

金属压力加工

(粉冶专业用)

张吟秋 丁钧伯 合编

中南工业大学

1992年11月2日

绪 论

第一章 金属塑性变形的力学基础

一、本课程的基础及研究内容

金属压力加工也称金属塑性变形,是在金属学、材料力学及弹性力学的基础上,研究大塑性变形力学的一门应用学科。以应力应变的变化来研究材料塑性变形的规律及其对材料性能的影响,故又称为力学冶金。

主要内容包括以下方面:

1. 力学状态,应力分析
2. 塑性条件及塑性变形特征
3. 变形及力能计算
4. 摩擦与润滑

二、金属压力加工与其他力学的关系

金属压力加工与弹性力学,材料力学,塑性力学和断裂力学均是研究晶体的力学行为的学科。分别研究材料在受力过程中弹性范围,弹塑性范围,破坏时的应力应变特征。金属压力加工是研究其中大塑性变形,也称为均匀塑性变形阶段的力学特征,故要应用到上述力学的结论和分析方法,不同之处为金属压力加工所研究的问题更为复杂。

三、学习方法和要求

本学科是一门应用基础学科,通过学习,掌握金属在塑性变形中的应力应变特征,并应用应力、应变的分析方法解决和处理塑性变形中的技术问题。鉴于本教材的对象为粉末冶金专业,又限于学时数和篇幅,故本教材侧重于介绍压力加工中的基础知识,而基本不介绍加工工艺的具体内容。

图1-1 主要变形过程时的外力作用

1. 外力

在金属压力加工中,主要研究变形区内的受力状态。“外力”是指工具与工件相接触并作用的区域。

主要变形过程时所受外力,如图1-1所示:(a)为锻造时的外力; (b)为轧制时的外力; (c)为挤压时的外力; (d)为拉拔时的外力; (e)为冲压时的外力; (f)为粉末冶金时的外力。图1-1(a)为锻造时的外力,图中1为锻锤的锤头,2为工件,3为砧座。锤头对工件施加压力,使工件在砧座上发生塑性变形。图1-1(b)为轧制时的外力,图中1为轧辊,2为工件,3为机架。轧辊对工件施加压力,使工件在机架中发生塑性变形。图1-1(c)为挤压时的外力,图中1为挤压筒,2为工件,3为挤压杆。挤压杆对工件施加压力,使工件在挤压筒中发生塑性变形。图1-1(d)为拉拔时的外力,图中1为拉拔工具,2为工件,3为模具。拉拔工具对工件施加拉力,使工件在模具中发生塑性变形。图1-1(e)为冲压时的外力,图中1为冲头,2为工件,3为凹模。冲头对工件施加压力,使工件在凹模中发生塑性变形。图1-1(f)为粉末冶金时的外力,图中1为粉末,2为压块,3为模具。压块对粉末施加压力,使粉末在模具中发生塑性变形。

目 录

第一章 金属塑性变形的力学基础

- § 1-1 金属的变形过程
- § 1-2 应力状态
- § 1-3 主应力图
- § 1-4 特征面及其意义
- § 1-5 塑性方程
- § 1-6 变形状态及其计算式
- § 1-7 变形温度 (T_n)
- § 1-8 变形速度 ($\dot{\epsilon}$)
- § 1-9 变形条件示意图

第二章 外摩擦与润滑

- § 2-1 金属压力加工时外摩擦的特点与作用
- § 2-2 摩擦系数的测定
- § 2-3 润滑剂

第三章 不均匀变形

- § 3-1 基本概念
- § 3-2 不均匀变形的原因与后果
- § 3-3 残余应力
- § 3-4 应力应变分析应用举例

第四章 金属的塑性

§ 4-1 塑性的基本概念

§ 4-2 影响材料塑性的因素

§ 4-3 塑性指标和塑性状态图

第五章 变形抗力

§ 5-1 基本概念

§ 5-2 影响变形抗力的因素

§ 5-3 加工硬化曲线

第六章 常用管棒型线生产方案

§ 6-1 板带材生产方案

§ 6-2 管棒型材生产方案

§ 6-3 线材生产方案

文 献

第一章 金属塑性变形的力学基础

§ 1-1 金属变形过程

一、金属变形的条件

在一定的条件下,要使物体变形必须施加一定的力。所谓条件即物体受力而不能发生牛顿运动($F = ma$),不能产生加速度,这样物体内部就出现与外力相平衡的力—应力,物体在应力作用下发生变形,所以,应力是内力。

作用于物体上的力有两种类型:体积力(质量力或者惯性力)及表面力(外力),它们均能使物体产生弹性或塑性变形。对大多数塑性加工操作而言,金属塑性变形是由表面力来完成的。与表面力相比,体积力在变形中的作用小,一般忽略不计。

