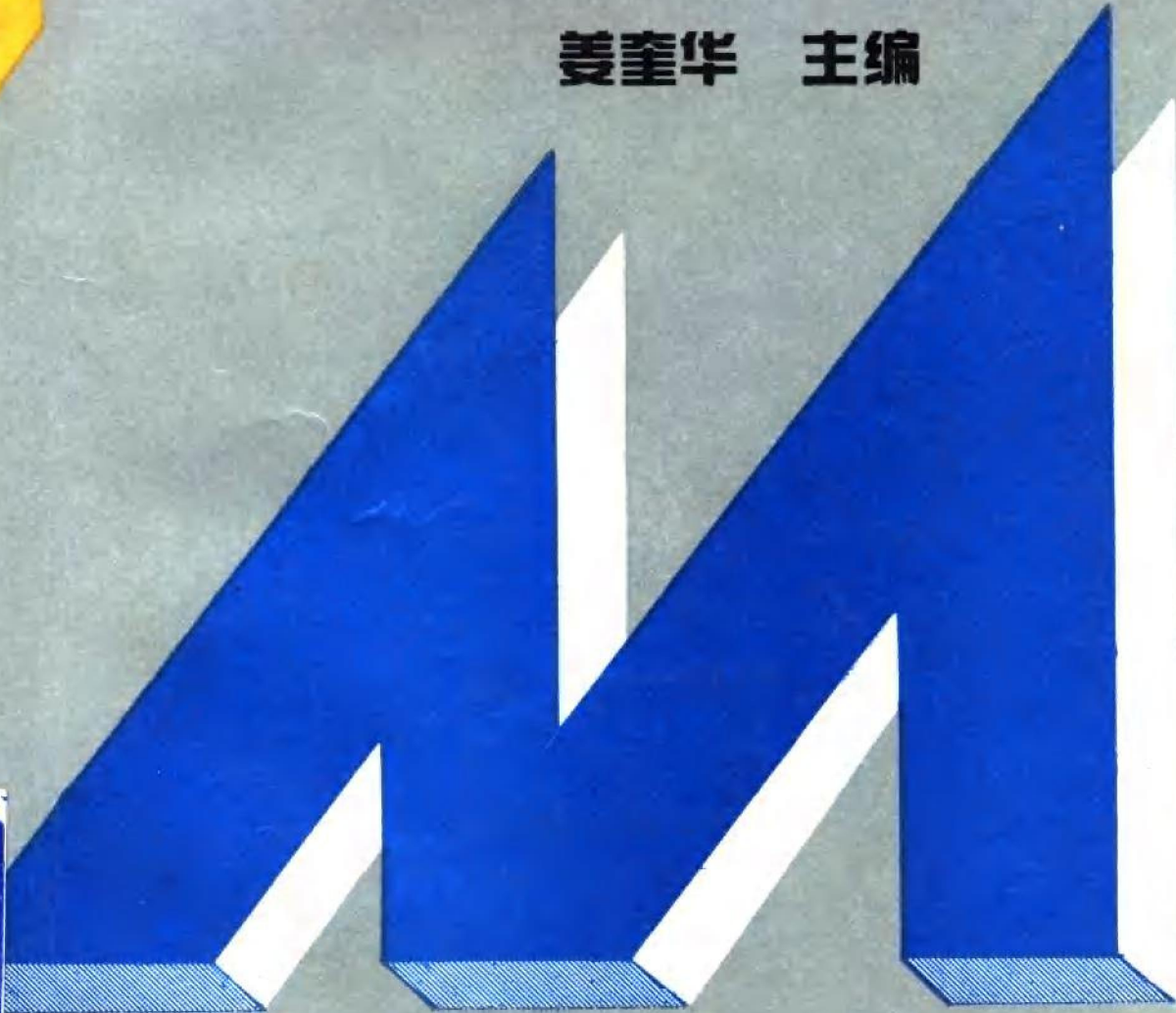


高等学校教材

冲压工艺与 模具设计

姜奎华 主编



机械工业出版社

高等学校教材

冲压工艺与模具设计

主 编 姜奎华

副主编 杨裕国

参 编 (按姓氏笔划为序)

刘 杰 李天佑 汪富均

赵振铎 袁国定 黄尚宇

常志华 戴翔九

主 审 周士能



机械工业出版社

前 言

本书系根据 1993 年 12 月第三次全国高等学校锻压专业教学指导委员会模具专门化协作组召开的教材编写研讨会所拟定的编写大纲,并参照 1983 年全国锻压专业(现改名为“塑性成形工艺及设备”专业)教材分编审委员会制订的“冲压工艺学”教学大纲编写的。全书除分别讨论了冲裁、弯曲、拉深、胀形和其他成形工艺的基本理论、工艺特点、工艺计算等内容外,还介绍了相应工艺的典型模具结构与设计。在编写上,既侧重各工艺方法的特点,又注意它们之间的内在联系以及在工艺设计和模具设计中带有共性的问题,力求全书体系的完整性。此外,还尽可能地在书中反映出当今冲压成形与模具的研究成果。

本书由武汉汽车工业大学姜奎华主编,无锡轻工业大学杨裕国副主编,华中理工大学周士能主审。具体分工如下:绪论、第一章第四~六节由姜奎华编写;第一章第一~三节由刘杰、常志华(武汉汽车工业大学)共同编写;第二章由袁国定(江苏理工大学)编写;第三、五章和第四章第四节由常志华编写;第四章(除第四节外)由杨裕国(无锡轻工业大学)编写;第六章由戴翔九(合肥工业大学)编写;第七章由汪富钧(合肥工业大学)编写;第八章由李天佑(太原重型机械学院)编写;第九章由赵振铎(山东工业大学)编写;第十章由杨裕国、黄尚宇(武汉汽车工业大学)共同编写。本书实验由李开彩(武汉汽车工业大学)协助编写,仅供各校教学实验参考。

本书除请周士能教授主审外,还经杨玉英教授(哈尔滨工业大学)、王孝培教授(重庆大学)、卢险峰教授(南昌大学)认真审阅,对他们所提出的宝贵意见表示衷心感谢!由于编者水平有限,本书不足之处在所难免,敬希读者不吝指正。

编 者

1995.10.

