

高等学校适用教材

矿山岩石力学

高磊主编

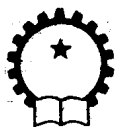
机械工业出版社

TD31
16
3

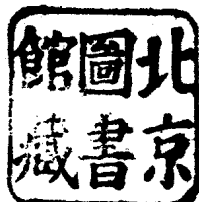
高等学校适用教材

矿山岩石力学

高磊 主编



机械工业出版社



B 451032

内 容 简 介

矿山岩石力学是矿业科学的理论基础。内容主要论述岩石及岩体的力学性质、围岩应力分布规律及围岩稳定性分析方法。本书除着重论述基本概念之外,并结合矿山工程(巷道、采场及边坡)阐述地压控制理论及方法。每章均附有思考题及习题,便于读者领会书中的基本概念。

本教材正式出版前,曾作为内部讲义在十余所高等院校使用了三届,在此基础上经过修改正式出版。适宜作为采矿工程专业本科学生的教科书,可供采矿工程技术人员参考。

高等学校适用教材

矿 山 岩 石 力 学

高 磊 主编

机械工业出版社出版发行(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

西安小寨印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 •印张 $19 \frac{3}{4}$ •字数506千字

1987年8月北京第一版•1987年8月西安第一次印刷

印数 00,001—10,000 定价:4.5元

统一书号:15033·6880H

前 言

本书是为大学采矿工程专业本科学生编写的教科书。内容较全面系统地反映本学科的基本知识、基本理论和基本技能。主要目的在于使学生掌握现代岩石力学的基本知识，完成工程师的基本训练，且为进一步深造奠定基础。

本书出版之前，已在十几所院校内部试用了三届。在此基础上，改正了原书中错误及不当之处。书中各章均附有思考题、习题和参考文献索引。

本书由以下同志参加编写：第一章：周昌达、高磊、李通林；第二章：李通林；第三章：章瑜、陈钧璠；第四章：高磊；第五章：李兰英；第六章：季卫东、章瑜；第七章：雷化南；第八章：陈新万、丁延陵；附录：陈钧璠。本书由高磊主编。

书中的缺点错误敬请读者批评指正。

目 录

绪 论	(1)
-----	-------

第一章 岩石的物理力学性质

§ 1-1 概述	(5)
§ 1-2 岩石的物理性质	(5)
§ 1-3 岩石的力学性质	(9)
§ 1-4 岩石的扩容	(21)
§ 1-5 岩石的流变性质	(22)
§ 1-6 岩石的各向异性	(37)
§ 1-7 岩石的强度理论	(41)

第二章 岩体的力学性质及其分类

§ 2-1 岩体的强度	(49)
§ 2-2 岩体的变形	(62)
§ 2-3 岩体的分类	(66)

第三章 原岩应力及其测量

§ 3-1 概述	(76)
§ 3-2 重力应力场	(77)
§ 3-3 构造应力场	(78)
§ 3-4 原岩应力的一般规律	(79)
§ 3-5 影响原岩应力分布的因素	(83)
§ 3-6 岩体应力测量	(84)

第四章 岩体的次生应力

§ 4-1 概述	(97)
§ 4-2 弹性区次生应力	(97)
§ 4-3 塑性区次生应力	(105)
§ 4-4 巷道围岩位移	(111)

第五章 巷道地压及喷锚支护设计原理

§ 5-1 地压的概念	(116)
§ 5-2 围岩与支架共同作用原理	(118)
§ 5-3 变形地压计算	(122)
§ 5-4 水平巷道散体地压计算	(129)
§ 5-5 竖井地压计算	(135)
§ 5-6 井巷维护原则	(140)
§ 5-7 喷锚支护与设计原理	(142)

第六章 采场地压

§ 6-1 概述	(160)
§ 6-2 空场法的地压	(167)
§ 6-3 充填法的地压	(184)
§ 6-4 崩落法的地压	(187)
§ 6-5 覆盖岩层的破坏与移动规律	(194)
§ 6-6 采场地压控制方法	(200)
§ 6-7 冲击地压及其监控	(204)

第七章 露天矿边坡稳定性分析

§ 7-1 概述	(212)
§ 7-2 影响露天矿边坡稳定的主要因素	(216)
§ 7-3 边坡稳定性分析与计算	(228)
§ 7-4 露天矿滑坡的防治	(237)

第八章 地压现场观测

§ 8-1 概述	(249)
§ 8-2 围岩位移的测量	(249)
§ 8-3 支架荷载测量	(254)
§ 8-4 地球物理探测法	(257)

§ 8-5 围岩应力变化的测量……………(265)

