

颜荣贵 著

地基开采沉陷 及其地表建筑

冶金工业出版社

地基开采沉陷 及其地表建筑

颜荣贵 著

冶金工业出版社

(京)新登字036号

责任编辑:徐忠义

图书在版编目(CIP)数据

地基开采沉陷及其地表建筑/颜荣贵著. —

北京:冶金工业出版社,1995. 1

ISBN 7-5024-1567-X

I. 地… II. 颜… III. ①矿山建筑-矿山开发
-地表移动-监测②矿山-地基失效-研究 IV. ①TD22②TU272

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第11142号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)
冶金部机关印刷厂印刷,冶金工业出版社发行,各地新华书店经销
1995年1月第1版,1995年1月第1次印刷
787×1092mm 1/16; 18.25印张; 432千字; 284页; 1-1500册
15.00元

前 言

本书是作者三十余年来从事矿山开采沉陷工作的汇总。全书分三部分：岩石力学基础，开采沉陷，矿山地表建筑。

第一篇在介绍岩石力学的材料属性、构造影响、原岩应力三大因素的基础上，就解决采矿地表大型建筑问题所必需的弹性力学经典解、边坡体稳定、孔周复应力函数求解、条带开采等方面基础知识予以简引。

第二篇汇集了作者所作的地表与岩层移动的概率积分法预计体系新进展。

众所周知，我国的矿山开采沉陷工作，由于老一辈的辛勤耕耘，已有了长足的发展，置身于国际先进之列。开采沉陷的应用理论，地表与岩层移动的研究，已形成了概率积分法、典型曲线法、负指数函数法三大学派；它的关键技术“三下开采”，已为开发矿业、发展我国国民经济做出了巨大贡献。刘天泉院士、刘宝琛教授、廖国华教授、马伟民教授、周国铨教授、王金庄教授、曾卓乔教授、范学理教授、胡昌炽教授等就是老一辈的杰出代表。作者有幸曾得到过众多老前辈教诲，从事过概率积分法体系的研究。本篇择要介绍：为解决层群矿体、复杂边界、非主断面开采条件下地表变形预计问题，把二维体系扩展到三维体系（第六章）；针对我国山地矿区众多特点，完成了变形预计由平地到山丘地表的拓广（第七章）；为适应煤矿井筒煤柱开采、井巷保护的需要，适应金属矿山减少贫化损失、避免表土下贯，与放矿规律研究相协调，进行了从地表到岩体内部移动规律的研究（第八章）；为露天开采边坡体及近邻建筑物安全，进行了与地下开采具有不同边界条件的露采边坡体移动规律的研究（第九章），从而形成了从地表二维问题到三维，从平坦地表到山丘地表，从地表到岩体内部，从地下开采到露采的概率积分法的完整、封闭的变形预计体系。这已广为现场、教学、科研、设计单位所应用，在工程实践中不断发展与完善。第十章介绍了岩层及地表移动的动态问题。

第三篇就解决采矿地表大型建筑这一新课题，论述了研究思想、方案、方法、措施与作者主持的工程实例。

八十年代初，我国矿区城市工业发展出现了新难题。一批超大型企业急需在采矿地表新建大型的钢铁、汽车、电力、冶炼、建材等厂房，急需在采矿地表修建大跨度隧道、桥涵、高速公路等。原有的地表变形预计、三下开采技术、预加固措施已不能完全适应工程需要，而国际上又无先例。作者在解决一系列工程实践问题中形成了“采矿地表大型工业建筑”研究的新技术，成为“矿山开采沉陷”的延伸、拓广与发展，是开采沉陷学与岩土力学、土木工程、矿山地质、采矿工程、地下工程控制相结合的产物（第十一章）。从开采状态来分，此类问题可分待采、在采、采空三类。在这里，从实例出发另作介绍：地表采动破坏至国内外规程不允许建筑时的大型架空索道建设（第十二章）；不能采用按三下开采规程所定的结构、基础时的重型汽车厂厂房的建设（第十三章）；按拟建厂房荷载影响下的共同作用体来处理采空地地表大型炼钢厂、电厂的建设（第十四章）。所有建筑、构筑工程均经国家验收与鉴定，建成至今一直安全使用，经济效益十分显著，为国内外的采矿地表大型工业建筑