目 录

前言		
绪论	1	
一、冲压成形工艺与理论研究	3	
二、冲压加工自动化与柔性化	4	
三、冲模 CAD/CAM	4	
第一章 冲压成形原理与成形极限	6	
第一节 金属塑性变形	6	
一、弹性变形与塑性变形	6	
二、塑性变形的两种基本形式	6	
三、多晶体塑性变形	7	
四、塑性变形机理	8	
第二节 塑性变形的力学基础	10	
一、一点的应力与应变状态	10	
二、塑性条件	15	
三、应力和应变关系	17	
四、硬化与硬化曲线	18	
第三节 板材成形问题的分析方法	20	
一、平面应力问题	20	
二、平面应变问题	23	
第四节 板材成形区域	29	
一、吉田成形区域	29	
二、成形破裂	30	
三、板材冲压成形工艺的应力、应变特点	30	
第五节 板料成形性能与试验	31	
一、板料成形性能分类	31	
二、板材拉伸试验	31	
三、 n 值、 r 值与成形性能的关系	32	
四、冲压工艺性能试验	34	
五、板材成形性能间的相关性	37	
第六节 板材成形极限	39	
一、拉伸失稳与成形极限	39	
二、成形极限曲线	41	
三、成形极限方程	42	
第二章 冲裁工艺与模具设计	45	
第一节 冲裁工艺分析	45	
一、冲裁过程	45	
二、冲裁断面质量分析	48	
第二节 冲裁力、卸料力及推件力的计算	49	
一、冲裁力的计算	49	
二、降低冲裁力的方法	50	
三、卸料力及推件力的计算	52	
第三节 冲裁间隙	53	
一、间隙的影响	53	
二、合理间隙的选用	56	
第四节 冲裁模工作部分的设计		
计算	61	
一、冲裁模刃口尺寸的计算	61	
二、计算举例	66	
第五节 冲裁件的排样	67	
一、材料利用率	67	
二、排样方法	68	
三、搭边和料宽	71	
第六节 冲裁工艺设计	74	
一、冲裁件的工艺性	74	
二、冲裁工艺方案的确定	78	
第七节 精密冲裁工艺与模具	80	
一、光洁冲裁	80	
二、负间隙冲裁	81	
三、精冲	82	
四、整修	90	
习题	94	
第三章 弯曲工艺与模具设计	96	
第一节 弯曲变形分析	96	
一、弯曲变形的特点	96	
二、弯曲时的中性层	98	
第二节 弯曲力的计算	100	
一、自由弯曲力	100	
二、校正弯曲力	101	
三、顶件力和压料力	101	
第三节 弯曲件的毛坯长度计算	101	

一、 $r > 0.5t$ 的弯曲件	101	一、压边形式与压边力	155
二、 $r < 0.5t$ 的弯曲件	102	二、拉深力和拉深功的计算	157
三、铰链式弯曲件	102	第六节 拉深模工作部分的设计	
第四节 弯曲工艺设计	103	计算	159
一、最小相对弯曲半径 $r_{\min}/t$	103	一、结构参数	159
二、弯曲件的工艺性	104	二、典型模具结构	163
三、弯曲件的工序安排	106	第七节 拉深工艺设计	168
第五节 提高弯曲件精度的工艺		一、拉深件的工艺性	168
措施	107	二、工序设计	169
一、拉裂	108	第八节 其他拉深方法	170
二、截面畸变	108	一、软模拉深	170
三、翘曲	108	二、差温拉深	171
四、弯曲回弹	108	三、脉动拉深	173
第六节 弯曲模工作部分的设计		四、变薄拉深	173
计算	112	习题	175
一、弯曲模工作部分的尺寸计算	112	第五章 胀形工艺与模具设计	177
二、弯曲模的典型结构	113	第一节 胀形变形分析	177
第七节 辊弯和辊形	115	一、变形特点	177
一、辊弯	115	二、成形极限	178
二、辊形	117	第二节 胀形工艺与模具	179
习题	119	一、平板毛坯的局部胀形	179
第四章 拉深工艺与模具设计	120	二、圆柱空心毛坯的胀形	182
第一节 拉深变形分析	120	三、张拉成形	184
一、变形过程	120	第三节 大型覆盖件的成形	186
二、起皱与拉裂	127	一、成形特点	186
第二节 直壁旋转零件的拉深	128	二、冲压工艺要点	186
一、毛坯尺寸计算	128	三、网格变形分析法与成形极限图的	
二、无凸缘圆筒形件的拉深	132	应用	190
三、有凸缘圆筒形件的拉深	137	习题	192
四、阶梯形零件的拉深	142	第六章 其他成形工艺与模具设计	193
第三节 其他旋转体零件的拉深	144	第一节 翻边	193
一、概述	144	一、圆孔翻边	193
二、球面零件的拉深	145	二、外缘翻边	197
三、锥形零件的拉深	146	三、非圆孔翻边	199
四、抛物面零件的拉深	148	四、变薄翻边	199
第四节 盒形件的拉深	149	第二节 缩口	200
一、矩形盒的拉深特点	149	第三节 旋压	203
二、毛坯尺寸计算与形状设计	150	一、不变薄旋压	203
三、盒形件的拉深工艺	151	二、变薄旋压	204
第五节 压边力、拉深力和拉深功的		第四节 爆炸成形	205
计算	155	第五节 电水成形	206