§ 8-6 巷道地压观测工作的几个共同性问题及实例分析……………(279)

§ 8-7 采场地压观测……………(285)

§ 8-8 露天矿边坡稳定性监测……………(289)

附录 赤平极射投影与赤平等积投影……………(297)

绪 论

矿山岩石力学是研究采矿工程所影响的那部分地壳内岩体力学现象的科学。本书主要阐述力场作用下岩体发生变形、位移和破坏的规律，具体论述露天矿边坡、坑内采场和巷道的稳定性分析方法，为采矿工程设计和维护安全生产提供理论依据，以便有效地开采矿床。

岩石力学的主要研究对象是岩体。岩体是在漫长的地质年代中形成的地质体，在它形成和存在的整个地质进程中，经历了多次地质变迁，承受各种构造力的作用，遭受不同的地质破坏。因此，它不同于其它力学所研究的材料那样单一，而具有多种多样的复杂特性，即使是由相同物质组成的岩体也存在很大差别。岩体的特点如下：

(1) 岩体为非均质各向异性体。通常，一定范围内的岩体均由许多种类的岩石构成，每种岩石中所包含的矿物成分又各不相同，矿物颗粒尺寸及其空间排列方式也有很大差异，所以其物理力学性质也相差甚远。

此外，岩体内还存在一个裂隙系统。由于形成时期和嗣后构造力的作用，产生了一系列层理、节理、裂隙和断层。这些弱面将岩体分割成岩块，使岩体的完整性和均匀性遭受破坏。同时，由于弱面本身的种类和成因不同，其力学性质也不一样。因此，岩体是异常复杂的非均质各向异性体；

(2) 岩体内存在初始应力场（原岩应力场），其中主要包括重力和构造力，它是岩体产生力学现象的原动力。尽管到目前为止，关于原岩应力场的研究尚未使人们彻底掌握它的规律，但原岩应力对地压显现具有极其重要的作用已被无数工程实例所证明。因此，原岩应力场的存在及其特征直接影响岩体应力状态和地压显现规律。

总之，岩体是一种具有初始应力场的物理力学性质十分复杂的介质。在力学分析中如何确定它的特性，将它作为什么样的介质更为合理，有待今后深入研究。

岩石力学首先是为满足采矿工程的需要而产生的。天然岩体（原岩）本来处于自然平衡状态。由于开采矿床，岩体中形成各种各样的空间，这些采掘空间的出现扰动了原岩应力场，即打破了原有的自然平衡，使岩体应力重新分布，并在其周围引起一系列力的现象，如围岩的变形和破坏等现象，这就是所谓“地压显现”。随着采矿工业的发展，人们对地压的认识逐渐深化并寻求其显现规律，用这些规律指导生产实践，这就出现了岩石力学的雏型。作为一门科学，岩石力学的发展大致可分为三个阶段：

二十世纪以前，岩石力学处于萌芽阶段。这个阶段，岩石力学主要研究的问题是巷道顶板冒落和地下开采所引起的岩石移动。1864年英国工程师D·古德思维提出地表移动范围主要取决于采矿方法、岩石性质、矿床倾角和开采深度。这一论断在岩石移动的研究中至今仍起着重要作用。此外，在西欧最主要的煤层开采中，开始使用仪器观测地表变形，并提出保安煤柱和地表移动范围的实用规范。这个时期，研究人员注意的基本上是岩体外部的力学现象，所提出的关系式带有很大程度上的经验性，没有反映地压与岩体力学性质参数之间的关系。

第二阶段可追溯到二十世纪五十年代之前。这个阶段松散介质学派占主导地位，他们借

用土力学基本理论解决岩石力学问题，提出巷道地压计算原理和采场地压假说。代表人物有M·M·普洛托基雅柯诺夫和K·太沙基。在研究方法方面，开始应用模拟法研究巷道和采场围岩的应力分布，变形和破坏过程。光弹模型和相似材料模型相继出现。本世纪初，试制成功卡曼型三轴试验机，为研究岩石力学性质提供了良好条件。在矿柱设计方面，按面积承压理论计算矿柱。“三下”开采也取得了进展。

总之，这个阶段更加深入地研究了岩石的变形和破坏机理，并将岩体作为松散介质或弹性介质，用连续介质力学或弹性理论研究岩体应力、变形和位移。

应当指出，在这个时期无论哪种地压计算方法均只考虑岩体重力而未计入构造应力的影响。

从本世纪五十年代到现在是岩石力学发展的第三阶段，也就是岩石力学发展的现代阶段。五十年代初期，岩石力学以弹塑性理论为基础，将岩体视为弹塑性介质，用弹塑性力学方法研究岩体应力、变形和位移。目前又在弹塑性分析的基础上引入流变理论，将某些岩体视为带粘性的介质，考虑时间因素对岩体应力、变形及位移的影响。

