



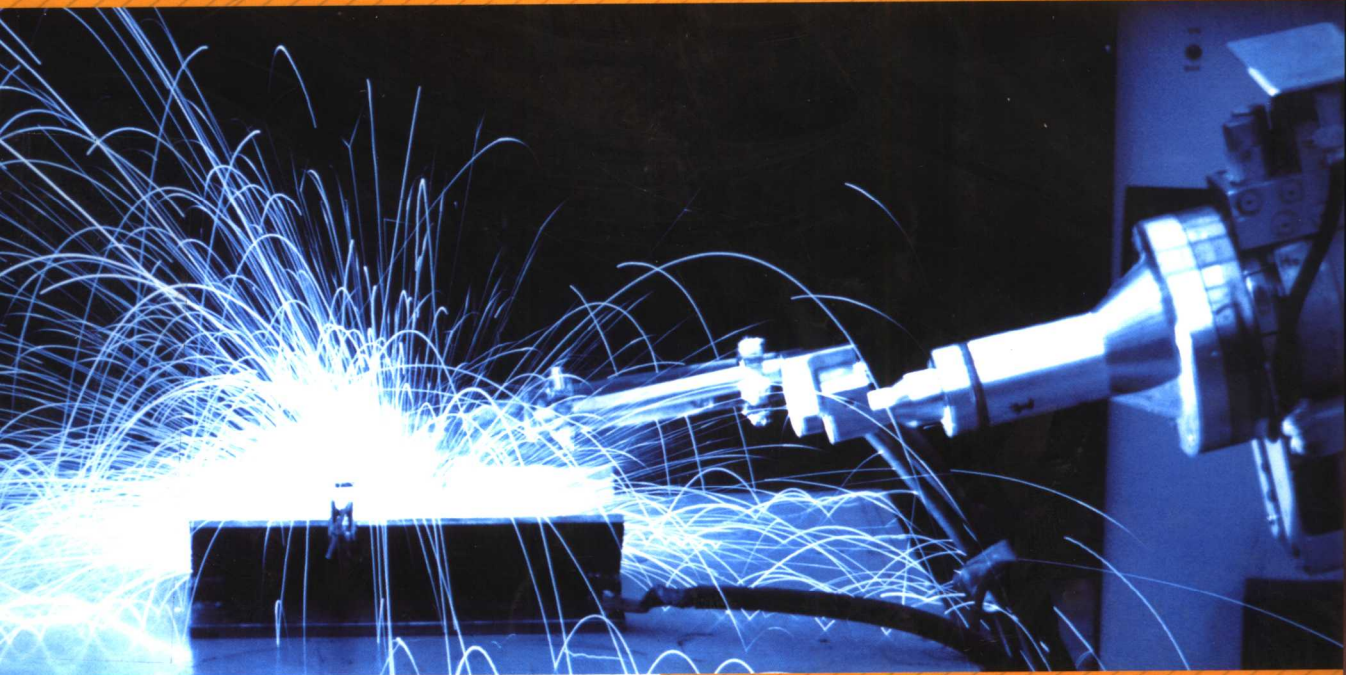
21 世纪高等院校应用型规划教材

冲压工艺与模具设计

主 编 魏春雷

副主编 安家菊 宛 强 胡文伟

主 审 陈智刚



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TG386/9

2007

21 世纪高等院校应用型规划教材

冲压工艺与模具设计

主 编 魏春雷
副主编 安家菊 宛 强 胡文伟
主 审 陈智刚

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书共八章,从工程力学入手,论述了冲压变形的基础理论;并将理论知识与生产实践相结合,详细讲述了正确设计冲压工艺及模具的基本方法;分析了冲压工艺、设备、模具、材料、冲压件质量和冲压件经济性之间的关系。

本书是高等院校、成人高校机械设计及相关专业的教学用书,也可供有关工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

冲压工艺与模具设计/魏春雷主编. —北京:北京理工大学出版社,
2007. 8

ISBN 978 - 7 - 5640 - 1262 - 5

I. 冲… II. 魏… III. ①冲压 - 工艺 - 高等学校 - 教材 ②冲模 - 设计 - 高等学校 - 教材 IV. TG38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 130738 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 22.5

