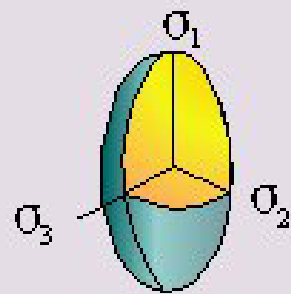
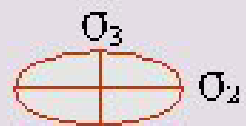
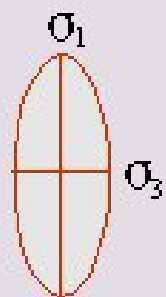
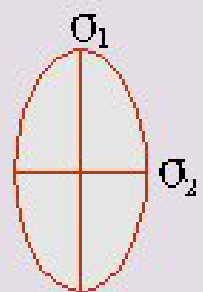


讨论题：应变

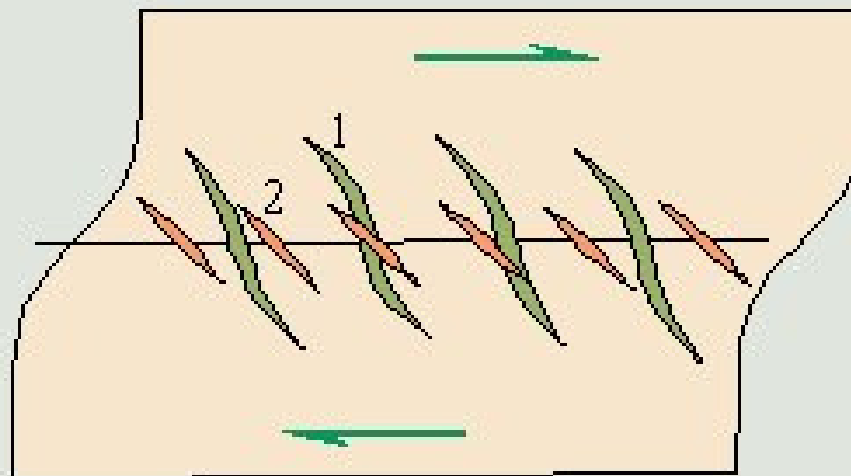
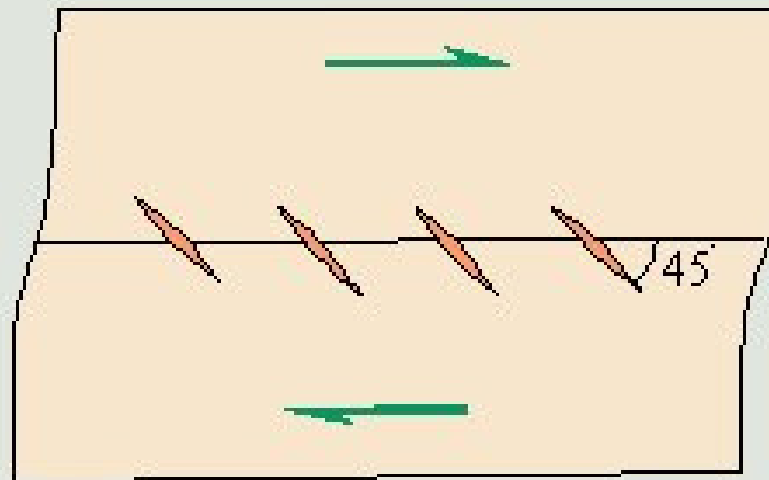
- 什么是线应变，剪应变？挤压/拉张力或剪切力与线应变和剪应变是怎样联系的？
- 应变椭球体中的主应变面（XY，YZ，XZ）面与主应力有什么关系？*
- 递进变形的概念对构造分析有什么意义？*
- 在Flinn图解中，三种形态的应变椭球体分别反映岩石受到何种变形？其可能的受力方式是什么？



A



B



地质构造分析的力学基础

3.1 应力

3.2 应变

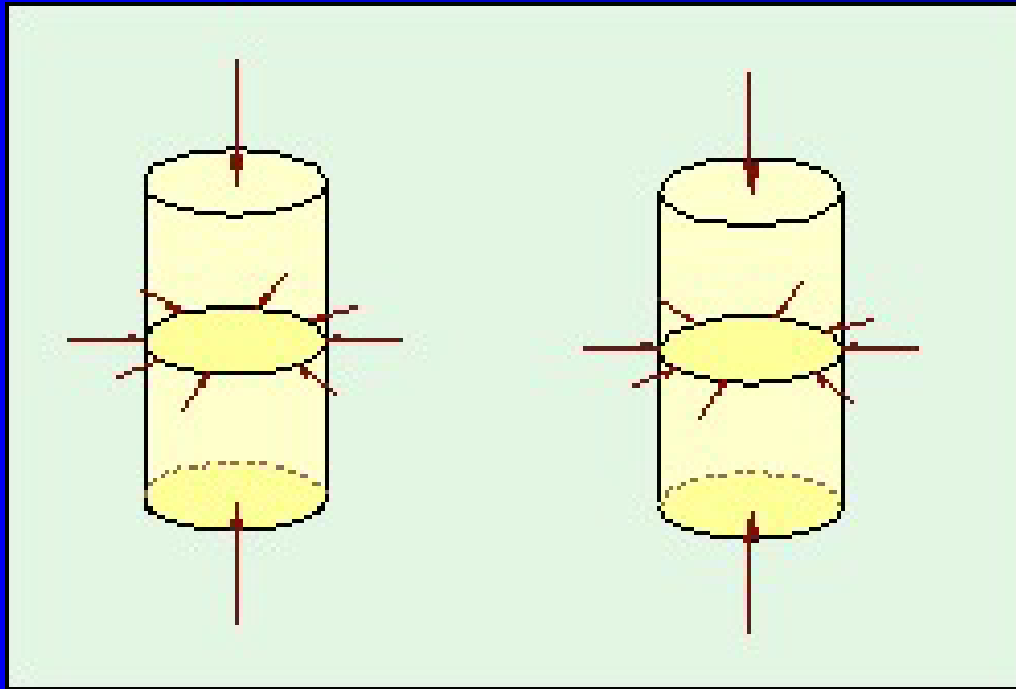
3.3 岩石变形行为

3.3 岩石变形行为

- 一般实验条件下岩石的变形行为
- 岩石的脆性破坏
- 影响岩石变形的因素
- 岩石的塑性变形机制

3.3.1

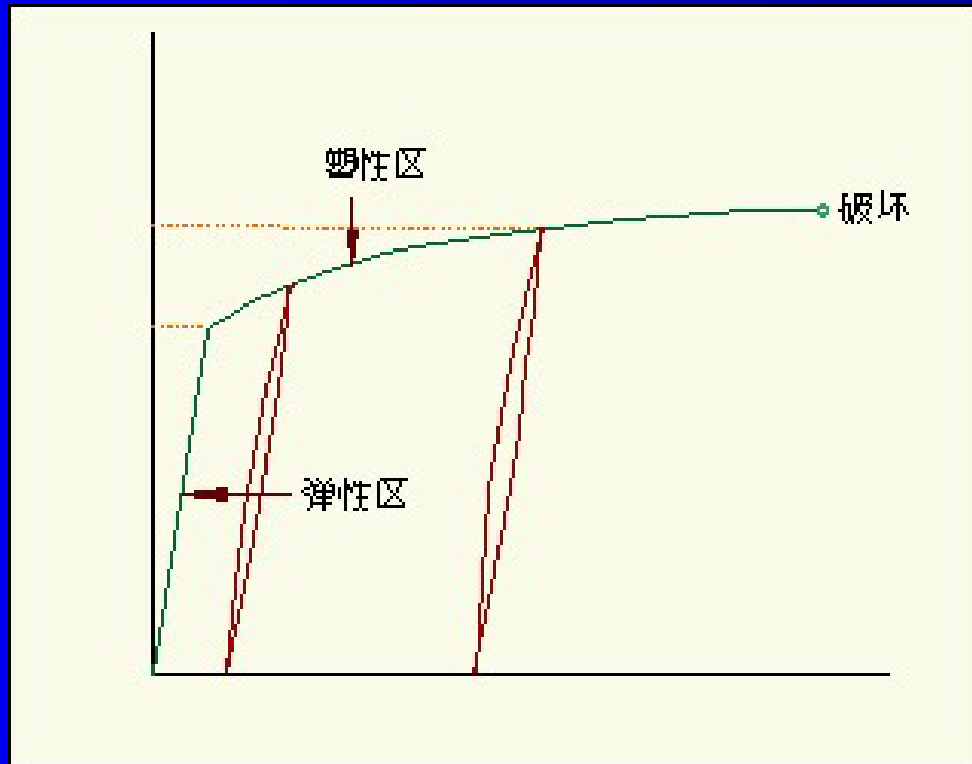
一般实验条件下的岩石变形行为



- 三轴压力机实验温压可达到1000MPa, 800°C
 - 用流体压力模拟围压

3.3.1 一般实验条件下的岩石变形行为

岩石变形阶段



- 弹性变形阶段
 - 弹性极限
- 塑性变形阶段
 - 强度（极限）
- 断裂变形阶段
- 岩石抗压强度 >>> 抗拉强度

3.3.1 一般实验条件下的岩石变形行为

岩石变形阶段

- 材料性质
脆性材料：断裂发生前应变量 $<5\%$
韧性材料：断裂发生前应变量 $>10\%$
- 材料性质？
 - 花岗岩
 - 橡胶
 - 粉笔
 - 馒头
 - 沥青

