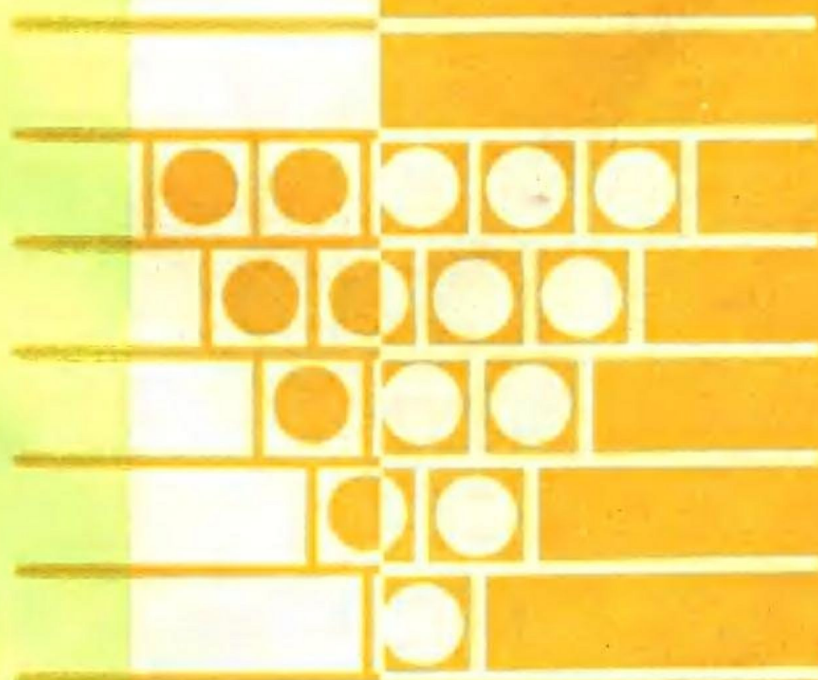


高等学校教学用书

矿山开采沉陷学

何国清 杨伦 凌赓娣 贾凤彩 洪钲 编



中国矿业大学出版社

TD327

1

3

高等学校教学用书

矿山开采沉陷学

何国清 杨 伦 凌赓娣

贾凤彩 洪 鍈

编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了矿山开采沉陷(原称矿山岩层和地表移动)的基本理论、研究方法和应用技术。全书分两篇,第一篇为矿山开采沉陷的基本理论和研究方法,包括:基本概念、观测方法、一般规律、预计、数据处理方法和模拟研究方法,第二篇为矿山开采沉陷的防治方法,包括:保护煤柱留设,建筑物下、水体下、铁路下(简称“三下”)开采技术,井柱开采方法和开采沉陷对环境的影响及其治理。

本书为煤炭高校矿山测量专业本科生教材,也可供有关专业研究生、生产技术人员、设计人员和科学研究人员参考。

责任编辑:洪 铄

技术设计:关湘雯

高等学校教学用书

矿山开采沉陷学

何国清、杨伦、凌赓娣、贾凤彩、洪铄 编

中国矿业大学出版社 发行

江苏省新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本787×1092毫米1/16 印张 24 字数 581 千字

1991年4月第1版 1991年4月第1次印刷

印数1—3000册

ISBN 7-81021-449-7

TD·90 定价:6.15元



注:凡本社出版的图书,如发现印装错误请退回出版社,本社均予更换

前 言

《矿山开采沉陷学》是在中国矿业学院、阜新矿业学院、焦作矿业学院编写，于1981年由煤炭工业出版社出版的《煤矿岩层与地表移动》一书的基础上，吸收近十年来矿山开采沉陷及其相关学科的新技术、新成果和教学经验，扩充、改编而成。它是根据教学大纲为煤炭高校矿山测量专业本科生所编的教材，编写时也考虑了供有关专业的研究生、生产技术人员、科研设计人员参考的要求。

本书的内容涉及面较广，学生在学习本课程以前，一般应先学习以下课程：测量学、高等数学、算法语言、普通物理、线性代数、概率论与数理统计、矿井地质、开拓与开采、矿山测量、弹性力学、误差理论与测量平差等。

本书共分两篇，第一篇为矿山开采沉陷的基本理论和研究方法，包括：基本概念、观测方法、一般规律、预计、数据处理方法和模拟研究方法，这一篇一般学生都应该学习；第二篇为矿山开采沉陷的防治方法，其中除第七章保护煤柱留设学生应该学习之外，第八章至十二章涉及“三下”（建筑物下、水体下、铁路下）和井柱开采技术、开采沉陷对环境的影响和整治等内容，可根据实际情况进行选修。为了帮助学生复习，在某些章节之后，还列出了作业题。