字 数 / 459 千字

版 次 / 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 4000 册

定 价 / 35.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 母长新

图书出现印装质量问题,本社负责调换

21 世纪高等院校应用型规划教材编委会

(机电类专业)

主 审 郭纪林 林知秋 张岐生

主 任 陈智刚 京玉海

副 主 任 方晓勤 熊 坚 朱江峰

委 员 余 萍 陈根琴 高保真 肖文福 李俊彬

李 奇 杨 安 陈小云 魏春雷 徐慧民

赵广平 唐 刚 涂序斌 袁建新 敖春根

夏永英 余 林 张克义 宋志良 黄国兵

郑和安 刘 勇 王训杰 陈华庚 刘耀元

魏斯亮

(排名不分先后)

执行委员 钟志刚 廖宏欢

前 言

本书是根据教育部制定的《高等院校机械类专业人才培养目标及规格》的要求编写的，可作为高职高专规划教材，也是21世纪高等院校应用型规划教材。本书的教学参考时数为80~100学时。

本书以必需、够用为前提，从工程力学入手，论述了冲压变形的基础理论；并将理论知识与生产实践相结合，详细讲述了正确设计冲压工艺及模具的基本方法；分析了冲压工艺、设备、模具、材料、冲压件质量和冲压件经济性之间的关系。内容力求适应应用型教学的要求，注重能力的培养。

本书由魏春雷任主编，安家菊、宛强、胡文伟任副主编。全书共8章，其中魏春雷编写第2、3章，安家菊编写第5、8章，宛强编写第1、4章，胡文伟编写第6、7章。本书由陈智刚教授担任主审。

由于编者水平有限，本书难免还存在一些缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 概述	(1)
第 2 章 冷冲压变形基础	(5)
第一节 应力与应变状态分析	(5)
第二节 塑性与变形抗力及其影响因素	(14)
第三节 材料的冲压成形性能及加工硬化现象	(18)
第 3 章 冲裁	(23)
第一节 冲裁过程的分析	(23)
第二节 冲裁模间隙	(27)
第三节 凸、凹模刃口尺寸的计算	(33)
第四节 排样	(39)
第五节 冲裁力	(48)
第六节 冲裁模分类及结构分析	(55)
第七节 冲裁模零部件结构	(77)
第八节 冲裁件的工艺性	(124)
第九节 精密冲裁	(126)
第十节 冲裁工艺方案的确定	(147)
思考题	(155)
第 4 章 弯曲	(156)
第一节 弯曲变形过程	(157)
第二节 最小弯曲半径	(162)
第三节 弯曲件的回弹	(164)
第四节 弯曲件的工艺计算	(169)
第五节 弯曲力的计算和设备选择	(171)
第六节 弯曲件的工艺性和工序安排	(173)
第七节 弯曲模工作部分设计	(177)
第八节 弯曲模的典型结构	(180)

第九节 弯曲模设计举例	(189)
思考题	(190)
习题	(191)
第5章 拉深	(192)
第一节 圆筒形件拉深的变形过程	(192)
第二节 圆筒形件拉深的工艺计算及模具设计	(201)
第三节 特殊形状零件的拉深	(245)
第四节 矩形件的拉深	(254)
第五节 其他拉深方法及辅助工艺	(265)
第六节 拉深模具设计举例	(272)
思考题	(278)
第6章 其他冷冲压成形工艺与模具设计	(281)
第一节 翻边	(281)
第二节 胀形	(294)
第三节 缩口	(303)
第四节 校形与整形	(308)
第五节 旋压	(312)
习题	(317)
第7章 多工位级进模的设计	(318)
第一节 概述	(318)
第二节 排样设计	(319)
第三节 级进模设计与举例	(333)
第8章 冲压工艺设计	(341)
第一节 工艺方案的制订	(341)
第二节 冲压工艺实例	(347)
参考文献	(353)

第1章

概 述

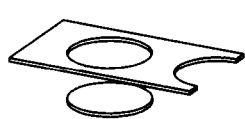
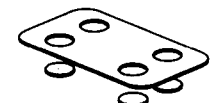

