上一讲思考讨论题

- 双轴应力状态的概念
- 双轴莫尔圆及其物理意义
- 线应变、剪应变、体积应变、应变椭球体、应变主轴（应变主方向）、应变主平面、应变椭圆、平面应变、非旋转应变、纯剪与单剪应变、均匀应变和非均匀应变、有限应变、无限小应变、递进变形的概念。
- 应变椭球体中的主应变面（XY，YZ, XZ）面与主应力有什么关系？

地质构造分析的力学基础

- 应力
- 应变
- 岩石的力学性质与岩石的破裂

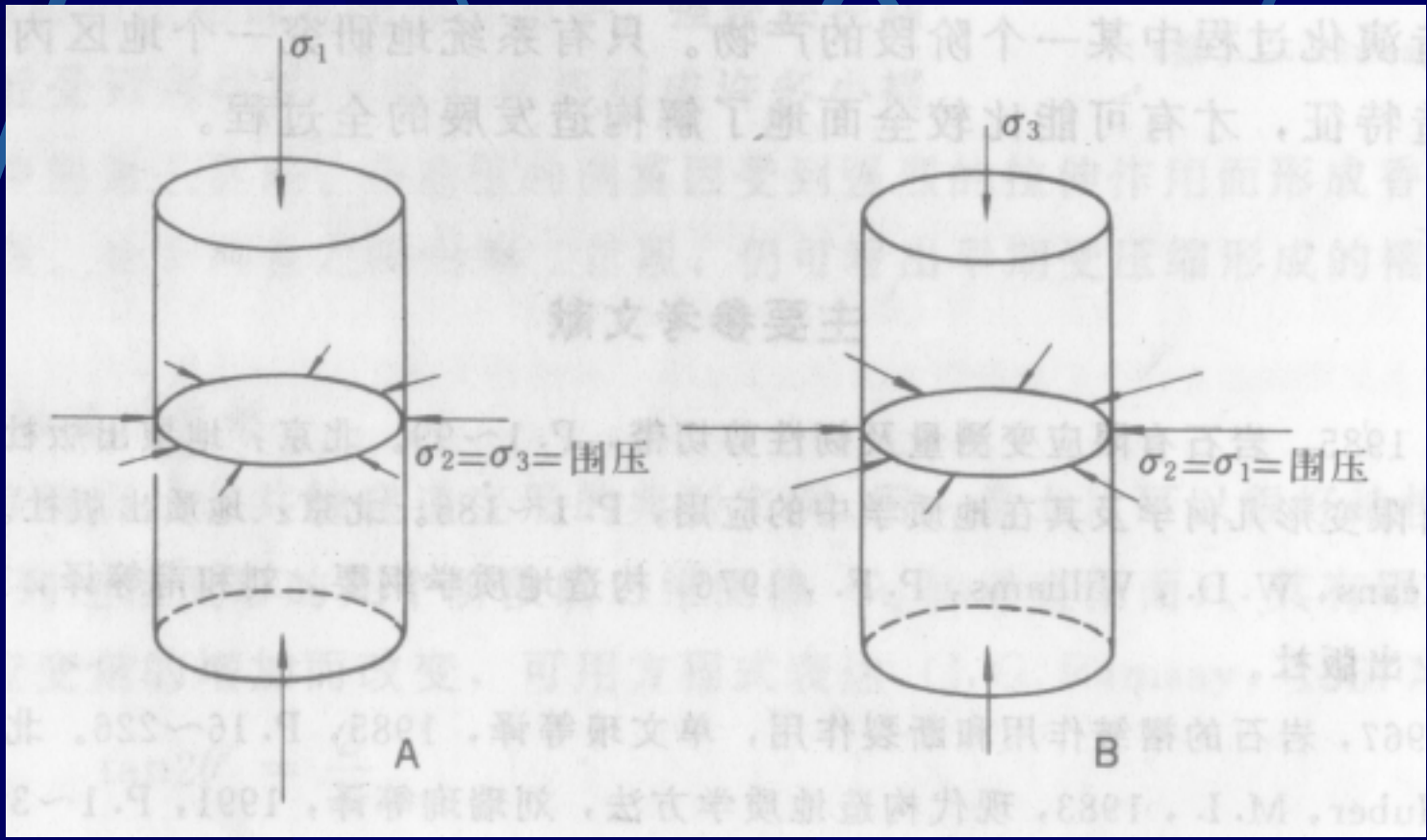
主讲人：刘志宏

吉林大学地球科学学院

内容提要

- 岩石变形的阶段
- 影响岩石力学行为的主要因素
- 岩石的破裂

第四节 岩石的力学性质与岩石的破裂



一、岩石变形的阶段

1）弹性变形阶段

虎克定律：$\sigma=E\varepsilon$

E: 弹性模量或杨氏模量

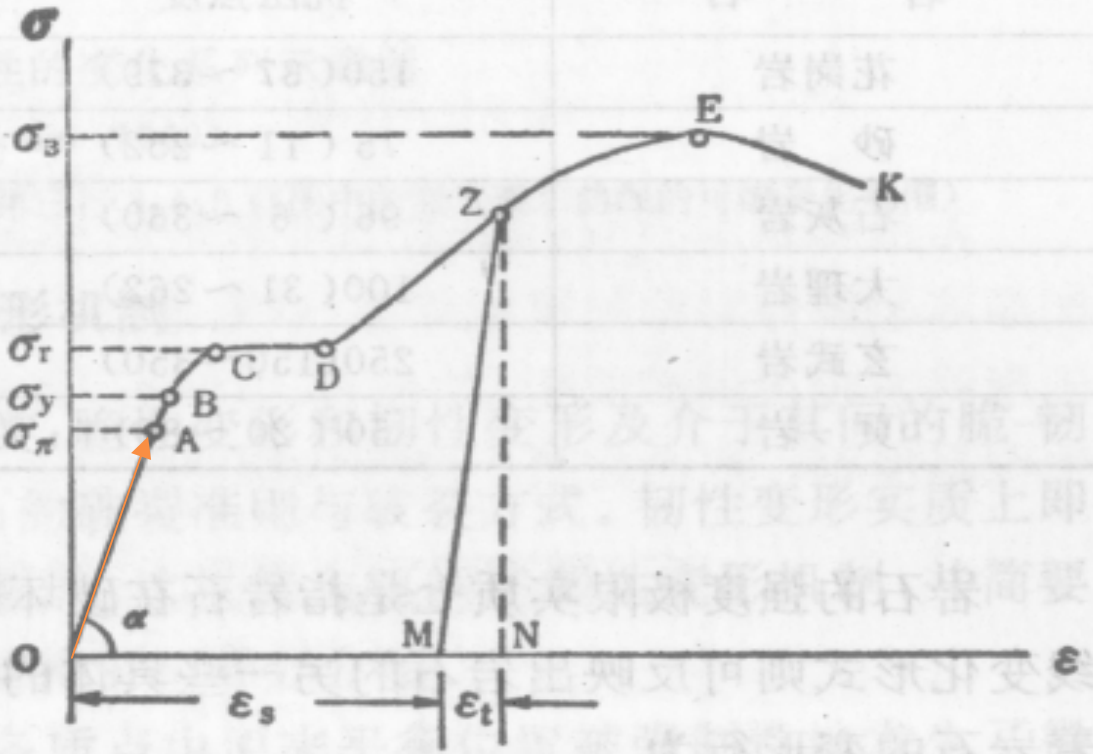


图 5-6　低碳钢拉伸时的应力-应变曲线

σ_π—比例极限；σ_y—弹性极限；

σ_T—屈服极限；σ_B—强度极限；

一、岩石变形的阶段

