



GAODENG
ZHUANKE
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

高等专科学校教学用书

矿山岩石力学

冶金工业出版社

高等专科学校教学用书

矿山岩石力学

沈阳黄金学院 季卫东 主编

冶金工业出版社



B794183

高等专科学校教学用书
矿山岩石力学
沈阳黄金学院 季卫东 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝寺北巷10号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 11 1/4 字数 266 千字

1991年3月第一版 1991年3月第一次印刷

印数00,001~3,000册

ISBN 7-5024-0813-4

TD·137 (课) 定价2.95元

1

前 言

本书是为采矿工程专业专科学生学习矿山岩石力学课程编写的教材。内容的选择,既考虑到了比较全面系统地反映本学科基本知识、基本理论和发展现状的需要,也考虑到了解决采掘工程的生产与技术管理中出现的岩石力学问题的实际需要,并着力体现专科教学层次所要求的针对性与应用性。鉴于本书面向的读者,既未参加过采矿工程实践,感性知识甚少,又尚未学习过较高层次的数学、力学理论及数值计算方法(如弹性力学、有限元法等),基础理论知识不足,故本书的编写首先着眼于通过感性到理性的引导,使初学者尽快地掌握岩石力学学科的基本概念和分析解决实际工程问题的基本思路、基本方法,而不是着眼于用数学及力学方法的严密论证或推演。为便于初学者分清思路、明确基本概念,对于内容交叉重迭而容易产生思路混淆的章节,尽可能地作了简化,并重新归类编排。为此,将全书内容分为三篇:第一篇,连续介质力学方法在岩石力学中的应用;第二篇,工程地质力学方法在岩石力学中的应用;第三篇,岩石力学在地下开采中的应用。

本书以季卫东同志编写的《矿山岩石力学讲义》(沈阳黄金学院,1987年)为蓝本,在内容上作了补充与修改,并将全书重新编写。编写分工如下:引论,沈阳黄金学院季卫东;第一章,连云港化学矿业专科学校汤辅华;第二章,季卫东、长沙有色金属专科学校袁明清;第三章,季卫东;第四章,本溪冶金专科学校和铭予;第五章,季卫东;第六章,和铭予、汤辅华。全书由季卫东任主编、和铭予任副主编,书稿最后由和铭予统一整理。书稿经北京科技大学陈新万同志及昆明冶金专科学校陈中经同志审阅,并提出了进一步修改的宝贵意见。

本书内容的编排及编写方法,是一个新的尝试,还有待于在教学和实践中加以修正和完善。我们热诚欢迎读者提出宝贵意见。

编 者

1990年2月

目 录

引论	I
----	---

第一篇 连续介质力学方法 在矿山岩石力学中的应用

第一章 岩石的物理力学性质	4
第一节 岩石的物理性质	4
第二节 岩石的变形性质	6
第三节 岩石的流变性	10
第四节 岩石的强度性质	13
第五节 岩石的破坏机理与破坏判据 (强度理论)	16
思考题与习题	21
第二章 原岩应力与巷道地压	23
第一节 原岩应力	23
第二节 巷道围岩应力的分布 (次生应力场)	27
第三节 巷道围岩的非弹性变形区 (塑性区)	35
第四节 巷道围岩的位移	41
第五节 塑性区边界的离层条件	44
第六节 巷道地压	46
第七节 锚喷支护	58
第八节 井巷维护与地压控制	64
思考题与习题	66

第二篇 工程地质力学方法 在矿山岩石力学中的应用

第三章 岩体结构与岩体的力学性质	69
第一节 岩体结构概述	69
第二节 结构面的力学特性	71
第三节 岩体的强度	73
第四节 结构面状况调查	77
第五节 岩体的工程类型	79
思考题与习题	82
第四章 工程地质力学方法与边坡稳定性分析	84
第一节 赤平极射投影原理	84
第二节 边坡的变形和破坏	88
第三节 影响露天矿边坡稳定性的因素	91

第四节 露天矿边坡稳定性的分析与计算.....	97
第五节 露天矿边坡的维护.....	108
思考题与习题.....	113

第三篇 岩石力学在地下开采中的应用

第五章 采场地压.....	115
第一节 概述.....	115
第二节 采场的极限跨度及矿柱尺寸.....	119
第三节 空场采矿法的地压显现规律及空区处理.....	127
第四节 崩落法开采中的地压问题.....	137
第五节 充填体及其作用.....	141
第六节 采场地压控制与回采顺序.....	144
第七节 冲击地压及其监控.....	147
思考题与习题.....	150
第六章 地压观测方法简介.....	152
第一节 岩体变形及破坏的观测.....	152
第二节 支架载荷测量.....	159
第三节 原岩应力测量.....	161
第四节 围岩应力变化的测量.....	166
思考题与习题.....	172
参考文献.....	173