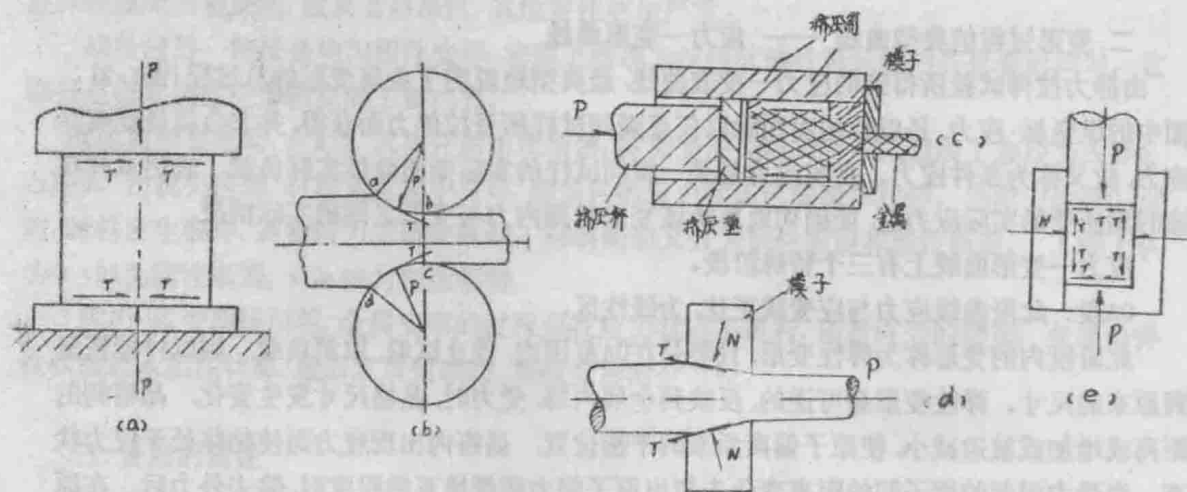


图1-1 主要变形过程时的外力图

1. 外力

研究受力状态主要是研究变形区内的受力状态。“变形区”即指工具与工件相接触所包络的区域。

主要变形过程时所受外力图,如图1-1,图中P为作用力;T为摩擦力。图1-1(a)中为平锤下锻粗,圆柱体试样受上、下锤头力的作用而部分高度减小,断面扩大。锤头力P是使圆柱体产生变形的有效作用力。由于锤头表面上横向没有运动,而金属和工具接触处是相对运动的,从而产生了阻碍柱体断面扩大的摩擦力T。图1-1(b)为平辊间的轧制,轧辊沿径向对轧件施加压力P使其高度减小。为了使轧件能进入逐渐缩小的辊缝,在轧辊与金属表面之间也存在着摩擦力T。图1-1(c)为在容器(挤压筒)中挤压变形时金属所受外力情况。挤压杆通过垫片向金属施加作用力P,同时容器壁限制工件膨胀给予侧压力P',图中T为金属运动时与工

具间的摩擦力。图1-1(d)图1-1(e)分别为金属通过模子拉伸变形和金属粉末模压时所受外力图示。由图1-1可知,金属在变形时所受外力有:工具对金属施加的作用力和金属与工具间的摩擦力。

2. 应力

变形物体受到外力作用时内部要出现内力与外力平衡,故寻求变形力的平衡条件,不仅有作用于整个物体上的外力的平衡条件,而且需要物体每个无穷小的单元也处于平衡。所以研究物体变形时力的情况时,要了解物体内部内力的情况。内力的强度称为应力;物体内部出现应力,称为物体处于应力状态之中,只有处于应力状态的物体才会发生变形。所以,可以说,应力是变形的驱动力。

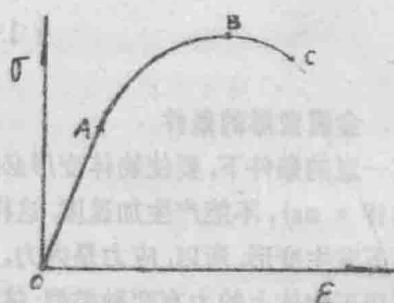


图1-2 应力-应变曲线

σ —应力; ϵ —应变

二、变形过程的典型曲线 —— 应力—变形曲线

由静力拉伸试验所得到的应力—应变曲线,最典型地说明了金属变形的总过程(图1-2)。图中的纵坐标—应力,是以原始面积除以任意瞬间试样所受拉伸力而获得,并非金属所受实际应力,故又称为条件应力。真实应力是某一瞬间试样的实际断面除以实际负载,表达试样在该时刻所受的实际应力值,能确切地反映该变形时刻内力与变形之间的实际情况。

应力—应变曲线上有三个特殊阶段。

OA段:此段曲线应力与应变成正比,为线性区。

此阶段内的变形称为弹性变形,只要是在OA范围内,停止试验,取消负载,则试样能恢复到原来的尺寸。弹性变形是可逆的,反映到金属内部,受力时,晶格尺寸发生变化,晶格间的距离或增加或被迫减小,使原子偏离原来的平衡位置,晶格内出现应力而使物体处于应力状态。当受力引起的原子间的距离变化未超出原子间力所能维系的程度时,除去外力后,在原子间力的作用下,可使偏离平衡位置的原子恢复到稳定的平衡位置,原子间的距离得到恢复,宏观上表现为变形的消失。OA段属于弹性力学研究的范围。

AB段:此段为塑性变形阶段,表现为非线性。

当试样受力超过A点时,晶体在应力状态作用下,原子间距离的变化超出了原子间所能维系的范围,迫使晶体的一部分沿着一定的结晶学面相对另一部分产生错动,而原子群跑到另一位置,当外力除去后,此新的位置不能恢复原态,发生不可逆运动。宏观上表现为变形(形状改变)现象。

由于金属的塑性变形过程是晶体在应力状态作用下晶体内部的一部分相对于另一部分错动。可见,要金属发生塑性变形,必须首先使金属处于应力状态。应力状态是由于原子偏离平衡位置,晶格发生弹性变形所致。所以塑性变形过程中有弹性变形同时存在,变形过程停止后,所发生的塑性变形不能消失,但弹性变形部分则因应力状态的消失而消失。如图1-2所示,变形物体在变形某一瞬间(如B点)所获得变形大小 ϵ_B 由两部分所组成,一部分为变形后消失的弹性部分 ϵ_{sp} ,而另一部分为变形后能保留下来的塑性变形 ϵ_{ps} 所组成,即:

塑性变形中有弹塑性变形同时发生的现象称为弹塑性共存定律。

实际生产中,弹塑性共存定律有十分重要的意义,如:

1) 加工工具设计: 压力加工变形中不允许工具发生塑性变形工具的弹性变形也愈小愈好,方能保证工件的加工精度。所以要求工具刚性好。

2) 加工件精度: 金属塑性变形时有弹性变形,变形后弹性变形又恢复,所以工艺设计中为保证加工件尺寸精度,必须适当加大予先变形量。

3) 粉末冶金材料变形工艺受影响更大表现为:

(1) 粉末冶金材料实际上是金属粉末与孔组成的复合体,变形时除了金属颗粒的弹性变形外,尚有压件中封闭孔的弹性压缩。所以粉末冶金材料变形后的弹性恢复比致密晶体大得多,远超过0.1%。另一方面粉末压件即变形体本身强度低,其整体强度为颗粒间结合强度,而脱模,或出变形区后弹性恢复所释放出的应力为三向拉伸的张应力,稍控制不当就会造成变形体开裂。

(2) 粉末冶金材料中,复相材料多,变形时,这种复相往往形成纤维状组织(并非织构),造成材料严重的各向异性,在弹性应力作用下造成沿加工方向延伸的裂纹,由于这种裂纹是释放弹性应力所造成的,故具有后滞性,其危害性更加严重。

