

矿山压力测控技术

主 编 耿献文
副主编 马全礼 刘桂仁 张宝红 陈家忠
参 编 朱学军 李 洪 王茂军 杜玉喜
陈繁华 朱怀志 任保明 边平勇
俞志新 盛月法 邢志春 张宗基
主 审 林东才

中国矿业大学出版社

内容提要

本书系统、全面地介绍了矿山压力的基本理论、观测技术、控制方法等内容。共分12章,内容包括岩石及岩体的基本性质、矿山压力及矿山压力显现、采煤工作面上覆岩层移动规律、采煤工作面矿山压力显现规律、矿山压力观测仪器、采煤工作面矿山压力观测、巷道矿山压力观测、矿山压力观测数据的分析与处理、采区巷道矿山压力控制、采煤工作面矿山压力控制、采煤工作面顶板事故的防治、煤矿冲击地压等。

本书是高等院校及高等职业技术教育采矿工程、矿井建设、通风与安全等专业的教学用书,可供从事采矿工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿山压力测控技术/耿献文主编. — 徐州:中国矿业大学出版社, 2002. 1

ISBN 7 81070 519-9

I. 矿... II. 耿... III. ①矿山压力—观测—方法
②矿山压力—控制方法 IV. TD326

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 024634 号

书 名 矿山压力测控技术
主 编 耿献文
责任编辑 刘社育 孙树朴
责任校对 孙树朴
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 18.25 字数 450 千字
版次印次 2002年1月第1版 2002年1月第1次印刷
印 数 1~3000 册
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

矿山压力的观测与控制是实现矿山生产科学管理必不可少的基础工作。多年来一直为广大采矿工程技术人员所重视。矿山压力显现规律及其控制方法的研究,是正确进行采矿设计、合理选择支护形式及支架类型,加强顶板管理,保证安全生产的重要一环。

矿山压力的观测与控制包括内容很多,已成为一门完整的技术学科。我国幅员辽阔,煤田的地质条件复杂,使用的采煤方法多种多样,随着开采深度的加大,采矿技术的进步,矿压理论和实践也在不断发展。因此,本书本着反映当前、兼顾长远、保证重点以及注重实用性、针对性和可操作性的原则,力求内容和结构体系合理,做到深入浅出,概念清晰,适应采矿技术发展。

书中对矿山压力理论部分作简要介绍,重点放在了实用性和可操作性上,尤其表现在“矿压观测”和“矿压控制”部分。全书共三大部分,第一部分包括第一章至第四章,重点介绍矿山压力的基本概念、岩层运动规律、矿山压力及其显现与上覆岩层运动的关系;第二部分包括第五章至第八章,在矿山压力理论的指导下,重点介绍矿山压力观测和预报工作,对观测的目的、项目、手段、方法和结果处理作了详细说明;第三部分包括第九章至第十二章,重点介绍了采煤工作面和巷道矿压的控制理论和方法,也就是根据基础理论和矿压观测的结果来解决采掘工作中遇到的实际问题,同时也对冲击地压作了简单介绍。

参加本书编写的人员有:

主编:耿献文

副主编:马全礼、刘桂仁、张宝红、陈家忠

参编:朱学军、李洪、王茂军、杜玉喜、陈繁华、朱怀志、任保明、边平勇、俞志新、盛月法、邢志春、张宗基

主审:林东才。

具体分工为:第一章,耿献文;第二章,马全礼,第三章,耿献文、朱怀志;第四章,耿献文、王茂军、杜玉喜;第五章,张宝红、任宝明;第六章,马全礼、张宗基;第七章,朱学军、俞志新;第八章,耿献文、李洪、边平勇;第九章,耿献文;第十章,耿献文、陈家忠;第十一章,刘桂仁、陈繁华、盛月法;第十二章,朱学军、邢志春。全书由耿献文统稿和定稿。

在本书编写过程中,得到了兄弟院校和现场工程技术人员的大力支持和帮助,同时也参阅了许多专家、学者的著作和文献,在此一并致谢。

由于编者水平有限,谬误或不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2001年11月

目 录

第一章 岩石及岩体的基本性质	(1)
第一节 概 述	(1)
第二节 岩石的物理性质	(1)
第三节 岩石的变形性质	(5)
第四节 岩石的强度特性	(7)
第五节 岩石的破坏类型	(10)
第六节 岩体的基本性质	(12)
第七节 岩体的力学性质	(15)
第二章 矿山压力及矿山压力显现	(18)
第一节 矿山压力及其在围岩中的分布	(18)
第二节 矿山压力显现	(24)
第三章 采煤工作面上覆岩层移动规律	(27)
第一节 概 述	(27)
第二节 直接顶的移动规律	(29)
第三节 老顶的移动规律	(33)
第四节 直接顶和老顶的相互转化	(35)
第四章 采煤工作面矿山压力显现规律	(36)
第一节 概 述	(36)
第二节 老顶的初次来压	(36)
第三节 老顶的周期来压	(37)
第四节 采煤工作面周围的支承压力及其分布	(38)
第五节 影响采煤工作面矿山压力显现的主要因素	(41)
第六节 放顶煤开采时的矿山压力显现	(43)
第五章 矿山压力观测仪器	(47)
第一节 机械式矿压观测仪器	(47)
第二节 液压式矿压观测仪器	(51)
第三节 振弦式矿压观测仪器	(56)
第四节 矿山压力遥测仪器	(58)
第五节 其他矿压观测仪器	(61)
第六章 采煤工作面矿山压力观测	(63)
第一节 概 述	(63)
第二节 顶底板移近量和活柱下缩量观测	(64)
第三节 支架载荷的观测	(75)
第四节 采煤工作面顶板状况统计观测	(91)
第五节 采煤工作面采空区上覆岩层移动和破坏过程的观测	(97)

第六节	采煤工作面顶板运动的预测预报	(101)
第七节	底板比压的测定	(110)
第八节	单体支柱工作面支护质量监控	(115)
第七章	巷道矿山压力观测	(122)
第一节	采区巷道矿山压力观测	(122)
第二节	开拓巷道矿山压力观测	(127)
第八章	矿山压力观测数据的分析与处理	(133)
第一节	概 述	(133)
第二节	观测数据的误差分析	(134)
第三节	概率论与数理统计方法在矿压观测数据处理分析中的应用	(136)
第四节	矿山压力观测报告的编写	(152)
第九章	采区巷道矿山压力控制	(161)
第一节	采区巷道支护原理	(161)
第二节	采区巷道矿山压力控制设计	(164)
第三节	锚杆、锚索支护设计	(172)
第四节	巷道冒顶的预防与处理	(184)
第五节	巷道冒顶事故实例分析	(187)
第十章	采煤工作面矿山压力控制	(190)
第一节	顶板分类	(190)
第二节	单体支柱采煤工作面顶板控制设计	(193)
第三节	综采工作面顶板控制设计	(226)
第十一章	采煤工作面顶板事故的防治	(232)
第一节	顶板事故的统计分析	(232)
第二节	局部冒顶事故的防治	(238)
第三节	大型冒顶事故的防治	(241)
第四节	特殊条件下采煤工作面的顶板控制	(248)
第五节	采煤工作面顶板事故的处理	(259)
第十二章	煤矿冲击地压	(264)
第一节	概 述	(264)
第二节	冲击地压的特征与分类	(266)
第三节	冲击地压发生的条件及原因	(267)
第四节	冲击地压的预测及预防	(269)
附录	(274)

第一章 岩石及岩体的基本性质

第一节 概 述

岩石是组成地壳的基本物质，它由各种造岩矿物或岩屑在地质作用下按一定规律（通过结晶或借助于胶结物粘结）组合而成。

自然状态下的岩石，按其固体矿物颗粒之间的结合特征，可分为固结性岩石、粘结性岩石、散粒状岩石、流动性岩石等。固结性岩石是指造岩矿物的固体颗粒间成刚性联系，破碎后仍可保持一定形状的岩石。在煤矿中遇到的大多是固结性岩石。常见的有砂岩、石灰岩、砂质页岩、泥质页岩、粉砂岩等。

按岩石的力学性质不同，常把矿山岩石分为坚硬岩石和松软岩石两类。工程中常把饱水状态下单向抗压强度大于 10 MPa 的岩石叫做坚硬岩石，而把低于该值的岩石称为松软岩石。松软岩石具有结构疏松、密度小、孔隙率大、强度低、遇水易膨胀等特点。从矿压控制角度看，这类岩石往往会给采掘工作造成很大影响。

岩石的强度与岩石的结构和构造有关。

岩石的结构指决定岩石组织的各种特征的总合。如岩石中矿物颗粒的结晶程度、颗粒大小、颗粒形状、颗粒间的联结特征、孔隙情况，以及胶结物的胶结类型等。岩石中矿物颗粒大小差别很大，在沉积岩中，有的颗粒小到肉眼难以分辨（如石灰岩、泥岩、粉砂岩中的细微颗粒），有的颗粒可大至几厘米（如砾岩中的粗大砾石）。组成岩石的物质颗粒大小，决定着岩石的非均质性。颗粒愈均匀，岩石的力学性质也愈均匀。一般来说，组成岩石的物质颗粒愈小，则该岩石的强度愈大。

岩石的构造是指岩石中矿物颗粒集合体之间、与其他组成部分之间的排列方式和充填方式。主要有以下几种构造：

- (1) 整体构造——岩石的颗粒互相紧密地紧贴在一起，没有固定的排列方向；
- (2) 多孔状构造——岩石颗粒间彼此相连并不严密，颗粒间有许多小空隙；
- (3) 层状构造——岩石颗粒间互相交替，表现出层次叠置现象（层理）。

岩石的构造特征对其力学性质有明显影响，如层理的存在常使岩石具有明显的各向异性。在垂直于层理面的方向上，岩石承受拉力的性能很差；沿层理面的方向上，岩石承受抗剪能力很弱。受压时，随加载方向与层理面的交角不同，强度有较大差别。

第二节 岩石的物理性质

一、岩石的相对密度

岩石的相对密度就是岩石固体部分实体积（不包括空隙）的质量与同体积水质量的比

值。其计算公式为

$$\Delta = \frac{G_d}{V_c \gamma_w} \quad (1-1)$$

式中 Δ ——岩石的相对密度；

G_d ——绝对干燥时岩石固体实体体积的质量，g；

V_c ——岩石固体部分实体体积， cm^3 ；

γ_w ——水的质量密度， g/cm^3 。

岩石相对密度的大小取决于组成岩石的矿物的质量密度，而与岩石的空隙和吸水多少无关。岩石的相对密度可用于计算岩石空隙度和空隙比。煤矿中常见岩石的相对密度见表 1—1。

二、岩石的质量密度

岩石的质量密度是指单位体积（包括空隙）岩石的质量。根据含水状态不同，岩石的质量密度分为天然密度、干密度、饱和密度。天然密度是岩石在天然含水状态下的质量密度；干密度是岩石在 $105^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ 烘箱内烘至恒质量时的质量密度；饱和密度是岩石在吸水饱和状态下的质量密度。干密度、饱和密度和天然密度的表达式如下：

$$\begin{aligned} \gamma_d &= \frac{G_d}{V} \\ \gamma_{\text{sat}} &= \frac{G_{\text{sat}}}{V} \\ \gamma &= \frac{G}{V} \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 G_d 、 G_{sat} 、 G ——分别是干燥岩石、水饱和岩石和天然含水岩石的质量，g；

γ_d 、 γ_{sat} 、 γ ——岩石的干密度、饱和密度和天然密度， g/cm^3 ；

V ——岩石的体积， cm^3 。

通常，不说明含水状态时，即指岩石的干密度。煤矿常见岩石的质量密度见表 1—1。

岩石的质量密度不仅与组成岩石的矿物成分有关，而且与岩石的空隙度和其中的含水量有关，当岩石中能进入水的空隙不多时，岩石的三种密度之间差值很小。实验室一般只提供干密度。对于遇水易膨胀的某些松软岩石，区分干密度和湿密度有重要意义。

表 1—1 煤矿常见岩石的相对密度、质量密度、空隙度、空隙比

岩石种类	相对密度	质量密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	空隙度 (n) /%	空隙比 (e)
砂 岩	2.67~2.75	2~2.6	3~30	0.031~0.429
页 岩	2.57~2.77	2~2.4	10~35	0.111~0.538
石灰岩	2.48~2.85	2.2~2.6	5~20	0.053~0.25
煤		1.2~1.4		

三、岩石的空隙性

岩石的空隙性是指岩石中孔隙和裂隙的发育程度，常用空隙度表示。所谓空隙度是指岩石中各种空隙、裂隙的体积的总和与岩石总体积之比，按下式计算：

$$n = \left(1 - \frac{\gamma_d}{\Delta} \right) \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 n ——岩石的空隙度，也称空隙率，%；

γ_d ——岩石的干密度， g/cm^3 ；

Δ ——岩石的相对密度。

岩石的空隙性也可用空隙比表示。空隙比是指岩石中各种孔隙和裂隙体积总和与岩石内固体部分实体积之比，表达式如下：

$$e = \frac{V_0}{V_c} \quad (1-4)$$

式中 e ——岩石的空隙比；

V_0 ——岩石内各种空隙和裂隙体积的总和， cm^3 ；

V_c ——岩石内固体部分实体积， cm^3 。

空隙比与空隙度之间有如下关系：

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-5)$$

岩石的空隙性对岩石的其他性质有显著影响。一般来说，空隙度增大可使岩石密度和强度降低，使塑性变形和透水性增加。煤矿中常见岩石的空隙度和空隙比见表 1-1。

四、岩石的碎胀性和压实性

岩石破碎以后的体积将比整体状态增大，这种性质称为岩石的碎胀性。岩石的碎胀性可用岩石破碎后处于松散状态下的体积与破碎前处于整体状态下的体积之比来表示，该值称为碎胀系数，其表达式如下：

$$k_p = \frac{V'}{V} \quad (1-6)$$

式中 k_p ——岩石的碎胀系数；

V' ——岩石破碎膨胀后的体积， cm^3 ；

V ——岩石处于整体状态下的体积， cm^3 。

岩石的碎胀系数对矿山压力控制，特别是对采煤工作面的顶板管理有重要意义。碎胀系数与岩石的物理性质、破碎后块度的大小及其排列状态等因素有关。例如，坚硬岩石成大块破坏且排列整齐时，碎胀系数较小；岩石破碎后块度较小且排列较杂乱，则碎胀系数较大。岩石破碎后，在其自重和外加载荷的作用下会逐渐压实，体积随之减小，碎胀系数比初始破碎时相应变小。这种压实后的体积与破碎前原始体积之比，称为残余碎胀系数，以 k'_p 表示，煤矿中常见岩石的碎胀系数及残余碎胀系数值见表 1-2。

表 1-2 煤矿常见岩石的碎胀系数

岩石名称	碎胀系数 k_p	残余碎胀系数 k'_p
砂	1.06~1.15	1.01~1.03
粘土	<1.20	1.03~1.07
碎煤	<1.20	1.05
粘土页岩	1.40	1.10
砂质页岩	1.60~1.80	1.10~1.15
硬砂岩	1.50~1.80	—

五、岩石的水理性质

1. 岩石的吸水性

岩石的吸水性是指遇水不崩解的岩石，在一定试验条件下（规定的试样尺寸和试验压力）吸入水分的能力。通常以岩石的自然吸水率和强制吸水率表示。岩石的自然吸水率是指试件在大气压力作用下吸入水分的质量与试件的烘干质量之比。岩石的强制吸水率（也称饱和吸水率）是指试件在加压（150个大气压）条件下吸入水分的质量与烘干质量之比。如不专门说明，岩石的吸水率指自然吸水率。两种吸水率表达式如下：

$$\omega = \frac{G_w}{G_d} \times 100\%$$

$$\omega_{\text{sat}} = \frac{G_{w,s}}{G_d} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 ω 、 ω_{sat} ——岩石的自然吸水率和强制吸水率；

G_w ——岩石试件在大气压力下吸入水分后的质量，g；

G_d ——岩石试件烘干后质量，g；

$G_{w,s}$ ——岩石试件强制饱和吸水后质量，g。

2. 岩石的透水性

在地下水水力坡度（压力差）作用下，岩石能被水透过的性能称为岩石的透水性。用渗透系数来表征岩石透水性能的大小。渗透系数的大小取决于岩石孔隙的大小、数量和相互贯通情况。根据达西定律：

$$Q = KAI \quad (1-8)$$

式中 Q ——单位时间透水量；

K ——渗透系数；

A ——渗透面积；

I ——水力坡度（压力差）。

3. 岩石的软化性

岩石浸水后的强度明显降低，可用软化系数表示水分对岩石强度的影响程度。软化系数是饱和吸水岩石试件的单向抗压强度与干燥岩石试件单向抗压强度的比值，其关系式如下：

$$\eta_c = \frac{R_{cw}}{R_c} \leq 1 \quad (1-9)$$

式中 η_c ——岩石的软化系数；

R_{cw} ——饱和吸水岩石试件的单向抗压强度，MPa；

R_c ——干燥岩石试件的单向抗压强度，MPa。

岩石浸水后的软化程度，与岩石中亲水矿物和易溶性矿物的含量、空隙的发育程度、水的化学成分以及岩石浸水时间的长短等因素有关。亲水矿物和易溶矿物含量越多、张性裂隙越发育，则岩石浸水后强度降低程度越大。此外，岩石浸水时间越长，其强度降低程度也越大。如某些砂岩浸水3天后，单向抗压强度降低32%~35%；浸水9天后，单向抗压强度降低51%~59%。

研究岩石的软化性，对用高压注水法控制坚硬难冒落顶板有重要意义。表1—3为煤

矿中几种常见岩石的软化系数，表中各种岩石的软化系数都小于 1，说明岩石普遍具有软化性。

表 1—3 煤矿常见岩石的软化系数

岩石名称	干试件抗压强度 $\sqrt{\text{kN}\cdot\text{cm}^{-2}}$	饱和吸水试件抗压强度 $\sqrt{\text{kN}\cdot\text{cm}^{-2}}$	软化系数 η_c
粘土岩	2.07~5.90	0.24~3.18	0.08~0.87
页岩	5.70~13.60	1.37~7.51	0.24~0.55
砂岩	1.75~25.08	0.57~24.55	0.44~0.97
石灰岩	1.34~20.67	0.78~18.92	0.58~0.94

第三节 岩石的变形性质

变形是岩石的主要力学性质。岩石受载时将首先发生变形，当载荷超过一定数值（极限强度）时导致破坏。变形和破坏是载荷作用下岩石的力学性质发展变化的两个阶段。

一、岩石的弹性和塑性

岩石受力后既可出现弹性变形，也可出现塑性变形。与一般固体材料不同，岩石的弹性变形和塑性变形往往同时出现。例如，岩石在弹性变形阶段就已伴随有或多或少的塑性变形，甚至在刚开始出现弹性变形的时刻，便出现了塑性变形。因此岩石是兼有弹性和塑性的材料。

二、在单向压缩下岩石的变形特性

1. 脆性岩石的变形性质

图 1—1 (a) 为脆性岩石的应力—应变曲线。其特点是岩石在破坏前没有明显的塑性变形，总应变也较小。通常把在外力作用下破坏前总应变小于 3% 的岩石，叫做脆性岩石。

可将图 1—1 (a) 所示曲线分为三段：OA 段表示岩石受载初期，由于岩石中的各种空隙受压闭合，曲线出现上弯，OA 段称为岩石的压密阶段；AB 段接近于直线，可近似地称为线弹性阶段，这时可认为岩石处于弹性状态；在 BC 段内，自 B 点开始岩石内部已有微破裂不断发生，到 C 点发生破坏，故 BC 段可称为破裂发展阶段。C 点即为岩石的强度极限。

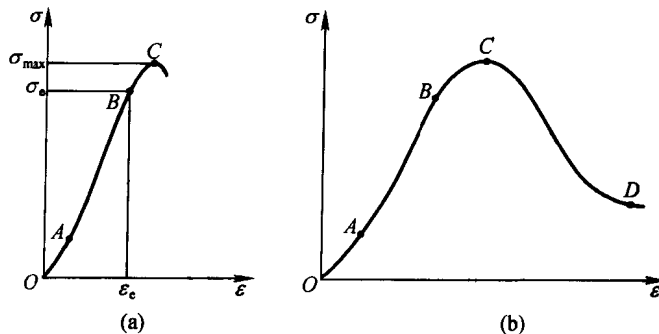


图 1—1 脆性岩石的应力应变曲线

图 1—1 (a) 是利用具有普通刚度的试验机所得的结果，岩石破碎时发出巨大的声响，岩石碎块强烈弹出，这就是一般所说的脆性破坏。如果采用刚度很大的材料试验机

(常称为刚性试验机) 加压, 就可以使原先呈炸裂性破坏的岩石试件平静地产生破坏, 从而可使试验继续进行下去, 并得出岩石的应力—应变全程曲线, 见图 1—1 (b)。它说明岩石应力达到最大值以后, 并不立即完全丧失承载能力, 而是要达到 D 点才完全破坏。 D 点称为完全破坏点, 而该点所保持的某一较小的应力值称为残余强度。岩石具有残余强度的特性, 对地下开采过程中合理地利用已经受到破坏的围岩 (或煤体) 的自承能力有重要意义。