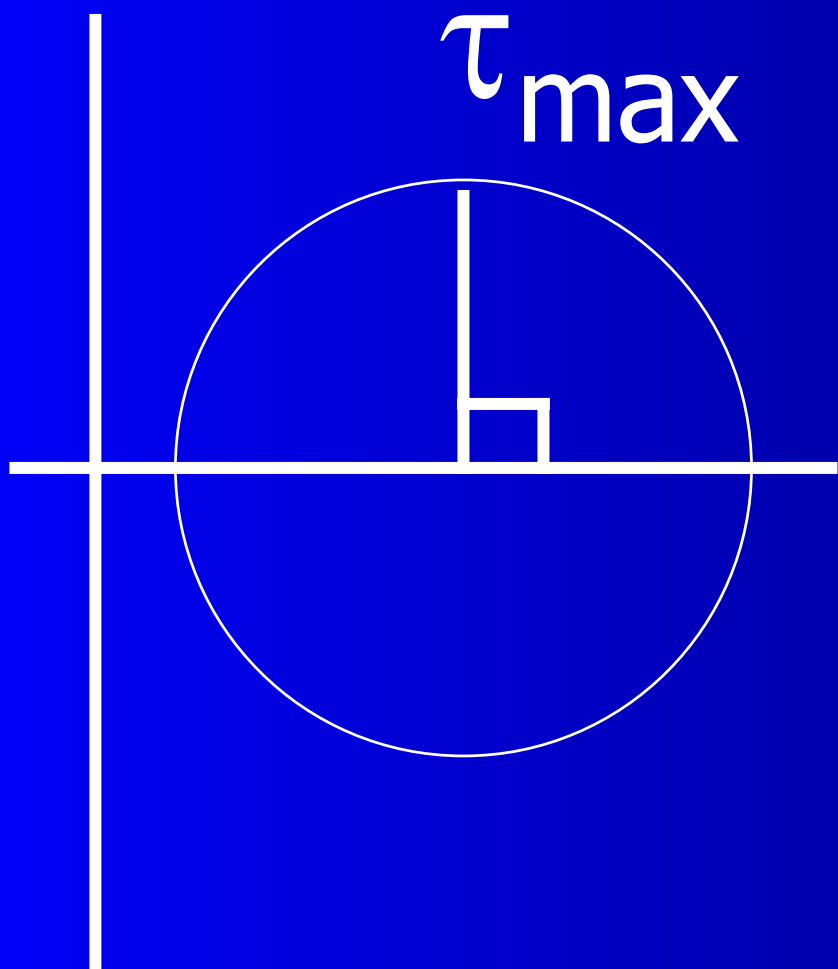
3.3.2

岩石的脆性破坏

- 试验和自然界宏观破裂的主要形式
 - 张裂——位移方向垂直于破裂面
 - 剪裂——位移方向平行于破裂面

3.3.2.1

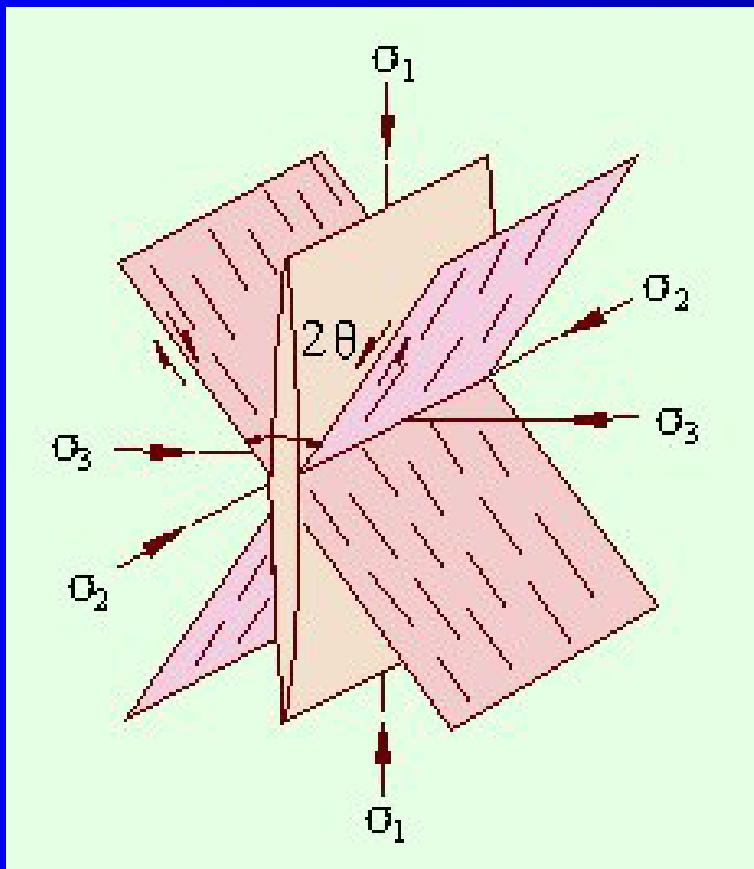
库仑剪破裂准则



- 问题的提出
 - 岩石实验中破裂面与应力圆中最大剪应力作用面不一致
 - 自然界岩石实际共轭剪裂面夹角也不是 90°
- 库仑准则的核心
 - 剪破裂不仅与剪应力有关，而且与正应力有关
- 经验公式

3.3.2.1

库仑剪破裂准则



- 问题的提出
 - 岩石实验中破裂面与应力圆中最大剪应力作用面不一致
 - 自然界岩石实际共轭剪破裂面夹角也不是 90°
- 库仑准则的核心
 - 剪破裂不仅与剪应力有关，而且与正应力有关
- 经验公式

3.3.2.1

库仑剪破裂准则

- 表达式: $\tau = \tau_0 + \mu \sigma_n$

τ —— 剪破裂发生时的剪应力

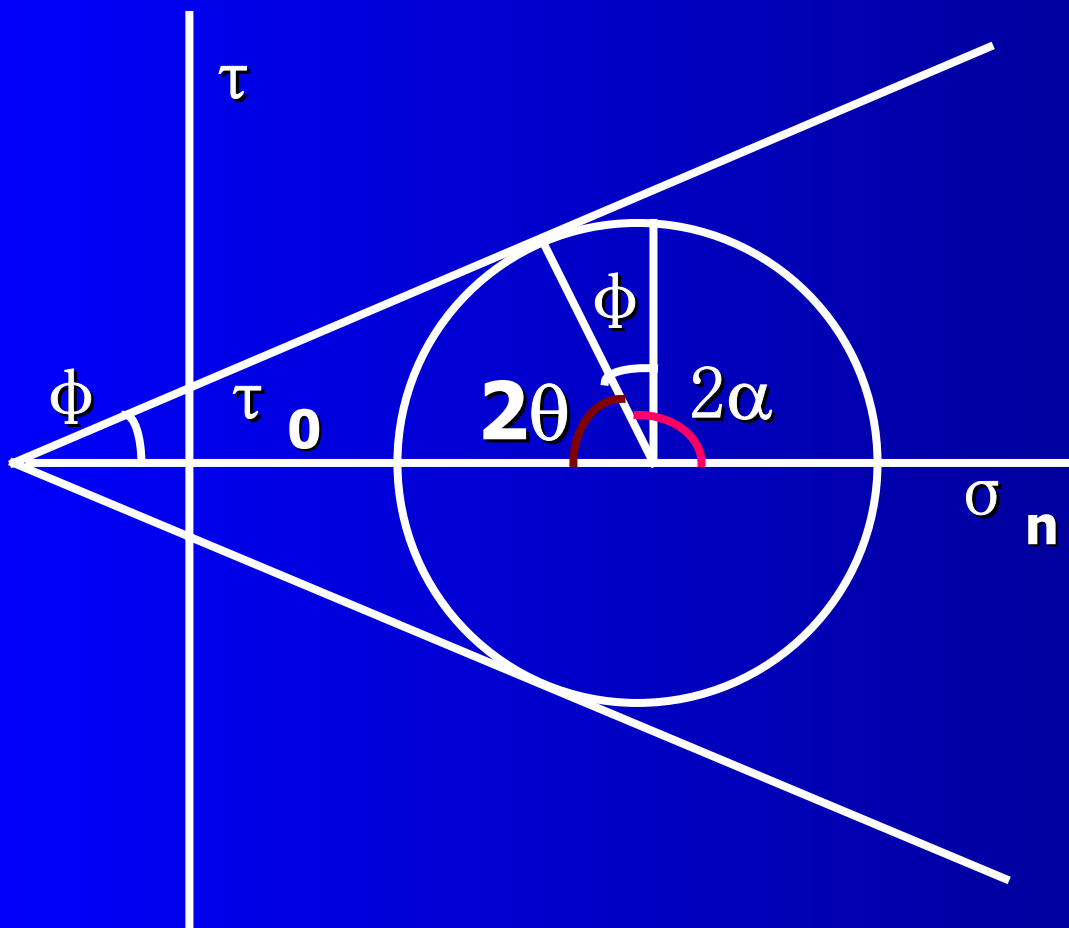
τ_0 —— 当 $\sigma_n = 0$ 时岩石的抗剪强度（又称岩石内聚力）

- 上式可改写成 $\tau = \tau_0 + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \phi$

截距为 τ_0 的直线方程

3.3.2.1 库仑剪破裂准则

麻烦的“角”

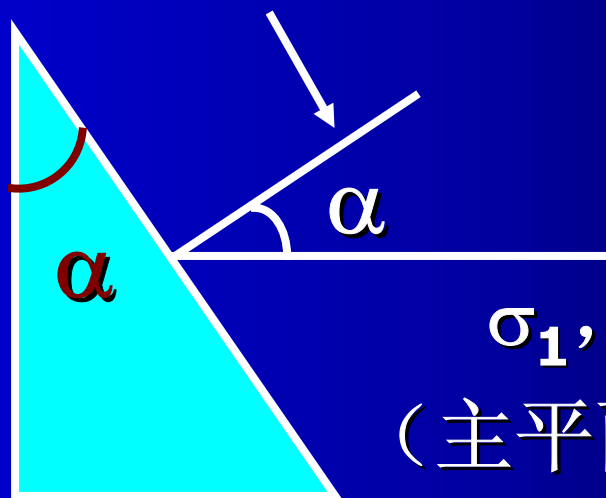


- ϕ ——内摩擦角
- θ ——剪裂角
- 2θ ——共轭剪裂面之间的夹角
- α ——应力分析中斜截面与主平面之间的夹角，或主应力与截面法线之间的夹角
- $2\theta = 90^\circ - \phi$
- $\theta = 45^\circ - \phi/2$
- $2\alpha + 2\theta = 180^\circ$
($\alpha + \theta = 90^\circ$)

3.3.2.1 库仑剪破裂准则

复习：关于 α

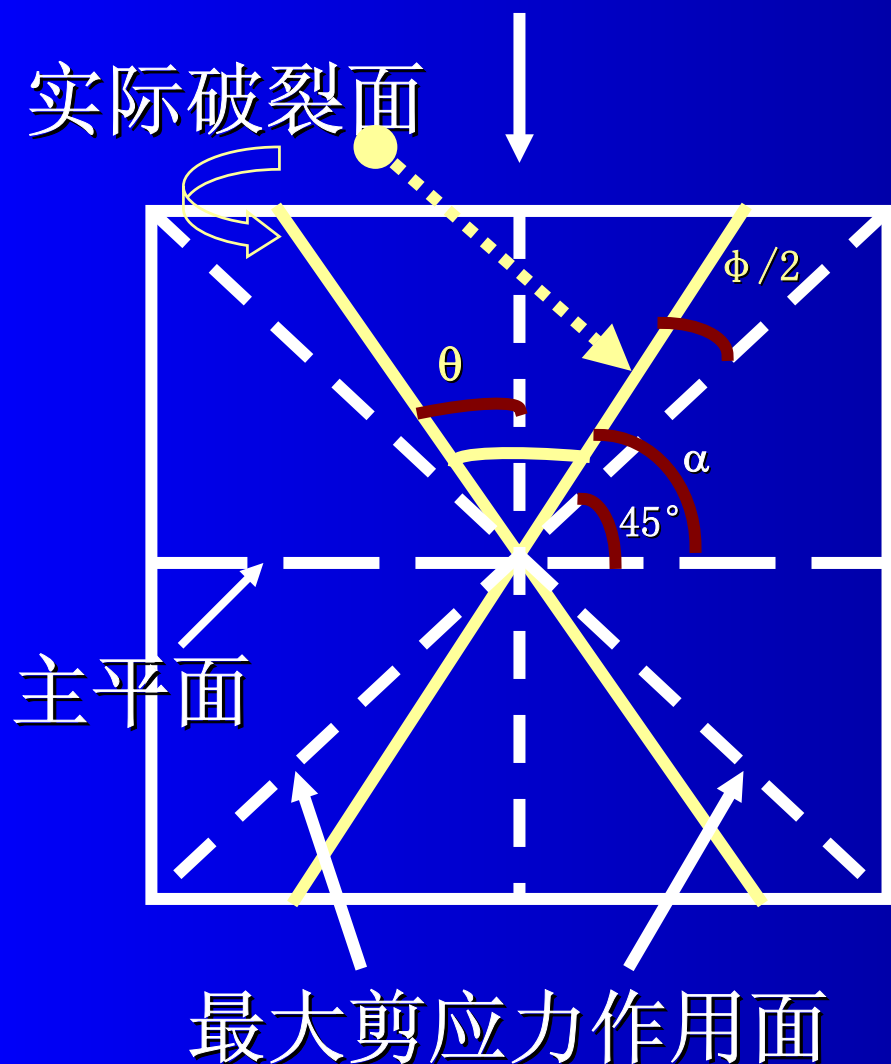
截面法线， $//\sigma_n$ 方向



σ_1 ， \perp 主平面
(主平面法线方向)