1）弹性变形阶段

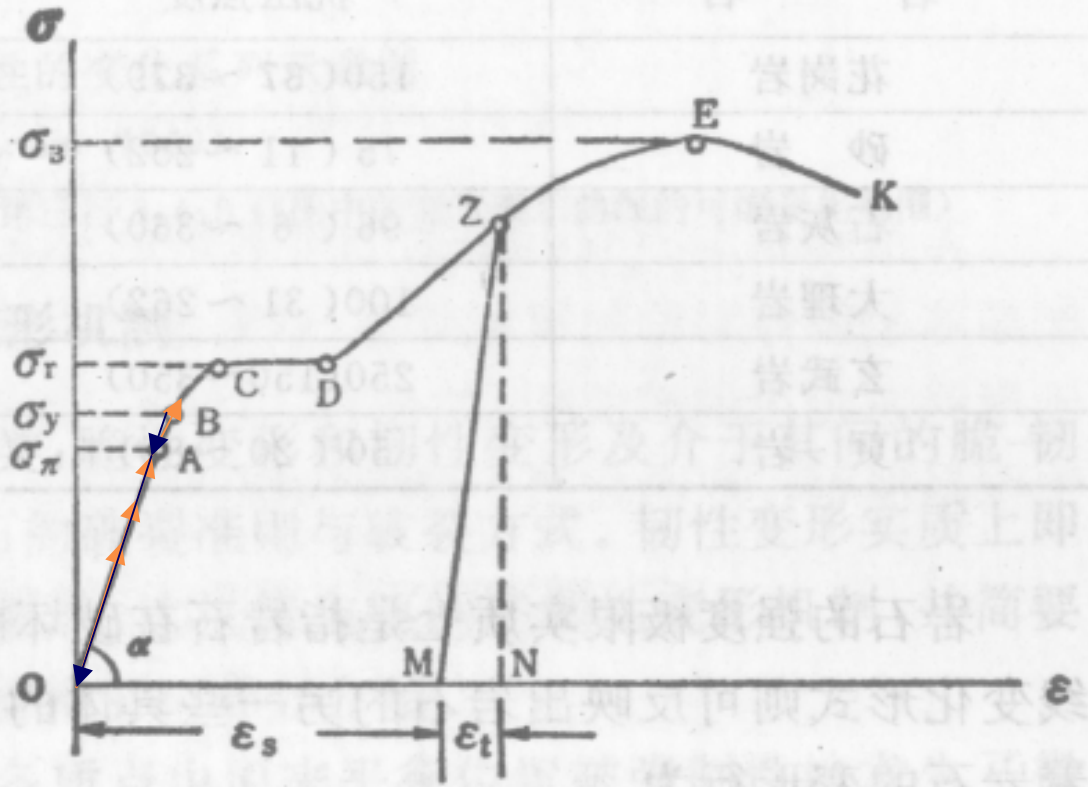


图 5-6　低碳钢拉伸时的应力-应变曲线

σ_π—比例极限；σ_y—弹性极限；

σ_Y—屈服极限；σ_B—强度极限；

一、岩石变形的阶段

2）塑性变形阶段

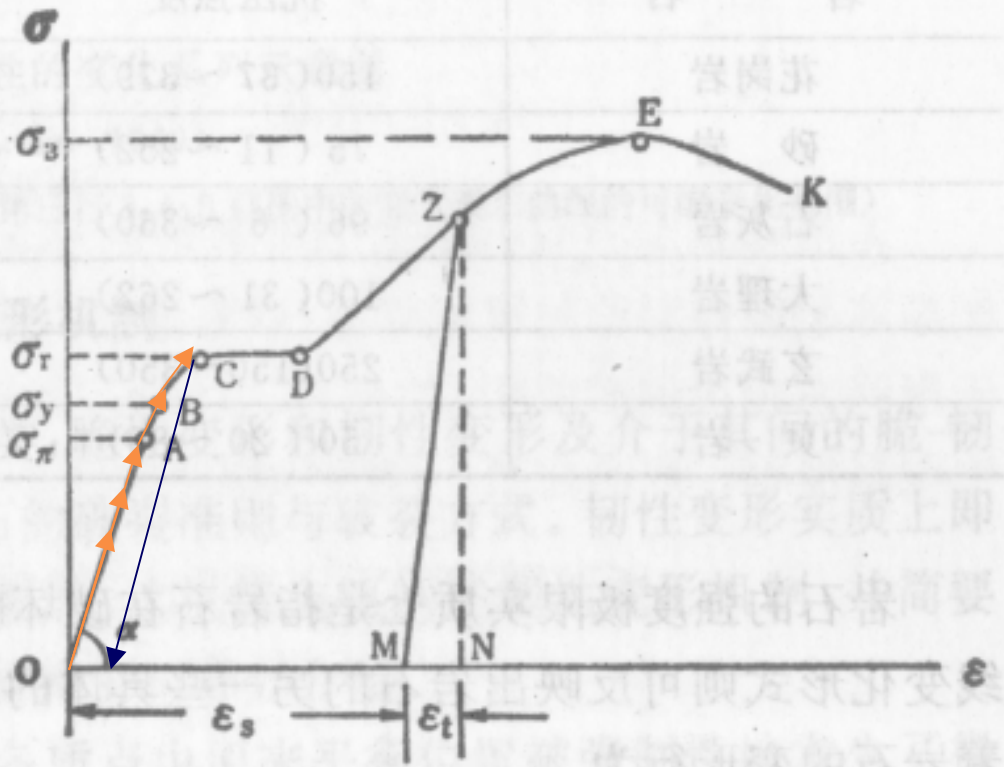


图 5-6　低碳钢拉伸时的应力-应变曲线

σ_π—比例极限；σ_y—弹性极限；

σ_Y—屈服极限；σ_B—强度极限；

一、岩石变形的阶段

2）塑性变形阶段与屈服极限

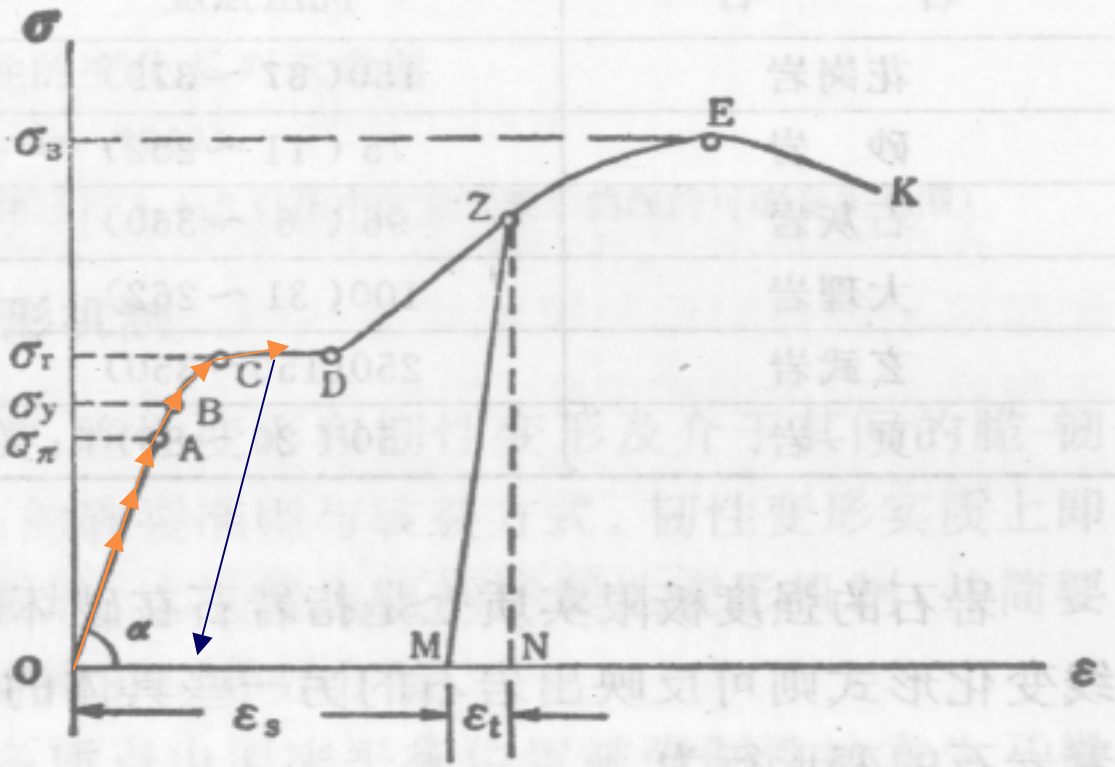


图 5-6　低碳钢拉伸时的应力-应变曲线

σ_π—比例极限；σ_y—弹性极限；

σ_T—屈服极限；σ_B—强度极限；

一、岩石变形的阶段

3）应变硬化阶段

应力超过屈服应力极限继续升高，出现应变硬化。应力达到强度极限，应变硬化随之消除。

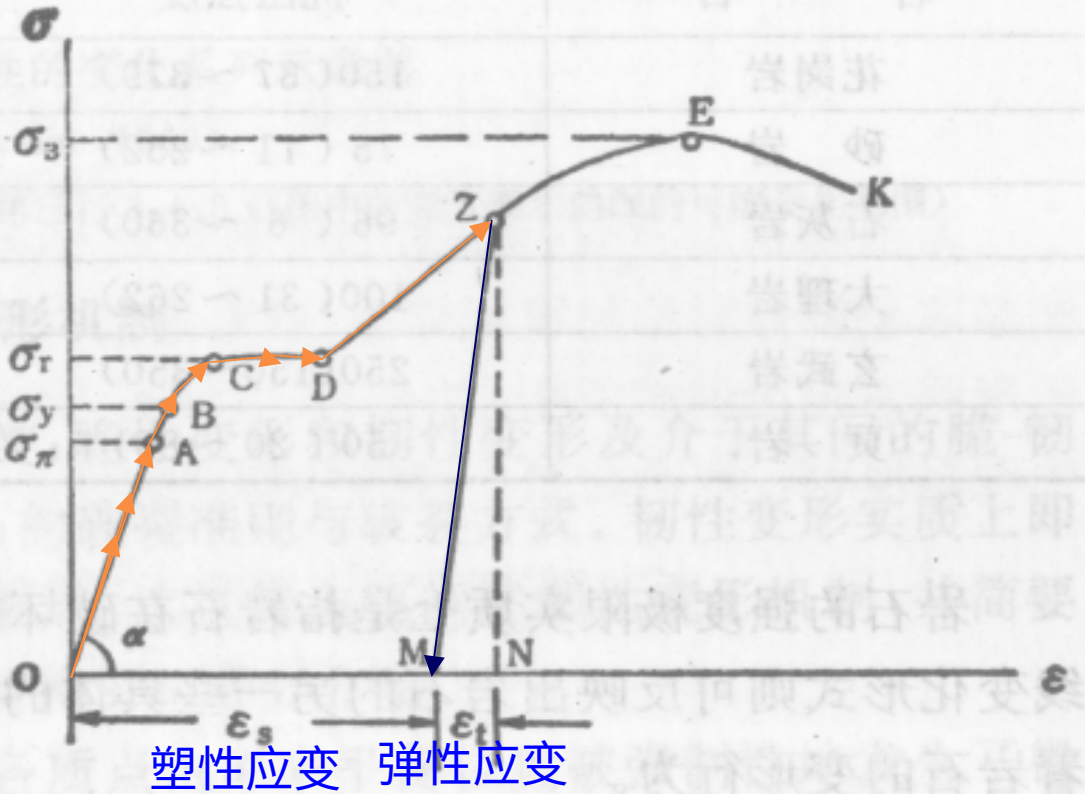


图 5-6　低碳钢拉伸时的应力-应变曲线

