

高等学校教学参考书

岩石力学

〔苏〕И.И.卡曹罗夫
聂孟荀 刘泽春 译

煤炭工业出版社

高等学校教学参考书

岩石力学

〔苏〕И.И.卡曹罗夫
聂孟荀 刘泽春 译

煤炭工业出版社

内 容 简 介

苏联И.Н.卡曹罗夫编著的《岩石力学》(1981年版)一书,介绍有关岩石性质的知识,对岩体内的应力状态进行评价,讨论在实验室和现场条件下研究岩石力学性质的主要方法。阐述岩石强度和变形特征的数学描述方法以及岩石连续性的概念。论述各种地压显现理论和实验研究方法。例举用连续介质力学理论和概率论解决某些课题的方法。论述井巷地压的计算方法和巷道维护方法。

本书是苏联高等院校《地下结构和矿井建设》专业的教学参考书,也可供采矿工程技术人员参考。

责任编辑:莫 国 震

И. Н. КАЦАУРОВ

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

МОСКВА «НЕДРА» 1981

高等学校教学参考书

岩 石 力 学

〔苏〕И. Н. 卡曹罗夫

聂孟荀 刘泽春 译

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $5^{1/2}$

字数 126 千字 印数 1—5,320

1985年4月第1版 1985年4月第1次印刷

书号15035·2714 定价1.10元

说 明

И.Н.卡曹罗夫编著的《岩石力学》(1981年版),是苏联高等和中等教育部批准供《地下结构和矿井建设》专业使用的高等学校教材。

此书编写简练,字数不到国内同类教材的二分之一,内容着重介绍基本理论、基本知识,没有繁琐的公式推导,没有罗列过多的参考资料和数据。有些内容,如《开拓巷道支架的统计概率计算方法》,在国内一些参考书中还很少介绍。

此书在一定程度上反映了当前苏联《岩石力学》科研工作的进展情况和苏联高等学校的教学内容、学术观点和教材编写方法。

为了协助广大从事《岩石力学》科研、教学的科技人员和高校师生了解、分析国外科研、教学动态,并为从事矿山开采、建设的工程技术人员提供参考用书,特将此书翻译付印。

本书承李世平副教授审校,特致谢意。

由于我们水平所限,敬希读者对译文中的缺点、错误批评指正。

译 者

1984.9

目 录

说 明 序 言

第一章 岩石的力学性质	1
第一节 概述	1
第二节 岩石的变形性	3
第三节 岩石的蠕变性	7
第四节 岩石的强度	12
第五节 岩石力学性质的现场研究	19
第六节 对岩石力学性质研究的评述	21
第七节 岩石的连续性	23
第二章 原岩应力状态	26
第一节 概述	26
第二节 原始地台型岩体的应力状态	26
第三节 褶皱岩体应力状态的估计	29
第三章 地压及其显现	31
第一节 概述	31
第二节 确定矿山巷道围岩弹性应力的解析方法	32
第三节 确定矿山巷道围岩弹性应力的偏振光法	36
第四节 研究矿山巷道围岩非弹性区的解析法	40
第五节 考虑到岩石蠕变和形成非弹性变形区的巷道周边位移解析计算	43
第六节 矿山巷道岩石膨胀预测方法	45
第七节 用相似材料模型试验的方法研究地压显现	48
第八节 巷道围岩应力-应变状态的现场研究	51
第九节 巷道周边岩石位移和支架上载荷的测量	54
第四章 地压计算和无支架巷道的稳定性	56
第一节 概述	56
第二节 松散和非固结性岩层中的水平巷道地压	57
第三节 无支架水平巷道的稳定性以及在临界深度以内的固结性岩层中的地压计算方法	59
第四节 临界深度以下的固结性岩层中的水平巷道地压	63
第五节 煤巷地压	68
第六节 松散岩层和非固结性岩层中的立井地压	69
第七节 固结性岩层中的立井地压	72
第五章 巷道维护方法	74
第一节 概述	74
第二节 增强无支护巷道稳定性的方法	74
第三节 减少地压的方法	77
参考文献	79

第一章 岩石的力学性质

第一节 概 述

构成地壳的致密或松散的聚集体称为**岩石**。岩石是由各种矿物的颗粒、结晶、碎屑以及联结（胶结）这些颗粒的物质和孔隙（空隙）组成的，在多数岩石的孔隙里含有水，它对矿物颗粒的相互联结情况产生影响。

主要的造岩矿物是^[63]：石英类（石英，燧石，玉髓及其它），硅酸盐类（长石，云母，角闪石，辉石及其它），碳酸盐类（方解石，白云岩），含水粘土类（高岭石，蒙脱石及其它）和可溶于水的矿物（石膏，岩盐及其它）。

按照生成原因，岩石可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩。

岩浆岩（火成岩）是由岩浆冷却和硬化而形成的。按硬化地点的不同，岩浆岩分为侵入岩或深成岩、喷出岩或溢岩（火山喷发岩）。花岗岩、正长岩、闪长岩、辉长岩属于前者；辉绿岩、安山岩、玄武岩等属于后者。

