



[加] D. F. 科 茨 著
雷化南 陈俊彦 云庆夏 等译
刘宝琛 马 光 校

岩 石 力 学 原 理



冶 金 工 业 出 版 社

岩石力学原理

〔加〕D.F.科茨 著

雷化南 陈俊彦 云庆夏 等译

刘宝琛 马光 校

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书是根据加拿大1970年出版的、科茨著《岩石力学原理》(D.F.Coates,《Rock Mechanics Principles》)一书翻译的。书中比较系统地讲解了岩石力学的基本知识、比较通俗地阐述了一些基本理论,列举了一些应用实例。本书以论述采矿工程方面的岩石力学问题为主,同时也兼顾了地质、地震、水利、铁道、建筑等各方面的需要。全书共分八章,前两章讲述岩石的力学属性及岩石力学的基础理论;后六章分别结合采矿工程及其它工程,介绍岩石力学的基本知识与应用实例;书末还附有详细的附录。

本书由包头钢铁学校雷化南、苏昭生、杨万根,中南矿冶学院陈俊彦,西安冶金学院云庆夏等同志翻译,冶金部长沙矿冶研究所刘宝琛和马光同志审校,中国科学院力学研究所和地质研究所的同志也对有关章节做了评阅。本书可供采矿工程技术人员和有关大专院校师生阅读,也可供地质、地震、水利电力、铁路交通、建筑及国防等部门的有关人员参考。

岩 石 力 学 原 理

[加] D.F.科茨 著

雷化南 陈俊彦 云庆夏 等译

刘宝琛 马光 校

*

冶金工业出版社出版

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 23 字数 549 千字

1978年3月第一版 1978年3月第一次印刷

印数 00,001~9,500册

统一书号: 15062·3319 定价(科三) 1.25 元

译者序

岩石力学是研究岩石与岩体的力学性质、力学现象及其规律的一门科学。这门科学是一个较新的领域，发展迅速，得到了国内外的普遍重视。研究这门新的科学，对于我国社会主义建设有着重大的实际意义，因为国民经济的许多重要部门，比如地质、矿业、水利电力、建筑（特别是地下建筑）、铁路交通以及国防工程，都会不同程度地涉及和应用到有关岩石力学理论和知识。

岩石力学与采矿工程的关系密切。在采矿工程中，人们进行的最基本活动，就是把岩石（包括矿石）从地壳中加以破碎而采掘出来，同时设法维护因采掘而形成的各种采掘空间——露天采坑、地下采场、井巷硐室等等。由此可见，破坏岩石与防止岩石破坏，是采矿工程中的基本矛盾；而研究和解决这一基本矛盾，也正是岩石力学的主要内容。它构成了岩石力学的两个研究方面，即所谓的破碎岩石力学和结构岩石力学。所以，可以认为岩石力学这门科学是采矿工程的基础科学。

国外对岩石力学的大量研究工作开始于五十年代末期。我国的岩石力学研究工作，解放以后在毛主席革命路线指引下，有了很大的发展，取得了显著成绩。采矿工业战线广大职工在毛主席关于“开发矿业”的光辉指示指引下，抓革命，促生产，大打矿山之仗，使我国矿山生产得到了很大的发展。近年来，随着矿山开采规模和采掘深度的不断增大，生产实践中所提出的岩石力学问题越来越多，迫切地需要我们去研究解决。为了适应这一需要，我们遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，翻译了这本《岩石力学原理》。

本书内容比较系统丰富，论述通俗易懂，联系采矿工程比较紧密，既阐明了一些公认的基本理论，也列举了一些应用实例。同时，每章都附有练习题和参考文献。美国、加拿大等若干国家的一些大学已将此书选作教材。当然，本书也有一些缺点和错误，对此我们做了一些删节、校正和补充工作。但是，由于我们水平有限，译文不妥甚至错误在所难免，希望广大读者批评指正。

本书在翻译和审校过程中，曾得到有关单位许多同志的大力支持和热情帮助，在此表示感谢。

一九七七年十二月

目 录

第一章 岩石的力学属性	1
第一节 引言	1
第二节 定义	1
第三节 一点的应力状态	3
第四节 莫尔圆	5
第五节 岩石的性态	6
第六节 莫尔强度理论	10
第七节 极限承载应力	17
第八节 格里菲思强度理论	19
第九节 其他强度理论	21
第十节 试验	22
第十一节 岩石分类	33
参考文献	38
练习题	40
第二章 弹性理论基础	42
第一节 引言	42
第二节 平衡	42
第三节 平面应力与平面应变	44
第四节 厚壁圆筒	46
第五节 无限弹性体中的圆孔	49
第六节 半无限弹性体	51
第七节 有限单元法	55
第八节 梁	76
第九节 应变能	80
第十节 平板	82
第十一节 拱	85
参考文献	91
练习题	93
第三章 竖井、平巷与隧道	96
第一节 引言	96
第二节 竖井周围的应力	97
第三节 竖井周围岩层的支护	101
第四节 平巷和隧道周围的应力	111
第五节 平巷和隧道周围岩层的支护	113
参考文献	127
练习题	129
第四章 矿 柱	132
第一节 引言	132