本书由何国清主编。执笔编写的有：何国清（前言、绪论、第四、五、十二章、第六章第一、二节），杨伦（第九、十、十一章），凌赓娣（第三、七、八章），贾凤彩（第一、二章）和洪镀（第六章第三节）。

本书编写过程中，马伟民老师审阅了书稿，提出了许多很好的意见；王金庄、聂孟荀老师也给予了热情的支持和帮助；还有许多老师和同志提出了许多宝贵的意见，在此一并表示感谢。

由于编者学识有限，经验不足，书中一定存在不少缺点甚至错误，恳请读者提出批评指正。

编 者
1989年10月

目 录

绪 论	(1)
第一篇 矿山开采沉陷	(3)
第一章 基本概念	(5)
第一节 岩石的物理力学性质	(5)
第二节 地下开采引起的岩层移动	(20)
第三节 地下开采引起的地表移动和破坏	(27)
第四节 地表移动盆地内移动和变形分析	(37)
第五节 地表移动盆地边界的确定	(42)
第二章 开采沉陷的观测工作	(45)
第一节 概述	(45)
第二节 地表移动观测站设计	(47)
第三节 地表移动观测站的观测工作	(49)
第四节 观测成果的整理	(57)
第五节 岩层移动的观测工作	(65)
第六节 开采沉陷观测新技术简介	(73)
第三章 地表沉陷的一般规律	(79)
第一节 地表移动盆地稳定后主断面内移动和 变形分布规律	(79)
第二节 采动过程中地表移动和变形的一般规律	(84)
第三节 地表下沉盆地稳定后全面积开采沉陷分布规律	(92)
第四节 地质采矿因素对开采沉陷的影响	(94)
第五节 复杂地质条件对地表沉陷的影响	(104)
第四章 开采沉陷的预计	(116)
第一节 概述	(116)
第二节 概率积分法	(118)
第三节 典型曲线法	(148)
第四节 剖面函数法	(157)
第五节 地表移动盆地内任意点的移动和变形预计	(166)
第六节 开采沉陷预计的专门问题	(183)
第五章 开采沉陷实测资料的数据处理	(188)
第一节 概述	(188)
第二节 观测站实测参数的求定及移动变形分布 规律的研究	(189)

第三节	多个观测站实测预计参数的综合分析	(194)
第六章	开采沉陷的模拟研究方法	(204)
第一节	概述	(204)
第二节	开采沉陷的理论模拟法	(206)
第三节	相似材料模型法	(219)
第二篇	矿山开采沉陷的防治	(241)
第七章	保护煤柱留设	(243)
第一节	保护煤柱留设原理	(244)
第二节	保护煤柱留设所用参数	(244)
第三节	保护煤柱留设方法	(248)
第四节	各种类型煤柱的留设方法	(258)
第五节	保护煤柱留设工作的管理	(268)
第八章	建筑物下采煤	(270)
第一节	概述	(270)
第二节	开采沉陷对建筑物的影响	(271)
第三节	建筑物变形和破坏与地表变形的关系	(277)
第四节	建筑物下采煤的防护措施	(287)
第五节	保护地面建筑物的条带开采法	(294)
第六节	建筑物下采煤的实施方法	(301)
第七节	建筑物下开采时的观测工作	(302)
第八节	采动区内抗变形建筑物的设计	(304)
第九章	水体下采煤	(309)
第一节	概述	(309)
第二节	覆岩破坏规律	(310)
第三节	水体下采煤条件的分析	(318)
第四节	水体下采煤的技术措施	(320)
第五节	水体下采煤的观测工作	(321)
第十章	铁路下采煤	(330)
第一节	概述	(330)
第二节	路基的移动和变形	(331)
第三节	线路上部建筑的移动和变形	(333)
第四节	铁路下采煤的技术措施	(335)
第五节	铁路下采煤的观测工作	(338)
第十一章	地下开采对立井的影响及防护	(342)
第一节	井筒煤柱开采对立井的影响及计算	(342)
第二节	柱外开采引起井筒的偏斜和破坏	(347)
第三节	立井煤柱回采的技术措施	(349)
第四节	立井偏斜与变形观测	(354)
第十二章	开采沉陷对环境的影响及其整治	(357)