沉积岩的形成是地壳破坏的结果。砂岩、页岩、石灰岩、泥炭、木质褐煤、褐煤和烟煤、无烟煤、岩盐及其他都属于沉积岩。

变质岩的形成是由于高温和高压的影响，使岩石内部结构、化学成分和物理性质发生改变的结果。最常见的变质岩是石英岩、大理岩、云母页岩。

岩石的岩石学特征（包括岩石的结构和构造）与它的成因密切相关。

岩石的结构（结构）是指矿物颗粒的形状、大小和胶结方法所决定的结构特征，可分为结晶结构和颗粒结构两种。

岩石的构造（组织）则是指各种不同结构的矿物集合体的各种分布和排列方式，可分为整体构造、层状构造、片状构造、带状构造和其它构造。

岩石有均质的、非均质的、各向同性的和各向异性的。

在任一点上都具有同样性质的岩石，称为均质岩石。

在不同的点上具有不同性质的岩石，称为非均质岩石。

在所有方向上具有同样性质的岩石，称为各向同性岩石。

在不同方向上性质不相同的岩石，称为各向异性岩石。晶体、一些具有层状和带状构造的岩石、页岩、粘土岩等，通常具有各向异性。

在岩石力学中，按照颗粒之间结合的特征，将岩石分为三个主要类型。

1. 坚硬岩石（坚固岩石）；
2. 不坚硬岩石（粘土岩、土）；
3. 松散岩石（粒状的）。

坚固岩石的矿物颗粒结合胶结物质有：硅质（石英岩、玉髓岩）、铁质、石灰质、粘土质、石膏等。由硅质和铁质胶结的岩石是最坚固的，由粘土和石膏胶结的岩石是最弱的。

在不坚硬（粘土质的）岩石中，矿物颗粒是依靠二氧化硅的胶状薄膜以及薄膜水、毛

细管水以及粘土和粉状颗粒的胶体凝聚而成的。这些颗粒是矿物的机械崩解和化学分解的产物。它们的尺寸很小（小于0.05毫米），而比面积[●]则很大（尺寸为0.001毫米的颗粒的总表面积在1米³岩石中达到500万米²左右）。这些颗粒表面被水膜包裹着，水膜保持有电分子力，它使颗粒表面的引力达到数百兆帕。水分子形成厚度为几十个分子直径的牢固结合水膜，在它的周围分布着第二层（在较小的压力下）松散的结合水。在结合水之外，还有充满孔隙的游离水。结合水拥有比一般水更大的密度和粘度。由于存在有粘聚力，松散岩石在干燥状态中形成相当坚固的块体。在潮湿状态下，视含水量的多少，这种块体将变为塑性甚至流体状态。松散岩石也可能含有砂粒，由于砂粒之间的摩擦，而赋予岩石一定的刚性。按岩体中粘土颗粒的含量，分为粘土（粘土超过30%）、亚粘土（30~10%）和亚砂土（10~30%）。当粉土和粘土颗粒的含量占优势并含有水时，松散岩石（特别是某些粘土）可能变为具有重液性质的“流砂”。

松散岩石乃是彼此互不结合的矿物颗粒（晶体的、碎屑的）堆积体。石英、长石以及各种岩石与矿物的碎屑是砂的主要矿物成分，还含有少量的云母、碳酸盐、海绿石、黄铁矿和磁铁矿等。

受风化作用、或是土壤化作用侵蚀的地壳表层岩石称为土壤。

研究岩石及其性质的学科有：岩石物理学、地质学、岩石学、水文地质学和土力学等。岩石力学的基本任务是研究采矿生产过程中岩石可能发生的破坏现象。这些破坏现象取决于岩石的强度和变形特征。因此，在岩石力学中，研究岩石性质的目的，是评价岩石的上述特征。

岩石对外力作用的反应能力，即根据不同的外力性质和外力强度改变本身的尺寸、形状和完整性的能力，称为岩石的力学性质。

在外力的作用下，岩石在不破坏的前提下改变其形状和尺寸的性能，称为变形性。

在一定的条件和范围内，岩石承受某种力的作用而不破坏的能力称为强度。强度是广义的概念，它既适用于单个岩块，也适用于岩体。

岩石硬度是岩石表面在局部接触力的作用下，产生阻抗而不破坏的能力。在研究机具破岩问题时，岩石硬度具有重要的意义。

后面将用到岩石的某些重要的普通物理特性。这些特性的定义如下：

岩石的孔隙度——单位岩石的总体积（即包括孔隙本身）中所包含的孔隙的体积。

岩石的孔隙率 κ_n ——固体颗粒的单位体积中的孔隙。坚硬岩石的 κ_n 远远小于1，例如石灰岩的 κ_n 为0.1，砂岩的 κ_n 为0.12；花岗岩的 κ_n 为0.01，砂岩的 κ_n 取决于粒度成分，可能有0.6~0.8（松散岩石的孔隙率取决于压力）。

岩石的含水量（Массовая влажность） w ——岩石中所含水的重量与干燥岩石的重量（即颗粒实体质量）之比，以百分比表示。

岩石的含水系数（含水率） κ_B ——岩石的自然含水量与其饱和含水量（最大含水量）之比。据此，岩石（土壤）可分为：低含水率岩石， $\kappa_B < 0.5$ ；中等含水率岩石， $0.5 < \kappa_B < 0.8$ ；饱和含水率岩石， $0.8 < \kappa_B < 1.0$ 。

岩石的塑性指数 W_n ——岩石的两种状态含水量的差值：即流限 w_L 与塑限 w_p 的含水量差值。当具有含水量 w_L （流限）时，两种搅匀的粘土试样可以溶为一体。当其含水量为 w_p ，

