第二章　思考、讨论题

- 层理的概念、类型及识别标志
- 如何利用沉积岩的原生构造判定岩层的顶底面？
- 如何利用喷出岩的原生构造判定岩层的新老顺序？
- 侵入岩体的原生构造有几种主要类型？

第三章 地质构造分析的力学基础

主讲人：刘志宏

吉林大学地球科学学院

地质构造分析的力学基础

—应力分析

- 地质构造是在力的作用下，由组成地壳（或岩石圈）的岩石变形的产物。在力的作用下，岩石内部质点发生位移而引起变形。因此，要探索岩石变形、构造形成的规律，力学基础知识是必不可少的。

地质构造分析的力学基础

- 应力
- 应变
- 岩石变形行为

本讲内容提要

- 有关应力的基本概念
- 单轴应力状态
- 单轴莫尔圆及其物理意义

第一节 应力与应力状态

1、力

- 力与力的性质
  - 力：物体间的相互作用，它使物体发生运动状态的改变。
  - 力是矢量，基本要素包括方向、大小和作用点。
  - 力可以合成和分解

第一节 应力与应力状态

- **2、外力和内力**
- 外力：外界作用于某一物体之上的力。
  - 面力（压力）：通过某一界面的相互作用力。
  - 体力（重力、磁力）：作用于物体内所有质点的力。

第一节 应力与应力状态

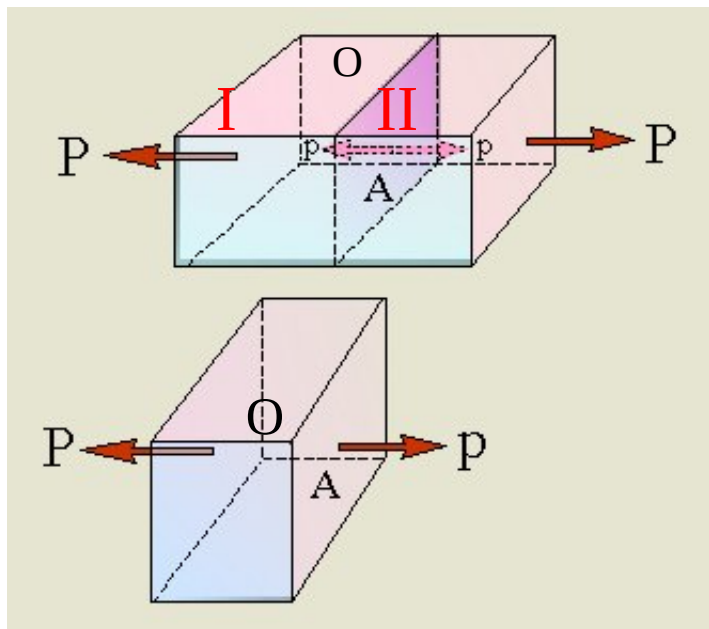
- **2、外力和内力**
- 内力：物体内部质点间的作用力
  - 固有内力：在没有外力作用时物体内质点间的相互作用力，它保持物体的形状和状态
  - 附加内力：在外力作用下固有内力的改变量，它引起物体形状和状态的变化。
  - 附加内力常称为内力。
- 外力和内力的相对性—尺度