第二节 应力分布	132
第三节 深度大的长条形采区内的矿柱受载分析	136
第四节 屈服性覆盖岩层重力产生的荷载	142
第五节 矿柱强度	142
第六节 围岩的反作用	147
第七节 拱脚应力	149
参考文献	151
练习题	153
第五章 采矿场、崩落与下沉	155
第一节 引言	155
第二节 崩落	155
第三节 放矿	160
第四节 下沉	166
第五节 地层控制	169
参考文献	185
练习题	187
第六章 岩石边坡	189
第一节 引言	189
第二节 无限边坡	189
第三节 弹性应力分布	192
第四节 屈服性岩石	195
第五节 边坡破坏的型式	203
第六节 预防和控制	205
第七节 废料坝	206
参考文献	208
练习题	209
第七章 基础与地基	210
第一节 引言	210
第二节 下沉	210
第三节 承载能力	216
第四节 岩石锚杆	220
参考文献	229
练习题	230
第八章 岩石动力学	231
第一节 引言	231
第二节 简谐振动	231
第三节 波的传播	236
第四节 爆炸	244
第五节 爆破漏斗(弹坑)	257
第六节 爆破	261
第七节 地下巷道	270
第八节 凿岩	276
参考文献	284

练习题	286
附录A 字符与略语	288
附录B 英文术语解释	294
附录C 流网	320
附录D 应力集中系数	323
附录E 有关梁的公式	334
附录F 量纲分析与相似理论	337
附录G 结构图解与应力分析	342
参考文献	360

第一章 岩石的力学属性

第一节 引言

首先重温一下力学中的一些重要概念，以便理解本书使用的公式和字符。然后，再结合破坏理论阐述几种比较普遍的岩石性态*模式。正确的破坏理论有着重要的实际意义，因为它使我们有可能根据试验或设计经验，将一种条件下的岩石破坏推广到其他条件。目前，关于岩石破坏的现象了解得还远远不够，仍不能建立可靠的理论。然而，在本书中我们提出和采用了两种接近于实际的假说。

因此，必须妥善地进行岩石性质的试验，以使所得试验资料能够用来预测各种不同情况下的岩石性态。同时，岩石的分类也应有助于指明可能出现问题的区域，以及提出用来判定是否会出现这类问题的试验。

第二节 定义

人们要求对所用名词术语的涵义具有共同的认识。尽管我们平常所采用的日常用语也有些道理，然而在科技工作中，对所使用的名词术语给予严谨的定义还是必要的。譬如，“应变”、“应力”、“荷载”和“变形”这些术语各自都具有不同的确切涵义，假若将它们视作同义词使用，就要造成混乱。因此，我们在本书附录中，对岩石力学领域里最常用的名词术语做了注释，而对其中几个最基本的术语在此重复一下。

力学 (Mechanics) 是研究作用于物体上的力的效应的一门科学。这种效应可以表现为加速度、速度和位移；或者这个力会引起物体体积和形状的改变，最终甚至出现断裂或流动。

岩石力学 (Rock Mechanics) 是研究作用于岩石上的力的效应的一门科学。地质学家感兴趣的主要效应，是岩石可能产生的形状变化。地球物理学家感兴趣的，大概是岩石体积和形状改变的动力学方面，即地震波。工程师主要关心的，是对预先判断岩石断裂和流动有影响的一些现象，同时，在某种程度上也注意岩石体积和形状的改变。

所以，对于工程师来说，岩石力学研究的主要课题应当包括：作用在岩石上的荷载或力的分析；应力、应变或积蓄的能量所产生的内部效应的分析；以及这些内部效应最终所引起的后果，即岩石的断裂、流动或简单变形的分析。

应力 (Stress) 是当单位面积趋近于零时作用在其上的内力 (内力和外力的区别请参阅第二章有关自由体受力图部分)。“压力”这一词则理解为作用在单位面积上的平均法向外力，在边界上作用的压力就等于材料在该点上的正应力。

正应力 σ (Normal Stress) 是与应力作用平面正交或垂直的那个应力分量。

剪应力 τ (Shear Stress) 是与应力作用平面相切或平行的那个应力分量。

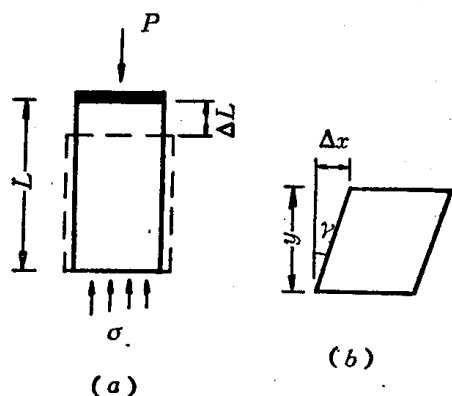
* “behaviour” 一词本书译为“性态”，一般是指物体在外力作用下的反应和行为。——译者

变形 δ (Deformation) 是物体上某一点的绝对位移或相对位移, 或者是物体直线尺寸的改变, 如图 1—1 所示的 ΔL 。

应变 (Strain) 是单位变形, 即单位长度或宽度上的变形。例如在图 1—1 (a) 中, 由于荷载 P 而产生的应变为 $\Delta L/L$ 。在实际的工程应用中, 通常都采用未产生变化的原有长度 L 来计算应变。严格地说, 应该采用瞬时长度。然而, 对于小应变来说, 采用原有长度所产生的误差无关紧要。

正应变 ϵ (Normal Strain) 是在变形方向上单位长度的变形。

剪应变 γ (Shear Strain) 通常是指一个无限小单元体棱边夹角的相对改变。或者仿照应变的一般定义, 也可以将它定义为单位长度上的变形, 但是产生变形的这一单位长度与变形方向垂直, 如图 1—1 (b) 中的 $\gamma = \Delta x / y$ 。