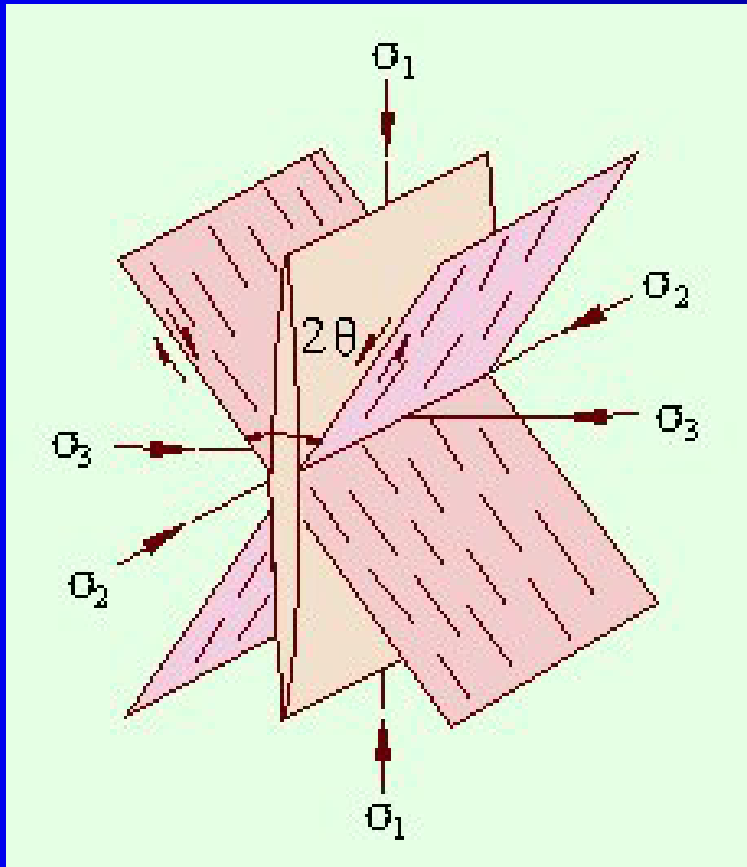
3.3.2.1

库仑剪破裂准则



- 剪裂面与“角”
- ϕ ——内摩擦角
- 2θ ——共轭剪裂面之间的夹角
- α ——应力分析中斜截面与主平面之间的夹角，或主应力与截面法线之间的夹角
- $2\theta = 90^\circ - \phi$
- $\theta = 45^\circ - \phi/2$
- $2\alpha + 2\theta = 180^\circ$
- $(\alpha + \theta = 90^\circ)$

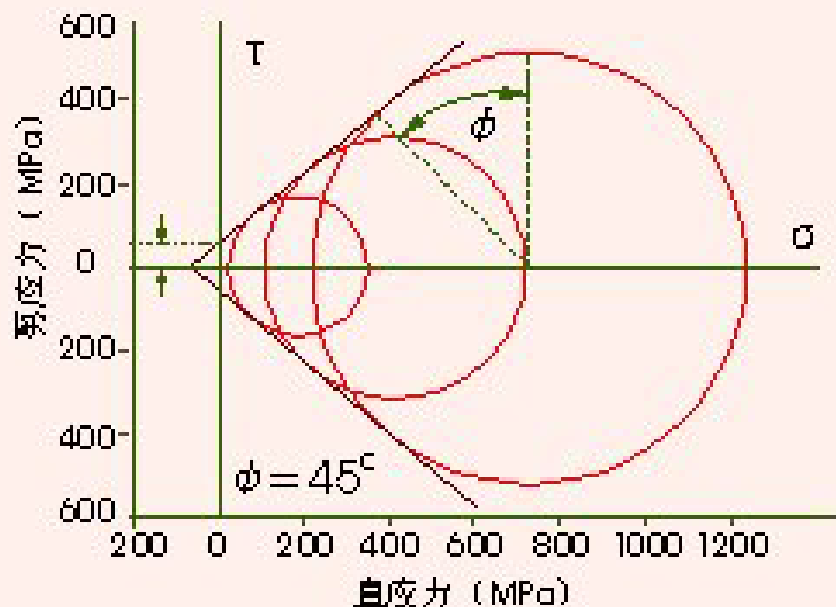
库仑剪破裂准则



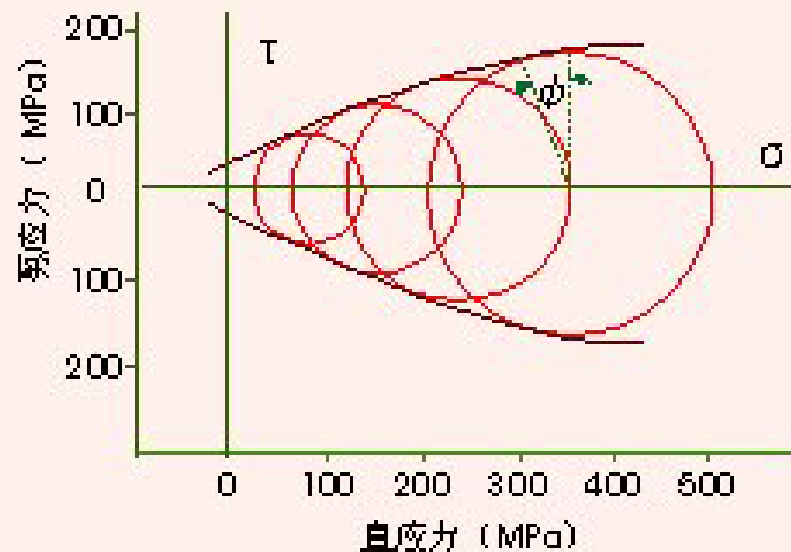
- 剪裂面与“角”
- ϕ ——内摩擦角
- 2θ ——共轭剪裂面之间的夹角
- α ——应力分析中斜截面与主平面之间的夹角，或主应力与截面法线之间的夹角
- $2\theta = 90^\circ - \phi$
- $\theta = 45^\circ - \phi/2$
- $2\alpha + 2\theta = 180^\circ$
- $(\alpha + \theta = 90^\circ)$

3.3.2.2

莫尔剪破裂准则



A



B

- 进一步观察表明， ϕ （内摩擦角）与围压、岩石性质有关，不是一个常量，因此 $\tau = f(\sigma_n)$
例如，砂岩： $\phi \approx 45^\circ$ （图A），页岩： $\phi \approx 23^\circ$ （图B）
- 此外，实验证明， ϕ 随围压增大而减小（图B）

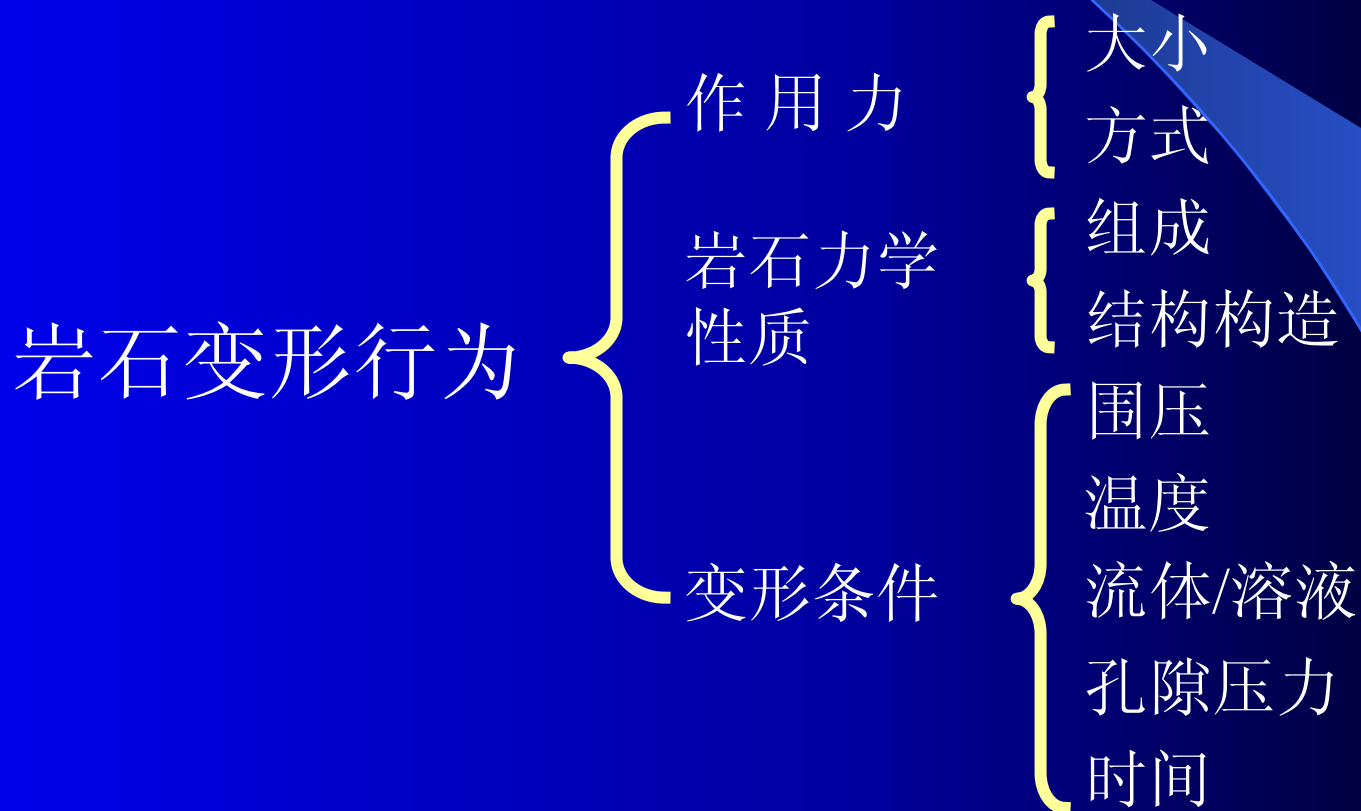
3.3.2.3

破裂准则评价

- “准则”初步描述了破裂过程的真实物理模式
- “准则”与实验结果仍有较明显不一致
 - 预计的单轴抗压与抗张强度之比都过低
 - 莫尔包络线与实际的斜率不严格一致
- 尽管存在一些不足，“准则”仍然是较为合乎实际的，广泛用于构造地质和岩石力学分析