2. 塑性岩石的变形性质

图 1—2 为塑性岩石的应力应变曲线, 它的特点是岩石在破坏之前的应变量较大。通常把外力作用下破坏前总应变大于 5% 的岩石叫做塑性岩石。

由图 1—2 可知, 塑性岩石应力曲线的斜率开始较陡, 以后逐渐平缓。工程上把开始变缓的转折点称为屈服点, 该点的应力值称为屈服极限 σ_T 。有时为了方便起见, 也将 OEF 曲线简化为 OEG 折线。认为岩石在达到屈服极限以前处于近似弹性状态, 而 σ_T 表示塑性流动开始。塑性岩石产生的塑性变形要比弹性变形大得多。

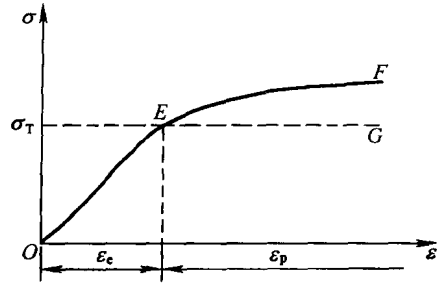


图 1—2 塑性岩石的应力应变曲线

三、岩石在三向压缩条件下的变形特性

图 1—3 (a)、(b) 为干砂岩和湿砂岩在常温和不同侧压 (或称围压) 三向压缩条件下的变形曲线。图中的纵坐标表示最大的主应力 σ_1 (一般为垂直应力) 与最小应力 σ_3 (一般为侧向应力) 之差, 横坐标表示轴向应变。试验时侧向应力 $\sigma_2 = \sigma_3$ 。由图可知:

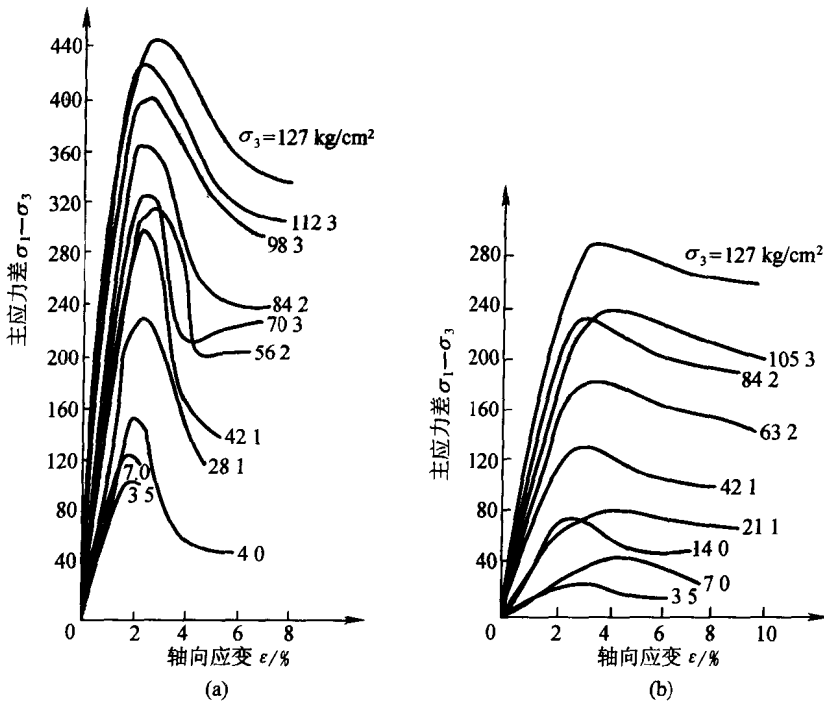


图 1—3 砂岩在常温和不同侧压三向压缩下的应变曲线

(a) 干砂岩; (b) 湿砂岩

(1) 当岩石受三向压缩时, 其应力应变曲线的开始阶段, 有一段近似于直线, 说明在主应力差值 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 峰值前的范围内, 岩石属弹性变形。

(2) 岩石的脆性和塑性是相对的, 即便在单向应力或较低的三向应力状态下表现为脆性的岩石, 在高压三向应力状态下破坏前也能表现出很大的塑性。

(3) 三向压缩时, 随着侧向应力 σ_3 和主应力差值 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 的增加, 强度极限 (峰值) 也随之增大。

(4) 岩石在三向压缩条件下破坏以后, 虽然其结构发生了变化, 但仍然保留一定的承载能力。这对于控制煤柱和岩体的稳定性很有实际意义。

四、岩石的蠕变性

在恒定载荷持续作用下, 应变随时间增长而变化的现象称为蠕变, 表示这一特征的曲线叫做蠕变曲线。图 1—4 是岩石的典型蠕变曲线, 在开始加载时, 试件立即产生一个瞬时应变 (图中 OA 段), 由于这一段作用的时间极短, 故可近似地认为是弹性变形; 在 AB 段, 应变不断增加, 但应变速率不断降低, 故曲线呈下弯型, 这个阶段的蠕变称为第一阶段蠕变或短暂蠕变; 在 BC 段, 应变以恒速增长, 这个阶段的蠕变称为第二阶段蠕变或定常蠕变, 且这个阶段延续时间最长; 在 CD 段, 应变以加速增长, 曲线呈上弯型, 这个阶段的蠕变称第三阶段蠕变或加速蠕变。当应变达到某数值 D 时, 最终引起试件破坏。