引 论

一、矿山岩石力学的研究内容及任务

矿山工程总是离不开岩石和土方。露天及地下采掘作业的目的，可以概括为两个方面：一是采用各种手段将岩石（包括矿石）破碎；二是设法对边坡、巷道、采场等岩体工程加以保护，以防止破坏。如果把采掘工程周围的岩体称为围岩，那么上述的第二个目的可简称为维护围岩的稳定性。为达到这一目的，需要对采掘过程中的围岩变形及破坏现象进行研究，以探求其发展变化规律，从中寻找经济而有效的维护措施。生产实践的这种需要促使人们去观测现象，分析探讨规律，从而逐步形成了一门学科，即《矿山岩石力学》。

从理论上讲，物体的变形及破坏都与物体之间或物体内部各部分之间的相互作用力的状况及其变化有关，属于力学范畴。不过，围岩稳定性问题是一个复杂的力学问题，因为它受到许多相关因素的影响和制约。这些因素如下。

采掘前岩体的状况（或原岩的状况），包括两个方面：

1. 岩体（原岩）的物理力学性质 主要是岩体的完整性（连续性或节理、断裂状况）、均质性、坚固性（变形性质、强度性质）等。

2. 原岩所处的应力状态 即采掘前岩体各部分之间的相互作用力的强弱及方向等。

采掘过程中或采掘影响下岩体的变化，包括两个方面：

1. 岩体应力状态的变化 主要是在采掘工程的几何形状、空间分布、开挖顺序、经历的时间及支护状况等影响下的应力变化。

2. 岩体抗变形、抗破坏能力的变化 主要指与地下水及应力状态有关的能力变化。

矿山岩石力学的主要课题，便是围绕着以上诸因素去分析、探讨围岩的变形及破坏规律（或称地压显现规律）。

二、岩体的特点及原岩应力状态

矿山工程的特点是在天然存在的地壳岩体中实施采掘作业，它面对的是经历过亿万年变迁的特殊地质体。这种地质体与钢材、水泥等普通工程材料相比，具有下列一些不可忽视的性质。

第一，从矿区或采区的较大范围来观察岩体时，它常常是非均质、各向异性和非连续的，因为其中分布着大小不一的节理、层理、构造断裂及各种不连续分界面（又称结构面或弱面）。因此，在分析岩石力学工程问题时，除了参照普通材料力学的试验方法测定岩石材料的力学性质之外，还需要确定含有弱面的原位岩石的力学性质。同完整的个体岩块相比，岩体具有更为明显的各向异性，变形的规模大而且随时间变化。为此，需要进行实地工程地质调查及原位测试。

然而，在同矿山工程的尺度相比较时，岩体的非均质及非连续性往往具有相对意义（参看图0-1）。于是，在分析岩石力学问题时要进行具体分析，不能采用单一的理论模式来处理。岩石力学在自身的发展过程中，之所以出现多样化的研究方法和理论模式，原因即在此。

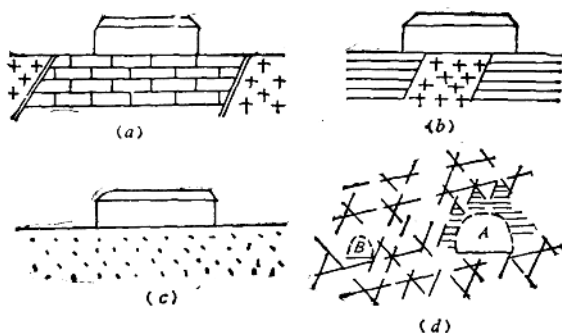


图 0-1 岩体非连续体的相对性

(a)在工程范围内可视为连续体；(b)岩体为非均质、非连续体；(c)松散土体可近似按连续体分析；(d)平洞A的围岩为非连续体，平洞B的围岩可视为连续体

第二，地壳岩体在被开挖或受扰动前即已存在相当强的应力，称为原岩应力或地应力。岩体的力学性质（包括变形性质、强度性质等）、开挖后的变形及破坏状况均同原岩应力有着密切关系。因此，分析岩石力学工程问题时必须首先搞清现场的原岩应力状况。