3.3.3

影响岩石变形行为的因素



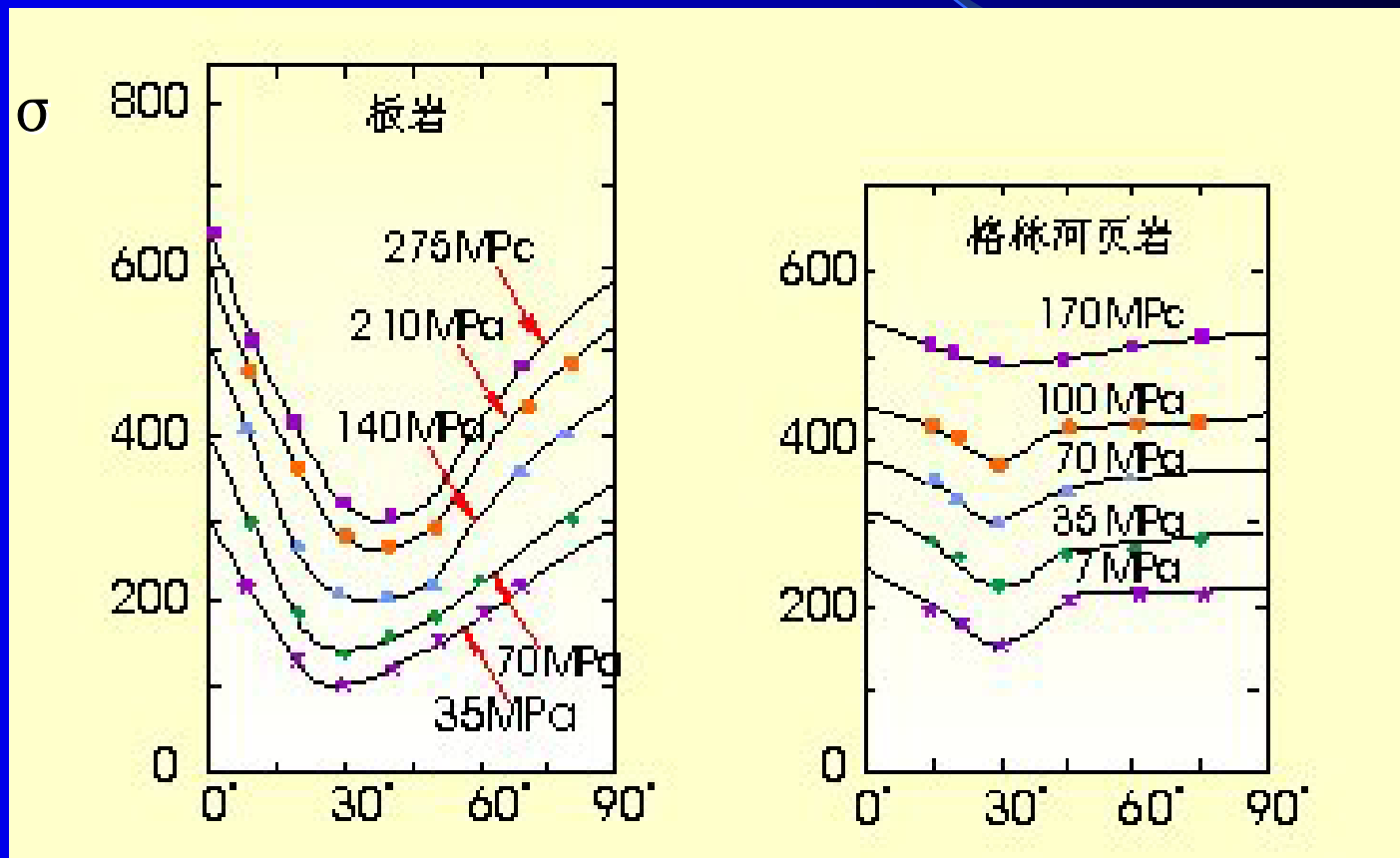
3.3.3.1

岩石各向异性对变形的影响

- 面构造对岩石抗压强度存在很大影响
 - 层理、面理、破裂面、先存软弱面
- 抗压强度与 σ_1 /先存面理之间夹角 α 的实验关系曲线，反映当 α 接近 30° 时，岩石的抗压强度最低

3.3.3.1

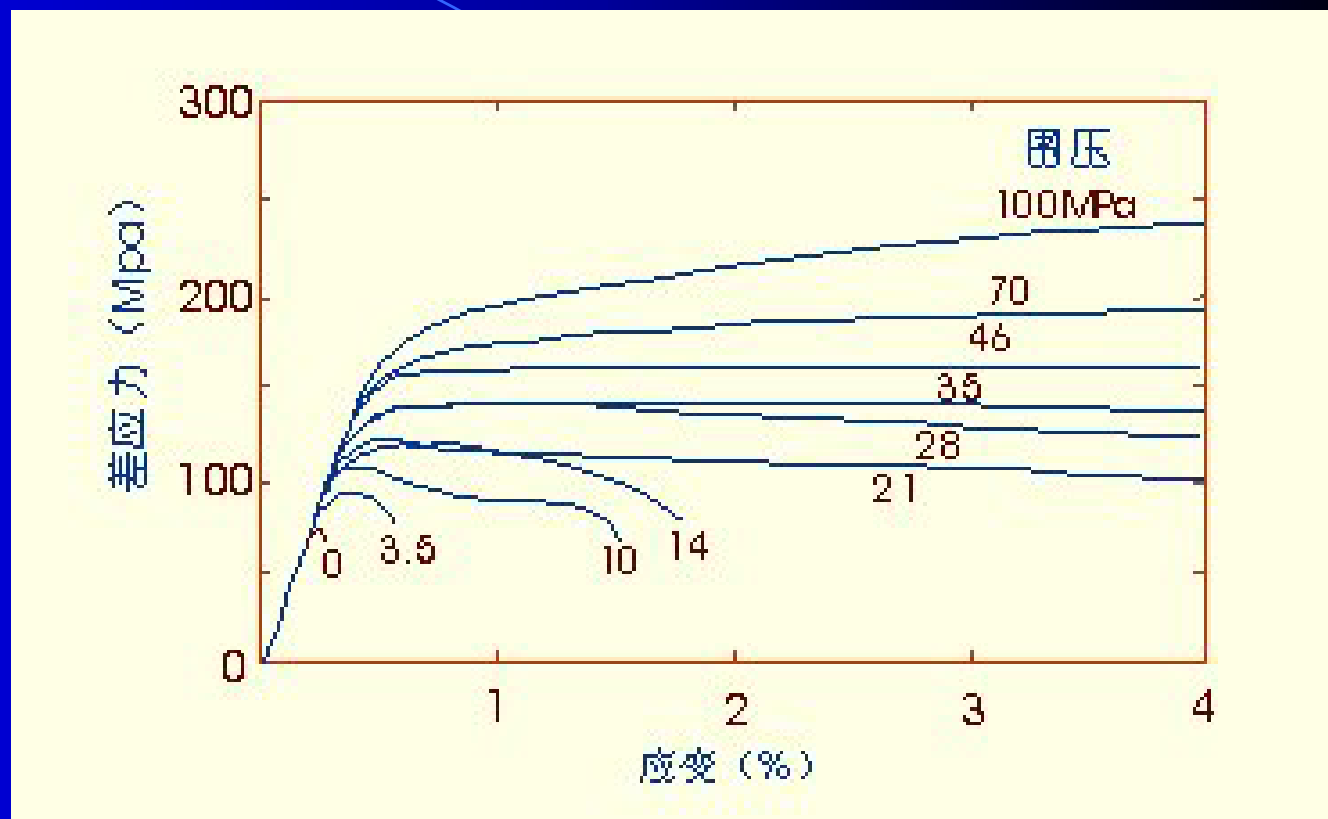
岩石各向异性对变形的影响



σ_1 与先存面理的夹角

3.3.3.2

围压

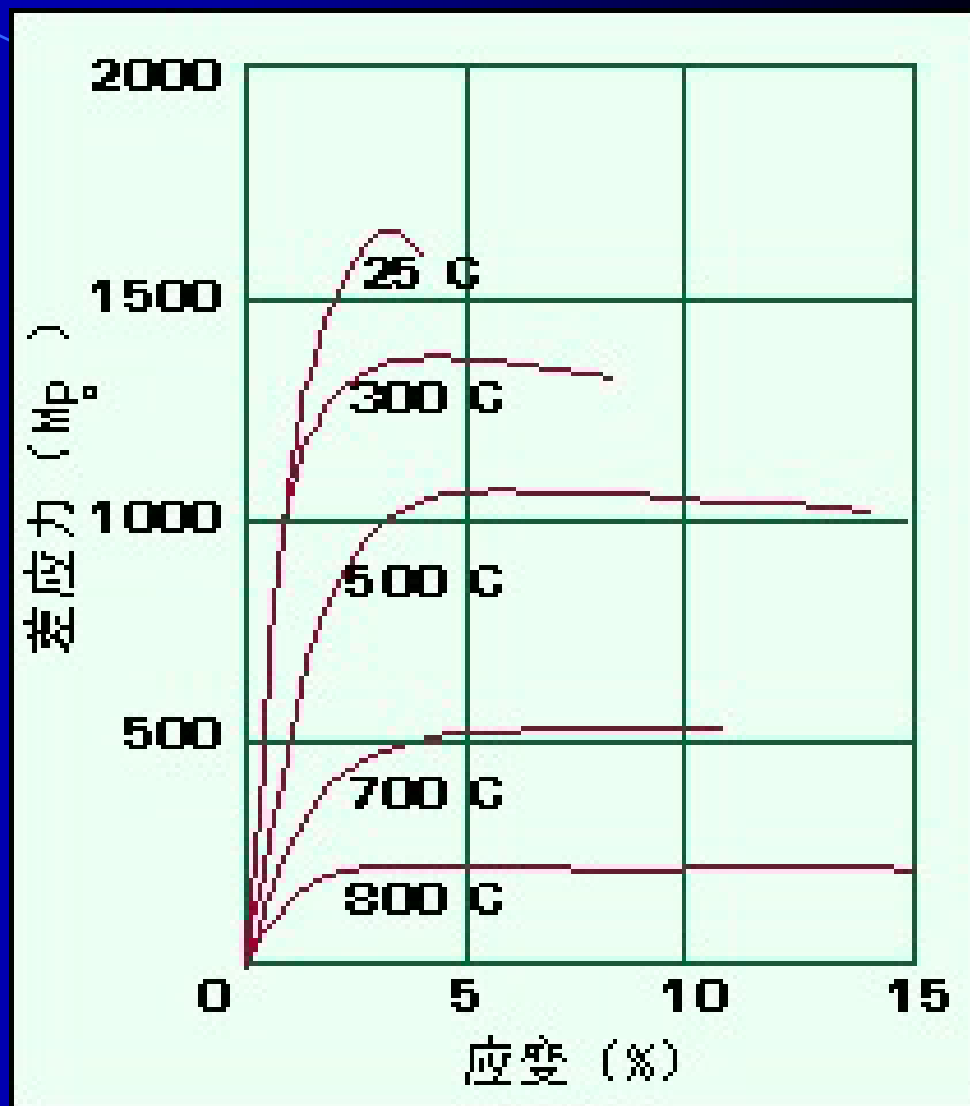


- 围压增大，岩石强度极限得到提高，韧性增强

3.3.3.3

温度

- 温度升高，使岩石韧性增大，屈服极限降低



3.3.3.3

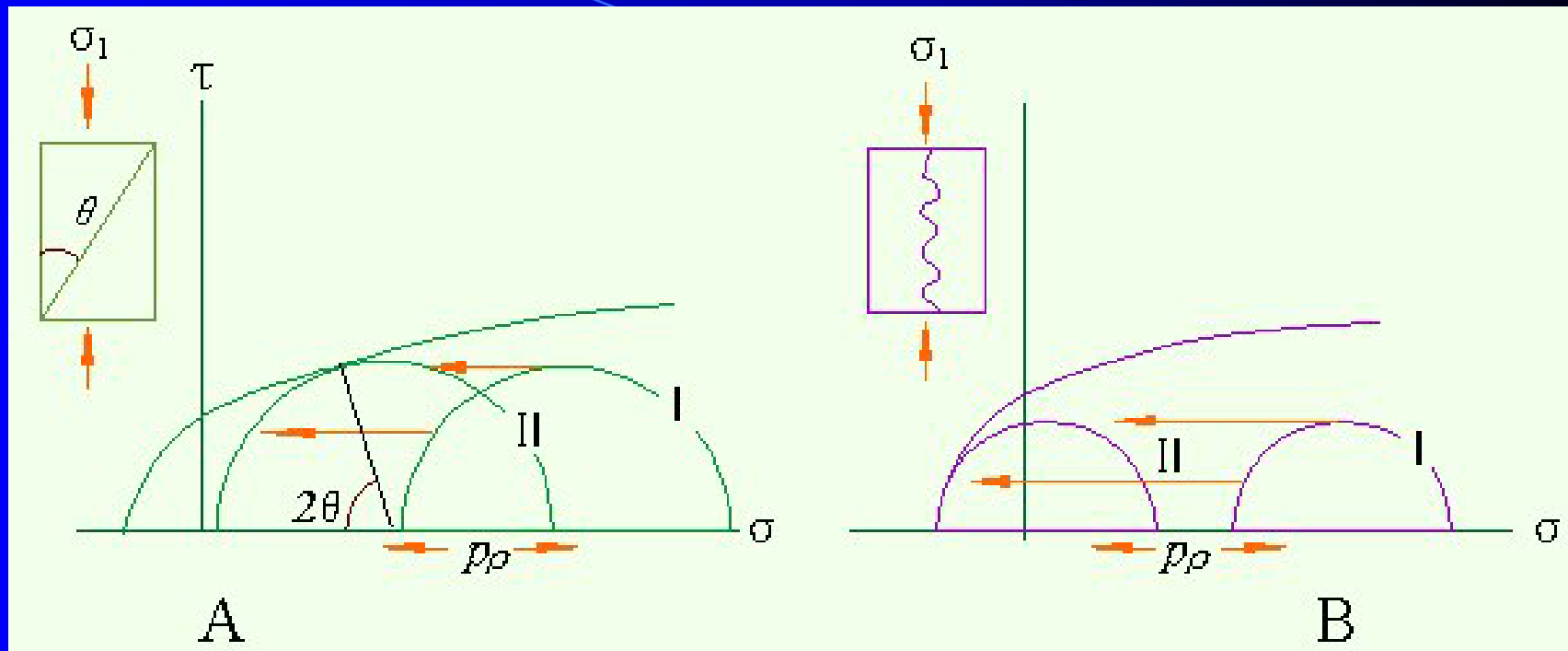
温度

- 温压关系密切
 - 岩石圈环境中，温度和压力随着深度的增加而升高
- 脆性-韧性转换所需的围压与温度成反比
 - 地壳中脆韧性转换带深度
 - 挤压环境中位于3.5公里
 - 在拉伸环境中深达15公里 ——与围压小有关

