

第三章 地质体构造分析的力学基础

地壳岩石中千姿百态的构造变形都是力作用的结果。如果要研究各种构造变形的力学成因和相关规律，就要求学生了解有关岩石受力的基础知识，具备应力、应变分析的基础。

第一节 地质体及地质体的产状

力：是物体间的相互作用。它是矢量，基本要素是大小、方向和作用点。

一、面力和体力

相邻岩块或地块之间的作用力属于接触力。接触力往往作用于物体边界一定面积的范围内，称为面力。

地壳岩石受到重力、惯性力等属于非接触力。非接触力作用于物体内部每一质点上，与围绕质点的物质质量有关，称为体力。

二、外力和内力

研究对象以外的物体对被研究物体施加的作用力，称为外力。

由外力作用引起的物体内部各部分之间的相互作用力，称为内力。

外力与内力是一对相对的概念，当研究范围扩大或缩小时，外力可以变为内力，内力可以变为外力。例如：地心引力对地壳来说是外力，但对整个地球而言则是内力。

三、应力、正应力和剪应力

1. 应力

在研究物体内部某一截面的内力时，可设想沿此截面将物体截开并将其中的一部分移去，另一部分仍保留移去部分的作用力，则可计算出该截面上的作用力，这种方法叫截面法。

为了研究截面上某点附近的内力，可以围绕一点取一微小面积 ΔF ，设其上的作用力为 P ，则将

$$\lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} = \frac{dP}{dF} = P$$

称为 n 截面上 m 点的应力。

2. 正应力和剪应力

应力 P 可以分解为两个分量，其一是垂直于截面 n ，用 σ 表示，称为 n 截面上 m 点的正应力；其二是与截面相切，以 τ 表示称为 n 截面上 m 点的剪应力。

3. 应力的单位

应力的单位是帕斯卡（Pascal），简称帕（Pa）。即 N/m^2 。

四、一点的应力状态

为了研究 P 点的应力状态，以 P 点为几何中心截取一微分六面体，称为单元体，六面体的各棱边平行于直角坐标系的坐标轴。每个面上的应力可分解为一个正应力、两个剪应力，这样 P 点的应力状态也就确定了。

五、主应力、应力椭圆体

1. 主应力

随着单元体取向的改变，应力分量也将改变。通过证明能够找到这样一种取向：单元体表面上的剪应力都为零，即三个正交截面上没有剪应力，只有正应力，这种情况下的正应力称为主应力，

分别用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示，并在数值上 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (规定压应力为正，拉应力为负)。

2. 应力椭球体

根据主应力的大小和方向，按一定的比例可以作一个三轴椭球体，椭球体的长轴、中间轴和短轴分别平行于 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ，并且与其值的大小成比例。该椭球体称为应力椭球体。

第二节 应力分析的莫尔圆

在应力分析中，有一种重要的图解方法，称为应力莫尔圆，它能够完整地代表一点的应力状态。

一、单轴应力状态的莫尔圆

1. 单轴应力状态的莫尔圆的画法

建立以 σ 为横坐标，以 τ 为纵坐标的直角坐标系，按一定的比例在横坐标上自原点 O 起截取 $OA = \sigma_1$ ，以 $(\sigma_1/2, 0)$ 点为圆心，以 $\sigma_1/2$ 为半径画圆，这就是单轴应力状态的莫尔圆。

该圆的方程是： $(\sigma - \sigma_1/2)^2 + \tau^2 = (\sigma_1/2)^2$

2. 莫尔圆的物理意义

莫尔圆上任意一点 D 的坐标 $(\sigma_\theta, \tau_\theta)$ 的物理意义是： σ_θ 、 τ_θ 分别代表一个面的法线与 σ_1 夹 θ 角截面上的正应力和剪应力。