开创了成功的先例，可予广泛借鉴与应用。

采矿地表建筑的研究得到了北京钢铁设计研究总院、长春汽车设计研究院、南京水泥工业设计研究院、沈阳有色冶金设计研究院、本溪钢铁公司、本溪水泥厂、本溪重型汽车制造厂、本溪热电厂的有关领导与专家大力支持与合作。长沙矿冶研究院丁九生同志参与了全书构思及一些研究工作的决策，贺跃光同志对本书形成付出了辛勤劳动。在此一并表示感谢！

水平所限，失当之处，恳请读者批评指正。

著者1994年8月
于长沙

目 录

第一篇 岩石力学基础

第一章 岩石的物理力学性质	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 岩石的基本物理性质.....	(2)
第三节 岩石的基本力学性质.....	(9)
第四节 岩石力学性质的实验研究	(19)
第二章 岩体的物理力学性质	(28)
第一节 概述	(28)
第二节 原岩应力	(30)
第三节 岩体应力量测	(32)
第四节 岩体结构与力学性质	(44)
第五节 岩石强度理论	(50)
第三章 开采沉陷的岩石力学基础	(54)
第一节 岩石力学模型与开采沉陷模式	(54)
第二节 地表建筑、近地表工程及采动开裂的应力扰动	(61)
第三节 条带开采的地表沉陷模式与受力机制	(67)

第二篇 开 采 沉 陷

第四章 开采沉陷和开采损害	(75)
第一节 开采沉陷的基本模式	(75)
第二节 开采沉陷与开采损害	(81)
第五章 开采沉陷的随机介质理论及单元盆地	(87)
第一节 理论研究及进展	(87)
第二节 水平成层介质中的单元盆地	(94)
第三节 倾斜成层介质中的单元盆地.....	(100)
第六章 任意开采时的地表移动与变形	(104)
第一节 地表移动盆地下沉.....	(104)
第二节 地表水平移动.....	(113)
第三节 地表点的水平变形.....	(116)
第四节 地表点的倾斜.....	(119)
第五节 地表点的曲率.....	(121)

第七章 开采影响下山区地表移动	(126)
第一节 开采影响函数.....	(126)
第二节 山区地表点下沉及水平移动.....	(127)
第三节 山区地表点垂直变形与水平变形.....	(130)
第四节 山区地表移动预计及移动特征.....	(133)
第五节 山丘地表移动实例分析.....	(135)
第八章 岩体内部移动规律	(140)
第一节 开采影响在岩体内部的传播.....	(140)
第二节 岩体内部的位移场.....	(150)
第三节 岩体内部的应变场.....	(156)
第四节 岩体内部移动基本参数的确定.....	(169)
第九章 露天开采矿山等边坡移动与变形	(179)
第一节 边坡体内部的位移场.....	(179)
第二节 边坡体内部的应变场.....	(182)
第三节 岩移基本参数确定.....	(184)
第四节 边坡稳定性分析与评价.....	(187)
第十章 岩层及地表移动的动态问题	(194)
第一节 概述.....	(194)
第二节 岩体的非稳定盆地下沉.....	(196)
第三节 岩体的非稳定盆地水平移动和变形.....	(204)
第四节 点移动时间过程与速度.....	(213)

第三篇 矿山地表建筑

第十一章 采动地表的抗变形建筑	(218)
第一节 开采对地表建筑物的影响.....	(218)
第二节 建筑物的采动破裂与保护等级.....	(219)
第三节 保护建筑物的采矿措施.....	(224)
第四节 采动地表的抗变形建筑.....	(228)
第十二章 开采破坏地表的大型建筑	(232)
第一节 开采破坏地表的大型建筑研究.....	(232)
第二节 大型架空索道建设实例.....	(235)
第十三章 在采地表大型厂房建设	(248)
第一节 在采地表大型厂房建设研究.....	(248)
第二节 新建铆焊厂房实例.....	(250)
第三节 新建后桥厂房实例.....	(256)
第十四章 采空区地表大型厂房建设	(259)

