

Meikuang Hangdao Sheji Shigong Yu Jiance  
中央高校基本科研业务费基金资助项目(3142013100)

# 煤矿巷道 设计施工与监测

主编 郭志飏 张国华 石建军

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

中央高校基本科研业务费基金资助项目

# 煤矿巷道设计施工与监测

主 编 郭志飏 张国华 石建军

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统讲述了煤矿巷道的设计施工,巷道支护及巷道矿山压力观测等方面的知识。全书共分为五章,内容深度与广度循序渐进,理论与实践结合,结构合理,具有实用性、先进性和前瞻性。

本书可供采矿工程及相关专业本科生使用,也可供从事矿山科研、工程设计、工程管理方面的工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

煤矿巷道设计施工与监测/郭志飏,张国华,石建军主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2015. 3

ISBN 978-7-5646-2653-2

I. ①煤… II. ①郭… ②张… ③石… III. ①煤巷—巷道设计②煤巷—巷道施工③煤巷—巷道压力—监测  
IV. ①TD263.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 058062 号

书 名 煤矿巷道设计施工与监测  
主 编 郭志飏 张国华 石建军  
责任编辑 王美柱  
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 11.75 字数 293 千字  
版次印次 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷  
定 价 25.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

我国能源结构以煤炭为主的格局在今后较长一段时间内不可能改变。为了将煤炭从地下采出,首先要从地表开凿一系列井筒、巷道和硐室到达煤层,巷道是煤矿地下开采的重要组成部分,是煤矿生产的“动脉”,占煤矿掘进工程总长度的90%以上。煤矿巷道的设计、施工和监测至关重要,因此,编者决定编写本书,以作为矿业类高校采矿工程和矿山建设工程专业学习巷道设计、施工和矿压监测的教材。

本教材本着着眼目前,兼顾长远,注重实用性和针对性的原则,力求重点突出,结构合理,深入浅出,概念清晰,适应煤矿巷道工程技术发展要求。

本教材按60学时授课内容编写。全书共分五章:第一章为岩石的基本性质,第二章为巷道断面设计,第三章为巷道施工,第四章为巷道支护设计,第五章为巷道矿山压力观测。

参加本教材编写的人员及编写内容分工如下:中国矿业大学(北京)郭志飏副教授负责撰写第一章、第二章和第四章,黑龙江科技大学张国华教授负责撰写第五章,华北科技学院石建军副教授负责撰写第三章。

华北科技学院李昊,中国矿业大学(北京)硕士研究生张跃林、邓小卫、丁志龙、赵兰勇和王将做了大量的辅助编辑和文献整理工作,在此表示感谢。

全书由郭志飏、张国华、石建军统稿和定稿。

本书编写过程中参阅了许多专家、学者的著作和文献,在此一并致谢!

本书除作为本科生教材外,还可作为从事相关专业的科学研究人员、设计人员和现场工程技术人员参考用书。

由于时间仓促,加之编者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者不吝指正。

编 者

2014年12月

## 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第一章 岩石的基本性质 .....           | 1   |
| 第一节 岩石的结构和构造 .....          | 1   |
| 第二节 岩石的物理性质 .....           | 7   |
| 第三节 岩石的变形性质 .....           | 16  |
| 第四节 岩石的流变性及其模型研究 .....      | 23  |
| 第五节 岩石的强度性质及强度理论 .....      | 24  |
| 第六节 岩体质量评价及工程分级 .....       | 34  |
| 第二章 巷道断面设计 .....            | 40  |
| 第一节 断面类型与形状 .....           | 40  |
| 第二节 巷道断面尺寸确定 .....          | 44  |
| 第三节 水沟与管缆布置 .....           | 58  |
| 第四节 巷道断面设计实例 .....          | 61  |
| 第三章 巷道施工 .....              | 66  |
| 第一节 岩巷施工 .....              | 66  |
| 第二节 煤巷施工 .....              | 102 |
| 第三节 半煤岩巷施工 .....            | 105 |
| 第四节 上、下山施工 .....            | 107 |
| 第四章 巷道支护设计 .....            | 114 |
| 第一节 支护材料 .....              | 114 |
| 第二节 常规锚杆支护设计方法 .....        | 116 |
| 第三节 极限平衡区锚杆支护设计方法 .....     | 139 |
| 第四节 煤层巷道围岩预应力锚杆支护设计方法 ..... | 148 |
| 第五节 围岩松动圈锚喷支护设计方法 .....     | 153 |
| 第六节 软岩巷道工程支护设计方法 .....      | 157 |
| 第五章 巷道矿山压力监测 .....          | 164 |
| 第一节 概述 .....                | 164 |
| 第二节 巷道相对移近量监测 .....         | 165 |
| 第三节 巷道支柱载荷与变形监测 .....       | 168 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第四节 巷道围岩应力监测.....  | 171 |
| 第五节 巷道围岩松动圈测定..... | 175 |
| 参考文献.....          | 179 |

## 第一章 岩石的基本性质

在地下工程稳定性研究当中,研究岩体或岩石主要是研究其物理性质和力学性质,其次是从微观上研究其矿物组成和结构。这主要取决于煤矿地下工程者的两个主要研究目的,其一是岩体的开挖问题,即采用何种方式和工艺过程对岩体进行开挖,从而形成所需要的地下空间,如井下巷道和硐室;其二是岩体的维护问题,即采用何种支护方式来保证在岩体中所形成地下空间能够确保使用期间的安全,也即通过何种方式来保证其围岩的稳定。