● 岩石总表面积与其体积之比称为比面积——译者注。

(塑限) 时，粘土试样就不再能搓成条状。

比值 $\frac{w_{\text{ли}} - w_{\text{п}}}{W_{\text{н}}} = J_r$ 称为稠度指标。根据塑性指数，粘土岩（土壤）可分成：亚砂土（ $1 < W_{\text{н}} < 7$ ），亚粘土（ $7 < W_{\text{н}} < 17$ ）和粘土（ $W_{\text{н}} > 17$ ）。按照稠度，土壤可分成：硬土（ $J_r \leq 0$ ），塑性土（ $0 < J_r < 1$ ）和流动土（ $J_r \geq 1$ ）。

为了研究和实用的目的，按照不同的标志制订了若干岩石分类方法。在采矿技术实践中，M.M.普罗托季亚科诺夫教授的岩石分类法获得了广泛应用。这种方法是按照岩石的相对特性即坚固性制订的。岩石力学中采用的岩石分类（表 1-1），在某些条件下，可同 M.M.普罗托季亚科诺夫的分类对照使用（参见第一章第四节）。

表 1-1

岩石力学中采用的分类法		M.M. 普罗托季亚科诺夫分类法		
岩石类型	颗粒间的胶结物	级 别	岩石坚固程度	坚固性系数
坚硬岩石	矿物质胶结物	I ~ II	极坚固，很坚固，坚固	20 ~ 8
不坚硬岩石	薄膜水和胶质	IV ~ VI	相当坚固，中等坚固，相当软	6 ~ 1.5
松散岩石	无	VII ~ X	软 土质的，松散的，流砂	1 ~ 0.8 0.6 ~ 0.3

苏联科学院通讯院士 B.B.勒热夫斯基按照岩石最重要的物理性质提出了岩石描述和分类的综合原则〔49，50〕。

第二节 岩石的变形性●

岩石可以在弹性范围内变形，也可以产生塑性（残余）变形。

弹性——在力的作用下，岩石改变形状和体积，而卸载后能完全恢复其原始状态的性质。

塑性——岩石在力的作用下，改变其形状和体积，而卸载后仍保留残余变形的性质。

岩石不是理想的弹性体或理想的塑性体，因此在对岩石加载时，总是观察到：在弹性变形的同时，都伴随有程度不同的残余变形。

图1-1为单轴加载应力 σ 与应变 ϵ 的关系图。它表明了加载到应力水平 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 而后卸载到同一应力 σ_{np} 的三个循环。该图的特点是应力与变形呈非线性关系以及卸载和重复加载时出现的所谓滞环。卸载时，总应变 $\epsilon_{\text{н}}$ 中的弹性应变 ϵ_y 消失。

现将单轴加载时岩石的主要变形指标列举如下：

弹性模量（杨氏模量）或标准弹性模量 E，是正应力与该力作用方向上的弹性应变的

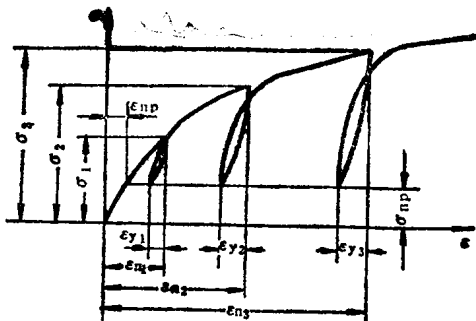


图 1-1 单轴压缩时的应力 σ 与应变 ϵ 的关系

● 读者应当具有大学教程〔6〕范围内的关于物体应力-应变状态的基本概念。一些必要的概念，也可参见文献〔4〕和〔54〕——原作者注。

比值。如果这个指标是一次加载测定的，则称为比例模量。标准弹性模量是采用多次重复加载、卸载的方法，使之消除塑性变形后求得的：

$$E = \frac{\sigma - \sigma_{np}}{\varepsilon_y} \quad (1-1)$$

式中 σ ——各次加载达到的最大应力；

σ_{np} ——卸载后应力；

ε_y ——相对弹性应变。

根据各次间隔加载求得的弹性模量值，计算弹性模量的平均值。

变形模量 E_0 是正应力与其作用方向上全应变（包括残余应变）之比值。

变形模量的确定也是用间隔加载的方法进行试验求得的：

$$E_0 = \frac{\sigma - \sigma_{np}}{\varepsilon_n - \varepsilon_{np}} \quad (1-2)$$

泊松比 μ 属于横向变形的相对系数，它是垂直于加载方向的横向弹性应变 ε'_x 与纵向弹性应变 ε_y 之比；全横向应变系数 μ_0 ——全横向应变 ε'_x 与全纵向应变 ε_n 之比。即：

$$\mu = \frac{\varepsilon'_x}{\varepsilon_y} \quad \text{和} \quad \mu_0 = \frac{\varepsilon'_x}{\varepsilon_n} \quad (1-3)$$

动力弹性模量是按照机械波（超声波）通过岩石的速度确定的。

还要用到剪切模量 G 。剪切模量与弹性模量之间（对于各向同性的岩石）具有下列关系：

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1-4)$$

当应力低于比例极限时，“应力-应变”关系可以认为是线性的。这种关系叫做虎克定律，在一般空间应力状态下，用上述变形指标或弹性常数描述该定律的形式如下：

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} + \mu \frac{\sigma_y}{E} - \mu \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_y &= -\mu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \mu \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_z &= -\mu \frac{\sigma_x}{E} - \mu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \end{aligned} \quad (1-5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{2G} \tau_{xy}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{2G} \tau_{xz}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{2G} \tau_{yz}$$