σ_π—比例极限；σ_y—弹性极限；

σ_T—屈服极限；σ_B—强度极限；

一、岩石变形的阶段

4）强度极限与破裂变形阶段

抗压强度、抗张强度和抗剪强度

宏观破裂形成、发展阶段，应力超过强度极限之后，应力下降但应变增加，出现应变软化，剪切强度逐渐减小，直到岩石里最终可见的宏观破裂。

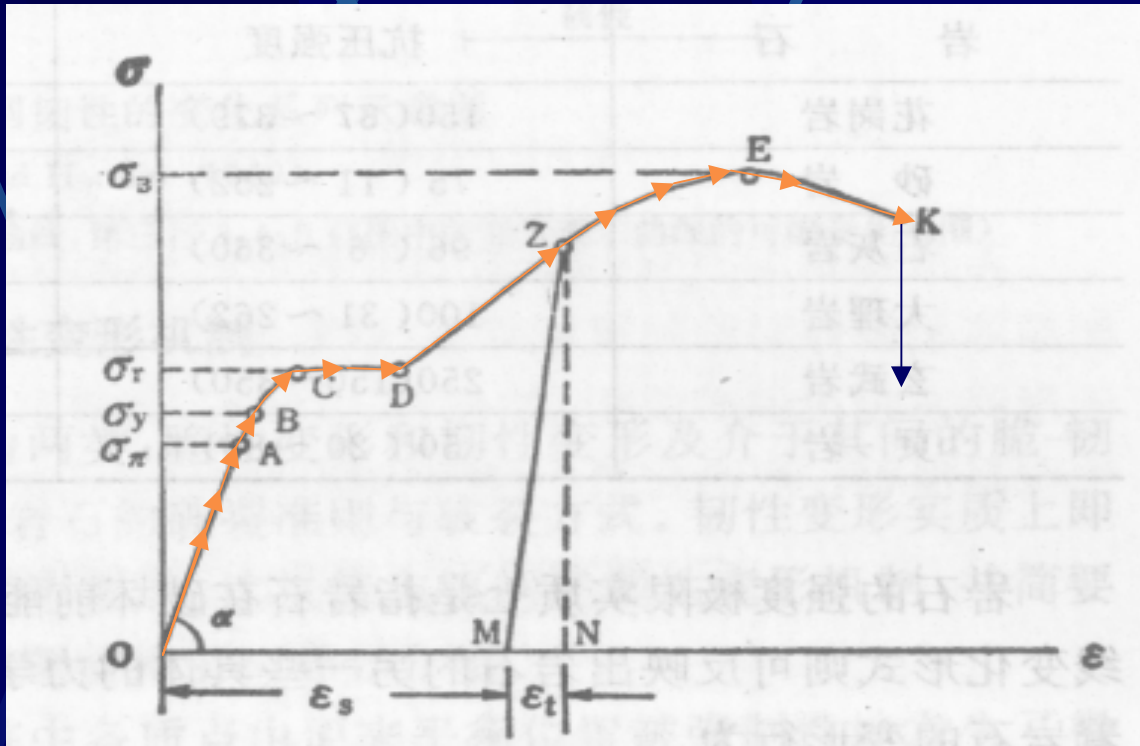


图 5-6　低碳钢拉伸时的应力-应变曲线

σ_π—比例极限；σ_y—弹性极限；

σ_Y—屈服极限；σ_B—强度极限；

一、岩石变形的阶段

- 抗压强度、抗张强度和抗剪强度

各类岩石在常温常压下的强度极限

岩　　石	抗压强度(Mpa)	抗剪强度(Mpa)	抗张强度(Mpa)
花岗岩	150（37～379）	20（15～30）	50～7
砂岩	75（11～252）	10（5～15）	1～3
灰岩	96（6～360）	17（10～20）	3～6
大理岩	100（31～262）	8（5～20）	3～9
玄武岩	250（150～350）	15（10～20）	—
页岩	50（20～80）	7（1.7～3.3 ）	—