一、冲压的概念

冲压就是利用冲压模具（凸模与凹模及结构附件）安装在压力机（例如：冲床、油压机等设备）或其他相关设备上，对材料（在常温下）施加压力，使其产生分离或塑性变形，从而获得一定形状和尺寸零件的一种加工方法。冲压不仅可以加工金属材料，而且还可以加工非金属材料。


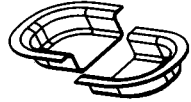
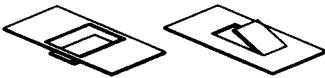

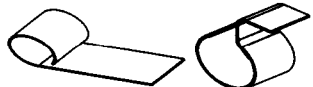

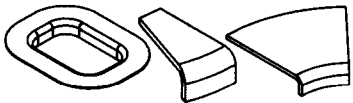


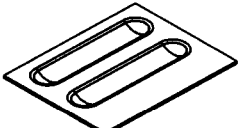

二、冲压工序的分类

冲压工序的分类是指冲压模具所能做的基本工序。冲压工艺按其变形性质可以分为材料的分离工序与成形工序两大类，每一类中又包括许多不同的工序，见表1-1。如冲裁方面的工序、弯曲方面的工序、拉深方面的工序、成形方面的工序等，统称为基本工序。

表1-1 冲压工序分类

工序分类	工序特征	工序名称	说 明	工序简图
分离 工序	冲 裁	落料	将材料沿封闭轮廓分离，被分离下来的部分大多是平板形的工件或工序件	
		冲孔	将废料沿封闭轮廓从材料或工序件上分离下来，从而在材料或工序件上获得需要的孔	
		切断	将材料沿敞开轮廓分离，被分离下来的部分大多是平板形的工件或工序件	

续表

工序分类	工序特征	工序名称	说明	工序简图
分离工序	冲裁	切边	将制件(零件)边缘处不规则的形状部分冲裁下来	
		剖切	将对称形状的半成品沿着对称面切开, 成为制件	
		切舌	切口不封闭, 并使切口内板料沿着未切部分弯曲	
变形工序	弯曲	压弯	将平板冲压成弯曲形状制件(零件)	
		卷边	将板料的一端弯曲成接近圆筒形状	
	拉深	拉深	将板料冲压成开口空心形状的制件	
	成形	翻边	将平板边缘弯曲成竖立的曲边形状或直线形状, 或将孔附近的材料变形成有限高度的圆筒形状	
		缩口	使管子形状的端部直径缩小	
		胀形	使空心件中间部分的形状胀大	
		起伏	使板料局部凹陷或凸起	
		扭弯		

当大批量生产各种产品时, 仅靠这些基本工序, 是满足不了生产需要的, 还得采用组合形式的工序, 就是把两个或两个以上的单独基本工序组合起来灵活运用, 进行设计。

三、冲压工艺的特点及其应用

冲压是生产中应用相当广泛的一种加工方法, 但冲压加工必须制备相应的模具, 而模具是技术密集型产品, 其制造属单件小批量生产, 具有加工难、精度高、技术含量高、生产成本高的特点。所以, 只有在冲压零件大批量生产的情况下, 冲压加工的优点才能充分显现出来。当前我国模具工业发展十分迅速, 模具技术是先进制造技术的重要代表, 模具工业已成为高新技术产业的一个重要组成部分。

冲压加工的三要素是模具、冲床和材料。此三要素是决定冲压质量、精度和生产效率的关键因素, 是不可分割的。先进的模具只有配备先进的压力机和优质的材料, 才能充分发挥作用, 做出一流产品, 取得高的经济效益。

冲压生产过程的主要特点如下:

- (1) 依靠冲模和冲压设备完成加工, 便于实现自动化, 生产率很高, 操作简便。
- (2) 冲压所获得的零件一般无需进行切削加工, 故节省能源和原材料。
- (3) 冲压所用原材料的表面质量好, 且冲件的尺寸公差由冲模保证, 故冲压产品尺寸稳定, 互换性好。
- (4) 冲压产品壁厚、质量轻、刚度好, 可以加工成形状复杂的零件, 小到钟表的秒针、大到汽车纵梁等。