3.3.3.4

孔隙流体和孔隙流体压力

- 岩石中的流体有利于物质迁移，促进压溶、重结晶（塑性变形）作用进行，降低岩石强度
- 当孔隙流体压力大到几乎等于围压时，可以使岩石产生浮起效应



- 孔隙流体压力可抵消一部分围压，减小有效围压 ($P_e = P_c - P_p$)，从而降低岩石强度，易于脆性破坏发生

3.3.3.5

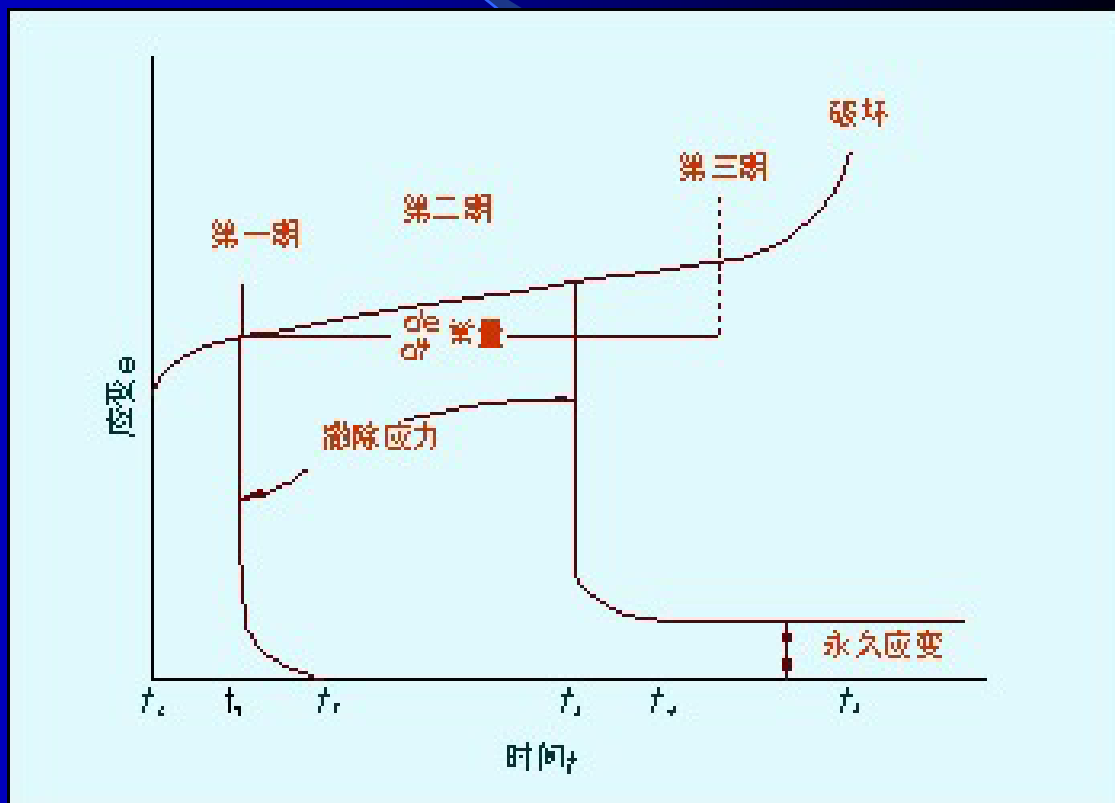
时间：应变速率

- 应变速率 $\dot{\epsilon}$
- 应变速率大（快速施力），易于脆性变形
- 应变速率小（缓慢施力），利于塑性变形。小应变速率降低岩石屈服极限，使脆性材料具有韧性特征。
- 沥青问题的延续——变形性状与时间的关系？蜡烛？

3.3.3.5

时间：蠕变

- 蠕变指应力保持不变，应变随着时间延续而增大的变形行为
- 岩石变形具有一临界应力值或蠕变强度 $\sigma_{\text{蠕}}$ 。应力小于该强度时，岩石不发生蠕变



3.3.3.6

岩石的粘性

- 粘性体（牛顿流体）流变与剪应力关系：
$$\tau \text{（剪应力）} = \eta e \text{（流变）}$$

η ——粘度，或粘性系数，单位为 $\text{Pa}\cdot\text{S}$ （帕斯卡·秒）
- 蠕变岩石可以看作高粘度的固流体（弹粘性体）

η 可达 $10^{16} - 10^{22} \text{ Pa}\cdot\text{S}$

 - 地下高温环境下，粘度系数 η 变小
 - 耶鲁大理岩
 - $T = 25^\circ\text{C}$ 时， $\eta = 10^{22} \text{ Pa}\cdot\text{S}$
 - $T = 500^\circ\text{C}$ 时， $\eta = 10^{15} \text{ Pa}\cdot\text{S}$
 - 地下高围压，使岩石仍具有弹性；快速变形也有利于岩石保持弹性性状

3.3.3.6

岩石的能干性

- “能干性”——易于发生塑性流变的程度
 - 某种程度上，可以用岩石的粘度比表示岩石能干性的差异
- “韧性”——岩石破坏前的塑性变形量。岩石的韧性差与能干性差有联系，但不完全等同
- 岩石能干性取决于：
 - 岩石的矿物组成（例如长英质矿物与云母类矿物的区别）
 - 粒度
 - 岩石结构构造（片状，块状）

3.3.4 岩石的塑性变形机制

- 岩石的塑性变形机制远比脆性变形机制复杂
- 绝大部分塑性变形是通过矿物单晶晶内滑动或粒间滑动实现的
- 塑性变形机制有多种，包括晶内滑动和（低温）位错滑动，高温位错蠕变，动态重结晶，粒间滑动

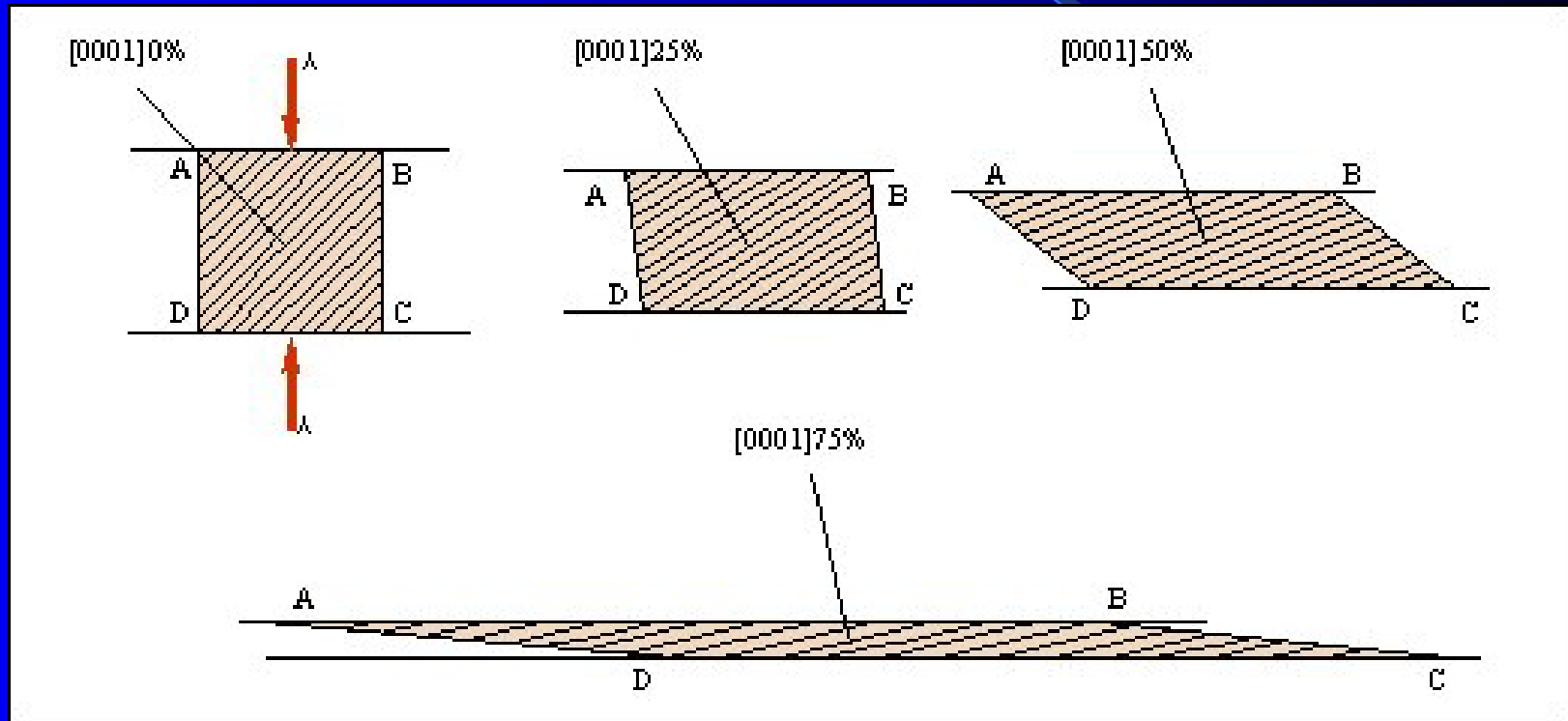
3.3.4.1

晶内滑动和（低温）位错滑动

- 晶内滑动——沿晶体内部一定滑移系发生，由晶体结构所决定。滑移面通常为高原子 / 离子密度面。滑移方向平行原子 / 离子排列最密集的方向
 - 石英底面（0001）
 - 方解石，底面，e面（机械）双晶
- 晶内滑移使晶粒形状改变，结晶轴发生旋转，产生晶格优选方位