第一节 应力与应力状态

3、应力

- 截面A上的平均应力：$P_m=\Delta P/\Delta A$，其中ΔP为作用在面积 ΔA上的内力。
- 点O附近的应力(合应力)：

$$P=\lim \Delta P/\Delta A=dP/dA \quad (\Delta A\rightarrow 0)$$



第一节 应力与应力状态

3、应力

应力是在面力或体力作用下，物体表面或物体内部假想的面上单位面积的一对大小相等、方向相反的力，是作用在该面上的力的大小的度量。

$$P=\lim \Delta P / \Delta A = dP/dA$$

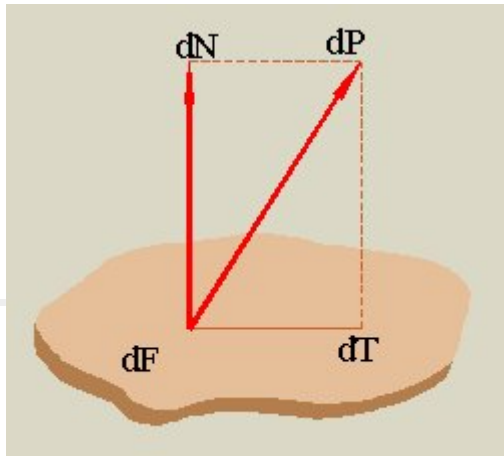
$$(\Delta A \rightarrow 0)$$

第一节 应力与应力状态

3、应力

$$P=\lim \Delta P / \Delta A = dP/dA \quad (\Delta A \to 0)$$

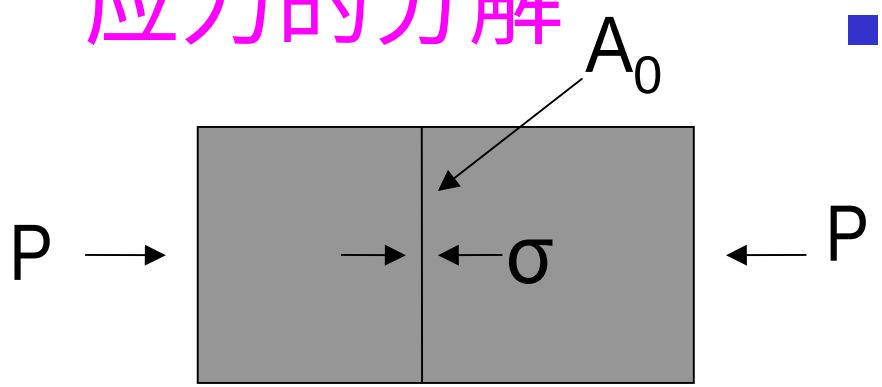
- 应力的单位：
  - 力/面积—牛顿/米^2（N/m ^{2})—即帕斯卡(Pa)
- 应力的性质：
  - 应力是一个矢量，有大小、方向，可以合成和分解

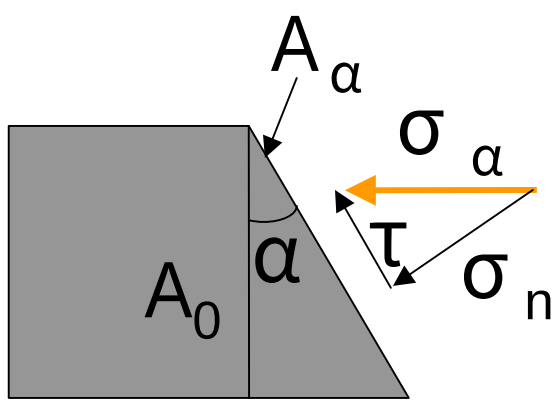


第一节 应力与应力状态

3、应力

应力的分解



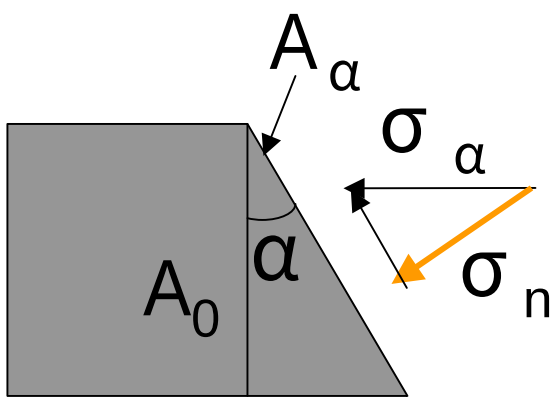


- 当截面与应力方向不垂直时，合应力可分解为垂直于作用面的正应力和平行于作用面的剪应力。
- 特别注意：应力与作用面密切相关

第一节 应力与应力状态

3、应力

正应力



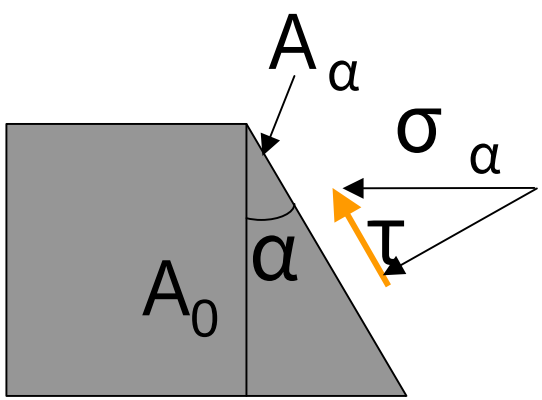
- 正应力也称作直应力，以σ或σ_n表示。
- $\sigma = \sigma_\alpha \cos\alpha$
- 正应力可以是压应力，也可以是张应力。
- 正应力符号规定：
  - 压应力为正
  - 张应力为负