二、双轴应力状态的莫尔圆

1. 双轴应力状态的莫尔圆的画法

与单轴应力状态莫尔圆的画法相似，建立以 σ 为横坐标，以 τ 为纵坐标的直角坐标系，按一定的比例在横坐标上自原点 O 起截取 $OA = \sigma_1$ ， $OB = \sigma_3$ ，得到 A 、 B 两点，以 $AB/2$ 长为半径 $((\sigma_1 - \sigma_3)/2)$ ，以 AB 的中点为圆心 $((\sigma_1 + \sigma_3)/2, 0)$ 画圆，就得到双轴应力状态莫尔圆。

该圆的方程为：

$$(\sigma - (\sigma_1 + \sigma_3)/2)^2 + \tau^2 = ((\sigma_1 - \sigma_3)/2)^2$$

2. 莫尔圆的物理意义

莫尔圆上任意一点 D 的坐标 $(\sigma_\theta, \tau_\theta)$ 的物理意义是： σ_θ 、 τ_θ 分别代表一个面的法线与 σ_1 夹 θ 角截面上的正应力和剪应力。

第三节 应变的概念

一、应变的概念

应变是用来度量物体变形程度的量。物体的变形可划分为：

长度的变化——线变形

角度的变化——角变形

体积的变化——体积变形

因此，对应有线应变、剪应变和体积应变。

(一) 线应变

变形前后物体中线段的相对伸长或缩短称为线应变。通常用以下几个量描述线应变：

1. 伸长率 (e)：是指绝对伸长或绝对缩短 ($\Delta L = L - L_0$) 与原长度 (L_0) 之比。

$$\text{即：} e = (L - L_0) / L_0 = \Delta L / L_0$$

2. 长度比 (s)：是变形后长度与变形前长度之比。

$$\text{即：} s = L / L_0 = (L_0 + \Delta L) / L_0 = 1 + e$$

3. 平方长度比 (λ)：指长度比的平方。

$$\text{即：} \lambda = s^2 = (1 + e)^2$$

(二) 剪应变

剪应变是描写变形体中角度变化的量。

变形前 ac 和 cf 垂直，变形后变为锐角 $\angle bcf$ ，
直角 $\angle acf$ 的角度改变量 ψ 称为角剪切，角剪切的正切 $\gamma = \tan \psi$ 称为剪应变。

如果角剪切是按顺时针方向旋转，剪应变为负值；

如果角剪切是按逆时针方向旋转，剪应变为正值。

(三) 体积应变

体积应变亦称膨胀度：是指变形后体积的变化量与原体积之比。

即： $\Delta = (V - V_0) / V_0 = \Delta V / V_0$

式中， Δ —体积应变或膨胀度； V —变形后的体积， V_0 —变形前体积。

二、应变椭球的概念

设想未变形体中原来一点附近存在一单位圆球体，均匀变形后圆球变为三轴椭球，原来球面上的质点经变形后位于椭球面上，这个椭球称为应变椭球。

应变椭球有三个互成直交的对称面，这些平面相交于椭球的三个主直径方向，这些主直径方向叫应变主方向，分别称为 λ_1 方向、 λ_2 方向和 λ_3 方向。取 λ_1 方向平行于椭球体的长轴， λ_2 和 λ_3 方向分别为椭球体的中间轴和短轴。

λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别代表椭球体三个主轴方向的质点线的平方长度比，即： $\lambda_1 = s_1^2$ 、 $\lambda_2 = s_2^2$ 、 $\lambda_3 = s_3^2$ 。

如果取椭球的几何中心为坐标原点，取 x、y 和 z 轴分别平行 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 方向，则应变椭球体的方程为：

