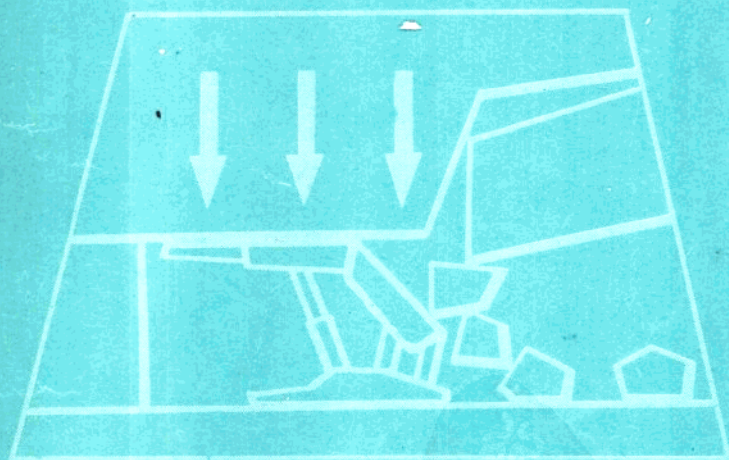


中等专业学校规划教材

# 矿压测控技术

主 编 谢明荣 林东才

副主编 王国福 耿献文 陈 峰



中国矿业大学出版社

TD326  
Y-329

中等专业学校规划教材

1991  
年

# 矿压测控技术

主 编 谢明荣 林东才  
副主编 耿献文 王国福 陈 峰

中国矿业大学出版社

876070

## 内 容 简 介

本书较系统、全面地叙述了矿山压力的基本理论、控制方法和实测技术等内容。全书共分12章,内容包括岩石及岩体的基本性质、巷道矿压、采煤工作面上覆岩层移动及其矿山压力显现规律、矿山压力观测仪器、采煤工作面“三量”观测、采煤工作面其它观测、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、采煤工作面矿压控制、采煤工作面顶板事故的防治、煤矿冲击地压。

本书是煤炭职业技术学校(中等专业学校、技工学校)采煤专业和综合机械化采煤专业的通用教材,也可供高等专科师生和煤矿工程技术人员学习参考。

中等专业学校规划教材

### 矿 压 测 控 技 术

主 编 谢明荣 林东才

副主编 耿献文 王国福 陈 峰

责任编辑 刘社育

---

中国矿业大学出版社出版发行

新华书店经销 中国矿业大学出版社印刷厂印刷

开本 787×1092mm 1/16 印张 15.25 字数 380千字

1997年6月第1版 1997年6月第1次印刷

印数:1-4500

---

ISBN 7-81040-665-5

---

TD·69

定价:16.50元

## 前 言

矿山压力的测试与控制是实现煤矿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。研究采煤工作面和巷道的矿压显现规律,是制定岩层控制措施、正确进行采区设计、合理选择支护形式、支架类型和加强顶板控制的重要一环。

近年来,各高等院校已将“矿山压力及其控制”内容从“采煤学”中分离出来,作为一门独立的课程,以便学生能更好地研究和掌握矿压理论与实践。目前,大部分中等专业学校也都作了相应的教学改革,开设了“矿压测试与控制技术”课程,但又无配套教材,再考虑到目前现场采矿工程技术人员也急需一本可供直接指导现场矿压测试与控制方面的参考书这一要求,特组织编写了此书。本书由煤炭工业部科技教育司原教材编审室组织煤炭中专采煤专业教材编审委员会和煤炭中专采煤学会审定。

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。加之我国幅员辽阔,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和采矿技术的发展,矿压理论和实践也在不断提高,因此,本书本着反映当前、兼顾长远、保证重点、删简次要内容、注重实用性和可操作性的原则,在内容和结构体系上作了较大程度的改革。

鉴于中等专业学校以培养应用型人才为主这一目标,全书对纯理论部分仅作简要介绍,重点放在了实用性和可操作性上,尤其表现在“矿压测试”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三章,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;第二部分包括第四章至第九章,重点介绍了在矿山压力理论的指导下的矿山压力测试和预报工作,对测试的目的、项目、手段、方法和结果处理作了详细说明;第三部分包括第十章至第十二章,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测试的结果来解决采掘工作面遇到的实际问题,同时也对冲击地压作了简单介绍。

本书的编写人员有:

主编:谢明荣、林东才

副主编:耿献文、王国福、陈峰

参编人员(按姓氏笔划为序):马全礼、王国福、王春城、庄文平、陈峰、林东才、武合意、陈向东、周成、赵汝星、耿献文、谢明荣、戴春山。

参加本书审稿的人有:周冠军、李长春、王永祥、王晓鸣、高国章、梁传运、张先民、刘成波、刘社育、李永怀、张大珍、高新波。

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,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,错误或不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者  
1997年3月

