

21 世纪高职高专
机械设计制造类
专业教材

(第 2 版)
冷冲模具设计

李双义 主编

清华大学出版社

内 容 简 介

本书第1版是根据2000年“全国高职、高专机电类专业教学改革与教材建设研讨会”的精神,为满足高等职业教育的需要而编写的。此次修订在原书的基础上吸纳了国内外近年来冲压加工和模具领域的部分新内容;完善和增加了部分章节的内容;删除、精简和整合了相关章节的内容;对某些经常应用的图表,深入浅出地阐述了其求证过程,力求做到不仅知其然,还要知其所以然。

全书共分为10章:绪论、冲压变形基础、冲裁、弯曲、拉深、成形、冲压模具、冲模零件设计、汽车覆盖件成形及模具、冲模CAD简介等。书中列举了大量实例,并附有习题。

本书除可作为高职、高专机械设计制造类专业教材之外,也可作为该行业工程技术人员自学的参考资料。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

冷冲模具设计/李双义主编. —2版. —北京:清华大学出版社,2008.4

(21世纪高职高专机械设计制造类专业教材)

ISBN 978-7-302-16485-2

I. 冷… II. 李… III. 冲模—设计—高等学校:技术学校—教材 IV. TG385.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第179516号

责任编辑:庄红权

责任校对:王淑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:18

字 数:410千字

版 次:2008年4月第2版

印 次:2008年4月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:025725-01

第二版前言

冷冲压在机械制造、电子电器及日常生活中占有十分重要的地位。为了获得良好的冲压制品,必须考察工件的工艺性,进行工艺计算及制定工艺路线,最后设计出合理的模具。

本书是根据 2000 年“全国高职、高专机电类专业教学改革与教材建设研讨会”的精神,为满足高等职业教育的需要而编写的,它是高职、高专“模具设计与制造”专业教学的基本内容。自第 1 版出版 5 年多以来,已陆续印刷 12500 册,表明本书尚能符合市场需求。

本书以社会需求为目标,以技术应用为主线。基础部分以应用为目的,以够用为度;工艺部分尽可能简明扼要,加强模具设计的内容。内容上力求具有针对性、应用性;叙述方法上力求通俗易懂、深入浅出,并增加了图示和典型实例的比重;部分章后面附有思考题和习题。

本书主要介绍各种冲压工艺的工艺性、工艺计算、工艺制定、各类模具的结构及其特点,以及各种冲模零件的设计要点。

本书与《冲压工艺学》的不同点是,除了介绍几大冲压工艺的工艺性和工艺计算方法外,按照模具的类型,以大量的实例和插图介绍了模具的结构及其特点;按照模具零件的功能类型,介绍了冲模零件的形式及设计要点;对汽车覆盖件成形的工艺特点、模具结构及设计做了单独介绍,并对冲模 CAD 进行了概述;书后附录中列出了常用压力机的规格和冲压件及模具的常用材料。

修订的主要内容如下:吸纳了国内外近年来冲压加工和模具领域的部分新内容;为了学科的完整性,完善和增加了部分章节的内容;为避免重复,删除、精简和整合了相关章节的内容;对某些经常应用的图表,深入浅出地阐述了其求证过程,力求做到不仅知其然,还要知其所以然。此外,对每一段叙述,每一张插图,都进行了认真地推敲、校对,力求做到准确无误;对于部分章节,在原有思考题和习题的基础上,又进行了充实。

本书由天津大学李双义教授主编。参加本书修订的有:李双义教授(第 1 章、第 2 章、第 5 章和附录),陕西工业职业技术学院焦小明副教授(第 3 章、第 4 章),天津市南开区职工大学虞自奋副教授(第 6 章、第 8 章),天津理工大学崔宏祥教授(第 7 章),北华大学刘瑞军老师(第 9 章),浙江工贸职业技术学院郑道友老师(第 10 章)。修订本书的分工,原则上与初版的编写分工一致。变动的是,第 5 章的初版原由天津大学张连洪教授编写,第