3.3.4.1

晶内滑动和（低温）位错滑动



石英沿着 $[0001]$ 的滑动，BD为滑动面，滑动面间距不变

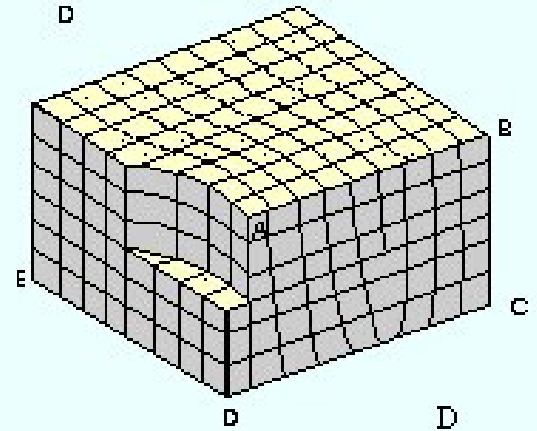
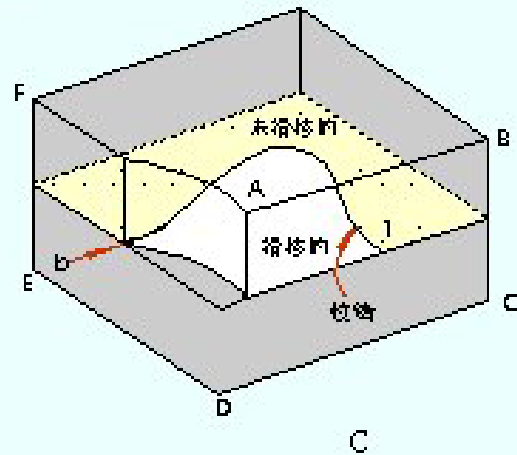
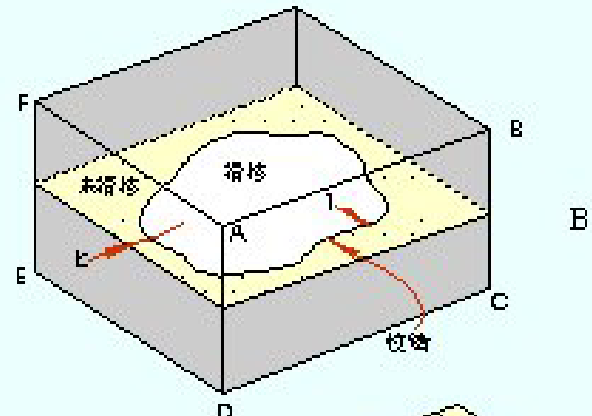
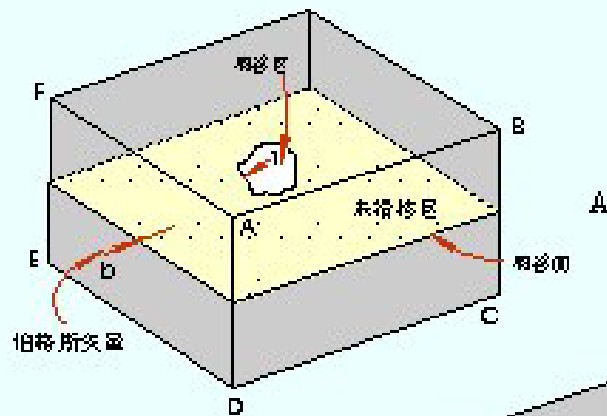
3.3.4.1 晶内滑动和（低温）位错滑动

位错滑动的形成

- 晶内滑移在微观上，并非同时发生在整个滑移面上
- 滑移首先发生在应力集中区（晶体缺陷处），然后沿滑移面扩张，最终与晶粒边界相交，产生一个阶梯
- 位错线——滑移区与未滑移区的界线

3.3.4.1 晶内滑动和（低温）位错滑动

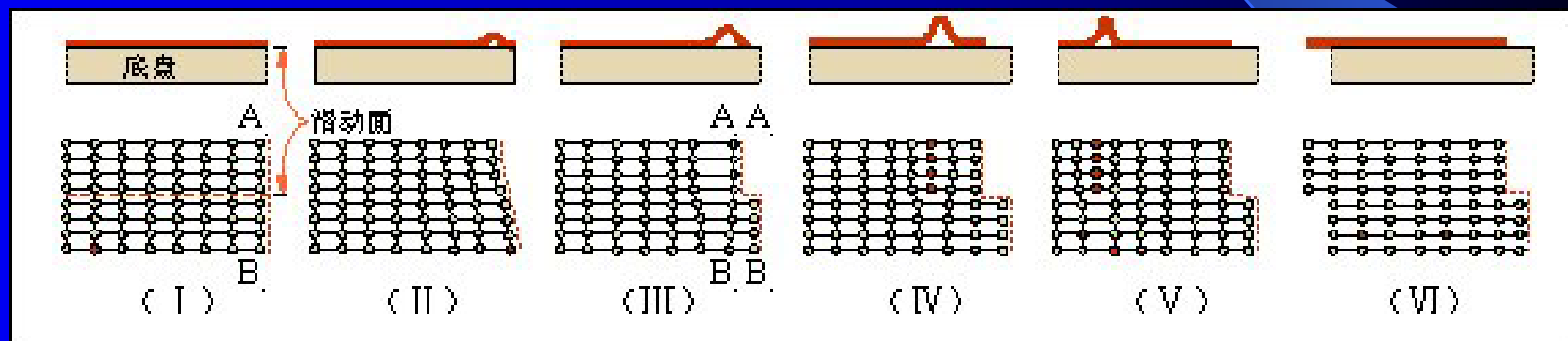
位错滑动的形成



- A--位错的萌生
- B--位错在剪应力作用下的扩展
- C--位错环与晶体边界相交处形成一个小位错
- D--表示立方体晶格的形变

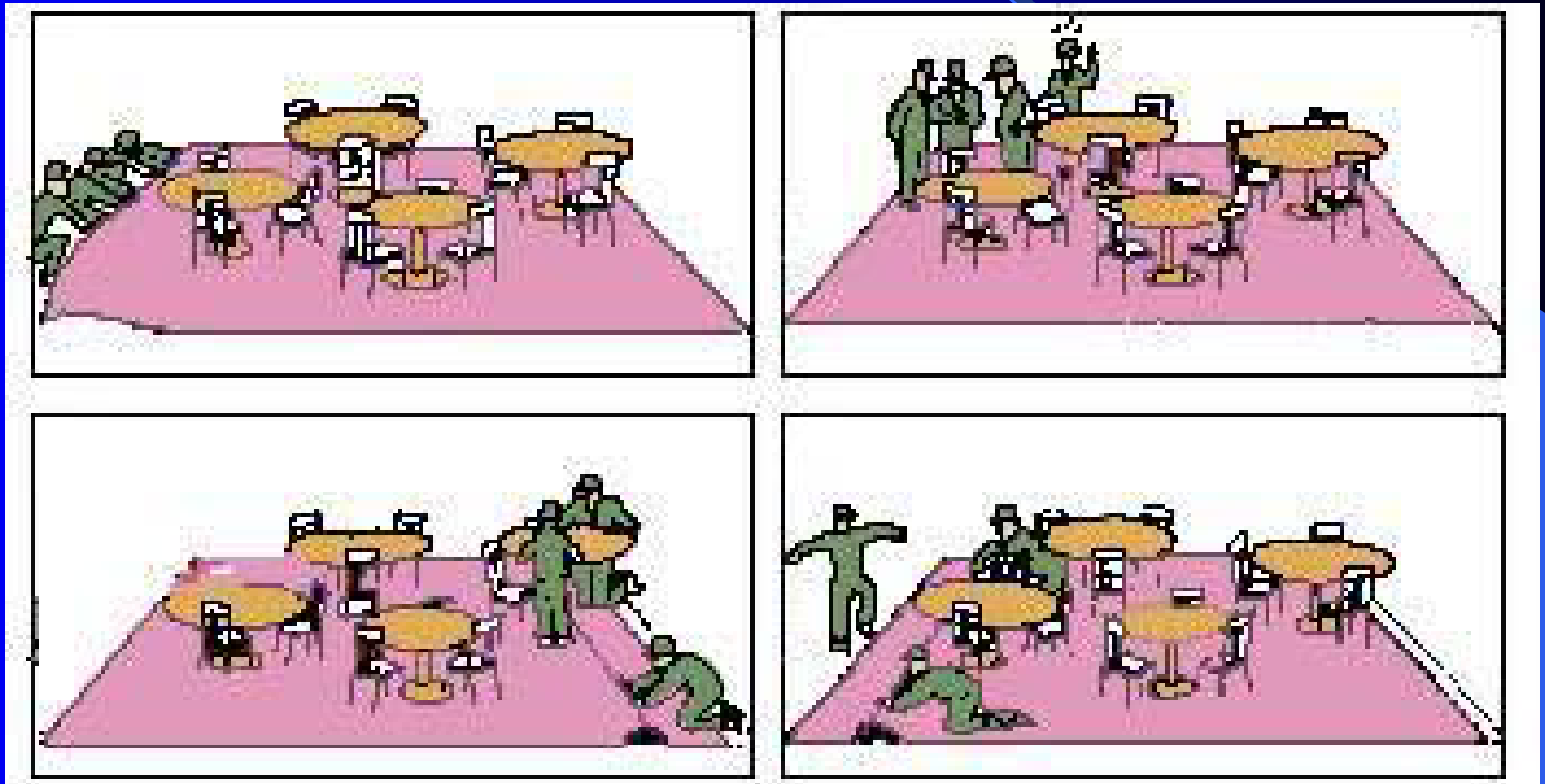
3.3.4.1 晶内滑动和（低温）位错滑动

位错滑动的形成



3.3.4.1 晶内滑动和（低温）位错滑动

位错滑动的形成



● [Dislocation.avi](#)

3.3.4.1 晶内滑动和（低温）位错滑动

应变硬化

- 位错发育到一定程度，其传播受阻，形成网络 and 缠结，需增大应力才能继续传播——“应变硬化”效应，使晶体变脆
- 位错受阻的原因：低温；晶体内部的杂质；不同方向不同滑移面上的位错相互制约
- 当应力大到一定量，晶体会发生破碎，因此单纯的位错滑动，不能形成大的塑性变形量。