随着电子计算技术的发展，用有限单元法解算岩石力学问题得以实现。目前这种方法既能解算线性问题，又能解算非线性问题，单元的划分可计入岩体结构特征和节理的影响，处理节理单元。但到目前为止，有限单元法仍未能从定量的精度解决工程实际问题，它往往只能作为解析法的参考，对岩体应力状态作定性分析。近几年来，除有限单元法外，又出现了边界元法，这种方法建立在严密的数学基础之上，对单一介质简单边界问题的处理比有限元法速度快误差小。

此外，岩体力学测试技术逐渐完善，应力解除法及近年来出现的水压致裂法均可测出较深处岩体的应力。刚性试验机的出现更深刻地揭示了岩石的力学特性，全应力-应变曲线具有重要的工程意义。在新奥地利隧道施工法中，岩体位移测量技术取得了新的工程成就。

上述成果表明，岩石力学发展到现阶段，已逐渐形成完整的科学体系，作为力学的一个分支，成为一门独立的力学学科，服务于各种岩石工程。

矿床开采工程中，地压控制是生产工艺中的重要环节。地压显现往往给采矿工程带来巨大灾难，它不仅危害生产安全，而且会使矿山局部停产，甚至毁灭整个矿山。类似这样的事例在国内外并不罕见。1930年10月23日，在美国深467m的宾哈姆、康诺露天矿，发生608万 m^3 的大滑坡，掩埋了露天矿的一半。1967年9月24日，我国江西盘古山钨矿爆发了大规模毁灭性的地压显现，致使该矿用了两年时间才恢复生产。矿山岩石力学的任务不仅在于防止这些毁灭性事故的发生，而且要为更合理的采矿工艺建立可靠的理论基础，摆脱采矿工程只凭经验管理的落后状态。诚然，经验是可贵的，尤其在矿山岩石力学还不十分成熟的时候，经验在指导生产中仍起着重要作用。但是只凭经验会导致片面性，会造成盲目的错误，甚至带来不能容忍的损失。这也是在生产管理走向科学化和现代化的进程中应当记取的教训。例如，某矿在一条主要巷道的施工中，由于地压的作用厚500mm的混凝土支架被压裂。施工人员根据传统经验认为，这是支架厚度不够，故在表面又套了一层500mm的混凝土，结果仍然无济于事，新套的混凝土层又出现了很大的裂缝。其实，地压的大小是由很多因素决定的，其中主要因素之一是支架的刚度。对于变形地压，支架刚度越大，支架上所受的壓力也越大，如果采用较薄的柔性支架，支架所受压力反而会减小。武钢金山店铁矿正是使用了200mm的喷射混凝土支护，使一条巷道通过了原来500mm厚的钢筋混凝土支架都

无法通过的大断层。

目前，我国采矿生产实践提出了一系列重大问题需要从矿山岩石力学中寻求答案，如：特别困难条件下井巷地压控制方法；适应岩体应力特征和地压显现规律的合理开采顺序、采矿方法及其构成要素，以及采场维护方法；采空区的合理处理问题；防止地下开采引起滑坡及滚石危害；三下（水下、铁路及公路下、建筑物下）安全开采；露天矿合理边坡角的确定及不稳定边坡的加固等等。

将来，矿床开采进入深部开采之后，“岩爆”也是非常突出且必须解决的问题。

从上述问题可以看出，矿山岩石力学在采矿工程中占有十分重要的地位，是采矿工程的理论基础。矿山岩石力学的发展水平是衡量一个国家采矿工业水平的重要标志。它反映采矿工业从单凭经验到有理论指导的完善程度。

岩石力学是一门新兴的科学，属于地质学和力学之间的边缘科学，是力学的一个重要分支。它广泛应用于采矿、石油探采、交通、水电、建筑和国防工程等诸多方面。本书采用“矿山岩石力学”为名，表明与其它岩石力学的区别。矿山岩石力学重点研究采矿工程中所涉及的岩石力学问题。