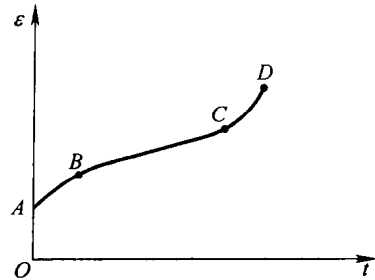


图 1—4 岩石的典型蠕变曲线

第四节 岩石的强度特性

在载荷的作用下, 岩石变形达到一定程度就会破坏。岩石发生破坏时所能承受的最大载荷称为极限载荷, 用单位面积承受极限载荷表示则称为极限强度。在不同应力条件下, 岩石具有不同的极限强度。岩石的强度可分为单向抗压强度、单向抗拉强度、抗剪强度、抗弯强度、三向抗压强度等。

一、岩石的单向抗压强度

岩石试件在单向压缩时, 单位面积所能承受的最大应力值称为岩石的单向抗压强度。单向抗压强度是采矿等地下工程中使用最广的岩石力学参数, 例如研究岩石分类、确定破坏准则以及表达围岩坚硬程度等, 常采用这一指标。

测定岩石的单向抗压强度通常采用直径 5 cm、高径比为 2 的圆柱形试件, 在压力机上以 50 N/s~100 N/s 的速度加载, 直到试件破坏, 然后按下式计算:

$$R_c = \frac{p}{A} \quad (1-10)$$

式中 R_c ——岩石试件的单向抗压强度, kPa;

p ——岩石试件破坏时施加的载荷, kN;

A ——试件初始截面积, m^2 。

煤矿常见岩石的单向抗压强度见表 1—4。

表 1—4 煤矿常见岩石强度值

岩石种类		抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	抗剪强度 /MPa
砂岩类	细砂岩	106.0~146.0	5.6~18.0	17.8~54.5
	中砂岩	87.50~136.0	6.1~14.3	13.6~37.2
	粗砂岩	58.0~126.0	5.5~11.9	12.6~31.0
	粉砂岩	37.0~56.0	1.4~2.5	7.0~11.7
砾岩类	砂砾岩	71.0~124.0	2.9~9.9	7.2~29.4
	砾岩	82.0~96.0	4.1~12.0	6.7~26.9
页岩类	砂质页岩	40.0~92.0	4.0~12.1	2.1~30.5
	页岩	19.0~40.0	2.8~5.5	1.6~23.8
灰岩类	石灰岩	54.0~161.0	7.9~14.1	10.0~31.0
煤		5.0~50.0	2.0~5.0	1.1~16.5

二、岩石的单向抗拉强度

岩石试件在单向拉伸时能承受的最大拉应力值，称为单向抗拉强度。它是岩石力学性质中的重要指标。由于岩石的抗拉强度远小于抗压强度，在受载不大时就可能出现拉伸破坏，因此，它对研究井下巷洞失稳等问题有重要意义。目前，测定岩石抗拉强度的基本方法可分两类，即直接拉伸法和间接拉伸法。直接拉伸法与金属材料拉伸试验类似，岩石的抗拉强度可按下式求得：

$$R_t = \frac{p_t}{A} \quad (1-11)$$

式中 R_t ——岩石试件的单向抗拉强度，kPa；

p_t ——试件破坏时的总拉力，kN；

A ——试件破坏断面积， m^2 。

由于直接拉伸法的岩石试件加工复杂，目前广泛采用劈裂法间接地测定岩石的单向抗拉强度。这种方法采用直径为 5 cm、厚 2.5 cm 的圆盘形试件，在材料试验机上以 3 N/s~5 N/s 的速度加载，直至试件被压裂，如图 1—5 所示。此时，试件的抗拉强度可按下式计算：

$$R_p = \frac{2p}{\pi Dt} \quad (1-12)$$

式中 R_p ——圆盘形试件的抗拉强度，kPa；

p ——试件裂开破坏时的竖向总压力，kN；

D 、 t ——圆盘形试件的直径和厚度，m。

三、岩石的抗剪强度

岩石的抗剪强度是指岩石抵抗剪切作用的能力。目前广泛采用倾斜压模法测定岩石抗剪强度，如图 1—6 所示。将规格为 5 cm×5 cm×5 cm 的立方体试件放在两个钢制的倾斜压模之间，以 50 N/s~100

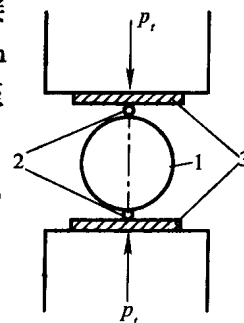


图 1—5 劈裂法试验装置示意图

1—试件；2—钢丝垫条；
3—承压板

N/s 的速度加载, 迫使试件沿预定的剪切面 AB 剪断。这时作用在破坏面上的应力强度为

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{T}{A} = \frac{p}{A} \sin\alpha \\ \sigma_n &= \frac{N}{A} = \frac{p}{A} \cos\alpha\end{aligned}\quad (1-13)$$

式中 T 、 N ——作用在剪切破坏面上的剪应力和正应力, kN ;

τ ——剪应力强度, kPa ;

σ_n ——剪切破坏面上的正应力强度, kPa ;

p ——试件发生剪切破坏时压力机施加的总压力, kN ;

A ——试件剪切破坏面的面积, m^2 ;