式中 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ ——拉伸（压缩）应变；

$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ ——剪切应变；

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ——正应力；

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ——切应力。下角符号 x, y, z 表示笛卡儿直角坐标轴的方向。

坚硬岩石的弹性应变和残余应变的大小取决于矿物的成分。组成岩石的各种矿物具有不同的变形性。在应力作用下,部分矿物出现弹性变形,而其它矿物则可能发生残余变形。在岩石内含有比例极限较低的矿物越多,残余变形所占的比例就越大。

岩石的孔隙度也同样影响其变形性。高于正常孔隙度的岩石具有大于一般的变形性。

细粒结构和孔隙度不大的岩石(玄武岩、石英岩、辉长岩)具有比较高的弹性模量。含同样矿物成分的岩石,当具有较致密的组构时,就具有较高的弹性特征。例如,在文献^[53]中引用的例子:有约1米厚的砂岩分层,明显地呈现出由分层上部的粗粒结构逐渐变化到下部的细粒结构,它的弹性模量则由36000兆帕增高到51000兆帕。

当平行和垂直层理加载时,各向异性岩石具有不同的弹性特征。顿巴斯矿区某些岩石,当施以不同方向载荷时其弹性模量之比如下^[53]:

岩 石	平行和垂直层理加载时弹性模量之比
粗粒砂岩	0.92~1.12
中粒砂岩	0.00~1.56
细粒砂岩	0.86~1.45
砂质页岩	0.33~1.55

压缩时的岩石弹性模量和应变比拉伸时的大。多孔岩石的弹性模量取决于岩石的湿度。例如,当砂岩饱含水时,其弹性模量降低,同时其残余变形增大。

根据变形的特征,松散岩石、不坚硬岩石与坚硬岩石的最主要的不同点,是在压缩载荷的影响下,由于孔隙度的减少,其自身的组构变得更为致密(实体颗粒靠拢)。此外,还发生颗粒的局部剪切,微屑滑入孔隙中以及水-胶膜厚度的改变。岩石的蠕变也影响岩石结构的改变。

只有在比较小的载荷作用于土壤,而且外力小于结构联系的强度时,变形才是弹性变形关系。土壤将类似固体一样地变形。在高于结构联系的压力作用下,通常认为土壤被压实,其孔隙度大大改变。为了测定土壤可压缩性指标,应在保证土壤不可能侧向膨胀,而且只在一个方向上压缩的条件下进行试验。

岩石变形特征的测定 坚硬岩石的弹性模量、变形模量,以及泊松比和横向变形系数的测定方法,就是在经过专门加工的岩石试样的加压过程中,细致而精确地测定其变形^[15]。试验时,采用直径为40~50毫米、高为直径的2~2.5倍的圆柱体试件1(图1-2)。试样的端面应与圆柱的生成线垂直($\pm 1^\circ$)。层状结构岩石试件加工时,应使它的轴向与层理方向的关系符合试验条件的要求。在试验机(压力机)上,对试件施加压力。载荷借助于压板2进行传递,压板表面应磨光,精确度要达到0.01毫米。压板的厚度不应小于岩石试件直径的一半。依靠对中装置,即球座3和4,保证试件受力对称。为了测定变形,采用贴在纸质基底上的康铜丝电阻应变片5、6。应变片基距为20毫米,电阻值约为100欧姆。应变片按一定的次序粘贴在试件上。将每个应变片的康铜丝两端接入测量仪器(例如,具有四个应变计的УИМ-62型仪器)作为电桥的一个桥臂。仪器的灵敏度应保证测量相对变形的精度为 2×10^{-5} (软岩的精度可降低到 10^{-4})。

当试验低模量岩石(煤、岩盐)时,为了测量变形,采用附有千分表的专门支架装置。

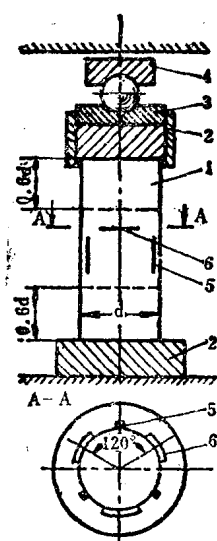


图 1-2 岩石变形性质的测定

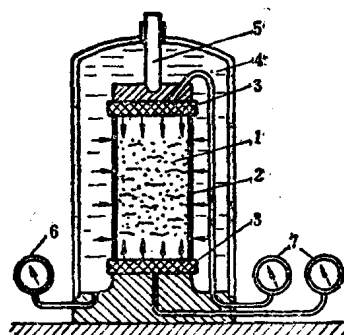


图 1-3 土壤试验仪器示意图

施加压力 σ_{np} 的大小(见图1-1), 根据岩石的弹性和强度, 可在3~15兆帕范围内选择。按照分阶段交替加载和卸载, 进行加压和测量相应的变形。加载的阶段数, 应根据岩石单轴抗压强度选定。加载进行到使试样破坏为止。加、卸载的速度控制在0.5~5兆帕/秒的范围内。然后对试验资料进行整理, 并绘制变形曲线图。

岩石的动力弹性模量, 采用测定超声波在岩石内通过的速度来确定。

对于弹性波的产生和它通过时间的测定, 可采用带有标准型示波器的脉冲装置进行, 例如 УКБ-1、ИКЛ-5 等。此时, 波长可以根据仪器的容许振动频率和岩石中弹性波速的估计值确定。有关资料可参阅文献[69]。