与一般岩石力学相比，矿山岩石力学有如下特点：

1、除采矿工程外，其它部门的地下工程多在地表或距地表几十米的范围内，而采矿工程的地下结构物却多处于较深部位。虽然我国多数矿山尚属浅部开采（通常，700m以上的矿井为深部开采，超过1000m深度的矿井为超深矿井），但一般也多在距地表三、四百米的范围内，况且已有部分矿井进入深部开采。深部岩体的动态与地表附近大不相同。地表附近岩体的一般破坏形式为脆性断裂，而较深处则是粘塑性破坏。也就是说，地表附近岩体是由于丧失凝聚力而破坏。破坏形式往往是裂隙的扩张，是突发性的，而深部岩体的破坏则是某种程度的流动变形。其次，岩体的初始应力状态也不相同，浅部岩体的垂直应力与水平应力之差一般很明显，深部相差却不甚显著，上述情况使得矿山岩石力学所采用的地压计算方法和测试技术具有独到之处；

2、对矿山的地下结构物，只要求其在开采期间不致破坏或适时破坏，在开采后能维持平衡状态不危害地面安全即可，甚至允许破坏到地表。所以，在计算精度、安全系数及岩体加固等方面的要求，一般均低于水利、建筑、国防等部门的标准；

3、由于矿山地质条件复杂，矿床赋存条件多样，故采矿工程结构物的位置，受多方面因素的制约，其选择性不大。同时，采掘工作面随时变化，又增加了支护工作的困难，这就造成矿山岩石力学具有一定复杂性的特点。

以上特点表明，对矿山岩石力学的研究必须给予足够的重视，结合工程实践，加强矿山岩石力学的基础理论研究。

近年来，许多国家都在高速发展采矿工业，随着科学技术水平的提高，采矿工业已进入机械化、自动化开采。开采深度逐年增加，目前，世界上最深的矿井已达3000余米，大型采掘机械进入地下，要求有巨大的采掘空间。因此，出现了前所未有的地压控制问题。这已远远不是只凭经验就能解决的简单问题。因此，世界上许多国家对岩石力学的发展都给予极大的重视。本世纪五十年代以前，许多国家就已成立了各种形式的岩石力学学术组织和工程机构，开展各种学术活动，交流科研成果，承担工程任务。1962年10月在奥地利萨尔斯堡召开的第十三届国际矿山岩石力学集会上宣布成立国际岩石力学学会，规定每四年举行一次定期

会议。1966年9月在里斯本举行了国际岩石力学学会第一次大会。第二次于1970年9月在贝尔格莱德召开。第三次于1974年9月在美国的丹佛举行。第四次于1979年9月在瑞士的蒙特诺举行。最近，1983年在澳大利亚墨尔本召开了第五次会议。我国于1983年成立了全国岩石力学学会筹备处。1979年我国第一次出席了国际岩石力学会议，并作为会员国参加了国际岩石力学学会。在最近召开的第五次国际岩石力学会议上，我国代表团团长被选为学会亚洲区副主席，代表团发表的论文受到会议的重视和好评。

岩石力学的发展，依赖于相关学科的发展，如弹性力学、流变理论、构造地质学、地球物理学、测试技术和相似理论等等，它还涉及物理学的各个领域，如声学、光学、电磁学、热学、原子物理学等等。因此，多学科的合作，协同研究是加速岩石力学发展的途径。

从第五届国际岩石力学会议上可以看出，各国除了应用模拟方法、现代力学、数学相似和物理相似等理论进行分析研究外，还广泛开展现场测试，以补充理论计算的不足。正如前文所提及，岩体的力学属性相当复杂，现阶段的理论分析尚不能给工程施工提供精确的依据。故现场测试的数据具有重要的实用价值，它既是科学研究必不可少的第一性资料，又是指导生产的重要依据。

岩石力学是一门技术科学，它要求研究人员除掌握岩石力学的基础理论和有关知识外，还必须通晓其所服务部门的有关工程知识，才能取得理论与实践相结合的研究成果，解决工程实际问题。

岩石力学的学习方法，除与学习其它力学有共同点之外，也有其特点。学习岩石力学应该了解岩石力学所研究问题的复杂性及科学本身尚不十分成熟的现实，着重掌握基本概念，对所进行的计算和研究进行科学的分析和判断，并密切结合工程实践作出结论。只有这样，才能正确运用岩石力学原理，才能创造性地发展岩石力学的理论。