α ——试件与水平面的夹角, $(^\circ)$ 。

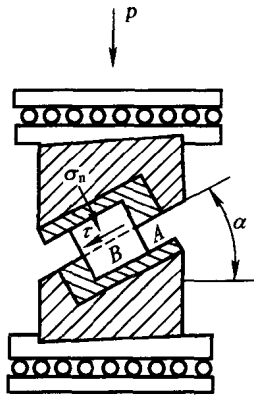


图 1-6 倾斜压模
剪切装置

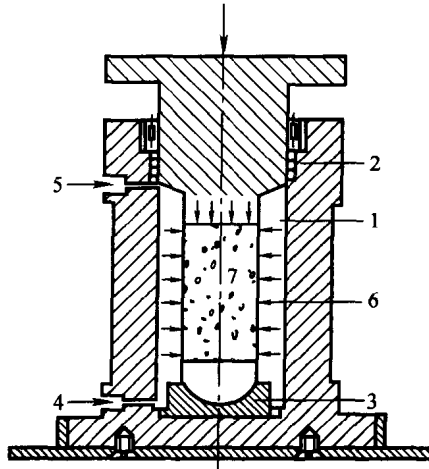


图 1-7 三轴试验装置
1—压力室; 2—密封设备;
3—球面底座; 4—压力液进口;
5—排气口; 6—侧向压力; 7—试件

四、岩石的三向抗压强度

岩石在三向应力作用下所能抵抗的最大轴向应力, 称为岩石的三向抗压强度。通常是在轴对称应力组合方式 (即 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) 的三向应力条件下, 利用岩石三轴应力试验机测定。如图 1-7 所示, 测定时将试件放在密闭的高压容器内, 用油泵向压力室内送入高压油, 对试件施加侧向压力 ($\sigma_2 = \sigma_3$), 达到预定值后封闭压力室, 然后以 $50 N/s \sim 100 N/s$ 的稳定速度, 连续均匀地通过压力机活塞施加轴向载荷, 直至试件破坏。

试件在相应侧压力下的三向抗压强度可按下式计算:

$$R_{3c} = \frac{p}{A} \quad (1-14)$$

式中 R_{3c} ——在一定侧向压力作用下的岩石三向抗压强度, kPa ;

p ——试件破坏时的轴向载荷, kN ;

A ——试件的初始横断面积, m^2 。

岩石因受力状态不同,其极限强度相差很大。岩石在不同应力状态下的各种极限强度一般符合下列顺序:

三向等压抗压强度 > 三向不等压抗压强度 > 双向抗压强度 > 单向抗压强度 > 抗剪强度 > 抗弯强度 > 单向抗拉强度。

此外,单向抗压强度 R_c 、单向抗拉强度 R_t 和抗剪强度 τ 之间具有以下数量关系:

$$\frac{R_t}{R_c} = \frac{1}{5} \sim \frac{1}{38}$$

$$\frac{\tau}{R_c} = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{15}$$

$$\tau \approx \sqrt{\frac{R_t R_c}{3}}$$

第五节 岩石的破坏类型

岩石在外力作用下首先产生不同形式的变形,继而产生微细裂缝和破裂,如果破裂不断发展,将导致岩石最终破坏。

有些岩石在破坏前出现很大的变形,而另一些岩石破坏前出现的变形很小或可忽略不计。通常把岩石在载荷作用下没有显著的变形而突然发生的破坏称为脆性破坏,把岩石在载荷作用下出现较大的变形以后才发生的破坏称为塑性破坏。但是在脆性破坏和塑性破坏之间并无明确的界限,岩石呈现脆性破坏还是塑性破坏,不仅取决于岩石本身的性质,还在很大程度上取决于外界条件,如岩石所处的应力状态、温度、压力、水分、受载时间等等。例如,在常温、低围压和高应变率条件下呈现为脆性破坏的岩石,在高温、高围压、多水分和低应变率的条件下可呈现为塑性破坏。

不论在何种受力状态下,岩石发生破坏的基本形式只有两种:拉断破坏和剪切破坏。例如,岩石在受单向压缩时,根据其上下端面的润滑情况,可能出现拉断破坏或剪切破坏。岩石试件在受弯曲时,往往是由于下部表面受到拉应力的作用而导致拉断破坏。至于塑性破坏(例如粘土类岩石),它实质上是塑性岩石颗粒间产生微小剪切滑移的结果,仍属于剪切破坏。因此,尽管由于岩石性质、构造特征、受力方式以及试件形状和尺寸不同,试件的破坏形态有很大差别,但从岩石的破坏方式和机理来看,都可归结为拉断破坏和剪切破坏这两种基本类型。

一、拉断破坏

拉断破坏可以直接由拉力引起的拉应力造成,也可以由压缩、弯曲等衍生的拉应力造成,但不论加载方式如何,都是由于拉应力超过极限强度而造成的破坏,其特点是岩石破坏时呈现出沿破坏面发生拉开的运动。拉断破坏又称张性破坏,据加载方式可分为直接拉断和间接拉断两种情况。

1. 直接拉断

直接拉断破坏情况见图 1—8 (a),特点是断裂面与受力方向垂直,断裂面明显分离,且断裂面间没有错动。

2. 间接拉断

间接拉断破坏情况见图 1—8 (b)、(c),特点是断裂面与受力方向平行。当在受压面

上涂润滑剂时，由于加压板与试件受压面之间无摩擦阻力或摩擦阻力很小，在纵向压缩过程中，引起试件自由地产生横向变形。当横向变形伸长量超过试件抵抗伸长的能力时，就会导致试件产生纵向劈裂而被拉断。这种因压缩而引起的拉断破坏形式又叫“压裂”或“横向张裂”。