第一节 概述.....	(357)
第二节 开采沉陷引起的环境影响评价.....	(359)
第三节 开采沉陷对土地影响的整治.....	(367)
参考文献.....	(371)

绪 论

有用矿物被采出以后，开采区域周围的岩体的原始应力平衡状态受到破坏，应力重新分布，达到新的平衡。在此过程中，使岩层和地表产生连续的移动、变形和非连续的破坏（开裂、冒落等），这种现象称为“开采沉陷”（Mining subsidence）。

广义上说，有用矿物的开采可以是井工方法开采，也可以是露天方法开采；开采的有用矿物可以是层状的也可以是非层状的。由于本书是为煤炭系统高校学生编写的教材，因而书中提及的有用矿物的开采，主要指的是层状有用矿物（特别是煤层）的井工开采，“开采沉陷”也是特指煤层地下开采后产生的开采沉陷。但是，本书所介绍的一些方法（如模拟方法），也适用于非层状的其他矿物开采（包括露天开采）的研究。

岩体本身是一种非常复杂的介质，它不仅是由各种不同性质的岩层组成，而且还由于各种地质作用（如褶皱、断层、开裂、火成岩侵入、陷落柱等）而产生了大量的不连续面。岩体在受到各种不同开采方法的开采影响时，产生的开采沉陷是一个在时间和空间上都是非常复杂的过程。在时间上来说，在移动过程中，开采沉陷的形式和大小在不同的时间是不同的，也就是说，此时的开采沉陷是“动态的”；随着时间的推移，开采沉陷的形式和大小逐渐趋向于稳定，开采沉陷变成“静态的”或“最终的”。从空间上来说，若地下开采的范围较小、开采的矿物的埋藏深度较大，则开采沉陷波及的范围往往只局限于开采区域周围的岩体；若开采范围较大、开采矿物的埋藏深度较小，则开采沉陷波及的范围就会从岩体发展到地表，引起“地表移动”（Ground movement）。由于人类的生产和生活活动大部分都是在地表进行，所以地表移动对人类的影响更为普遍。

从研究史上来说，开采沉陷曾经用过“矿山岩层和地表移动”这个名称，有些国家（如苏联）目前仍沿用这一名称。由于开采沉陷的力学机制（不仅仅是“移动”）正在越来越受到广大开采沉陷工作者的重视，研究领域也越来越宽（如开采沉陷的模拟、开采沉陷对环境的影响等都被作为研究内容），所以，应用许多国家通用的“开采沉陷”这一名称更为合适。1986年，在江苏省苏州市召开的全国开采沉陷学术讨论会上已就这一点取得了较为一致的意见。

开采沉陷的研究对国民经济的发展和人民生活水平的提高都有着重要的意义。为了进行现代化建设，需要开采大量的有用矿物，但是开采这些有用矿物产生的开采沉陷，又反过来影响和破坏岩体内和地面上的一些生产和生活设施，影响生产的发展和人民生活水平的提高。要解决好这个矛盾，只有依靠对开采沉陷的深入研究。仅仅从我国“三下”（建筑物下、水体下和铁路下）压煤的情况来看，就可以显示出开采沉陷研究的重要性：据1982年底的不完全统计，我国生产矿井“三下”压煤量总计达到133.48亿吨，其中建筑物下78.18亿吨、水体下（包括承压灰岩水上）36.39亿吨、铁路下18.91亿吨。如果通过开采沉陷的研究，能将我国“三下”压煤哪怕只“解放”出来一半，就可供66个年产100万吨的大型矿

井生产100年。但是，到目前为止，我国从“三下”采出的煤炭尚不足7亿吨，只占整个“三下”压煤量的5%左右。由此可见，开采沉陷的研究现状还远远不能满足生产和我国现代化建设的需要。

开采沉陷对人类生产和生活的影响早已被人们所认识。早在15至16世纪，在比利时曾经发布过一项法令，对因进行开采而使列日城的水源(含水层)受到破坏的责任者处以死刑。但由于开采沉陷研究不够，在本世纪初以前，因为地下开采使铁路、房屋遭到破坏，井下透水造成人员死亡的惨案时有发生。1875年德国的约汉·载梅尔矿，由于地表塌陷使铁路的钢轨悬空、影响列车运行；1895年德国柏留克城地面突然塌陷、毁坏了31所房屋；1916年日本海下采煤时，海水沿着由于开采而扩大的构造裂缝溃入井下，使得矿井全部淹没，237人死亡。