AB段的另一特征是均匀塑性变形,宏观上表现为拉伸试棒计算长度内各处变形均匀。这部分是金属塑性变形研究的主要内容。

BC段属断裂范畴,在B点,试棒开始出现细颈,称为变形失稳,在P- ΔL 曲线上表现为 $\Delta L > 0$, $\Delta P = 0$ 。出现失稳时,材料发生集中变形,细颈区的应力状态已非简单拉伸。当应力达到C点时,材料发生破坏,属断裂力学研究范畴。材料断裂又分为韧性断裂和脆性断裂。工程上认为 $\varepsilon < 5\%$ 为脆性断裂, $\varepsilon > 5\%$ 为韧性断裂。

应力-应变曲线说明,金属变形的过程是在应力状态下进行,随着应力的增加,金属由弹性状态进入塑性状态,最后发展到断裂,完成变形的全过程。

三. 变形的描述

工程上用方程 $\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$ 描述金属变形式中 σ ——应力;K——常数; ε ——应变; $\dot{\varepsilon}$ ——应变速度;n——加工硬化指数;m——变形速度敏感指数。

变形描述通式的几种特殊情况:

1. 金属处于全刚性时,所施加力引起的应力全部为材料所吸收。即 $n=1$; $m=0$ 得 $\sigma = K \varepsilon$ 为虎克定律表达式, $K=E$, 所以虎克定律为金属弹性变形表达式。

2. 晶体材料变形,在一般塑性变形速度范围内,材料对变形速度不敏感,即 $m=0$; $n \neq 1$; $n \neq 0$; 得 $\sigma = K \varepsilon^n$, 即塑性变形表达式。

3. 晶体变形时若以蠕变速度进行,变形以晶格滑动机理而非晶格歪曲方式,则变形不出现加工硬化 $n=0$; $m \neq 0$ 得 $\sigma = K \dot{\varepsilon}^m$, 此即金属超塑性变形表达式。

4. 若金属件为硬相和软相构成的复相,变形时既有晶体的弹性变形和塑性变形,又有界面间的粘滞性流动,如粉末冶金材料变形就是典型代表,则 $m \neq 0$; $n \neq 0$; $n \neq 1$ 得 $\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$ (粉末压制理论模式)

§ 1-2 应力状态

一、应力状态分类

应力状态可分为以 σ 表示的法向应力, 引起线变形; 以 τ 表示的切向应力, 引起角变形, 造成工件形状改变。

二、点应力状态

研究物体变形时的应力状态, 首先必须了解物体内部任意一点的应力状态, 才可推断整个物体的应力状态。

点应力状态是指物体内部任意一点附近不同方位上所承受的应力情况。

1. 点应力状态的描述方法

在变形区内某点附近取一无限小的单元六面体, 在其每个面上作用着一个全应力。设单元体很小, 可视为一点, 故对称面上的应力是相等的, 只需在三个可见的面上画出全应力, 如图1-3(a)所示。将全应力按取定的坐标轴向进行分解, 并让单元体面与坐标轴面平行, 每个全应力可分解一个法向应力(正应力)和两个切向应力, 如图1-3(b)。

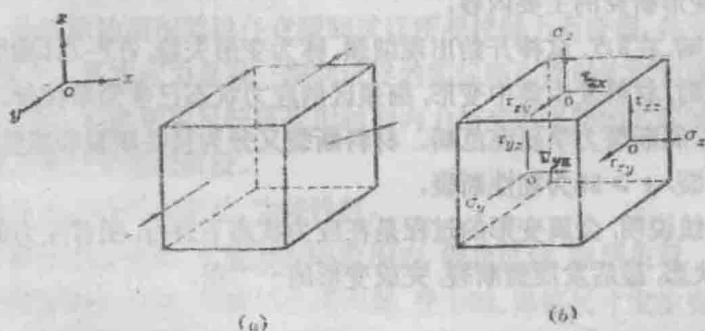


图1-3 单元六面体上作用应力图

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别表示垂直于 x, y, z 轴所在的坐标面上的法向应力, τ 为切向应力, 其下标的第一个字母为应力所属面的坐标轴名称, 第二个字母为所指向的坐标轴名称, 如 τ_{xy} 为 x 轴垂直面上指向为 y 轴的切应力。并规定, 应力指向与坐标轴指向一致时为正 (+), 反之为负 (-)。这样任意一点的应力状态完全可由三个法向应力和六个切向应力所表示(图1-3b), 也可用下列应力状态张量来描述。

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

当小单元体没有转动时, 存在切应力互等,

即

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz}$$

这样任意点的应力状态可用六个分量来描述。

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

'.' 所表示的项和位置与之对称的项相等。

2. 一点应力状态的数学表达式

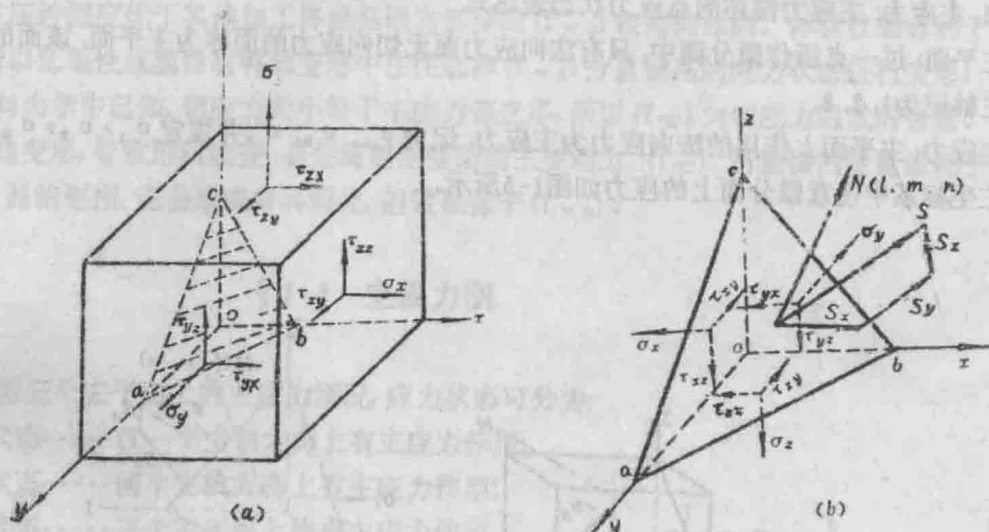


图1-4 点应力状态分析图

(a) 截取单元四面体的位置; (b) 单元四面体上的应力

若在六面体的一角沿微分面abc截割, 则得图1-4b所示的小四面体。为了与三个坐标面上的应力平衡, 微分斜面abc上应出现全应力 S 。

设斜面法线 N 与坐标轴 x, y, z 的夹角为 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ 且命名各夹角的余弦值,