变形模量 E (Modulus of Deformation) 是指应变随应力而增加的特定材料正应力与正应变之比。对于弹性体则用“弹性模量”来表示这一特性。

波桑比 μ (Poisson's Ratio) 是指特定材料在纵向的单向应力作用下所产生的横向正应变与纵向正应变之比。图 1—1 (a) 表示的是一个典型试件在压应力作用下的反应。

图 1—1 变形体或应变体

必须懂得, 横向应变是纵向应力造成的。在纵向压缩的情况下, 将产生横向伸长。这种横向伸长或横向应变并不象某些人所认为的那样是由横向拉应力所造成的。

波桑效应 (Poisson's Effect) 是常常用来描述由纵向应力产生横向变形的一个术语。

弹性 (Elastic) 是指其应变或变形可以恢复 (名义上是全部瞬时恢复, 而实际上有一小部分是 在某一时间间隔内恢复的) 的材料性质或材料状态。

塑性 (Plastic) 是指其应变或变形不能全部恢复 (在某一界限和某一时间间隔内) 的材料性质和材料状态。按照另外一种习惯用法, 塑性也可以是指材料在超过屈服点以后产生残余应变以抵抗压力的性质。

粘滞性 (Viscous) 是指其应变随时间而改变的一种材料性质。

体积力 (Body Forces) 是分布在物体体积内的力, 即在物体的每一个质点上均作用有总体积力的一部分。例如, 假若一个物体具有质量, 那么在重力场内该物体的每一个质点都必然受到重力的作用。同理, 铁和镍的金属物体当被置于磁场内时, 也会受到磁力的作用。

〔例〕试求算图 1—2 所示圆柱体顶部的垂直变形。圆柱体的容重为 160 磅/呎³, 变形模量为 1×10^6 磅/吋²。

在距圆柱体底部为 y 的距离上, 厚度为 dy 的单元体所产生的变形, 见图 1—2 (b), 可用下列方程表示:

$$dL = \frac{\sigma dy}{E} = \frac{(2-y)(160/1728)dy}{1 \times 10^6}$$

对这一方程积分, 便可求得总变形 L :

$$L = \int_0^2 \frac{(2-y)(160/1728)dy}{1 \times 10^6}$$

$$= \left[\frac{160}{1728 \times 10^6} \left(2y - \frac{y^2}{2} \right) \right]_0^2$$

$$= 1.85 \times 10^{-7} \text{ 吋}$$

在这里应该指出, 当大小等于物体重量的作用力施于试件顶部时, 它所产生的变形是同一体积力所产生变形的二倍。

强度 (Strength) 就是物体在达到破坏 (即断裂或流动) 前所能承受的最大应力。

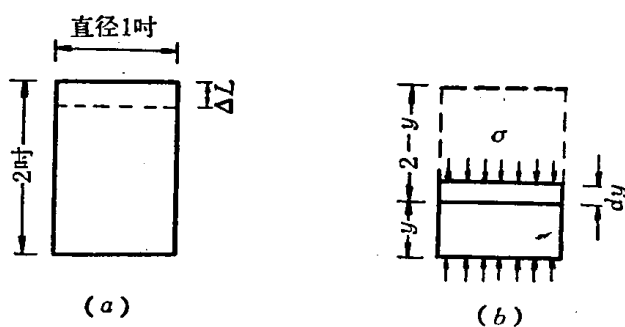


图 1—2 在重力体积力作用下的圆柱体

第三节 一点的应力状态

根据定义可知, 应力作用的面积是无限小的。因此, 作用在一点上的应力可以被看做是作用在由几个无限小平面所限定的单元体上。

图1—3 (a) 表示的是作用在某一单元立方体的一个平面上的应力。假若该单元体其余两个平面上的应力为零, 这就是平面应力的情况。

应当看到, 平面应力一般会引起三向应变; 换句话说, 图1—3 (a) 上所示的单元体, 除了在 x 和 y 方向上产生应变外, 亦会在 xy 平面的法线方向扩张。相反, 平面应变情况又常常产生一个三向应力状态。为了简化分析, 往往需要在平面应力或平面应变这两种情况中进行选择。

图1—3 (a) 中单元体的 x 和 y 面上的剪应力, 其值相等, 均用同一字符 τ 表示。这一结论的正确性可以通过分析该单元体的平衡予以证实。令 τ_x 代表垂直面上的剪应力, τ_y 代表水平面上的剪应力, 以右下角顶点作为力矩中心, 可列出一个力矩平衡方程:

$$\Sigma M = \sigma_x dy^2/2 - \sigma_y dx^2/2 + \sigma_y dx^2/2 - \sigma_x dy^2/2 + \tau_x dy dx - \tau_y dx dy = 0$$

因为 $dx = dy$

所以

$$\tau_x = \tau_y \quad (1-1)$$

我们用一个与铅垂面成 θ 角的斜截面切割图1—3 (a) 上的单元体, 取出一个棱柱体作为分离体示于图 1—3 (b), 这时在斜截面上将同时作用着正应力 σ_i 和剪应力 τ_i 。为了根据已知的应力 σ_x 、 σ_y 和 τ 确定 σ_i 和 τ_i 这两个未知应力的方向, 可以利用如下两个平衡方程:

$$\Sigma F_x = \sigma_x dy + \tau dy \tan \theta - (\sigma_i dy / \cos \theta) \cos \theta + (\tau_i dy / \cos \theta) \sin \theta = 0$$

$$\Sigma F_y = \sigma_y dy \tan \theta + \tau dy - (\sigma_i dy / \cos \theta) \sin \theta - (\tau_i dy / \cos \theta) \cos \theta = 0$$