由于开采沉陷研究的重要性，各国矿山工程技术人员投入了越来越多的时间、技术和装备来进行此项研究。苏联、波兰、联邦德国、澳大利亚、英国、加拿大、日本和美国等国家，对开采沉陷的理论和“三下”开采技术都进行了深入的研究，并取得了丰硕的成果。我国对开采沉陷的研究工作是从新中国成立以后开始的。50年代起，在我国的一些主要矿区，如淮南、开滦、抚顺、阜新、峰峰、大同、鹤岗、新汶、阳泉、本溪等，先后建立了地表观测站，开展了开采沉陷观测工作。经过近40年的努力，我国不仅积累了上千条观测线的实测资料，并由此对开采沉陷的基本规律有了进一步的认识，而且还提出了具有我国特色的预计方法，在“三下”开采实践中，也取得了很大的成绩，积累了较为丰富的经验。

长期的开采沉陷理论研究和生产实践表明，开采沉陷研究涉及测量、采矿、力学、电子计算机、建筑、地质等许多学科的知识。近二三十年来，这些学科的新成果不断被引进到开采沉陷研究中来，使开采沉陷的研究得到了飞速的发展。目前开采沉陷已经发展成为一门独立的、边缘性的学科。但是，和生产发展及现代化建设的要求相比，目前的开采沉陷研究还显得很不够。这就要求我们在学习前人经验的基础上，不断探索，努力在开采沉陷的理论研究、科学试验、应用技术开发和模拟、测试技术研究上多做工作，为实现我国社会主义现代化而努力奋斗。

第一篇 矿山开采沉陷

第一章 基本概念

第一节 岩石的物理力学性质

一、概述

岩石是组成地壳的基本物质。在自然状态下的岩石，按其固体矿物颗粒间的结合特征，可区分为：固结性岩石，粘结性岩石，散粒状岩石，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呈刚性联系，破碎后可以保持一定的形状。在矿山开采过程中，遇到的大多属于此类岩石，如砂岩、石灰岩、砂质页岩、泥质页岩、泥页岩、粉砂岩等。

在矿山开采之前，地下岩石处于相对静止状态，保持着岩石内部的应力平衡。采矿工程实施中，为了从地下采出煤炭或其它矿石，必须要开掘一系列的井筒、巷道、峒室、采场等，因此，使一定范围内的原有应力状态受到破坏，引起岩层内部应力的重新分布，直至达到新的平衡。岩层内部应力形成新平衡的过程，是周围岩层乃至地表产生移动和变形的过程。

岩层及地表的沉陷过程受很多因素的影响，其中岩石的物理力学性质起着重要的作用，它决定着各种现象的显现。因此，在研究有关岩层及地表沉陷时，必须对呈现沉陷的主体——岩石的物理及力学性质有所了解。岩石的物理力学性质主要是指岩石的结构、构造、湿度、比重、质量密度(重力密度)、空隙性、碎胀性、吸水性、透水性、强度性质、应力-应变性质等。有关岩石的结构和构造问题已在地质学中作过详细介绍，这里不再赘述。

二、岩石的物理性质

(一) 岩石的湿度

具有自然湿度的岩石试样中所含水的重量与绝对干燥的岩石试样重量之比，称为岩石的湿度。岩石湿度一般用百分数表示：

$$W = \frac{G - G_1}{G_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 W ——岩石的湿度；
 G ——具有自然湿度的岩石试样的重量；
 G_1 ——烘干后的岩石试样的重量。

岩石的湿度直接影响岩石的强度性质，所以在测定岩石强度时，需首先测定岩石的湿度。岩石湿度一般是在试验室内利用含天然水的试样测定。为了准确地测定岩石的自然湿度，在采样后应立即放在封闭的容器内，以免湿度受大气影响后发生变化。

(二) 岩石的比重和质量密度(重力密度)

1. 岩石的比重

岩石的比重是指单位体积岩石固体部分的重量与同体积水（4°C）的重量之比。比重可在试验室内测定。其计算公式如下：

$$\delta = \frac{G_2}{v_0 \gamma_{w(4^\circ\text{C})}} \quad (1-2)$$

式中 δ ——岩石的比重；
 G_2 ——绝对干燥时岩石固体部分的重量；
 v_0 ——岩石固体部分的体积；
 $\gamma_{w(4^\circ\text{C})}$ ——4°C时水的质量密度。