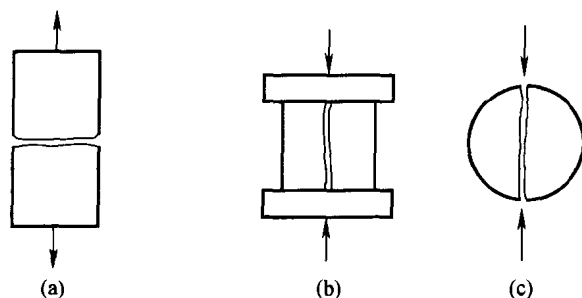


图 1—8 拉断破坏的两种情况
(a) 直接拉断；(b)、(c) 间接拉断

尽管以上两种拉断破坏的受力方式不同，但两者共同之处都是由拉应力引起破坏，而且都出现张开的裂缝。

二、剪切破坏

剪切破坏可以直接由剪切应力破坏或者由压缩衍生的剪应力造成。但无论加载方向如何，都是由于剪应力超过极限强度而造成的破坏。其特点是岩石破坏时呈现出沿破坏面发生相互错动的运动。剪切破坏又称剪破裂或剪裂，据加载方式剪切破坏有两种情况。

1. 直接剪切

通常由外加的剪力造成，其特点是剪切破坏面与外加剪力方向一致，见图 1—9 (a)。

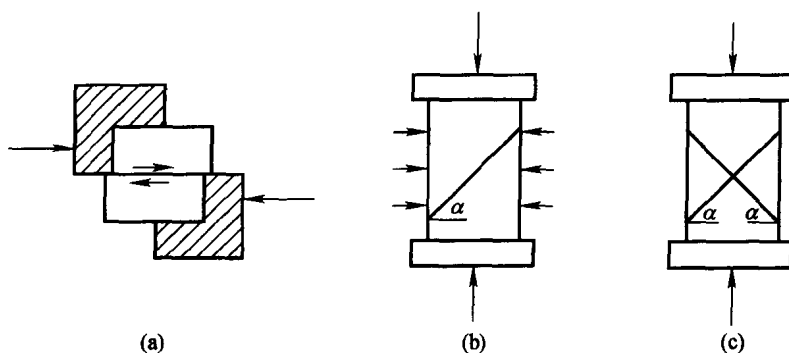


图 1—9 剪切破坏的两种情况
(a) 直接剪切；(b)、(c) 间接剪切

2. 间接剪切

由轴向压缩或其他受力方式引起的剪切破坏。当受压面上不涂润滑剂时，加压板与试件受压面之间有很大的摩擦阻力，试件不易产生横向变形。于是试件内部产生剪应力，最

后沿与最大压应力垂直方向成一定角度 α 的某个平面发生剪切破坏, 见图 1—9 (b)、(c)。 α 称为剪切破坏角。剪切破坏角与岩石强度有关。通常, 坚硬岩石的剪切破坏角较大, 软岩则较小, 常见岩石剪切破坏角见表 1—5。

表 1—5 常见岩石的剪切破坏角

岩石种类	剪切破坏角 α
花岗岩	79°
砂岩	74°
石灰岩	58°
页岩	50°

尽管直接剪切和间接剪切破坏的受力方式不同, 但两者共同之处是其破坏形式表现为试件的一部分相对于另一部分产生滑移, 即形成剪切裂缝。但这种裂缝通常都不张开, 而是呈闭合的形式, 常称之为剪裂面。

通常, 试件内部的剪应力具有对称性, 试件受剪切破坏时常出现成对的倾斜裂缝, 称为“X形剪裂隙”, 见图 1—9 (c)。

第六节 岩体的基本性质

前面讨论的岩石力学性质, 都是基于对小块岩石试件(岩块)进行的实验和研究得出的, 与大范围天然岩体的力学性质有很大差别。为了有效地解决与工程有关的岩石力学实际问题, 需要了解岩体的特征及其有关的力学性质。

概括来说, 岩体在以下三个方面与实验室岩石试件有显著不同:

(1) 岩体以天然状态埋藏在地下, 处于特定的自然物理环境(地下水、地温、地应力等)之中, 这些因素无疑将对岩体的物理力学性质有很大影响。

(2) 岩体由一定数量的岩石组成, 没有特定的自然边界。岩体的范围根据解决问题的需要来圈定。

(3) 岩体中存在各种地质弱面和地质构造。岩体在自然状态下经历了漫长的地质作用过程。在地应力作用下, 岩体内部保留了各种永久变形和地质构造形迹。例如, 不整合、褶皱、断层、层理、节理、裂隙等等。

根据上述特征, 岩体可定义为自然界中各种岩性、各种结构特征的岩石的集合体。从大多数工程实际遇到的情况来看, 岩体是存在有各种弱面的坚硬天然岩石。因此, 从抽象的、典型化的角度来说, 可以把岩体看作是由结构面和受它包围的结构体共同组成的。

所谓“结构面”, 是指在地质发展历史中, 尤其是地质构造运动过程中形成的、具有一定方向、延展较大、厚度较小的地质界面, 它包括岩石物质的分界面和不连续面。例如, 岩体中存在的层面、节理、断层、软弱夹层等, 可统称为结构面。结构面是岩体的重要组成单元, 它的性质影响到岩体的性质。

所谓“结构体”是指由不同产状的结构面相互切割而形成的单元块体, 也称单元岩块。结构体的四周都被结构面包围, 常见的结构体大都是有棱有角的多面体, 如立方体、柱状体、板状体、菱形体、梯形体、楔形体、锥形体等。结构体也是岩体的重要组成部分, 它本身的物质组成和排列组合方式也影响到岩体的力学性质。