第一节	采空区地表大型厂房建设研究.....	(259)
第二节	拟建厂房荷载作用下采空区地表稳定性.....	(262)
第三节	采空地表活化的建厂措施与监测.....	(269)
第四节	本钢特钢厂建设实例.....	(271)
第五节	本溪热电厂建设实例.....	(278)
参考文献		(282)

第一篇

岩石力学基础

第一章 岩石的物理力学性质

第一节 概 述

矿山工程的直接对象是矿山岩体与矿体，矿山岩体与表土同时又是矿山地表建筑物和构筑物的地基。矿山岩体性态的测试、了解、掌握、利用与改造自然成了“矿山地表建筑决策”这一新兴课题的基础。矿山岩体是一种十分复杂的、经受了长期的地质作用、被各种断层、节理、裂隙等构造弱面切割，同时又被各种不同性质的充填物所充填或胶结的地质介质。要全面确切了解与掌握矿山岩体性质，就必须首先掌握矿山岩石的物理力学性质。

岩石是组成地壳的基本物质。按岩石成因，可以分成火成岩（内生岩）、沉积岩（外生岩）及变质岩三大类。按岩石生成的地质年代，岩石分成元古代、古生代、中生代、新生代几种类别。不论以岩石生成的地质年代或生成原因来区分岩石，都不能用以判断岩石的力学性态，而只能给人们一个粗略的概念。人们又从自然状态下的岩石，按其固体矿物颗粒间的结合特征来区分，可分为固结性岩石、粘结性岩石、散粒状岩石、流动性岩石等。对矿山工程来说，所遇到的极大部分是固结性岩石。如砂岩、石灰岩、粉砂岩、砂质页岩、页岩、泥质页岩、泥页岩、花岗岩、正长岩、闪长岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、大理岩、白云岩、凝灰岩、玢岩、斑岩、片麻岩等。在矿山，不同的矿种对应着相应围岩，人们从工程实用出发又往往习惯于从矿体围岩角度来区分岩类。

构成地壳的岩石和表土，由不同比例的各种化学元素构成。组成岩石的常见元素有氧、硅、铝、铁、钙等，它们多以化合物的形式存在。这类化合物，其地质作用与成岩过程，所经受的温度、压力各不相同，其后又由于风化及各类地质作用，才成为现存状态。以各种

不同结晶体形式出现，或以非晶态存在于其它结晶体之间，形成一种胶状物质。使岩石在微观结构上存在三种状态：结晶型，隐晶型及非结晶型。岩石材料宏观力学性质，或非伟晶岩的岩块力学性质指标，决定于岩石的微观结构与组成。其与微观结构力学性质指标之间遵循统计规律，可用概率论方法进行数学处理。从这个意义上来说，岩石介质本属统计范畴。

岩石是由各种结晶或非晶形矿物，被非晶形粘性胶结物质粘结在一起而形成的。岩石的各向异性决定于矿物及胶结物质的特性。矿物的各向异性主要取决于矿物的结晶形式，不同结晶系的矿物具有不同的各向异性特征。矿物晶体存在 32 种几何对称形式，可分为七个类别：三斜晶系，单斜晶系，菱形晶系，正方晶系，三角形晶系，六边形晶系，立方晶系。当力学性态上具有各向异性的晶体，在各类地质作用的长期综合作用下，最终呈现定向有序排列，则此矿山岩石在宏观上表现为各向异性；若最终呈现的还是无序的杂乱无章的排列，则岩石材料显现了统计上的各向同性。从这个意义来看，岩石力学性质也是地质作用的产物。

