冲裁
切断(剪切)		分离轮廓为不封闭曲/直线，用于将板料裁切成长条或加工成形状简单的平板型制件
修边(切边)		在工序件/半成品的曲/平面上沿内/外轮廓修切，以获得规则整齐的棱边、光洁的剪切面和较高的尺寸精度
剖切		将整体成形得到的工序件/半成品切开成数个制件，多用于不对称制件成组成形之后的分离
切口		将制件沿不封闭的轮廓部分地分离，并使部分板料产生弯曲变形

表 1.2 冲压工艺中的成形工序

工序名称	示意图	说明
弯曲(压弯)		将坯料/型材/工序件/半成品沿直线压弯成具有一定曲率和角度的制件
辊弯		沿直线用辊子(2~4个)实现板料的逐步弯曲变形，一般用卷板机完成
卷弯		把板料端部卷成接近封闭的圆筒状

续表

工序名称	示意图	说明
辊形 (纵向辊弯)		用多对成形辊, 沿纵向使带料逐渐弯曲变形
拉弯		在施加拉力的条件下实现弯曲变形
扭曲		将工序件/半成品的一部分相对于另一部分在某个面上扭转一定角度
拉深		变形区在一拉一压的应力作用下, 使板料/浅的空心坯成形为空心件/深的空心件, 而壁厚基本不变。用于将板料外缘全部/部分转移到制件侧壁, 使板料成形为皿状制件
翻边		沿封闭/不封闭的轮廓曲线将板料的平面/曲面边缘部分翻成竖直边缘
缩口		将空心/管状工序件或半成品的某个端部的径向尺寸减小
胀形		使板料/空心工序件/半成品的局部变薄, 从而使其表面积增大
扩口		将空心/管状工序件或半成品的某个端部的径向尺寸扩大
整形		对坯料/工序件/半成品的局部/整体施加法向接触压力, 以提高制件尺寸精度/获得清晰的过渡形状
旋压		在坯料旋转的同时, 用一定形状的轱轮施加压力使坯料的局部变形逐步扩展到整体, 达到使坯料全部成形的目的。多用于回转体制件的成形

1.3 冲压工艺的特点及其应用

从技术先进性方面看, 冲压工艺可以得到形状复杂、用其他加工方法难以加工的制件(如薄壳类件), 且能够把强度好、刚度大、重量轻等相互矛盾的特点融为一体(如液压胀形制造的皮带轮)。制件的精度由模具保证, 互换性好, 品质稳定。

从经济合理性方面看, 通过合理设计、优化排样, 冲压工艺可以获得很高的材料利用率; 既不像切削加工那样在把金属切成碎屑时消耗大量的能量, 也不像锻造那样需耗能对坯料加热; 冲压加工操作比较简单, 从而对操作工要求低, 有条件时易实现自动化。一般的冲压工艺, 生产效率为几件/分至几十件/分, 自动化生产可达千件/分以上。

冲压工艺存在的不足之处有, 对于批量较小的制件, 模具费用使得成本明显增高, 所以一般要有经济批量; 同时, 模具需要一个生产准备周期。冲压工艺尤其是冲裁存在颇为恼人的噪音和振动, 劳动保护措施不到位时, 还存在安全隐患。

总体上看, 冲压是一种制件质量较好、生产效率高、成本低, 其他加工方法无法替代的加工工艺, 在机械、车辆、电机、电器、仪器仪表、农机、轻工、日用品、航空航天、电子、通信、船舶、铁道、兵器等制造业中获得了十分广泛的应用, 表 1.3 为部分产品中冲压加工零件所占比例。图 1.1 所示为轿车车身部分冲压制件。