1997/03

# 目 录

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| <b>第一章 岩石及岩体的基本性质</b> .....            | (1)   |
| 第一节 岩石及其性质 .....                       | (1)   |
| 第二节 岩体及其性质 .....                       | (7)   |
| <b>第二章 巷道矿压</b> .....                  | (10)  |
| 第一节 原岩应力 .....                         | (10)  |
| 第二节 巷道矿压及其显现规律 .....                   | (11)  |
| <b>第三章 采煤工作面上覆岩层移动及其矿山压力显现规律</b> ..... | (17)  |
| 第一节 采煤工作面上覆岩层移动规律 .....                | (17)  |
| 第二节 采煤工作面矿山压力显现规律 .....                | (21)  |
| 第三节 影响采煤工作面矿山压力显现的主要因素 .....           | (25)  |
| <b>第四章 矿山压力观测仪器</b> .....              | (28)  |
| 第一节 机械式矿压观测仪器 .....                    | (28)  |
| 第二节 液压式矿压观测仪器 .....                    | (31)  |
| 第三节 振弦式矿压观测仪器 .....                    | (37)  |
| 第四节 矿压遥测仪 .....                        | (39)  |
| 第五节 其它矿压观测仪器简介 .....                   | (42)  |
| <b>第五章 采煤工作面“三量”观测</b> .....           | (44)  |
| 第一节 概述 .....                           | (44)  |
| 第二节 顶底板移近量和活柱下缩量观测 .....               | (45)  |
| 第三节 支架载荷观测 .....                       | (55)  |
| <b>第六章 采煤工作面其它矿压观测</b> .....           | (69)  |
| 第一节 采煤工作面顶板状况统计观测 .....                | (69)  |
| 第二节 采煤工作面采空区上覆岩层移动和破坏过程的观测 .....       | (75)  |
| 第三节 采煤工作面顶板运动的预测预报 .....               | (78)  |
| 第四节 底板比压的测定 .....                      | (86)  |
| 第五节 单体支柱工作面支护质量监控 .....                | (90)  |
| <b>第七章 巷道矿山压力观测</b> .....              | (98)  |
| 第一节 采区巷道矿压观测 .....                     | (98)  |
| 第二节 基本巷道矿压观测 .....                     | (103) |
| <b>第八章 矿压观测数据的分析与处理</b> .....          | (108) |
| 第一节 概述 .....                           | (108) |
| 第二节 观测数据的误差分析 .....                    | (109) |
| 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 .....    | (111) |
| 第四节 矿压观测数据处理的计算机程序示例 .....             | (124) |
| 第五节 矿压观测报告的编写 .....                    | (134) |
| <b>第九章 采区巷道矿山压力控制</b> .....            | (142) |
| 第一节 采区巷道矿山压力控制设计 .....                 | (142) |
| 第二节 巷道冒顶的预防与处理 .....                   | (149) |

|               |                           |              |
|---------------|---------------------------|--------------|
| 第三节           | 巷道冒顶事故实例分析 .....          | (152)        |
| <b>第十章</b>    | <b>采煤工作面矿压控制 .....</b>    | <b>(154)</b> |
| 第一节           | 顶板分类 .....                | (154)        |
| 第二节           | 单体支柱采煤工作面顶板控制设计 .....     | (156)        |
| 第三节           | 综采工作面顶板控制设计 .....         | (187)        |
| <b>第十一章</b>   | <b>采煤工作面顶板事故的防治 .....</b> | <b>(192)</b> |
| 第一节           | 顶板事故的统计分析 .....           | (192)        |
| 第二节           | 局部冒顶事故的防治 .....           | (198)        |
| 第三节           | 大型冒顶事故的防治 .....           | (201)        |
| 第四节           | 特殊条件下采煤工作面的顶板控制 .....     | (207)        |
| 第五节           | 采煤工作面顶板事故的处理 .....        | (217)        |
| <b>第十二章</b>   | <b>煤矿冲击地压 .....</b>       | <b>(221)</b> |
| 第一节           | 概述 .....                  | (221)        |
| 第二节           | 冲击地压的特征分类 .....           | (223)        |
| 第三节           | 冲击地压发生的条件及原因 .....        | (224)        |
| 第四节           | 冲击地压的预测及预防 .....          | (226)        |
| <b>附录</b>     | .....                     | (230)        |
| <b>主要参考文献</b> | .....                     | (237)        |

# 第一章 岩石及岩体的基本性质

## 第一节 岩石及其性质

岩石是由各种造岩矿物或岩屑在地质作用下按一定规律组合而成的。自然状态下的岩石,按其固体矿物的固体颗粒之间的组合特征,可分为固结性岩石、粘结性岩石、散粒状岩石和流动性岩石等。所谓固结性岩石是指造岩矿物的固体颗粒之间成刚性联系,破碎后可以保持一定形状的岩石。煤矿中遇到的大多是固结性岩石。

按岩石的力学强度和坚实性不同,常把矿山岩石分为坚硬岩石和松软岩石两类。实践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;而把低于该值的胶结岩石称为松软岩石。岩石的强度与岩石的结构和构造有关。

岩石的结构是指决定岩石组织的各种特征的总合,通常是指岩石中矿物颗粒的结晶程度,颗粒的大小、形状,颗粒之间的相互连接特征,存在孔隙的情况以及胶结物的胶结类型等。一般来说,组成岩石的物质颗粒愈小,则该岩石的强度愈大;颗粒均匀,岩石的力学性质也均匀。

岩石的构造是指岩石中矿物颗粒集合体之间,以及它与其他组成部分之间的排列方式和充填方式。常见的构造有整体构造、多孔状构造和层状构造等。

### 一、岩石的物理性质

#### (一)岩石的密度

岩石的密度是指单位体积(包括空隙体积)岩石的质量。根据试件含水状态的不同,岩石的密度分为天然密度、干密度和饱和密度。天然密度是岩石在天然含水状态下的密度。干密度是试件在 105~110 °C 烘箱内烘至恒重时的密度。饱和密度是试件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:

$$\left. \begin{aligned} \nu_a &= \frac{G_a}{V} \\ \nu_{sat} &= \frac{G_{sat}}{V} \\ \nu &= \frac{G}{V} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中  $G_a, G_{sat}, G$  ——分别是干燥岩石、水饱和岩石和天然含水状态下岩石的质量, g;

$\nu_a, \nu_{sat}, \nu$  ——岩石的干密度、饱和密度和天然密度, g/cm<sup>3</sup>;

$V$  ——岩石的体积, cm<sup>3</sup>。

通常不说明含水状态时,即指岩石的干密度。常见岩石的密度如表 1-1 所示。

表 1-1 煤矿常见岩石的密度、空隙度和空隙比

| 岩石种类 | 密度, g/cm <sup>3</sup> | 空隙度 $n$ , % | 空隙比 $e$     |
|------|-----------------------|-------------|-------------|
| 砂 岩  | 2~2.6                 | 3~30        | 0.031~0.429 |
| 页 岩  | 2~2.4                 | 10~35       | 0.111~0.538 |
| 石灰岩  | 2.2~2.6               | 5~20        | 0.053~0.25  |
| 煤    | 1.2~1.4               |             |             |



## (二)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。空隙度是指岩石中各种孔隙、裂隙体积的总和与岩石总体积之比。其值可按下式计算:

$$n = (1 - \frac{V_s}{V}) \times 100 \% \quad (1-2)$$

式中  $n$ ——岩石的空隙度(也称空隙率)。

有时,岩石的空隙性也用空隙比表示。空隙比是指岩石中孔隙和裂隙体积的总和与岩石内固体部分实体积之比。其关系式如下:

$$e = \frac{V_p}{V_s} \quad (1-3)$$

式中  $e$ ——岩石的空隙比;

$V_s$ ——岩石内固体部分实体积,  $\text{cm}^3$ ;

$V_p$ ——岩石中孔隙和裂隙体积之和,  $\text{cm}^3$ 。

煤矿中常见岩石的空隙度和空隙比见表 1-1 所示。

## (三)岩石的膨胀性和压实性

岩石破碎以后的体积比整体状态下增大,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。其关系式为:

$$K_p = \frac{V'}{V} \quad (1-4)$$

式中  $K_p$ ——岩石的碎胀系数;

$V'$ ——岩石破碎膨胀后的体积,  $\text{cm}^3$ ;

$V$ ——岩石处于整体状态下的体积,  $\text{cm}^3$ 。

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地变小。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。煤矿常见岩石的碎胀系数及残余碎胀系数见表 1-2。

表 1-2 煤矿中常见岩石的碎胀系数值

| 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     |
| 粘土   | <1.20      | 1.03~1.07     |
| 碎煤   | <1.20      | 1.05          |
| 粘土页岩 | 1.4        | 1.10          |
| 砂质页岩 | 1.06~1.80  | 1.10~1.15     |
| 硬砂岩  | 1.50~1.80  | —             |

## (四)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,在一定的试验条件下(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。岩石强制吸水率有时也称为饱和吸水率,是试件在加压(150 个大气压)条件下吸入水分的质量与烘干质量之比。如果不专门指明,岩石的吸水率即指自然吸水率。两种吸水率可用下式表示:



$$\left. \begin{aligned} W &= \frac{G_w}{G_a} \times 100 \% \\ W_{sat} &= \frac{G_{wg}}{G_a} \times 100 \% \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中  $W, W_{sat}$ ——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份的质量, kg；

$G_a$ ——岩石试件烘干后的质量, kg；

$G_{wg}$ ——岩石试件强制饱和吸水后的质量, kg。

(2) 岩石的透水性。地下水在水力坡度(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。岩石的渗透系数大小取决于岩石的孔隙的大小、数量和相互贯通情况。根据达西定律：

$$Q = KAI \quad (1-6)$$

式中  $Q$ ——单位时间透水量；

$K$ ——渗透系数；

$I$ ——水力坡度(压力差)；

$A$ ——渗透面积。

(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份对强度的影响程度。软化系数是水饱和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：

$$\eta_c = \frac{R_{cw}}{R_c} \leq 1 \quad (1-7)$$

式中  $R_{cw}$ ——水饱和岩石试件的单向抗压强度；

$\eta_c$ ——岩石的软化系数；

$R_c$ ——干燥岩石试件的单向抗压强度。

## 二、岩石的变形性质

### 1. 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。但岩石与一般固体材料不同, 它的弹性变形和塑性变形往往是同时出现的。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。

### 2. 岩石在单向压缩下的变形特性

(1) 脆性岩石的变形性质。图 1-1a 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 1-1a 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 1-1a 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

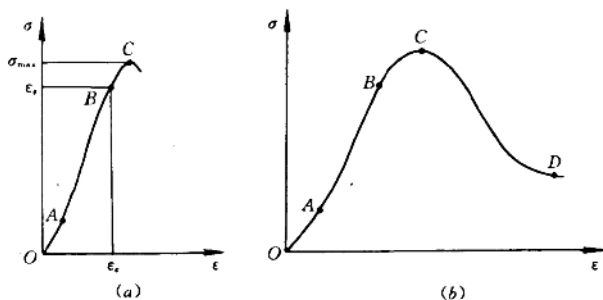


图 1-1 脆性岩石的应力应变曲线

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(图 1-1b)。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。

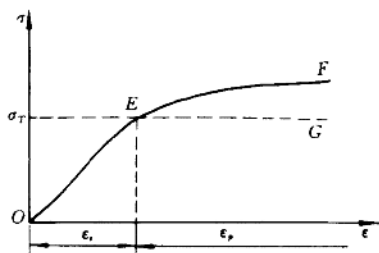


图 1-2 塑性岩石的应力应变曲线

(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,塑性岩石应变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  $\sigma_T$ 。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  $\sigma_T$  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。

### 3. 岩石在三向压缩条件下的变形特性

图 1-3a、b 为干砂岩和湿砂岩在常温和不同侧压(或称围压)三向压缩下的变形曲线。图中的纵坐标表示最大的主应力  $\sigma_1$ (一般为垂直应力)与最小应力  $\sigma_3$ (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:

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

(2)岩石的脆性和塑性是相对的,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  $\sigma_3$  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。这对于在井下控制煤柱和岩体的稳定性很有实际意义。

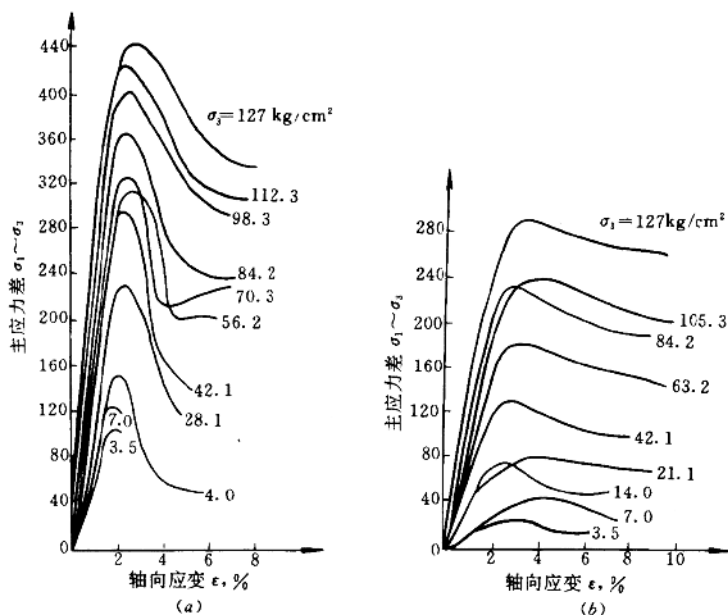


图 1-3 砂岩在常温和不同侧压三向压缩下的应变曲线

#### 4. 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。由图可知,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,故曲线呈下凹型,这个阶段的蠕变称为第一阶段蠕变或短暂蠕变。在  $BC$  段,应变以稳定恒速增长,这个阶段的蠕变称为第二阶段蠕变或定常蠕变,且这个阶段的时间延续最长。在  $CD$  段,应变以加速增长,曲线呈上凹型,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。

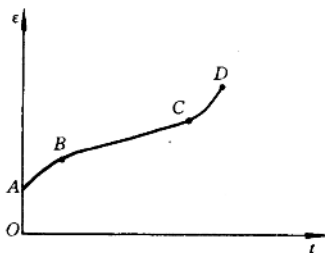


图 1-4 岩石的典型蠕变曲线

### 三、岩石的强度性质

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叫做极限载荷,用单位面积表示则称为极限强度。在不同应力条件下岩石有不同的极限强度,所以岩石的强度分为单向抗压强度、单向抗拉强度、抗剪强度以及三向抗压强度等。

#### 1. 岩石的单向抗压强度

岩石试件在单向压缩时所能承受的最大压应力值,称为岩石的单向抗压强度。测定岩石的单向抗压强度,通常用直径 5 cm 和高径比为 2 的圆柱形试件,在压力机上以 50~100 N/s 的速度加载,直到试件破坏,然后按下式计算:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (1-8)$$

式中  $R_c$  —— 岩石试件的单向抗压强度, kPa;

$P$  —— 试件破坏时施加的载荷, kN;

$A$  —— 试件初始截面积,  $m^2$ 。

## 2. 岩石的单向抗拉强度

岩石试件在单向拉伸时承受的最大拉应力值, 称为单向抗拉强度。目前, 测定岩石抗拉强度的方法基本上可分为两类, 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。可按下式求得岩石的抗拉强度:

$$R_t = \frac{P_t}{A} \quad (1-9)$$

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, 近年来广泛采用劈裂法间接地测定岩石的抗拉强度。这种方法是用直径 5 cm 和厚 2.5 cm 的圆盘形试件, 在材料试验机上以 0.3~0.5 kg/s 的速度加载, 直至试件被压裂(图 1-5)。根据弹性理论可知:

$$R_p = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (1-10)$$

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。

## 3. 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。目前广泛用于测定岩石抗剪强度的方法是倾斜压模法。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 50~100 N/s 的速度加载, 迫使试件沿着预定的剪切面 AB 剪断。这时作用在剪切破坏面上的应力为:

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{T}{A} = \frac{P}{A} \sin \alpha \\ \sigma_n &= \frac{N}{A} = \frac{P}{A} \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

式中  $T, N$  —— 作用在剪切破坏面上的剪切力和正压力, kN;

$\tau$  —— 抗剪强度, kPa;

$\sigma_n$  —— 剪切破坏面上的正应力, 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,  $m^2$ ;

$\alpha$  —— 试件与水平面的夹角, ( $^\circ$ )。

## 4. 岩石的三向抗压强度

岩石试件在三向压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。它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

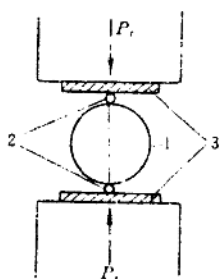


图 1-5 劈裂法试验装置示意图

1-试件; 2-钢丝绳; 3-承压板

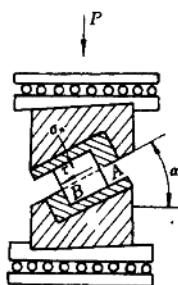


图 1-6 倾斜压模剪切装置

岩石三轴应力试验机测定的。

岩石因受力状态不同,其极限强度相差很悬殊。根据试验研究可知,岩石在不同应力状态下的各种强度值,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。

#### 四、岩石的破坏机理

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异,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两种基本类型。

##### 1. 拉断破坏

根据加载方式不同,拉断破坏可分两种情况:

(1)直接拉断(图1-7a)。其特点是断裂面与受力方向垂直,断裂面明显分离,而在断裂面之间没有错动。

(2)间接拉断(图1-7b)。其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”。

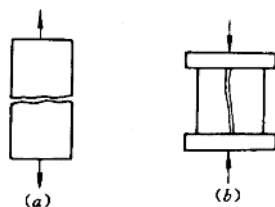


图1-7 拉断破坏的两种情况

a—直接拉断,b—间接拉断

##### 2. 剪切破坏

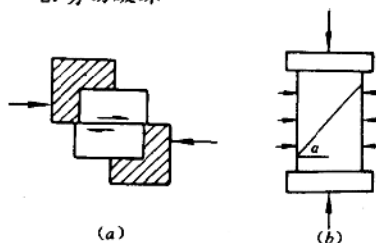


图1-8 剪切破坏的两种情况

a—直接剪切,b—间接剪切

根据加载方式不同,剪切破坏可分为两种情况:

(1)直接剪切。由外加剪力造成,其特点是剪切破坏面与外加剪力方向一致(图1-8a)。

(2)间接剪切。由轴向压缩或其他受力方式引起的剪切破坏。当在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力,使试件不易产生横向应变。于是,试件内部出现剪应力,最后沿着与最大压应力垂直方向成一定角度 $\alpha$ 的某个平面,发生剪切破坏(图1-8b)。剪切破坏角与岩石的强度有关。

通常坚硬岩石的剪切破坏角较大,软岩则较小。

## 第二节 岩体及其性质

### 一、岩体的概念

#### 1. 岩石与岩体的区别

以上介绍的岩石力学性质,都是以小块岩石试件(岩块)进行的实验和研究为基础,与大范围天然岩体的力学性质有很大差别。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之中,地下水、地温、地应力等因素无疑对岩体的物理力学性质有很大影响。

(2)岩体是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。

根据上述特征,将岩体定义为自然界中由各种岩性和各种结构特征(结构面、结构体)的岩石所组成的集合体。

## 2. 岩体的结构类型

根据岩体结构特征的不同,可把岩体划分为以下几种基本类型(图 1-9):

(1)整体岩体(图 1-9a)。它是指只遭受轻微构造变动的厚层沉积岩,岩层多呈水平或缓斜状,节理不发育,很少有断层,通常可认为是均质、连续介质。

(2)块状岩体(图 1-9b)。它是指遭受中等构造变动的厚层、中厚层沉积岩,岩层多为水平或倾斜状,节理发育,有小断层,偶有层间错动。

(3)层状岩体(图 1-9c)。它是指构造比较简单的沉积岩,岩层可呈水平或倾斜陡急状。它可以由单一岩性或不同岩性的互层或夹层组合而成,岩层的单层厚度一般在 0.5 m 以下。

(4)破碎岩体(图 1-9d)。它是指岩层受强烈的构造变动后产生严重变形和破裂的岩体。

(5)松散岩体(图 1-9e)。是指经受最剧烈的构造变动后由断层泥、岩粉、压碎的岩石碎屑、碎块等所组成的岩体。

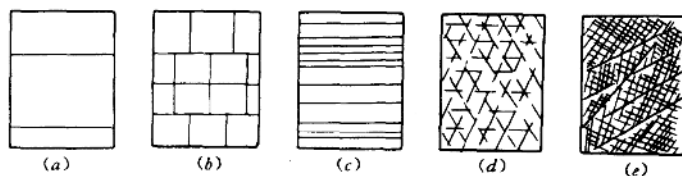


图 1-9 岩体结构的基本类型

a—整体结构;b—块状结构;c—层状结构;d—碎裂结构;e—散体结构

## 二、岩体的基本特征

### 1. 岩体的非均质性

岩体由一种或几种岩石组成,而且以后者居多。对于多种岩石组成的岩体,由于在自然条件下组成岩石的物质成分、组织结构及其组合状态经常变化,所以一般认为岩体是非均质的。

### 2. 岩体的各向异性

岩体的各向异性,即岩体在不同方向上的致密程度不同,显示的物理力学性质(如极限强度、弹性模量等)就有明显不同。岩体的各向异性还受岩体内各种结构面的影响。

### 3. 岩体的非连续性

由于岩体被各种结构面所切割,因此从原则上说岩体属于非连续介质。但是随着被切割的岩块大小、形态和性质不同,岩块的排列和相互接触状态的差异,其不连续程度会有所不同。

## 三、岩体的变形和破坏特征

岩体的变形要比岩块的变形复杂得多,因为岩体是由大小和形状不同的各种天然岩块(结构体)和切割这些天然岩块的弱面(结构面)组成的。所以在岩体的总变形中必然包括结构体和结构面的变形成分,通常前者可分为结构体的压缩变形和形状变形,而后者则可分为结构面的压密变形和剪切滑移变形。岩体变形时除了出现与岩石试验相同的那种横向变形外,还有因在其破坏前产生的非弹性膨胀(扩容)而造成的侧向膨胀。因此在表达岩体变形特征时,通常用侧胀系数  $\mu_m$  来代替岩石的横向变形系数  $\mu$ (泊松比)。侧胀系数的含义是:

$$\mu_m = \frac{\text{侧向变形}}{\text{纵向变形}}$$

可把岩体受力后产生变形和破坏的过程分为四个阶段,其应力应变曲线见图 1-10 所示。

(1)压密阶段。岩石受力后首先出现的是压密阶段(I)。此时的变形,主要是由岩体内的结构面(节理、裂隙等)被闭合和裂隙中充填物受到压密而造成的。其特点是随着应力的增长,变形增长率逐渐减小,故应力应变曲线呈凹状缓坡。

(2)弹性阶段。岩体经过压缩以后,即由非连续介质转化为连续介质。在载荷的持续作用下将进入第二阶段——弹性阶段(II)。在这个阶段中,结构面和结构体的性质共同起作用,但主要是结构体开始承载和产生变形,因而,这时弹性变形是岩体变形的主要组成部分。它的特点是随载荷增加,其变形基本上按比例增长,即应力应变曲线表现为直线型。

(3)塑性阶段。当变形继续发展到屈服点以后,就进入岩体变形的第三阶段——塑性阶段(III)。在这个阶段中,与结构体变形同时伴随有结构面的剪切滑移变形,且变形成分主要是沿结构面滑移。岩体的扩容现象也越来越明显。

(4)破坏阶段。在塑性阶段中,随载荷的增长,其变形增长率不断增加,当应力增加到极限强度时,使岩体沿着某些破损面滑动而导致岩体破坏,于是进入第四阶段——破坏阶段(IV)。

岩体变形和破裂,在岩体变形全过程中无法严格区分。实际上岩体在变形过程中包含着破裂的成分,破裂的出现反映着变形积累的突变,因此变形和破裂没有明显的界限,这是岩体变形性质区别其他材料的最主要的特点。

#### 四、岩体的强度特征

由于岩体结构的复杂性,加上其他因素的影响,目前还难以准确地建立岩体的强度曲线。但可以认为,具有结构弱面的岩体总强度,既不会超过作为连续均匀介质的岩石结构体的强度,同时也不会低于其中结构弱面的强度。通常岩体内的弱面越少,越接近于均质连续体,则岩体强度曲线越接近于岩石强度曲线,并以岩石强度曲线为其上部界限;反之,岩体内弱面越发育,则岩体强度曲线越接近于弱面强度曲线,而以弱面强度曲线为其下部界限。通常的岩体强度曲线总是介于岩石强度曲线和弱面强度曲线之间(图 1-11)。

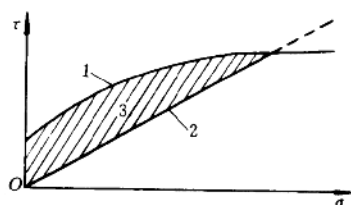


图 1-11 岩体强度曲线的范围

1—岩石强度曲线;2—弱面强度曲线;3—岩体强度曲线的可能范围

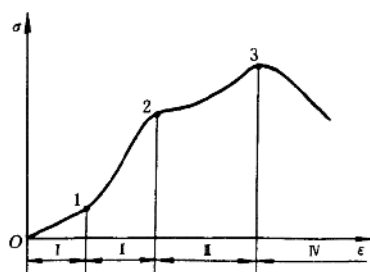


图 1-10 岩体应力应变关系

1—转化点;2—屈服点;3—极限强度



## 第二章 巷道矿压

由于井巷掘进而使岩体应力发生显著变化的区域叫做井巷影响圈,其直径一般为井巷断面最大直线尺寸的 3~5 倍,习惯上将此范围内的岩体称为围岩;而把没有受到井巷或采煤工作面等地下工程影响的岩体称做原始岩体,简称原岩。

在原岩体中掘进的巷道,如不进行支护或支护不当,往往发生较大的变形或破坏。譬如巷道冒顶、片帮、顶板下沉、底臃及支架折断等。围岩和支架的变形与破坏现象统称为矿压显现(或地压现象)。矿山压力(地压)是因采掘影响引起的岩层作用在井巷、硐室和工作面围岩以及支护物上各种力的总称,简称矿压。

从地表到煤层或矿床,岩层重叠,下面的岩层不仅承受着上部覆盖岩层的重量(即重力)的作用,而且岩体中还存在着构造应力、膨胀应力、温度应力等应力作用。掘进巷道之前,岩体内任意点上的应力都处于平衡状态。这种在地壳内存在的自然应力状态叫做原岩应力状态。开掘巷道后,破坏了原来的应力平衡状态,围岩应力就要重新分布,直到建立新的平衡为止。

应力的重新分布使巷道周边围岩中产生明显的应力集中现象。如果巷道围岩中重新分布的应力没有超过岩体的强度,围岩只产生变形或位移;反之,如果应力超过岩体强度,该处的围岩就要破坏,产生矿压显现。

### 第一节 原岩应力

#### 一、自重应力

由上部覆盖岩层的重量所引起的应力称为自重应力。在研究自重应力时,可把原岩体看作半无限体,即上部以地平面为界,而垂直及水平方向上都是没有边界的。在地表以下深度  $Z$  处取一单位立方体,如图 2-1 所示。在上覆岩层重力作用下,作用在这个单元体上的应力有垂直应力  $\sigma_z$  及水平应力  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ 。