这两个未知的应力 σ_i 和 τ_i 便可用下列两个方程求得:

$$\sigma_i = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau \sin 2\theta \quad (1-2 a)$$

$$\tau_i = -\frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta + \tau \cos 2\theta \quad (1-2 b)$$

用这两个方程也可以确定出应力的方向, 此时假定图1—3 (a) 和图1—3 (b) 上所

示的方向为正，即假定正应力为压应力，作用在单元体右侧面上的剪应力向下， θ 角是从左侧面起按逆时针方向量度，剪应力 τ_x 往右下方的方向作用。

从方程(1-2a)和(1-2b)中不难看出， σ_x 和 τ_x 是随角度 θ 的变化而变化的，其变化规律可以通过分析 σ_x 的最大值和最小值来阐明。若将 σ_x 对 θ 求导数，并令此导数为零，即得：

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (1-3)$$

这个方程表明：使 σ_x 成为最大值和最小值的 θ 角，仅与单元体两个互相垂直面上给定的应力 σ_x 、 σ_y 和 τ_x 有关。 2θ 和 $2\theta+180^\circ$ 这两个角度均满足方程(1-3)。换言之， θ 和 $\theta+90^\circ$ 这两个角度都分别满足方程(1-3)。将 θ 角的这两个数值代入方程(1-2a)求 σ_x ，即可发现，一个角度产生最大的 σ_x ，而另一个角度则产生最小的 σ_x 。

将上述两个角度代入方程(1-2b)还可以看出，在相应斜截面上的 τ_x 均为零。换句话说，使 σ_x 成为最大值和最小值的平面就是剪应力等于零的那两个平面。我们将这种平面称为主平面，其上作用的正应力则称为主应力。要记住，主应力迹线组一定是相互垂直的曲线图形，以后还会提到这一点。

利用字符 σ_1 代表最大主应力， σ_2 代表中间主应力， σ_3 代表最小主应力。在结构工程中，假定拉应力为正，因而最大主应力就是最大拉应力，或者在无拉应力条件下就是最小压应力。在岩石力学中，假定压应力为正是有益的。所以，此时的最大主应力就是一点的最大压应力或最小拉应力。

根据以上分析，我们可以得出结论：对于一点的任一应力状态，都有相应的主应力存在。假如 x 和 y 坐标正好放在主应力的方向上，则一点的应力 σ_x 和 τ_x 由主应力的大小和斜截面的方位角 θ 决定，即：

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \quad (1-4a)$$

$$\tau_x = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta \quad (1-4b)$$

(例) 如图1-3(c)所示，在物体内部某一点作用着拉应力 $\sigma_x = 18.7$ 千磅/吋²， $\sigma_y = 0$ ， $\tau = 3.4$ 千磅/吋²，试确定其主应力。

根据方程(1-3)和方程(1-2)，可得：

$$\tan 2\theta = \frac{2 \times 3.4}{-18.7 - 0} = -0.364$$

故 $2\theta = -20^\circ$ 或 $+160^\circ$

$$\sigma_{1,3} = \frac{-18.7 + 0}{2} + \frac{-18.7 - 0}{2} \cos(340^\circ) + 3.4 \sin(340^\circ) = -19.30$$

同理
$$\sigma_{1,3} = \frac{-18.7 + 0}{2} + \frac{-18.7 - 0}{2} \cos(160^\circ) + 3.4 \sin(160^\circ) = 0.60$$

所以
$$\sigma_1 = 0.60 \text{ 千磅/吋}$$

$$\sigma_3 = -19.30 \text{ 千磅/吋}$$

其作用情况如图1-3(d)所示。

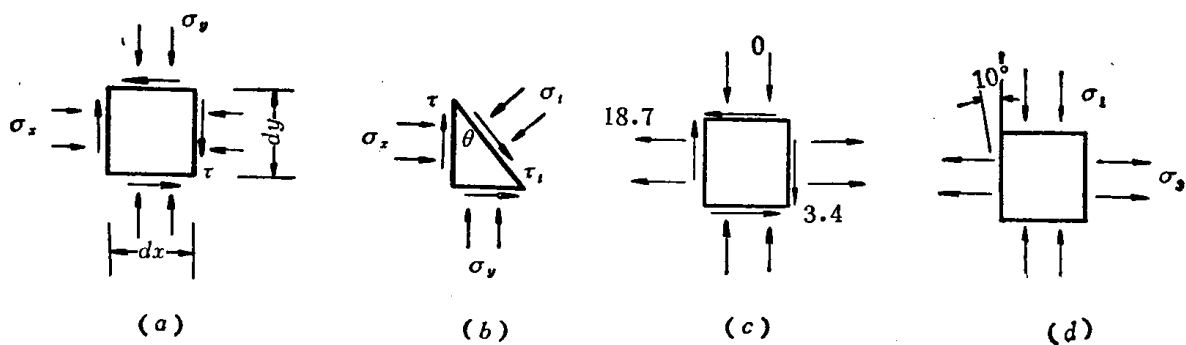


图 1—3 一点应力状态的楔体分析

第四节 莫 尔 圆

方程 (1—4 a) 和 (1—4 b) 可简化如下:

令
$$a = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$b = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

则
$$\sigma_t = a + b \cos 2\theta$$

或
$$\sigma_t - a = b \cos 2\theta$$

$$\tau_t = -b \sin 2\theta$$

将上述两式平方然后相加, 可得:

$$(\sigma_t - a)^2 + \tau_t^2 = b^2 \quad (1-5)$$

这一方程可视为圆的方程, 也就是说, 它类似于方程 $(x-a)^2 + y^2 = r^2$ 。若以 σ_t 为横坐标, 以 τ_t 为纵坐标, 则该圆的圆心就在 $\sigma_t = a$ 和 $\tau = 0$ 这一点上, 该圆的半径就等于 b , 如图 1—4 所示。

这个圆也就是通常所说的莫尔圆, 它表示了某一点的应力 σ_t 和 τ_t 的轨迹。在图 1—4 上, 若将 a 和 b 相加, 则可发现该圆上 A 点的横坐标就代表最大主应力 σ_1 , 亦即代表作用在最大主平面 (正应力为最大且剪应力为零的平面) 上的应力。 B 点代表作用在最小主平面上的应力。

图 1—4 上的 E 点, 代表了作用在与最大主平面成 θ 角的那个平面上的应力 σ_t 和 τ_t 。通过分析 E 点的几何关系, 即可求得角度 α 的大小:

$$\begin{aligned} \overline{OD} &= \overline{OC} + \overline{CD} \\ &= \overline{OC} + \overline{CE} \cos \alpha \end{aligned}$$

因此

$$\sigma_t = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \alpha$$

而根据方程 (1—2 a)

$$\sigma_t = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

故

$$\alpha = 2\theta$$

所以莫尔圆同样也表明，在莫尔圆上，所研究平面与最大主平面之间的夹角 α 等于实际所考察的物质微元上相应平面之间的夹角的二倍。

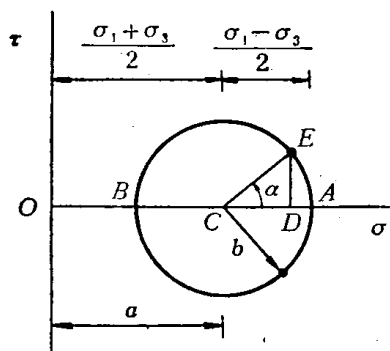


图 1—4 用莫尔圆表示一点应力的几何图解法

如上所述，为了确定一点的应力状态，仅知其主应力就够了。例如，在对某一试件进行单向压缩试验时，最大主应力等于所受之压应力，最小主应力为零，此时该试件内任何一点的应力状态均可用图1—5上的圆①表示。从这个圆不难看出，最大剪应力为最大主应力之半，并作用在与最大主平面成 45° 的平面内，即 $\alpha = 90^\circ = 2\theta$ 。同理，该图上的圆②表示单向拉伸试件内任何一点的应力状态。

图1—5之圆③可以用来表示扭转和纯剪切这两种应力状态中的任意一种。假如试件受到压缩最大主应力和等值的

拉伸最小主应力，那末圆③将表示这种试件内任何一点的应力状态。从这个圆不难看出，最大剪应力作用在正应力为零的平面上。换句话说，该应力圆也表示了通常称之为纯剪切的应力状态，即剪应力作用在彼此垂直且无正应力作用的平面上。因此，在所谓的纯剪切状态中，除了最大剪应力的作用平面以外，在通过试件任何一点的所有平面上都作用有正应力。

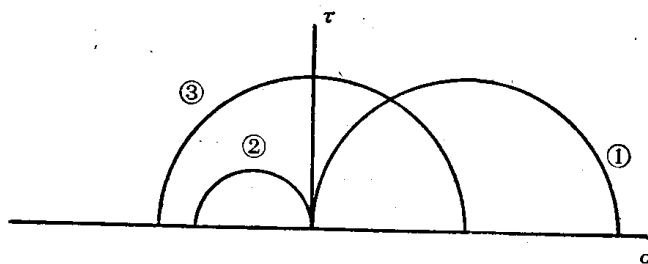


图 1—5 几种常见应力状态的莫尔圆
①单轴压应力；②单轴拉应力；③扭转或纯剪切应力

在岩石力学中，剪应力的符号以及介于最大主平面与其他平面之间的夹角的符号，一般都不太重要。因此，通常只需要画出图1—5所示圆的一半即可。在符号显得重要的情况下，与其费力去记住有关莫尔圆的常用符号，倒不如用楔体（即三棱柱体）分析法〔如图1—3（b）所示〕来解决问题。

第五节 岩石的性态

前面已经指出，在弹性体内产生的应变是完全可以恢复的。许多坚硬岩石都可视为弹性体，因为其试件的应力-应变曲线不仅是可逆的，而且还是直线，如图1—6（a）所示。

这样的坚硬岩石，当其内部含有节理这类结构面时，在平面加载试验中得出的荷载-变形曲线如图1—6（b）所示。第Ⅰ段曲线的初始曲率大，这是由于节理的闭合所造成。在这种情况下，岩石不属线性弹性的，但因第Ⅰ和第Ⅱ段曲线通常都是可逆的，故此类岩石仍旧为弹性的。