第一章 岩石的物理力学性质

§ 1-1 概 述

岩石是由矿物组成的，是构成地壳的主要物质。它可以是尺寸很小的矿物颗粒，也可能是相当大的岩体。岩石力学中将岩石分成岩块和岩体。通常所说的岩石指的是岩块（即试件）。岩体要有足够大的体积，且受结构面（或称弱面）削弱，如由地质构造力引起的节理、裂隙、断层等，而岩块是不包含弱面的完整岩石，故岩石的强度比岩体的强度大得多。一般是以室内岩石试件的力学性质表示岩石的力学性质，以现场的大型试块的力学性质表示岩体的力学性质。岩石力学中所以分成岩块和岩体，是为了将未受损伤的完整岩石和受弱面损伤的岩石二者在力学性质上的差异区别开来，并且要研究不同性质和分布的弱面对岩石强度的影响。工程中所涉及的是岩体，在设计前必须取得一定数量的岩体力学性质指标。然而做大量岩体力学性质试验是很不经济的。既然同种类的岩石与岩体的区别只是体积大小和有无弱面存在，那么它们之间也必然有一定内在的联系。因此，目前还是以岩块的性质通过一定的关系找到岩体的力学性质，这样，既节约费用又节省时间。与岩体工程有关的岩石性质有物理性质及力学性质两个方面，标志这些性质的力学参数是岩体力学计算中不可缺少的重要指标，因此工程中总要做大量的岩石物理力学性质的测定。测试方法是否科学，所得的结果是否反映岩石客观存在的性质是很重要的。随着岩石力学理论和测试技术的发展，测试方法也将不断更新。

§ 1-2 岩石的物理性质

与矿山岩石力学有关的主要岩石物理性质有下列几种：

1. 岩石的密度（ ρ ） 单位体积内岩石所具有的质量。

$$\rho = \frac{G}{V} \quad \text{t/m}^3 \quad (1-1)$$

式中 G ——岩石试件质量， t ；

V ——岩石试件的体积（包括孔隙和裂隙的体积）， m^3 。

2. 岩石的相对密度（ δ ） 岩石密度与 4°C 时纯水密度的比值。

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1-2)$$

式中 ρ_w —— 4°C 时纯水的密度， t/m^3 。

3. 岩石的容重（ γ ） 单位体积岩石质量所受的重力。

$$\gamma = \rho g \quad \text{N/m}^3 \quad (1-3)$$

式中 ρ ——岩石的密度， t/m^3 ；

g ——重力加速度, 9.8m/s^2 。

表1-1^[1] 某些岩石的相对密度

岩 石 名 称	相对密度	岩 石 名 称	相对密度
花 岗 岩	2.63~3.40	石 灰 岩	2.40~3.20
正 长 岩	2.60~2.90	大 理 岩	2.72
闪 长 岩	2.85~3.00	白 云 岩	2.78
辉 长 岩	2.90~3.20	致 密 砂 岩	2.4~2.65
辉 绿 岩	2.92	凝 灰 岩	2.56
玄 武 岩	2.90~3.30		

表1-2^[1] 某些岩石的容重

岩 石 名 称	容 重 ($10^4 \cdot \text{N/m}^3$)	岩 石 名 称	容 重 ($10^4 \cdot \text{N/m}^3$)
花 岗 岩		石 灰 岩	
粗粒的	2.8	至密的	2.9~3.1
中粒的	3.1	较松的	2.5
细粒的	3.3	泥灰质的	2.3
强风化的	2.5	砂 岩	1.75~2.65
正 长 岩	2.4~2.8	白 云 岩	2.7~2.9
闪 长 岩	2.9	页 岩	2.4~2.7
辉 长 岩	2.9	片 麻 岩	2.6~2.8
辉 绿 岩	2.9	大 理 岩	2.7
玢 岩	2.5~2.7	凝 灰 岩	0.75~1.40
玄 武 岩	2.7~3.2		

因岩石中含水量发生变化时, 所称量的岩石质量将随之发生变化, 故岩石的密度可分为天然密度 (ρ ——天然状态下的密度), 干密度 (ρ_d ——试件在 105°C 条件下烘干至密度不再变化时的密度) 和水饱和密度 (ρ_s ——水饱和状态下的密度), 故容重亦分为天然容重 (γ) 干容重 (γ_d) 和水饱和容重 (γ_s)。

4. 岩石的孔隙性 系指岩石的裂隙和孔隙的发育程度, 其计算指标为孔隙度 (n)。

孔隙度 (n) 岩石中孔隙体积 V_0 占原体积的百分数 (%)

$$n = \frac{V - V_0}{V} \times 100\%$$

式中符号同前。

当已知 ρ 及 δ 后, 上式亦可表示为

$$n = \left(1 - \frac{\rho}{\delta}\right) \times 100\% \quad (1-4)$$

岩石的孔隙和裂隙削弱了岩石的完整性, 使强度降低, 透水性增高; 且孔隙水可溶解岩石中的某些矿物质, 降低岩石的抗冻性能。所以孔隙度愈大, 其力学性能愈差。

表1-3^[1] 某些岩石的孔隙度

岩石名称	孔隙度 (%)	岩石名称	孔隙度 (%)
花岗岩	0.04~0.61	正长岩	1.38
闪长岩	0.25	玢岩	1.88~2.65
斑岩	0.29~2.75	长英岩	3.40~3.74
玄武岩	1.28	凝灰岩	25

