

高等学校教材

YANSHI LIXUE

岩石力学 与石油工程

YANSHIYOU
GONGCHENG

楼一珊 金业权 编著

石油工业出版社

高等学校教材

岩石力学与石油工程

楼一珊 金业权 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书结合了岩石力学的基本特性和相关理论知识,对其在石油工程中的应用进行了深入系统的阐述,是能够做到理论联系实践的一本好教材。本书从内容上,包括绪论以及其他十二章内容,分别从岩石的结构特点、物理性质、力学性质、蠕变、地应力计算、测井解释、裂缝检测、水力压裂等多个角度介绍了岩石力学与石油工程的关系,并提出相关计算、预测模型。本书语言通俗易懂,理论知识重点突出,且实用性强,是岩土工程、石油工程类专业的必备教材,也可作为石油勘探、开发、钻井等领域的工程技术人员和研究人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石力学与石油工程/楼一珊,金业权编著.

北京:石油工业出版社,2006.3

高等学校教材

ISBN 7-5021-5452-3

I. 岩…

II. ①楼… ②金…

III. 油气钻井-岩石力学-高等学校-教材

IV. TE21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 019105 号

岩石力学与石油工程

楼一珊 金业权 编著

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:北京市兴顺印刷厂

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.5

字数:307 千字 印数:1—2000 册

定价:20.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

油气勘探开发的工作对象是地层的岩石和流体,储层的岩石和流体所承受的力是研究有关地质和工程问题时的外载。因此,从某种意义上讲,油气勘探开发的许多问题都涉及岩石力学范畴,岩石力学的研究和应用越来越受到国际石油工程界的普遍重视,岩石力学对油气勘探开发的影响和作用越来越多地从各个方面表现出来。

国内外与油气开发相关的岩石力学理论及应用,在近十几年,尤其是在 20 世纪 90 年代以来得到了较大的发展。在综合研究与应用方面,美国的 Oklahoma 大学、Stanford 大学、MIT 麻省理工学院、Terratek 公司和加拿大 Waterloo 大学、Calgary 大学、Alberta 大学、加拿大提高采收率研究所以及西方各大石油公司处于领先地位。我国应用岩石力学理论开展了地应力及压裂优化设计等研究,最近几年又初步开展了开发中的流固耦合理论研究,并引入到了油藏数值模拟之中。但无论从理论研究还是应用程度来看都与国外有着较大的差距。目前与油气开发相关的岩石力学理论,主要应用在完井工程、油气开发和油气藏工程等领域。

在地质勘探方面,地质构造形成与演化、储层中油气运移和聚集、天然裂缝的形成和扩展、断层的形态和分布等,都与岩石的应力状态有密切关系。在钻井过程中,岩石的破碎、井眼轨迹的控制、井壁的稳定性以及井身结构的优化设计等,也都与岩石的力学特性有密切关系。在完井工程设计中,完井方式的优化设计、射孔方案的优化设计都要涉及岩石的力学问题。在油气开采工程中,注采井网布置、压裂优化设计、储层变形和孔隙坍塌预测、提高采收率与防止储层损坏、延长油气井开采寿命等领域的设计工作都与岩石的力学特性有着广泛和密切的关系。在油藏工程领域,孔隙随地层压力的动态变化规律及其对流体流动的影响、低渗透油藏的开发等工作也都要涉及岩石的力学行为。可以说,岩石力学已经成为石油工业的基础学科和基本理论。

解决油气藏开发中存在的复杂问题的客观要求,促进了岩石力学的研究与发展。目前国内油气开发中岩石力学的研究主要集中在以下几方面:

- (1) 实际环境下的岩石力学性质及在开采过程中的变化规律;
- (2) 石油开采中的流固耦合问题及孔隙结构的变形和坍塌;
- (3) 应力场、渗流场和温度场作用下的流固耦合分析;
- (4) 油气藏开采引起的地层错动、蠕变和地面沉降研究;
- (5) 地应力测试技术;
- (6) 地应力场的演变及天然裂缝的形成与扩展的分布规律;
- (7) 实际地层环境下的岩石物性和声学的响应特性;
- (8) 岩石物理力学性质的井下地球物理解释;
- (9) 井眼稳定、储层出砂、优化射孔、稠油冷热采等井下工程研究;
- (10) 水力压裂力学研究;
- (11) 流固耦合油气藏数值模拟理论和方法研究。