3.3.4.2

高温位错蠕变——恢复作用

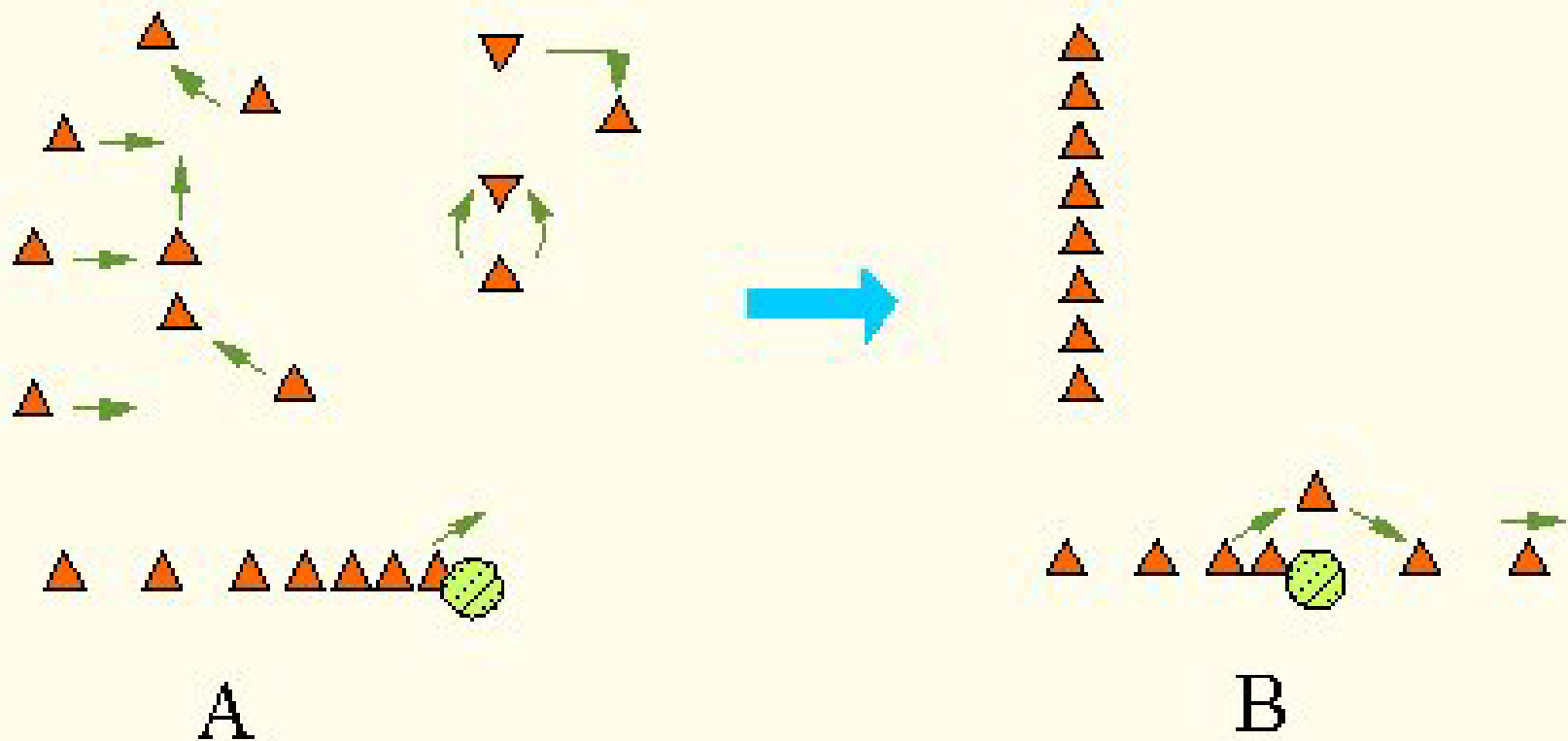
- 高温变形机制

当 $T > 0.3 T_m$ 时，恢复作用开始起重要作用

- 位错攀移——使符号相反的位错互相抵消，“相同者”重新排列成位错壁，形成亚晶粒（Subgrain）。亚晶粒内部位错密度降低，晶体多边形化。

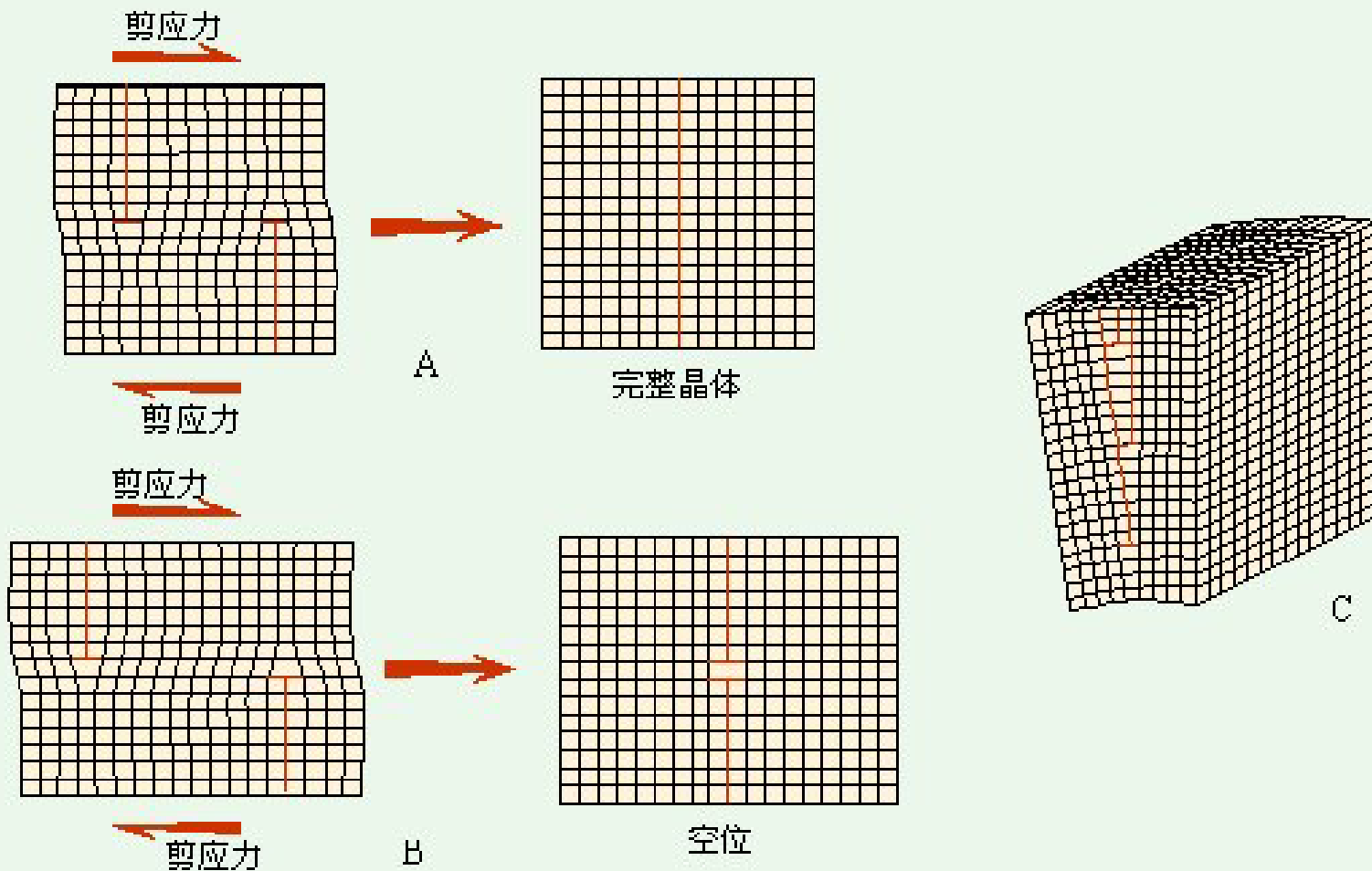
3.3.4.2

高温位错蠕变——恢复作用



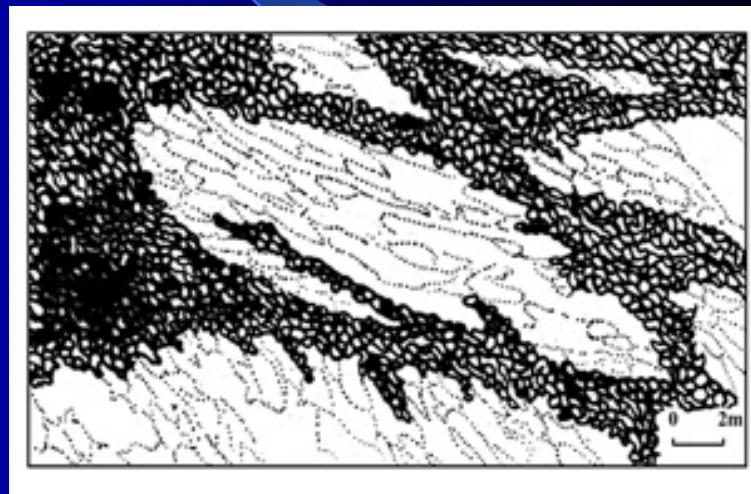
3.3.4.2

高温位错蠕变——恢复作用



3.3.4.2 高温位错蠕变 动态重结晶

- 高应变能储存在变形晶粒边界和局部高位错密度处，在较高温度下形成新生颗粒（核幔构造）
- 恢复和动态重结晶作用导致：
 - 位错密度降低，应变继续进行
 - 岩石不破裂而有很大塑性变形
 - 岩石细粒化
- 动态重结晶颗粒特征
 - 与亚晶粒相比，相邻颗粒光性差大（ $>10^{\circ} - 15^{\circ}$ ），正交镜下边界明显，呈犬牙交错状



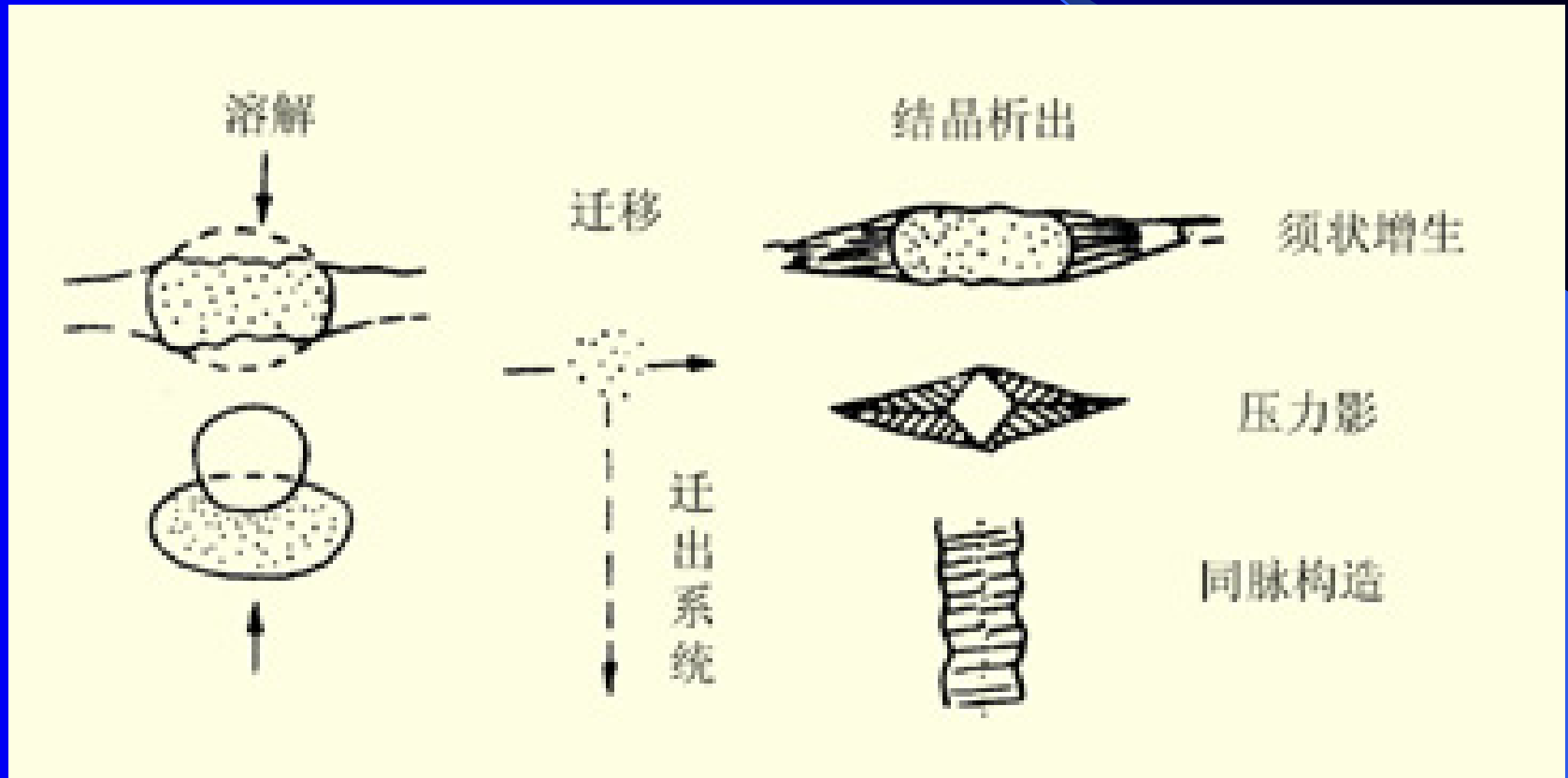
3.3.4.3

扩散蠕变——压溶作用

- 压溶作用使物质发生扩散—转移，矿物颗粒形态发生改变
- 压溶作用在有粒间水膜时更易发生
- 压力影、矿物（集合体）的须状增生和同构造（张性）脉都是压溶作用的产物
- 压溶作用在不变质或浅变质区对于岩石的塑性变形更为重要