5. 岩石的吸水性 岩石吸收水份的性能称为岩石的吸水性, 它取决于岩石孔隙体积的大小、数量的多少, 及其敞开或封闭的程度等。岩石吸水性指标有吸水率、饱水率和饱水系数。

(1) 岩石的吸水率 (v_1) 在标准大气压力下岩石吸入水的质量 g_1 与岩石干质量 G_d 之比, 即

$$v_1 = \frac{g_1}{G_d} \times 100\% \quad (1-5)$$

(2) 岩石的饱水率 (v_2) 在高压 (15MPa) 或真空条件下岩石吸入水的质量 g_2 与岩石干质量 (G_d) 之比, 即

$$v_2 = \frac{g_2}{G_d} \times 100\% \quad (1-6)$$

(3) 岩石的饱水系数 (K_s) 吸水率与饱水率之比, 即

$$K_s = \frac{v_1}{v_2} \quad (1-7)$$

吸水性较大的岩石在吸水后往往体积膨胀, 称之为岩石的膨胀性, 它会给衬砌十分巨大的压力, 这是目前矿井建设中难以解决的问题之一。

6. 岩石的透水性 地下水存在于岩石孔隙、裂隙之中, 因大多数岩石的孔隙、裂隙是连通的, 因而在一定压力作用下, 岩石可使地下水透过的性能称为岩石的透水性, 衡量岩石透水性的指标为渗透率 (或透水系数)。渗透率 K 可由下式确定:

表1-4^[1] 某些岩石吸水性指标

岩石名称	吸水率 $v_1(\%)$	饱水率 $v_2(\%)$	饱水系数 K_s
花岗岩	0.46	0.84	0.55
石英闪长岩	0.32	0.54	0.59
玄武岩	0.27	0.39	0.69
基性斑岩	0.35	0.42	0.83
砂岩	7.00	12.00	0.60
白灰岩	0.09	0.25	0.36
白云质石灰岩	0.74	0.92	0.80

$$v = -K \frac{h_2 - h_1}{\Delta l} = -K \frac{dh}{dl} \quad (1-8)$$

式中 v ——渗透速度, $v = \frac{dQ}{dA}$;
 A ——渗透方向上的截面积;
 Q ——表示通过 A 的流量;
 h_2 ——高压水头;
 h_1 ——低压水头;
 h 的通式:

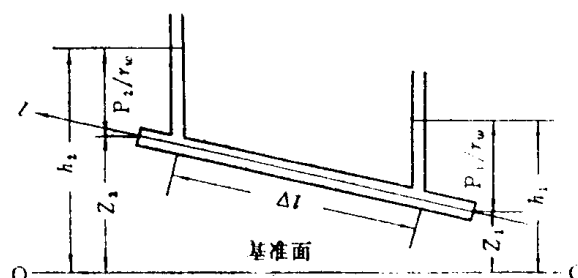


图1-1 水的渗透速度

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + z$$

式(1-8)称为达西(Darcy)定律,负号表示水的流动沿着水头减小的方向。

7. 岩石的碎胀性 岩石破碎后体积比原体积膨大的一种性质,通常用碎胀性系数(ξ)表示。岩石体积碎胀后,在其重力作用下又逐渐压实。直到不能再压密时的碎胀系数称为永久碎胀性系数。用崩落顶板方法处理空区,或研究坑下冒落高度时,都要用到永久碎胀性系数。

$$\xi = \frac{V_1}{V_2}$$

式中 ξ ——碎胀性系数;
 V_1 ——岩(矿)石脱离岩体后的松散体积;
 V_2 ——开采前岩(矿)石原有的实体积。

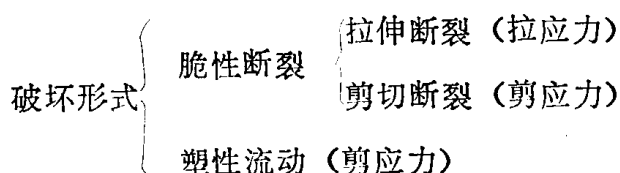
§ 1-3 岩石的力学性质

岩石的力学性质包括两个方面：岩石的强度特性和岩石的变形特性。

一、岩石的强度

岩石的强度是岩石抵抗外力作用的一种能力。当外力增加时，岩石的应力也相应增大，直至岩石破坏，岩石破坏时可能承受的最大应力称为岩石的强度。岩石的强度不仅取决于岩石的性质，还取决于同内部应力状态有关的量。因此只有首先确定受力状态，才能讨论岩石强度的概念。例如，岩石的强度随外力的性质（静荷载和动荷载）及加载方式而变化，故拉伸、压缩、剪切的强度相差甚远。单向压缩、双向压缩、三向压缩的强度也相差很大。所以岩石有抗压、抗拉、抗剪等强度。