岩石比重的大小取决于组成岩石的矿物比重及其在岩石中的相对含量，而与岩石的孔隙性和吸水性无关。煤矿中常见岩石的比重如表1-1。

表1-1 某些岩石的比重

岩石名称	比重	岩石名称	比重
砾岩	2.61~2.71	石灰岩	2.40~2.80
砂岩	2.60~2.75	泥质灰岩	2.70~2.80
细砂岩	2.70	石英岩	2.53~2.84
粘土质砂岩	2.68	煤	1.98
砂质页岩	2.72		
页岩	2.57~2.77		

2. 岩石的质量密度（重力密度）[注]

岩石的质量密度是指单位体积岩石的质量，用下式表示：

$$\rho = \frac{G}{v} \quad (1-3)$$

式中 G ——具有自然湿度的岩石试样的质量，g；
 v ——包括孔隙在内的岩石试样的体积，cm³；
 ρ ——岩石的自然质量密度，g/cm³。

按岩石的含水状况不同，岩石的质量密度可分为干质量密度、自然质量密度和饱和质量密度。自然质量密度和饱和质量密度又统称为湿质量密度。干质量密度是干燥状态下单位体积岩石的质量。

岩石的质量密度取决于岩石所含矿物的成分、胶结物的性质、空隙发育程度及含水情况等。由于一般岩石空隙较少，其干质量密度与湿质量密度在数值上相差不大，因此，岩石的质量密度和比重比较接近。试验室提供的一般为干质量密度。

[注]：过去常用的“岩石容重”，既包含与“质量”有关的概念，又包含与“重力”有关的概念，很不严密。按照有关国家标准，今后凡在指质量（在贸易和人民生活中习惯把质量称为重量）的场合下，都称作质量密度，简称密度，用 ρ 表示；凡在指重力的场合下，都称作重力密度，简称重度，用 γ 表示。质量密度的定义是：单位体积材料（包括岩石和土）的质量，计量单位为kg/m³。重力密度的定义是：单位体积材料所受的重力，计量单位为N/m³。例如，在计算煤的储量和土石方量时，要用质量概念(kg/m³)；在计算岩石和煤的应力和压强时，要用重力概念(N/m³)。二者的单位可按下列公式换算：1 kgf \approx 10N。关于这个问题，本书中已经采用新的规定，请读者注意——责任编辑。

岩石质量密度的大小,在一定程度上反映了岩石的力学性质,一般是质量密度越大,力学强度也大。岩石质量密度是矿山常用的指标。现将常用的岩石的质量密度(重力密度)列于表1-2。

表1-2 某些岩石的质量密度(重力密度) [40, 43]

岩石名称	干质量密度 g/cm ³ (干重力密度 N/cm ³)	湿质量密度 g/cm ³ (湿重力密度 N/cm ³)
砂岩	1.57~2.65 (1.57~2.65 × 10 ⁻²)	1.96~2.75 (1.96~2.75 × 10 ⁻²)
石灰岩	(1.96~2.75 × 10 ⁻²)	2.16~2.75 (2.16~2.75 × 10 ⁻²)
砂质页岩	2.35~2.65 (2.35~2.65 × 10 ⁻²)	2.35~2.75 (2.35~2.75 × 10 ⁻²)
泥质页岩	2.16~2.65 (2.16~2.65 × 10 ⁻²)	2.16~2.65 (2.16~2.65 × 10 ⁻²)
砾岩	1.57~1.86 (1.57~1.86 × 10 ⁻²)	1.77~1.96 (1.77~1.96 × 10 ⁻²)
石英岩	1.86~2.55 (1.86~2.55 × 10 ⁻²)	2.16~2.55 (2.16~2.55 × 10 ⁻²)
花岗岩	2.26~2.65 (2.26~2.65 × 10 ⁻²)	2.35~2.65 (2.35~2.65 × 10 ⁻²)
煤	1.18~1.37 (1.18~1.37 × 10 ⁻²) 一般取 1.27~1.32 (1.27~1.32 × 10 ⁻²)	1.18~1.47 (1.48~1.47 × 10 ⁻²)