为 $\cos \alpha_x = L$

$$\cos \alpha_y = m$$

$$\cos \alpha_z = n$$

为简化, 设斜面上abc的面积为1, 则四面体其他三个坐标面的面积分别为 L, m, n 。现求abc面上的应力与其他三个坐标面上应力间的关系式。

全应力 S 可分解为 S_x, S_y, S_z 三个分量, 显然 $S^2 = S_x^2 + S_y^2 + S_z^2$ (1-1)

当四面体处于平衡状态时, 各轴上应力分量之和等于零, 所以

$$S_x = \sigma_x L + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n$$

$$S_y = \tau_{xy} L + \sigma_y m + \tau_{yz} n$$

$$S_z = \tau_{xz} L + \tau_{yz} m + \sigma_z n$$

斜面上的法向线应力 σ_N 和切应力 τ_N 计算式

为 $\sigma_N = S_x L + S_y m + S_z n$ (1-3)

将(1-2)式和切应力互等代入(1-3)式,

得: $\sigma_N = \sigma_x L^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2(\tau_{xy} Lm + \tau_{yz} mn + \tau_{xz} nL)$ (1-4)

因为 $S^2 = \sigma_N^2 + \tau_N^2$

将(1-1)式代入得 $\tau_N = \sqrt{S^2 + T_N^2} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2 - \sigma_N^2}$ (1-5)

由上各式可见, 单元四面体坐标系中三个互相垂直平面上的应力, 可用来确定任意斜面上的应力, 只要该面的方位已经确定。若变形体内某点三个互相垂直面上的应力已知时, 该点处的应力状态即可完全确定, 因为法线应力 σ_N 和切线应力 τ_N 完全可以表达该点的应力情况。因之, 物体的应力情况可用互相垂直的三个平面上的应力分量来描述。

3. 主应力: 主应力描述的点应力状态表达式

主平面: 过一点所作微分面中, 只有法向应力而无切向应力的面称为主平面, 该面的坐标轴为主轴记为1, 2, 3。

主应力: 主平面上作用的法向应力为主应力, 记为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 并规定 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。

主坐标系中任意微分面上的应力如图1-5所示。

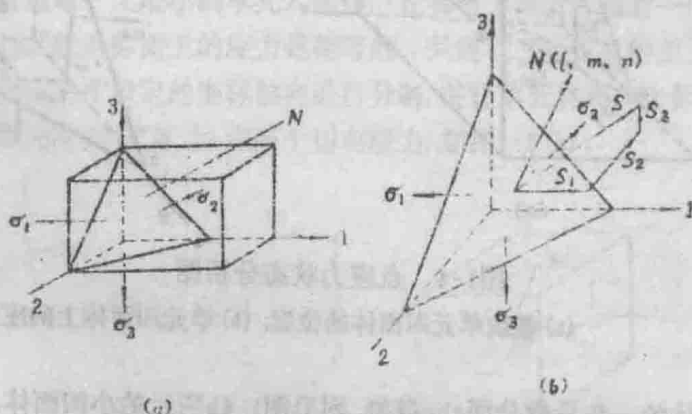


图1-5 主坐标系中任意微分面上的应力

与任意坐标系中点应力状态的数学表达式同理推导可将

$$\sigma_N = \sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2 \quad (1-6)$$

$$\tau_N = \sqrt{\sigma_1^2 l^2 + \sigma_2^2 m^2 + \sigma_3^2 n^2 - (\sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2)} \quad (1-7)$$

式中 l, m, n 为法线 N 与主轴之夹角和方向余弦。

三、主应力描述的应力张量及张量分析

在

$$(T_\sigma) = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (1-8)$$

中将坐标轴 x, y, z 转动到主坐标轴1, 2, 3, 则 $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$, 将各项同加以 σ_0 和减 σ_0 。则张量值不变,

得

$$(T_\sigma) = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} = (T_{\sigma_0}) = (T_\tau)$$

将($T_{\sigma\sigma}$)称为球张量;($T_{\tau\tau}$)称为偏张量。因为法向应力只引起线变形。当三个坐标轴方向的线变形相等时,则只引起金属的相似变形:膨胀或收缩。所以($T_{\sigma\sigma}$)也称等静球应力。

($T_{\sigma\sigma}$)>0造成体积膨胀,使材料内能降低,释放能量,易于导致材料破坏。如粉末冶金压制中的弹性后效,烧结中的体积膨胀均产生不利后果。

($T_{\sigma\sigma}$)<0造成试样体积收缩,材料吸收能量,内能增高材料贮能,强化。如粉末冶金中冷,热等静压,烧结中的活化,烧结,热压等,均是提高压块,烧结块强度的有效措施。致密金属加工中,挤压件强度优于其他加工件也是因为挤压时($T_{\sigma\sigma}$)较高的原因。体积收缩有利于缺陷愈合,所以低塑性或脆性材料的变形中往往选择($T_{\sigma\sigma}$)分量较高的应力状态进行变形。

材料力学中已知,切应力大小等于主应力差之半,所以($T_{\tau\tau}$)为切应力组成的张量。切应力引起角变形,导致形状改变,是金属塑性变形的主要动力,($T_{\tau\tau}$)所提供的能量消耗于形状的改变,晶格歪扭,也会造成材料强化,但效果低于($T_{\sigma\sigma}$)。

§ 1-3 主应力图

根据三个主平面上的主应力情况,应力状态可分为:

线应力状态-----仅一个主轴方向上有主应力作用;

面应力状态-----两个主轴方向上有主应力作用;

体应力状态-----三个主平面上均有主应力作用。

主应力图:表示所研究点(或研究物体某部分)各主轴方向上,有无主应力及主应力性质的定性的图形。它可以简单而明晰地描述物体变形时所承受的应力状态的型式。

将可能出现的九种主应力图按一定的规律排列如图1-6。

主应力图是金属压力加工中用来分析金属受力情况以及产生的一些后果时常用的工具之一。

图1-6中

L---表示线应力状态(L为Line的缩写);