然而，在岩石力学的早期研究中，对上述现象的认识是相当肤浅的，考虑到的应力场只是岩层自重作用的结果（通常称为自重应力），对于地壳岩体中随构造运动及地质变迁而出现的应力（通常称为构造应力）则缺乏了解。直到本世纪后半叶，世界各地相继开展了大量的地应力实测工作，人们才逐步认识到：在多数情况下，原岩应力在更大程度上取决于构造应力的强弱及其方向（通常，其沿水平方向的作用大于垂直方向）。

可以说，岩石力学理论的发展及其对工程实践的指导意义，取决于人们对岩体特性及原岩应力状态研究的深化及其发展。有鉴于此，在许多岩石力学专著中都用了大量篇幅介绍有关内容。

三、矿山岩石力学的研究方法和发展简况

对于围岩变形、移动或破坏规律的研究和探讨，追溯其历史与现状，共采用三类方法。第一，以实地观测（包括工程实践经验）为基础，采用统计、归纳方法总结有关规律；第二，以分析研究岩体的力学特性为基础，找出描述这一特性（或称本构关系）的简化模型，再运用相应的力学理论进行推导、演绎，据此预测或论证有关规律；第三，以相似理论为基础，开展相似材料模型及光学弹性材料模型的试验研究，以便在简化某些次要条件的情况下，充分应用现代测试技术，研究探讨有关基本规律。

对于岩石力学的发展来说，这三类方法都是不可或缺的，而且是相辅相成、相互促进的。在早期，或在研究的初级阶段，人们更多地依赖第一类方法。例如，上世纪后半叶欧洲一些煤矿制订的关于保安矿柱、地表移动范围等的规范，便是运用这类方法取得的成果；本世纪初俄国的普罗托吉雅柯诺夫教授提出的关于顶板冒落的著名的拱形理论也是一例。但当积累的经验性规律不断丰富之后，人们的注意力便转向运用后二类方法进行更为深入的研究上来了。在这些领域，对岩石力学发展有着举足轻重影响的研究方法与研究成果，大体有以下几个方面：

(1) 将土体视为松散体, 并运用连续介质力学进行理论分析的土力学方法。其代表作有太沙基(K.Terzaghi, 1925年)著的《土力学》等, 在工程实践中被广泛用于分析均质松软岩土中的边坡滑坡、挡土墙及浅埋巷道支架的顶压及侧压等问题。

(2) 将岩体视为均质、连续的弹性塑性体, 并运用连续介质力学进行理论分析的弹塑性力学方法。代表作有法国的塔罗勃(J.Talobre, 1957)的《岩石力学》、卡斯特纳(H.Kastner, 1971)的《隧道与坑道静力学》, 以及我国于学馥教授(1960)的《轴变论》等, 在工程实践中被广泛用于分析均质、坚固岩体中的巷道地压问题。

(3) 将岩体视为被结构面分割的非连续体, 注重工程地质调查和获取岩体力学性质的原位测试, 并运用刚体力学原理进行块体极限平衡分析的工程地质力学方法。代表作有西德的缪勒(L.Müller, 1974)主编的《岩石力学》及我国的谷德振、王思敬等(1972)著的《岩体工程地质力学的原理与方法》等。在工程实践中被广泛用于分析露天矿的边坡, 以及分析被断层或结构面明显分割的岩块稳定问题。

(4) 将岩体视为被大大小小的裂隙或弱面分割开来的损伤体, 运用损伤体力学方法进行分析研究。这是近年来正在发展中的一种新方法。

综上所述, 岩石力学的众多研究方法和理论各有千秋, 目前仍处于继续发展和完善的阶段。不同的学术观点竞相发展, 互为补充; 这个现象恰好说明了岩石力学这一学科的复杂性。考虑到各种研究方法的发展现状, 本书拟重点介绍连续介质力学方法和工程地质力学方法。作为教学用书, 本书采取了理论阐述与工程应用相结合的讲述方法, 其目的在于有利于理解和消化。鉴于各种研究方法都有其局限性, 对其难以概全之处, 将在有关章节中加以说明。至于这样的作法是否有失严谨, 还有待于科学实践的检验。

思考题

1. 矿山岩石力学要研究解决的主要问题是什么? 解决这些问题对矿山工程有什么意义?
2. 在分析矿山岩石力学工程问题时要考虑的最基本因素是什么?
3. 研究矿山岩石力学工程问题的理论与方法有哪些? 各有什么特色?