注意：方向与材料力学中的规定相反

第一节 应力与应力状态

3、应力

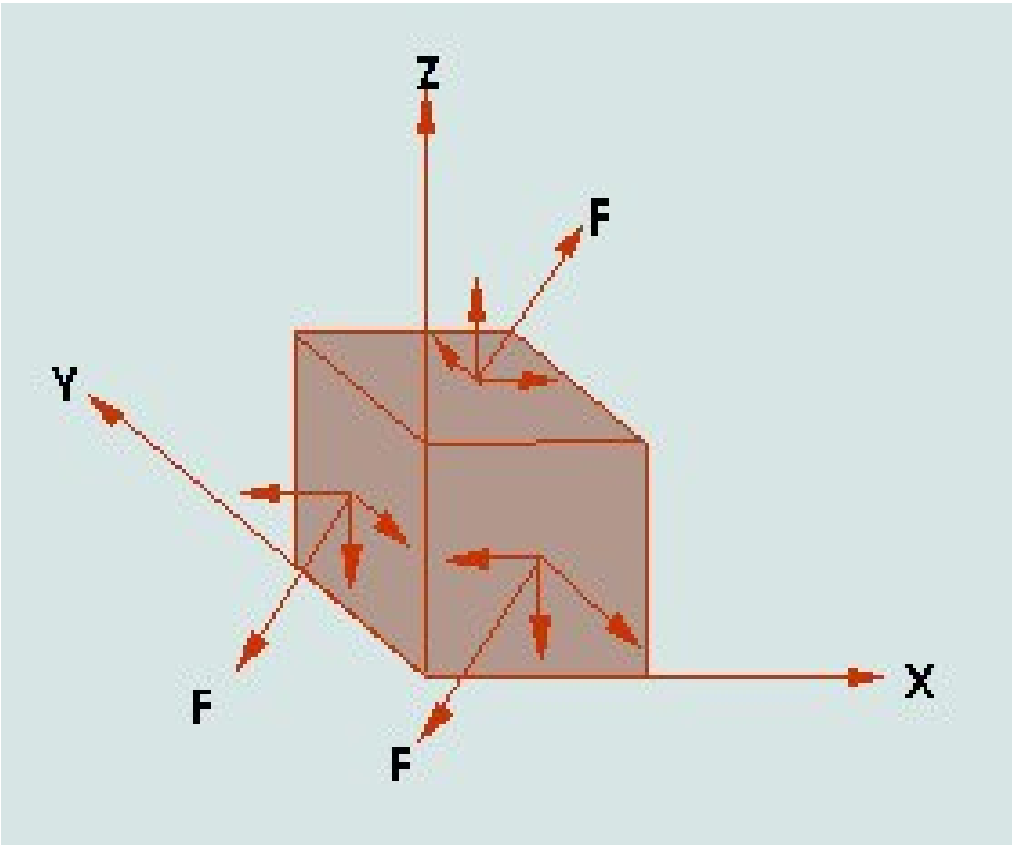
剪应力



- 剪应力亦称作切应力，以τ或σ_s表示。
- $\tau = \sigma_\alpha \sin\alpha$
  - 剪应力符号规定：
  - 使物体沿逆时针方向旋转的剪应力为正
  - 使物体沿顺时针方向旋转的剪应力为负