综上所述, 冲压与其他加工方法相比, 具有独到的特点, 所以在工业生产中, 尤其在大批量生产中应用十分广泛, 如汽车、拖拉机、电器、仪表、电子、国防以及日用品等行业。

四、冲压工艺的发展

目前, 我国的冲压技术、冲压模具与先进工业发达国家相比还是有一定差距的, 主要表现在我国的冲压基础理论及成形工艺、模具标准化、模具设计、模具制造工艺及设备、材料等方面。但是随着外资企业迅速地进入, 先进工业发达国家的许多技术本地化, 差距正在缩小。冲压模具正向高效、精密、长寿命、大型化方向发展。

随着我国计算机技术和制造技术的迅速发展, 冲压模具设计与制造技术正由手工设计、依靠人的经验和常规机械加工技术转向以计算机辅助设计 (CAD/三维软件)、数控加工 (CNC) 的计算机辅助设计与制造 (三维造型/CAM) 技术转变。计算机辅助设计软件与模具设计和制造技术相结合的模具设计已迅速发展, 目前, 我国已有相当多的厂家普及了计算机绘图。

CAD/CAE/CAM, UG, Pro-E, SolidWorks, SolidCAM 等著名软件, 在我国模具工业应用已相当广泛。一些厂家还引进了冲压模、塑料模和压铸模设计的专用软件, 我国自主开发

的 CAD/CAE/CAM 系统也有很大发展。例如,华中理工大学模具技术国家重点实验室开发的注塑模、汽车覆盖件模具和级进模 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冲研究中心开发的冷冲模和精冲模 CAD 软件,北京机电研究所开发的锻模 CAD/CAE/CAM 软件,北航华正软件工程研究所开发的 CAXA 软件,吉林汽车覆盖件成型技术所独立研制的商品化覆盖件冲压成型分析 KMAS 软件等在国内模具行业也已拥有不少的用户。已经形成了 CAD/三维造型/CAM 数控加工这一新型技术。以三维造型为基础的模具显著缩短了模具设计及制造周期,使设计、制造一体化。降低生产成本、提高产品质量,在行业内已成为共识。例如在自动冲床上用级进冲裁组合冲模进行叠加并铆接好转子与定子成品或其他插接件成品,都是有目共睹的。由此可见,模具技术是先进制造业的重要代表,模具工业是高新技术产业的一个重要组成部分,模具工业大有前途。

另外,由三坐标测量仪进行测量或检验最终产品也在普及发展之中,现在所用的三坐标测量仪的测量空间中任何一点的定位精度为 0.015 mm。不但可测量冲模或塑料模的零件在加工时的尺寸与公差,还可作为最终检验模具品质的工具。

虽然我国的模具工业和技术在过去的十多年得到了快速发展,但未来的十年,中国模具工业和技术的主要发展方向包括:

- (1) 提高模具的设计制造水平,使其朝着大型化、精密化、复杂化、长寿命化发展。
- (2) 在模具设计制造中更加普及和应用国产的 CAD/CAE/CAM 技术。
- (3) 发展快速制造成形和快速制造模具的技术。
- (4) 提高模具标准化水平和模具标准件的使用率。
- (5) 研究和开发优质的模具材料和先进的表面处理技术。
- (6) 研究和开发模具的抛光技术和设备。
- (7) 研究和普及模具的高速测量技术与逆向工程。
- (8) 研究和开发新的成形工艺和模具。

第2章

冷冲压变形基础

第一节 应力与应变状态分析

一、应力状态

物体的变形都是施加于物体的外力所引起的内力或由内力直接作用的结果。单位面积上的内力叫作应力。物体内每一点上的受力情况，称为点的应力状态。然而，由于外力的作用状况、物体的尺寸以及模具的形状千差万别，物体各点的应力与应变也各不相同。因此有必要研究物体各点的应力状态、应变状态以及产生变形时各应力之间的关系、应力与应变之间的关系等。