注: 括号中为重力密度的数值和单位。

(三) 岩石的空隙性

岩石的空隙性是岩石中孔隙性和裂隙性的统称。岩石中孔隙和裂隙的发育程度,用空隙率表示。岩石的空隙率是指岩石的空隙体积与岩石总体积之比,其值按下式计算(用百分数表示):

$$n = \frac{v'}{v} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 n ——岩石的空隙率;
 v' ——岩石试样中孔隙和裂隙的总体积;
 v ——包括空隙在内的试样体积。

空隙率也可用岩石的比重和质量密度来计算,即

$$n = \frac{\delta - \rho}{\delta} \times 100\% \quad (1-5)$$

空隙性对岩石的其它性质有显著的影响。一般说来,空隙率大的岩体,其整体性较差,岩石的质量密度较小,强度较低,而透水性较好,风化速度较快,反之亦然。煤矿中常见岩石的空隙率列于表1-3。

(四) 岩石的碎胀性及碎胀系数

从岩体中采掘或崩落下来的碎石,其整个体积大于它在岩体内的体积。这种体积增大

表1-3

某些岩石的空隙率

岩石名称	空隙率 %	岩石名称	空隙率 %
砾岩	0.8~10.0	石灰岩	0.5~27.0
砂岩	1.6~28.0	石英岩	0.1~8.7
泥岩	3.0~7.0	石英片岩	0.7~3.0
页岩	0.4~10.0	板岩	0.1~0.45
泥灰岩	1.0~10.0		

的性质，叫做岩石的碎胀性。岩石的碎胀性通常用碎胀系数 k 来表示：

$$k = \frac{v + \Delta v}{v} \quad (1-6)$$

式中 $v + \Delta v$ ——采掘或崩落下来的碎石总体积；

v ——碎石在岩体内的体积。

实践证明，岩石的碎胀系数恒大于1，其数值取决于岩石的组成、结构、强度、岩石块度的大小与排列方式等因素。一般是，致密而坚硬岩石的碎胀系数大于软弱或松散岩石的碎胀系数。

对于同一种岩石而言，它的碎胀系数并非常数。刚破碎而堆积起来的岩石碎胀系数最大，随着时间的推移，经过雨淋日晒以及岩石的自重作用逐渐压实，使破碎岩块间的空隙减小，碎胀系数也随之变小。此外，矿山压力的作用也能使破碎岩石间空隙减小，从而碎胀系数亦减小。但是，除砂土之外，所有破碎岩石都不可能恢复到原来的体积，此时，所剩余的碎胀系数，称为残余碎胀系数 k' 。将常见岩石的碎胀系数列于表1-4。

表1-4

岩石的碎胀系数⁽⁴⁴⁾

岩石名称	碎胀系数		岩石名称	碎胀系数	
	初始(刚破碎) k	残余(压实后) k'		初始(刚破碎) k	残余(压实后) k'
砂子	1.05~1.15	1.01~1.03	硬砂岩	1.50~1.80	
粘土	1.20以下	1.03~1.07	一般软岩石		1.020
碎煤	1.20以下	1.05	一般中硬岩石		1.025
泥质页岩	1.40	1.10	一般硬岩石		1.030
砂质页岩	1.60~1.80	1.10~1.15			

(五) 岩石的水理性质

岩石的水理性质系指岩石与水互相作用时所表现的性质，通常包括岩石的吸水性、透水性、软化性等。

1. 岩石的吸水性

岩石在一定试验条件下的吸水性能称为岩石的吸水性。它取决于岩石中空隙的数量、大小、开闭程度和分布情况。除此之外，随着浸水时间的延长，吸水性也有所增加。吸水性通常以吸水率表示。吸水率是指岩石试件在一个大气压力下吸入水份的重量与岩石干重量的比值，以百分数表示，即

$$\omega = \frac{G_s}{G_1} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中 ω ——岩石的吸水率；
 G_s ——岩石试样吸入水的重量；
 G_1 ——干岩石试样的重量。

现将几种常见岩石的吸水率列于表1-5。

表1-5 几种岩石的吸水率^[40]

岩石名称	吸水率%	岩石名称	吸水率%
砾岩	0.2~5.0	板岩	0.10~0.95
砂岩	0.2~12.19	花岗岩	0.10~0.952
页岩	1.80~3.10	石英岩	0.10~1.50
石灰岩	0.10~4.45	泥灰岩	0.50~3.00
片岩	0.08~0.55		