第六节 电磁成形	207	第一节 铋-锡低熔点合金模	257
第七节 超塑性成形	207	第二节 锌基合金模	259
一、概述	207	一、锌基合金冲模用材料、力学性能及其熔炼方法	259
二、成形方法	208	二、锌基合金冲裁模	260
习题	209	三、锌基合金成形模	263
第七章 冲压工艺过程设计	210	第三节 聚氨酯橡胶模	264
第一节 工艺设计的内容与步骤	210	一、聚氨酯橡胶模简介	264
一、设计程序	210	二、聚氨酯橡胶薄板冲裁模	265
二、工艺方案的确定	211	三、聚氨酯橡胶成形模	266
第二节 典型冲压件工艺设计		第四节 通用冲模与组合冲模	268
实例	215	一、逐次冲裁法和通用冲裁模	268
一、冲压件的工艺分析	215	二、组合冲模	269
二、工艺方案的分析和确定	216	第五节 简易冲裁模	270
三、编制工艺卡片	218	一、钢带冲模	270
第八章 冲模结构及设计	221	二、板模	272
第一节 冲模及冲模零件的分类	221	第十章 冲模 CAD/CAM 简介	276
一、冲模的分类	221	第一节 概述	276
二、冲模零件的分类	221	一、冲模 CAD 的发展与现状	276
第二节 冲模主要零件设计	222	二、模具 CAD/CAM 系统的功能及内容	277
一、工作零件	222	三、冲模 CAD 系统的硬件	278
二、定位零件	227	四、冲模 CAD 系统的软件	280
三、压料及卸料零件	232	第二节 冲模 CAD 系统	281
四、固定与紧固零件	235	一、冲模 CAD 系统的结构	281
五、导向零件	236	二、建立冲模 CAD 系统的步骤	283
六、冲模零件的材料选用	237	三、冲模 CAD 系统的关键技术	283
第三节 复合模	239	四、微机冲裁模 CAD/CAM 系统——HPC 系统简介	284
一、概述	239	实验	288
二、典型结构	240	实验一 板材 n 、 r 值的测定	288
第四节 级进模	242	实验二 冲杯实验	289
一、概述	242	实验三 杯突实验	290
二、带料连续拉深	243	实验四 锥杯实验	291
三、其他典型结构	244	实验五 胀形主应变曲线的测定	293
第五节 冲模设计要点	247	实验六 扩孔实验	294
一、模具结构形式的确定	247	实验七 冲模拆装	295
二、压力中心的计算	248	实验八 冲模调试	296
三、冲压设备的选用	250	参考文献	298
四、冲模零部件的技术要求	251		
五、冲模设计中应采取的安全措施	252		
六、总图、零件图及技术要求	253		
七、冲模设计举例	253		
第九章 特种冲压模具设计	257		

绪 论

冲压是通过模具对板材施加压力或拉力，使板材塑性成形，有时对板料施加剪切力而使板材分离，从而获得一定尺寸、形状和性能的一种零件加工方法。由于冲压加工经常在材料冷状态下进行，因此也称冷冲压。冲压加工的原材料一般为板材或带材，故也称板材冲压。

冲压加工需研究冲压工艺和模具两个方面的问题。根据通用的分类方法，冲压工艺可以分成分离工序和成形工序两大类。其具体的工序分类可参见表 1 和表 2。

表 1 分离工序

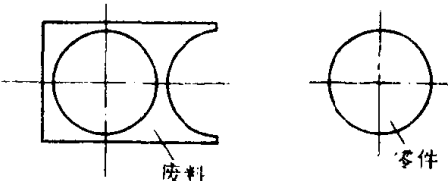
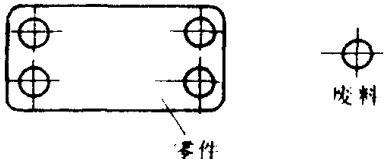
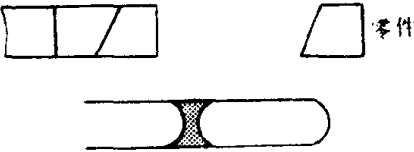
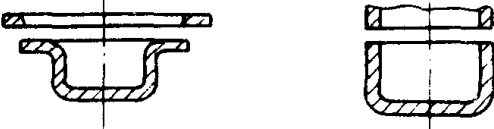
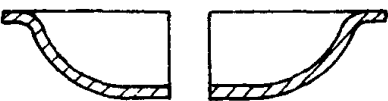
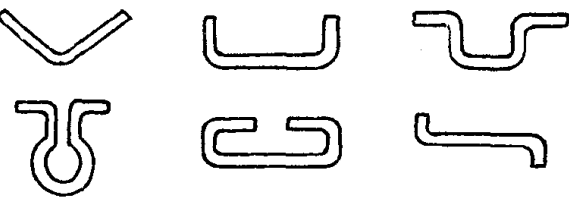
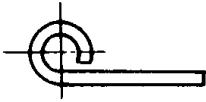
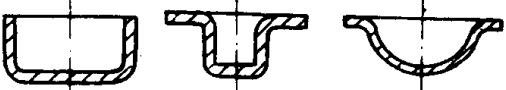
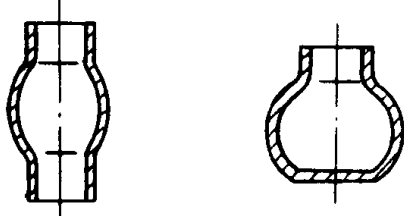
工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
落 料		用冲模沿封闭轮廓曲线冲切，冲下部分是零件，用于制造各种形状的平板零件
冲 孔		用冲模按封闭轮廓曲线冲切，冲下部分是废料
切 断		用剪刀或冲模沿不封闭曲线切断，多用于加工形状简单的平板零件
切 边		将成形零件的边缘修切整齐或切成一定形状
剖 切		把冲压加工成的半成品切开成为二个或数个零件，多用于不对称零件的成双或成组冲压成形之后

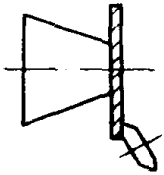
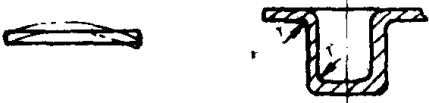
表 2 成形工序

工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
弯 曲		把板材沿直线弯成各种形状，可以加工形状极为复杂的零件

(续)

工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
卷 圆		把板材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		把板材毛坯成形制成各种空心的零件
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		在预先冲孔的板材半成品上或未经冲孔的板料冲制成竖立的边缘
翻 边		把板材半成品的边缘按曲线或圆弧成形成竖立的边缘
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的变形,可以成形各种空间曲面形状的零件
起 伏		在板材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的变形方法

(续)

工序名称	简 图	特 点 及 应 用 范 围
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的变形方法
旋 压		在旋转状态下用辊轮使毛坯逐步成型的方法
校 形		为了提高已成形零件的尺寸精度或获得小的圆角半径而采用的成形方法

冲压加工作为一个行业，在国民经济的加工工业中占有重要的地位。据统计，冲压件在各个行业中均占相当大的比重，尤其在汽车、电机、仪表、军工、家用电器等方面所占比重更大。冲压加工的应用范围极广，从精细的电子元件、仪表指针到重型汽车的覆盖件和大梁、高压容器封头以及航空航天器的蒙皮、机身等均需冲压加工。