第一节 应力与应力状态

4、应力状态

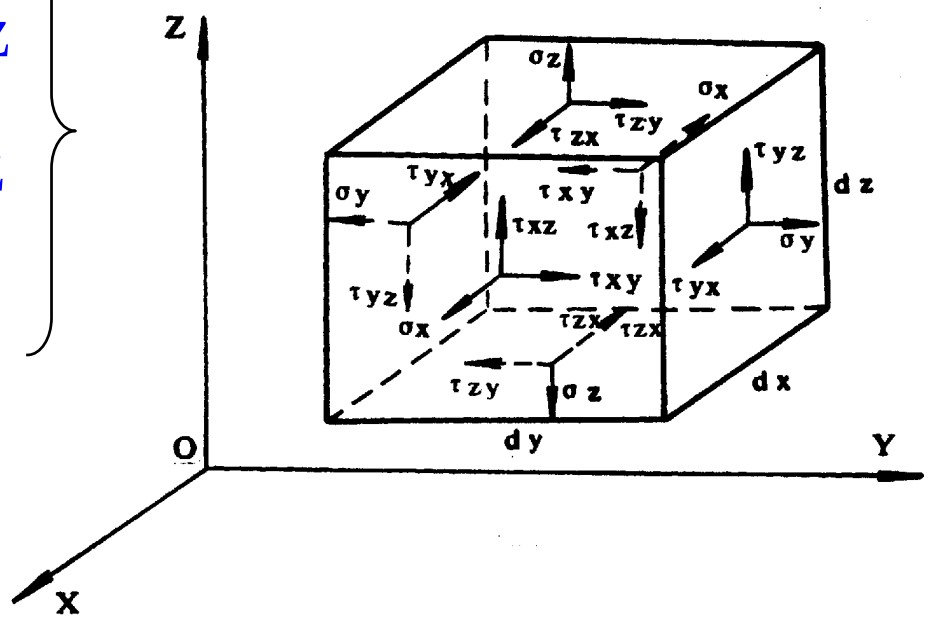


- 取岩石中P点附近的一个六面体单元体；
- 每个面上的应力可分解为三个平行于空间直角坐标系中三 个坐标轴的分量；
- 在平衡力系中，三个面上的九个应力分量限定了这一点的应力状态。

点应力状态

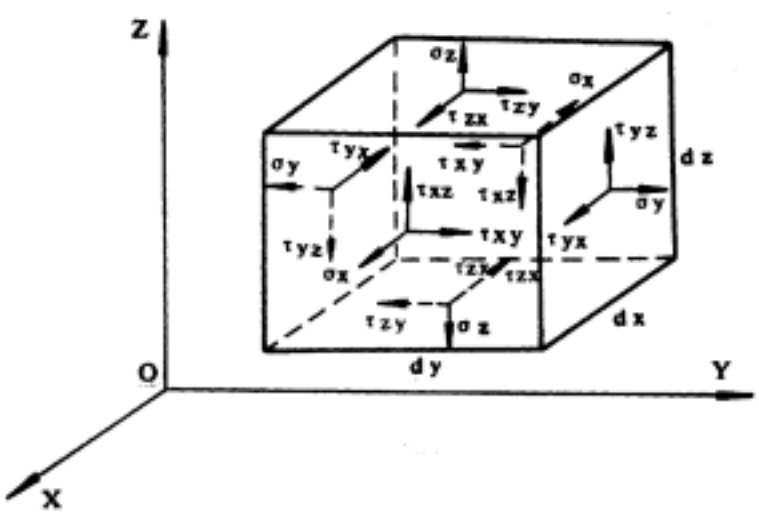
- 点应力状态的应力矩阵

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{Bmatrix}$$



点应力状态

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{Bmatrix}$$



- 在平衡力系中，互相垂直平面上作用的相互垂直的一对剪应力大小相等、符号相反—剪应力互等定律，即：

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

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

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

所以，空间一点的应力状态可以由 6 个独立的分量完全限定。

第一节 应力与应力状态

5、主应力

- 在平衡力系中，虽然在一点附近可以有很多上述六面体，但总可以找到其中的一个，在三个互相垂直的面上只有正应力，而没有剪应力。这种面称主平面（或主应力面），其上的正应力称主应力。
- 主应力的方向线称为主应力轴或主方向。
  - 主应力是空间一点上量值最大的正应力。

第一节 应力与应力状态

5、主应力

主应力与差应力

- 一点的应力状态可以用三个主应力的大小和方向表示，从大到小依次为σ_1，σ_2，σ_3。$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$。
- 最大主应力与最小主应力之差，是一个非常重要的量，称为差应力（$\sigma_1 - \sigma_3$）。

第一节 应力与应力状态

5、主应力

应力状态

- 单轴应力状态
  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$，单轴压缩
  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0 > \sigma_3$，单轴拉伸
- 双轴应力状态（平面应力状态）
  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = 0$，双轴压缩
  $\sigma_1 > \sigma_2 = 0 > \sigma_3$，压缩-拉伸
  $\sigma_1 = 0 > \sigma_2 > \sigma_3$，双轴拉伸