“矿山地表建筑决策”受很多因素制约，其中岩石的物理力学性质起着重要作用，成为各种现象的基本因素。为此，必须掌握岩石的基本物理性质、基本力学性质及岩石力学性质的实验研究主要方法与设备。

第二节 岩石的基本物理性质

岩石的物理性质与岩石的矿物成分和结构构造密切相关。岩石的物理性质不仅能在一定程度上反映岩石的力学性质，还能局部地反映岩体的物理性质。因而它是矿山岩体力学分析不可缺少的重要指标。通常实用的岩石物理性质指标有：岩石比重 δ ，质量密度（或重力密度） ρ ，空隙性 n ，岩石碎胀系数 K' ，岩石湿度 W ，吸水性 w ，透水性 K ，软化性，波速等。

一、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的摄氏 4℃ 水的重量之比。单位体积是指不包括岩石中的孔隙的体积在内的实体积。比重可在实验室内测定。计算公式如下：

$$\delta = \frac{G}{V_0 \gamma_{w(4^\circ\text{C})}} \quad (1-1)$$

式中 δ ——岩石的比重（无因次）；

G ——体积为 V_0 的绝对干燥时岩石固体部分的重量（g）；

V_0 ——岩石固体部分的体积（cm³）；

$\gamma_{w(4^\circ\text{C})}$ ——4℃ 时水的质量密度（g/cm³）。

岩石的比重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。因此，组成岩石的矿物比重越大（如基性和超基性岩石），则岩石比重大。那些含有比重较小的酸性矿物的岩石，其比重也小。矿山中常见岩石的比重如表 1-1。

表 1-1 矿山常见岩石的比重

岩石名称	比重	岩石名称	比重	岩石名称	比重	岩石名称	比重
花岗岩	2.63~2.75	玄武岩	2.90~3.30	凝灰岩	2.56	细砂岩	2.70
正长石	2.60~2.90	石灰岩	2.40~2.80	泥质灰岩	2.70~2.80	粘土质砂岩	2.68
闪长岩	2.85~3.00	大理岩	2.72	石英岩	2.53~2.84	砂质页岩	2.72
辉长岩	2.90~3.20	白云岩	2.78	砾岩	2.61~2.71	页岩	2.57~2.77
辉绿岩	2.92	致密砂岩	2.80~2.85	砂岩	2.60~2.75	煤	1.98

二、岩石的质量密度（重力密度）

岩石的质量密度是指单位体积岩石的质量，用下式表示

$$\rho = \frac{G_1}{V} \quad (1-2)$$

式中 G_1 ——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， cm^3 ；

ρ ——岩石的自然质量密度， g/cm^3 。

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。

岩石质量密度取决于岩石所含矿物成分、胶结物的性质、孔隙发育程度及含水情况等。由于一般岩石孔隙较少，故干质量密度与湿质量密度在数值上相差不大。但对某些具有吸水鼓胀性岩石，例如粘土质页岩、粘土质板岩，则干质量密度与湿质量密度数值相差较大。少数多孔性岩石，如火山熔岩及浮石等，当其孔隙很大时，其质量密度可能小于 1.0，可以浮在水上。某些岩石质量密度列于表 1-2，干湿质量密度对比列于表 1-3。

表 1-2 某些岩石的质量密度

岩石名称	质量密度 (g/cm^3)	岩石名称	质量密度 (g/cm^3)	岩石名称	质量密度 (g/cm^3)	岩石名称	质量密度 (g/cm^3)
花岗岩		闪长岩	2.9	石灰岩		白云岩	2.7~2.9
粗粒的	2.8	辉长岩	2.9	致密的	2.9~3.1	页岩	2.4~2.7
中粒的	3.1	辉绿岩	2.9	较松的	2.5	片麻岩	2.6~2.8
细粒的	3.3	玢岩	2.5~2.7	泥灰质的	2.3	大理岩	2.7
强风化的	2.5	玄武岩	2.7~3.2	砂岩	1.75~2.65	凝灰岩	0.75~1.40
正长岩	2.4~2.8						