在第Ⅲ段曲线内岩石破裂起始。对岩石试件所做的试验表明：在此段曲线内，横向应变的速率常常增加，岩石的体积也往往增大。继续施加应力就会导至破坏，至破坏所需的时间与超过临界值或屈服值（在第Ⅱ和第Ⅲ段曲线之间的过渡点上）以上的应力增量成反比〔9〕。另一个有意义的现象是，当应力值超过岩石极限强度50%时，用灵敏度高的晶体拾音器能探测到岩石内部的微裂或微震活动〔1〕。这种活动一般随应力的增加而增加，如图1—6（b）所示，这说明在岩石试件的颗粒构造内部发生了某种重新调整和破坏〔30〕。

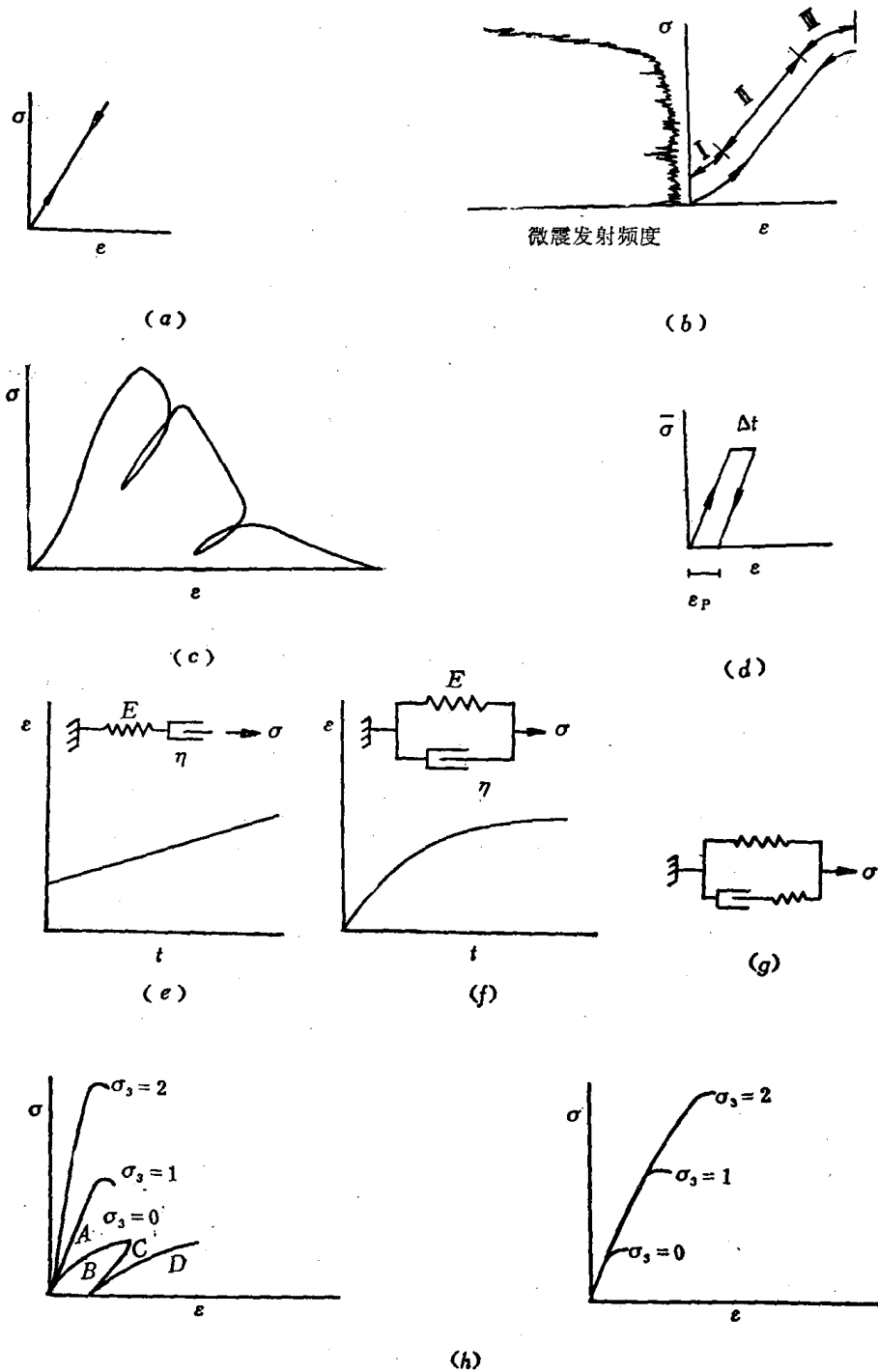


图 1—6 岩石性态的几种类型

(a) 可逆的直线型应力-应变曲线；(b) 可逆的曲线型应力-应变曲线及与它相对应的微震发射频度；(c) 使用刚性试验机得出的应力-应变曲线；(d) 表示塑性应变随应力作用时间而变化的应力-应变曲线；(e) 马克斯威尔模型——表示应力除产生瞬时应变外还产生随时间而变化的应变；(f) 凯尔文模型——表示应力所产生的随时间而变化的应变逐渐趋于某一极限值；(g) 普遍的线性物质模型——应力将产生瞬时的和随时间而变化的两部份应变，且后一部份应变将逐渐趋于某一极限值；(h) 某些岩石在应力循环作用下的反应与约束效应