1. 岩石的破坏形式 因为强度是抵抗破坏的一种能力，在讨论岩石强度之前，首先分析一下岩石破坏的形式。从受力观点看，岩石的破坏形式有两种：



- (1) 拉伸断裂 截面拉应力达到某一定值时，岩石在该截面被拉断。
- (2) 剪切断裂 截面剪应力达到某一定值时，岩石在此截面被剪断。
- (3) 塑性流动 岩石在剪应力作用下产生塑性变形，其线应变达10%时就算塑性破坏。

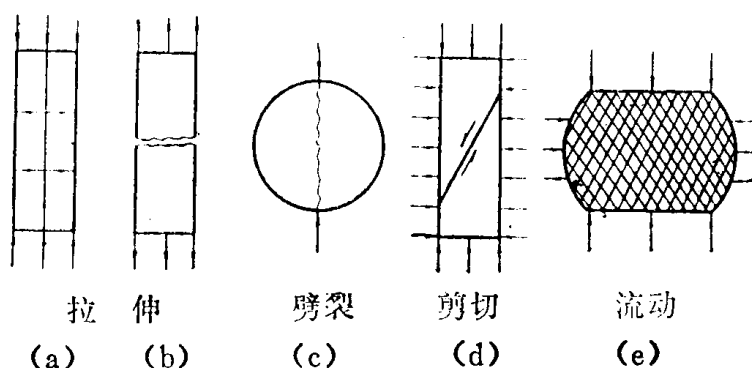


图1-2 岩石的破坏形式

2. 岩石的抗压强度 岩石在压应力作用下发生破坏，是由于某一截面剪应力达到岩石的抗剪强度而引起的。通常以达到破坏时的最大轴向荷载除以受力截面积所得之值作为岩石的抗压强度。根据受力状态可分为三种情况：

(1) 单轴抗压强度 岩石试件在单轴压力下达到破坏的极限强度，数值上等于破坏时的最大压应力。

试件为立方体($5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 或 $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$)或圆柱体，圆柱体试件高度 $h = (2 \sim 2.5)d$ ， d —试件直径；四棱柱体 $h = (2 \sim 2.5)\sqrt{A}$ 。

$$\text{岩石抗压强度} \quad S_c = \frac{P}{A} \quad (1-9)$$

式中 P ——试件破坏时荷载 (N)；
 A ——试件受力截面积 (m^2)。

试验在室内材料试验机上进行。圆柱体和四棱柱体试件优于立方体试件，前者可消除试件受力面与试验机承压板之间产生的摩擦力的影响。

单轴压缩破坏时，试件中产生两组交叉的破裂面，破裂面与荷载轴线的夹角 $\beta = 45^\circ - \frac{\phi}{2}$ ，（式中 ϕ 为岩石内摩擦角）。试验结果与理论分析完全一致，说明压缩破坏是剪应力造成的（图1-3）。

试件尺寸对试验结果有很大影响，故规范中都明确规定试件尺寸，若采用非标准试件，应用下述经验公式校正：

$$S_c = \frac{9S'_c}{7 + 2\frac{d}{h}} \quad (1-10)$$

式中 S'_c ——非标准试件强度；
 d ——非标准试件边长或直径；
 h ——非标准试件高度。

岩石含水量的大小也影响岩石的抗压强度，含水愈多，强度愈低，通常以软化系数反映这种关系。软化系数总是小于1的。

$$\text{软化系数} = \frac{\text{水饱和状态下试件强度}}{\text{干燥状态下试件强度}} \quad (1-11)$$

饱和与干燥的概念与容重中的概念相同。

试验机加荷速度对岩石强度有明显影响，例如：以 $18.62 \times 10^5 \text{ Pa/s}$ 的加荷速度对花岗岩作单轴压缩试验，获得的岩石强度为 $1513 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，若加荷速度增加到 $52 \times 10^5 \text{ Pa/s}$ 则强度增加到 $2401 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。规范规定标准加荷速度为 $14.7 \times 10^5 \text{ Pa/s}$ [1]。