冲压件在形状和尺寸精度方面的互换性较好，一般情况下，可以直接满足装配和使用要求。此外，在冲压加工过程中由于材料经过塑性变形，金属内部组织得到改善，机械强度有所提高，所以，冲压件具有质量轻、刚度好、精度高和外表光滑、美观等特点。

冲压加工是一种高生产率的加工方法，如汽车车身等大型零件每分钟可生产几件，而小零件的高速冲压则每分钟可生产千件以上。由于冲压加工的毛坯是板材或卷材，一般又在冷状态下加工，因此较易实现机械化和自动化，比较适宜配置机器人而实现无人化生产。

冲压加工的材料利用率较高，一般可达70%~85%，冲压加工的能耗也较低，由于冲压生产具有节材、节能和高生产率等特点，所以冲压件呈批量生产时，其成本比较低，经济效益较高。

当然，冲压加工与其他加工方法一样，也有其自身的局限性，例如，冲模的结构比较复杂，模具价格又偏高。因此，对小批量、多品种生产时采用昂贵的冲模，经济上不合算。目前为了解决这方面的问题，正在努力发展某些简易冲模，如聚氨酯橡胶冲模、低合金冲模以及采用通用组合冲模、钢皮模等，同时也在进行冲压加工中心等新型设备与工艺的研究。

采用冲压与焊接或胶接等复合工艺，可以使零件结构更趋合理，加工更为方便，成本更易降低，这是制造复杂形状结构件的发展方向之一。

冲压工艺，模具以及冲压设备等正在随着科学技术的发展而不断发展，从总体来看，现代冲压工艺与模具的主要发展方向可以归纳为以下几个方面：

一、冲压成形工艺与理论研究

近年来，冲压成形工艺有很多新的进展，特别是精密冲裁、精密成形、精密剪切、复合

材料成形、超塑性成形、软模成形以及电磁成形等新工艺日新月异,冲压件的成形精度日趋精确,生产率也有极大的提高,正在把冲压加工提高到高品质的、新的发展水平。前几年的精密冲压主要指对平板零件进行精密冲裁,而现在,除了精密冲裁外还可兼有精密弯曲、精密拉深、压印等,可以进行复杂零件的立体精密成形。过去的精密冲裁只能对厚度为5~8mm以下的中板或薄板进行加工,而现在可以对厚度达25mm的厚板实现精密冲裁,并可对 $\sigma_b > 900\text{MPa}$ 的高强度合金材料进行精冲。

由于引入了计算机辅助工程(CAE),冲压成形已从原来对应力应变进行有限元等分析而逐步发展到采用计算机进行工艺过程的模拟与分析,以实现冲压过程的优化设计。在冲压毛坯设计方面也开展了计算机辅助设计,可以对排样或拉深毛坯进行优化设计。

此外,对冲压成形性能和成形极限的研究,冲压件成形难度的判定以及成形预报等技术的发展,均标志着冲压成形已从原来的经验、实验分析阶段开始走上由冲压理论指导的科学阶段,使冲压成形走向计算机辅助工程化和智能化的发展道路。

二、冲压加工自动化与柔性化

为了适应大批量、高效生产的需要,在冲压模具和设备上广泛应用了各种自动化的进、出料机构。对于大型冲压件,例如汽车覆盖件,专门配置了机械手或机器人,这不仅大大提高了冲压件的生产品质和生产率,而且也增加了冲压工作和冲压工人的安全性。在中小件的大批量生产方面,现已广泛应用多工位级进模、多工位压力机或高速压力机。在小批量多品种生产方面,正在发展柔性制造系统(FMS),为了适应多品种生产时不断更换模具的需要,已成功地发展了一种快速换模系统,现在,换一副大型冲压模具,仅需6~8min即可完成。此外,近年来,集成制造系统(CIMS)也正被引入冲压加工系统,出现了冲压加工中心,并且使设计、冲压生产、零件运输、仓储、品质检验以及生产管理等全面实现自动化。

三、冲模CAD/CAM

自从美国Die Comp公司于1971年在简单级进模中首先将CAD/CAM技术引入到冲模设计与制造中以来,冲模CAD/CAM技术已成为冲压工艺与模具的主要发展方向之一。1978年日本机械工程实验室开发了MEL系统,采用了图形显示设备和交互图形设计技术,使CAD开始走向实用化。到80年代中期,人工智能技术在模具设计与制造中获得应用,美国Purdue大学的G. Eshel等于1984年开发了轴对称拉深件冲压工艺设计的专家系统。1992年印度学者Y. K. D. V. Prasad等在AUTOCAD基础上开发了普通冲裁模的CAD/CAM系统CADDs,采用参数化编程技术建立了模具标准件库,但模具设计仍以交互式图形设计为主。1991年,Michael R. Doffey等在探讨级进模的CAD/CAM时针对简单铰链件的冲压加工开发了一个利用特征(Feature)作为表达知识单元的系统。该系统将模具的表达分为几何实体、特征、零件、装配等四个层次。条料排样采用基于规则的推理方法及自动设计,模具结构及零件的设计分为标准件自动设计和凸、凹模等非标准件交互设计两个部分,使模具设计走向智能化方向。

我国在冲压模具的CAD/CAM方面也取得了重大进展。上海交通大学在80年代初期开展了大规模的CAD/CAM研究开发工作,采用交互设计方法进行条料排样,模具结构及零件设计方面采用了典型结构及标准零件的自动调用和交互设计相结合的方法,开发了智能化数据库,贮存了各种冲模的典型结构、标准零件、设计经验、设计方法和步骤,并向用户开放,目前在上海交通大学已建立了模具CAD/CAM国家工程中心。

华中理工大学于1981年首先开始了精冲模的CAD/CAM工作。近年来,在冲压件特征建模、专家系统以及CAD/CAM系统柔性化方面都取得了卓越的成就,并建立了模具CAD/CAM国家重点实验室。