从地质学的基本知识可知,岩体是指在地质历史过程中形成的,具有一定的岩石成分和一定结构,并赋存于具有一定地应力状态的地质环境中的地质体。岩体在形成过程中,长期经受着建造和改造两大地质作用,生成了各种不同类型的结构面,如断层、节理、层理、片理等。所以,岩体往往表现出明显的不连续、非均质和各向异性。具有一定的结构是岩体的显著特征之一,它决定了岩体的工程特性及其在外力作用下的变形破坏机理。由此可见,从抽象的、典型化的概念来说,可以把岩体看作由结构面和受它包围的结构体两部分共同组成的,而岩石是不含有结构面的矿物集合体,故在这种条件下,可以将岩石近似看作岩块(结构体)进行分析和研究。因此,有必要对岩石的基本性质进行全面的了解。

### 第一节 岩石的结构和构造

岩石作为多孔介质的一种,是各种矿物的集合体,是各种地质作用的产物,是构成地壳的物质基础。影响岩石基本性质的主要因素是岩石的矿物组成、岩石的结构和构造。

岩石的结构和构造对岩石的性质有重要影响。岩石的结构说明岩石的微观组织特征,是指岩石中矿物的结晶度、颗粒大小、形状和颗粒之间的联结方式。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时,含片状矿物较多的岩石往往呈现较强的各向异性;含颗粒状矿物较多的岩石,则常呈各向同性。沉积岩与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关系。硅质胶结的强度最大,铁质、钙质、泥质和凝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。岩浆石的流纹构造、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、岩块和岩体这三个术语。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;岩石则是不区分岩块和岩体的泛称。

岩体是地质体,它经历过多次反复地质作用,经受过变形,遭受过破坏,形成一定的岩石成分和结构,赋存于一定的地质环境中。由于各种地质作用的原因,在岩体中往往存在各种

地质界面,包括物质分异面和不连续面,如假整合、不整合、褶皱、断层、层理、节理和片理等。这些不同成因、不同特性的地质界面统称为结构面(弱面)。结构面依其本身的产状,彼此组合将岩体切割成形态不一、大小不等以及成分各异的岩石块体。正是由于弱面的存在,岩体强度通常小于岩块强度。

在自然界中,岩体极其复杂,不仅组成岩体的岩石“软”、“硬”差别极大,而且岩体还包含各种结构面,以及大量的微观裂隙等。因此,岩体远比迄今为止人类所熟知的任何工程材料都复杂。

在研究岩石的力学性质时,必须注意到岩体的非均质性、各向异性和不连续等问题。而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。

## 一、岩石的分类

目前,在岩石的分类当中,主要从以下两个方面进行:

1. 按其成因可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类

① 岩浆岩:在内力地质作用下,地球内部的岩浆沿地壳裂隙侵入地壳或喷出地面冷凝而成的岩石,称为岩浆岩。岩浆岩又称火成岩,其中,埋于地下深处或接近地表的称为侵入岩;喷出地表的称为喷出岩。

② 沉积岩:在外力地质作用下,岩石经过风化、剥蚀成岩石碎屑,经流水、风等搬运作用搬运到低洼处沉积下来,而后再经过压紧或化学作用硬结而成的岩石,称为沉积岩。

③ 变质岩:地壳的原岩(岩浆岩或沉积岩)因地壳运动、岩浆活动,在高温、高压和易发生化学反应的物质作用下,改变原岩的结构、构造和成分,形成一种新的岩石,称为变质岩。

2. 按其坚固性可分为硬质岩石和软质岩石两类

① 硬质岩石:其饱和单轴极限抗压强度 $\geq 30$  MPa 的岩石。常见的硬质岩石有花岗岩、石灰岩、石英岩、闪长岩、玄武岩、石英砂岩、硅质砾岩和花岗岩片麻岩等。

② 软质岩石:其饱和单轴极限抗压强度 $< 30$  MPa 的岩石。常见的软质岩石有页岩、泥岩、绿泥石片岩和云母片岩等。

除此之外,岩石按其风化程度可分为三类,即微风化岩石、中等风化岩石和强风化岩石。

## 二、岩石的矿物成分

岩浆岩、沉积岩及变质岩的内部细划分种类繁多,组成其岩石的矿物成分也各不相同。

对于岩浆岩,其中最常见的矿物成分包括浅色矿物(石英、正长石、斜长石、白云母等)和深色矿物(黑云母、闪石、辉石、橄榄石等)。这些矿物除黑云母外,都是硬度较大的矿物。所以未经强烈蚀变和剧烈错动的岩浆岩一般强度都较大,稳定性都比较好,有利于采用高效率、高效率的采掘方法。此外,在酸性岩中,含有较大量的游离的二氧化硅,在其中进行采掘作业时,有产生硅肺病的可能,必须加强通风防尘措施。