表 1-3 某些岩石的干、湿质量密度

岩石名称	干质量密度 (g/cm^3)	湿质量密度 (g/cm^3)	岩石名称	干质量密度 (g/cm^3)	湿质量密度 (g/cm^3)	岩石名称	干质量密度 (g/cm^3)	湿质量密度 (g/cm^3)
砂岩	1.57~2.65	1.96~2.75	泥质页岩	2.16~2.65	2.16~2.65	花岗岩	2.26~2.65	2.35~2.65
石灰岩	1.96~2.75	2.16~2.75	砾岩	1.57~1.86	1.77~1.96	煤	1.18~1.37	1.18~1.47
砂质页岩	2.35~2.65	2.35~2.75	石英岩	1.86~2.55	2.16~2.55			

岩石质量密度多用于工程场合，如计算矿石贮量和土石方量时，要用质量概念，计量单位为 kg/m^3 。岩石重力密度多用于力学体系，如计算岩石、矿石的应力和压强时，要用重力概念，计量单位为 N/m^3 。二者单位间可按下列关系换算： $1\text{kgf}\cong 10\text{N}$ 。

岩石比重与岩石质量密度在数值上比较接近，一般岩石比重稍大些，一般仅为 $1\sim 2\%$ ，最大值为 3% 。

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。一般为：质量密度越大，力学强度也越大。

三、岩石的孔隙度

岩石的孔隙度表征岩石中孔隙和裂隙的发育程度，是岩石中孔隙性和裂隙性的统称，用孔隙度 n 表示。岩石的孔隙度是岩石内的各种裂隙、孔隙的总体积与岩石总体积之比，其值可按下式计算，孔隙度 n 通常用百分数表示：

$$n = \frac{V'}{V} \times 100\% \tag{1-3}$$

式中 n ——岩石的孔隙度；

V' ——岩石试样中孔隙和裂隙的总体积；

V ——包括孔隙、裂隙在内的试样总体积。

孔隙度也可用岩石的比重 δ 与质量密度 ρ 来计算，即

$$n = \frac{\delta - \rho}{\delta} \times 100\% \tag{1-4}$$

多数岩石的孔隙度很小，表 1-4 列出了一些岩石孔隙度测定值。

表 1-4 某些岩石的孔隙度

岩石名称	孔隙度 %	岩石名称	孔隙度 %	岩石名称	孔隙度 %
花岗岩	0.04~0.61	长英岩	3.04~3.74	泥灰岩	1.0~10.0
闪长岩	0.25	凝灰岩	25	石灰岩	0.5~27.0
斑 岩	0.29~2.75	砾 岩	0.8~10.0	石英岩	0.1~8.7
玄武岩	1.28	砂 岩	1.6~28.0	石英片岩	0.7~3.0
正长岩	1.38	泥 岩	3.0~7.0	板 岩	0.1~0.45
玢 岩	1.88~2.65	页 岩	0.4~10.0		

岩石的裂隙和孔隙，一方面削弱了岩石的完整性，使岩石质量密度较小，强度较低；另一方面使透水性增加，孔隙充水可以溶解岩石中的某些矿物并降低岩石的抗冻性能。

四、岩石的碎胀性及碎胀系数

采掘或崩落下来的岩石，其整个体积大于它在岩体内的体积。这种体积增大的性质，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：

$$K' = \frac{v + \Delta v}{v} \tag{1-5}$$

式中 $v + \Delta v$ ——采掘或崩落下来的碎石总体积；

v ——碎石在岩体内的原始体积。

生产实践表明，岩石的碎胀系数 K' 恒大于 1，其数值取决于岩石的组成、结构、强度、块度大小与排列方式等因素。一般情况下，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。