第一节 应力与应力状态

5、主应力

应力状态

- 三轴应力状态 —— 三个主应力都不等于0

  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$，一般应力状态

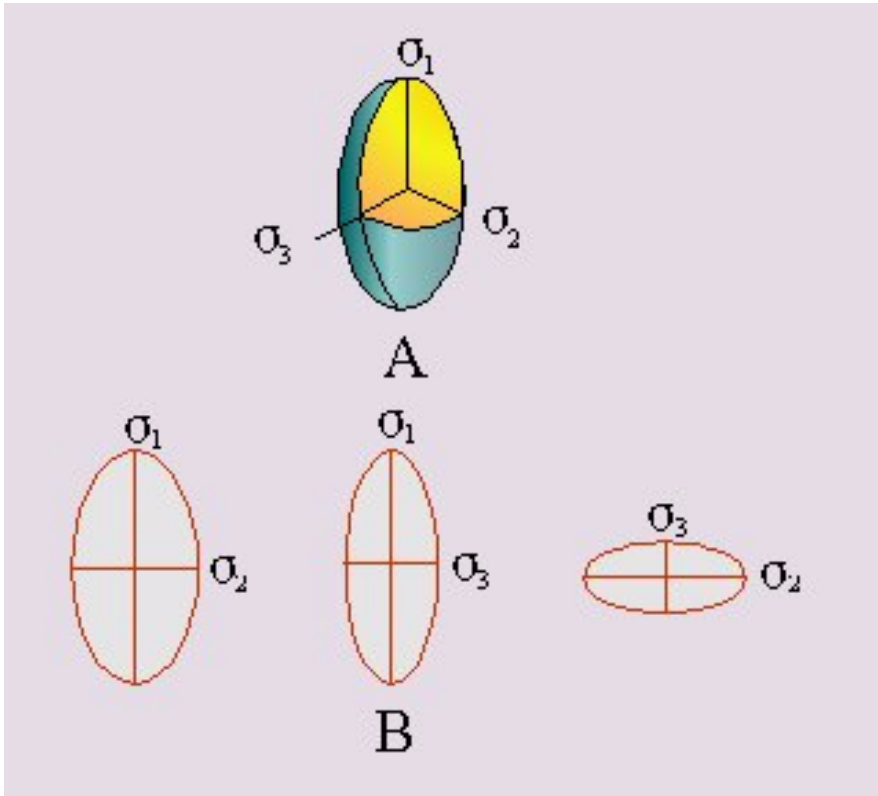
  当 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 时，为均压，称作静水压力或流体静压力。这种状态只引起物体体积变化，不改变其形状。