沉积岩的成分,包括矿物和胶结物。矿物中有石英、长石、云母等原生矿物和方解石、白云石、石膏、黏土矿物等次生矿物。胶结物按其硬度与抗风化力的大小,有硅质( $\text{SiO}_2$ )、钙质( $\text{CaCO}_3$ )、铁质( $\text{FeO}$  或  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )和泥质四种。沉积岩中对采掘影响的矿物成分有以下几类:

① 二氧化硅类矿物:主要有石英、燧石和蛋白石等。含这类矿物特多的岩石有石英砂



岩、硅质灰石和燧石灰石。该类矿物的特点是硬而脆,所以,当岩石中这些矿物含量高时,岩石的稳固性好。在掘进过程中,虽难于凿岩,但爆破效果好,且一般不需要支护。但因含游离的二氧化硅多,要特别注意防尘。

② 碳酸盐类矿物:主要有方解石、白云石、菱镁矿、菱锰矿等。含这类矿物多的岩石有石灰岩、白云岩和泥质灰岩等。这类岩石凿岩及爆破性能均好,岩体稳固性也较强,有利于采用快速掘进的方法。但由于含方解石较多,易于溶解而产生溶孔和溶洞,常是地下水活动的通道和储存的场所,矿山开采时,可能引起矿坑突然涌水而造成重大事故。因此,必须加强水文地质工作,搞好防排水措施。

③ 黏土类矿物:主要有高岭石、蒙脱石和水云母等。含这类矿物多的岩石有各种黏土岩、页岩及泥岩。这类岩石的特点是硬度小,具有可塑性,遇水膨胀、软化和黏结。具有凿岩性好(不包括黏土)、稳固性差、爆破性也差的特点。同时,它们长期受水浸泡时,会使地下坑道变形,露天边坡不稳,矿车结底,溜井和凿岩机水眼堵塞等。但是,只要加强防排水措施,就可以避免或减少上述问题的发生。

变质岩的矿物成分,除石英、长石、云母、方解石等矿物外,还具有特异的矿物滑石、绿泥石、蛇纹石和石榴石等。变质岩类岩石的矿物组成中,常因含一定数量的滑石、绿泥石和云母等,对采掘影响较大,这些矿物光滑柔软,且多呈片状,因而稳定性极差,不少矿山常因此而冒顶片帮,故在采矿过程中必须引起足够的重视。至于所含其他矿物组分,大多与岩浆岩和沉积岩相似,其采掘特点参见岩浆岩和沉积岩。

### 三、岩石的结构和构造

岩石的结构是指岩石中矿物的结晶程度、颗粒大小和形状以及彼此间的组合方式。这主要决定于地质作用进行的环境,在同一大类岩石中,由于它们生成的环境不同,就产生了种种不同的结构。

岩石的构造是指岩石中矿物集合体之间或矿物集合体与岩石的其他组成部分之间的排列方式以及充填方式。这反映着地质作用的性质。由岩浆作用生成的岩浆岩大多具有块状构造;由变质作用生成的变质岩,多数情况下它们的组成矿物都依一定方向作平行排列,具有片理状构造;由外力地质作用生成的沉积岩,是逐层沉积的,多具有层状构造。

#### 1. 岩浆岩的结构和构造

岩浆岩一般均较硬,绝大多数矿物均成结晶粒状紧密结合,常具块状流纹状及气孔状结构,原生节理发育。岩浆岩的结构,根据矿物的结晶程度、颗粒大小和均匀程度,分为四种:

① 显晶质结构:即等粒结构,岩石中的矿物全部为显晶质、粒状,且主要矿物颗粒大小近于相等,这种结构是在温度和压力较高、岩浆温度缓慢下降的条件下形成的,主要是深部侵入岩所具有的结构。

② 隐晶质结构:矿物颗粒在肉眼和放大镜下看不见,只有在显微镜下才能鉴别这种结构。从外表看,岩石断面是粗糙的。它是在岩浆很快冷却的情况下形成的,常为喷出岩所具有的结构。

③ 玻璃质结构:矿物没有结晶,岩石断面光滑,具有玻璃光泽,为喷出岩所特有的结构。

④ 斑状结构:岩石中较大晶体散布于较细物质之间的结构。大的晶体称为斑晶,细小的部分称为基质。这种结构主要是由于矿物结晶的时间先后不同造成的,在地下深处,温度

和压力较高,部分物质先结晶,生成一些较大的晶体即斑晶,随着岩浆岩的继续上升,到浅处或喷出地表,尚未结晶的物质,由于温度下降较快,迅速冷却形成结晶细小或不结晶的基质。因此,这种结构为浅成岩或喷出岩所具有。

岩浆岩的构造,指岩浆岩的外貌整体特征,它是由矿物集合体的排列方式和充填方式决定的。常见的构造有四种:

① 块状构造:组成岩石的各种矿物,无一定的排列方向,而是均匀分布于岩石之中,是侵入岩特别是深成岩所具有的构造。

② 流纹状构造:黏度大的岩浆在流动过程中,形成不同颜色的条纹或拉长的气孔,长条状矿物沿一定方向排列,所表现出来的熔岩流的流动构造。

③ 气孔状构造和杏仁状构造:岩石中分布着大小不同的圆形或椭圆形空洞,称为气孔状构造。它是岩浆冷却较快,所含气体占有一定空间位置,气体逸出,便形成空洞即气孔。当气孔被后来的硅质或钙质充填后,便形成杏仁状构造。这种构造为喷出岩所特有的构造。