对于同一类岩石，碎胀系数也受一系列因素影响。刚破碎而堆积起来的岩石的碎胀系数为最大，随着时间的增加，经过雨淋日晒及岩石自重作用逐渐压实，使碎裂岩块间的孔隙减小，碎胀系数也随着减小。此外，矿山地压作用也能使破碎岩堆压密，岩石间孔隙减小，碎胀系数也减小。破碎岩石无论体积如何减小，除砂土外，都不可能恢复到原来的体积。所剩余的碎胀系数，称为残余碎胀系数 K^o 。一些岩石碎胀系数列于表 1-5。

表 1-5 岩石的碎胀系数

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^o		初始（刚破碎） K'	残余（压实后） K^o
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、岩石的湿度

具有自然湿度的岩石试件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：

$$W = \frac{G_1 - G_2}{G_2} \times 100\% \tag{1-6}$$

式中 W ——岩石的湿度；

G_1 ——具有自然湿度的岩石试样的重量；

G_2 ——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。岩石湿度通常是在实验室内利用含天然水的试样来测定。

六、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。它取决于岩石中孔隙、裂隙的体积、大小、敞开或封闭程度、分布情况等。除此之外，随着浸水时间的延长，吸水性也有所增加。岩石吸水性指标有吸水率、饱水率、饱水系数。吸水率是指岩石试件在一个大气压力下吸入水分的重量与岩石干重量的比值，以百分数表示，即

$$w_1 = \frac{G_{w_1}}{G_2} \times 100\% \tag{1-7}$$

式中 w_1 ——岩石的吸水率；

G_{w_1} ——岩石试样吸入水的重量；

G_2 ——干岩石试样的重量。

现将几种岩石的吸水率列于表 1-6。

表 1-6 几种岩石的吸水率

岩石名称	吸水率%	岩石名称	吸水率%	岩石名称	吸水率%
砾 岩	0.2~5.0	片 岩	0.08~0.55	泥灰岩	0.50~3.00
砂 岩	0.2~12.19	板 岩	0.10~0.95	石英闪长岩	0.32
页 岩	1.80~3.10	花岗岩	0.10~0.952	玄武岩	0.27
石灰岩	0.10~4.45	石英岩	0.10~1.50	基性斑岩	0.35

岩石的饱水率为岩石在高压(150 个大气压力)或真空条件下吸入水的重量与岩石干重量的比值,以百分数表示,即

$$w_2 = \frac{G_{w_2}}{G_2} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 w_2 ——岩石的饱水率;

G_{w_2} ——岩石在 150 个大气压力或真空条件下吸入水的重量;

G_2 ——干岩石试样的重量。

岩石的饱水系数 K_s 为吸水率 w_1 与饱水率 w_2 之比,即

$$K_s = \frac{w_1}{w_2} \quad (1-9)$$

一般岩石的饱水系数 $K_s=0.5\sim0.8$,表 1-7 给出某些岩石的吸水率、饱水率和饱水系数。

表 1-7 某些岩石的吸水性指标

岩石名称	吸水率 w_1 (%)	饱水率 w_2 (%)	饱水系数 K_s	岩石名称	吸水率 w_1 (%)	饱水率 w_2 (%)	饱水系数 K_s
花岗岩	0.46	0.84	0.55	砂岩	7	12	0.60
石英闪长岩	0.32	0.54	0.59	石灰岩	0.09	0.25	0.36
玄武岩	0.27	0.39	0.69	白云质石灰岩	0.74	0.92	0.80
基性斑岩	0.35	0.42	0.83				

一般吸水性较大的岩石,在其吸水之后往往产生体积膨胀,即所谓鼓胀性,如果外界条件对岩石鼓胀产生约束,则会引起十分巨大的鼓胀力。

七、岩石的透水性

岩石允许水透过的性能称为岩石的透水性。在大多数岩石中,孔隙与裂隙往往是连通的,在一定压力作用下,水可以沿着连通的孔隙在岩石中渗透。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为:

$$K = \frac{Q}{iA} \quad (1-10)$$

式中 K ——渗透系数, m/d;

Q ——渗透流量, m^3/d ;