表 1.3 各类产品中冲压加工零件所占比例

产品	汽车	仪器仪表	电子	电机电器	家用电器	自行车、手表
比例/%	60~70	60~70	>85	70~80	≤90	>80

“冲压工艺与模具设计”是一门从事现代制造工程应该掌握的重要课程, 学习本课程应注重理论与实践相结合, 侧重培养工程实践能力。

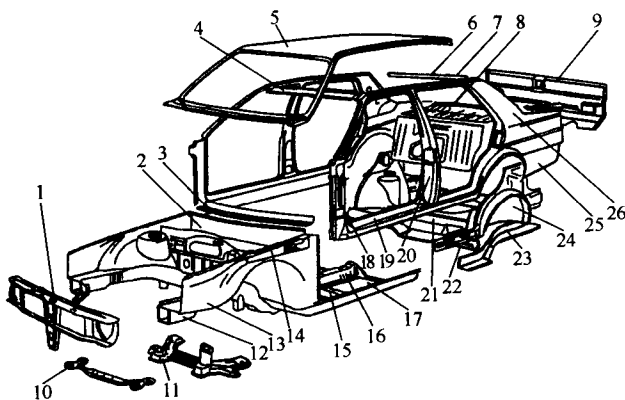


图 1.1 轿车车身

- 1—散热器框架; 2—前围板; 3—前风窗下横梁; 4—前风窗上横梁; 5—顶盖; 6—后风窗上横梁;
7—上边梁; 8—后风窗下横梁; 9—后围板; 10—前横梁; 11—副车架; 12—前纵梁; 13—挡泥板;
14—挡泥板加强撑; 15—前座椅横梁; 16—地板通道; 17—前地板; 18—前立柱; 19—门槛;
20—中立柱; 21—后地板; 22—地板后横梁; 23—后纵梁; 24—后轮罩; 25—后翼子板; 26—后立柱

1.4 冲压变形的理论基础

1.4.1 金属塑性变形的概念

在外力作用下, 固体材料发生形状和尺寸变化的现象称为变形, 使物体产生变形的力称为变形力。变形力去除后, 能恢复原状的变形称为弹性变形; 变形力去除后, 不能恢复原状的变形称为塑性变形。金属材料在变形力的作用下, 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。从微观结构上看, 弹性变形阶段, 金属体受力较小, 金属体内部原子的间距有微小的改变, 从而引起了尺寸和形状的变化, 变形力去除后, 原子回到原来的稳定平衡位置, 该金属体就完全恢复了原来的形状和尺寸。当金属体受力较大, 迫使原子偏离原来的稳定平衡位置, 而达到邻近的稳定平衡位置, 变形力去除后, 原子就不再回到其原来位置, 而是停留在邻近的稳定平衡位置上, 因而变形就成为不可恢复的永久变形, 这就是金属的塑性变形。

金属学研究成果表明, 所有的固态金属都是晶体, 各种固态金属的晶体结构并不完全相同。工业应用的金属中, 除少数具有复杂的晶体结构外, 最常见的金属晶体结构有面心立方结构、体心立方结构和密排六方结构。

晶体中由原子组成的平面称为晶面, 由原子组成的直线称为晶向, 每种晶格不同晶面上的原子密度和不同晶向的原子间距是不同的。

单晶体的塑性变形主要通过滑移和孪生两种方式进行, 最常见的方式为滑移, 即晶体一部分沿一定的晶面和晶向相对于另一部分产生滑移, 这一晶面和晶向称为滑移面和滑移方向。一般来说, 滑移面总是原子排列最密的面, 滑移方向总是原子排列最密的方向。因为沿着原子分布最密的面和方向, 滑移阻力最小。一种滑移面及其面上的一个滑移方向组成一个滑移系。每一个滑移系表示晶体在产生滑移时可能采取的空间位向。当其他条件相同时, 金属晶体的滑移系愈多, 则滑移时可能出现的滑移位向愈多, 塑性就愈好。一般说来, 面心立方和体心立方金属的滑移系较多, 因此比密排六方金属的塑性好。