动力弹性模量通常比静力弹性模量高一些。根据文献[51]的资料, 其差值为3~8%, 有时达到35%。

对于不坚硬岩石的试验, 目前广泛采用图1-3所示的三轴压缩仪(稳压计)。橡胶套2内的岩石试件1处在压力室4内的两个底盘3之间, 压力室内装满液体并与加压泵相连接。利用活塞5来施加竖向轴压力。试验时进行以下项目的测定: 压力表6、7示出的试件孔隙水压力(即所谓中性压力或孔隙压力)和侧压力, 以及纵向压缩量和试件体积的变化(根据千分表和体积计测定, 图上未示出)。根据三轴应力条件和不同的竖向与横向压力比值的试验结果, 确定破坏载荷以及相对纵向变形和相对体积变形值。进而确定纵向变形模量 E_{np} 和体积变形模量 E_{o6} :

$$E_{np} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\epsilon} \text{ 和 } E_{o6} = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\theta} \quad (1-6)$$

式中 $\Delta\sigma_1$ ——轴向载荷增量;

$\Delta\epsilon$ ——纵向应变增量;

$\Delta\theta$ ——试样体积变化量。

相对的横向变形系数按下式确定:

$$\mu_0 = \frac{E_{o6} - E_{np}}{2E_{o6}} \quad (1-7)$$

第三节 岩石的蠕变性

岩石和其它材料一样，在瞬时和长时间承受载荷时，将发生不同的变形。这种现象与岩石具有蠕变性有关。

在恒定应力的作用下，变形随时间的增长而持续增加的性质，叫做蠕变性。在显现蠕变性的材料中，也可以看到松弛现象，即在保持一定变形的情况下，应力随时间的持续而减小。

图1-4描绘了固体随时间 t 显现蠕变(a)和松弛(b)的特征。

松弛可以表述如下：如果材料试件被两个平面挟持，并使 $\epsilon = \text{const}$ ，则试件端面上的压力起初等于 σ_0 ，然后随时间的持续而减小，最后趋于定值。

作为松弛曲线方程的例子，可以引用方程：

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{t}{t_0}} \quad (1-8)$$

式中 t_0 ——松弛时间，即应力降低 e 倍的那一段时间。

固体的变形性质可以采用与应变、应力以及与它们的时间导数有关的状态方程来描述。为简单明瞭起见，这里仅摘录适用于单轴加载情况的状态方程。

对于理想的弹性材料，其状态方程按虎克定律可写成：

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1-9)$$

它也可以用应变速度表示：

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (1-10)$$

对于粘性液体的状态方程，根据牛顿的理论，应变速度与应力成正比关系：

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\alpha}$$

式中 α ——粘性系数，单位：帕·秒。

理想弹性材料的变形，当去掉应力时变形消失；而理想粘性材料的变形，当去掉应力时，其变形仍然保留。

按照技术科学博士Ю.М.利伯曼的研究，根据变形与时间的关系（即根据蠕变性），可将岩石分为两种类型。属于第一种类型的有粘土、砂质页岩、砂岩等，即石炭纪的主要岩石。在固定应力作用下，该类岩石的变形趋于一定极限，达到该极限时，实际上停止变形（见图1-5, a）。第二种类型的岩石，例如塑性粘土，其特征是：在固定应力作用下，其变形无限制地增长（见图1-5, b）。

通过对岩石进行的各种研究，可以找到蠕变曲线方程所应满足的一些主要要求。

对于第一种类型的岩石：

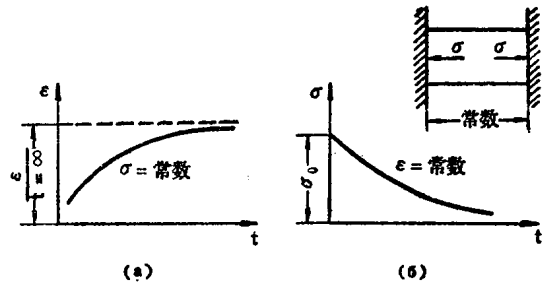


图 1-4 固体显现蠕变和松弛的特征曲线

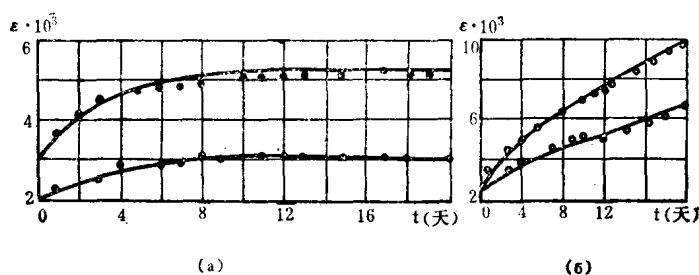


图 1-5 岩石蠕变曲线图

a—第一种类型; b—第二种类型

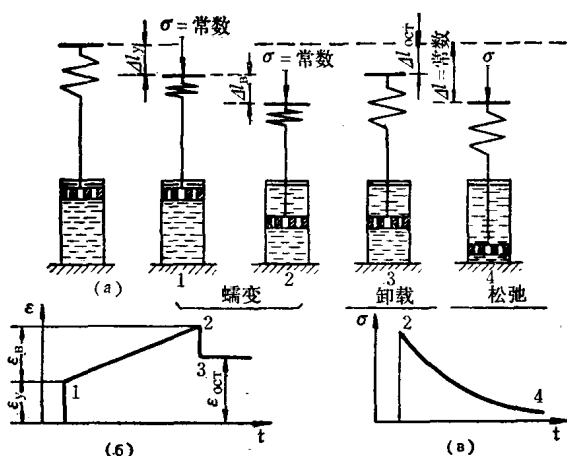


图 1-6 麦克斯威尔介质的特征

a—流变模型; b—蠕变曲线图; c—松弛曲线图

为了推导状态方程,可利用具有相应变形性质的结构模型法。理想弹性材料(虎克介质)的最简单模型是弹簧,弹簧的变形与应力成正比例。通常用充满粘滞液体的液缸和有孔洞的活塞表示牛顿介质的模型。