④ 带状构造:岩石由不同成分的物质条带相间组成。主要发育在超基性岩和伟晶岩体中。

常见的岩浆岩包括:酸性、浅色的花岗岩、花岗斑岩和流纹岩;中性、浅色的正长岩、正长斑岩和粗面岩;中性、深色的闪长岩、玢岩和安山岩;基性、深色的辉长岩、辉绿岩和玄武岩;超基性、深色的橄榄岩和辉岩。

## 2. 沉积岩的结构和构造

沉积岩分布广泛,约占地球表面积的 75%。沉积岩的结构,按成因和组成物质不同,分为以下几种:

(1) 碎屑结构:碎屑沉积岩所具有的结构,是由碎屑物质被胶结起来而形成的,按照颗粒大小和形状分为:

① 砾状结构:颗粒直径大于 2 mm,磨圆程度较好,无棱角。若磨圆程度较差,而具有明显的棱角,则称为角砾状结构。

② 竹叶状结构:是指刚沉积的石灰岩,因水浪打击,冲刷而成碎屑(其形态多呈扁平状),再被同类沉积物胶结而成。

③ 砂状结构:颗粒直径在 2~0.005 mm,又可分为粗砂结构(粒径 2~0.5 mm)、中砂结构(粒径 0.5~0.1 mm)、细砂结构(粒径 0.1~0.05 mm)和粉砂结构(粒径 0.05~0.005 mm)。

(2) 泥质结构:颗粒直径小于 0.005 mm,是黏土类所具有的结构。

(3) 结晶结构:为化学岩所具有的结构。是物质从真溶液或胶体溶液中沉淀时的结晶作用以及非晶质、隐晶质的重结晶作用和交代作用所产生的。如石灰岩、白云岩是由许多细小的方解石、白云石晶体集合而成的。

(4) 胶状结构:颗粒直径小于 0.001 mm。

(5) 生物结构:是生物化学岩所具有的结构。由生物遗体及其碎片组成,如生物介壳结构和珊瑚结构等。

沉积岩的构造,最显著的特点是具有层理构造,常具有碎屑状、鲕状等特殊结构及层状结构,并富含生物化石和结核。常见的沉积岩构造有:

① 层理构造:由于季节性的气候变化及先后沉积下来的物质颗粒的形状、大小、成分和颜色不同而显示出来的成层现象。层与层之间的接触面称为层面,上下两个层面之间的岩

石称为岩层。根据岩层中每个单层厚度的不同,可将沉积岩层划分为:

|      |                |
|------|----------------|
| 块状   | 单层厚度大于1 m      |
| 厚层状  | 单层厚度1~0.5 m    |
| 中厚层状 | 单层厚度0.5~0.1 m  |
| 薄层状  | 单层厚度0.1~0.01 m |
| 页片状  | 单层厚度小于0.01 m   |

层理构造是绝大多数沉积岩最典型、最重要和最基本的特征。按层理形态可分为:

水平层理:层与层之间的界面是平直的,且相互平行。是在沉积环境比较稳定的条件下形成的。

波状层理:层理面成对称或不对称,规则或不规则的波状线,其总方向平行于总的层面,形成于波浪运动的浅水地区。这种层理在细砂岩或粉砂岩中常见。

斜层理:细层与主要层理面斜交。斜层理是沉积物在水介质中做单向运动时产生的。斜层理的倾斜方向代表了当时水流的方向。

② 块状构造:岩石层理不清楚,矿物颗粒排列无一定规律。

③ 鲕状构造:具有同心圆状的圆形或椭圆形颗粒,形似鱼子,称为鲕状构造。鲕粒直径一般在0.5~2 mm,鲕粒的形成是胶体物质围绕砂粒、碎屑在浅海浅水环境中沉积而成。鲕粒直径大于2 mm的可称为豆状构造。

沉积岩的种类包括碎屑岩(砾岩、角砾岩、砂岩、凝灰岩、火山角砾岩)、黏土岩(泥岩、页岩)、化学岩和生物化学岩(石灰岩、泥灰岩)四类(参见表1-1)。

表 1-1 沉积岩分类

| 类 别       | 岩石名称                                                   | 物 质 来 源                  | 结 构              | 沉 积 作 用          |
|-----------|--------------------------------------------------------|--------------------------|------------------|------------------|
| 碎屑岩       | 火山碎屑岩<br>集块岩<br>火山角砾岩<br>凝灰岩                           | 火山喷发的碎屑产物                | 火山碎屑结构           | 以机械沉积作用为主        |
|           | 正常碎屑岩<br>砾岩<br>角砾岩<br>砂岩<br>粉砂岩                        | 母岩机械破坏的碎屑产物              | 沉积碎屑结构           |                  |
| 黏土岩       | 黏土岩<br>泥岩<br>页岩                                        | 母岩化学分解过程中形成的新生矿物及少量细碎屑   | 泥质结构             | 机械沉积和胶体沉积作用      |
| 化学岩及生物化学岩 | 铝质岩<br>铁质岩<br>锰质岩<br>硅质岩<br>磷质岩<br>碳酸盐岩<br>盐岩<br>可燃有机岩 | 母岩化学分解过程中产生的溶液和生物生命活动的产物 | 胶体结构、结晶结构和生物碎屑结构 | 化学、胶体化学及生物化学沉积作用 |