尽管象硬岩这类脆性材料的破坏情况可以认为是类似于玻璃和铸铁这样的材料，但却发现，试验机的特性对岩石破坏过程的性态有很大影响。假如试验机在给试件施加荷载的同时自身变形也相当大，那么能量就积蓄于试验机内，而当到达破坏点时将之释放，从而产生急剧变形，引起试件碎片猛烈地飞溅。反之，假如试验机在试件的反力作用下变形很小（也就是刚性试验机的情况），那末积蓄于试验机内的能量很小，因而试件就不会破坏成碎片。由于试件的反作用力在其破坏时开始减小，作用在试件上的力也要随着发生微小移动而相应地缓慢减小。有人用这样的刚性试验机对已发生破坏但仍保持完整的脆性岩石试件测出了破坏后的变形，如图1—6（c）所示。因为这种加载类型与房间矿柱的受载情况很类似，所以就不难理解矿柱虽已发生破坏但仍保持完整的机理。图1—6（c）所示破坏后的荷载循环也表明，这样破坏的矿柱仍旧可能具有一定的刚度，从而也就可能具有一定的承载能力。

假如实验用的岩石试件的孔隙率很大，则可以得出第Ⅰ段曲线〔9〕。在这种场合下，孔隙多半是呈细小的楔形裂隙存在于颗粒之间，它们在压力作用下发生闭合。

前面已经指出，塑性体在应力作用下产生的应变是部分或全部不可恢复的。在应力作用下压实的某些岩层，它所产生的塑性应变不随时间而改变。对于另一些岩石，其塑性应变的发展则需要一段时间。这种塑性应变随时间而增长的现象一般称之为蠕变，如图1—6（d）所示。图中 Δt 代表产生 ε_p 所需要的时间增量。这种蠕变符合流变学定律，可用粘性系数表征。因此，这类岩石在本书里称为粘性岩石。

但是应当懂得，没有明显粘性的岩石也可以产生时间效应。作为这种情况的一个实例，是观测到某矿山扒矿巷道周围的滑动节理系以4吋/月的速率闭合，其原因并不是由于岩石具有粘性，而是由于巷道顶板冒落，岩石活动使节理系的荷载增加。当节理系中的滑动节理活动时，荷载减小，同时又引起岩石活动的增加。于是荷载再次增大，从而在节理系中产生另一个变形增量。所有这些作用与反作用都需要时间，由此而得的结果类似于但却不等于粘性岩石所出现的结果。

图1—6（e）所表示的是许多流变模型之一——马克斯威尔（Maxwell）体。该模型表征这样一种物质，即它在应力作用下所产生的应变，其中一部分为瞬时和可恢复的，而另一部分则随时间变化且不可恢复。因此，这后一部分应变（或称塑性应变）将随时间和应力的大小而改变。

马克斯威尔体的应变-时间曲线也示于图1—6（e）上。假如模型内的弹簧的弹性模量与有孔活塞的粘性系数均为常数，则模型内产生的应变可由下列方程求得：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma t}{\eta} \quad (1-6)$$

式中 t ——应力 σ 作用的时间；

η ——粘性系数。

图1—6（f）所表示的是另一个简单的流变模型——凯尔文（Kelvin）体。该模型在应力作用下所产生的应变是随时间而改变的。但是，如果给以足够的时间，所产生的任何应变都可全部恢复。因此，这种模型代表了弹性体，尽管从实际的观点来看，全部恢复这种岩石的应变所需要的时间也许太长，以致某些应变可视为塑性。当然，有不少岩石的性态会类似于粘土与混凝土，其应变几乎完全不能恢复〔4〕。

假如凯尔文模型的特性参数为常数，则在应力作用下产生的应变可由下式求得：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}(1 - e^{-Et/\eta}) \quad (1-7)$$

从方程 (1-7) 可以看出, 当时间 t 趋于无穷大时, 其应变就接近于应力 σ 作用下的弹性应变。在应力解除时, 应用下列方程:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-Et/\eta} \quad (1-8)$$

式中 ε_0 ——时间 t 为零时的应变。

大多数天然物质, 当然不会与上述理想模型完全相同。为了接近实际的物质性态, 可以设计出各种不同的组合模型。譬如, 图1-6 (g) 所示的是由马克斯威尔单元和凯尔文单元组成的普遍线性物质模型。这种物质将产生弹性和塑性两部分应变, 其塑性部分随时间而改变, 其弹性部分在应力恢复中也有一些是随时间而改变的。

目前在岩石力学中, 流变模型仅用来探求岩石中可能有的种种应变-时间曲线。现阶段为了解决各种几何形状坑洞与各种类型荷载作用下的应力分布问题正在进行一些研究, 这些研究都是将物质假定为流变的而不是弹性的。但是, 要将这种方法用于解决实际的现场问题, 还需要一段时间。

地质学上往往将所有的岩石变形都视为粘性的。对于各种不同的岩石, 业已估算出粘性变形所需要的时间比弹性变形要大一千倍以上, 例如: 冰为14昼夜, 岩盐为1年, 石膏为10年, 蛇纹岩为 10^4 年, 有些岩石高达 10^{10} 年^[22]。因此, 这一概念可以用来解释为什么在现场能观察到石膏有呈熔岩状挤出的痕迹, 为什么蛇纹岩能凭借着自身的粘性逐渐侵入比它更坚实的岩石内。