一、岩石变形的阶段

5）常见岩石类型的强度极限

表 5-3　几种岩石在干、湿条件下的抗压强度表

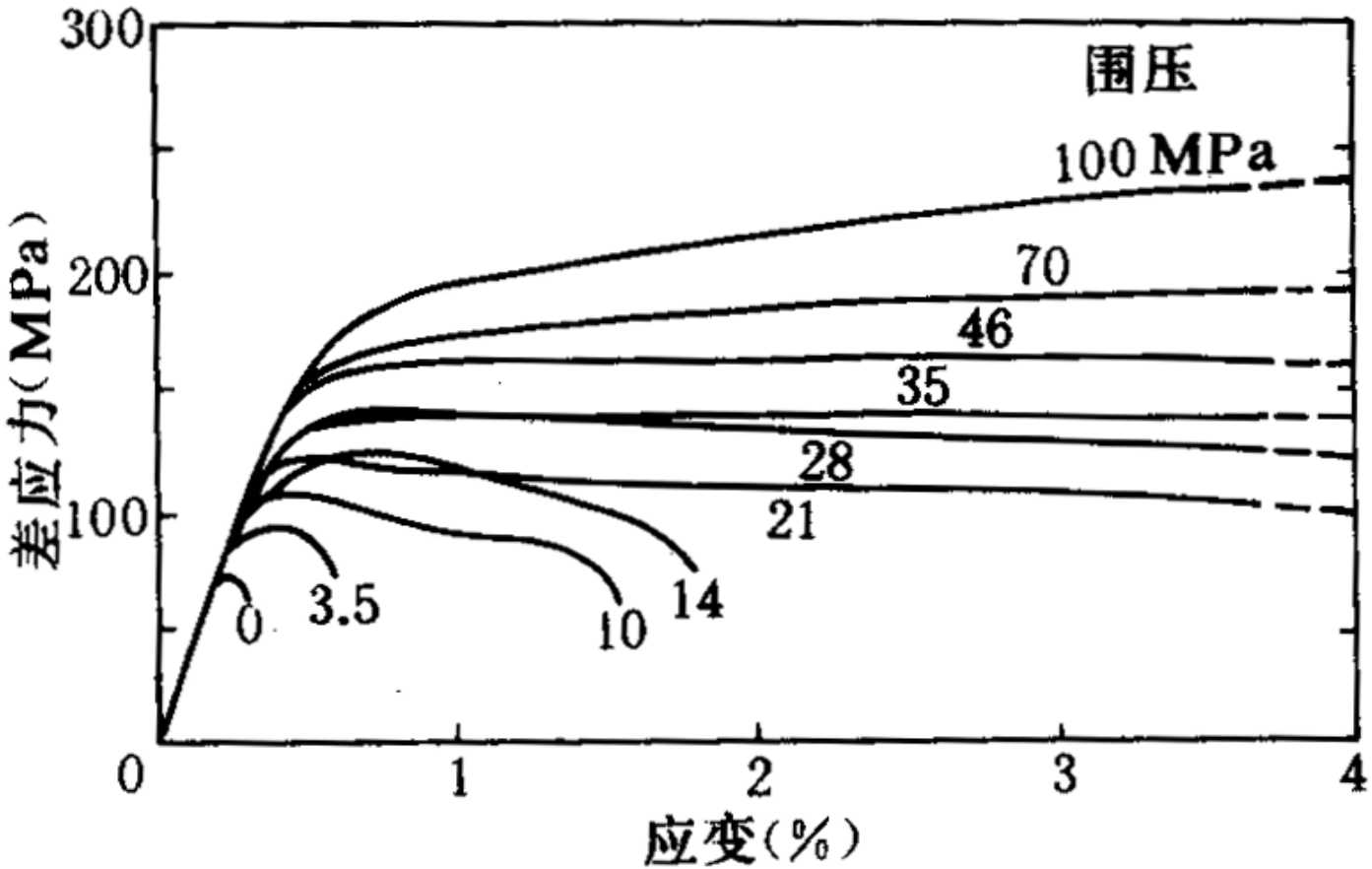
岩石名称	干燥状态下的抗压强度（MPa）	潮湿状态下的抗压强度（MPa）	强度降低率（%）
花岗岩	193～213	162～170	16～20
闪长岩	123	108	21.8
煌斑岩	183	143	12
石灰岩	150	118.5	21
砾　岩	85.6	54.8	36
砂　岩	87.1	53.1	39
页　岩	52.2	20.4	60

第四节　岩石的力学性质与岩石的破裂

二、影响岩石力学行为的主要因素

- 1）围压

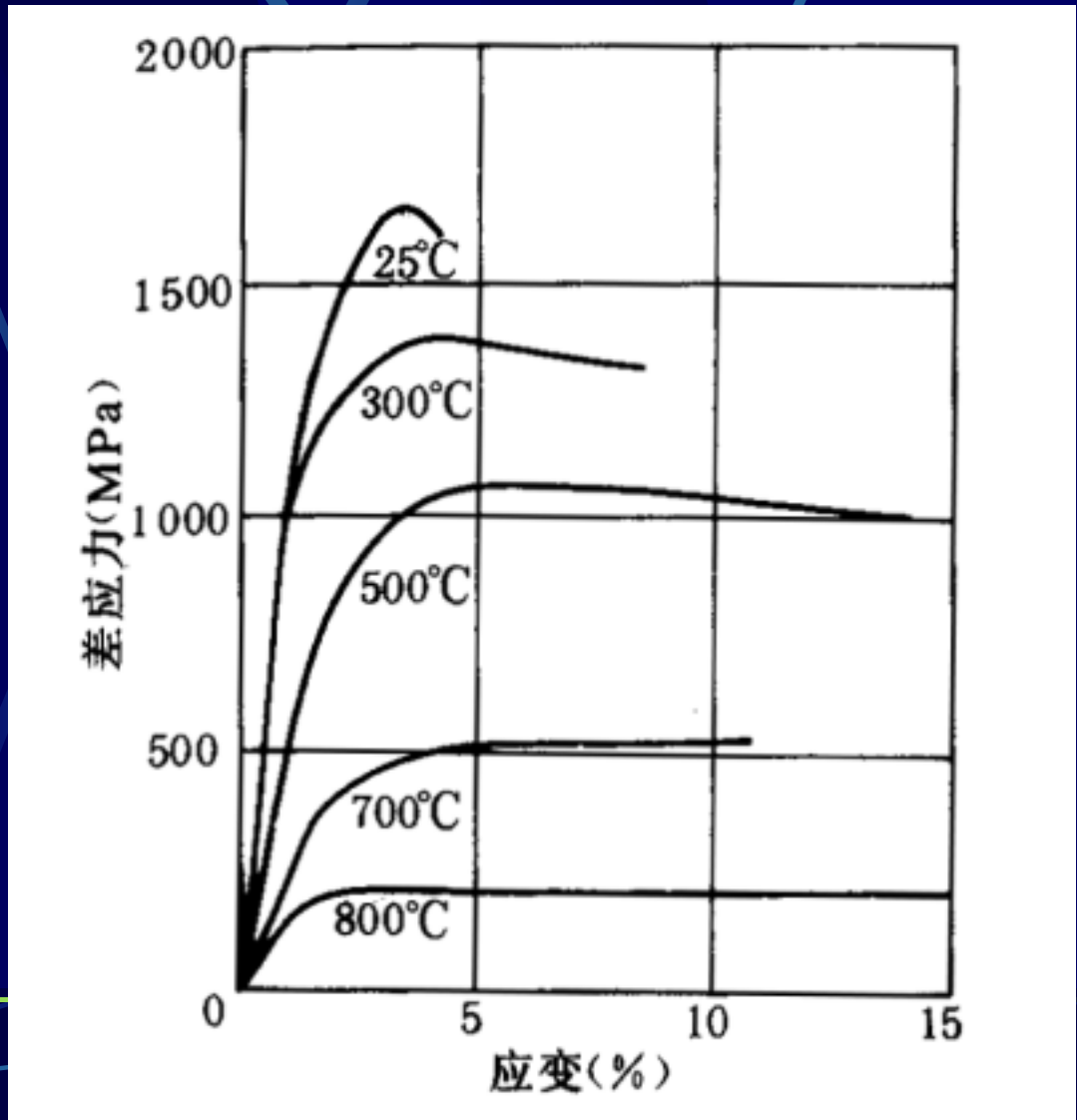
大理岩



二、影响岩石力学行为的主要因素

2）温度

——玄武岩

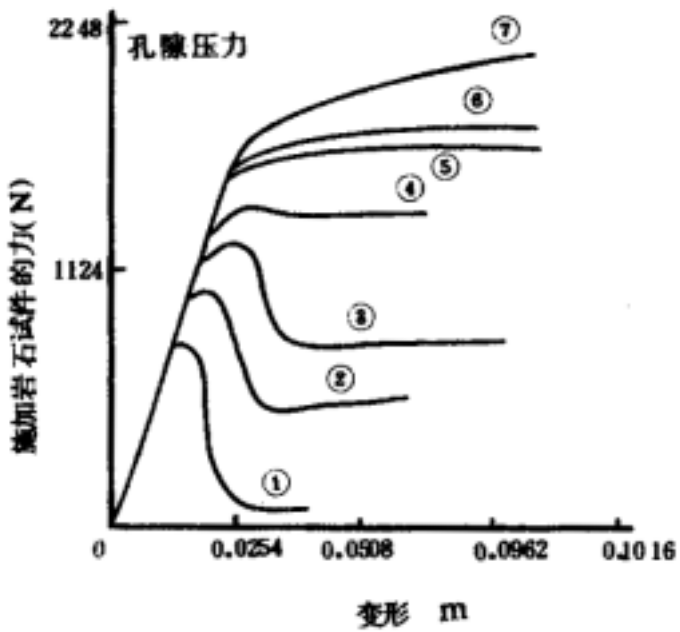


二、影响岩石力学行为的主要因素

3）孔隙流体压力

- 孔隙压力：孔隙压力是由于岩石中的孔隙内，含有一定量的流体，受压后产生一种与外界压力方向相反的反向应力。
- 有效围压：由于孔隙压力的存在，抵消了围压的作用。

$$P_e=P_c-P_f$$



印第安纳石灰岩在68.95MPa 围压、不同孔隙液压下应力—应变曲线
（据 Spencer，1981）
孔隙压力①68.950MPa；②65.055MPa；③55.160MPa；④41.370MPa；⑤34.475MPa；⑥27.580MPa；⑦0MPa