同时具有弹性和流变性质的介质模型,首先是麦克斯威尔提出的(1867年)。它由串联在一起的虎克介质和牛顿介质模型构成(见图1-6)。当施加固定的外力从而产生应力 σ 时,弹簧产生弹性压缩量 Δl_e (图1-6,a位置1),可以把它理解为弹性应变 ϵ_e (图1-6,b)。但后来由于受压的粘滞液体流过活塞上的孔洞,施力点产生 Δl_v 的位移(位置2)。这将与粘性应变 ϵ_v 相符合,它随时间的变化过程如图1-6,b上直线1—2所示。

如果去掉载荷,则弹性应变部分立刻恢复原状(位置3),它在图1-6,b上由线段2—3表示,“粘性”应变 ϵ_{oc} 则完全残留,是不可恢复的。

如果将处在压缩状态(位置2)下的弹簧加以固定,则应力开始松弛(位置4),因为活塞将向下移动直到弹簧应力所决定的位置为止,即直到全部弹性应变得以恢复为止。松弛时,应力与时间的关系如图1-6,c所示。

应变速度应当由弹性和粘性应变速度叠加而成。状态方程具有以下形式:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} \left(\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{t_e} \right) \quad (1-11)$$

式中 E ——弹性模量;

1) 瞬时应变与瞬时加载相适应,并具有线性关系;

2) 应变随时间延长而增加;

3) 在固定载荷下,应变值趋近某一定极限,此极限与作用载荷的大小有关;

4) 应变值所趋向的极限与作用应力的呈非线性关系。

对于第二种类型的岩石:

1) 不存在极限应变值;

2) 在初期(短时期),蠕变曲线呈指数曲线型,但很快就变为倾斜于时间轴的直线;

3) 应变速度与施加的应力成正比。

t_* ——有时间因次的常数。

将 σ 作为常值并且对式(1-11)求积分,即得应变(蠕变特征的)方程:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\sigma}{E} \frac{t}{t_*} = \frac{\sigma}{E} \left(1 + \frac{t}{t_*} \right) \quad (1-12)$$

式中 $\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E}$ ——积分常数,等于初始弹性应变。

上述模型不适合于第Ⅰ类岩石,因为它不能满足第三条关于经过某些时间以后应变停止增长的要求。这种模型的特征在某种程度上十分接近于第Ⅱ类岩石(粘土)蠕变的特征。但是,不能满足第二条关于蠕变曲线初始段为指数曲线的要求。

符合于第Ⅱ类岩石(粘土)蠕变实际特性的状态方程十分复杂,而且利用它也有一定的困难。

可以忽略图1-5,6所示的曲线部分,将直线部分延长与 ε 轴相交。因为第Ⅱ类岩石蠕变特性的主要部分是直线形式,采取这样的简化方法不会产生大的误差。对于这种介质,其换算弹性模量 E_{np} 的计算方法,是将作用应力除以初始应变值 ε_0 ; ε_0 的值则由将试验蠕变曲线的直线段延长与纵轴相交而得。所以,对于第Ⅱ类岩石来说,可以取麦克司威尔状态方程作为它的第一阶近似值。

有时采用宾哈姆(Бингам)模型来描述粘土的蠕变性质,在此模型中,利用了粗糙平面上的干燥摩擦片的结构元件。

当应力小于一定值时,相应的介质为弹性的;而当应力大于一定值时,则成为粘-弹性介质。

宾哈姆介质的蠕变方程为:

$$\text{当 } \sigma \leq K_1 \sqrt{3} \text{ 时, } \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\text{当 } \sigma > K_1 \sqrt{3} \text{ 时, } \varepsilon = \frac{1}{E} \left[\sigma + (\sigma - K_1 \sqrt{3}) \frac{t}{t_*} \right] \quad (1-13)$$

式中 K_1 ——介质的某常数。

鲍埃丁和汤姆逊提出的结构模型(图1-7),能较好地反映Ⅰ类岩石的性质。在施加力时,应力 σ 引起两个弹簧的弹性压缩量为 Δl_1 (位置1)。同时活塞开始下移,引起进一步的位移 Δl_2 ,不论是弹性部分或是粘性部分,其变形都在增加。变形极限(位置2)将由弹簧Ⅰ的弹性和所加外力的大小来确定。图1-7,6所示的是弹性变形 ε_y 和粘性变形 ε_v 随时间的变化过程。