第一篇 连续介质力学方法

在矿山岩石力学中的应用

本篇主要按材料力学及弹塑性理论的试验研究与分析方法来阐述岩石力学中的有关问题。在这个概念下,岩体被近似地作为均质连续介质看待。岩体的物理力学性质,以小尺寸岩块(试样)在室内试验取得的数据为准,必要时可考虑乘以折减系数。至于这种近似处理方法可能偏离客观实际的程度,将在第二篇中进行比较。

第一章 岩石的物理力学性质

岩石是构成地壳的基本物质,是各种造岩矿物的聚合体。在岩石力学中,通常所说的岩石是指从地壳岩体中取出的,没有显著弱面的较均质的岩块(或岩石材料)。至于岩石的广义概念,则既包括岩块,也包括岩体。不过,本章只涉及岩块的物理力学性质。

为了预测和控制岩体工程的变形和破坏规律,深入掌握岩石材料的物理力学性质是不可少的。

第一节 岩石的物理性质

与采矿工程有关的岩石物理性质指标,主要有以下几种:

一、岩石的密度 ρ

单位体积岩石所具有的质量,称为岩石的密度。

$$\rho = \frac{G}{V} \quad (1-1)$$

式中 G ——岩石试件的质量;

V ——岩石试件的体积,包括孔隙和裂隙的体积。

用上述方法测定的岩石密度又叫做整体密度,即试件的体积包括孔隙和裂隙的体积在内。如果去掉试件中的孔隙和裂隙体积,则所余下的体积称为实体积 V_s 。单位实体积岩石所具有的质量,叫做岩石的实体密度 ρ_s 。

$$\rho_s = \frac{G}{V_s} \quad (1-2)$$

二、岩石的容重 γ

单位体积岩石质量所受的重力,称为岩石的容重。

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度。

由于试件中含水量的不同,岩石的容重又有天然容重、干容重与水饱和容重之分。

三、岩石的孔隙率 q

岩石的孔隙率是指岩石试件中各种孔隙体积之和 V_0 与整体体积的比值，通常用百分数表示。

$$q = \frac{V_0}{V} \times 100\% = \frac{V - V_s}{V} \times 100\% \quad (1-4)$$

若将式(1-1)及(1-2)中的相应值代入上式，则岩石的孔隙率也可用岩石的密度和岩石的实体密度来计算：

$$q = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (1-5)$$

四、岩石的吸水性

岩石试件在标准大气压(0.1MPa)下吸入水的质量 Q_1 与试件干质量 G_s 之比称为岩石的自然吸水率 w_1 。

$$w_1 = \frac{Q_1}{G_s} \times 100\% \quad (1-6)$$

在高压(15MPa)或真空条件下岩石吸入水的质量 Q_2 与试件干质量之比称为岩石的

某些常见岩石的物理性质

表 1-1

岩石名称		密度 (10^3kg/m^3)	容重 (10^4N/m^3)	孔隙度(%)	吸水率(%)		渗透系数 (cm/s)
					自然吸水率	饱和吸水率	
花岗岩	粗粒	2.63~3.4	2.8	0.04~0.61	0.1~0.92		
	中粒		3.1				
	细粒		3.3				
	强风化		2.5				
正长岩		2.6~2.9	2.4~2.8	1.38			
闪长岩		2.85~3.0	2.9	0.25			
玢岩			2.5~2.7	1.88~2.65			
玄武岩		2.9~3.3	2.7~3.2	1.28	0.27	0.39	
石灰岩	致密	2.48~2.85	2.9~3.1	5~20	0.1~4.45		$<10^{-10}$
	较松		2.5				2~4
	泥灰质		2.3				
砂岩		2.6~2.75	1.75~2.65	3~30	7.0	12	$>(10^{-8} \sim 10^{-9})$
页岩		2.57~2.77	2.4~2.7	10~35	1.8~3		
大理岩		2.72	2.7				
凝灰岩		2.56	0.75~1.4	25			

饱和吸水率 w_z 。

$$w_z = \frac{Q_z}{G_s} \times 100\% \quad (1-7)$$

岩石的自然吸水率与饱和吸水率之比称为岩石的饱水系数 K_s 。

$$K_s = \frac{w_1}{w_z} \quad (1-8)$$

五、岩石的透水性

大多数岩石的孔隙及裂隙是相互连通的，因而在一定的压力作用下，地下水可以在岩体中通过（渗透）。岩石可使地下水透过的性能称为岩石的透水性。衡量岩石透水性指标为渗透系数 K ，它是在钻孔中利用抽水或压水试验方法测定出来的。从下面的渗流速度 v 的计算式中可反求出岩石的渗透系数：