二、影响岩石力学行为的主要因素

3）孔隙流体压力

- 孔隙压力与有效围压问题

$$P_e=P_c-P_f$$

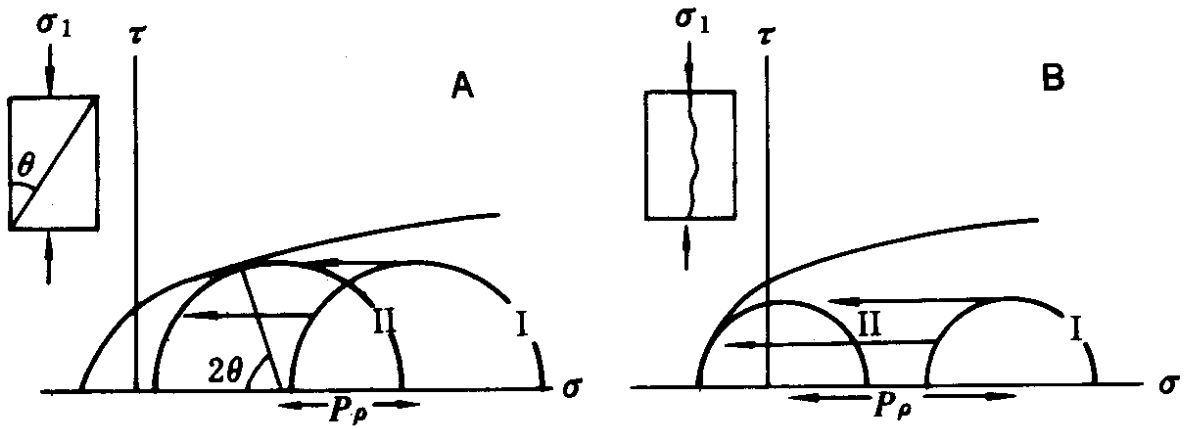


图 5-11　孔隙压力的效应示意图

圆 I 位于莫尔包络线下，岩石处于稳定状态。随着孔隙压力 P_ρ 的增加，应力圆向左移动，当与莫尔包络线相切时，形成剪裂（A）或张裂（B）而破坏

二、影响岩石力学行为的主要因素

3）孔隙流体压力

$P_e=P_c-P_f$

表 5-3　几种岩石在干、湿条件下的抗压强度表

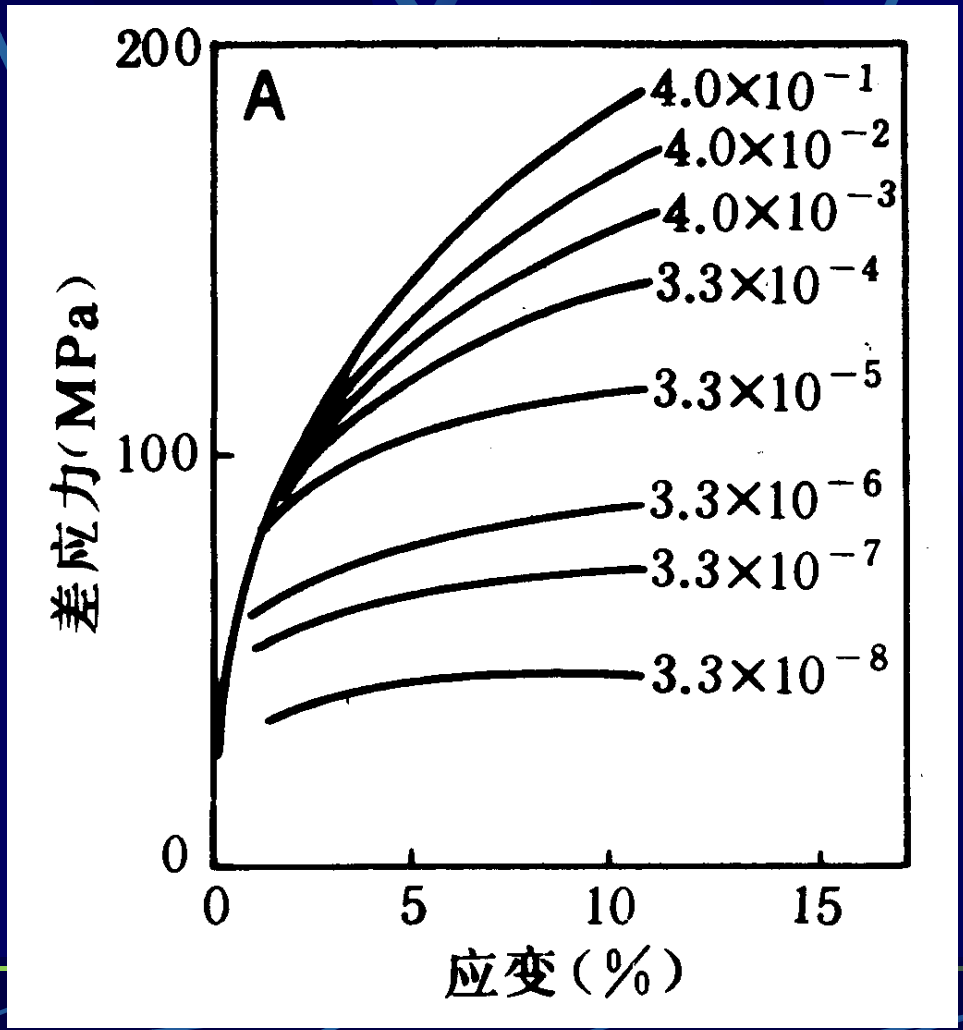
岩石名称	干燥状态下的抗压强度（MPa）	潮湿状态下的抗压强度（MPa）	强度降低率（%）
花岗岩	193～213	162～170	16～20
闪长岩	123	108	21.8
煌斑岩	183	143	12
石灰岩	150	118.5	21
砾　岩	85.6	54.8	36
砂　岩	87.1	53.1	39
页　岩	52.2	20.4	60