国内其他高校、研究所和大型企业在冲模CAD/CAM方面也进行了许多探索和实践,并获得了众多可喜的成果。

最后,关于冲模的破损机理与寿命分析,以及新型模具材料方面,近年来也有不少新的进展。

从以上冲压工艺与模具的各个发展方向中可以看出,“冲压工艺与模具设计”课程是一门从事现代塑性加工所必须掌握的重要课程,本课程的理论性和实用性均很强,因此,学习本课程时应从理论与实践相结合的角度来研究、探讨,并侧重加强工程实践能力。本课程主要分冲压工艺与模具设计两大部分,各校和各专业可根据本校与本专业的特点,有所侧重。

第一章 冲压成形原理与成形极限

第一节 金属塑性变形

在外力作用下，金属产生形状与尺寸的变化称为变形。金属变形分为弹性变形和塑性变形。

一、弹性变形与塑性变形

所有的固体金属都是晶体，原子在晶体所占的空间内有序排列。在没有外力作用时，金属中原子处于稳定的平衡状态，金属物体具有自己的形状与尺寸。施加外力，会破坏原子间原来的平衡状态，造成原子排列畸变（图 1-1），引起金属形状与尺寸的变化。

假若除去外力，金属中原子立即恢复到原来稳定平衡的位置，原子排列畸变消失和金属完全恢复了自己的原始形状和尺寸，则这样的变形称为弹性变形。弹性变形时，原子离开平衡位置的位移与外力作用的大小有关，但移动之距离总是不超过相邻两原子间的距离（图 1-1 b）。

继续增加外力，原子排列的畸变程度增加，移动距离有可能大于受力前的原子间距离，这时晶体中一部分原子相对于另一部分产生较大的错动（图 1-1 c）。外力除去以后，原子间的距离虽然仍可恢复原状，但错动了的原子并不能再回到其原始位置（图 1-1 d），金属的形状和尺寸也都发生了永久改变。这种在外力作用下产生不可恢复的永久变形称为塑性变形。

受外力作用时，原子总是离开平衡位置而移动。因此，在塑性变形条件下，总变形既包括塑性变形，也包括除去外力后消失的弹性变形。

二、塑性变形的两种基本形式

原子离开平衡位置而产生变形，是由切应力作用引起的，通常有滑移和孪生两种形式。

（一）滑移

滑移是晶体一部分沿一定的晶面（滑移面）和晶向（滑移方向）相对于另一部分作相对移动。由于沿原子排列最密排面和方向滑移的阻力最小，所以，滑移面总是原子排列最密的面，滑移方向也总是原子排列最密的方向。一种滑移面及其面上的一个滑移方向组成一个滑移系，它是晶体滑移时可能拥有的空间位向。常见的金属晶体结构及其滑移系的数量见表 1-1。

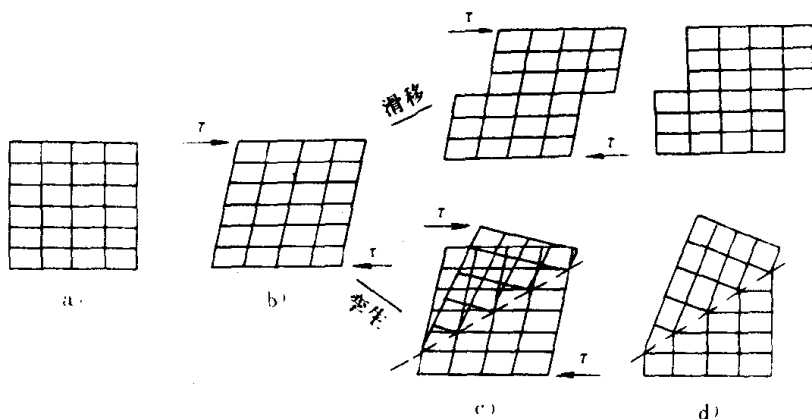


图 1-1 弹性变形与塑性变形

a) 无变形 b) 弹性变形 c) 弹性变形+塑性变形 d) 塑性变形

表 1-1 常见金属晶体结构及其滑移系

晶体结构	滑移面数	滑移方向数	滑移系总数
体心立方	6	2	$6 \times 2 = 12$
面心立方	4	3	$4 \times 3 = 12$
密排六方	1	3	$1 \times 3 = 3$

在其他条件相同的情况下，晶体的滑移系多，则可能出现的滑移位向多，金属的塑性也好。金属塑性还与滑移面上原子密排程度和滑移方向的数目等有关，如具有体心立方结构的金属 α -Fe，滑移方向和原子密排程度均不及面心立方金属，其塑性比面心立方金属 Cu、Al、Ag 等低。

滑移往往是在许多平行的晶面上同时进行，形成滑移层，其厚度可达 $50\mu\text{m}$ 左右。若干滑移层组成滑移带，滑移带中各滑移层之间为阶梯状（图 1-2），在变形金属表面出现无数互相平行的线条，即所谓的滑移线。

（二）孪生

孪生是晶体一部分相对另一部分，对应于一定的晶面（孪晶面）沿一定方向发生转动的结果。已变形部分的晶体位向发生改变，与未变形部分以孪晶面互为对称。发生孪生时，晶体变形部分中所有与孪晶面平行的原子平面均向同一方向移动，移动距离与该原子面距孪晶面之距离成正比。虽然每个相邻原子间的位移只有一个原子间距的几分之几，但许多层晶面积累起来的位移便可形成比原子间距大许多倍的变形。

孪生与滑移的主要差别是：①滑移是一渐进过程，而孪生是突然发生的，如体心立方结构的金属变形一般采取滑移方式，但在低温或冲击载荷下易于产生孪生；②孪生所要求的临界切应力比滑移要求的临界切应力大得多，只有在滑移过程很困难时，晶体才发生孪生；③孪生时原子位置不能产生较大的错动，金属获得较大塑性变形的主要形式是滑移。