A ——过水的法向断面, m^2 ;

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孔隙的大小、数量、方向及其连通程度。通常通过测定涌水量而反算渗透系数。

渗透系数可以在很大范围内变化, 按其数值大小将渗透程度划分为五级。表 1-8 表示透水程度分级指标和几种岩石的渗透系数。

表 1-8 岩石的透水分级及几种岩石的渗透系数

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	$10\sim 1$	$1\sim 0.01$	$0.01\sim 0.001$	<0.001
岩石类型	渗透系数 m/d		透水等级		
砾石	>50		极强透水		
粗砂岩	$50\sim 20$		极强透水		
中砂岩	$20\sim 5$		极强透水或强透水		
细砂岩	$5\sim 1$		极强透水或中等透水		
亚粘土	$0.1\sim 0.001$		中等透水或弱透水		
粘土	<0.001		极弱透水		
花岗岩	$(0.0432\sim 0.0518)\times 10^{-2}$		极弱透水		
安山玄武岩	$4.92\sim 35.42$		强透水或极强透水		
斑岩	0.10368×10^{-2}		弱透水		
凝灰砂岩	43.2		极强透水		
泥质石灰岩	$26.78\sim 64.80$		极强透水		
裂隙石灰岩	2073.6		极强透水		
坚硬砂岩	$(3.8\sim 33.70)\times 10^{-2}$		中等透水		

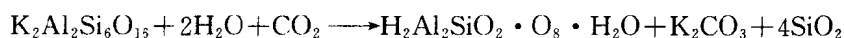
八、岩石的软化性

岩石浸水后强度降低的性能称为岩石的软化性。岩石的软化性多用软化系数来衡量。岩石的软化程度与它的孔隙度、矿物成分、胶结物性质、水的化学成分及岩石浸水时间的长短等因素有关。一般, 岩石中的亲水性矿物和易溶性矿物含量越多, 开口裂隙越发育, 岩石的软化程度越大。

水对岩石强度的影响, 国内外矿山也均有广泛研究。大孤山铁矿、大冶铁矿、大同煤矿、抚顺西露天煤矿、顿巴斯矿区、萨哈林煤田等都有大量实验资料。水对岩石软化作用, 使岩石强度降低的作用机制主要有: 水化作用、吸附及吸收作用、扩容作用、水合作用、楔入作用、水解及溶解作用。矿物组分不同, 水对岩石的各种作用的强烈程度也不同。

(1) 水化作用及风化作用

以长石、云母等硅酸盐类矿物为主的岩石, 在水的影响下易风化, 使长石变为高岭石:



云母风化变为水云母, 水云母进一步风化变为高岭石:



这是粘土矿物含量较多的矿石、围岩受水软化的重要原因之一。

(2) 吸附、吸收与膨胀作用

对于具有势能的膨胀岩，如片状结构的蒙脱石等，遇水后易吸水产生膨胀。膨胀量一般为5~30%，个别大于30%，膨胀力可达0~2.0MPa。其膨胀性能大小依次为蒙脱石、伊利石、高岭石。若以软岩的塑性指数和粘粒含量百分数之比值，即“活动性指标”来表示，几种矿物的排列次序为表1-9。

表 1-9 几种矿物活动性指标

矿物名称	石英	方解石	白云母	高岭石	伊利石	钾蒙脱石	钠蒙脱石
活动性指标	0	0.18	0.23	0.33~0.46	0.9	1.5	7.2

(3) 扩容作用

泥岩、页岩等膨胀性较大的粘土质矿物及充填有粘土质矿物的岩样，遇水后膨胀和崩解，这不仅是水的物理化学过程，同时也是扩容的力学过程。岩石为非均质介质，在受偏应力作用下变形不协调，故会产生裂隙与扩容。虽然膨胀岩本不透水，但扩容产生裂隙，使孔隙率增加，水就乘隙而入，如此互为因果，岩石吸水膨胀和在偏应力作用下的扩容两者互相促进，使岩石强度急剧下降。