在材料力学中，为了求得物体内的应力，常常采用切面法，即假想把物体切开，在一定条件下，直接利用内力和外力的平衡条件求得切面上的应力分布。

如图 2-1 所示为一物体受外力系 $P_1, P_2, \dots, P_9, P_{10}$ 的作用而处于平衡状态，设物体内有任意一点 Q ，过 Q 点作一法线为 N 的平面 A ，将物体切开并移去上半部，这时 A 面即可看成是下半部的外表面， A 面上作用的内力应该与下半部其余的外力保持平衡。这样，内力的问题就可以转化为外力来处理。

在 A 面上围绕 Q 点取一很小的面积 ΔF ，设该面积上的内力的合力为 ΔP ，则定义 A 面上 Q 点的全应力 S 为

$$S = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} = \frac{dP}{dF} \quad (2-1)$$

全应力 S 可以分解成两个分量，一个垂直于 A 面，叫作正应力，一般用 σ 表示，另一个平行于 A 面，叫作切应力，用 τ 表示，此时面积 dF 可叫作 Q 点在 N 方向上的微分面， S, σ, τ 则分别称为 Q 点在 N 方向微分面上的全应力、正应力、切应力。

通过 Q 点可以做无限多的切面，在不同方向的切面上， Q 点的应力显然是不同的。现以单向均匀拉伸为例（如图 2-2 所示）进行分析，设一断面积为 F_0 的均匀截面棒料承受拉力 P ，通过棒料内一点 Q 作一切面 A ，其法线 N 与拉伸轴成 θ 角，将棒料切开而移去上半

部。由于是均匀拉伸，故 A 面上的应力是均匀分布的。设 Q 点在 A 面上的全应力为 S，则 S 的方向一定平行于拉伸轴，而大小则为

$$S = \frac{P}{\frac{F_0}{\cos \theta}} = \frac{P}{F_0} \cos \theta = \sigma_0 \cos \theta \quad (2-2)$$

式 2-2 中， σ_0 即为垂直与拉伸轴的切面上的正应力。全应力的正应力分量及切应力分量则分别为

$$\sigma = S \cos \theta = \sigma_0 \cos^2 \theta \quad (2-3)$$

$$\tau = S \sin \theta = \frac{1}{2} \sigma_0 \sin 2\theta \quad (2-4)$$

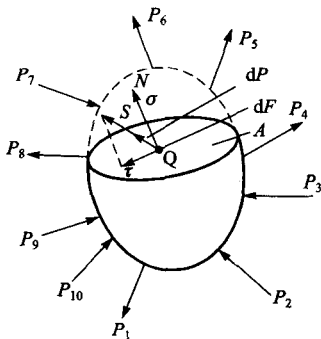


图 2-1 面力、内力 and 应力

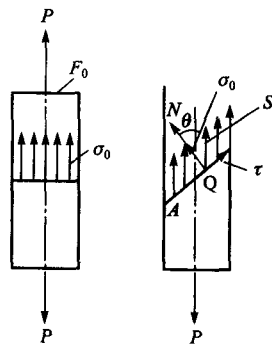


图 2-2 单向拉伸时的应力

在简单拉伸的情况下，只要知道 Q 点任意一个切面上的应力，就可以通过上述公式求得其他切面上的应力。而且当 $\theta=0$ 时， $\tau=0$ ， $\sigma=\sigma_0$ ，此时称切应力 $\tau=0$ 的切面为应力主平面；而应力主平面上的正应力 σ_0 则称为主应力。

然而，在多向受力的情况下，显然不能由一点任意切面上的应力求得其他方向上的应力，也就是说，仅仅用某一方向切面上的应力并不足以全面地表示出一点所受应力的情况。

为了研究物体内每一点的受力情况，假想把物体切成无数个极其微小的六面体（在物体边界上也可以是四面体或五面体），叫作单元体或微元体。一个单元体可以代表物体的一个质点。根据单元体的平衡条件列出平衡微分方程，然后考虑其他必要的条件设法求解。