如果将弹簧固定在位置2而使应变恒定,则弹簧Ⅱ开始推动活塞,直到弹簧的整个弹

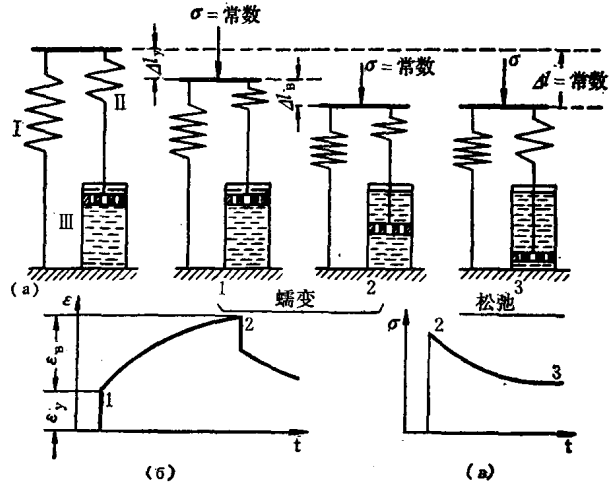


图 1-7 鲍埃丁-汤姆逊介质特性

a—流变模型; б—蠕变曲线; в—松弛曲线

性变形都转变为不可恢复的粘性变形（位置3）为止。换言之，应力松弛只是局部的，因为弹簧 I 仍旧处于压缩状态。

如果使模型卸载，则整个变形，不论弹性变形或塑性变形都将消失，而且模型恢复到原始状态。鲍埃丁-汤姆逊模型的状态方程为

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\varepsilon}{t_r} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{E_1 t_r} \quad (1-14)$$

取 $\sigma = \text{const}$ ，并对状态方程求积分，得到该模型的蠕变方程如下：

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma}{E_1} \right) e^{-\frac{t}{t_r}} + \frac{\sigma}{E_1} \quad (1-15)$$

这里 $E_1 < E$ ， E_1 是常数，有时叫“松弛”弹性模量。

模型满足 I 类岩石蠕变特征的前三个条件。由方程可以看出，瞬时载荷产生瞬时弹性变形，而且变形随着时间的增长而增加，但并不是没有限制，直到与时间指数有关的某一极限值为止。

但是，该模型不能满足第四条关于极限变形和应力之间为曲线关系的条件，因为极限值为 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1}$ ，就是应变与应力呈线性关系。

技术科学博士 IO.M. 利伯曼提出了对第四个条件也能满足的 I 类岩石的状态方程。

为此，以某非线性函数 $\varepsilon_\infty = f\left(\frac{\sigma}{E}\right)$ 取代方程 (1-14) 中的 $\frac{\sigma}{E_1}$ ，它的常数应当用试验方法确定。对该函数提出了两个式子：

$$f\left(\frac{\sigma}{E}\right) = \alpha \frac{\sigma}{E} + \beta \left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 \quad (1-16)$$

$$\text{或} \quad f\left(\frac{\sigma}{E}\right) = A \left(\frac{\sigma}{E}\right)^m \quad (1-17)$$

这里， α 、 β 以及 A 、 m 都是蠕变常数。

IO.M. 利伯曼的提出的 I 类岩石的蠕变方程将有下列形式：

$$\varepsilon = \left[\frac{\sigma}{E} - f\left(\frac{\sigma}{E}\right) \right] e^{-\frac{t}{t_r}} + f\left(\frac{\sigma}{E}\right) \quad (1-18)$$

$$\text{或} \quad \varepsilon = [\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty] e^{-\frac{t}{t_r}} + \varepsilon_\infty \quad (1-19)$$

图 1-5, a 上各点为试验的结果，而标出的曲线则是按方程 (1-19) 画出的。

流变特性的研究可用几种不同的方法进行：在施加恒定压缩载荷条件下，长时间的持续测定变形；在恒定的压缩变形条件下，测定应力的变化；以及在恒定载荷作用下，测定岩石梁试件的挠曲变形。在前两种方法中都采用弹簧压力机进行试验。

下面介绍用弹簧压力机测定蠕变曲线的方法^[54]。

弹簧压力机（图 1-8）由两个立柱 1 组成，横梁 2 和 3 可以沿着它上、下自由移动。下层的横梁位于几个弹簧 4 上。直径约 70 毫米、高 140 毫米的圆柱形岩石试件 5 安置在下层横梁上的平板上。在试件上面安置一个盖帽 6，在其上固定四个读数精度为 0.001 毫米的指针型千分表 7，用来记录载荷作用下岩石试件的缩短量。

拧紧螺母 8 即可对试件加载。压力通过测力计 9 传递给盖帽。此时测力计多少有些弯曲。利用预先标定好的千分表 10 测出这一弯曲变形的数值，便可查得所施加压力的大小。

蠕变常数根据几次试验的结果来确定。

常数 t_x 可以从下面的条件求得，即对式 (1-19) 两边取对数：

$$\frac{t}{t_x} = \ln \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{\varepsilon - \varepsilon_\infty}$$

以 $Z = \ln[(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)/(\varepsilon - \varepsilon_\infty)]$ ，则得 $t = t_x Z$ 。

绘出 t 和 Z 的关系曲线，从所得直线的斜率，即可确定 t_x 。

某些岩石（根据 IO.M. 利伯曼的资料）的蠕变常数见表 1-2。

哈萨克斯坦社会主义共和国科学院院士 Ж.С. 叶尔扎诺夫拟定了研究岩石蠕变的其它一些方法^[26]。他是通过测定岩石梁试件的横向弯曲对蠕变性进行研究的。试件断面为 20×20 毫米，长 160 毫米。两支座之间的跨度为 140 毫米。承放荷重的吊架通过悬吊铰链和冲头，将力作用在岩石梁的中部。挠度由读数精度为 1 微米的指针式指示器测定。要求长时间（400~800 小时）进行加载试验。试件的负荷为破坏负荷的 20% 到 80%。