岩石性态随时间因素变化的另一个表现, 是应力速率或应变速率的作用。一般来说, 岩石的破坏应力与变形模量是随施载速率的增加而增加的。表1列出了几种岩石的动态试验和静态试验结果, 它比较了应力速率对拉伸破坏应力和应变的影响^[20]。

岩石动态特性与静态特性的比较^[20]

表 1

岩石特性		大理石	砂岩 A	砂岩 B	花岗岩
动态试验	应力速率, 公斤/厘米 ² /秒	1.7×10^6	1.4×10^6	1.5×10^6	1.5×10^6
	应变速率, 10^{-6} /秒	3.6	3.7	3.3	5.5
	破坏应力, 公斤/厘米 ²	215	220	190	170
	破坏应变, 10^{-6}	490	610	460	630
	E , 公斤/厘米 ²	51×10^4	64×10^4	40×10^4	30×10^4
静态试验	应力速率, 公斤/厘米 ² /秒	1.1	1.8	0.5	2.2
	破坏应力, 公斤/厘米 ²	53	80	29	53
	破坏应变, 10^{-6}	145	410	370	510
	E , 公斤/厘米 ²	47×10^4	19×10^4	10×10^4	12×10^4

图1-6 (h) 上的 B—C 循环是某些岩石在单向压缩条件下的应力-应变曲线。在这种情况下, 所施加的应力形成一条弯曲的应力-应变关系曲线, 在曲线达到最大值时才出现屈服。要确定出这种情况下具有代表性的变形模量是困难的。切线模量 $d\sigma/d\varepsilon$ 代表曲线任一点上的斜率, 而割线模量 σ/ε 代表某一应力的平均斜率。

对于这类岩石, 塑性这一概念具有两种不同含义。一种是指低于破坏应力时所出现的一些不可恢复的应变或塑性应变 (也就是说, 低于破坏应力的恢复曲线通常是一条与 x 轴

相交于某一截距的直线)。因此，这类岩石可以视为塑性的或弹塑性的。

另一种塑性是出现在当该类岩石的强度被超过时，如图1—6 (h) 所示。这时，就象在软岩中可能发生的那样，不是断裂而是流动。这种流动类似于软钢在应力超过屈服点以后的状态。大量的塑性应变会发生在岩石断裂或破裂以前，正如第二循环D所指出的那样。遗憾的是，目前在应用力学的各个领域中还使用着许许多多不同的塑性概念。因此，当把塑性这一术语用来交流重要情报时，严格它的定义或明确它的专门含义就显得特别重要。

图1—6 (h) 上的应力-应变曲线A，是与曲线B、C及D同类的岩石在三向应力条件下获得的。该曲线说明了岩石在侧向约束压力作用下的共同表现。这时岩石强度一般都会增大，而且变形模量也可能增大，二者的增大情况均随约束压力的大小而变化。但是，对于致密的脆性岩石，约束压力对变形模量的影响可能很小。

第六节 莫尔强度理论

一、非粘结性岩层

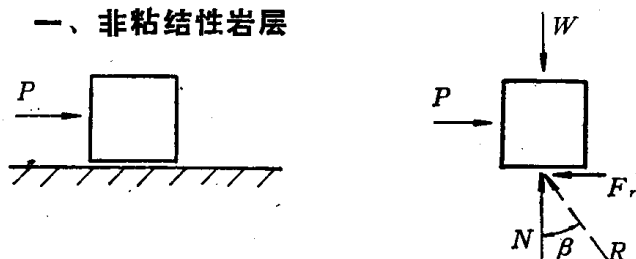


图 1—7 物体在克服摩擦阻力而运动时所受到的各种力

目前，用来描述压应力作用下岩石强度的最可靠的理论，就是莫尔强度理论。虽然莫尔强度理论还不能完全解释所有观测到的强度可变性，但是也没有一种其它的理论能得到这么多的实验证据。

这一强度理论的实质是，需要克服初始破坏面上的内摩擦力才能造成破坏。我们可以象图1—7所示那样来研究一个基本的摩擦力学问题。图中，在平面上的滑块受到水平力P的作用。在自由体受力图中，说明有三个外力作用在该滑块上，这三个外力是水平力P、重力W和接触面上的反作用力R。力R可以用它的两个分力——垂直作用在接触面上的力N和沿接触面切线方向作用的力 F_r 来代替。

根据库仑摩擦定律可列出：

$$F_r \leq N u$$

或

$$F_r / N \leq u$$

故

$$\tan \beta \leq u$$

式中 u ——摩擦系数；

β ——接触面上反作用力R的倾角。

当 $\tan \beta = u$ 时， β 是相对于接触面法线方向的最大可能倾角，或者说是使 F_r 达到最大值的倾角。这时，如果P增加，则滑块失去平衡而发生运动。对于 β 的最大值，一般用希腊字母 φ 表示，并称之为摩擦角。就象摩擦系数 u 一样，这个最大倾角或摩擦角也随材料不同而改变。

在图1—3 (b) 中，由 θ 角限定的斜截面上的应力以两个应力分量 σ_i 和 τ_i 表示。这两个应力又可用一个与该平面法线方向成 β 角 ($\tan \beta = \tau_i / \sigma_i$) 的斜应力表示。

在图1—8 (a) 中，E点表示了通过材料内一点 (该点应力状态由莫尔圆②表示) 的某一平面上的应力状态。由于在E所代表之平面上应力的倾角为 $\beta = \tan^{-1} \tau / \sigma$ ，因而E点和