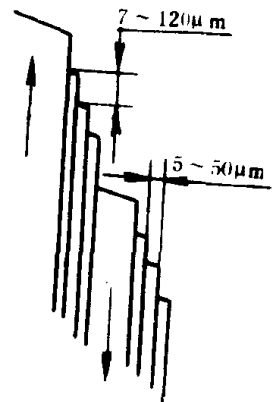


图 1-2 滑移带

三、多晶体塑性变形

实际使用的金属都是多晶体，其中包含有大小、形状、位向都不完全相同的晶粒，各晶粒之间由晶界相连接。多晶体塑性变形的形式也是滑移和孪生。

多晶体在受到外力作用时，塑性变形首先发生在位向最有利的晶粒中。也就是滑移面与力系引起的最大切应力作用的平面相重合，如图 1-3a 中的晶粒 A 和 B，其他晶粒（如晶粒 C 和 D）产生弹性变形与之协调。随着外力增加，作用在位向不太有利的滑移面上的切应力达到了开始塑性变形所需要的数值，于是塑性变形开始遍及越来越多的晶粒。多晶体各晶粒的变形先后不一致，有些晶粒变形较大，有些则变形较小，在同一晶粒内变形也不一致，这就造成了多晶体变形的不均匀性。

除了各晶粒本身的变形以外，多晶体中各晶粒之间也会在外力的作用下相对移动而产生变形，即晶间变形。对于塑性较差的材料，其晶间结合力弱，晶粒之间的相对移动会破坏晶界面降低晶粒之间的机械嵌合，易于导致金属的破裂。

对于多晶体金属来说，晶粒越小，具有位向不同的晶粒数目就越多，晶界面积也越大。从一般使用的角度来看，晶粒细小的材料变形抗力大，塑性好，变形较均匀。经塑性变形后的

多晶体金属，会引起下述组织改变：

1. 纤维组织 各晶粒沿最大的变形方向伸长，形成纤维状的晶粒组织，即纤维组织。

2. 变形组织 塑性变形过程中晶粒形状变化的同时，部分晶粒在空间发生转动（图 1-3 b），使滑移面与金属强烈流动方向趋于一致，形成变形组织。

具有变形组织的金属，各晶粒的位向非常接近，力学性能、物理性能等明显地出现各向异性，对其工艺性能和使用都有很大的影响。例如，冷轧钢板具有变形组织组织，在拉深过程中各方向的变形不等，得到的拉深件在口部不平整。

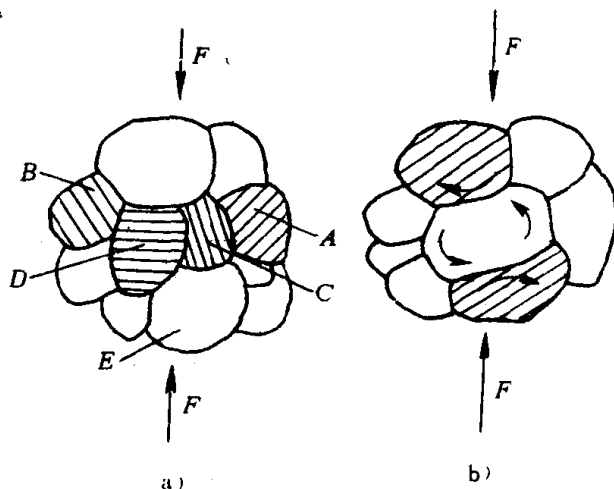


图 1-3 多晶体塑性变形

a) 晶内变形 b) 晶间变形

四、塑性变形机理

早在 20 年代，就有人提出晶体中存在位错的假设，即认为晶体中存在一种线缺陷，它在切应力作用下容易滑移，并引起塑性变形。

(一) 位错类型与柏氏矢量

位错的主要类型有刃型位错和螺型位错。如果有一原子平面中断在晶体内部，这样使滑移面一侧的原子平面的数量多于另一侧，此为刃型位错（图 1-4 a）；另一种晶体错排是：晶体一部分沿滑移面被剪断，被分开的两部分彼此相对错动了一个原子间距，并引起与滑移面垂直的原子平面弯曲，此为螺型位错（图 1-4 b）。

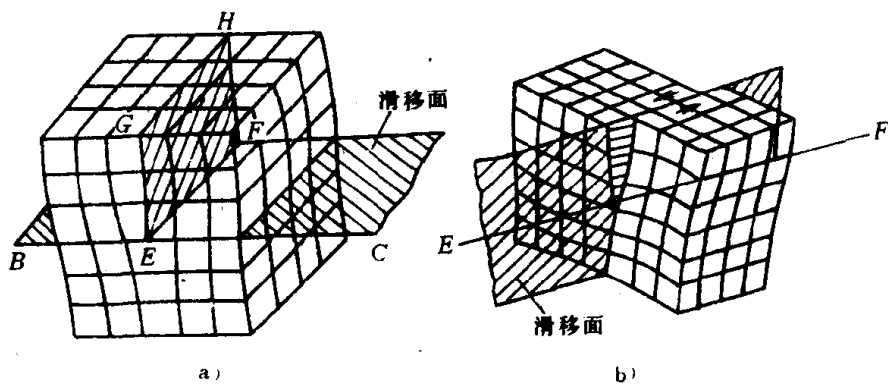


图 1-4 刃型和螺型位错示意图

a) 刃型位错 b) 螺型位错

描述位错的结构和类型及位错的运动，可用柏氏矢量 b 。围绕位错线每边移动相同的晶格作柏氏回路，自终点引向起点的矢量为柏氏矢量 b （图 1-5）。柏氏矢量有以下重要特性：

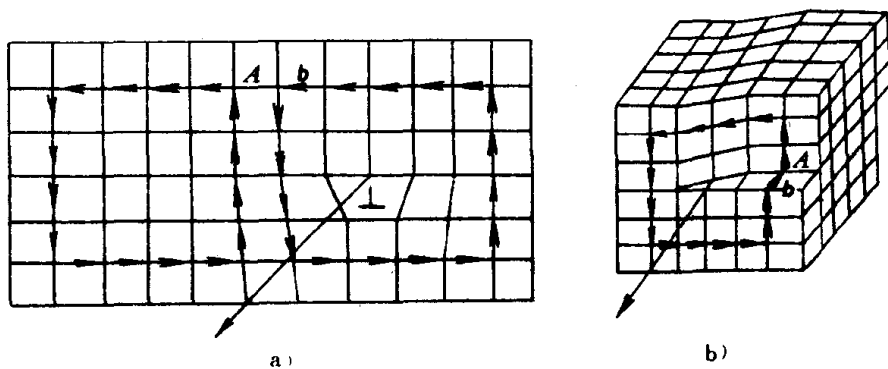


图 1-5 柏氏回路和柏氏矢量

a) 刃型位错的柏氏回路 b) 螺型位错的柏氏回路

(1) 柏氏矢量 b 的方向

就是位错扫过整个滑移面产生相对滑移的方向， b 的大小表征该位错运动后产生滑移量的大

小, 如图 1-6 所示。

(2) 柏氏矢量 b 与刃型位错线垂直, 而与螺型位错线平行 (图 1-5)。

(3) 位错线在运动过程中其柏氏矢量保持不变。

(二) 位错运动

晶体中的位错是一种结构形式, 金属塑性变形是通过位错运动来实现的。位错运动除有位错线沿滑移面运动——滑移这种形式外, 还有位错线从一个滑移面过渡到另一个滑移面的运动, 即刃型位错的攀移和螺型位错的交滑移。