$$v = -K \frac{h_2 - h_1}{\Delta l} = -K \frac{dh}{dl} \quad (1-9)$$

式中 v ——渗流速度，等于单位时间内通过某截面的流量 Q 与截面积 A 之比，即

$$v = \frac{Q}{A};$$

h_2 ——高压水头；

h_1 ——低压水头；

Δl ——高压水头至低压水头间的距离。

一些岩石的物理性质指标，列于表1-1中。

第二节 岩石的变形性质

岩石在载荷作用下会产生弹性变形及塑性变形。不过同钢材等相比，它性脆易断，没有明显的屈服极点，而且塑性变形的发展往往与弹性变形同时进行。岩石变形过程的这些特点，只有通过试验才可被揭示出来。由于试验技术方面的困难，岩石材料的拉伸及扭转变形的试验资料很少。岩石的弹性及塑性变形性质，通常是采用压缩变形试验方法测定的。由于试件的变形量极其微小，试验时常需借助电阻应变片或位移传感器，以传递变形信息。

一、岩石在单轴压缩条件下的变形性质

岩石在破坏前的变形性质可通过测定其应力与应变的关系而被揭示出来。根据岩石的变形性质，可把岩石大致划为以下几种类型（见图1-1）。

1. 弹性硬岩 如图1-1(a)所示，岩石的应力—应变曲线近似直线。如若卸载，则变形可完全恢复；即卸载试验曲线可回归到加载试验的起始点，并与加载试验曲线几乎完全重合。从试验曲线上量得的斜率就是岩石的弹性模量， $E = \sigma / \epsilon$ 。弹性模量是岩石的一项重要力学性能指标，它的大小反映出岩石抗变形能力的强弱。细粒岩浆岩及细粒变质岩多属于这一类。

2. 塑性软岩 应力—应变曲线逐渐平缓，并沿 ϵ 轴延长，如图(b)所示。如若卸载，则大部分变形不能恢复，说明主要是塑性变形。此类岩石的变形特点是试块的径向

(横向) 应变 ε_d 与纵向应变 ε_l 的比值(泊松比)较大, 可达到0.35~0.45。泥质岩石、页岩、孔隙度大的沉积岩均属此类。

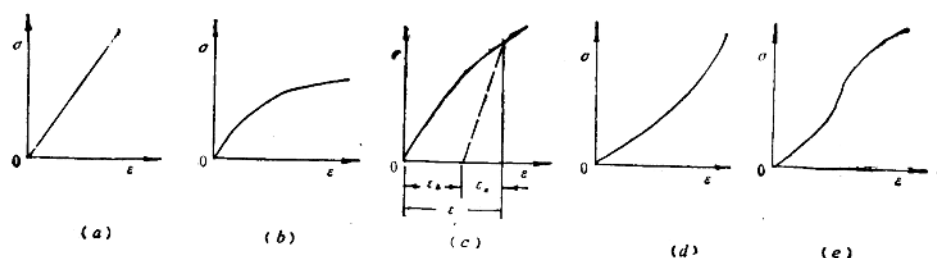


图 1-1 岩石试验曲线的基本类型

(a) 弹性硬岩; (b) 塑性软岩; (c) 弹—塑性(虚线为卸载曲线); (d) 塑—弹性;
(e) 塑—弹—塑性

3. 半弹性岩石 又可细分为弹—塑性、塑—弹性及塑—弹—塑性岩石, 如图(c)、(d)、(e)。试验曲线中的直线段代表弹性部分; 弯曲线段代表塑性部分, 反映岩石内孔隙的压密或裂隙的产生、扩展与滑移等过程。如若卸载, 则变形不会完全恢复。卸载曲线不能回归到加载的起始点, 也不会与加载曲线重合。此类岩石具有两种模量, 即弹性模量 E_e 及变形模量 E_p , 其值分别为

$$E_e = \frac{\sigma}{\varepsilon_e}, \quad E_p = \frac{\sigma}{\varepsilon_p + \varepsilon_e} \quad (1-10)$$

式中 σ ——岩石试件中的应力, 压应力为正值;

ε_e ——非弹性岩石的弹性应变;

ε_p ——塑性应变。

岩石的变形模量可从试验曲线上某点的切线的斜率获得, 也可从曲线上某点(通常在强度极限的一半处取点)与原点间所作直线的斜率获得。前者称为切线模量, 后者称为割线模量。

在对试件进行反复加载与卸载试验时, 此类岩石的试验曲线见图1-2。当每次循环的最大载荷均相同时(图a), 则经多次反复后即不再出现塑性变形, 最后的应力—应变曲线趋近于直线。当每次循环的最大载荷都超过前一次时(图b), 则多次加载试验曲线仍然沿着单次加载时的曲线上升, 好象不曾受过反复加载一样。