(4) 水的楔入作用

有些岩石显微裂隙发育，如长石及黄铁矿颗粒中一般微裂隙与节理都很发育，能产生水的楔入作用，使原生裂隙扩大并产生新裂隙。

(5) 水合作用

粘土矿物微粒周围，由于胶结物薄膜破碎，胶结物质如碳酸钙、游离氧化物（ SiO_2 ， Al_2O_3 ， Fe_2O_3 ）受地下水的溶蚀和胶溶，其表面电荷密度增大，形成较厚的表面溶剂化层，增强了相互间的斥力，降低了强度。

(6) 水解与溶解作用

这种作用使黄铁矿变成稳定的褐铁矿，使水变成酸性溶液，进而加速风化，溶解部分硅酸盐。

在工程应用上，一般都以进行自然条件下与饱水状态下的岩石力学性试验，对比两者结果确定软化系数。

表 1-10 某些岩石的软化系数

岩石名称	抗压强度 (MPa)		软化系数 k
	干 燥	饱 水	
细粒砂质砂岩	118.6	76.3	0.64
中粒石英砂岩	62.0	43.7	0.70
粘土质砂岩	54.0	36.0	0.67
坚硬石灰岩	117.0	58.0	0.50
泥 灰 岩	46.0	21.0	0.46
花岗岩	256.0	230.0	0.89
粗粒花岗岩：新鲜	239.0	208.0	0.82
风化	188.0	157.0	0.84
细粒花岗岩：新鲜	265.0	241.0	0.90
风化	193.0	180.0	0.93

九、岩石的弹性波速

各向同性岩石介质中,弹性波的传播速度主要决定于岩石介质的弹性模量及其密度。其纵波,又称 *P* 波,波的传播方向与质点振动方向一致;其横波,又称 *S* 波,波的传播方向与质点振动方向相垂直,它们的传播速度分别以下式表示:

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \tag{1-11}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)}} \tag{1-12}$$

式中 V_P ——岩石中纵波的传播速度;
 V_S ——岩石中横波的传播速度;
 E ——岩石的弹性模量;
 μ ——岩石的波松比;
 ρ ——岩石的质量密度。

可见,岩石介质中的弹性波传播速度,主要决定于岩石的弹性模量、波松比和密度等。因此,岩石的某些物理力学性质的改变,如岩质、密度、裂隙、弹性模量以及应力状态改变等,都能直接引起波速、波幅和频率的变化。一般来说,岩性好、结构面不发育、风化微弱、岩石坚硬完整,则波速高、波幅大;反之,岩性差、节理发育、结构松散、风化严重、岩石破碎,则波速低,波幅小。根据大量实测资料,各种岩体中的弹性波传播速度如表 1-11。

表 1-11 岩石的弹性波速

岩石名称	裂隙、风化程度	纵波波速 (m/s)
粘板岩、砂岩、硬砂岩、石灰岩、辉绿凝灰岩、燧石、花岗岩、千枚岩、结晶片岩、角页岩 石英粗面岩、安山岩 页岩、砂岩、角砾岩、凝灰岩、集块岩、砂质页岩、其它	新鲜、坚硬无裂隙	4000~6000
	新鲜、坚硬无裂隙	4000~6000
	岩石本身未变质,有大裂隙	3000~4000
	岩石本身未变质,裂隙发达	2000~3000
	裂缝、裂隙发育,夹薄层粘土,岩石微软化	1500~2000
	裂隙显著发育,含粘土较多	1000~1500
	显著风化,粘土化,有时呈岩堆状	1000

十、其它

岩石的物理性质还应包括:岩石的抗冻性、岩石的可溶性、岩石的热胀性、岩石的导热性、岩石的导电性、岩石的压电性、岩石的磁性及岩石的放射性等等,此处不作讨论。

第三节 岩石的基本力学性质

岩石的力学性质主要是岩石的力学强度、岩石的变形特性及岩石的摩擦性质。