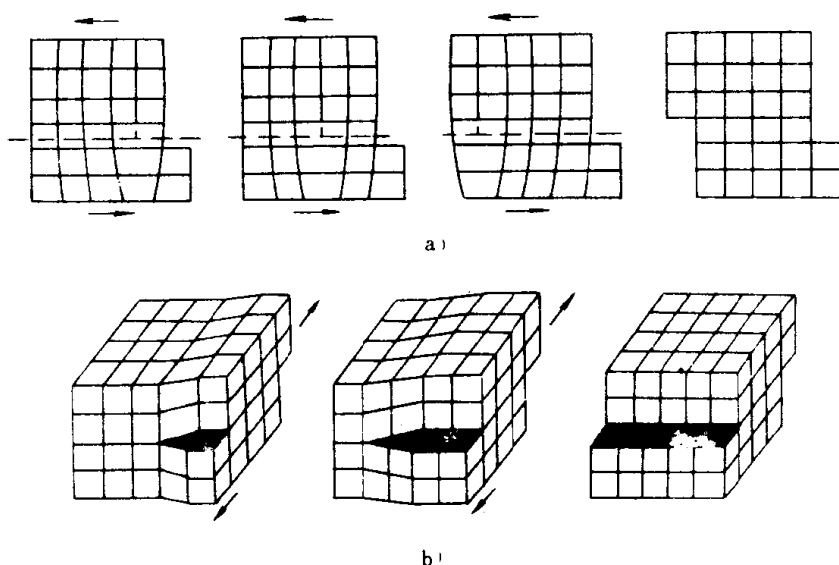


图 1-6 位错运动引起的滑移

a) 刃型位错运动 b) 螺型位错运动

如图 1-6 所示, 真正的滑移过程并不是滑移面上的所有原子同时移动, 而是滑移面上原子

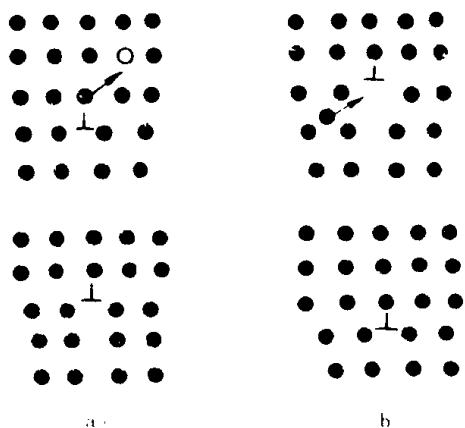


图 1-7 刃型位错攀移

a) 正攀移 b) 负攀移

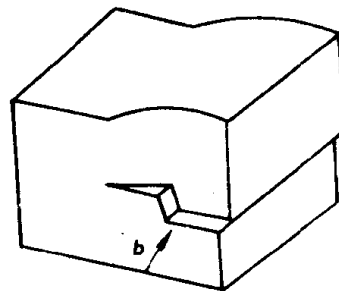


图 1-8 螺型位错交滑移

群按先后顺序相继移动。在切应力作用下, 位错线周围畸变区域的原子沿滑移方向作微小的剪位移, 即可使位错的结构位置沿滑移面及滑移方向发生变化, 也就是使位错的畸变中心位置——位错线的位置发生改变。刃型位错的运动方向与塑性滑移的方向平行, 螺型位错的运动方向则与塑性滑移的方向垂直。

刃型位错垂直于滑移面的运动, 称为位错的攀移。如图 1-7 所示, 刃型位错攀移的实质是多余半原子面 (在晶体一端) 的扩展或收缩。半原子面扩展, 是间隙原子或晶格上的原子移入半原子面的下端, 使位错向半原子面下方移动, 此为负攀移; 半原子面收缩, 是半原子面下端的原子迁入空位或移出形成间隙原子, 使位错向半原子面上方移动, 此为负攀移。由于位错攀移是由空位扩散离开位错或空位扩散到位错而引起的, 必然需要热激活, 因此攀移比位错滑移需要更大的能量, 也就是说攀移比较困难。

螺型位错没有附加的半原子面，从一个滑移面过渡到另一个滑移面并不困难。螺型位错可以在与位错线垂直的方向为滑移方向的任一滑移面内运动，这种运动称为螺型位错的交滑移。交滑移通常是由于螺型位错在滑移面上运动遇到障碍时不能继续滑移，在应力作用下移到相交滑移面上的继续滑移。如果螺型位错发生交滑移后，又回到与原滑移面平行的滑移面上滑移，即为双交滑移（图 1-8）。

攀移是指刃型位错而言的，螺型位错无所谓攀移；交滑移是指螺型位错而言的，刃型位错无所谓交滑移。因此，位错从一个滑移面过渡到另一个滑移面的运动，必须区分刃型位错的攀移和螺型位错的交滑移。

第二节 塑性变形的力学基础

物体受外力（面力和体力）作用后，其内各质点之间将产生相互作用的内力，单位面积上的内力叫做应力；另一方面，应力作用必然引起物体质点间的相对位移，即使物体产生应变。

一、一点的应力与应变状态

（一）一点的应力状态

假设从受力物体内任一点 Q 处，取出一个正六面体为单元体，虽然在该单元体的六个平面上作用有大小和方向均不完全相同的全应力 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ （取直角坐标系的三个坐标轴平行于正六面单元体的棱边，下标 x, y, z 表示应力所作用的平面的法线方向），其中应力 σ_i 又可分解为平行于坐标轴的三个分量 σ_{ij} ($i, j = x, y, z$)，如图 1-9 a、b 所示。