第一节 应力与应力状态

5、主应力

应力椭球体

- 一点P的应力状态可以用一个椭球体表示，椭球体的球心为P；半径分别为三个主应力。——应力椭球
- 过任意两个主应力轴可以确定一个椭圆，称为应力椭圆。



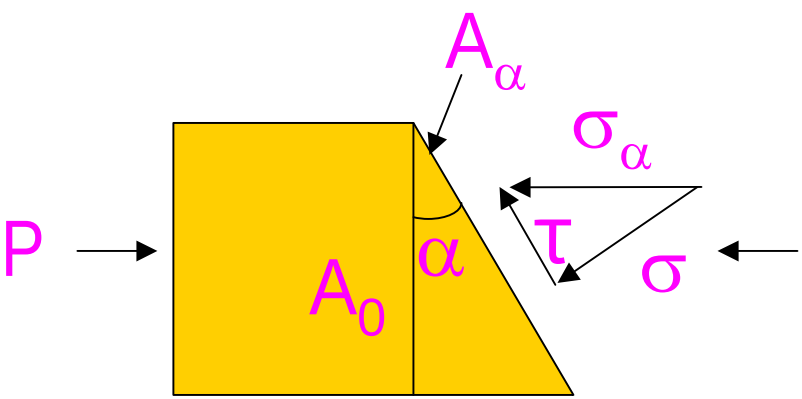
应力椭球和应力椭圆

第二节 应力分析

- 应力分析：在一定的力（单轴、双轴或三轴）的作用下，物体内部任意方向的截面上，正应力与剪应力的变化规律。

一、二维应力分析—单轴应力状态的特点

单轴应力状态：物体仅受到一个方向的作用力，而其它方向的正应力和剪应力均为零。



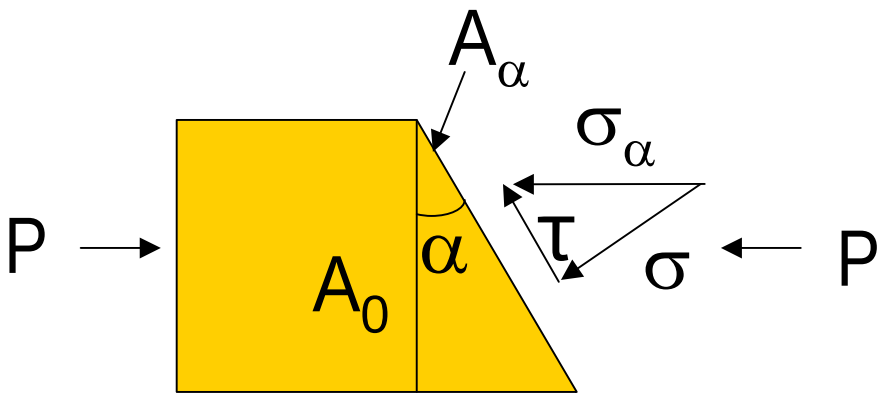
注意：$\sigma_1 = P / A_0$

$\cos\alpha = A_0 / A_\alpha$

- $\sigma_\alpha = P / A_\alpha$
  $= P / A_0 \cos\alpha = \sigma_1 \cos\alpha$
- $\sigma = \sigma_\alpha \cos\alpha = \sigma_1 \cos^2\alpha$
  $= \sigma_1/2(1+\cos 2\alpha)$
- $\tau = \sigma_\alpha \sin\alpha = \sigma_1 \sin\alpha\cos\alpha$
  $= 1/2\sigma_1 \sin 2\alpha$

一、二维应力分析—单轴应力状态的特点

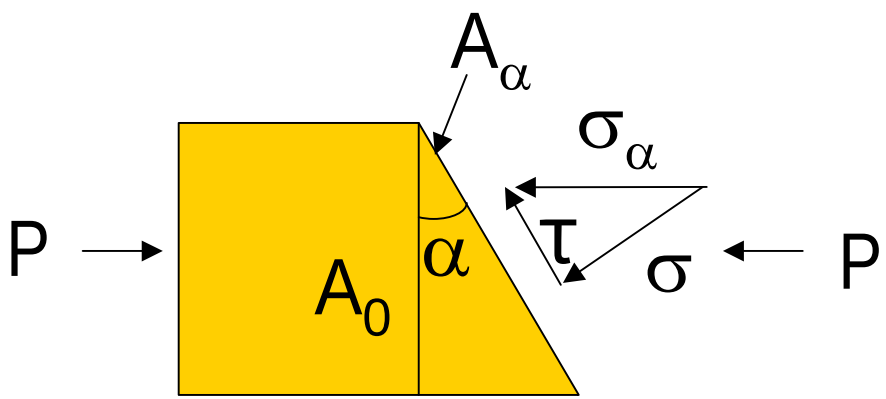
- 上述公式适用于挤压和拉伸，但拉伸为负
- 当$\alpha=0$时，$\cos 2\alpha=1$, $\sigma=\sigma_1$；当α介于0和90之间时，$-1<\cos 2\alpha<1$， $\sigma<\sigma_1$。
  - 结论1：在与挤压方向垂直的截面上正应力最大；与拉伸方向垂直的截面上，正应力最小。
- 当$\alpha=0$时，$\sin 2\alpha=0$， $\tau=0$
  - 结论2：与挤压或拉伸方向垂直的截面上无剪应力



- $\sigma=1/2\ \sigma_1(1+\cos 2\alpha)$
- $\tau=1/2\sigma_1\sin 2\alpha$

一、二维应力分析—单轴应力状态的特点

- 当α=45时， sin 2α=1，τ =1/2σ_1；当 α>45或α<45时，sin 2α<1
  - 结论3：在与挤压或拉伸方向呈45交角的截面上剪应力最大。称为最大剪切面。
- 当α=90时，τ =0，σ=0
  - 结论4：在平行于作用力的截面上，既无正应力，也无剪应力。



