



煤炭技工学校通用教材



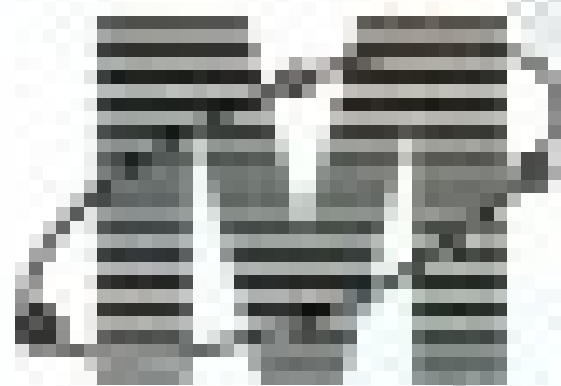
# 巷道掘进

煤炭工业出版社



中国工商银行

M



M

M

中国工商银行

M

M

中国工商银行

煤炭技工学校通用教材

# 巷道掘进

全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会 编

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

煤炭技工学校通用教材

## 巷道掘进

全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会 编

\*

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

\*

开本 787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 13<sup>1</sup>/<sub>4</sub>

字数 307 千字 印数 1—5,000

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷

**ISBN 7-5020-2863-3/TD263**

社内编号 5650 定价 23.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

## 内 容 提 要

本书介绍了岩石的性质与工程分级；钻眼爆破；巷道断面形状和尺寸；岩石平巷施工；巷道地压与巷道支护；煤巷与半煤岩巷施工；硐室与交岔点施工；上下山施工；特殊条件下的巷道施工；巷道维护与维修等方面的内容。

本书为煤炭技工学校通用教材，也适合煤矿技术工人培训之用。

# 全国职业培训教学工作指导委员会 煤炭专业委员会

|       |           |     |     |     |     |     |
|-------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 主任委员  | 刘 富       |     |     |     |     |     |
| 副主任委员 | 仵自连       | 刘同良 | 张贵金 | 韩文东 | 范洪春 | 刘荣林 |
|       | 雷家鹏       | 曾宪周 | 夏金平 | 张瑞清 |     |     |
| 委 员   | (按姓氏笔画为序) |     |     |     |     |     |
|       | 于锡昌       | 牛麦屯 | 牛宪民 | 王亚平 | 王自学 | 王朗辉 |
|       | 甘志国       | 石丕应 | 仵自连 | 任秀志 | 刘同良 | 刘荣林 |
|       | 刘振涛       | 刘 富 | 刘 鉴 | 刘鹤鸣 | 吕军昌 | 孙东翔 |
|       | 孙兆鹏       | 邢树生 | 齐福全 | 严世杰 | 吴庆丰 | 张久援 |
|       | 张 君       | 张祖文 | 张贵金 | 张瑞清 | 李 玉 | 李庆柱 |
|       | 李祖益       | 李家新 | 杨 华 | 辛洪波 | 陈家林 | 周锡祥 |
|       | 范洪春       | 赵国富 | 赵建平 | 赵新社 | 夏金平 | 高志华 |
|       | 龚立谦       | 储可奎 | 曾宪周 | 程光玲 | 程建业 | 程彦涛 |
|       | 韩文东       | 雷家鹏 | 樊玉亭 |     |     |     |

# 前 言

为了加快煤炭技工学校的教学改革步伐，不断适应社会主义市场经济发展和劳动者就业的需要，加速煤炭工业技能型人才的培养，促进煤炭工业现代化建设和科学技术的进步，在全国职业培训教学工作指导委员会的指导下，全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会，以全国煤炭技工学校“八五”教材建设规划为基础，研究制定了全国煤炭技工学校新时期教材建设规划，并列入了国家劳动和社会保障部制定的全国技工学校教材建设规划，劳动和社会保障部以《关于印发1999年度全国职业培训教材修订开发计划的通知》（劳社培就司函（1999）第15号）下发全国。这套教材59种，其中技术基础课教材43种，实习课教材16种。目前正在陆续出版发行当中。

这套教材主要适用于煤矿技工学校教学，工人在职培训、就业前培训，也适合具有初中文化程度的工人自学和工程技术人员参考。

《巷道掘进》是这套教材中的一种，是根据经劳动和社会保障部批准的全国煤矿技工学校统一教学计划、教学大纲的规定编写的，经全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会审定，被劳动和社会保障部认定为合格教材，是全国煤炭技工学校教学，工人在职培训、就业前培训的必备的统一教材。

本教材由淮南矿业高级技工学校陶冠米同志任主编，本教材的编写过程中，得到了学校领导和本单位教师和煤矿有关工程技术人员的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，书中难免有不当之处，恳请广大读者批评指正。

全国职业培训教学工作指导委员会

煤炭专业委员会

2006年3月28日

# 目 录

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第一章 岩石的性质与工程分级 .....   | 1   |
| 第一节 概述 .....           | 1   |
| 第二节 岩石的物理性质 .....      | 2   |
| 第三节 岩石的力学性质 .....      | 6   |
| 第四节 岩石的工程分级和围岩分类 ..... | 9   |
| 复习思考题 .....            | 12  |
| 第二章 钻眼爆破 .....         | 13  |
| 第一节 钻眼机具 .....         | 13  |
| 第二节 炸药和爆炸概论 .....      | 28  |
| 第三节 矿用炸药 .....         | 35  |
| 第四节 起爆材料 .....         | 41  |
| 第五节 电雷管起爆法 .....       | 48  |
| 第六节 破岩原理和爆破技术 .....    | 50  |
| 复习思考题 .....            | 56  |
| 第三章 巷道断面形状和尺寸 .....    | 57  |
| 第一节 巷道断面形状 .....       | 57  |
| 第二节 巷道断面尺寸 .....       | 58  |
| 复习思考题 .....            | 66  |
| 第四章 岩石平巷施工 .....       | 67  |
| 第一节 钻眼爆破法 .....        | 67  |
| 第二节 掘进通风与综合防尘 .....    | 80  |
| 第三节 装岩与转运 .....        | 84  |
| 第四节 巷道施工组织与管理 .....    | 96  |
| 复习思考题 .....            | 103 |
| 第五章 巷道地压与巷道支护 .....    | 104 |
| 第一节 巷道地压 .....         | 104 |
| 第二节 巷道支护 .....         | 106 |
| 复习思考题 .....            | 143 |
| 第六章 煤巷与半煤岩巷施工 .....    | 144 |
| 第一节 煤巷施工 .....         | 144 |
| 第二节 半煤岩巷施工 .....       | 151 |
| 复习思考题 .....            | 153 |
| 第七章 硐室与交岔点施工 .....     | 154 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 第一节 硐室施工.....              | 154        |
| 第二节 巷道交岔点施工.....           | 159        |
| 复习思考题.....                 | 164        |
| <b>第八章 上下山施工.....</b>      | <b>165</b> |
| 第一节 上山施工.....              | 165        |
| 第二节 下山施工.....              | 167        |
| 复习思考题.....                 | 171        |
| <b>第九章 特殊条件下的巷道施工.....</b> | <b>172</b> |
| 第一节 松软岩层巷道施工.....          | 172        |
| 第二节 含水岩层巷道施工.....          | 177        |
| 第三节 揭开煤与瓦斯突出煤层的施工方法.....   | 180        |
| 复习思考题.....                 | 187        |
| <b>第十章 巷道维护与维修.....</b>    | <b>188</b> |
| 第一节 巷道破坏分析和巷道维护原理.....     | 188        |
| 第二节 巷道维护与修复支护技术.....       | 190        |
| 第三节 巷道底鼓的防治.....           | 197        |
| 第四节 巷道修复安全措施.....          | 199        |
| 复习思考题.....                 | 200        |
| 参考文献.....                  | 202        |

# 第一章 岩石的性质与工程分级

井巷施工最基本的过程，就是把岩石从岩体上破碎下来，形成设计所要求的井筒、巷道及硐室等空间，接着对这些地下空间进行必要的维护，防止围岩继续破碎或垮落。因此，破岩与井巷维护就成为井巷工程的主要问题。为了能够有效、合理地进行破岩和井巷维护，必须对岩石和岩体的物理力学性质有所了解，并在此基础上制定出科学的岩石工程分级方法，以便为设计、施工和成本计算提供依据。

## 第一节 概 述

岩石是由一种或几种矿物组成的集合体。每种矿物都具有一定的内部结构和比较固定的化学成分，同时也具有一定的物理性质和形态。岩石性质与其矿物组成有关。一般而言，岩块中含硬度大的粒状和柱状矿物（如石英、长石、角闪石、辉石和橄榄石等）愈多，岩块的强度就愈高；含硬度小的片状矿物（如云母、绿泥石、滑石、蒙脱石及高岭石等）愈多，岩块的强度就愈低。

岩石的结构和构造对岩石的性质也有重要影响。岩石的结构是指岩石中矿物的结晶程度、颗粒大小、形状和颗粒之间的联结方式，用以说明岩石的微观组织特征。岩石结构不同，其性质也各异。当矿物成分一定，呈现细晶、隐晶结构时，岩块强度往往比较高。粒状矿物较片状矿物不易形成定向排列，所以当其他条件相同，含片状矿物较多的岩石往往呈现较强的各向异性，含粒状矿物较多的岩块则常呈各向同性。沉积岩如砾岩和砂岩的力学性质，除了与砾石和砂粒的矿物成分有关以外，还与胶结物的性质有很大的关系。硅质胶结的强度最大，铁质、钙质、泥质和泥灰质胶结的强度依次递减。而岩石的构造则说明岩石的宏观组织特征。岩浆岩的流纹构造、沉积岩的层理构造和变质岩的片理构造，均可使岩石在力学性质上呈现出显著的各向异性。

研究岩石性质时，常用到岩石、岩块和岩体这3个术语。一般认为：岩块是指从地壳岩层中切取出来的小块体；岩体是指地下工程周围较大范围的自然地质体；岩石则是不分岩块和岩体的泛称。

由于各种地质作用，岩体中往往有明显的地质遗迹，如层理、节理、断层和裂隙面等。这些地质界面与所研究岩体的岩块比较，具有强度低、易变形的特点，称为弱面。岩体被这些弱面切割成既连续又不连续的裂隙体。由于弱面的存在，岩体强度通常小于岩块强度。

在研究岩石的力学性质时，必须注意到岩块的非均质性、各向异性和不连续等问题。但岩块是不包含有显著弱面的岩石块体，相对岩体而言，可以把岩块近似地视为均质、各向同性的连续介质来处理，而岩体则不能。除了少数岩体外，一般岩体均属于非均质、各向异性的不连续介质。

建井工作者常把覆盖在地壳上部的第四纪沉积物如黄土、粘土、流沙、淤泥、砾石等

统称为表土；表土以下的固结性岩石统称为基岩。在煤系地层中最常遇到的是各种沉积岩，如石灰岩、砂岩、砂质页岩、页岩等，只有局部地段才有岩浆岩侵入。

## 第二节 岩石的物理性质

### 一、岩石的相对密度和密度

岩石由固体、水、空气组成，具有相对密度、密度和重度等指标。

#### 1. 相对密度

岩石的相对密度，是指岩石固体实体积的质量与同体积水的质量之比。所谓岩石固体实体积，就是指不包括孔隙体积在内的实在体积。

$$d = \frac{G}{V_c \rho_w} \quad (1-1)$$

式中  $d$ ——岩石的相对密度；

$G$ ——绝对干燥时体积为  $V_c$  的岩石质量，g；

$V_c$ ——岩石固体实体积， $\text{cm}^3$ ；

$\rho_w$ ——水的密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

岩石的相对密度取决于组成岩石的矿物的相对密度。一般情况，如果岩石的矿物成分鉴定以后，岩石的相对密度就可以粗略地进行估计。例如石灰岩的相对密度与方解石的相对密度相近，砂岩的相对密度接近于石英的相对密度。

#### 2. 密度

岩石单位体积（包括岩石内孔隙体积在内）的质量，称为岩石的密度，又称质量密度。岩石的密度又可分为干密度和湿密度2种。干密度是指单位体积岩石绝对干燥时的密度，湿密度是指天然含水或饱水状态下的密度。

$$\rho_c = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

$$\rho = \frac{G_1}{V} \quad (1-3)$$

式中  $\rho_c$ ——岩石的干密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ ；

$\rho$ ——岩石的湿密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ ；

$G$ ——岩石试件烘干后的质量，g；

$G_1$ ——岩石试件的质量（天然含水或饱水），g；

$V$ ——岩石试件的体积， $\text{cm}^3$ 。

在一般情况下，岩石干、湿密度的数值差别不大，但对于某些粘土类岩石，区分干、湿密度具有重要意义。岩石密度取决于岩石的矿物成分、孔隙度和含水量。当其他条件相同时，岩石的密度在一定程度上与埋藏深度有关，靠近地表的岩石密度往往较小，而深部致密的岩石一般具有较大的密度。

#### 3. 重度

单位体积的岩石所受的重力称为重度，又称为重力密度。由于试件含水量不同，岩石

的重度也有干、湿重度之分。

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

式中  $\gamma$ ——岩石的重度,  $\text{N/m}^3$ ;

$\rho$ ——岩石的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

## 二、岩石的孔隙性

岩石的孔隙性是指岩石的裂隙和孔隙发育的程度, 通常用孔隙率  $n$  和孔隙比  $e$  来表示。孔隙率是指岩石试件内各种裂隙、孔隙的体积总和与试件总体积  $V$  之比; 孔隙比指岩石试件内各种裂隙、孔隙的体积总和与试件内固体矿物颗粒体积  $V_c$  之比。岩石的孔隙率和孔隙比通常是根据岩石的相对密度  $d$  和干密度  $\rho_c$  计算求得。

$$n = \frac{V - V_c}{V} = 1 - \frac{V_c}{V} = 1 - \frac{V_c \cdot G}{G \cdot V} = 1 - \frac{\rho_c}{d\rho_w} = \left(1 - \frac{\rho_c}{d\rho_w}\right) \times 100\% \quad (1-5)$$

$$e = \frac{V - V_c}{V_c} = \frac{V}{V_c} - 1 = \frac{d\rho_w}{\rho_c} - 1 \quad (1-6)$$

岩石的孔隙性质对岩石的其他性质有显著影响。随着岩石孔隙率增大, 一方面削弱了岩石的整体性, 使得岩石的密度和强度随之降低, 透水性增大; 另一方面由于孔隙的存在, 又会加快风化速度, 从而进一步增大透水性和降低力学强度。

## 三、岩石的水理性质

岩石在水作用下表现出来的性质是多方面的, 对于矿山工程岩体稳定性有突出影响的主要是吸水率、透水性、溶蚀性、软化性、膨胀性和崩解性等指标。

### 1. 岩石的吸水率

岩石吸水率  $\omega$  是指岩石试件在标准大气压力下吸入水的质量  $g$  与试件烘干质量  $G$  之比值, 常以百分数表示。

$$\omega = \frac{g}{G} \times 100\% \quad (1-7)$$

岩石吸水率的大小取决于岩石所含孔隙、裂隙的数量、大小、开闭程度及分布情况, 并且与试验条件有关。试验表明, 整体岩石试件的吸水率比同一岩石的碎块试样吸水率小; 随着浸水时间的增加, 吸水率也会有所增大。

表 1-1 为某些岩石的相对密度、密度、孔隙比和吸水率指标。

### 2. 岩石的透水性

地下水存在于岩石的孔隙和裂隙中, 而且大多数岩石的孔隙和裂隙是互相贯通的, 因而在一定水压力作用下, 地下水可在岩石中渗透。这种岩石能被水透过的性能称为岩石的透水性。岩石透水性的大小除了与地下水水头和岩体内的应力状态有关外, 还与岩石的孔隙率、孔隙大小及其连通程度有关。

渗透系数是衡量岩石透水性的指标, 其单位与速度相同。由达西公式  $Q = KAI$  可知, 单位时间内的渗水量  $Q$  与渗透面积  $A$  和水力坡度  $I$  成正比关系, 其中比例系数  $K$  称为渗透系数。渗透系数一般通过在钻孔中进行抽水试验或压水试验来测定。

表 1-1 某些岩石的相对密度、密度、孔隙比和吸水率指标

| 岩石名称 |     | 相对密度 $d$  | 密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 孔隙比 $e/\%$ | 吸水率 $W/\%$ |
|------|-----|-----------|-----------------------------------------|------------|------------|
| 岩浆岩  | 花岗岩 | 2.50~2.84 | 2.30~2.80                               | 0.04~0.92  | 0.10~0.92  |
|      | 闪长岩 | 2.60~3.10 | 2.52~2.96                               | 0.25~3.00  | 0.30~0.48  |
|      | 辉绿岩 | 2.80~3.10 | 2.53~2.97                               | 0.40~6.38  | 0.22~5.00  |
|      | 安山岩 | 2.40~2.80 | 2.30~2.70                               | 1.09~2.19  | 0.29       |
|      | 玄武岩 | 2.60~3.30 | 2.50~3.10                               | 0.35~3.00  | 0.31~2.69  |
|      | 凝灰岩 | 2.56~2.78 | 2.29~2.50                               | 1.50~4.90  | 0.12~7.45  |
| 沉积岩  | 砾岩  | 2.67~2.71 | 2.42~2.66                               | 0.34~9.30  | 0.20~5.00  |
|      | 砂岩  | 2.60~2.75 | 2.20~2.71                               | 1.60~2.83  | 0.20~12.19 |
|      | 页岩  | 2.57~2.77 | 2.30~2.62                               | 1.46~2.59  | 1.80~3.10  |
|      | 石灰岩 | 2.48~2.85 | 2.30~2.77                               | 0.53~2.00  | 0.10~4.45  |
| 变质岩  | 片麻岩 | 2.63~3.01 | 2.30~3.05                               | 0.70~4.20  | 0.10~3.15  |
|      | 片岩  | 2.75~3.02 | 2.69~2.92                               | 0.70~2.92  | 0.08~0.55  |
|      | 石英岩 | 2.53~2.84 | 2.40~2.80                               | 0.50~0.80  | 0.10~1.45  |
|      | 大理岩 | 2.80~2.85 | 2.60~2.70                               | 0.22~1.30  | 0.10~0.80  |

不同岩石的透水性差别极大。对于某些岩石来说,即使是同种类型的岩石,其透水性也可以在很大范围内变化,表 1-2 为几种岩石的渗透系数。

表 1-2 几种岩石的渗透系数

 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 

| 岩石类型     | 渗透系数                                      | 测定方法  |
|----------|-------------------------------------------|-------|
| 泥岩       | $10^{-4}$                                 | 现场测定  |
| 粉砂岩      | $10^{-9}\sim 10^{-8}$                     | 实验室测定 |
| 细砂岩      | $2\times 10^{-7}$                         | 实验室测定 |
| 坚硬砂岩     | $4.4\times 10^{-5}\sim 3.9\times 10^{-4}$ |       |
| 砂岩或多裂隙页岩 | $>10^{-3}$                                |       |
| 致密的石灰岩   | $<10^{-10}$                               |       |
| 有裂隙的石灰岩  | 2~4                                       |       |

### 3. 岩石的溶蚀性

由于水的化学作用而把岩石中某些组成物质带走的现象称为岩石的溶蚀。如把试件浸在  $80^{\circ}\text{C}$  的纯水中,经过 24h,水中离子的变化可以看出水的溶蚀作用。溶蚀作用可使岩石致密程度降低、孔隙率增大,导致岩石强度降低。这种溶蚀现象在某些围岩为石灰岩的矿井中是常见的。如贵州 761 矿,在该矿巷道中可看到类似钟乳石或石笋的溶蚀沉积物。

### 4. 岩石的软化性

岩石浸水后其强度明显降低,通常用软化系数来表示水分对岩石强度的影响程度。软化系数是指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之比,可表示为

$$\eta_c = \frac{R_{cw}}{R_c} \leq 1 \quad (1-8)$$

式中  $\eta_c$ ——岩石的软化系数，见表 1-3；

$R_{cw}$ ——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，与岩石中亲水性矿物和易溶性矿物的含量、孔隙发育情况、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愈多，开口孔隙愈发育，则岩石浸水后强度降低程度愈大。岩石浸水时间愈长，其强度降低程度也愈大，如某些砂岩浸水 3 天后单向抗压强度可降低 32%~35%，而浸水 9 天后降低 51%~59%。

表 1-3 某些常见岩石的软化系数值

| 岩石名称 | 干燥试件抗压强度 $R_c$ /MPa | 水饱和试件抗压强度 $R_{cw}$ /MPa | 软化系数 $\eta_c$ |
|------|---------------------|-------------------------|---------------|
| 粘土岩  | 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     |

#### 5. 岩石的膨胀性和崩解性

膨胀性和崩解性是散软岩石所表现出的特征。前者是指软岩浸水后体积增大和相应地引起压力增大的性能，后者是指软岩浸水后发生的解体现象。岩石的膨胀性和崩解作用往往对地下工程的施工和巷道稳定性带来不良影响。

岩石的膨胀性可用膨胀应力和膨胀率来表示。岩石与水进行物理化学反应后，随时间变化会产生体积增大现象，这时使试件体积保持不变所需要的压力称为岩石的膨胀应力，而增大后的体积与原体积的比值称为岩石膨胀率。这些指标可在实验室用专门仪器测定。

岩石的崩解性用耐崩解指数表示，它是指岩石试件在承受干燥和湿润的两个标准循环之后，岩石试件对软化和崩解作用所表现出的抵抗能力。该指标可通过实验确定。

#### 四、岩石的碎胀性

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岩石破碎前处于整体状态下的体积之比来衡量，该值称为碎胀系数，即

$$K = \frac{V_1}{V} \quad (1-9)$$

式中  $K$ ——岩石的碎胀系数；

$V_1$ ——岩石破碎膨胀后的体积；

$V$ ——岩石破碎前处于整体状态下的体积。

岩石的碎胀系数与岩石的物理性质、破碎后块度大小及其排列状态等因素有关。如坚

硬岩石破碎后块度较大且排列整齐时，碎胀系数较小；反之，如破碎后块度较小且排列较杂乱，则碎胀系数较大。

表1-4列出了几种常见岩石的碎胀系数。在井巷掘进中选用装载、运输、提升等设备的容器时，必须考虑岩石的碎胀系数。岩石爆破所需容许膨胀的空间大小也同该岩石的碎胀系数有关。

表1-4 几种常见岩石的碎胀系数

| 岩石名称     | 砂、砾石     | 砂质粘土     | 中硬岩石    | 坚硬岩石    | 煤    |
|----------|----------|----------|---------|---------|------|
| 碎胀系数 $K$ | 1.05~1.2 | 1.2~1.25 | 1.3~1.5 | 1.3~1.5 | <1.2 |

### 第三节 岩石的力学性质

#### 一、岩石的变形特征

岩石在外荷载作用下，因应力增加会发生相应的应变。当荷载增大到破坏值，或荷载达到某一数值而一直保持恒定，均会导致岩石破坏。变形和破坏是岩石在荷载作用下的两个发展阶段。变形中包含着破坏的因素，而破坏是变形发展所致。

##### 1. 岩石的弹性、塑性和脆性

岩石的弹性是指在外力作用下产生变形，当取消外力后，能完全恢复到原形状的性质。这种完全能恢复的变形，称为弹性变形。弹性变形是可逆的。岩石在弹性变形范围内，其应力  $\sigma$  与应变  $\epsilon$  的比值是一个常数，这个比值称为岩石的弹性模量，即

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

弹性模量  $E$  是衡量岩石抵抗变形能力的一个指标，其值越大，则岩石越不易变形。

岩石的塑性是指在外力作用下产生的变形，当取消外力后，仍保持变形后的形状和尺寸的性质。这种不能恢复的永久变形，称为塑性变形。塑性变形具有不可逆性。

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。

岩石受载后变形很小即破裂的性质称为脆性。永久变形或全变形小于3%者为脆性破坏，具有这种特性的岩石称为脆性岩石。永久变形或全变形大于5%者为塑性破坏，具有这种特性的岩石称为塑性岩石。永久变形或全变形为3%~5%为过渡状态。

岩石的弹性、塑性和脆性不是绝对的，可随受力状态、加载速度、温度等条件变化而变化。例如，多数岩石在单向或三向低压应力状态下表现出脆性，但在三向高压应力状态下脆性岩石在破坏前都表现出很大的塑性；在静荷载作用下产生塑性变形的岩石，在冲击荷载作用下脆性显著增长；在常温下表现为脆性的岩石在高温下塑性显著提高。

##### 2. 岩石的流变性质

岩石的变形特性与岩石类型、加载方式、载荷大小、岩石的物理状态等因素有关。另

外，许多岩石的变形并非在一瞬间完成，它与时间因素有密切关系。岩石的流变就是指岩石的应力应变随时间因素而变化的特性。岩石的流变性质表现在以下几个方面：

(1) 蠕变 在恒定载荷持续作用下，应变随时间变化而增长的现象称为蠕变。蠕变有两种情况：一是当岩石应力较小时，经过一定时间，应变能稳定下来，不再增加，称稳定蠕变；二是当岩石应力较大时，应变随时间变化而不断增加，直至岩石破碎，称不稳定蠕变。其间的临界应力即为岩石长期稳定的必要条件。井下某些含有粘土矿物的岩石，蠕变相当突出。如位于一些软岩中的巷道，经过几天甚至几小时以后，其断面就缩小到难以通行的程度。

(2) 后效弹性变形 岩石在弹性变形阶段，卸载以后，有一部分变形立刻恢复，还有一部分变形不能立刻恢复，但是经过一定时间仍能完全恢复。这部分变形，不是塑性变形，这种现象称为后效弹性变形。后效弹性变形的发展很缓慢，而且变形量所占的比值较小，通常只占弹性变形的百分之几，很少超过 10%。尽管如此，后效弹性变形在井下工程中仍有重要意义。

(3) 松弛 在应变保持一定的条件下，应力将随时间而逐渐减小的现象称为松弛。研究岩石变形的松弛性质可以更合理地选择井下支护形式。

## 二、岩石的强度特性

在载荷的作用下，岩石变形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极限载荷，用单位面积表示则称为极限强度。

对巷道而言，如围岩强度小于所受应力，则围岩要被破坏，可能发生冒顶、片帮和底鼓等现象；如围岩强度大于所受应力，则巷道可不支护而保持长期稳定。影响岩石强度的因素很多，如岩石的性质（岩石本身矿物成分、颗粒大小及胶结物的种类不同）、岩石的构造特征、试件的几何尺寸、岩石所处的物理状态、加载速率和岩石的受力状态等。

### 1. 岩石的抗压强度

岩石试件在压缩时所能承受的最大压应力值，称为岩石的抗压强度。它是目前井下采矿工程中使用最广泛的岩石力学特性参数。

岩石的抗压强度又分为两类：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；岩石试件在三向压应力作用下所能承受的最大轴向应力（或称最大的主应力），称为岩石的三向抗压强度。

通常，岩石中含高强度的矿物多、矿物颗粒间的连接力大、空隙度小，则岩石抗压强度大；反之，岩石抗压强度小。此外，在一定变化范围内，试件尺寸越小，加载速度越大，则抗压强度越大。

### 2. 岩石的抗拉强度

岩石试件在拉伸时能承受的最大拉应力值，称为岩石的抗拉强度。岩石的抗拉强度，主要受其内部因素的影响。如果组成岩石的矿物强度高、颗粒之间的连接力强且空隙不发育，则其抗拉强度高。

### 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，它也是反映岩石力学性质的主要参数之一。

煤矿中常见岩石的单向抗压强度、抗拉强度和抗剪强度见表 1-5。

表 1-5 煤矿中常见岩石强度值

MPa

| 岩石名称 |      | 抗压强度     | 抗拉强度     | 抗剪强度      |
|------|------|----------|----------|-----------|
| 煤    |      | 5~50     | 2~5      | 1.1~16.5  |
| 砂岩类  | 细砂岩  | 106~146  | 5.6~18   | 17.8~54.5 |
|      | 中砂岩  | 87.5~136 | 6.1~14.3 | 13.6~37.2 |
|      | 粗砂岩  | 58~126   | 5.5~11.9 | 12.6~31   |
|      | 粉砂岩  | 37~56    | 1.4~2.5  | 7~11.7    |
| 砾岩类  | 砂砾岩  | 71~124   | 2.9~9.9  | 7.2~29.4  |
|      | 砾岩   | 82~96    | 4.1~12   | 6.7~26.9  |
| 页岩类  | 砂质页岩 | 49~92    | 4~12.1   | 21~30.5   |
|      | 页岩   | 19~40    | 2.8~5.5  | 16~23.8   |
| 灰岩类  | 石灰岩  | 54~161   | 7.9~14.1 | 10~31     |

#### 4. 岩石各种强度之间的关系

岩石受力状态不同，其极限强度亦不同。实验研究可知，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 > 抗拉强度。

此外，实验证明，各种强度值有以下数量关系：

$$\text{抗拉强度/单向抗压强度} = 1/5 \sim 1/38$$

$$\text{抗剪强度/单向抗压强度} = 1/2 \sim 1/15$$

针对岩石强度的特点，在破岩时应使岩石单向或双向受力处于拉伸或剪切的状态，在井巷维护时应使岩石处于受压状态。

### 三、岩石的硬度

岩石的硬度，一般理解为岩石抵抗其他较硬物体侵入的能力。硬度与抗压强度既有联系又有区别。对于凿岩而言，岩石的硬度比岩石单向抗压强度更具有实际意义，因为钻具对孔底岩石的破碎方式多数情况下是局部压碎，所以，硬度指标更接近于反映钻凿岩石的实质和难易程度。

### 四、岩石的可钻性和可爆性

岩石可钻性表示岩石被破岩工具钻碎的难易程度。岩石可爆性表示爆破破岩的难易程度。它们是岩石物理力学性质在钻眼或爆破的具体条件下的综合反映。

岩石的可钻性和可爆性常用工艺性指标来表示，例如：可以采用钻速、钻每米炮眼所需要时间、钻头进尺（钎头在变钝以前的进尺数）、钻每米炮眼磨钝的钎头数或破碎单位体积岩石消耗的能量等来表示岩石的可钻性；可以采用爆破单位体积岩石所消耗的炸药，爆破单位体积岩石所需炮眼长度或单位重量炸药的爆破量及每米炮眼的爆破量等来表示岩