二、影响岩石力学行为的主要因素

4）时间：

- 应变速率

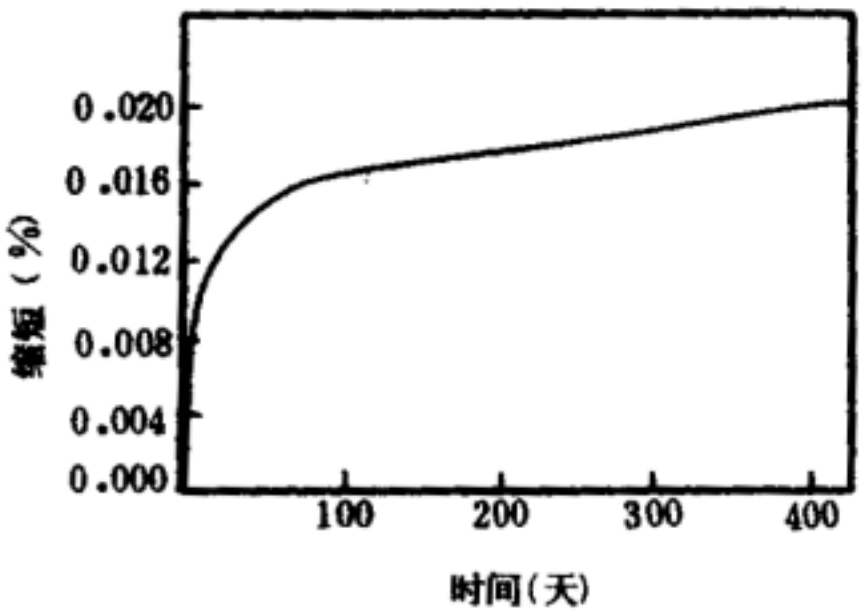
Yule 大理岩，围压50MPa, 温度500 ° C



二、影响岩石力学行为的主要因素

4）时间

蠕变：在恒定应力作用下，应变随着时间的持续而增加的变形行为。

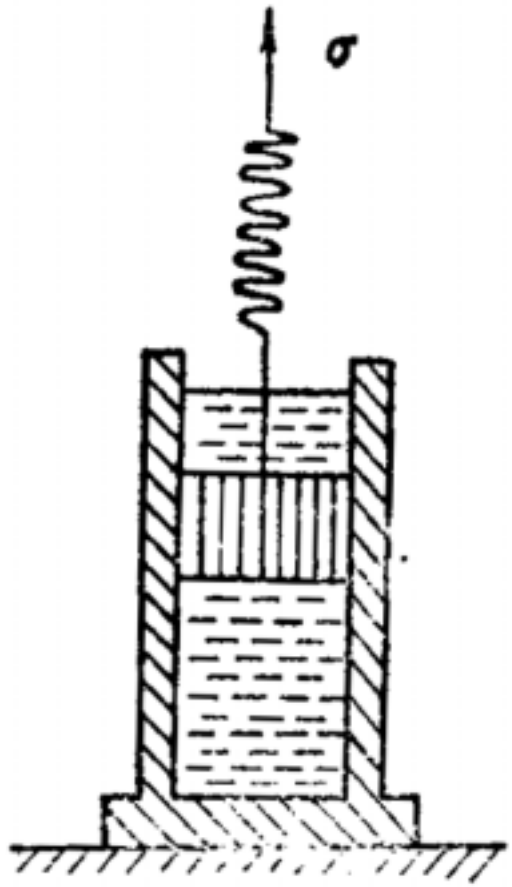


索伦霍分石灰岩在1400kg/cm^{2}应力下蠕变曲线（据 Griggs，1936）

二、影响岩石力学行为的主要因素

4）时间

松弛：在应变保持不变的情况下，随着时间的变化，应力逐渐减小的现象。



马克思威尔模型

二、影响岩石力学行为的主要因素

5）外力作用方式：拉伸与压缩

6）快速施力与缓慢施力

7）重复施力

各类岩石在常温常压下的强度极限

岩　　石	抗压强度(Mpa)	抗剪强度(Mpa)	抗张强度(Mpa)
花岗岩	150（37～379）	20（15～30）	50～7
砂岩	75（11～252）	10（5～15）	1～3
灰岩	96（6～360）	17（10～20）	3～6
大理岩	100（31～262）	8（5～20）	3～9
玄武岩	250（150～350）	15（10～20）	—
页岩	50（20～80）	7（1.7～3.3 ）	—

第四节　岩石的力学性质与岩石的破裂

三、岩石的破裂

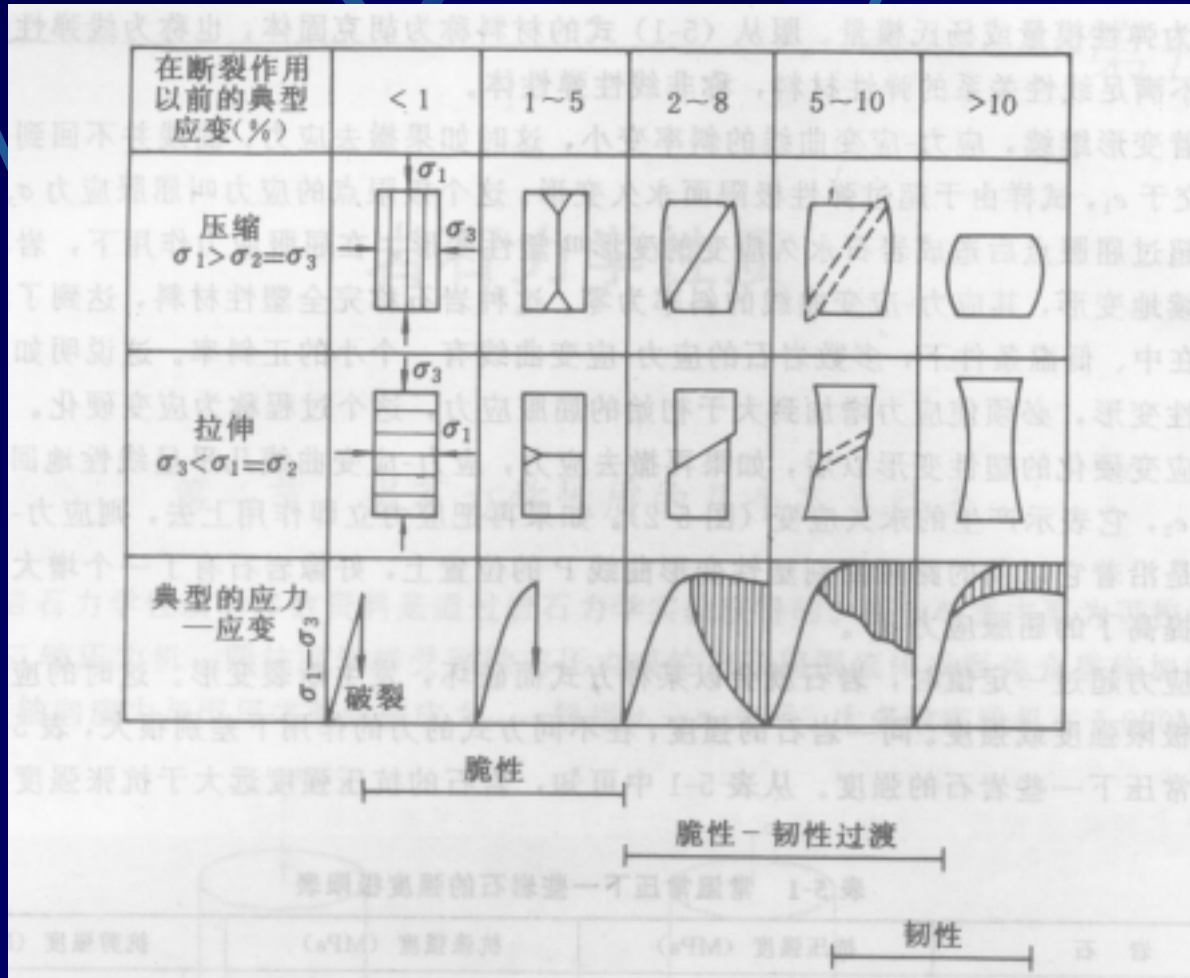


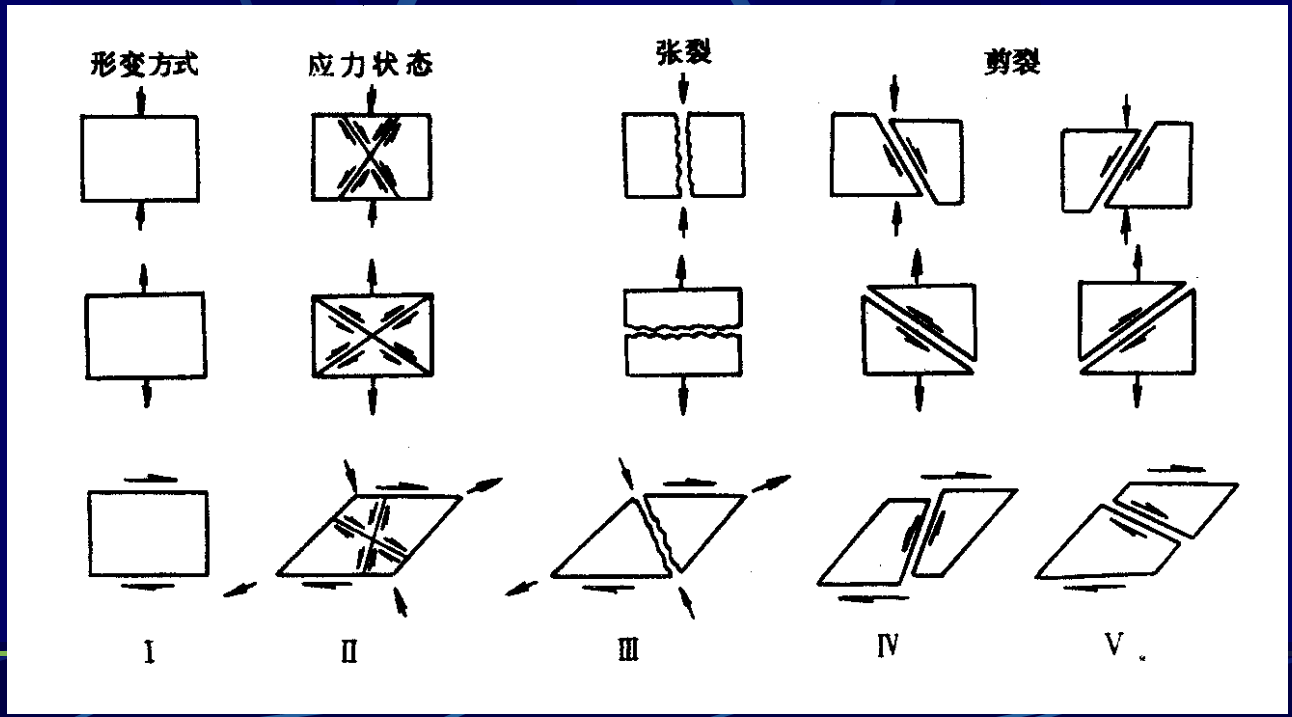
图 5-3　脆性-韧性行为的变形特征及其应力-应变曲线形式图示

(据 D. T. Griggs 和 J. Handin，1960，引自 Hobbs，Means 和 Williams，1976)