P---表示平面应力状态(P为Plane的缩写);

B---表示体应力状态(B为Body的缩写)。

由图1-6可见,由上到下为由线应力到体应力。即为由简单到复杂;从左到右为压缩应力向拉伸应力发展。若以 $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ 评价,则表示 σ 值由负发展到正,

当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 < 0$ 时对致密金属而言,若内部没有空隙疏松等缺陷,则不可能发生塑性变形,但三向均匀受压可迫使金属内部缝隙贴紧,特别是高温下,借助原子的扩散可消除裂缝等内部缺陷,有利于提高金属的强度和塑性。这种三向相等的压缩应力,一般称为静水压力。静水压力值($T_{\sigma\sigma}$)大小可以用来判别某个实际的B₁图形—某个具体的金属塑性加工的优越性。

一般静水压力的强度越大即($T_{\sigma\sigma}$)越大,一次加工所获得的变形程度也越大。如挤压时

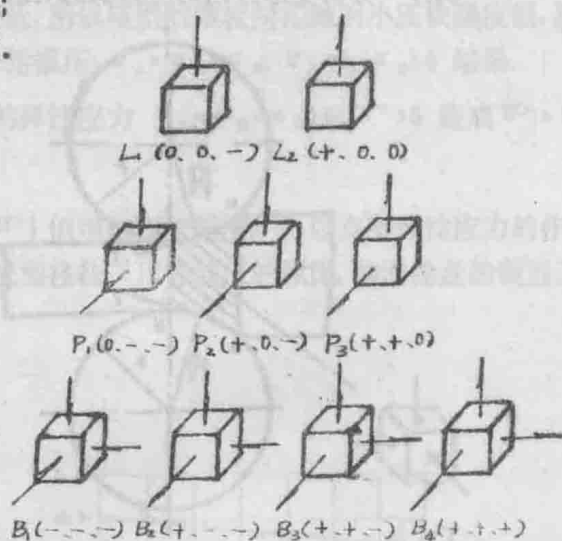


图1-6 九种主应力图

一次变形量比轧制就大得多。

一般致密金属加工中不可能采用 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 < 0$ 的 B_1 图, 但可人为地利用近乎静水压力型应力状态的优点来提高塑性变形过程的效果, 如挤压法, 闭模锻造, 冲挤, 静液挤压等等。

粉末冶金中对难变形的粉末如陶瓷粉, 球形硬质粉的成形, 往往采用 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 < 0$ 的应力状态, 即等静压成型。

异号图, 为图1-6的中间部分, B_2 、 B_3 中不论应力相等或不等, 均可产生塑性变形, 如通过模孔的拉伸变形, 带张力的带、箔轧制, 斜穿孔均属于 B_2 应力状态, B_3 图较为少见如开口冲孔即是。

同号图 B_4 , 不论应力相等与否, 都不能产生大的塑性变形。粉末冶金工艺中的弹性后效, 烧结膨胀属于这种应力状态, 变形中应尽量避免这种破坏性应力状态。

同理, 面应力状态和线应力状态中也存在这种由左(同号压缩应力) $\rightarrow$ 异号 $\rightarrow$ 右(同号拉伸应力) 的规律。同号拉伸均为不利变形的应力状态, 应避免而同号压缩应力为有利塑性变形的应力状态, 应加以利用。

线应力状态中, 实际上仅在简单静力拉伸时试样的计算长度内有 L_1 应力状态, L_2 的应力状态实际上并不存在。

主应力图应用举例:

例1: 分析变形区内的应力状态(图1-7)

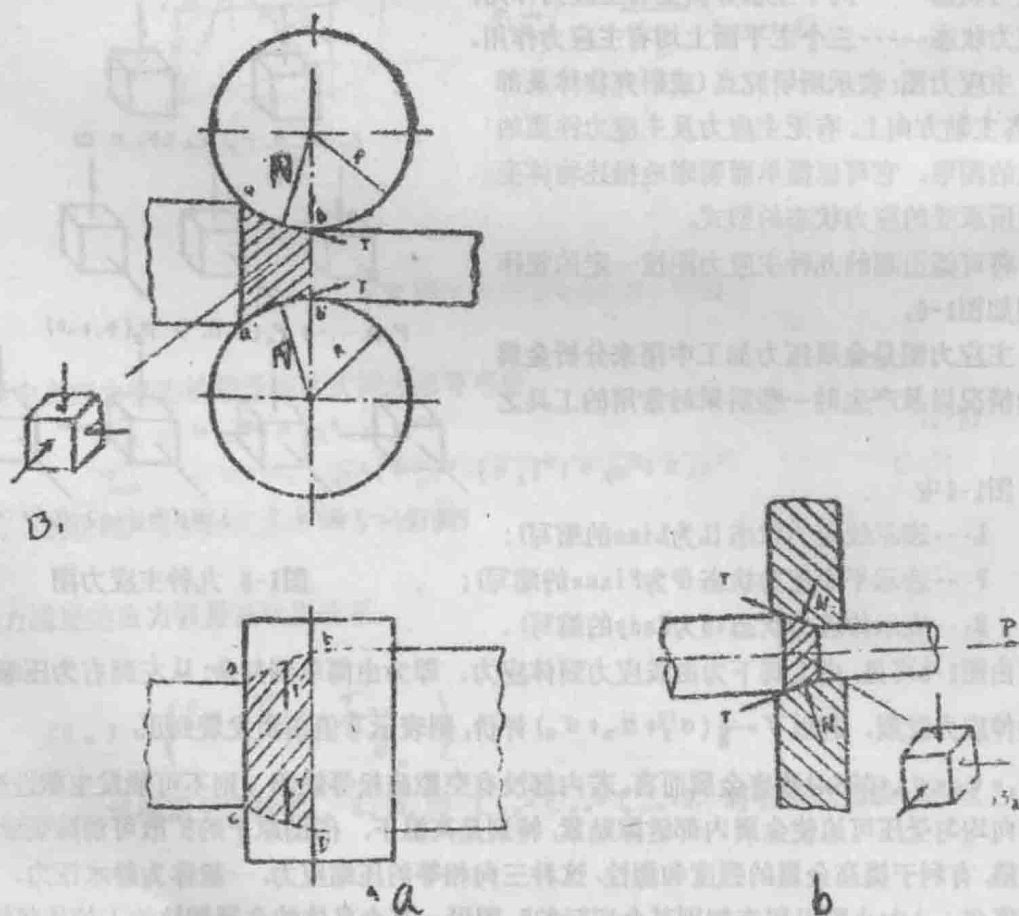


图1-7 平辊间轧制板材(a)和通过模孔拉伸(b)时变形区金属受力状态

图1-7a 为平辊轧制时的应力状态,

其中 N --- 轧辊给金属的正压力;