### 3. 变质岩的结构和构造

变质岩的结构包括变晶结构(等粒、斑粒、鳞片)、变余结构和压碎结构,其中多为变晶结构。

① 变晶结构:是变质岩最重要的结构,由于这种结构是原岩中各种矿物同时再结晶形成的,所以矿物晶体相互嵌生。晶形的发育程度,并不取决于矿物的结晶顺序,而是取决于矿物的结晶能力,这是与岩浆岩的结晶结构不一样的。变晶结构又可细分为等粒变晶结构、斑状变晶结构和鳞片变晶结构三种。

② 变余结构:这是一种过渡型结构。由于变质作用进行得不彻底,在变质岩的个别部分,还残留着原来岩石的结构。这种结构对于判断原来岩石属于何类别,有着很大的意义。如变质岩的原岩是砂状沉积岩,则可出现变余砂粒结构或变余泥质结构;若变质岩的原岩是岩浆岩,则可能出现变余斑状结构等。变余结构一般常见于变质较轻的岩石中。

③ 压碎结构:由于动力变质作用,使岩石发生破碎而形成的,如碎裂岩等。

变质岩的构造是识别各种变质岩的重要标志。变质岩的构造分为片理构造、块状构造、条带状构造和斑点构造。

① 片理构造:是由于岩石中片状、板状和柱状矿物在定向压力的作用下重结晶,垂直压力方向成平行排列而形成的。顺着平行排列的面,可以把岩石劈成一片一片的小型构造形态。

② 块状构造:矿物无定向排列,其分布大致呈均一状,如石英岩、大理岩常具有这种结构。

③ 条带状构造:岩石中的矿物成分分布不均匀,某些矿物有时相对集中呈宽的条带,有时呈窄的条带,这些宽窄不等的条带相间排列,便构成条带状构造。混合岩常具有这种构造。

④ 斑点构造:当温度升高时,原岩中的某些成分(如碳质)首先集中凝结或起化学变化,形成矿物集合体斑点,其形状、大小可有不同,某些板岩具有这种结构。

常见的变质岩有块状的大理岩和石英岩,板状的板岩,片状的云母片岩、绿泥石片岩、滑石片岩、闪石片岩,片麻状的片麻岩等。

### 四、岩石结构和构造的研究意义

研究岩石的结构和构造,不仅对划分岩类、正确识别岩石有着实际的意义,而且在采掘工艺中,对于研究岩体稳定、井巷支护、爆破措施及选择采掘机械起着重要作用。

岩石具有许多结构,但对采掘影响最大的是颗粒的粗细。对于岩浆岩而言,在其他条件相似的情况下,隐晶质、细粒、均粒的岩石比粗粒和斑状的岩石强度大。例如,玄武岩为隐晶质结构,而辉长岩为粗粒结构,所以玄武岩的抗压强度可到达 500 MPa,而辉长岩的抗压强度仅为 120~360 MPa。又如花岗斑岩具有斑状结构,其抗压强度只有 120 MPa,而同一成分的细粒花岗岩因具有等粒结构,其抗压强度可达 260 MPa。强度大的岩石虽然较难凿岩,但却容易维护,甚至可以支护,给巷道稳定性控制带来很大的方便。沉积岩与岩浆岩相似,但对于碎屑岩,其物理机械性质主要取决于胶结物的成分和性质,泥质胶结比铁质或硅质胶结的岩石硬度小,稳固性差。

岩浆岩多具有块状构造。这种构造的最大特点是岩石各个方向的强度相近,从而可增

加岩石的稳定性。所以岩浆岩的块状构造,不像沉积岩的层理构造和变质岩的片理构造那样对凿岩、爆破和支护等有明显的影响。值得注意的是,岩浆岩的原生节理(即岩浆岩生成时冷凝收缩所产生的裂隙)发育,如玄武岩的柱状节理、细碧岩的枕状节理等。这些节理的存在,降低了岩石的稳固性,影响了岩石的爆破效果。

沉积岩最大的特点是具有层理构造,这种构造的存在,使岩石在各个方向的强度不同,在其他条件相同或相似的情况下,层理越发育,岩石的稳固性越低,各个方向的强度差异也越大。一般是平行岩石层理方向的抗压和抗剪强度小、抗拉强度大,而垂直于岩石层理方向情况则正好相反。在这类岩石中开掘巷道时,若顺着层理方向掘进,不仅爆破效果不好,而且容易产生冒顶、片帮事故,给采掘带来不利的影响;如果斜交,特别是垂直层理方向掘进时,则可以提高爆破效果,也可增加顶板及两帮的稳固性。

变质岩的构造尤其是片理构造对采掘影响更大,其影响同沉积岩的层理构造相似。如千枚岩、片岩及板岩的片理比较发育,岩石沿片理延伸方向结合力较低,故其稳定性极差。一般情况下,岩石的片理越发育,各个方向的强度相差越大,在平行片理的方向抗压和抗剪强度小、抗拉强度大;垂直片理方向则恰好相反。岩石片理发育时,对采掘极为不利,必须加强支护,其有效的办法是在垂直片理的方向采用锚喷支护,即可增强该类岩石的稳定性,避免冒顶和片帮。露天矿开采时,因片理所造成的岩石稳定性差,从而影响岩体的边坡稳定,但另一方面有时可以提高爆破效果。