三、岩石的破裂

1）岩石破裂的两种主要方式

——张裂和剪裂



三、岩石的破裂

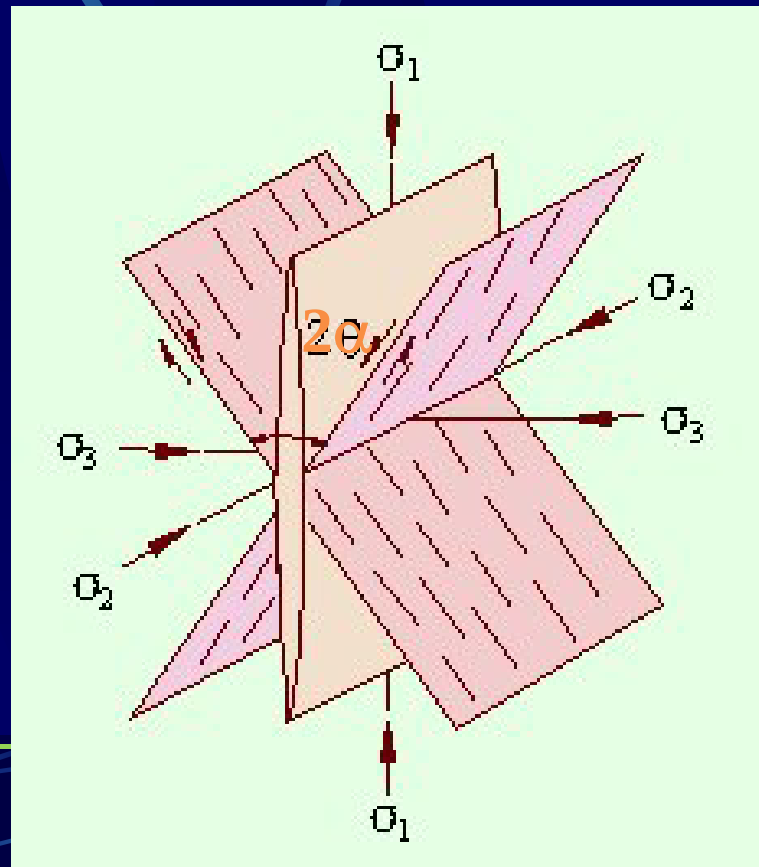
2）岩石破裂理论：

按照应力分析，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。因此，剪切破裂面应该发生在这个方向上，成对出现，称为共轭剪切破裂面。

剪切破裂面与最大主应力之间的夹角，称为剪裂角（α）。

共轭剪切破裂面之间的锐夹角，称为共轭剪裂角（2α）。

$2\alpha=90°$

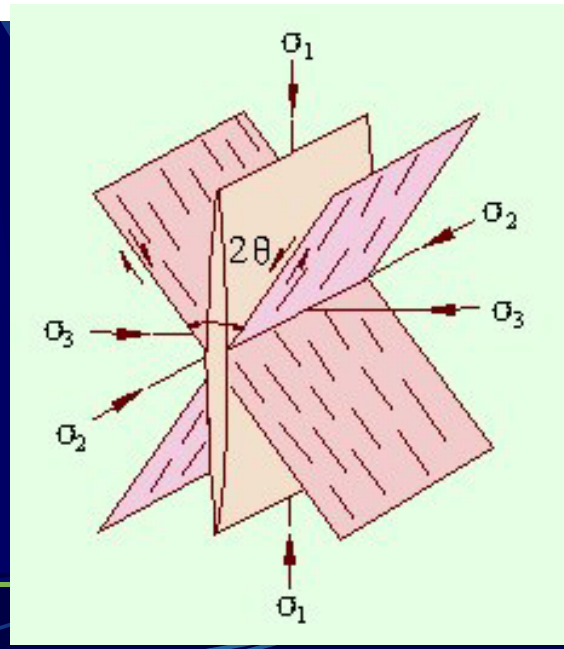


三、岩石的破裂

2）岩石破裂理论：库仑-纳维叶破坏准则

$$|\tau| = \tau_0 + f \cdot \sigma_n$$

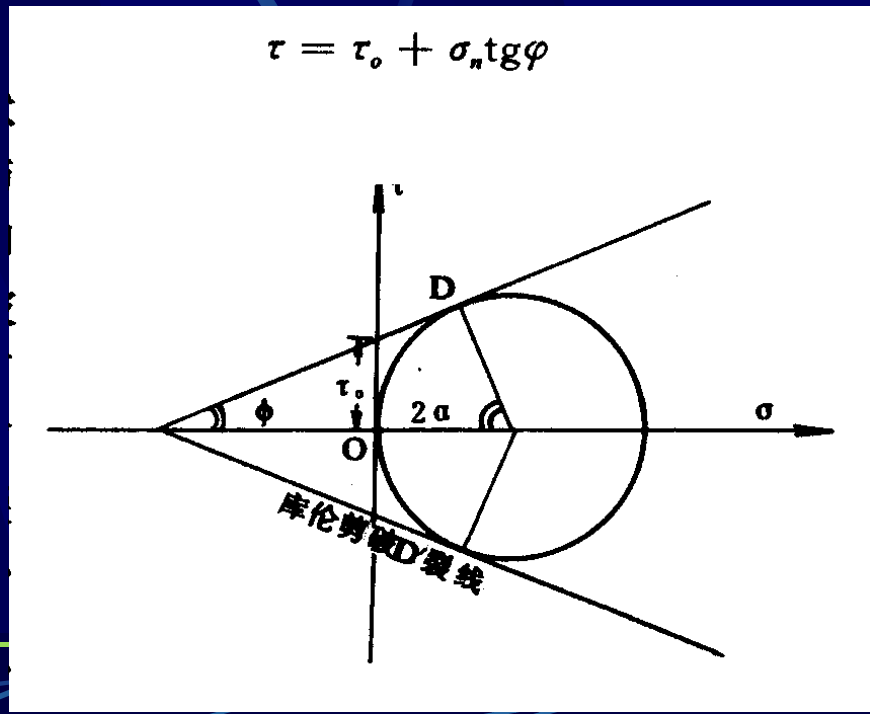
式中：τ 是剪切破裂面的抗剪强度；τ_0 是当 $\sigma_n = 0$ 时岩石的抗剪强度，又称内聚力（C）；f 是内摩擦系数；σ_n 是破裂面上的正应力。



三、岩石的破裂

2）岩石破裂理论：库仑-纳维叶破坏准则

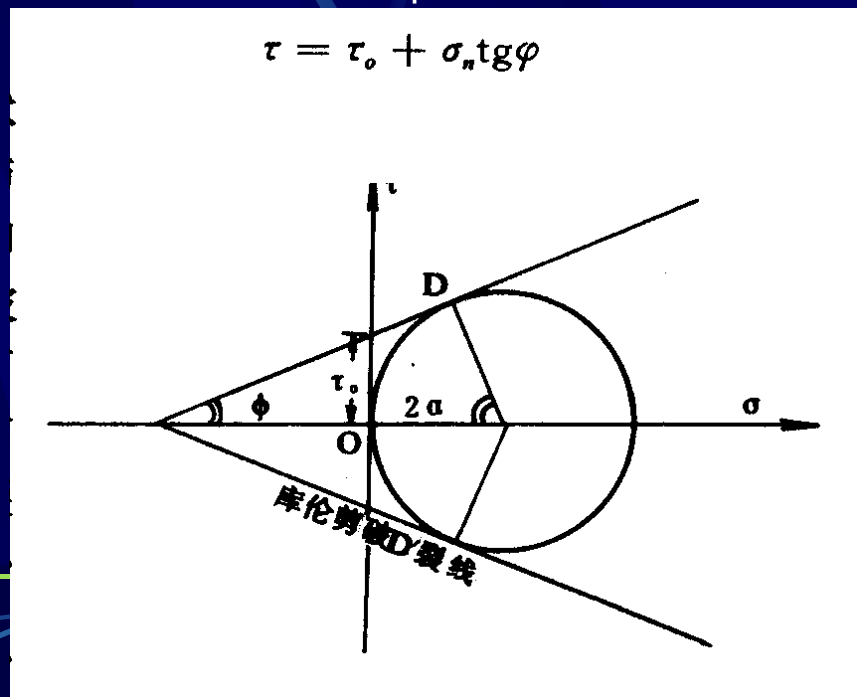
- 以σ为横坐标，τ为纵坐标，则式$|\tau| = \tau_0 + f\cdot\sigma$为两条直线的方程，称为库仑剪切破裂线。
- 令直线与坐标横轴夹角为ϕ，则：$f=tg\ \phi$。其中ϕ称为内摩擦角。有：$\tau = \tau_0 + \sigma_n tg\ \phi$