因此，物体内一点的应力状态可以用九个应力分量表示，写成矩阵形式为

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

——作用在 x 面上
 ——作用在 y 面上
 ——作用在 z 面上
 ——作用方向为 z
 ——作用方向为 y
 ——作用方向为 x

这里， $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为正应力分量， $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$ 为切应力分量。习惯上规定：若单元体平面上的外

法线方向与坐标轴相同时，则令作用其上的应力分量方向与坐标轴相同者为正，反之为负。

由于单元体处于静力平衡状态，绕其各轴的合力矩等于零，因此切应力互等

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{yz} = \tau_{zy}; \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (1-1)$$

式 (1-1) 表明，为保持单元体的平衡，切应力总是成对出现的。实质上，变形体内任一点的应力状态，只有六个独立的应力分量。

对于板材成形，经常忽略板厚方向（常用 z 方向表示）的应力分量（板材弯曲成形除外），即有 $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$ ，此时应力状态为

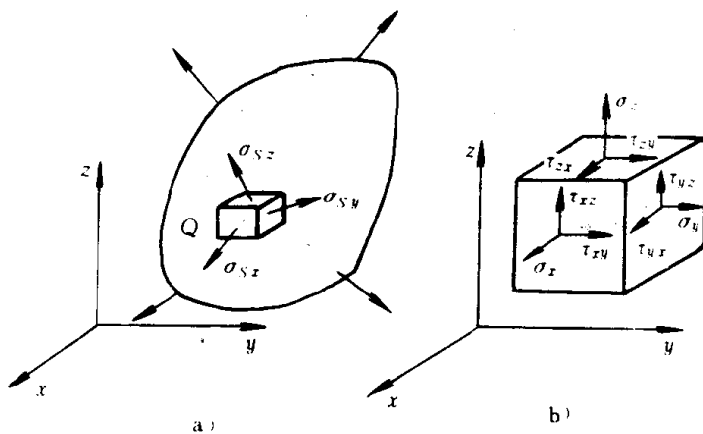


图 1-9 单元体坐标面上的应力分量

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix}$$

这是平面应力状态，只需要三个应力分量，此时，利用应力莫尔圆进行研究是很方便的。

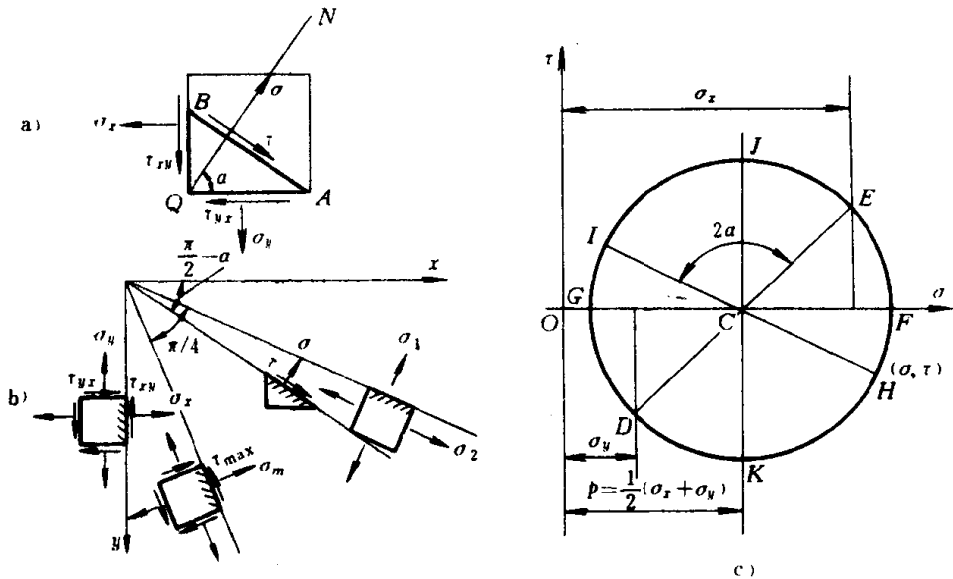


图 1-10 平面应力状态下的应力莫尔圆

a) 任意平面上的应力 b) 坐标旋转时的应力变化情况 c) 应力莫尔圆

如图 1-10 所示，设单元体的应力分量为 σ_x 、 σ_y 和 $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ 。有任一平面 AB ，其法线方向 N 与 x 轴夹角为 α ，作用有正应力 σ 及切应力 τ 。在单元体 AQB 上，沿 N 方向的合力为

$$\sigma AB - \sigma_x QB \cos \alpha - \tau_{xy} QB \sin \alpha - \sigma_y AQ \sin \alpha - \tau_{yx} AQ \cos \alpha = 0$$

$$\text{因为} \quad AQ = AB \sin \alpha \quad QB = AB \cos \alpha$$

$$\begin{aligned} \text{故有} \quad \sigma &= \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + 2\tau_{xy} \sin \alpha \cos \alpha \\ &= \frac{1}{2} \sigma_x (1 + \cos 2\alpha) + \frac{1}{2} \sigma_y (1 - \cos 2\alpha) + \tau_{xy} \sin 2\alpha \end{aligned}$$

$$\text{即} \quad \sigma = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha \quad (1-2)$$

单元体上垂直于 N 方向的合力为

$$\tau AB + \tau_{xy} QB \cos \alpha - \sigma_x QB \sin \alpha - \tau_{yx} AQ \sin \alpha + \sigma_y AQ \cos \alpha = 0$$

$$\text{得} \quad \tau = \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\alpha - \tau_{xy} \cos 2\alpha \quad (1-3)$$

比较式 (1-2) 和式 (1-3)，不难得出

$$\left[\sigma - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \right]^2 + \tau^2 = \left[\frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \right]^2 + \tau_{xy}^2 \quad (1-4)$$

式 (1-4) 为 σ - τ 坐标系中圆的方程，圆心坐标为 $\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, 0 \right)$ ，半径为

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (1-5)$$

该圆可以描述任意平面上 σ 、 τ 的变化规律，常称应力莫尔圆。圆周上每一个点，对应于单元体一个物理平面上的应力。

不难发现：单元体存在这样的物理平面，在此面上只有正应力而无切应力的作用，如图