$$x^2 / \lambda_1 + y^2 / \lambda_2 + z^2 / \lambda_3 = 1$$

通过椭球中心并包含任意两个应变主轴的应变主平面与椭球面相交成应变椭圆

在构造地质学中，我们经常利用应变椭圆进行二维变形分析。

三、旋转应变和非旋转应变

在变形过程中，如果应变主轴的方位始终不变，只是应变主轴的长度发生变化，这种应变称为非旋转应变；如果应变主轴的方位不断变化，这种应变称为旋转应变。

简单的拉伸和压缩产生非旋转应变；

剪切变形是典型的旋转应变。

四、递进变形

1. 有限应变：物体变形的最终状态与初始状态对比发生的变化，叫总应变或有限应变。

2. 递进变形：在变形过程中，物体从初始状态变化到最终状态的过程是一个由许多次微量应变逐次叠加的过程，这种变形的发展过程，称为递进变形。

3. 增量应变：递进变形过程中某一瞬间正在发生的小应变叫增量应变。

4. 无限小应变：在递进变形过程中，若所取的瞬间非常微小，其间发生的微量应变可称为无限小应变。

在变形的任一阶段，都可以把应变状态分解为两部分：一是已经发生了的有限应变，二是正在发生的无限小应变。

5. 共轴递进变形与非共轴递进变形

在递进变形过程中，如果各增量应变椭球体的主轴与有限应变椭球体的主轴一致，这种变形叫共轴递进变形，否则就叫非共轴递进变形。

五、简单剪切和纯剪切变形

1. 简单剪切变形：是典型的非共轴递进变形，是物质沿着一系列平行的密集排列的剪切面发生的剪切变形。

2. 纯剪切变形：是典型的共轴递进变形，这种变形导致平行于一个轴的均匀缩短，平行另一个

轴的均匀拉长。

简单剪切和纯剪切都没有发生体积、面积的损失。

第四节 岩石的力学性质及影响因素

岩石的力学性质是指在应力作用下岩石变形的特征，如弹性、塑性、强度等。

岩石的力学性质与本身的成分及结构构造有关，同时又与温度、压力等关系密切。

一、常温常压下岩石的力学性质

人们常用常温常压下岩石单轴力学试验获得该条件下岩石力学特性。在常温常压下岩石单轴压缩实验的应力-应变曲线（根据陈子光，1986）。

1. 曲线中 A 点以下的 OA 段呈微向上弯曲状。

这是由于岩石中往往存在天然孔隙和裂隙。当初加载荷时孔隙和微裂隙被压紧，应变较大，但压紧后，岩石抵抗外力的能力有所增强的缘故。有围压条件下的岩石力学实验没有 OA 段，致密岩石的力学试验出现 OA 段很小或没有。

2. AB 段曲线呈近直线状。

说明应力与应变之间呈线性关系。直线的斜率为岩石的弹性模量 E。

在 B 点以前任何一点卸载，变形将消失。因此 B 点以前是弹性变形阶段。

3. 超过 B 点以后，曲线呈向下弯曲状。

说明应力增加不大的情况下即能产生较大的变形。在 BC 段内任意一点卸载，当应力为 0 时，应变不能完全恢复，即产生了永久变形。称保留部分的应变为塑性应变。因此 BC 段代表岩石的塑性变形阶段。在塑性变形时，岩石试件内已产生一些微破裂。

当曲线非常接近 C 点时，试件表面开始出现宏观破裂。C 点是曲线的最高点，代表岩石所能承受的最大应力值。如果保持试件上的 C 点应力值不变，试件将突然破坏。因此 C 点应力值称为破坏强度。

4. 到 C 点时，岩石已不能承受再大的压力。如果从 C 点开始逐步卸载，则应力-应变曲线上将出现图中的 CD 段。在 CD 段，岩石强度逐渐下降，当岩石试件中某些破裂面上的内聚力完全丧失时，试件将破裂成几块，此为岩石的破坏。

因此，岩石的变形可归结为三个阶段：弹性变形阶段、塑性变形阶段和破裂变形阶段。这三个变形阶段依次发生。但对于不同岩石，这三个阶段发育的程度很不同。有些岩石在破坏前能产生较大的塑性应变 ($>5\%$)，称为韧性或延性；有些岩石在破坏前只能产生很小的塑性应变 ($<3\%$)，称为脆性。