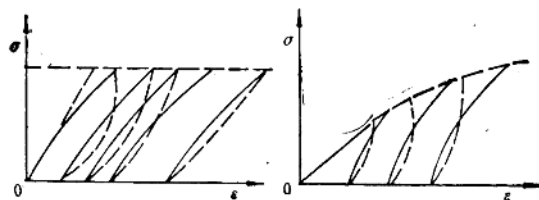


图 1-2 反复加载与卸载时的试验曲线

二、应力—应变全过程曲线

在普通试验机上把岩石试件加载到强度极限(峰值应力)时, 通常试件会在一瞬间突

然崩裂，致使峰值以后的应力—应变过程难以测出，其原因在于试验机没有足够的刚度。普通试验机的刚度小 ($<50\text{MN/m}$)，在压缩试件的同时其自身构件也发生了较大的变形，从而积蓄了相当大的弹性变形能。当试件破坏时，它对试验机的反作用力突然降低，使得试验机中积蓄的弹性能在一瞬间释放，从而冲击岩石试件，将试件崩裂。这就是岩石的脆性破坏。如果使用另一种类型的试验机，使其刚性大于岩石试件的刚性，由于试验机积蓄的弹性能很少，则当试件破坏时可避免受到弹性能释放的冲击，从而能测出峰值应力以后的应力—应变的发展过程。

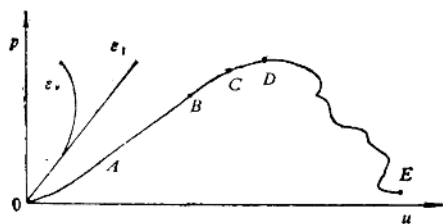


图 1-3 载荷—位移全过程曲线（大冶大理石）

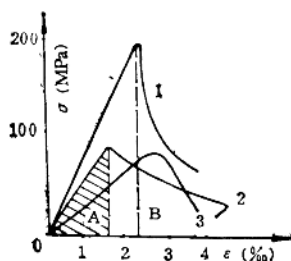


图 1-4 应力—应变全过程曲线

1—石英岩；2—大理石；3—砂岩

七十年代以来，测定峰值后的应力—应变曲线的工作多是采用配有液压伺服系统的刚性试验机进行的。但是这样的试验设备价值昂贵，费用很高，普通试验室难以购置。不过还有一种简便的方法，可以在普通试验机上测出峰值应力后的近似过程。方法是在岩石试件的四周安放四个高度与试件相等的钢柱，与岩石试件同时加载；当试件开始破坏时，则钢柱可承受试验机的载荷。虽然是应变速度稍有加快，但却避免了试件的崩裂，并能测出应力降低后的全过程。

岩石的应力—应变全过程可大致划分为五个阶段（图1-3）。

1. **OA段** 该线段的斜率由小到大，表明岩石内裂隙被压密的过程。在压密阶段，岩石体积缩小。对应于A点的应力值称为压密极限。

2. **AB段** 该线段大致为直线，表明岩石呈线弹性变形。随着试件的轴向压缩，横向有所增大，但体积仍在缩小。对应于B点的应力值称为弹性极限。

3. **BC段** 岩石内原有的微裂隙延伸扩展，体积变形由缩小转为增大（膨胀），即发生“扩容”。扩容的出现是岩石发生破裂的开始。同扩容起始点对应的应力称为临界应力，它是断定岩石是否发生破坏的一个重要依据。同C点对应的应力称为屈服极限。岩石的临界应力位于弹性极限与屈服极限之间。

4. **CD段** 岩石中的裂隙加速扩展，显示出宏观破坏的迹象，体积膨胀加剧。岩石的承载能力达到极限值，即峰值强度。对应于D点的应力值称为强度极限。

5. **DE段** 岩石由破裂发展为全面破坏。应力随应变的增大而下降，即承载能力逐渐降低。岩石的承载能力虽然在降低，但并不是全部立即丧失。此时尚存的承载能力称为残余强度。

岩石残余强度的存在，在矿山生产中具有实际意义。如有的矿柱在发生局部开裂以后仍能稳固地支撑着顶板，就是残余强度在发挥作用的例证。

各种岩石在破坏阶段中的应力—应变曲线具有不同的形式。如图1-4所示，石英岩及砂岩显示“脆性”破坏，大理岩则显示“延性”破坏。此处峰值左侧曲线下的面积（如曲线2下面的阴影部分） A 代表岩石在压缩变形过程中积蓄的变形能，而峰值右侧曲线下的面积（如2下面的空白部分） B 则代表岩石在破坏断裂过程中所耗散的能量。可以设想， $A > B$ 的那类岩石，一旦获得从压缩状态下松动的机会，就有可能因积蓄的变形能被释放而发生强烈的脆性崩裂。在深部开采中有时发生的岩爆现象，正是这种能量释放过程的表现。