T --- 轧辊拖入金属时的摩擦力;

T' --- 变形区中阻止金属横向流动(宽展)的摩擦阻力。

未进轧辊缝和已出轧辊缝的部分称为刚端。刚端不参加变形,但由于变形金属为一整体,故刚端部分也阻碍变形区金属的自由伸长,所以可以用 B_1 近似地描述轧制变形区应力状态。

图1-7b为拉伸时应力状态,其中 N 为模子对金属的正压力, T 为接触面的摩擦力 P 为施加的外力,可以用 B_2 来描述之。因为拉伸中 $\sigma_1 > 0$ 出现正向应力,所以 $\sigma_{\text{主}} < \sigma_{\text{主}}$ 从主应力图可见,拉伸与轧制相比拉伸不利于变形,一次变形量比轧制小。

例2, 进行质量分析, 如粉末压制中压块密度分布分析(图1-8)

在上冲头接触处, P 为施加压力; T 为横向运动摩擦阻力 $T = \mu p$, 此外中间部分可用 B_1 描述。

下冲头处由于粉末压制过程中力的损耗, 此处的正压力 $P' < P$, 相应的摩擦力 T' 也小, 尽管也可以用 B_2 描述, 但上冲头处 $|\sigma_{\text{上}}| > |\sigma_{\text{下}}|$ 下冲头处的压强而粉末压制过程中密度的提高是靠粉末的移动, 转动, 变形和破碎, 这些量的大小取决于所受力的大小, 所以由图1-8b所测得的上冲头处密度为6.4。下冲头处仅为5.4也就是这种原因。

例3, 指导工艺设计。如有弥散强化型粉末 Ni-TiO_2 (简称 ODSNi), 试确定成形方法。ODSNi一般为球形粉, 粉末硬度, 强度高, 塑性低, 所以压型时颗粒间接触面小压块强度低, 颗粒弹性变形大, 释放的弹性应力 B_2 也大。若采用模压: $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, $\sigma_1 < 0$, $\sigma_3 < 0$ 结果, $\bar{\sigma} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) < 0$ 但 $|\bar{\sigma}|$ 小脱模时的弹性应力 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 > 0$; $\bar{\sigma}' > 0$ 造成 $\bar{\sigma}' > \sigma_3$ (压块压强度)造成压块溃散。

所以采用等静压 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 < 0$, 提高 $|\bar{\sigma}|$ 值增加压块强度, 可以克服弹性应力的作用, 达到成型的目的。这就是何以ODSNi粉的成型往往采用等静压的原因, 如涡轮盘的制造工艺为: ODSNi粉 → 冷等静压成型 → 等温锻造。

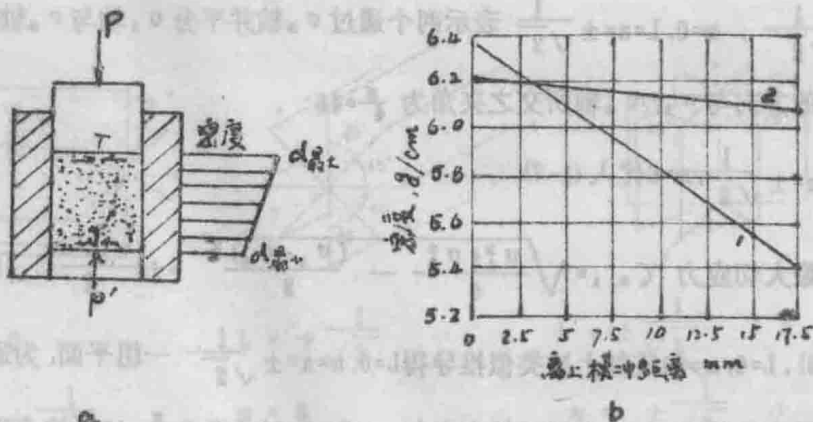


图1-8 电解铜单向压制时密度沿高度方向的分布

a--密度分布示意图; b--密度变化曲线; 1无润滑; 2添加4%石墨粉

§ 1-4 特征面及其意义

切应力是引起塑性变形的动力, 在式 (1-7) 中, τ_n 的斜面方位为何值时 $\tau_n = \tau_{max}$ 是塑性变形理论中最感兴趣的, 也是很重要的实际问题。同时有些面, 如与各坐标轴成等轴的面也是结晶学上中重要的面, 对这些面上的应力, 也是塑性变形中感兴趣的问题。所以, 特征面上应力的研究就具有重要的理论和实际意义。

一、主切平面和主切应力

已知方向余弦之间存在着 $L^2 + m^2 + n^2 = 1$ 的关系, 所以可将 $n^2 = 1 - L^2 - m^2$ 代入 (1-7) 消除一个变量得:

$$\begin{aligned} \tau_n^2 &= \sigma_1^2 L^2 + \sigma_2^2 m^2 + \sigma_3^2 (1 - L^2 - m^2) - [\sigma_1 L^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 (1 - L^2 - m^2)]^2 \\ &= (\sigma_1^2 - \sigma_3^2) L^2 + (\sigma_2^2 - \sigma_3^2) m^2 + \sigma_3^2 - [(\sigma_1 - \sigma_3) L^2 + (\sigma_2 - \sigma_3) m^2 + \sigma_3]^2 \end{aligned} \quad (1-8)$$

为求 τ_n 的最大值, 使 τ_n 对 L, m 偏导为零。

得确定 L, m 的两个方程

$$\begin{aligned} (\sigma_1^2 - \sigma_3^2) L - 2[(\sigma_1 - \sigma_3) L^2 + (\sigma_2 - \sigma_3) m^2 + \sigma_3](\sigma_1 - \sigma_3) L &= 0 \\ (\sigma_2^2 - \sigma_3^2) m - 2[(\sigma_1 - \sigma_3) L^2 + (\sigma_2 - \sigma_3) m^2 + \sigma_3](\sigma_2 - \sigma_3) m &= 0 \end{aligned}$$