6、8 两章的初版原由天津理工大学毕大森教授编写,第 9、10 两章的初版原由浙江工贸职业技术学院丁素珍高级工程师编写的,在此对初版编者表示感谢。

由于编者水平所限,本书不足之处在所难免,敬请读者不吝指正。

编 者

2008 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 冲压变形基础	6
2.1 冲压应力应变状态	6
2.2 冲压成形力学特点的分类	10
2.3 板料机械性能指标及其对冲压性能的影响	12
2.4 冲压成形性能的试验方法及指标	15
2.5 冲压用板料和新材料	18
思考题和习题	21
第 3 章 冲裁	22
3.1 冲裁变形过程	22
3.2 冲裁间隙	26
3.3 凸凹模尺寸	32
3.4 冲裁力、冲裁功及冲裁压力中心的确定	35
3.5 卸料力、推件力及顶件力的计算	39
3.6 冲裁件的工艺性	41
3.7 排样与搭边	44
3.8 整修	46
思考题和习题	49
第 4 章 弯曲	51
4.1 弯曲变形	51
4.2 弯曲件展开长度的计算	54
4.3 最小弯曲半径	55
4.4 弯曲力	59
4.5 弯曲模工作部分的尺寸参数	61
4.6 回弹	64
4.7 弯曲件的工艺性	74
思考题和习题	79

第5章 拉深	81
5.1 拉深变形特点	81
5.2 拉深起皱与压料	86
5.3 筒形件拉深模工作部分的结构与尺寸	89
5.4 拉深件毛坯尺寸的计算	94
5.5 拉深力和拉深功	96
5.6 带法兰(有凸缘)圆筒形件的拉深	98
5.7 阶梯件的拉深	102
5.8 盒形件的拉深	103
5.9 其他非回转体直壁零件的拉深	112
5.10 拉深实例	114
5.11 辅助工序	118
思考题和习题	119
第6章 成形	121
6.1 起伏成形	121
6.2 翻边与翻孔	125
6.3 胀形	132
6.4 缩口	134
6.5 校平与整形	137
6.6 旋压	138
思考题和习题	140
第7章 冲压模具	141
7.1 设计程序	141
7.2 分类	142
7.3 单工序模具	143
7.4 复合模具	161
7.5 连续模具	167
7.6 冲模与冲压设备安装的尺寸关系	173
思考题和习题	173
第8章 冲模零件设计	175
8.1 凸模	175
8.2 凹模	178
8.3 卸料板	183
8.4 导板	190
8.5 压料装置	192
8.6 导料装置	194
8.7 顶料装置	196

8.8 挡料和导正装置	198
8.9 定位装置	204
8.10 出件装置	205
思考题和习题	209
第 9 章 汽车覆盖件成形及模具	210
9.1 汽车覆盖件	210
9.2 覆盖件冲压工艺	212
9.3 拉延件设计	218
9.4 拉延模设计	224
9.5 侧向冲压成形模具的运动及受力分析	235
9.6 修边模设计	242
9.7 翻边模设计	248
第 10 章 冲模 CAD 简介	253
10.1 冲模 CAD 概述	253
10.2 冲模 CAD 系统的构成	254
10.3 现代冲模 CAD 技术	260
10.4 冲模 CAD 软件开发平台简介	265
附录 A 常用压力机规格	268
附录 B 冲压件及模具常用材料	272
参考文献	278

第 1 章 绪 论

模具是机械、汽车、电子、通信、家电等工业产品的基础工艺装备,属于高新技术产品。作为基础工业,模具的质量、精度、寿命对其他工业的发展起着十分重要的作用,在国际上称为“工业之母”。近 10 年来,随着国民经济的快速发展,作为工业品基础的模具工业,也得到了蓬勃发展,已成为国民经济建设中的重要产业。

模具可以划分为以下 3 大类:金属材料成形用模具,包括冷冲压模具、热锻模具、铸造模具、粉末冶金模具、拉丝模具等;有机(高分子)材料成形用模具,包括塑料模具、橡胶模具、食品模具和皮革模具等;无机非金属材料成形用模具,包括陶瓷模具、水泥(混凝土)和玻璃模具等。其中,冷冲压模具历史悠久、用途广、技术成熟,在各种模具中所占比重最多。汽车、摩托车、家电行业是模具最大的市场,占整个模具市场的 60% 以上。例如,一种车型的轿车共需模具约 4000 套,价值达 2 亿~3 亿元;单台电冰箱需要模具生产的零件约 150 个,共需模具约 350 套,价值约 400 万元;单台彩电大约有 150 个零件需用模具生产,共需模具约 140 套,价值达 700 万元。其中所用模具大部分为冷冲压模具。

冷冲压是先进的金属加工方法之一,它主要加工板料,故又称为板料冲压。冷冲压是在室温下,借助于设备提供的压力,利用模具,使板料金属发生塑性变形。因此,它也是金属塑性加工(压力加工)的一种方法。有些非金属材料,也可以采用某些冲压工艺制造零件。

与切削加工相比,冷冲压靠模具和设备完成加工过程,所以具有生产率高、加工成本低、材料利用率高、产品一致性好、操作简单、便于实现机械化与自动化等一系列优点。一台普通冲压设备每分钟可生产零件几十件,而高速冲床的生产率可达每分钟数百件甚至上千件,而且,每一次冲压行程有可能得到一个冲压件。因此,大批量生产的机械、电子、轻工等产品,都大量使用冷冲压零件。在国防方面,飞机、导弹、各种枪支与炮弹等产品中,冷冲压加工的零件比例也是相当大的。随着汽车和家用电器等行业的飞速发展,在工业发达的国家,对发展冷冲压生产给予了高度重视。据近年来的统计,美、日等国的模具工业年产值已经超过机床工业年产值的 6%~12%。

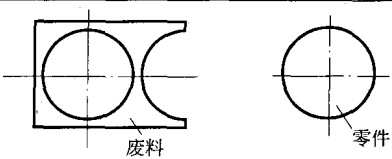
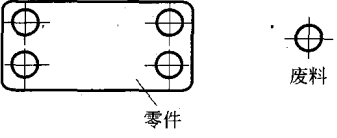
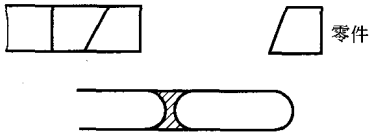
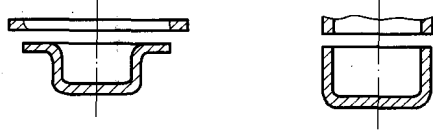
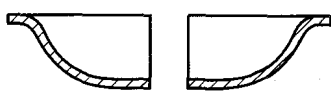
由于冷冲压不需要加热,也不像切削加工那样,将大量金属切成碎屑而消耗大量能量,所以它是一种节能的加工方法。冲压制品所用的原材料是冶金厂大量生产的廉价的钢板和钢带,在冲压加工中材料表面质量不受破坏,故冲压件的表面质量好,这是任何其他加工方法所不能竞争的。

冲压模具,简称冲模,它作为制造产品(或半成品)的一种工具,其作用是完成某种工艺。模具设计必须满足工艺要求,最终满足产品的形状、尺寸和精度的要求。因此,冲压模具的设计师必须掌握冲压工艺,包括冲压工艺的分类、各种工艺计算、工艺制定等基本知识,而后才可以选择模具的类型,进行模具设计,使模具的类型、结构及尺寸等满足工艺及产品的要求。

冷冲压工艺大致分为两大类:分离工序和成形工序。分离工序的目的是在冲压过程

中将冲压件与板料按一定的轮廓线进行分离;分离工序又可分为落料、冲孔和剪切等,如表 1-1 所示。成形工序的目的是使冲压毛坯在不破坏其完整性的条件下产生塑性变形,并转化成产品所要求的形状;成形工序又可分为弯曲、拉深、翻边、翻孔、胀形、扩孔、缩孔和旋压等,如表 1-2 所示。

表 1-1 分离工序

工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
落 料		用冲模沿封闭轮廓曲线冲切,冲下部分是零件,用于制造各种形状的平板零件
冲 孔		用冲模按封闭轮廓曲线冲切,冲下部分是废料
切 断		用剪刀或冲模沿不封闭曲线切断,多用于加工形状简单的平板零件
切 边		将成形零件的边缘修切整齐或切成一定形状
剖 切		把冲压加工成的半成品切开成为两个或数个零件,多用于不对称零件的成双或成组冲压成形之后

冷冲压模具是冲压生产的主要工艺装备。冲压件的表面质量、尺寸精度、生产率以及经济效益等,与模具结构及设计是否合理关系极大。因此,了解模具结构,研究提高模具的各项技术指标,对于模具设计和冲压技术的发展是十分必要的。

冲模的结构形式很多,可以根据以下特征进行分类:

(1) 按冲模的工序性质,分为落料模、冲孔模、切边模、弯曲模、拉深模、成形模和翻边模等。

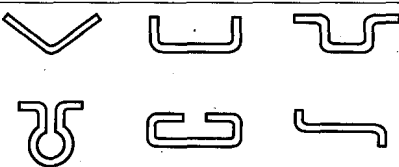
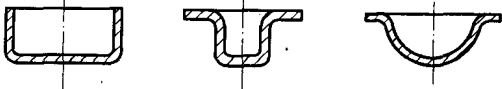
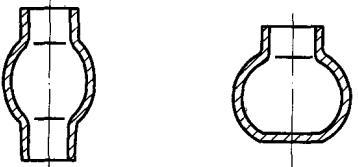
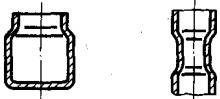
(2) 按冲模工序的组合方式,分为单工序模、复合模和连续模等。

(3) 根据模具的结构形式,按上、下模的导向方式,分为无导向模和导柱模、导板模等;按卸料装置,分为带固定卸料板冲模和弹性卸料板冲模;按挡料形式,分为固定挡料钉冲模、活动挡料销冲模、导正销冲模和侧刃定距冲模等。

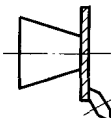
(4) 按采用凸、凹模的材料,分为硬质合金模、钢质硬质合金模、钢皮冲模、橡皮冲模和聚氨酯冲模等。

此外,还可按模具轮廓尺寸的大小,分为大型冲模和中小型冲模;按行业特点,分为普通冲模和汽车、拖拉机覆盖件冲模等。

表 1-2 成形工序

工序名称	简 图	特点及应用范围
弯 曲		把板料沿直线弯成各种形状,可以加工形状极为复杂的零件
卷 圆		把板料端部卷成接近封闭的圆头,用以加工类似铰链的零件
扭 曲		把冲裁后的半成品扭转成一定角度
拉 深		把板料毛坯成形为各种空心的零件
变薄拉深		把拉深加工后的空心半成品进一步加工成为底部厚度大于侧壁厚度的零件
翻 孔		将预先冲孔的板料半成品或未经冲孔的板料冲制成竖立的边缘
翻 边		把板料半成品的边缘按曲线或圆弧成形为竖立的边缘
拉 弯		在拉力与弯矩共同作用下实现弯曲变形,可得精度较好的零件
胀 形		在双向拉应力作用下实现变形,成形各种空间曲面形状的零件
起 伏		在板料毛坯或零件的表面上用局部成形的方法制成各种形状的突起与凹陷
扩 口		在空心毛坯或管状毛坯的某个部位上使其径向尺寸扩大
缩 口		在空心毛坯或管状毛坯的某个部位上使其径向尺寸减小

续表

工序名称	简 图	特点及应用范围
旋 压		在旋转状态下用辊轮使毛坯逐步成形
校 形		校正零件形状,以提高已成形零件的尺寸精度或获得小的圆角半径

随着科学技术的不断进步和工业生产的迅猛发展,冷冲压技术及模具不断革新和发展,主要反映在以下几个方面。

1. 冷冲压生产的机械化、自动化、数控化、无人化和精密化

为了满足大批量生产的需要,冲压设备已由单工位的低速压力机发展到多工位的高速压力机;在高速压力机上采用多工位的级进模(连续模)进行冲压加工,使冲压生产达到高度自动化;汽车覆盖件可采用自动送料、自动取件、自动传送的流水线生产。数控冲床是按照事先编制好的加工程序,自动地对板料进行冲裁加工的设备。

2. 冲压生产中批量要求的两种趋势——大批量生产和多品种小批量生产

冲压生产中标志批量生产的近似值大致如表 1-3 所示。表中所给值是以一般薄板冲压件、工艺复杂程度中等、中等精度等级等为基础的。

表 1-3 冲压生产批量大小的近似数据

万件/年

冲压件尺寸/mm	试制	小批	中批	大批	大量(流水生产)
大型(250~1000)	<0.1	<1	1~5	5~50	>50
中型(50~250)	<0.5	<5	5~50	50~200	>200
小型(<50)	1	<10	10~100	100~1000	>1000

3. 冲压新材料的研制与开发

随着汽车工业的迅猛发展,为了适应汽车轻量化的需要,很多新型冲压用板料问世,其中有:高强度钢板、耐腐蚀钢板、双相钢板、涂层板以及复合材料板等。

4. 模具的计算机辅助设计和辅助制造技术

为了加快产品的更新换代,必须缩短工装的设计和制造周期,从而开展了模具的计算机辅助设计和辅助制造(模具 CAD/CAM)的研究。采用该技术,模具设计和制造效率一般可提高 2~3 倍,模具生产周期可缩短 $1/2 \sim 2/3$,现在已达到 CAD/CAM 一体化,模具图纸只是作为检验模具之用。

5. 工艺分析中的虚拟成形技术(冲压 CAE)

对普通冲压工艺的制定,可根据有关资料进行工艺计算;而对于复杂的曲面成形,例如汽车覆盖件的成形,传统方法是凭设计者的经验,进行对比分析,初步确定工艺方案和有关参数,然后设计试验模具并进行试冲,经反复试验和修改,才能转入正式投产,因此造

成周期长,投资大,风险大。近几年来,国内外已采用弹塑性、刚塑性有限元法,开发出覆盖件成形过程的模拟软件,以预测某一工艺方案对零件成形的可行性和可能发生的问题,供设计人员进行修改和选择。这不仅可以节省昂贵的模具试验费用,也可以大大缩短试制周期。

6. 快速模具制造技术的发展

将快速成形技术与各种常规的铸造、粉末烧结工艺相结合而发展起来的快速模具制造技术,其模具的制造周期仅为常规模具切削制造的 $1/5 \sim 1/3$,而成本仅为后者的 $1/4 \sim 1/2$,因此快速成形技术对模具制造的潜在影响是巨大的。快速模具制造技术具有制造周期短、成本低等优点,在精度和寿命方面又能满足生产上的使用要求,非常适合于新产品的开发、样品试制、工艺验证或中小批量生产的需要。

7. 其他成形制模方法

除了钢制模之外,低熔点合金模具、中熔点合金模具以及树脂模具都可用于冷冲压成形。低熔点合金的熔点一般只有 $70 \sim 150^{\circ}\text{C}$,熔化后流动性好,冷凝时体积膨胀。它具有制造周期短、成本低、制造工艺简单、模具材料可反复使用、便于存放等优点。中熔点合金主要指锌基合金,其熔点一般在 380°C 左右;它除了具备低熔点合金模具的优点之外,硬度比低熔点合金模具高,寿命和成本都优于低熔点合金模具。树脂模具主要用于制造汽车大型内外覆盖件的拉延模具,其特点是模具型面以 CAD/CAM 加工的主模型为基准,采用高强度树脂浇注而成,凸凹模间隙采用专用蜡片准确控制,模具尺寸精度高,制造周期可缩短 $1/2 \sim 2/3$ 。

冷冲压模具设计是一门实用性很强的课程。对初学者来说,在学习这门课之前,应对冲压生产实践有所了解,具有初步的感性知识,这样才能在学习中联系实际,对完成冲压工艺的工装部分——模具产生兴趣,进而了解模具的类型、结构,掌握模具的设计要点和设计方法。在从事工艺制定和模具设计时,仅依靠一两本教材提供的资料是不够的,还要参考有关的手册、图册及标准等。

第2章 冲压变形基础

2.1 冲压应力应变状态

2.1.1 应力状态

冲压变形是由冲压设备提供变形载荷,然后通过模具对毛坯施加外力,进而转化为毛坯的内力,使之产生塑性变形。因此,研究和分析金属的塑性变形过程,应首先了解毛坯内力作用和塑性变形之间的关系。

在一般情况下,变形毛坯内各质点的变形和受力状态是不相同的。通常将质点的受力状态称为点的应力状态。一点的应力状态可用一个平行六面体(单元体)来表示,见图 2-1(a),将各应力分量均表示在前 3 个可视面(即 x 面、 y 面、 z 面)上,而后 3 个不可视面(即 $-x$ 面、 $-y$ 面、 $-z$ 面)上的应力分量应与前 3 个面上对应的应力分量大小相等、方向相反,一般不予表示。每个面上有 1 个正应力、2 个剪应力,共 9 个应力分量,再考虑剪应力的互等性($\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$),则仅有 6 个独立的应力分量;正应力分量方向的含义是,箭头指向平行六面体之外,符号为正,为拉应力;反之,符号为负,为压应力。对同一点应力状态,6 个应力分量的大小与所选坐标有关,不同坐标系所表现的 6 个应力分量的数值是不同的。存在这样一个(仅有一个)坐标系,按该坐标系做平行六面体,则应力分量只有 3 个正应力分量,而无剪应力分量,那么称这 3 个正应力为主应力,称该坐标系为主应力坐标系,3 个坐标轴为主应力轴,见图 2-1(b)。

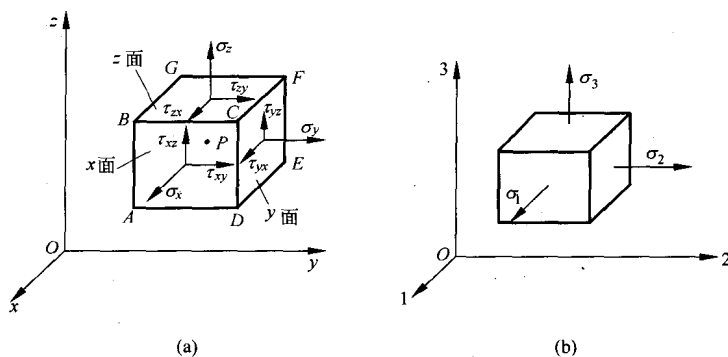


图 2-1 质点的应力状态

(a) 任意坐标系; (b) 主应力坐标系

如果用主应力坐标系表示质点的应力状态,即单元体上仅有正应力,而无剪应力。换言之,仅承受拉应力或压应力,则可将主应力状态分为如图 2-2 所示的 9 种类型。图中,第一行为单向应力状态:单向拉和单向压;第二行为两向应力状态,或称作平面应力状态:两向拉、两向压或一拉一压;第三行为三向应力状态,或称作复杂应力状态:三向拉、

三向压、一压两拉或一拉两压。对于板料冲压工艺,第二行应力状态居多。图中还表示出同号应力与异号应力的区分。

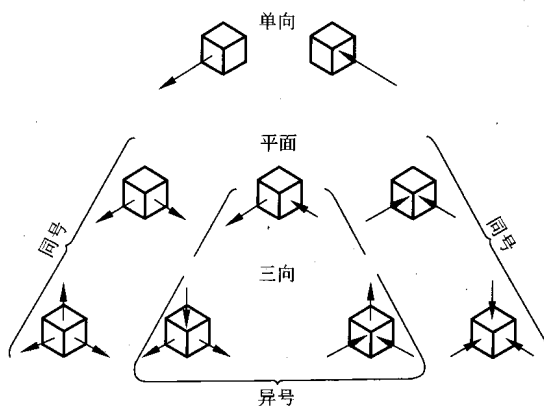


图 2-2 主应力状态图

2.1.2 应变状态

在一般情况下,变形毛坯内各质点的变形状态是不相同的。通常将质点的变形状态称为点的应变状态。一点的应变状态可用一个平行六面体来表示,每个面上有 1 个正应变、2 个剪应变,共 9 个应变分量,经迭加刚性转动可使剪应变互等($\gamma_{xy} = \gamma_{yx}, \gamma_{yz} = \gamma_{zy}, \gamma_{zx} = \gamma_{xz}$),则仅有 6 个独立的应变分量。正应变分量方向的含义是,箭头指向平行六面体之外,符号为正,则表示伸长;反之,符号为负,则为压缩(收缩)。而剪应变分量的作用是使平行六面体产生剪切(角)变形。对同一点的应变状态,6 个应变分量的大小与所选坐标有关,不同的坐标系所表现的 6 个应变分量数值不同。存在这样一个(仅有一个)坐标系,按该坐标系做平行六面体,则应变分量只有 3 个正应变分量,而无剪应变分量,那么称这 3 个正应变为主应变,称该坐标系为主应变坐标系,3 个坐标轴为主应变轴。

如果用主应变坐标系表示质点的应变状态,即单元体上仅有正应变,而无剪应变。换言之,仅承受拉伸或压缩,而无角变形。由于塑性变形中要满足体积不变条件,即 3 个正应变(当然,主应变也是正应变)之和为零,即 $\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0$,因此,绝对值最大的主应变值应等于另两个主应变绝对值之和,但符号相反。也就是说,绝对值最大的主应变,永远与另外两个主应变符号相反。故可将应变状态大致分为 3 类:一向伸长一向收缩、一向伸长两向收缩、一向收缩两向伸长,如图 2-3 所示。图中,最上面的应变状态是一个主应变为零,另两个绝对值相等,符号相反,称为平面应变状态;第二行左边的应变状态是一向伸长两向收缩,即拉伸类;第二行右边的应变状态是一向收缩两向伸长,即收缩类。第三行仅为第二行的特例,左边的应变状态是一向伸长和两向相等

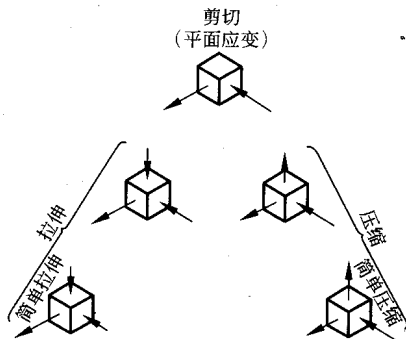


图 2-3 主应变状态图

的收缩,称之为简单拉伸;右边的应变状态是一向收缩和两向相等的伸长,称之为简单压缩。

2.1.3 屈服准则

材料由弹性变形过渡到塑性变形,取决于材料的力学性能和所受的应力状态。力学性能是决定材料进入塑性状态的內因,而应力状态则是使材料进入塑性状态的外部条件。对于同一种材料,在相同的变形条件下,可以认为进入塑性状态的条件只决定于所受的应力状态。判断应力状态是否能使材料达到塑性变形状态的判据,称为屈服准则。有两种同时在应用的屈服准则: Tresca 准则和 Mises 准则。

1. Tresca 准则

Tresca 准则可叙述为: 当材料内的最大剪应力达到某一定值时,材料便进入屈服状态(产生塑性变形)。如果将主应力规定为 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, 则可表达为 $\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = k$, k 为一常数。

由单向拉伸试验可知,单向拉伸的应力状态为 $\sigma_{\text{轴向}} = \sigma_1 \neq 0$; 当 $\sigma_1 = \sigma_s$ 时,材料进入塑性变形状态; 又 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 则 $\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - 0) = \frac{1}{2}\sigma_1 = k$, $\sigma_1 = 2k = \sigma_s$, 可见常数 $k = \frac{1}{2}\sigma_s$ 。因此, Tresca 准则可以表达为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s \quad (2-1)$$

对于板料冲压成形而言,多属于平面应力问题,即在板料厚度方向上 $\sigma_z = \sigma_x \approx 0$ 。另外在板平面内的两向正应力 $\sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} \neq 0$, 采用任意应力和主应力之间的关系,可导出平面应力状态 Tresca 准则的表达式:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = \sigma_s^2 \quad (2-2)$$

2. Mises 准则

Mises 准则可叙述为: 当材料内的等效应力达到某一定值时,材料便进入屈服状态(产生塑性变形)。如果用主应力表达,用 $\bar{\sigma}$ 表示等效应力,则 Mises 准则可表达为

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = c$$

由单向拉伸试验可知,单向拉伸的应力状态为 $\sigma_{\text{轴向}} = \sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 代入上式可得出 $\bar{\sigma} = \sigma_1 = c$ 。当 $\sigma_1 = \sigma_s$ 时,材料进入塑性状态,可见 $c = \sigma_s$, 故 Mises 准则表达为

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (2-3)$$

如果采用任意坐标表示应力状态,则可表达为

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2\sigma_s^2 \quad (2-4)$$

如上所述,由于板料冲压成形多为平面应力,如令 $\sigma_z = \sigma_x = \sigma_3 \approx 0$, 则式(2-3)可简化为

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_s^2 \quad (2-5)$$

为了简化易记,可将 Mises 准则表达式写为与 Tresca 准则表达式(2-1)相类似的形式:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_s \quad (2-6)$$

式中, $\beta = 1 \sim 1.155$, 具体数据视中间主应力 σ_2 大小而定。

对于板料成形而言,通常将 β 取折中值,故常用下式作为屈服准则:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 1.1\sigma_s \quad (2-7)$$

2.1.4 应力与应变关系

由上述的叙述可知,应力状态与应变状态具有相似性。对于小变形而言(不超过 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 数量级),两者的主坐标系是一致的。

对于应力与应变关系,我们不妨从方向和大小两方面进行叙述。首先讨论应力方向与应变方向之间的关系。

对剪应力和剪应变,可用图 2-4 来表示。图(a)的剪应力方向对应于图(b)的剪应变方向,这很容易理解。而对于正应力和正应变的方向,就不是这样简单了。正应力为正值(受拉)时,正应变未必是正值(未必伸长);正应力为负值(受压)时,正应变未必是负值(未必收缩);正应力为零时,正应变未必为零(可能有伸长或收缩)。

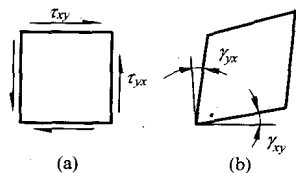


图 2-4 剪应力和剪应变的方向
(a) 剪应力方向; (b) 剪应变方向。

为说明正应力和正应变方向的对应关系;也为说明应力分量与应变分量数值大小之间的关系,需要了解小变形时的应力应变关系,它可叙述为:小变形时的应变分量正比于应力偏量。即

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1} = \frac{\epsilon_2}{\sigma_2} = \frac{\epsilon_3}{\sigma_3} = \lambda \quad (2-8)$$

式中, λ 为常数; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 为 3 个主应变值; $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ 为 3 个主应力偏量值。

主应力偏量定义为:

设 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为 3 个主应力值,则平均应力 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$,那么,3 个主应力偏量分别为 $\sigma'_1 = \sigma_1 - \sigma_m, \sigma'_2 = \sigma_2 - \sigma_m, \sigma'_3 = \sigma_3 - \sigma_m$ 。

由式(2-8),依照比例定律,又可导出以下公式:

$$\epsilon_1 : \epsilon_2 : \epsilon_3 = \sigma'_1 : \sigma'_2 : \sigma'_3 \quad (2-8a)$$

$$\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \lambda \quad (2-8b)$$

式(2-8), (2-8a), (2-8b)也适用于全量应变理论的应力应变关系。注意, $\sigma'_1 - \sigma'_2 = \sigma_1 - \sigma_2, \sigma'_2 - \sigma'_3 = \sigma_2 - \sigma_3, \sigma'_3 - \sigma'_1 = \sigma_3 - \sigma_1$ 。

2.1.5 引例

利用上述应力应变关系,可以很方便地研究冲压过程中毛坯内应力的作用特点及分布规律。

在筒形件拉深过程中,压料板对凸缘部位的毛坯有摩擦力和正压力,但与内应力相比,可略去不计,其应力状态如图 2-5 所示。图中的平行六面体采用圆柱坐标 (r, θ, z) 截取,属于一拉一压的应力状态(平面应力状态)。若 $\sigma_1 = \sigma_r = 80 \text{ MPa}, \sigma_3 = \sigma_\theta = -140 \text{ MPa}$, 而 $\sigma_2 = \sigma_z = 0$,依照上式, $\sigma_m = \frac{80+0-140}{3} = -20 \text{ MPa}$, 则 $\sigma'_1 = 80 - (-20) = 100 \text{ MPa}, \sigma'_2 = 0 - (-20) = 20 \text{ MPa}, \sigma'_3 = -140 - (-20) = -120 \text{ MPa}$, 依照(2-8a)式, $\epsilon_1 : \epsilon_2 : \epsilon_3 = \sigma'_1 : \sigma'_2 : \sigma'_3$

$=100:20:(-120)=10:2:(-12)=5:1:(-6)$ 。这里,虽然没有求出3个主应变值,但揭示了3个主应变值符号及相互之间的比例关系及变形状态。该点的应变属于两向伸长,一向收缩,即径向和厚度方向出现伸长变形,而切向出现收缩,将应变状态表示在图2-5的左上角。可以看出,厚度方向虽然无应力作用,但有伸长变形,即厚度增加了。由拉深凸缘部位的应力应变状态可以发现,绝对值最大的主应力如果是负值(压应力),如 $\sigma_3=-140\text{ MPa}$,则该方向的应变一定是负值(收缩变形),称之为压缩类变形;同理,绝对值最大的主应力如果是正值(拉应力),则该方向的应变一定是正值(伸长变形),称之为伸长类变形。因此,可由绝对值最大的主应力符号来判断其变形的类型,故拉深凸缘部位属于压缩类变形。

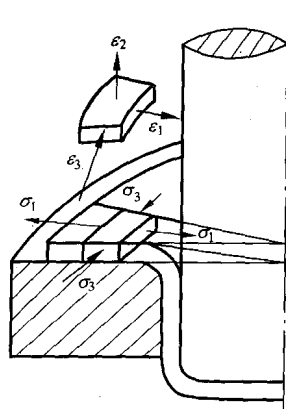


图2-5 拉深凸缘部位的应力应变状态

2.2 冲压成形力学特点的分类

有了应力、应变以及应力应变关系的概念之后,可以对板料冲压成形的各种工艺,从力学特点上进行分类,以便反映每个类型中成形工艺的共性,并在此基础上采用共同的观点和方法去分析、研究和处理成形工艺中遇见的各种问题。

关于对冲压工艺工序的分类,比较认同的是分为两大类:分离工序和成形工序,如表1-1和表1-2所示。研究的重点和难点在于成形类工序。由表1-2可知,成形类工序含有很多工序种类。如何从各自变形的力学特点进行归类呢?国内外先后提出了一些分类方法。

2.2.1 工件成形时的区域划分

为了更有利于理解对变形的力学特点进行分类,不妨先考虑对变形进行分区。

将板料冲压成形时正在进行变形的毛坯划分为变形区和非变形区两大部分。变形区是正在进行特定变形的部分。非变形区又包含几种情况:已经经历了变形的已变形区;尚未参与变形的待变形区;冲压全过程中都不参与变形的不变形区;在变形过程中仅起传递变形力作用的传力区。图2-6列出了拉深、翻边、缩口和弯曲4个基本工序变形过程中

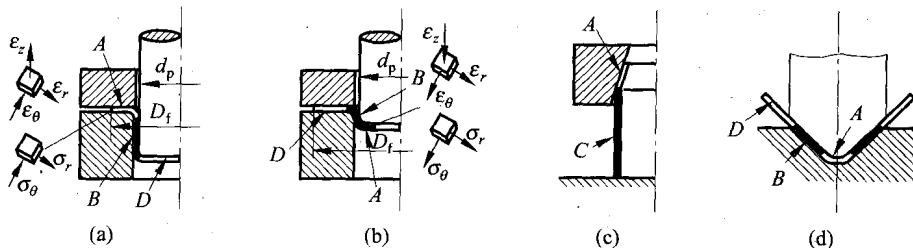


图2-6 毛坯各区划分举例
(a) 拉深; (b) 翻边; (c) 缩口; (d) 弯曲