三、三轴压缩条件下的岩石变形性质

地下岩石多处于三轴压缩状态之下，因而研究岩石在三轴压缩下的变形性质是十分必要的。在这方面最早的试验是由卡曼（V. Kamar, 1911）提出的。他将岩石试件置于可施加围压的压力室中，在用试验机作轴向加载的同时，液压对试件施加侧向压力。此时，各侧面上的压强相等（ $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0$ ），所以这是一种等围压三轴压缩试验。从图1-5可以看出，当围压提高时，岩石可由脆性转变为延性。某些孔隙度大的岩石（如砂岩），其弹性模量随着围压的提高而增大。图中各曲线旁的数字代表围压值（MPa）。

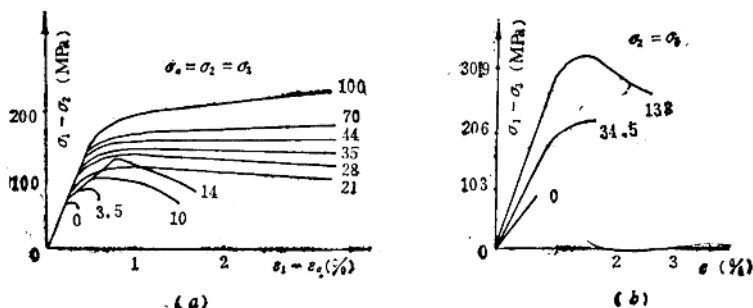


图 1-5 等围压三轴压缩试验曲线

(a) 大理岩；(b) 砂岩； σ_0 —围压； σ_1 、 σ_3 —侧压（ $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0$ ）

为搞清中间主应力 σ_2 对岩石变形性质的影响，需在三个主应力均不相等的应力状态下（ $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ）进行试验。这种试验称为“真三轴压缩试验”。这类试验目前进行得还不多，初步所得结果表明，三个主应力对弹性模量均有影响（图1-6）。

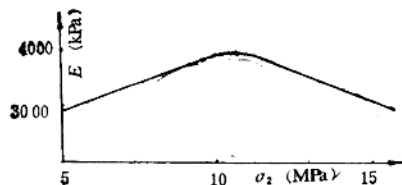


图 1-6 岩石弹性模量随 σ_2 的变化

(1) 当最小主应力 σ_3 较低时，沿最大主应力 σ_1 方向的弹性模量及断裂时的脆性表现，随着中间主应力 σ_2 或应力差 $\sigma_2 - \sigma_3$ 的增大而增大，见图1-6中曲线的左侧部分。

(2) 岩石沿最小主应力方向的抗拉伸变形能力，随着中间主应力或应力差的增大而降低，见图中曲线的右侧部分。

第三节 岩石的流变性

一、概述

岩石的流变性是指变形随时间延长而表现出来的类似粘滞流体流动方面的特性。

流体在流动过程中会显示出一种抗流动的特性,称为粘性。粘性的大小用粘性系数来表示。岩石并不是流体,但在变形随时间的发展过程中也表现出相仿的粘性。由于各类岩石的粘性大小不同,其变形(或应力)随时间发展而变化的速度也不一致,从而构成了不同的流变特性。

岩石的流变性可以通过试验方法测定出来。常用的方法有蠕变试验和松弛试验两种。

在恒定应力或恒定应力差的作用下,变形随时间而增长的现象称为蠕变。蠕变试验,就是在岩石试件上加以恒定载荷,观测其变形随时间的发展状况。根据试验数据绘制的应变—时间曲线,称为蠕变试验曲线,见图1-7。

当应变保持恒定时,应力随着时间的延长而降低的现象称为松弛。松弛试验的条件就是使试件的变形保持一恒定值,借此来观察载荷 P 随时间 t 的变化。试验所得的载荷—时间曲线称为松弛试验曲线,见图1-8。

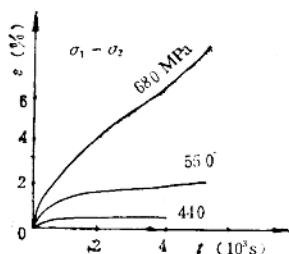


图 1-7 蠕变试验曲线(石灰岩, $\sigma_3 = 1000\text{MPa}$)