- $\sigma=1/2\ \sigma_1(1+\cos 2\ \alpha)$
- $\tau\ =1/2\sigma_1 \sin 2\alpha$

一、二维应力分析—单轴应力状态的特点

- 单轴应力莫尔（Mohr）圆：表达任意方向截面上正应力和剪应力的大小与主应力之间的关系。

$$\sigma-\frac{\sigma_1}{2}=\frac{\sigma_1}{2}\cos 2\alpha$$

$$(\sigma-\frac{\sigma_1}{2})^2=(\frac{\sigma_1}{2})^2\cos^2 2\alpha$$

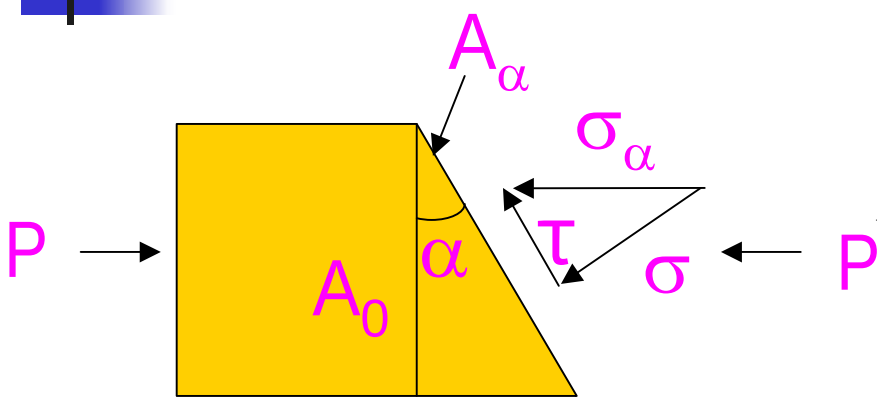
$$\tau^2=(\frac{\sigma_1}{2})^2\sin^2 2\alpha$$

- $\sigma=1/2\ \sigma_1(1+\cos 2\ \alpha)$
- $\tau\ =1/2\sigma_1\sin 2\alpha$

$$(\sigma-\frac{\sigma_1}{2})^2+\tau^2=(\frac{\sigma_1}{2})^2\cos^2 2\alpha+(\frac{\sigma_1}{2})^2\sin^2 2\alpha=(\frac{\sigma_1}{2})^2(\cos^2 2\alpha+\sin^2 2\alpha)$$

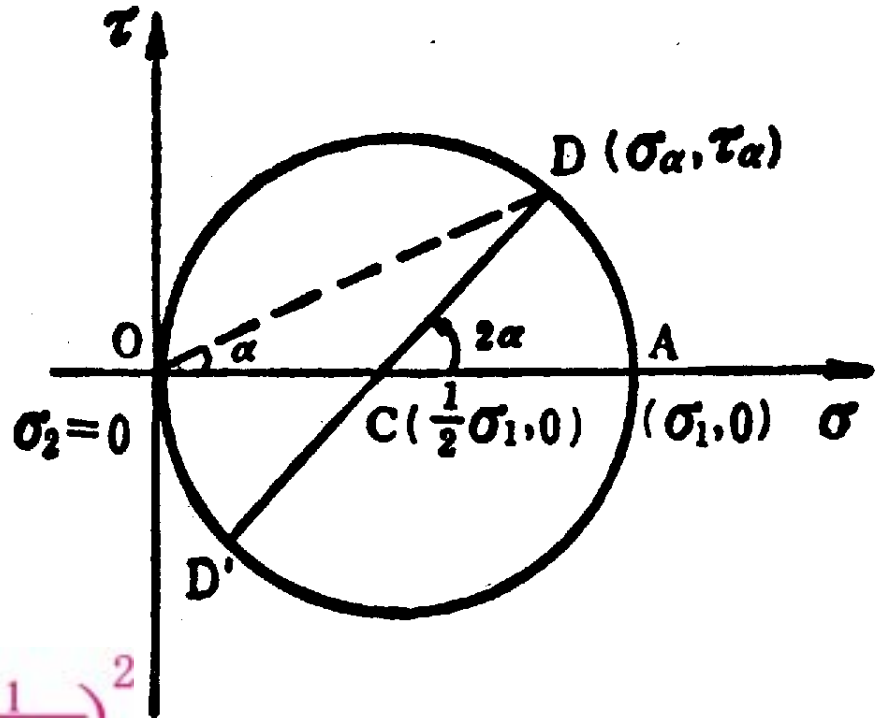
$$(\sigma-\frac{\sigma_1}{2})^2+\tau^2=(\frac{\sigma_1}{2})^2$$