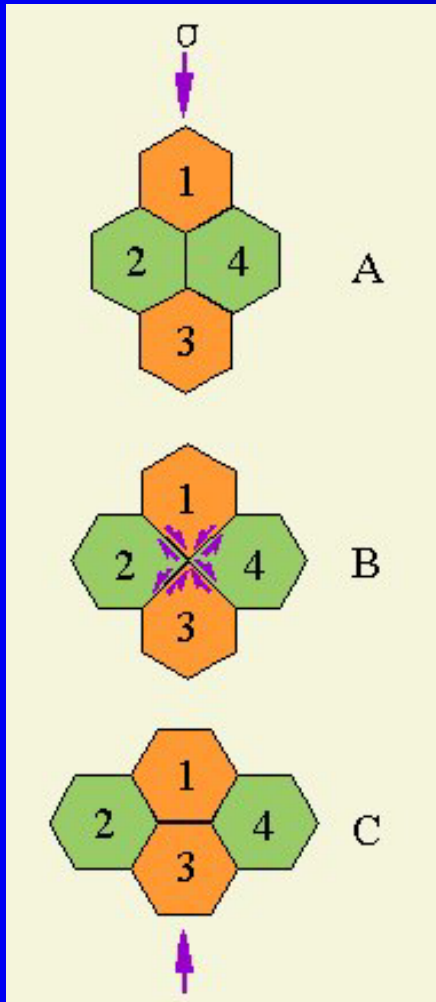
3.3.4.3

扩散蠕变——压溶作用



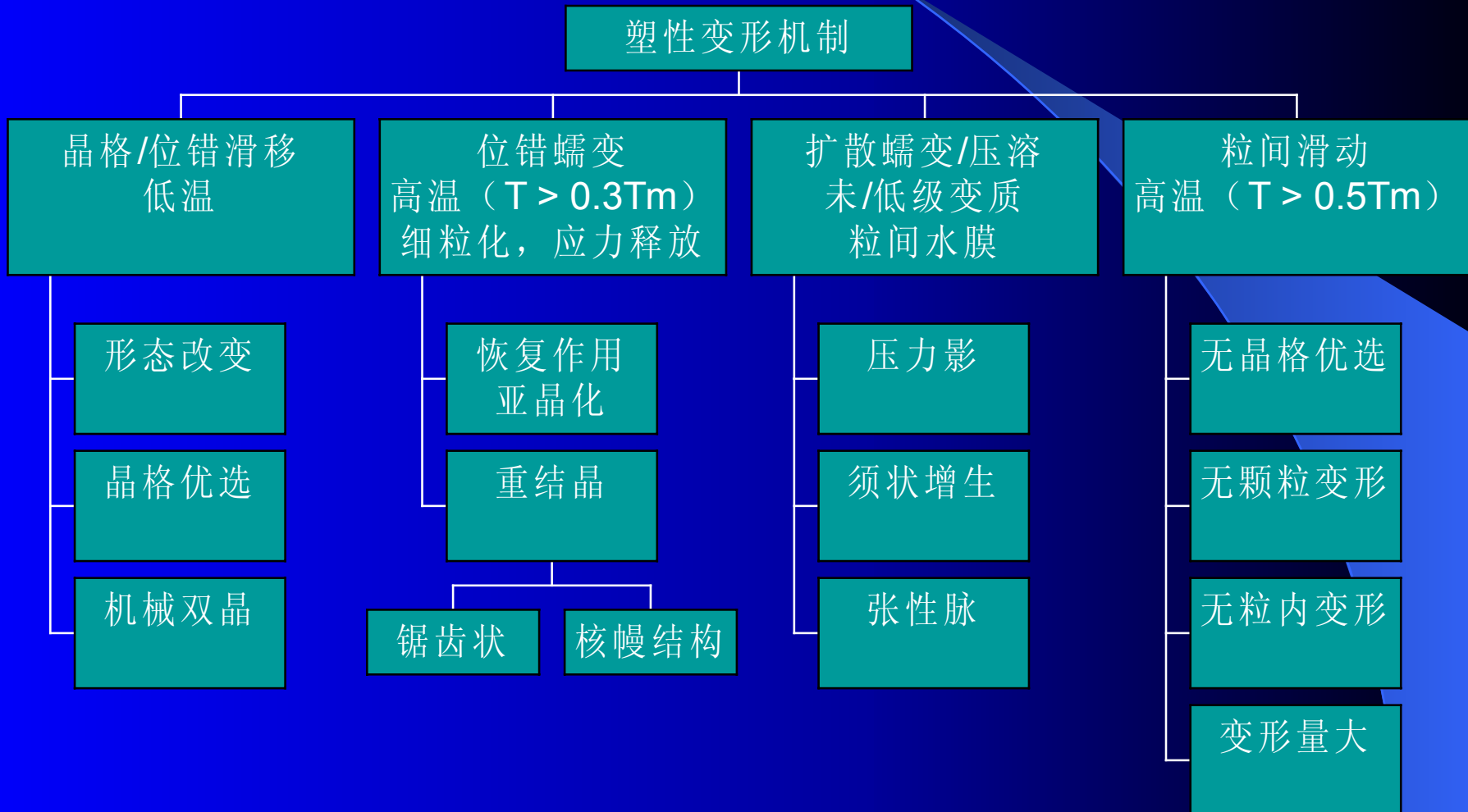
3.3.4.4

超塑性流动——颗粒边界滑动



- 当岩石处在高温 ($T > 0.5 T_m$) 时可能发生粒间滑动
- 特点:
 - 应变量可极大
Helvetic nappe, Alps, 钙质糜棱岩的应变量可达到100:1 (X/Z)
 - 颗粒本身变形微弱或没有变形
 - 无晶格优选方位
 - 无亚晶构造

塑性变形机制——小结



本节要点

- 库仑剪破裂准则
 - 论据，表达式，图解
- 递进变形：共轴/非共轴递进变形
- 岩石变形的三个阶段（应力-应变曲线）
- 影响岩石变形的因素（ P P T t F ）
- 塑性变形机制

思考、讨论问题

- 沥青是脆性材料还是塑性材料？为什么？
- 岩石变形是否一定都经历弹性、塑性和断裂变形三个阶段？为什么？
- 库仑剪破裂准则的依据是什么？莫尔准则的依据又是什么？这二者与格里菲斯准则的区别在哪里？

附录

The background is a solid dark blue. A thin, light blue curved line starts from the left edge and arcs downwards towards the bottom right. A larger, lighter blue triangular shape is positioned in the lower right quadrant, with its hypotenuse facing the center of the page.

格里菲斯破裂准则

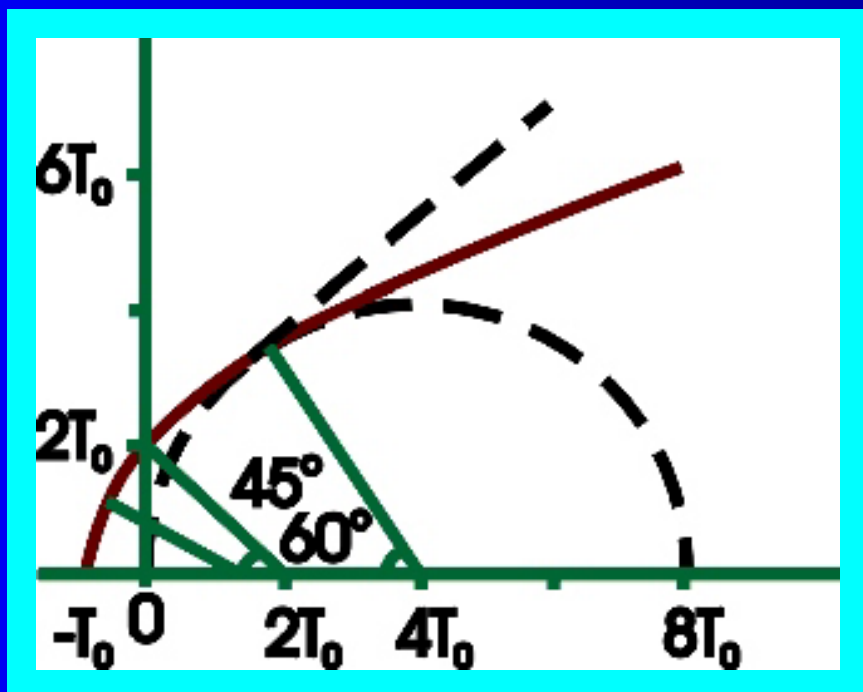
- 问题：

- 库伦、莫尔准则都为岩石力学试验的经验公式，未从破裂机制上作出解释
- 岩石实际破裂与根据分子结构理论计算的材料粘结强度，差值达三个数量级

- 格里菲斯破裂准则的解释：破裂是由材料中随机分布的微裂隙扩展而成

- 裂隙末端的应力集中 → 裂隙扩展 → 裂隙相互联结 → 形成宏观破裂

格里菲斯破裂准则



- 二维分析中，把裂隙看作扁平的椭圆
- 当 $\underline{\sigma_1} < -3 \underline{\sigma_3}$ 时，
 $\sigma_3 = -T_0$ (张裂准则)
 $-T_0$ — 单轴拉张时的强度
- 当 $\underline{\sigma_1} \geq -3 \underline{\sigma_3}$ 时，则

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8 T_0 (\sigma_1 + \sigma_3) = 0$$

$$\text{或 } \tau_n^2 = 4 T_0 (T_0 + \sigma_n) \quad (\text{抛物线——实线})$$

(τ_n — 剪裂面上剪应力; σ_n — 剪裂面上正应力)

格里菲斯破裂准则

- 格里菲斯破裂准则存在问题:

据 $(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - 8 T_0 (\sigma_1 + \sigma_3) = 0$,

在单轴压缩时,

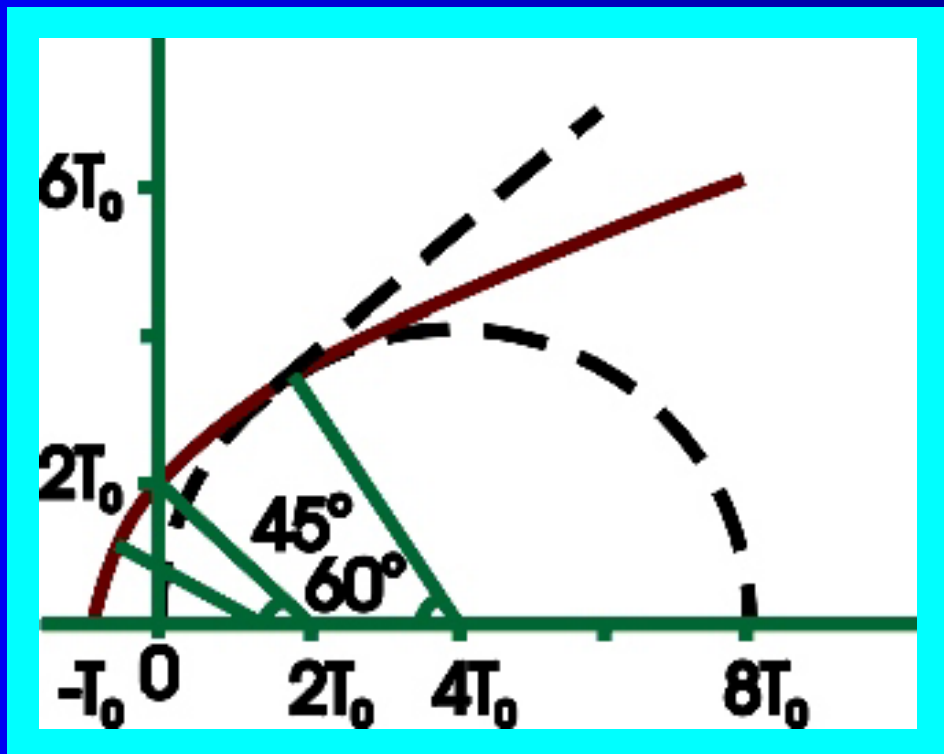
$$\because \sigma_1 = \sigma_c \text{ (抗压强度)}, \quad \sigma_3 = 0$$

$$\therefore \sigma_c = 8 T_0$$

这跟的实验结果不符

- 室温常压下岩石的抗压强度 (σ_c) 等于抗张强度 (T_0) 的10-50倍

修正的平面格力菲斯准则



- 假定微裂隙在受压方向上闭合，产生一定摩擦力影响微裂隙的扩展
- 修正后的莫尔准则成为：

$$\tau_v = \mu \sigma_v + 2 T_0 \quad (\text{虚线})$$