(2) 双轴抗压强度 双轴抗压强度比单轴抗压强度有明显增加，岩石愈软，强度增加得愈多。硬煤在双轴压缩下强度增加18%，软煤增加108% [1]。

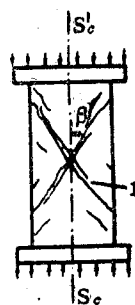


图1-3 岩石抗压试验

β —破坏角；
1—剪切破裂

表1-5 [1] 某些岩石的软化系数

岩石名称	抗压强度 ($\times 10^5 \text{ Pa}$)		软化系数 k
	干燥	饱水	
细粒砂质砂岩	1162	748	0.64
中粒石英砂岩	608	428	0.70
粘土质砂岩	529	353	0.67
坚硬石灰岩	1147	568	0.50
泥灰岩	451	206	0.46
花岗岩	2509	2254	0.89
粗粒花岗岩：新鲜	2342	2038	0.82
风化	1842	1538	0.84
细粒花岗岩：新鲜	2597	2362	0.90
风化	1891	1764	0.93

(3) 三轴抗压强度

巷道围岩通常都是处于双轴或三轴应力状态之下, 单轴应力状态比较少见, 因此, 轴单抗压强度不便于直接应用。本世纪初试制成卡曼 (Karman) 型三轴等围压试验机, 六十年代我国自制成长江-500型岩石三轴压力试验机(原理见图1-4), 也属卡曼型。围压通过高压油加荷 (最高围压可达 $1470 \times 10^5 \text{Pa}$), 垂直方向与普通单轴压力机相同, 压力可达4.9MN。加荷及测试系统见图1-5。

岩石三轴抗压强度比单轴及双轴强度更高, 岩石三轴与单轴抗压强度可用下述关系式表示:

$$S_c''' = S_c + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_a \quad (1-12)$$

式中 S_c''' —— 岩石三轴抗压强度;
 S_c —— 岩石单轴抗压强度;
 ϕ —— 岩石内摩擦角;
 σ_a —— 试验施加的围压。

三轴应力试验标准的岩石试件为圆柱体, 直径9cm, 高20cm。

卡曼型三轴岩石应力试验机的缺点是围压相等, 即 $\sigma_2 = \sigma_3$, 不能根据实际情况调整 σ_2 及 σ_3 , 为了克服这一缺点, 国内外都在研制不等压的真正三轴应力试验机, 葛州坝工程局设计院试制的真三轴应力试验机如图1-6所示, 将液压加荷改为刚性加荷, σ_2 及 σ_3 由独立的液压系统控制。

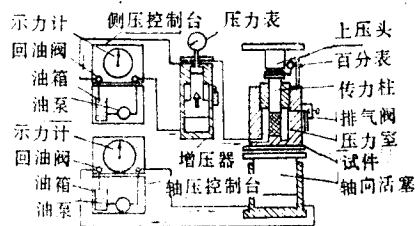


图1-5 长江-500型三轴应力试验机加荷及测试系统

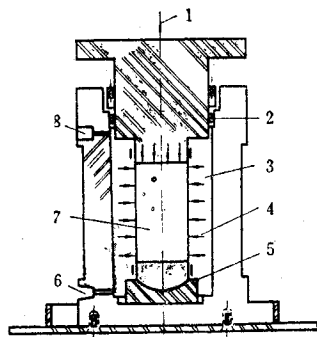


图1-4 三轴试验装置图

- 1—压力机施加垂直压力;
- 2—密封设备;
- 3—压力室;
- 4—侧压力;
- 5—球状底座;
- 6—侧压力液体进口处;
- 7—岩石试件;
- 8—侧压力液体出口处, 排气处

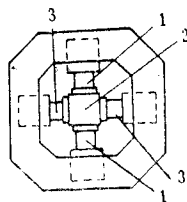


图1-6 330岩石三轴试验机加压室示意图
 1—传力柱；2—试件；3—传力柱

三轴应力关系应该是 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, 通过刚性加荷方式实现上述条件, 试件表面与加压板之间的摩擦影响是一个困难问题。因表面有摩擦力, 即试件表面不但受轴向荷载, 而且有剪应力存在, 因而此受力面不再是主平面, 原来所施加的轴向力, 也将不是主应力。解决的办法是减少摩擦力, 使它的影响减少到可以忽略不计的程度, 或是准确地计算出试件表面的剪应力, 再通过坐标变换求出主应力的方向及大小。

3. 岩石的抗拉强度

对截面积为 A 的试样, 施加均匀拉伸荷载 (P_t) 使其断裂, 则岩石试件的抗拉强度 S_t 可