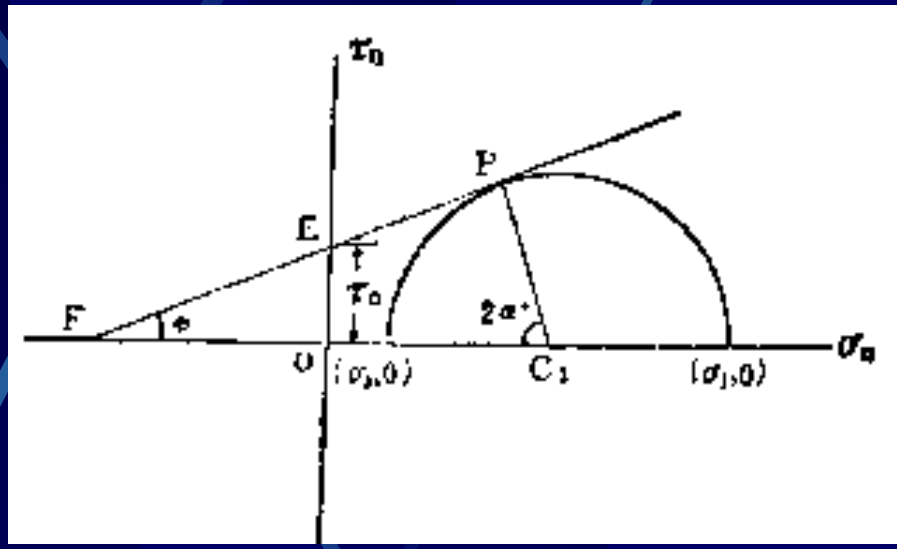
三、岩石的破裂

下图是单轴压缩时岩石破裂的莫尔圆。其中D和D’点上的正应力和剪应力代表剪切破裂时破裂面上的正应力和剪应力。

当岩石发生剪切破裂时，剪裂面与最大主应力轴的夹角：$\alpha=45°-\varphi/2$；共轭剪裂角$2\alpha=90°-\varphi$



三、岩石的破裂

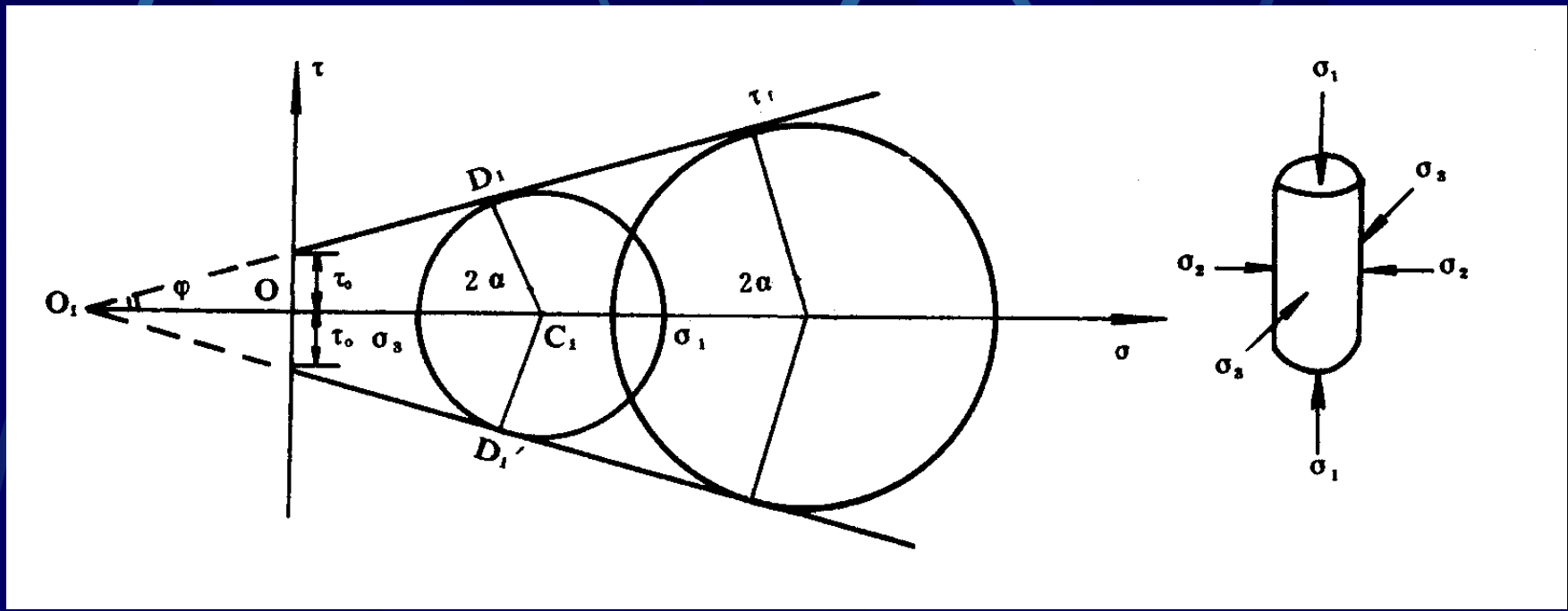


单向压缩下一组剪裂面与最大主应力轴 σ_1 之间夹角（α'）实验值

材料	样品地点	实验规格（cm）	α' 值
花岗闪长岩	江苏[illegible]岩体	5×5×5	16°—20°
铸铁	武口铸铁	质柱为2.5直径1.5	22°—27°
砂岩	元古[illegible]系中粗粒砂岩	5×5×5	20°—30°
灰岩	南京古[illegible]系[illegible]灰岩	5×5×5	28°—33°
泥质	南京第四系亚砂土亚粘土	10×5×2	34°—40°

三、岩石的破裂

2）岩石破裂理论：库仑剪切破裂线在低围压时基本上为直线；说明φ和τ_0基本上不变。



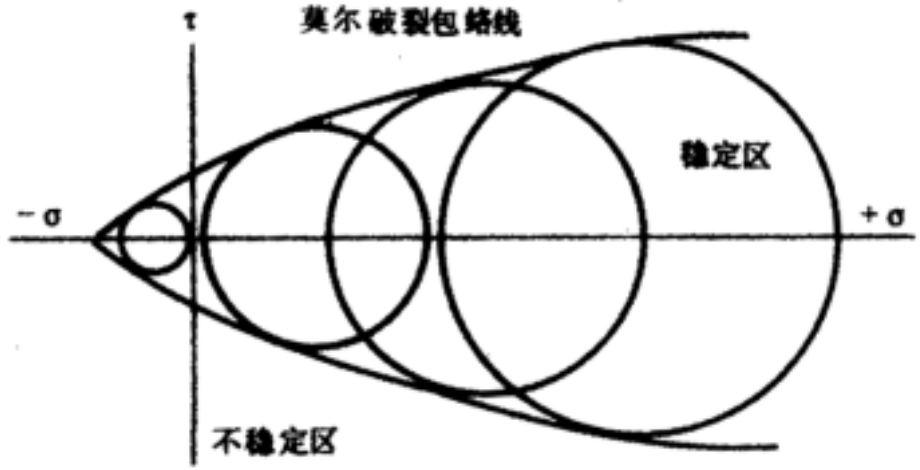
库仑-纳维叶破坏准则

三、岩石的破裂

2）岩石破裂理论：莫尔包络线——高围压

莫尔破坏准则

$$\tau = f(\sigma_n)$$



莫尔破裂包络线

本讲要点

- 岩石变形的阶段；
- 影响岩石力学行为的主要因素；
- 岩石的破裂与岩石破裂理论。

本讲思考、讨论题

1. 岩石变形的阶段与影响岩石力学行为的主要因素。
2. 张裂和剪裂。
3. 库仑-纳维叶破坏准则。