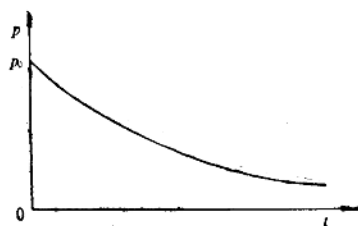


图 1-8 松弛试验曲线

P_0 —初始载荷

加载或卸载时,弹性变形滞后于应力的现象称为弹性后效,这也属于岩石流变性的一种表现。在蠕变试验过程的卸载阶段可以观察到这种现象。

二、岩石的蠕变特性

岩石的蠕变分为稳定蠕变与不稳定蠕变两类。

(一) 稳定蠕变

当作用在岩石上的恒定载荷较小时,初始阶段的蠕变速度较快,但随着时间的延长,岩石的变形趋近一稳定的极限值而不再增长。这就是稳定蠕变。

(二) 不稳定蠕变

当载荷超过某一临界值时,蠕变的发展将导致岩石的变形不断增长,直到破坏,这就是不稳定蠕变。它的发展过程分为三个阶段,见图1-9。

1. 过渡蠕变阶段(I) 在加载的瞬间有一个弹性变形 ϵ_e ,继而变形以较快的速度增长;随后蠕变速度逐渐降低,并过渡到等速蠕变阶段。如果在该阶段内卸载,则会出现瞬间的弹性变形(PQ段),以及经过一段时间才能恢复的变形(QR段)。

2. 等速蠕变阶段(II) 变形速度保持恒定。如果在该阶段内卸载,则不仅出现瞬

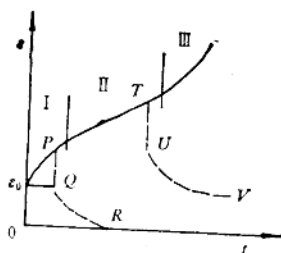


图 1-9 不稳定蠕变的三个阶段

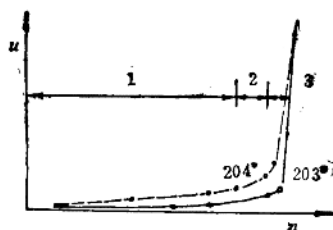


图 1-10 小龙矿岩体位移曲线
 u —位移量, mm; m —时间, 月; 1—缓慢移动
 阶段; 2—移动加速阶段; 3—崩落阶段;
 203°、204°—岩体位移观测点代号

间的弹性恢复 (TU段) 和弹性后效 (UV段), 还会有不可恢复的永久变形残留下来。

3. 加速蠕变阶段 (Ⅲ) 变形速度急剧加快。此时岩石内裂隙迅速发展, 促使变形加剧直至破坏。

岩石蠕变发展的阶段性, 为监测和预报围岩破坏现象提供了一个可靠的判据。如果发现岩体某部分的位移速度开始由等速转入加速发展时, 则表明破坏将要发生。如智利某矿的边坡在等速蠕变阶段内的岩体位移速度为0.025mm/d。到发生滑坡的24小时前, 位移速度增至7.0cm/d。临近滑坡时的位移速度达到15cm/d。江西小龙矿定期观测了采空区围岩的岩体位移, 见图1-10。根据观测到的岩体位移信息成功地预报了可能发生地压活动的日期。该矿于1972年4月8日作出了撤离坑内作业人员的决定, 并立即执行; 结果在4月10日及11日发生了岩体崩塌。

由于过载引起的蠕变发展会导致破坏, 因此在处理岩石工程问题时 要 特别 注重时间性, 尽可能加快工程进度。

三、描述岩石流变性的力学模型

综上所述, 岩石具有粘性材料、弹性材料及塑性材料的综合变形性质, 是一种复杂的流变性材料。为了便于深入地理论分析, 预测岩石变形随时间而发展的状况, 有必要对变形过程作出数学描述。通常采用流变学中的基本力学模拟元件来组合岩石材料的力学模型, 并借以作出岩石流变性的数学描述。流变模型由以下三种基本元件构成:

1. 虎克体 (弹簧元件) 它是一种理想的弹性体, 其力学模型为弹簧元件。在载荷作用下, 如果材料的变形性质完全符合虎克定律, 则称此种材料为虎克体。材料的应变与所受的应力成正比, $\sigma = E\varepsilon$ 。由于弹性模量 E 为常量, 于是有

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1-11)$$

2. 库伦体 (摩擦元件) 它是一种理想的塑性体, 其力学模型常用摩擦元件 (或称滑块) 来表示。当材料所受的应力小于其屈服极限时, 物体虽有应力存在, 但不产生变形。当应力达到屈服极限时, 便开始产生塑性变形; 即使应力不再增加, 变形仍会不断增长。这就是库伦体的特性, 它与摩擦体的力学性质相同。塑性摩擦元件服从库伦摩擦定律