##### 1. 垂直应力 $\sigma_z$

垂直应力等于单位立方体上覆岩层的重力,即:

$$\sigma_z = \gamma Z, \text{ kN/m}^2 \quad (2-1)$$

式中  $\gamma$  ——上覆岩层的平均容重,  $\text{kN/m}^3$ ;

$Z$  ——单位立方体的埋藏深度,  $\text{m}$ 。

一般当上覆层为岩层时,取  $\gamma = 2.5 \text{ kN/m}^3$ ; 上覆层为表土层时,取  $\gamma = 1.8 \text{ kN/m}^3$ 。

##### 2. 水平应力 $\sigma_x$ 及 $\sigma_y$

在垂直应力  $\sigma_z$  作用下,单位立方体将要产生横向变形,但由于它处在原岩体之中,在各水平方向上都受到相邻岩体的约束,不可能在横向自由膨胀,即它的横向应变  $\epsilon_x = \epsilon_y = 0$ ,根据广义虎克定律:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \frac{\sigma_y}{E} - \mu \frac{\sigma_z}{E} = 0 \quad (2-2)$$

式中  $E$  ——岩石的弹性模量;

$\mu$  ——岩石的泊松比。

若将岩体看作是各向同性的弹性体，则水平应力  $\sigma_x = \sigma_y$ ，由式(2-2)得：

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z = \lambda \sigma_z = \lambda \gamma Z \quad (2-3)$$

式中  $\lambda$ ——原岩体的侧压力系数， $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$ 。

大多数固结性岩石的泊松比  $\mu = 0.2 \sim 0.3$ ，侧压力系数  $\lambda = 0.25 \sim 0.43$ ，对于塑性岩石或埋藏很深的岩体， $\mu$  趋近于 0.5，则  $\lambda = 1$ ，这意味着  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma Z$ 。这种各向等压的应力状态叫做静水应力状态。

## 二、构造应力

地下原岩体在形成时或形成后，经历或正在经历着各种地质构造运动。这种由于地质构造运动而在岩体内积存的应力称为构造应力。它具有以下特点：

(1)一般情况下地壳运动多为水平方向的运动，因此构造应力是以水平应力为主。而且地壳运动总的来说是挤压运动，因此水平应力则以压应力为主。

(2)在构造应力场中，主应力的大小和方向可能有很大变化；两个水平方向的应力( $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ )通常不相等。

(3)大量实测资料说明：在构造应力场内，水平应力大于垂直应力。即：

$$\sigma_{Hmax} > \sigma_{Hmin} > \sigma_z$$

式中  $\sigma_{Hmax}$ ——天然最大水平应力；

$\sigma_{Hmin}$ ——天然最小水平应力；

$\sigma_z$ ——天然垂直应力。

(4)构造应力在坚硬岩层中普遍存在，而在软岩层中却很少出现。因为软岩强度低，在外力作用下，易产生塑性变形或破坏，应力能随之释放。而坚硬岩层则相反，在地壳运动中，往往可聚集大量能量，形成很高的构造应力。

## 第二节 巷道矿压及其显现规律

### 一、巷道围岩应力分析

#### (一)弹性变形区内的应力分布

巷道开掘后，在其围岩中产生一个应力变化区，以巷道周边的应力集中最为严重。当巷道围岩周边的应力值小于岩体强度极限(脆性岩石)或屈服极限(塑性岩石)时，围岩周边只产生不大的弹性变形或位移，巷道处于稳定状态。

为了简化理论分析，设圆形巷道开掘在连续均质各向同性的岩体中；取围岩  $abcd$  为脱离体，原岩作用在围岩上的矿压分别为  $p$ (垂直应力)和  $q$ (水平应力)(图 2-2)巷道中心深度  $Z > 30R$  ( $R$  为巷道掘进半径)，脱离体内的岩石自重可忽略不计；巷道很长，沿轴向没有位移，可作为平面问题来研究。

根据弹性理论，围岩应力为：

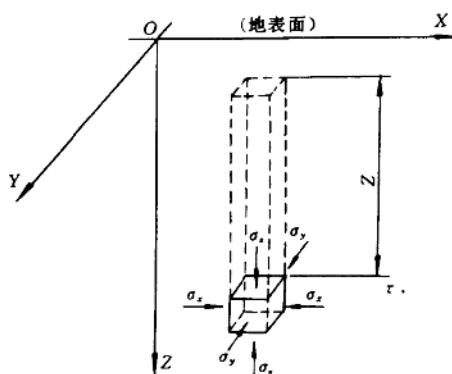


图 2-1 原岩体应力状态