## 第二节 岩石的物理性质

岩石的基本性质是岩石内部组成矿物成分、结构、构造的综合反映,研究岩石的基本性质对研究工程体的稳定性是有重要意义的,其研究内容包括岩石的物理性质和力学性质。其中,物理性质是自然状态下所表现出的特征,而力学性质则是反映在外力作用下所表现出的响应特征。不同的岩石其物理力学性质是不同的,即使是同一种性质的岩石,由于其形成过程及赋存环境等多种外界因素的不同,其所表现出的性质也有差别。

岩石的物理性质是其内部矿物基本性质、结构与构造的综合反映,研究主要包括以下几个内容。

### 一、岩石的密度

岩石的密度,是指单位体积岩石的质量。又可分为颗粒密度和块体密度。

岩石的颗粒密度( $\rho_s$ ),是指岩石固体骨架部分的质量与其对应的实体体积之比。它不包括岩石孔隙,其大小取决于组成岩石的矿物密度及其相对含量。

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

式中  $M_s$ ——岩石固体部分的质量;

$V_s$ ——岩石固体部分的体积。

岩石的块体密度,是指岩块单位体积的质量。按其含水情况的不同,可分为干密度( $\rho_d$ )、天然密度( $\rho$ )和饱和密度( $\rho_{sat}$ ),后两者又称为湿密度。岩石的块体密度除与矿物组成有关外,还与岩石的孔隙性及含水情况有关。致密而裂隙不发育的岩石,块体密度与颗粒密

度很接近,随着孔隙、裂隙增加,块体密度相应减小。

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_s + V_v} \quad (1-2)$$

$$\rho = \frac{M_s + M_w}{V_s + V_v} \quad (1-3)$$

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + \rho_w V_v}{V_s + V_v} \quad (1-4)$$

式中  $\rho_w$ ——水的密度;  
 $V_v$ ——岩石中孔隙所占的体积;  
 $M_w$ ——水的质量。

## 二、岩石的相对密度

岩石的相对密度是指单位体积岩石固体部分的质量与同体积水(4℃)的质量之比,即:

$$G = \frac{M_s}{V_s \rho_w} \quad (1-5)$$

式中  $M_s$ ——体积为  $V_s$  的岩石固体部分的质量;  
 $\rho_w$ ——单位体积水(4℃)的质量。

岩石的相对密度取决于组成岩石的矿物相对密度及其在岩石中的相对含量。常见岩石的相对密度参见表 1-2。

表 1-2 常见岩石的相对密度值

| 岩石名称 | 相对密度      | 岩石名称 | 相对密度      | 岩石名称   | 相对密度      |
|------|-----------|------|-----------|--------|-----------|
| 花岗岩  | 2.50~2.84 | 玄武岩  | 2.50~3.30 | 煤      | 1.35      |
| 正长岩  | 2.50~2.90 | 凝灰岩  | 2.50~2.70 | 片麻岩    | 2.68~3.01 |
| 闪长岩  | 2.60~3.10 | 砾岩   | 2.67~2.71 | 花岗岩片麻岩 | 2.60~2.80 |
| 辉长岩  | 2.70~3.20 | 砂岩   | 2.60~2.75 | 角闪片麻岩  | 3.07      |
| 橄榄岩  | 2.90~3.40 | 细砂岩  | 2.70      | 石英片岩   | 2.60~2.80 |
| 斑岩   | 2.60~2.80 | 黏土砂岩 | 2.68      | 绿泥石片岩  | 2.80~2.90 |
| 玢岩   | 2.60~2.90 | 砂质页岩 | 2.72      | 黏土质片岩  | 2.40~2.80 |
| 辉绿岩  | 2.60~3.10 | 页岩   | 2.57~2.77 | 板岩     | 2.70~2.90 |
| 流纹岩  | 2.65      | 石灰岩  | 2.40~2.80 | 大理岩    | 2.70~2.90 |
| 粗面岩  | 2.40~2.70 | 泥质灰岩 | 2.70~2.80 | 石英岩    | 2.53~2.84 |
| 响岩   | 2.40~2.70 | 白云岩  | 2.70~2.90 | 蛇纹岩    | 2.40~2.80 |
| 安山岩  | 2.40~2.80 | 石膏   | 2.20~2.30 |        |           |

## 三、岩石的重度

岩石的重度是指单位体积岩石的重力,即:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-6)$$

式中  $W$ ——岩石试件的重力；

$V$ ——岩石试件的体积(包括孔隙体积)。

按岩石的含水情况不同,重度也可分为天然重度、干重度和饱和重度,其意义参见岩石密度中的天然密度、干密度和饱和密度。岩石的天然重度取决于组成岩石的矿物成分、孔隙发育程度及其含水情况。大多数岩石的天然重度在  $23\sim 31\text{ N/cm}^3$  之间,参见表 1-3。