一、二维应力分析—单轴应力状态的特点



- $\sigma=1/2\ \sigma_1(1+\cos2\ \alpha)$
- $\tau\ =1/2\sigma_1\sin2\alpha$

$$(\sigma_1-\frac{\sigma_1}{2})^2+\tau^2=(\frac{\sigma_1}{2})^2$$



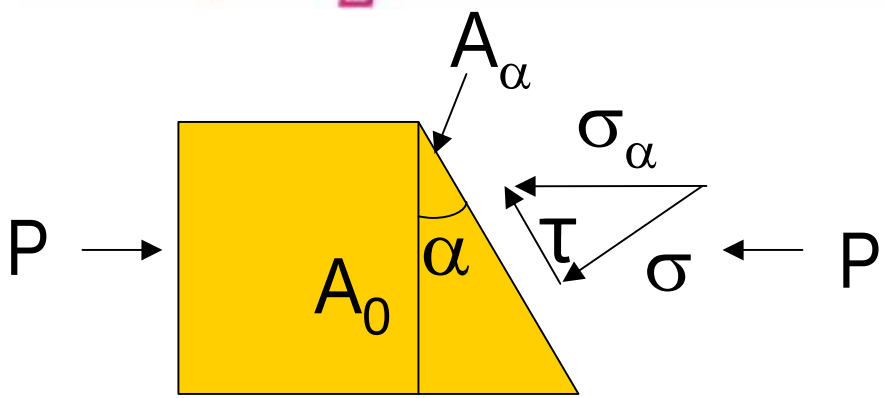
单轴莫尔应力圆

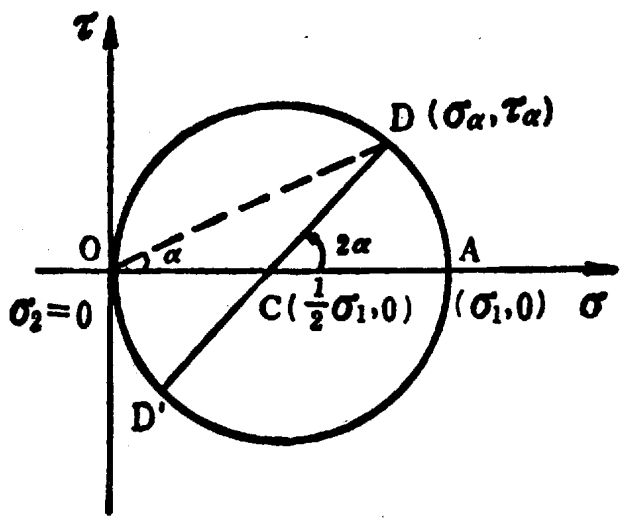
一、二维应力分析—单轴应力状态的特点

单轴莫尔圆的物理意义：

1）应力圆代表物体内一点的应力状态，通过该点的任一截面上的应力分量σ_α和τ_α 由应力圆上的一个对应点代表。在物体内，截面逆时针旋转 α角，在莫尔圆上也按同一方向旋转2 α。

$$(\sigma_1 - \frac{\sigma_1}{2})^2 + \tau^2 = (\frac{\sigma_1}{2})^2$$





单轴莫尔应力圆

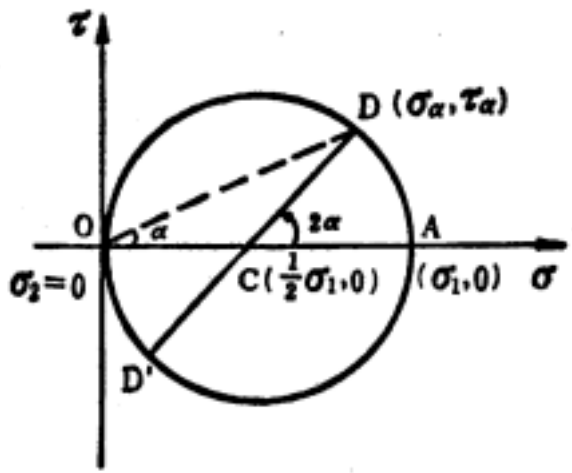
一、二维应力分析—单轴应力状态的特点

单轴莫尔圆的物理意义：

2） τ_α 的最大值就是圆的半径，等于$1/2\sigma_1$，它作用在法线与主应力σ_1成±45的截面上，而且两个最大剪应力作用面相互垂直，称为共轭剪切面。

3）最大和最小正应力分别在A和O点，此两点对应的截面上，剪应力等于零。

$$\left(\sigma_1-\frac{\sigma_1}{2}\right)^2+\tau^2=\left(\frac{\sigma_1}{2}\right)^2$$



单轴莫尔应力圆

本讲要点

- 应力的类型
  - 合应力，正应力，剪应力，主应力，差应力（应力差）
- 单轴应力状态分析

本讲思考题、讨论题

1. 基本概念：应力、合应力、正应力、剪应力、静岩压力、差应力、主应力、应力椭球与应力椭圆
2. 物体内部假想的面是任意方向的吗？
3. 什么是剪应力互等定律？
4. 单轴应力状态的概念
5. 单轴莫尔圆及其物理意义