2. 岩石的透水性

岩石允许水透过的性能称为岩石的透水性。水只能沿连通的空隙渗透，而大多数岩石中的孔隙、裂隙是连通的，在一定压力作用下，水可以在岩石中通过（渗透）。岩石透水性的强弱可用渗透系数来衡量。渗透系数是指水在岩石中流动时，在单位流动途径上水力坡度为1的条件下，单位时间内通过流线法向单位面积的流量。渗透系数的计算公式如下：

$$K = \frac{Q}{iA} \quad (1-8)$$

式中 K ——渗透系数，m/d；
 Q ——渗透流量，m³/d；
 A ——过水的法向断面，m²；
 i ——水力坡度。

渗透系数是一个重要的水文地质参数，它不仅是衡量岩石透水性能的指标，而且是评价地下水资源和计算涌水量的重要参数，其值主要取决于岩石空隙的大小、数量、方向及其连通程度。通常多是通过测定涌水量而反算渗透系数。

渗透系数可以在很大的范围内变化，按其数值大小将渗透程度划分为五级。表1-6表示透水程度分级指标和几种岩石的渗透系数。

表1-6 岩石的透水分级及几种岩石的渗透系数^[33]

岩石的透水分级	极强透水	强透水	中等透水	弱透水	极弱透水（不透水）
渗透系数m/d	>10	10~1	1~0.01	0.01~0.001	<0.001
岩石类型	渗透系数m/d			透水等级	
砾石	>50			极强透水	
粗砂石	50~20			极强透水	
中砂岩	20~5			极强透水或强透	
细砂岩	5~1			极强透水或中等透水	
亚粘土	0.1~0.001			中等透水或弱透水	
粘土	<0.001			极弱透水	

3. 岩石的软化性

岩石浸水后强度降低的性能称为岩石的软化性。岩石的软化程度与它的空隙性、矿物成分、胶结物性质、水的化学成分以及岩石浸水时间的长短等因素有关。一般是亲水性矿物和易溶性矿物含量越多，开口空隙越发育，则岩石的软化程度越大。

岩石浸水软化，将使其强度降低，塑性增加。这对岩石力学性质及岩层移动的研究有重要的意义。

三、岩石的力学性质

岩石的力学性质主要指岩石的强度性质和应力-应变性质。这部分内容这里只作简要介绍，若需详细了解，可参阅有关岩石力学方面的文献。

(一) 岩石应力与应变关系

物体上任一点的绝对或相对位移，或者线性尺寸的变化，称为该物体的变形。岩体在应力作用下，首先发生变形，然后破坏。

岩石的力学性质多半是在试验室内通过单轴或三轴试验进行研究。图 1-1 所示是通过单轴压缩试验，研究岩石试块的应力与变形关系。设圆柱试件纵向（即轴向）长度为 l ，横向（即径向）宽度为 d ，截面面积为 F ，在试验机上连续增加压力 p ，则岩石试件的应力为

$$\sigma = \frac{p}{F} \quad (1-9)$$

试件受力后纵向缩短 Δl ，横向膨胀 Δd ，则试件产生的应变为

$$\text{纵向应变} \quad \epsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} \quad (1-10)$$

$$\text{横向应变} \quad \epsilon_2 = \frac{\Delta d}{d} \quad (1-11)$$

式中 σ ——试件的应力；
 ϵ_1 ——试件的纵向变形；
 ϵ_2 ——试件的横向变形。

在加压试验过程中，每一个应力值都对应有一个应变值，直至试件完全破坏。以应力 σ 作为纵坐标，以应变 ϵ 作为横坐标，可以作出连续加载条件下岩石的 σ - ϵ 曲线(如图 1-2)。

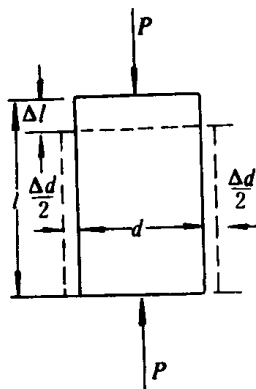


图1-1 岩石的压缩变形

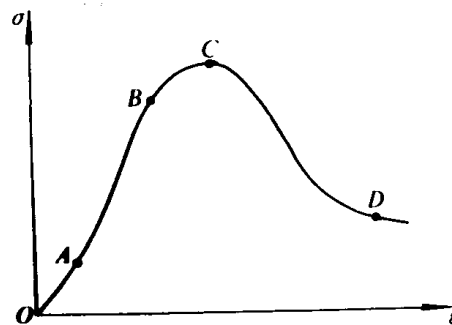


图1-2 应力-应变关系曲线