表 1-3 常见岩石的天然重度  $\text{N/cm}^3$

| 岩石名称  | 天然重度      | 岩石名称    | 天然重度      | 岩石名称    | 天然重度      |
|-------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| 花岗岩   | 23.0~28.0 | 致密灰岩    | 25.0~25.6 | 凝灰角砾岩   | 22.0~29.0 |
| 正长岩   | 24.0~28.5 | 坚硬致密灰岩  | 27.0      | 新花岗岩片麻岩 | 29.0~33.0 |
| 闪长岩   | 25.2~29.6 | 白云质灰岩   | 28.0      | 风化片麻岩   | 23.0~25.0 |
| 辉长岩   | 25.5~29.8 | 硅质灰岩    | 28.1~29.0 | 角闪片麻岩   | 27.6~30.5 |
| 斑 岩   | 27.0~27.4 | 页 岩     | 23.0~26.2 | 混合片麻岩   | 24.0~26.3 |
| 硅长斑岩  | 22.0~27.4 | 砂质钙质页岩  | 25.0~25.5 | 片麻岩     | 23.0~30.0 |
| 玢 岩   | 24.0~28.6 | 砂质页岩    | 26.0~27.0 | 片 岩     | 29.0~29.2 |
| 辉绿岩   | 25.3~29.7 | 坚固的页岩   | 28.0~29.0 | 特坚硬石英岩  | 30.0~33.0 |
| 粗面岩   | 23.0~26.7 | 砂 岩     | 22.0~27.1 | 坚硬细石英岩  | 28.0      |
| 安山岩   | 23.0~27.0 | 泥质胶结砂岩  | 22.0~23.6 | 片状石英岩   | 28.0~29.0 |
| 玄武岩   | 25.0~31.0 | 硅质胶结砂岩  | 25.0~25.7 | 风化石英岩   | 27.0      |
| 凝灰岩   | 22.9~25.0 | 石英砂岩    | 26.1~27.0 | 大理岩     | 26.0~27.0 |
| 火山凝灰岩 | 16.0~19.5 | 砾 岩     | 24.0~26.6 | 白云岩     | 21.0~27.0 |
| 蛇纹岩   | 26.0      | 胶结差的砾岩  | 22.0~23.3 | 板 岩     | 23.1~27.5 |
| 灰 岩   | 23.0~27.7 | 钙质胶结砾岩  | 23.0~24.1 | 蛇纹岩     | 26.0      |
| 泥质灰岩  | 23.0      | 岩浆岩卵石砾岩 | 29.0      |         |           |

研究岩石的密度、相对密度、重度对地下工程来说,其影响主要表现为能够对岩体的开挖方式进行定性分析。一般来说,岩石的密度或重度越大,表明其质地越坚硬,在选择开挖方法和机械设备时宜采用炮掘或选用功率较大的开挖机械。但该性质绝不是决定性因素,因为岩体是否容易开挖还取决于其内部节理裂隙的发育程度。

#### 四、岩石的孔隙性

岩石的孔隙性是岩石孔隙性和裂隙性的统称。岩石孔隙性的度量通常有两种:一种是用孔隙率来表示,也可以用孔隙率和裂隙率来表示;另一种是用岩石的孔隙比来表示。岩石的孔隙性对岩石的其他性质有重要的影响,如岩石的密度、含水性、透水性、变形性质等。

岩石的孔隙率,是指岩石中孔隙体积与岩石总体积之比,以百分率表示。岩石中的孔隙有的与外界相通,有的不相通,孔隙开口有大有小。因此,岩石的孔隙率可以根据孔隙类型分为总孔隙率、总开孔隙率、大开孔隙率、小开孔隙率和闭孔隙率五种。

设  $V$  为岩石体积; $V_v$  为孔隙总体积; $V_{v0}$  为总开孔隙体积; $V_{vb}$  为大开孔隙体积; $V_{vs}$  为小开孔隙体积; $V_{vc}$  为闭孔隙体积。这五种孔隙率的计算公式分别为:

总孔隙率:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% = (1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}) \times 100\% \quad (1-7)$$

总开孔隙率:

$$n_o = \frac{V_{v0}}{V} \times 100\% \quad (1-8)$$

大开孔隙率:

$$n_b = \frac{V_{vb}}{V} \times 100\% \quad (1-9)$$

小开孔隙率:

$$n_s = \frac{V_{vs}}{V} \times 100\% \quad (1-10)$$

闭孔隙率:

$$n_c = \frac{V_{vc}}{V} \times 100\% \quad (1-11)$$

岩石的孔隙比,是指岩石中总孔隙的体积与岩石固体实体部分的体积之比,一般以  $e$  表示,即:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-12)$$

通过变化很容易得到岩石的孔隙率  $n$  与岩石的孔隙比  $e$  之间的关系,其关系为:

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-13)$$

一般工程中所提到的岩石孔隙率是指总孔隙率。岩石因形成条件及其后期经受的变化和埋藏深度不同,孔隙率变化范围很大,可自小于百分之一到百分之几十。新鲜的结晶岩类的孔隙率一般小于 3%;而沉积岩则较高,为 1%~10%,有些胶结不良的砂砾岩,孔隙率可以达到 10%~20%,甚至更大。常见岩石的孔隙率见表 1-4。