若 $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$, 将上式除以 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 第二式除以 $(\sigma_2 - \sigma_3)$ 并加以整理得

$$\begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3) - 2[(\sigma_1 - \sigma_3) L^2 + (\sigma_2 - \sigma_3) m^2] L &= 0 \quad (a) \\ (\sigma_2 - \sigma_3) - 2[(\sigma_1 - \sigma_3) L^2 + (\sigma_2 - \sigma_3) m^2] m &= 0 \quad (b) \end{aligned} \quad (1-9)$$

这是 L, m 的三次方程, 每个方程有三个解。

其中 (1) $L=m=0, n=\pm 1$ 即主平面, 其上切应力为零, 不予考虑。

(2) $L \neq 0, m=0$ (1-9) 式 b 式得到满足, 代入 (1-9) a 得 $(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - 2L^2) = 0$ 若 $\sigma_1 - \sigma_3 \neq 0$

则必有 $1 - 2L^2 = 0$ 所以 $L = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ 以 $L = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}, m=0$ 代入 $n^2 = 1 - L^2 - m^2$

得 $n = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}, m=0, L=n = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ 表示两个通过 σ_3 轴并平分 σ_1 轴与 σ_2 轴夹角的平面, 过这

两个平面的方向与 σ_1, σ_2 轴所交之夹角为 $\frac{\pi}{4} = 45^\circ$ 。

将 $L=n = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}, m=0$ 代入 (1-7)

$$\text{得该平面最大切应力 } \tau_{s,1} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{4} - \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{2}} = \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2} \quad (\sigma_1 + \sigma_2)$$

(3), $L=0, m \neq 0$ 重复上述类似推导得 $L=0, m=n = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$ 一组平面, 为通过 σ_1 轴, 并平分

σ_2 和 σ_3 轴夹角的平面, 这个平面的方向与 σ_2 和 σ_3 轴交角为 $\frac{\pi}{4} = 45^\circ$ 这个平面上的最大切应力和正应力分别是

$$\tau_{s,2} = \pm \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_3)$$

(4) $L \neq 0, m \neq 0$ 是不可能的, 因为将式 (1-9) 的 a, b 式分别除以 L 和 m, 然后相减得 $\sigma_1 = \sigma_2$,

这与 $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ 的假定相矛盾。用类似的方法, 消除 m, 可得 $L = m = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}, n = 0$ 的一组。另

一组解, $L = n = 0, m = \pm 1$ 是指主微分面, 其上 $\tau = 0$, 类似推得一组通过某点的六个主平面:

$$L = \pm 1, m = n = 0, \tau = 0, \sigma_n = \sigma_1$$

$$m = \pm 1, L = n = 0, \tau = 0, \sigma_n = \sigma_2$$

$$n = \pm 1, L = m = 0, \tau = 0, \sigma_n = \sigma_3$$

对最大切应力面可归纳为:

$$\begin{array}{lll} L = 0 & m = n = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} & \tau_{2,3} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad \sigma_{2,3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \\ m = 0 & L = n = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} & \tau_{3,1} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2} \quad \sigma_{1,2} = \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2} \\ n = 0 & m = L = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} & \tau_{1,2} = \frac{\sigma_3 - \sigma_2}{2} \quad \sigma_{1,3} = \frac{\sigma_3 + \sigma_2}{2} \end{array}$$

这是一族表示通过一点有 12 个这样的面,

它通过一轴与另两轴相交成 $\frac{\pi}{4}$ 角度, 这样面上切应力达到最大值, 这种切应力称主应力, 它等于两个主应力差值的一半。

因为 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$,

$$\text{所以 } \tau_{1,2} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)$$

(1-12) 称为最大应力, 为最大主应力和最小主应力差的一半。

很明显

$$\tau_{1,2} + \tau_{2,3} + \tau_{3,1} = 0 \quad (1-13)$$

主切应力作用的平面称为主切平面, 通过一点可以作出 12 个主切平面, 如图 1-10。

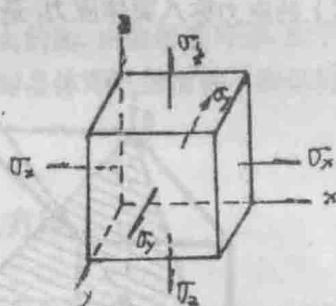


图1-9 通过一点的主平面体

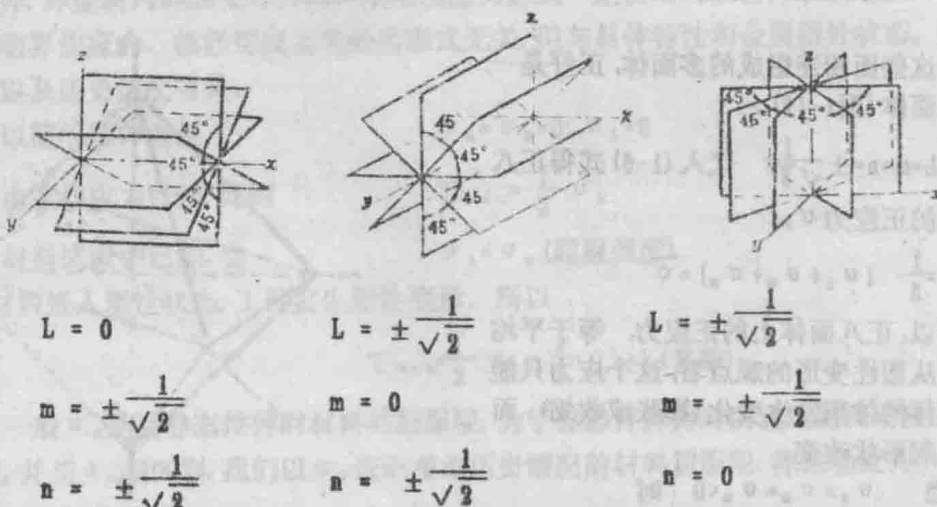


图1-10 一点附近的主切平面

将(1-10)式和(1-11)式归纳如下表:

$l =$	0	0	± 1	0	$\pm \frac{1}{\sqrt{2}}$	$\pm \frac{1}{\sqrt{2}}$
$m =$	0	± 1	0	$\pm \frac{1}{\sqrt{2}}$	0	$\pm \frac{1}{\sqrt{2}}$
$n =$	± 1	0	0	$\pm \frac{1}{\sqrt{2}}$	$\pm \frac{1}{\sqrt{2}}$	0
τ_1	0	0	0	$\pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}$	$\pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	$\pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$
正应力				$\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}$	$\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$	$\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$

二. 八面体面和八面体应力

围绕一点可作八个与主平面夹角相等的面, 这些面的方向余弦相等, 即 $l=m=n = \pm \frac{1}{\sqrt{3}}$

这些面构成一个正八面体面(图1-11), 正八面体面相当于面心立方晶系的 $\{111\}$ 面, 是变形的滑移面, 其上的应力称八面体应力, 是塑性变形十分感兴趣的应力(图1-12)。

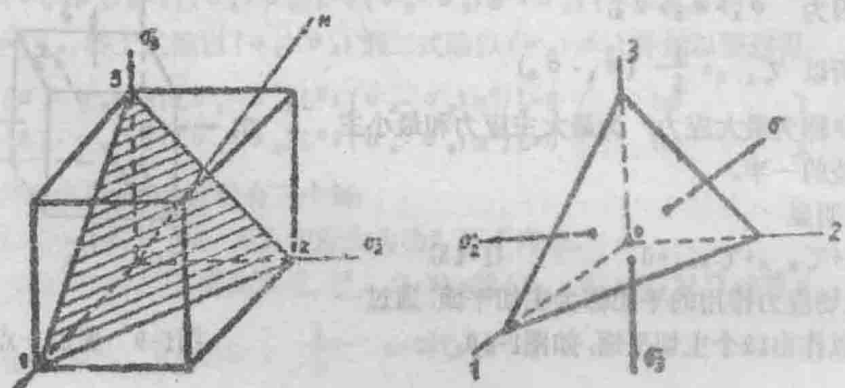


图1-11 正八面体面

将这些面相连组成的多面体, 正好是一个正八面体(图1-12)。

将 $l=m=n = \pm \frac{1}{\sqrt{3}}$ 代入(1-6)式得正八面体上的正应力 σ_o 。

$$\sigma_o = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \bar{\sigma}$$

所以, 正八面体上的正应力, 等于平均应力。从塑性变形的观点看, 这个应力只能引起物体的体积发生变化(膨胀或收缩), 而不能引起形状改变。

当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 < 0$ 时

这个平均应力就称为静水压力。

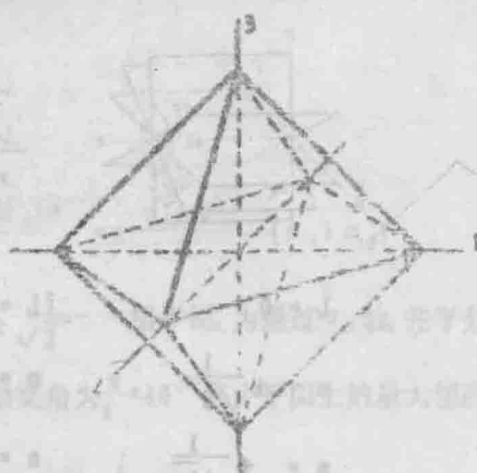


图1-12 正八面体

将 m, n, L 的值代入(1-7)式得正八面体上切应力 τ 。

$$\tau = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1-12)$$

所以正八面体切应力为主应力差平方和开方的三分之一。

塑性变形中, 为了使用方便, 将 τ 乘以 $\frac{3}{\sqrt{2}}$ 称为'等效应力' σ_1 。

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1-13)$$

当 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0, \sigma_1 \neq 0$ 时, 此时为单向应力状态, 代入(1-13)得 $\sigma_1 = \sigma_1$ 与单向应力值相等, 故为等效。对已知点的应力状态, σ_1 值与坐标选择无关, σ_1 值的确定仅与材料状态有关, 在计算中只用 σ_1 的绝对值。

σ_3 相当于应力球张量, τ 相当于应力偏张量。 τ 只引起形状改变, 当 σ_3 变化而 τ 不变时, 材料除形状变化相似外, 内能变化不同, σ_3 大者, 材料强度高、塑性发挥好。如棒材挤压和拉伸, 变形相似, 但挤压变形者强度和加工量均比拉伸者大得多。

综上所述, 对物体内部任意一点, 在取定主坐标系的情况下, 对金属塑性加工理论最有直接关系的是两组十对特殊面, 六对主平面, 四对八面体面, 它们都和变形力计算理论有密切关系, 是变形力计算中不可缺少的基本概念。

同时, 这些特征面也是立方晶系中原子密度最大的面。由金属学可知, 原子密度最大的面为最易滑移面, 这些面上的应力达到位错启动应力时晶体即开始滑移。所以特征面的应力状态对塑性变形十分重要。

§ 1-5 塑性方程

金属塑性变形理论中最重要的课题之一, 是确定金属受外力作用时, 由弹性状态过渡到塑性状态而开始塑性变形时, 在金属内部产生的主应力和金属的物理常数之间的关系, 即金属产生塑性变形所需要施加的力与金属本身性质所处状态的关系。根据实验和实践, 提出切应力定律, 即金属内部因受外力而产生的切应力达到一定值时, 金属开始塑性变形, 此切应力值称为临界切应力。临界切应力与外力形式无关, 但与晶体特性和金属所处状态, 变形温度和速度以及历史情况有关。

以简单拉伸为例

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0; \sigma_1 > 0$$

由主切应力可知, 此时

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \sigma_1$$

材料试验中已知, 当

$$\sigma_1 = \sigma_s \text{ (屈服强度)}$$

时, 材料进入塑性状态, 工件发生塑性变形。所以

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \sigma_1 = \frac{1}{2} \sigma_s = k \text{ (常数)}$$

一般 σ_s 是指静态拉伸时材料的屈服限, 为了标志计算力时所选用的流动应力, 考虑历史情况, 并与 σ_s 相区别, 我们以 σ_T 表示考虑历史情况的材料屈服限, 称流动应力, 简单拉伸时的塑性条件为 $\sigma_1 = \sigma_T$ 或 $\tau_{max} = \frac{1}{2} \sigma_T$

(1-14)