在变形物体上的任意点取一个单元体（如图 2-3 (a) 所示），取单元体（其棱边分别平行于三个坐标轴）的六个相互垂直的表面作为微分面，其上有着大小不同、方向不同的全应力，设为 S_x ， S_y ， S_z ，其中每一个全应力又可分解为平行于坐标轴的三个分量，即一个正应力和两个切应力。如果这三个微分面上的应力为已知，则该单元体任意方向上的应力都可以通过静力平衡方程求得，因此，无论变形体的受力状态如何，为了确定物体内任意点的应力状态，只需知道九个应力分量，即三个正应力和六个切应力（如图 2-3 (b) 所示）。

又由于所取单元体处于平衡状态，故绕单元体各轴的合力矩必须等于零，即

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{yz} = \tau_{zy}; \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2-5)$$

式(2-5)又称为切应力互等定律：为了保持单元体的平衡，切应力总是成对出现的，它们大小相等，分别作用在两个相互正交的微分面内，其方向共同指向或背离两微分面的交线。因此，为了表示一点的应力状态，实际上只需要知道六个分量即三个正应力和三个切应力即可。

同简单拉伸一样，任何一种应力状态总存在这样一组坐标系，使单元体各表面上只出现正应力而不出现切应力，如图2-3(c)所示，把该坐标系中的正应力称为主应力（其数值有时也可能为零），一般按其代数值大小依次用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示，且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ；带正号的主应力表示拉应力，带负号的主应力表示压应力。

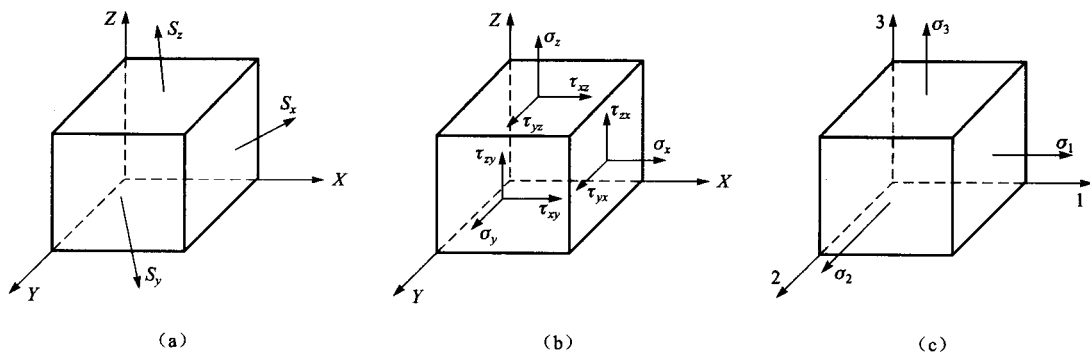


图2-3 单元体上的应力状态

对于任意一点的应力状态，一定有（也只有）一组相互垂直的三个主应力，因此三个主应力中的最大者和最小者也就是一点所有方向的应力中的最大者和最小者。在三个主应力中，如果有两个为零，则该点的应力状态为单向应力状态，如单向拉伸；如果有一个为零，则该点的应力状态为两向应力状态，又叫平面应力状态，如弯曲、扭转，塑性成形中的多数板料成形工序也可以看成是两向应力状态；如果三个主应力均不为零，则该点的应力状态为三向应力状态，如锻造、轧钢等工艺。

以主应力表示的应力状态称为主应力状态，表示其应力个数及其符号的简图称为主应力状态图。可能出现的主应力简图共有九种（如图2-4所示），即单向主应力图两种——单向受拉和单向受压；两向主应力图三种——两向受拉、两向受压和一向受拉一向受压；三向主应力图四种——三向受拉、三向受压、两向受拉一向受压、一向受拉两向受压。

单元体上 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 的三个主应力的平均值称为平均主应力，常用 σ_m 表示为

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2-6)$$

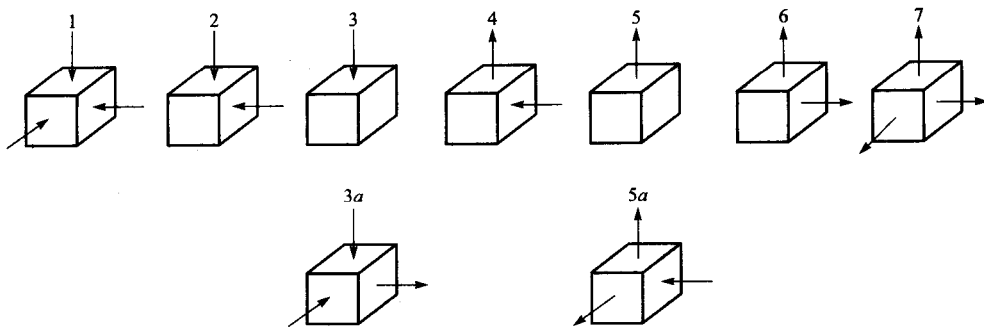


图 2-4 九种主应力状态图 (按塑性发挥的有利程度排列)

任何一种应力状态都可以分解成为两部分, 如图 2-5 所示。第一部分是平均主应力 σ_m 为各向应力值的三向等应力状态, 其特点是只能改变物体的体积, 不能改变物体的形状。第二部分是各个主应力与 σ_m 的差值为应力值构成的应力状态, 其特点是只能改变物体的形状, 而不能改变物体的体积。

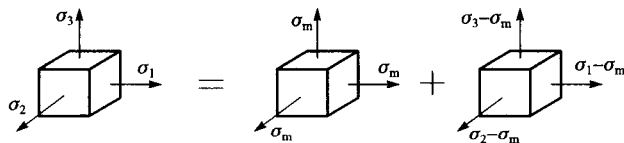


图 2-5 应力状态的分解

除主平面上不存在切应力外, 单元体其他方向的切面上都有切应力, 切应力有极值的微分面称为主切应力平面, 面上作用的切应力称为主切应力。通过列方程求解可知, 主切应力平面共有三组, 它们分别与一个应力主轴平行, 并与另外两个应力主轴成 45° , 如图 2-6 所示。 τ_{12} 作用的面平行于 3 轴, 与 1, 2 轴相交成 $\pm 45^\circ$; τ_{23} 作用的面平行于 1 轴, 与 2, 3 轴相交成 $\pm 45^\circ$; τ_{31} 作用的面平行于 2 轴, 与 1, 3 轴相交成 $\pm 45^\circ$ 。

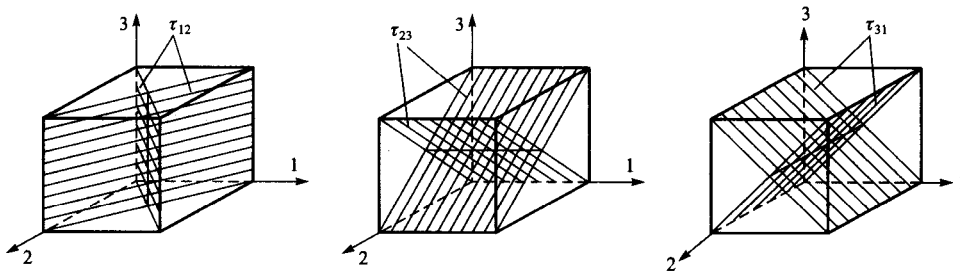


图 2-6 主切应力面

$$\begin{aligned}\tau_{12} &= \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \\ \tau_{23} &= \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \\ \tau_{31} &= \pm \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}\end{aligned}\quad (2-7)$$

每对主切应力面上的主切应力都相等,如图 2-7 所示。主切应力面上的主切应力和正应力值分别为

$$\begin{aligned}\sigma_{12} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \\ \sigma_{23} &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \\ \sigma_{31} &= \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2}\end{aligned}\quad (2-8)$$

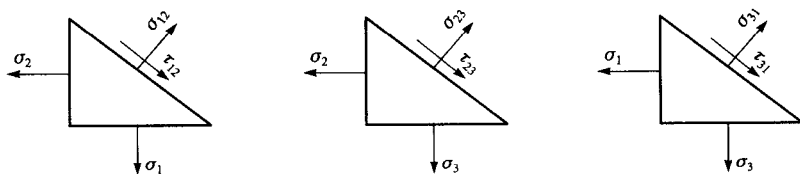


图 2-7 主切应力面上的正应力

主切应力中绝对值最大的一个,也就是一点所有方向的切面上切应力的最大者,称为最大切应力,用 τ_{\max} 表示,若 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$,则

$$\tau_{\max} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\quad (2-9)$$

最大切应力与金属材料的塑性变形有着十分密切的关系。

二、塑性条件 (又称屈服条件)

如图 2-8 所示为单向拉伸时得到的应力与应变曲线。当拉伸应力低于 σ_s 时,发生变形的特点是应力 σ 与应变 δ 成正比,且当外力去除后,变形即消失,试样完全恢复到原来的形状和尺寸,称此阶段的变形为弹性变形。当拉伸应力超过 σ_s 后,应力 σ 就不再与应变 δ 成正比,且当外力去除后,变形只能恢复一部分,而不能完全恢复到原来的形状和尺寸,即仍有一部分的变形被保留下来,称之为塑性变形或永久变形。 σ_s 则为屈服极限。

质点处于单向应力状态时,只要单向应力达到屈服极限,该质点即开始屈服,由弹性变形状态进入塑性变形状态。而在多向应力状态下,则不能仅仅用某一个应力数值来判断质点

是否进入塑性变形状态，必须同时考虑其他应力分量。而且只有当各应力分量之间符合一定条件时，质点才进入塑性变形状态。这种条件称为塑性条件，即决定受力物体内部质点由弹性变形状态向塑性变形状态过渡的条件。

Tresca（屈雷斯加）的最大切应力理论：在一定的变形条件下，材料中最大切应力达到某一定值时就开始屈服。或者说材料处于塑性状态时，其最大切应力始终是一不变的定值。该定值只取决于材料在变形条件下的性质，而与应力状态无关。这里所指的定值，实际上就是材料单向拉伸时屈服强度值的一半。

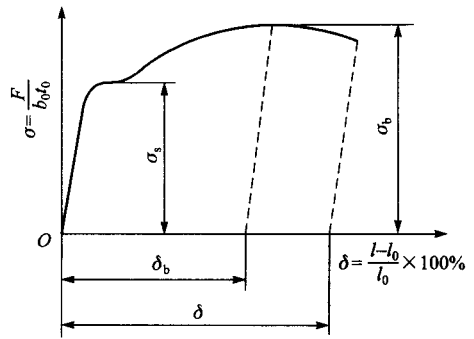


图 2-8 单向拉伸时的应力与应变曲线

$$\left. \begin{aligned} \tau_{12} &= \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right| = \frac{\sigma_s}{2} \text{ 或 } |\sigma_1 - \sigma_2| = \sigma_s \\ \tau_{23} &= \left| \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \right| = \frac{\sigma_s}{2} \text{ 或 } |\sigma_2 - \sigma_3| = \sigma_s \\ \tau_{31} &= \left| \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \right| = \frac{\sigma_s}{2} \text{ 或 } |\sigma_3 - \sigma_1| = \sigma_s \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

设 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ，则

$$\tau_{\max} = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right| = \frac{\sigma_s}{2} \Rightarrow |\sigma_1 - \sigma_2| = \sigma_s \quad (2-11)$$

Mises（密塞斯）的常数形变能量理论：在一定的变形条件下，无论变形物体所处的应力状态如何，只要其三个主应力的组合满足以下的条件，物体便开始屈服。

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (2-12)$$

这个条件称为密塞斯屈服条件，又称为常数形变能量理论。其物理意义是：当物体的质点内单位体积的弹性形变能量达到临界值时，材料就进入塑性状态。

两个屈服条件实际上相当接近，在有二个主应力相等的应力状态下两者还是一致的；而且两个屈服条件的表达式都和坐标的选择无关，等式左边都是不变量的函数；三个主应力可以任意置换而不影响屈服；同时拉应力和压应力的作用是一样的。

三、应变状态

物体是由原子构成的，根据原子在物质内部的排列方式的不同，可将固态物质分成晶体和非晶体两大类。所谓晶体，是原子（或分子）在三维空间做有规则的周期性重复排列的固体，而所有固态金属和合金都是晶体。在没有外力作用时，金属中的原子处于稳定的平衡状态，金属物体保持已有的形状和尺寸。但当物体受到外力作用时，原子间原有的平衡状态