在煤矿生产中,研究岩石的孔隙性主要体现在瓦斯灾害防治和瓦斯资源开采以及矿井水害防治方面,主要是研究岩石的渗透性,即岩石的孔隙越发育,则为瓦斯赋存提供的空间越多,孔隙之间的贯通性越好,表明岩石的渗透率越高,瓦斯或水的外排越容易。

表 1-4 常见岩石的孔隙率

| 岩石类型 | 颗粒密度<br>$\rho_s / (\text{g}/\text{cm}^3)$ | 块体密度<br>$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$ | 孔隙率<br>$n / \%$ | 吸水率<br>$/ \%$ |
|------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|---------------|
| 花岗岩  | 2.50~2.84                                 | 2.30~2.80                               | 0.4~0.5         | 0.1~4.0       |
| 闪长岩  | 2.60~3.10                                 | 2.52~2.96                               | 0.2~0.5         | 0.3~5.0       |
| 辉绿岩  | 2.60~3.10                                 | 2.53~2.97                               | 0.3~5.0         | 0.8~5.0       |
| 辉长岩  | 2.70~3.20                                 | 2.55~2.98                               | 0.3~4.0         | 0.5~4.0       |
| 安山岩  | 2.40~2.80                                 | 2.30~2.70                               | 1.10~4.5        | 0.3~4.5       |
| 玢岩   | 2.60~2.84                                 | 2.40~2.80                               | 2.1~5.0         | 0.4~1.7       |
| 玄武岩  | 2.60~3.30                                 | 2.50~3.10                               | 0.5~7.2         | 0.3~2.8       |
| 凝灰岩  | 2.56~2.78                                 | 2.29~2.50                               | 1.5~7.5         | 0.5~7.5       |



续表 1-4

| 岩石类型  | 颗粒密度<br>$\rho_s/(g/cm^3)$ | 块体密度<br>$\rho/(g/cm^3)$ | 孔隙率<br>$n/\%$ | 吸水率<br>$/\%$ |
|-------|---------------------------|-------------------------|---------------|--------------|
| 砾 岩   | 2.67~2.71                 | 2.40~2.66               | 0.4~10.0      | 0.3~2.4      |
| 砂 岩   | 2.60~2.75                 | 2.20~2.71               | 1.6~28.0      | 0.2~9.0      |
| 页 岩   | 2.57~2.77                 | 2.30~2.62               | 0.4~10.0      | 0.5~3.2      |
| 石灰岩   | 2.48~2.85                 | 2.30~2.77               | 0.5~27.0      | 0.1~4.5      |
| 泥灰岩   | 2.70~2.80                 | 2.10~2.70               | 1.0~10.0      | 0.5~3.0      |
| 白云岩   | 2.60~2.90                 | 2.10~2.70               | 0.3~25.0      | 0.1~3.0      |
| 片麻岩   | 2.63~3.01                 | 2.30~3.00               | 0.7~2.2       | 0.1~0.7      |
| 石英片岩  | 2.60~2.80                 | 2.10~2.70               | 0.7~3.0       | 0.1~0.3      |
| 绿泥石片岩 | 2.80~2.90                 | 2.10~2.85               | 0.8~2.1       | 0.1~0.6      |
| 千枚岩   | 2.81~2.96                 | 2.71~2.86               | 0.4~3.6       | 0.5~1.8      |
| 泥质板岩  | 2.70~2.85                 | 2.30~2.80               | 0.1~0.5       | 0.1~0.3      |
| 大理岩   | 2.80~2.85                 | 2.60~2.70               | 0.1~6.0       | 0.1~1.0      |
| 石英岩   | 2.53~2.84                 | 2.40~2.80               | 0.1~8.7       | 0.1~1.5      |

## 五、岩石的吸水性

由于岩石是一种多孔介质,在工程环境条件下(如井下潮湿的环境等),常常内部含有一定的水,由于水的侵入使得岩石的物理力学性质发生很大的变化,这在岩体工程体中是经常要考虑的。

岩石的吸水性,是指岩石在一定试验条件下的吸水性能。它取决于岩石的孔隙数量、大小、开闭程度和分布情况。表征岩石吸水性的指标有吸水率、饱和吸水率和饱水系数。

岩石的吸水率( $w_a$ ),是指岩石试件在一个大气压和室温条件下自由吸入水的质量( $M_{w1}$ )与试件干质量( $M_s$ )之比,用百分率表示,即:

$$w_a = \frac{M_{w1}}{M_s} \times 100\% \quad (1-14)$$

实测时先将岩石试样烘干并称干质量,然后浸水饱和。由于试验是在一个大气压(常压)下进行的,岩石吸水时,水只能进入大开孔隙,而不能进入闭孔隙和小开孔隙。因此,可用吸水率来计算岩石的大开孔隙率,即:

$$n_b = \frac{V_{vb}}{V} = \frac{\rho_d \cdot w_a}{\rho_w} = \rho_d w_a \quad (1-15)$$

式中  $\rho_w$ ——水的密度。

岩石的饱和吸水率( $w_p$ ),是指岩石试件在高压(一般为 15 MPa)或真空条件下吸入水的质量( $M_{w2}$ )与岩石试样干质量之比,用百分数表示,即:

$$w_p = \frac{M_{w2}}{M_s} \times 100\% \quad (1-16)$$

这种条件下,通常认为水能进入所有开孔隙中,因此,岩石的总开孔隙率为: