

Kuangshan Yali Cekong Jishu

矿山压力

测控技术

第二版

耿献文 马全礼 主编

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

矿山压力测控技术

(第二版)

主 编 耿献文 马全礼
副主编 刘锋珍 夏均民

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、实测技术、控制方法等内容。本书共分十章,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、采煤工作面矿山压力观测、采煤工作面矿山压力控制、巷道矿山压力显现与观测、采区巷道矿山压力控制、煤矿顶板事故的防治、煤矿冲击地压及控制等。

本书是高等院校及高等院校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,也可供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,马全礼主编. —2版. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1984 - 8

I. ①矿… II. ①耿… ②马… III. ①矿压观测②矿山压力—控制 IV. ①TD3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 187173 号

书 名 矿山压力测控技术
主 编 耿献文 马全礼
责任编辑 郭 玉
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 18.25 字数 456 千字
版次印次 2013 年 8 月第 2 版 2013 年 8 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

矿山压力的测试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。

矿山压力的测试与控制包括的内容很多,已成为一门完整的技术科学。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,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,适应采矿技术的发展。

本书是在《矿山压力测控技术》(耿献文主编,2002年第一版)的基础上修订而成的。本次修订作者广泛征集了读者对第一版的意见和建议,对第一版存在的错误和不足之处进行了完善,并结合近年来矿山压力的科学研究和生产技术的进步,对部分内容作了必要的调整和增删。

参加本次修订的人员及分工为:耿献文(第一章、第二章、第三章),马全礼(第九章、第十章),刘锋珍(第七章、第八章),夏均民(第四章、第五章、第六章)。全书由耿献文负责统稿和定稿。李宗超、曲帅帅负责文字及插图处理。

本书在编写过程中,得到了兄弟院校和现场工程技术人员的大力支持和帮助,同时作者也参阅了许多专家、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

2013年1月

目 录	
第一章 岩石及岩体的基本性质	1
第一节 岩石的物理性质	1
第二节 岩石的强度和变形特性	5
第三节 岩石的破坏机理和强度理论	12
第四节 岩体的基本性质	18
第五节 岩体的基本力学性质与分级	21
复习思考题	28
第二章 矿山压力及矿山压力显现	29
第一节 矿山压力及其在围岩中的分布	29
第二节 矿山压力显现	36
复习思考题	39
第三章 采煤工作面上覆岩层移动规律	40
第一节 概述	40
第二节 直接顶的移动规律	46
第三节 老顶的移动规律	50
第四节 直接顶和老顶的相互转化	52
第五节 岩层控制的关键层理论	53
复习思考题	54
第四章 采煤工作面矿山压力显现规律	55
第一节 概述	55
第二节 老顶的初次来压	55
第三节 老顶的周期来压	56
第四节 采煤工作面周围的支承压力及其分布	58
第五节 影响采煤工作面矿山压力显现的主要因素	61
复习思考题	63
第五章 采煤工作面矿山压力观测	64
第一节 概述	64
第二节 采煤工作面矿压观测的常用仪器	65
第三节 单体支柱采煤工作面矿压观测	70

第四节	单体液压支柱采煤工作面支护质量与顶板动态监测	76
第五节	综采工作面矿压观测	82
第六节	采煤工作面顶板状况统计观测	94
第七节	采煤工作面采空区上覆岩层移动和破坏过程的观测与预报	101
第八节	采煤工作面矿山压力观测报告的编写	114
第九节	采煤工作面底板比压的测定	122
	复习思考题	127
第六章	采煤工作面矿山压力控制	128
第一节	概述	128
第二节	单体支柱工作面顶板控制	136
第三节	综采工作面顶板控制设计	157
第四节	厚煤层综放开采顶板控制技术	165
	复习思考题	170
第七章	巷道矿山压力显现与观测	171
第一节	巷道矿山压力显现规律	171
第二节	巷道矿压观测仪器	179
第三节	巷道围岩应力观测	186
第四节	巷道支架载荷观测	194
第五节	锚杆支护质量的监测	197
	复习思考题	200
第八章	采区巷道矿山压力控制	201
第一节	采区巷道支护原理	201
第二节	巷道支架支护设计	207
第三节	锚杆、锚索支护设计	213
第四节	无煤柱护巷技术	232
第五节	软岩巷道围岩支护技术	238
第六节	巷道围岩卸压技术	244
	复习思考题	248
第九章	煤矿顶板事故的防治	250
第一节	顶板事故的分类	250
第二节	局部冒顶事故的防治	251
第三节	大型冒顶事故的防治	255
第四节	采煤工作面顶板事故的处理	260
第五节	巷道顶板事故预防及处理	265
	复习思考题	271

第十章 煤矿冲击地压及控制.....	272
第一节 冲击地压的特征与分类.....	272
第二节 冲击地压发生的条件及原因.....	274
第三节 冲击地压的预测及预防.....	279
复习思考题.....	283
参考文献.....	284

第一章 岩石及岩体的基本性质

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黏结)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、黏结性岩石、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 的岩石称为坚硬岩石,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困难。

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和,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,有的颗粒小到用肉眼难以分辨(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,以及与其他组成部分之间的排列方式和充填方式。岩石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。

第一节 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 ——水的密度, g/cm^3 。

岩石相对密度的大小取决于组成岩石的矿物比重,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孔隙度和孔隙比。煤矿中常见岩石的相对密度见表 1-1。

表 1-1 煤矿中常见岩石的相对密度、密度、孔隙率以及孔隙比

岩石种类	砂岩	页岩	石灰岩	板岩	煤
相对密度 Δ	2.60~2.75	2.57~2.77	2.48~2.85	—	—
密度 $\rho'_d/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2~2.6	2~2.4	2.2~2.6	—	1.2~1.4
孔隙率 $n/\%$	3~30	10~35	5~20	0.1~1.0	—
孔隙比 e	0.031~0.429	0.111~0.538	0.053~0.25	0.001~0.010	—

二、岩石的密度

岩石的密度是指单位体积(包括孔隙)岩石的质量。根据含水状态不同,岩石的密度分为天然密度、干密度、饱和密度:天然密度是岩石在天然含水状态下的密度,干密度是岩石在 105~110 °C 烘箱内烘至恒重时的密度,饱和密度是岩石在吸水饱和状态下的密度。干密度、饱和密度和天然密度的表达式如下:

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

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

$\gamma_d, \gamma_{\text{sat}}, \gamma$ ——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,即是指岩石的干密度。煤矿常见的岩石密度见表 1-1。

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。

三、岩石的孔隙性

岩石的孔隙性是指岩石中孔隙和裂隙的发育程度,常用孔隙度表示(也称空隙率)。所谓孔隙度是指岩石中各种孔隙、裂隙的体积的总和与岩石总体积之比。按下式计算:

$$n = \frac{V_0}{V} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 n ——岩石的孔隙度；

V_0 ——岩石中孔隙和裂隙的总体积, cm^3 ;

V ——岩石的总体积。

岩石的孔隙性也可用孔隙比表示。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:

$$e = \frac{V_0}{V_c} \tag{1-4}$$

式中 e ——岩石的孔隙比;

V_0 ——岩石内各种孔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 。

孔隙比与孔隙度之间有如下关系:

$$e = \frac{n}{1-n} \tag{1-5}$$

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下增大,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。表达式如下:

$$k_p = \frac{V'}{V} \tag{1-6}$$

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,坚硬岩石破碎成大块且排列整齐时,碎胀系数较小;如破碎后块度较小且排列较杂乱,则碎胀系数较大。煤矿中常见岩石的碎胀系数见表 1-2。

表 1-2 煤矿中常见岩石的碎胀系数和残余碎胀系数

岩石种类	碎胀系数 k_p	残余碎胀系数 k'_p
砂	1.06~1.15	1.01~1.03
黏土	<1.2	1.03~1.07
碎煤	<1.2	1.05
黏土页岩	1.4	1.10
砂质页岩	1.6~1.8	1.1~1.15
硬砂岩	1.5~1.8	—

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见表 1-2。

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(规定的试件尺寸和试验压力)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。两种吸水率表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{G_w}{G_d} \times 100\% \\ \omega_{\text{sat}} &= \frac{G_{w \cdot s}}{G_d} \times 100\% \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中 $\omega, \omega_{\text{sat}}$ ——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;

$G_{w \cdot s}$ ——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。通常用渗透系数来表征岩石的透水性能。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, m^3/s ;

K ——渗透系数, m/s ;

A ——渗透面积, m^2 ;

I ——水力坡度。

3. 岩石的软化性

岩石浸水后的单向抗压强度明显降低,可用软化系数表示水分对岩石强度的影响程度。软化系数是水饱和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} ——吸水饱和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 天后降

低 51%~59%。

研究岩石的软化性对用高压注水法控制坚硬难垮落顶板有重要意义。表 1-3 所列是煤矿中几种常见岩石的软化系数,由该表可看出,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 煤矿中常见岩石的软化系数

岩石种类	干试件单向抗压强度/MPa	吸水饱和和试件单向抗压强度/MPa	软化系数 η_c
黏土岩	20.3~57.8	2.35~31.2	0.08~0.87
页岩	55.8~133.3	13.4~73.6	0.24~0.55
砂岩	17.1~245.8	5.6~240.6	0.44~0.97
石灰岩	13.1~202.6	7.6~185.4	0.58~0.94

第二节 岩石的强度和变形特性

一、岩石的变形

1. 岩石的变形性质

岩石的变形性质是岩石的主要力学性质,是岩石在力的作用下发生形状及体积的变化。岩石的变形可分为弹性变形、塑性变形和黏性变形三种。

岩石的弹性变形是指卸载后岩石变形能完全恢复到其原始状态的性质,随岩石性质的不同可分为三种不同的弹性特征(图 1-1)。

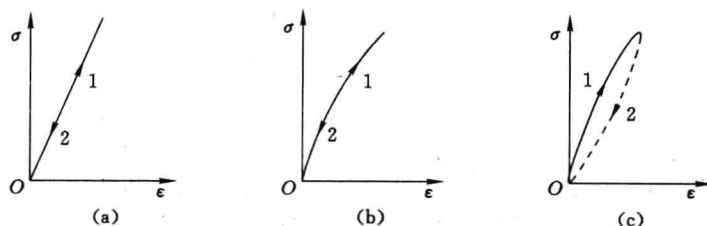


图 1-1 岩石的不同弹性类型

(a) 线弹性;(b) 完全弹性(非线性弹性);(c) 滞弹性

1,2——加载、卸载过程

(1) 线弹性——应力—应变呈直线关系,见图 1-1(a);

(2) 完全弹性(非线性弹性)——应力—应变不是直线关系,但卸载时应力应变沿原来的曲线返回原点,见图 1-1(b);

(3) 滞弹性——应力—应变为曲线关系,无残余变形,卸载时应力应变沿另一条曲线返回原点,见图 1-1(c)。

岩石的塑性变形是指岩石在外力作用下当超过其屈服极限应力时仍能发生变形,撤去外力后不能完全恢复其原始状态的性质,亦称残余变形。理想的岩石塑性变形应力—应变

关系曲线如图 1-2(a)所示。当应力低于屈服极限(屈服应力) σ_y 时,岩石的性质为弹性;有的岩石当应力达到其屈服应力后,应力不增加而变形不断增长,应力—应变曲线为水平线。此时岩石所能承受的最大载荷为其屈服应力。还有一类岩石,当应力超过其屈服应力后,应力和变形都不断增加,应力—应变曲线呈上升变化,此即应变硬化现象,如图 1-2(b)所示。也就是说,即使应力超过屈服应力,但随塑性变形的发展,岩石的承载力也会增长。

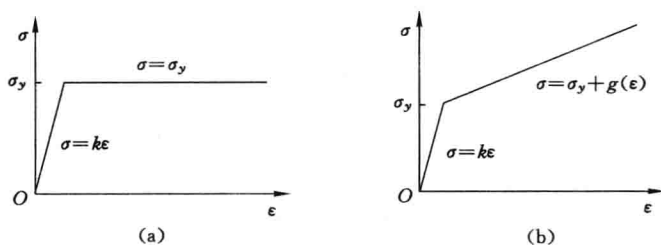


图 1-2 塑性变形应力—应变关系曲线

研究表明,岩石的变形特性与其类型、物理性质、加载方式、大小及作用时间等有关,且岩石的弹性和塑性变形往往同时出现。一般加载条件下,岩石只在较小的应力范围内应力—应变关系可看做服从虎克(Hook)定律,但多数并不遵从。图 1-3 为一般岩石的变形曲线,从图中可看出,在外力达到屈服应力时,开始卸载初期,应力—应变曲线比较陡,但当卸载接近结束时则较平缓,甚至当完全除去应力后,还有部分变形恢复,此即弹性后效现象。虽然弹性变形在岩石中传递速度很快,但弹性后效的发展却很缓慢。因此,岩石的弹性变形可分为瞬时弹性变形(卸载后变形立即恢复)和后效弹性变形(卸载后变形需要经过一定时间才恢复)。

岩石的黏性变形是指岩石在外力作用下变形不能在瞬间完成,且应变的速率随应力的变化而改变,当外力撤去后,不能恢复其原始状态的性质。理想的黏性岩石材料,其应力—应变速率曲线呈直线关系,并且通过原点。这种应变速率随应力而改变的变形称之为流变变形。

2. 岩石的变形指标

表征岩石的变形指标一般有泊松比、弹性模量和体积变形模量等。现以岩石试件单向压缩试验的结果来讨论岩石的这些变形指标,其他条件类似。

泊松比指岩石在单向压缩条件下横向应变和轴向应变的比值,也称横向变形系数,其表达式为:

$$\mu = -\frac{\epsilon_c}{\epsilon_a} \quad (1-10)$$

式中 μ ——岩石的泊松比;

ϵ_c, ϵ_a ——岩石试件的横向应变、轴向应变。

岩石受力后既出现弹性变形也出现塑性变形,故必须用岩石的弹性模量和变形模量来表示岩石的弹性变形和其总变形(包括弹性变形和残余变形)。

(1) 岩石在单向受压条件下,其轴向应力—应变曲线呈直线时(图 1-4),其弹性模量为:

$$E = \sigma / \epsilon \quad (1-11)$$

式中 E ——岩石的弹性模量, kPa;

σ ——轴向应力—应变曲线上任一点的轴向应力, kPa;
 ϵ ——对应于 σ 的轴向应变。

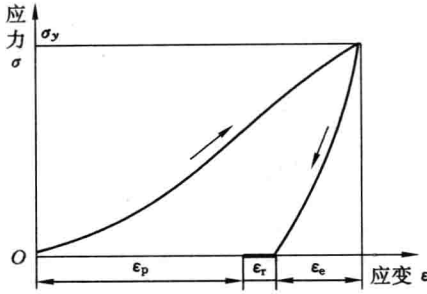


图 1-3 一般岩石的变形曲线

ϵ_e ——瞬时弹性变形; ϵ_r ——后效弹性变形; ϵ_p ——塑性变形

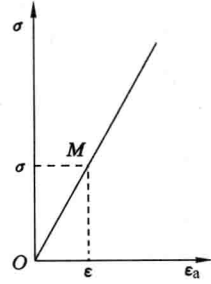


图 1-4 轴向的应力—应变

(2) 岩石在单轴受压条件下,既有弹性又有塑性变形时(如图 1-3 所示),用岩石的变形模量 E_ϵ 来表征其总变形:

$$E_\epsilon = \frac{\sigma}{\epsilon_e + \epsilon_r + \epsilon_p} \quad (1-12)$$

式中 σ ——应力;

$\epsilon_e, \epsilon_r, \epsilon_p$ ——分别为岩石的瞬时弹性、后效弹性、塑性应变。

通常用体积应变 ϵ_v (体积改变量 ΔV 与原体积 V 的比值),又称体积改变率,来表征体积的变化,即:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1-13)$$

当岩石为各向同性的弹性材料时,其体积变形特征还可由体积变形模量 (E_v) 来表示,其表达式为:

$$E_v = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (1-14)$$

煤矿中常见岩石的变形指标值见表 1-4。

表 1-4 煤矿中常见岩石的变形指标

岩石种类	弹性模量 E /GPa			泊松比 μ	
	压缩		拉伸		
	平行层理	垂直层理	平行层理	平行层理	垂直层理
花岗岩	58.8	58.8	21.6	0.05~0.25	0.05~0.25
石灰岩	26.3	28.4	25.5	0.16~0.27	0.19~0.39
砂岩	36.7	39	36.3	0.12	0.14~0.20
砂质页岩	35.6	23.7	12.7	0.25	0.16
泥质页岩	24.5	14.7	10.8	0.15~0.39	0.1~0.48
黏土	0.3	—	—	—	—
煤	9.8~19.6	—	—	0.1~0.5	0.1~0.5

二、岩石的单向强度及变形特性

1. 岩石的单向抗压强度及变形特征

岩石的单向抗压强度指岩石试件在单向受压条件下出现破坏时,试件单位面积所承受的极限强度。它在数值上等于试件破坏时的最大压应力。岩石的抗压强度一般在实验室压力机上按照实验规范试验,岩石试件抗压强度 R_c (kPa) 为试件破坏时的荷载 P (kN) 与其横断面面积 A (m^2) 之比。煤矿中常见岩石单向抗压强度见表 1-5。

表 1-5 我国煤矿常见岩石的强度

岩石种类		单向抗压强度 R_c /MPa	单向抗拉强度 R_t /MPa	抗剪强度 τ /MPa
砂岩类	细砂岩	103.9~143	5.5~17.6	17.4~53.4
	中砂岩	85.7~133.3	6.0~14	13.3~36.5
	粗砂岩	56.8~123.5	5.4~11.6	12.4~30.4
	粉砂岩	36.3~54.9	1.3~2.4	6.86~11.5
砾岩类	砂砾岩	6.9~121.5	2.8~9.7	7.0~28.8
	砾岩	80.4~94	4~11.76	6.6~26.4
页岩类	砂质页岩	39.2~90.2	3.9~11.8	20.6~29.9
	页岩	18.6~39.2	2.7~5.4	15.6~23.3
灰岩类	石灰岩	52.9~157.8	7.7~13.8	9.8~30.4
煤		4.9~49	2~4.9	1.08~16.2

岩石的单向抗压强度试验大都是在普通材料力学试验机上进行的,因这种试验机刚性较小,用其对岩石试件加压时,试验机的金属框架受拉,导致大量能量在试验机内积聚,一旦应力达到极限强度,产生一个较大量级的应变,这时普通试验机中贮存的能量就突然释放,从而对岩石试件产生强大的冲击使其崩溃。这并不能反映岩石在静载下的真实破坏现象,是由于试验机本身的缺陷造成的。只有在刚性试验机出现后,才得出岩石在单向压力作用下的真实过程,即应力—应变全程曲线(图 1-5)。

岩石单轴受压条件下的全程应力—应变曲线(图 1-5)可划为 5 个阶段。

(1) $O-A$ 段,该段曲线微向上弯曲,是岩石微裂隙被压实的结果。此段变形模量较小且不是一个常数。

(2) $A-B$ 段,该段曲线接近直线,属于弹性变形。对应于 B 点的应力值称为弹性极限。

(3) $B-C$ 段,弹塑性过渡阶段,岩石的应力—应变曲线从 B 点开始偏离直线,当应力达到 $0.6\sigma_{\max}$ 时,岩石开始有微破裂不断产生,岩石的体积由压缩转向膨胀。对应于曲线上 C 点的应力值称为屈服极限。

(4) $C-D$ 段,塑性阶段,当应力超过屈服应力后接近 $0.95\sigma_{\max}$ 时,岩石破裂速度加快,岩石的应力—应变曲线继续向右上方延伸,岩石的体积膨胀加速,变形也随应力增长而迅速增长,直到 D 点破坏。对应于 D 点的应力值称为岩石的强度极限($\sigma_{\max}$)或峰值强度。

(5) $D-E$ 阶段,卸载阶段, D 点以后为破坏阶段,又称后破坏阶段。这段峰后曲线说