但当温度、围压等条件发生变化时，岩石的力学性质将会发生较大变化。

二、影响岩石力学性质的因素

1. 围压

在不同围压下进行的大理岩三轴实验表明，随着围压增加，岩石弹性极限增大，延性增强，强度及破坏前的应变增大。但岩石类型不同，所受影响的程度不同。对碳酸盐类岩石及砂岩来说，围压对弹性极限的影响较小，对延性影响较大。

对大部分硅酸盐类岩石来说，围压的加大将使弹性极限有显著提高，但破裂前的永久变形量提高不大。

围压对岩石力学性质影响的原因在于围压增加使固体物质质点彼此靠近从而增加了岩石内聚力的缘故。

2. 温度

在地壳常温层以下，温度随深度的增加而增加。预计，地壳底部温度可高达 $1100-1300^{\circ}\text{C}$ 。因此，在研究地壳岩石变形时必须考虑温度因素。

在固定围压、不同温度条件下进行的岩石力学实验表明，温度升高可降低岩石的弹性极限和强度，促进岩石的延—脆性转化。

在室温情况下花岗岩是脆性的；在 300℃时已产生显著的永久变形；在 800℃时几乎是完全延性的。

温度还可以促进蠕变和松弛现象的发生和发展。

温度升高产生延性的原因是由于在高温条件下岩石内部分子的热运动增强, 因此削弱了岩石的内聚力, 使晶粒容易产生滑移。

3. 孔隙液压

如果岩石的孔隙中含有水, 在成岩过程中由于孔隙缩小将造成孔隙内的液体对矿物颗粒产生一种压力, 这种压力与矿物表面垂直, 称为孔隙液压。

根据石油、天然气开发的实际资料, 孔隙液压随着岩石埋藏深度的增加而增加, 但并非呈简单的线性关系, 在一定深度上两者趋近相等。

由于孔隙液压与矿物颗粒表面垂直, 所以将直接减缓围压的作用。设围压为 P , 孔隙液压为 P_s , 则有效围压 $P_e = P - P_s$ 。因此孔隙液压对岩石力学性质的影响与围压相反: 它使岩石的延性、强度和弹性极限降低, 脆性增加。

4. 时间

时间对岩石力学性质的影响是多方面的。

- (1) 如快速加力岩石可表现脆性变形, 缓慢加力脆性物质也能出现塑性变形。
- (2) 当多次、重复加力时, 在没有达到岩石强度极限的情况下可使岩石发生脆性破坏。或者说, 多次重复加力可以降低岩石的破坏强度。当在重复加力情况下破坏应力降低到某一极限值时, 如果继续降低应力, 无论重复加力多少次也不能引起岩石破裂。该极限值称为疲劳极限。

蠕变是指岩石在恒定载荷作用下应变随时间缓慢增长的现象。在地壳变形过程中, 时间以百万年计, 因此蠕变现象是重要的。

松弛是指应变保持不变时随着时间应力逐渐减小的现象。

在地质构造的应力—应变解析中, 时间对岩石变形的影响主要体现在应变速率、蠕变和松弛三个方面。

蠕变、松弛和应变速率共同说明时间对岩石变形的意义。显然, 在以百万年为单位的地质历史时期中, 时间因素对岩石变形的影响是巨大的。

(五) 外力作用方式

外力作用方式不同, 岩石的力学行为也不同。在张力的作用下岩石容易发生脆性破裂; 在同等环境的压缩条件下, 岩石则显示延性。

索伦霍夫石灰岩的拉伸和压缩实验表明: 外力作用方式不同, 灰岩的脆延性转化的条件不同, 拉伸时脆性转化为延性所需温度远远大于压缩时的转化温度。在 400℃、 $2 \times 10^2 \text{ MPa}$ 围压时压缩条件下已发生脆延性转化, 在此条件的拉伸情况下, 灰岩仍为脆性变形。

第五节 岩石的破坏

当应力达到某一极限值时, 岩石本身失去抵抗外力的能力, 最终导致岩石完全破裂。

一、破坏和破裂的类型

Griggs & Handin (1960) 根据岩石破坏前应变量的大小, 将破坏分成 5 种类型:

(1) 破坏前永久应变 $\leq 1\%$, 应力—应变曲线几乎为直线型, 只能在垂直最大拉伸应力方向上产生断裂面一张裂。这种情况发生在地表或接近地表的环境, 常温常压或接近常温常压。

(2) 破坏前永久变形量为 1-5%, 应力—应变曲线有少量塑性变形段。岩石破裂时在与 σ_1 夹角小于 45° 方位上出现少量破裂面—剪裂面但仍以张裂面为主。这种情况相当于岩石有一定埋深, 温度和围压较前者略高。

(3) 破裂前永久变形量为 2-8%, 应力—应变曲线上出现较大的塑性变形, 并有明显下降段。岩石

中出现单一的剪裂面,在地质体中,这些破裂面可发育成正断层、逆断层或平移断层。这种情况相当于岩石埋深达 2-5km,围压和温度较高的情况。

(4)破坏前永久变形量达 5-10%,应力—应变曲线变化范围较大。破裂仍只为剪切破裂。岩石埋深 10-20km 的围压和温度较高或应变速率较低的情况与此相应。代表岩石的延—脆性过渡状态。

(5)破坏前永久变形量为 10%,应力—应变曲线无下降段。岩石呈现完全延性状态。此时温度大于 500℃,围压大于 500MPa。相当于岩石埋深大于 20km 条件。

上面的五种破坏方式中包含了两种破裂方式——张裂和剪裂。

二、张裂

张裂是指垂直于最大张应力方向的破裂面。它是该面上张应力达到岩石抗张强度时发生的。

张裂代表地壳浅部层次的构造形态。从理论上讲,根据岩石实验数据,可以推断出张裂面形成的最大深度。Brace(1964)推断出干燥辉绿岩中张节理形成的最大深度为 2.7km。

三、剪裂

剪应力达到或超过岩石的抗剪强度时发生的破裂称为剪裂。

最大剪应力理论认为,剪裂将沿着最大剪应力作用面发生。最大剪应力作用面成对出现并与 σ_1 和 σ_3 夹 45° 角。但岩石力学实验结果及剪切节理的野外观察表明,剪切破裂面与 σ_1 的夹角总是小于 45° 。因此一对共轭剪切破裂面形成一对锐角和钝角。正常情况下,锐角平分线的方向平行 σ_1 ,钝角平分线平行 σ_3 。

剪裂角:剪切破裂面与 σ_1 所夹的锐角称为剪裂角;

共轭剪裂角:共轭剪切破裂面所夹的锐角叫共轭剪裂角。

剪裂角小于 45° ,说明剪切破裂面并没有沿着最大剪应力作用面发生。

库伦—纳维叶破坏准则认为,岩石发生剪切破裂不仅与该面上剪应力大小有关,还与该面上的正应力有关。岩石并不沿着最大剪应力作用面发生破裂,而是沿着剪应力与正应力达到最佳组合的某个面发生破裂。其数学表达式为:

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

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。

如果以 σ 为横坐标, τ 为纵坐标,则上式代表两条直线方程。这两条直线称为库伦剪切破裂线。 τ_0 是直线截距; f 是直线的斜率。如果直线与坐标横轴所夹锐角为 ϕ , 则 $f = \tan \phi$ 。 ϕ 称为岩石的内摩擦角。因此,上式可写为:

$$\tau = \tau_0 + \sigma_n \cdot \tan \phi$$

进行单轴压缩实验,将破裂时应力状态用莫尔圆表示。该圆与剪切破裂线相切于 D 和 D' 点。D 和 D' 的横坐标和纵坐标分别代表剪切破裂面上的正应力和剪应力。从图中可以看出:当岩石发生剪切破裂时,剪裂面与最大主应力轴的夹角(剪裂角) $\alpha = 45^\circ - \phi/2$,共轭剪裂角 $2\alpha = 90^\circ - \phi$ 。因此剪裂角和共轭剪裂角的大小取决于岩石的内摩擦角 ϕ 。