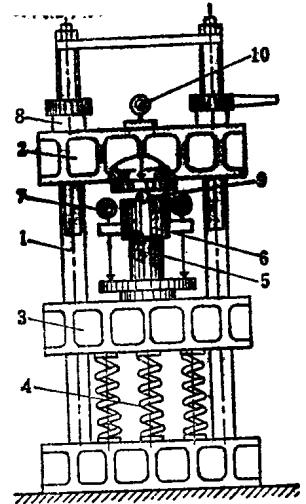


图 1-8 岩石蠕变性研究装置示意图（据 IO.M. 利伯曼）

表 1-2

岩 石	E_{np} (兆帕)	A	m	α	β	t_x (昼夜)
粘土页岩	—	10~15	1.2~1.3	1.5	600~800	30~40
砂土页岩	—	5~10	1.1~1.2	1.3	200~300	3~10
砂 岩	—	1.0~1.2	1.0~1.05	1.1	10~20	2~3
非可塑性粘土	300~500	—	—	—	—	11~18

从以下原理出发确定蠕变常数。

变形规律采取 Л. 博利茨曼 (Л. Больцман) 和 В. 沃尔特 (В. Вольтерр) 提出的形式：

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \left[\sigma(t) + \int_0^t L(t, \tau) \sigma(\tau) d\tau \right] \quad (1-20)$$

式中 $\varepsilon(t)$ 和 $\sigma(t)$ ——从加载开始计算，与时间 t 相对应的应变与应力；

$L(t, \tau)$ ——称做遗传性（蠕变性）核心，它是与材料特性有关的某种函数，反映在时间为 τ 时所作用的应力 $\sigma(\tau)$ ，对时间为 t 时的应变速度的影响。

博利茨曼-沃尔特定律不过是描述蠕变方程的新的公式，它比用微分方程写出的蠕变方程更具有普遍性。上述 I 类和 II 类岩石的蠕变方程都可以用遗传核写出。对于用鲍埃丁-汤姆逊线性模型描述的第 I 类岩石，其遗传核将有如下形式：

$$L(t, \tau) = \frac{E}{E_1 t_x} e^{-(t-\tau)/t_x} \quad (1-21)$$

第Ⅱ类岩石的遗传核可以表示为

$$L(t, \tau) = 1/t, \quad (1-22)$$

Ж.С.叶尔扎诺夫建议采用幂函数作为蠕变核，或叫阿贝尔（Абель）核：

$$L(t, \tau) = \delta(t - \tau)^{-\nu}$$

式中 δ 和 ν ——蠕变性参数。这些参数的值如下所示。

岩 石	$\delta, C^{-\nu-1}$	ν
粉 砂 岩	0.0094	0.726
泥质板岩	0.0080	0.710
砂 岩	0.0021	0.670
石 灰 岩	0.0018	0.701

根据Ж.С.叶尔扎诺夫的建议，岩石梁试件的挠度可用下式表示

$$u(t) = u_0 + u_0 \frac{\delta}{1 - \nu} t^{1-\nu} \quad (1-23)$$

式中 u_0 ——加载后的瞬时挠度。

公式(1-23)中，挠曲值随时间 t 的增加而无限限制的增大，所以它描述的是第Ⅱ类岩石的蠕变性。考虑到在600小时以后，蠕变速度将变为零，为了将这个公式用于第一类岩石，Ж.С.叶尔扎诺夫限定 t 值为600小时左右。

Ю.Н.拉博特诺夫（Ю.Н.Работнов）院士提出了可以直接描述第Ⅰ类岩石蠕变性的蠕变核的更普遍的形式[70]。在文献[71]、[72]和[73]中给出了为获得Ю.Н.拉博特诺夫核表达式中的参数的试验数据整理方法。

第四节 岩石的强度

岩石的强度决定于很多因素。岩石的结构影响坚硬岩石的强度。细粒组构的岩石较粗粒组构的岩石坚固，因为胶结物常常比颗粒本身还坚硬。矿物成分也影响岩石的强度。石英质矿物含量高的岩石具有较大的强度。裂隙也对岩石的强度产生影响，其中微裂隙也能使强度大大降低。

颗粒的大小和矿物的成分以及颗粒的形状在相当大的程度上影响着非坚硬岩石的强度。岩石中大量的粘土和粉质颗粒成分将降低其强度指标。石英族矿物的存在可以提高这些指标。高岭土、胶岭石含量多时则相反，它使这些指标降低。

松散岩石的某些强度指标决定于颗粒的组成。加大颗粒的粒度和棱角性可提高内摩擦角的数值。

任何材料对应力作用的阻抗都决定于应力状态的特性。井巷的围岩通常处在双轴或三轴应力状态。我们将利用强度理论对上述应力状态进行评价，这些强度理论以一定假设和试验数据为基础。理论应当很好地反映在实践、经验和试验中得到证实的材料的主要性质。

莫尔强度理论能最充分地反映岩石的力学性质。在这个理论上，拟制了评定岩石强度的较方便的方法。

岩石的三轴强度图 假定岩石试件处于三轴应力状态。我们研究垂直于中间应力 σ_2 的平面，并取 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。在试件内选择一个与最大主应力的作用方向成 ψ 角或者与 σ_1 的作