就理想的晶体结构而言, 全部原子都是规则地排列在晶体的格点上, 然而实际晶体总是存在着各种缺陷, 引起晶格的畸变以及原子排列的不规则, 最明显的是多晶体。这些缺陷包括位错、晶界、空位、间隙原子和异质原子等。研究表明, 有些缺陷对金属塑性变形有很大的影响, 如晶体的滑移变形就是在剪应力的作用下通过滑移面上的位错运动进行的。一个位错移到晶体表面形成一个原子间距的滑移量。同一个滑移面上许多位错移到晶体表面便形成明显的滑移线。许多滑移线在一起形成滑移带。这种滑移带常可在拉伸变形后的金属试样上观察到。

工业上用于塑性成形的金属都是多晶体, 组成多晶体的各晶粒类似于单晶体, 它们的大小、形状、位向不同, 晶粒之间又有晶界相连, 因而多晶体的变形比单晶体要复杂得多。

多晶体的变形, 就其中每个晶粒的变形来讲, 不外乎滑移和孪生两种晶内变形方式。但就总体而言, 多晶体内还存在着晶粒之间的相对滑动和转动。这种晶粒之间的变形称为晶间变形, 所以多晶体的变形是晶内变形和晶间变形综合作用的结果。

由于晶粒是靠原子间的吸引力和晶粒间的机械连锁力互相联结的,因此,晶间变形比较困难。晶粒间的滑动即使非常微小,也容易引起晶界处的结构破损,从而导致金属的断裂。晶粒间的转动过程相当复杂,这是由于多晶体中不同位向的各个晶粒既有向有利于晶内滑移的方向转动的趋势,又受到相互牵制的缘故。晶粒转动的现象在粗晶粒的板料冲压成形后可以观察到,这就是冲压件表面显出凹凸不平的所谓“桔皮”现象。

多晶体的塑性变形还受到晶界的影响。晶界内晶格畸变更甚,晶界的存在使多晶体的强度、硬度比单晶体高。多晶体内晶粒愈细,晶界区所占比率也就愈大,金属的强度、硬度也就愈高。此外,晶粒愈细,变形愈易分散在许多晶粒内进行,因此变形更为均匀,不易造成应力集中而导致金属破坏,这就是一般的细晶粒金属不仅强度、硬度高,而且塑性也较好的原因。

在金属塑性变形过程中,金属的性能和组织都可能发生变化。其中最重要的是加工硬化,随着变形程度的增加,变形阻力增大,强度和硬度升高,而塑性、韧性下降。同时,由于变形不均匀,晶粒内部和晶粒之间会存在不同的内应力。变形后作为残余应力,保留在金属内部,致使经冷变形后的零件在放置一段时间后,可能自动发生变形甚至开裂。金属塑性变形后的性能变化是其组织发生变化的结果。多晶体变形时各晶粒沿其变形最大的方向伸长,在变形程度很大时,则显著伸长,使得晶界过剩相沿主变形方向呈条状分布,形成热处理也改变不了的纤维组织。晶内变形会使晶粒破碎,形成许多小晶粒,即亚晶粒。晶间变形则在晶界造成许多破坏。另外,在变形程度很大时,多晶体内各个晶粒的位向会因滑移面的转向而逐渐趋向一致,形成变形织构。由于变形织构的形成,使轧制后的板料出现各向异性,即使退火,一般也难以消除。用这种材料经冲压变形得到的制件厚薄不均,口沿不齐,典型表现是在拉深成形的筒形制件口部形成凸耳(参见图 1.18)。由此可见,金属塑性变形过程中的这些变化对冲压成形工艺有相当大的影响。

1.4.2 影响塑性及变形抗力的主要因素

1.4.2.1 塑性与变形抗力的概念

1. 塑性

所谓塑性,是指金属材料在外力作用下产生永久变形而其完整性不被破坏的能力。塑性可用材料在不被破坏条件下能获得的塑性变形的最大值来评定。同一种材料,在不同的变形条件下,其塑性是不一样的。

影响金属塑性的因素包括两个方面:金属本身的晶格类型、化学成分和金相组织等;变形时的外部条件,如变形温度、变形速度以及变形方式等。

2. 变形抗力

变形抗力一般来说反映了金属在外力作用下抵抗塑性变形的能力(参见 1.4.3 节)。

影响变形抗力的因素,也包括金属的内部性质和变形条件(即变形温度、变形速度和变形程度)两个方面。

塑性和变形抗力是两个不同的概念。通常说某种材料的塑性好坏是指受力以后临近破坏时的变形程度的大小,而不是指变形抗力的大小。如奥氏体不锈钢允许的变形程度大,

称为塑性好，但其变形抗力也大，需要较大的外力才能产生塑性变形。由此可见，变形抗力是从力的角度反映塑性变形的难易程度。

1.4.2.2 成分与组织对金属塑性变形的影响

成分与组织对金属塑性变形的影响很大，下面以钢为例来说明。

1. 化学成分的影响

在碳钢中，Fe 和 C 是基本元素。在合金钢中，除了 Fe 和 C 以外，还包含有 Si、Mn、Cr、Ni、W 等合金元素。此外，在各类钢中还含有一些杂质，如 P、S、N、H、O 等。

(1) 碳钢中 C 和杂质元素的影响

C 对碳钢的性能影响最大。C 能固溶于 Fe，形成铁素体和奥氏体固溶体，它们都具有良好的塑性。当 C 的含量超过 Fe 的溶 C 能力时，多余的 C 便与 Fe 形成硬而脆的渗碳体，从而使碳钢的塑性降低，变形抗力提高。含 C 量愈高，碳钢的塑性愈差。宜于拉深成形的低碳钢一般含 C 量为 0.05%~0.15%。

杂质元素对钢的塑性变形一般都有不利影响，如 P 溶入铁素体后，使钢的强度、硬度显著提高，塑性、韧性显著降低，在低温时，造成钢的冷脆性。又如 S 在钢中几乎不溶解，而与铁形成脆性的硫化铁，使钢的塑性降低。热加工时，钢的热脆现象也是由 S 引起的。因此，应对冷冲压材料的杂质含量加以控制。如对于深拉深冷轧薄钢板就应按国家标准 (GB 710) 加以控制，S 的含量不超过 0.040%，P 的含量控制更严。

(2) 合金元素对钢的塑性变形的影响

合金元素加入钢中，不仅改变钢的使用性能，而且改变钢的塑性成形性能。主要表现为：塑性降低，变形抗力提高。这是由于合金元素与钢中的 C 形成硬而脆的碳化物，使钢的强度提高，塑性降低。另外，很多元素溶入固溶体(铁素体和奥氏体)中，致使 Fe 原子的晶格发生不同程度的畸变，从而使钢的变形抗力提高，塑性降低。

表 1.4 列出了几种主要元素对 08 钢冲压性能的影响。

表 1.4 几种主要元素对 08 钢冲压性能的影响

元素	对冲压性能的影响
C	增加 Fe_3C 的数量，提高钢板的抗拉强度和屈服强度，降低塑性，使冲压性能恶化，特别是当 Fe_3C 出现于晶界时，对冲压性能的不利影响更大
Si	溶于铁素体中，强化作用很大，增加强度，降低塑性。含量愈低愈好，深拉深钢板不能用 Si 脱氧
Mn	直接影响不大，和 S 形成 MnS 夹杂物，其数量和形态对冲压性能有影响
P	显著地增加强度和脆性，并有偏析倾向，易于形成带状组织，对冲压性能不利
S	硫化物数量、形态和分布对冲压性能有很大影响，数量多、呈细长条状分布的硫化物对冲压不利
Al	是镇静钢的最终脱氧剂，可与 N 形成氮化铝(AlN)，显著降低钢板的“应变时效”倾向，容易得到“饼形”铁素体晶粒，改善冲压性能。钢中 Al 的最佳含量为 0.03%~0.05%

注：沸腾钢板平整后存放一段时间，拉伸曲线上会重新出现屈服伸长的现象称为应变时效。

2. 组织的影响

金属材料的组织状态和其化学成分有密切关系,但这不是完全由化学成分所决定,它还和制造工艺(如冶炼、浇铸、锻轧、热处理)有关。由于以上原因,金属材料的组织很不相同,除了基体金属的晶体结构存在不同以外,还有晶粒的大小以及单相组织和多相组织的差别等。这些组织上的差异对材料的塑性和变形抗力的影响也不能忽视。

如前所述,基体为面心立方晶格(Al、Cu、 γ -Fe、Ni)塑性最好;体心立方晶格(α -Fe、Cr、W、Mo)塑性次之;密排六方晶格(Mg、Zn、Cd、 α -Ti)塑性较差。

另外,晶粒的细化有利于提高金属的塑性,但也使其变形抗力提高。从冲压成形角度来看,晶粒度过小和过大都不利,等轴的或饼状的6级晶粒度比较理想。

单相组织要比多相组织塑性好,变形抗力小。这是由于合金为多相组织时,各相性能往往存在很大差别,使变形不均匀,塑性降低。若硬而脆的第二相呈网状分布于塑性相的晶界上,则整体塑性大大下降。若硬而脆的第二相呈弥散质点均匀分布于基体相晶粒内,则阻碍晶内滑移变形,显著提高变形能力。

1.4.2.3 变形温度对金属塑性变形的影响

变形温度对金属的塑性变形有很大影响。就大多数金属而言,其总的趋势是:随着温度的升高,塑性增加,变形抗力降低。其主要原因如下。

(1) 随着温度的升高,发生了回复与再结晶。回复使变形金属得到一定程度的软化,再结晶则完全消除了加工硬化效应,使金属的塑性显著提高,变形抗力显著降低。

(2) 温度升高,临界剪应力降低,滑移系增加。由于温度升高,原子的热运动加强,原子间的结合力变弱,使临界剪应力降低。同时,在高温时还可能出现新的滑移系。多晶体滑移系的增加,大大提高了金属的塑性。

(3) 新的塑性变形方式——热塑性的产生。温度升高时,原子的热运动加剧,晶格中的原子处于一种不稳定的状态。此时,若晶体受到外力的作用,原子就会沿着应力梯度方向,由一个平衡位置转移到另一个平衡位置(并不是沿着一定的晶面和晶向),使金属产生塑性变形,这种塑性变形方式称为热塑性。热塑性不同于滑移和孪生,它是金属在高温下塑性变形时新增加的一种变形方式,因而降低了变形抗力,增加了塑性。温度愈高,热塑性愈大。但温度低于回复温度时,热塑性的作用不显著。

(4) 温度升高导致晶界的切变抗力显著降低,晶界易于滑动;又由于扩散作用的加强,及时消除了晶界滑动所引起的微裂纹。这一切使得金属在高温下具有良好的塑性和低的变形抗力。

在板料成形中,必要时可对板料加热,增加变形程度,降低变形抗力,提高制件的成形准确度。但往往对制件表面造成不利影响。

值得指出的是,金属加热软化的趋势并不是绝对的。在加热过程的某些温度区间,往往由于过剩相的析出或相变等原因出现脆性区,使金属的塑性降低和变形抗力增加。如碳钢加热到200~400℃之间时,因为时效作用(夹杂物以沉淀的形式在晶界滑移面上析出)使塑性降低,变形抗力增加,这个温度范围称为蓝脆区。这时钢的性能变坏,易于脆断,断口呈蓝色。在800~950℃范围内,又会出现热脆,使塑性降低。因此,选择变形温度时,碳钢应避免蓝脆区和热脆区。