在以上众多的研究方向上,油气开发过程中的岩石力学性质求取及变化规律、油气储层流固耦合理论、水力压裂理论、地应力测试技术和流固耦合油气藏数值模拟理论,以及这些理论

方法在油气开发中的应用等课题,均为当前国内外研究的热门内容。

自 1995 年以来,本书的作者及其项目组成员围绕着岩石力学的强度测定、钻头选型、地应力分布规律、流变地层套管受力分析及设计、油层出砂及防砂、裂缝检测及分布规律、地应力场的动态模拟等领域开展了大量的研究工作,其中“深层盐膏岩蠕变规律及其在石油工程中的应用”荣获国家科技进步二等奖。本书是基于大量的研究成果编写而成,同时考虑全书的系统性,收录了部分岩石力学的基础理论知识。

本书第一章至第六章由金业权博士编写,第七章至第十二章由楼一珊教授编写,李忠慧老师负责资料及校对工作,在此表示感谢。

由于作者水平和知识面的限制,书中难免有一些不当之处,敬请批评和指正。

编著者

2006 年 1 月于长江大学

目 录

绪论	(1)
一、岩石力学的发展历史和概貌	(2)
二、岩石力学的基本研究内容和研究方法	(3)
三、岩石力学在石油工程中的应用	(4)
第一章 岩石的结构和组织特点	(5)
第一节 岩石的基本构成和地质分类	(5)
第二节 岩石的微观结构	(13)
第三节 岩石的宏观结构	(15)
第二章 岩石的物理性质及工程分类	(17)
第一节 岩石的工程性质	(17)
第二节 岩石的物理性质指标	(18)
第三节 岩石的非均质性和各向异性	(23)
第四节 岩石的工程分类	(24)
第三章 岩石力学性质	(25)
第一节 概述	(25)
第二节 岩石的强度性质	(27)
第三节 岩石的变形性质	(39)
第四节 影响岩石力学性质的因素	(48)
第四章 岩石的本构关系和强度准则	(51)
第一节 应力及应力状态分析	(51)
第二节 应变及应变状态分析	(55)
第三节 岩石的应力应变关系	(56)
第四节 岩石的强度理论	(59)
第五章 岩石的蠕变	(65)
第一节 蠕变概念和蠕变曲线	(65)
第二节 岩石蠕变经验公式	(67)
第三节 蠕变模型	(68)
第四节 粘弹性常数的室内测定	(71)
第六章 地应力测量及计算	(74)
第一节 地应力的成因及分布特点	(75)
第二节 地应力的测量	(77)
第三节 地应力场的模拟计算	(86)
第四节 孔隙压力的变化对地应力的影响	(92)
第五节 油田开发动态应力场的模拟方法	(93)

第七章 测井解释与岩石力学	(94)
第一节 测井解释基础	(94)
第二节 利用测井资料解释岩石力学参数	(95)
第三节 地层岩石物理参数	(100)
第四节 静态弹性和动态弹性参数关系	(102)
第八章 井壁稳定的力学机理	(104)
第一节 井壁不稳定的危害和研究方法	(104)
第二节 直井的井壁稳定分析	(106)
第三节 斜井井壁稳定分析	(109)
第九章 岩石裂缝检测	(117)
第一节 储层天然裂缝的成因及其特征	(117)
第二节 裂缝检测的常规测井资料法	(123)
第三节 地层倾角及 FMI 测井检测裂缝产状	(127)
第四节 利用曲率法评价构造裂缝方向	(128)
第五节 裂缝检测结果在开发中的应用	(131)
第十章 水力压裂	(133)
第一节 裂缝高度预测分析	(133)
第二节 裂缝方位预测	(134)
第三节 裂缝扩展模型	(136)
第四节 地应力与压裂施工设计	(140)
第十一章 油气井生产出砂	(143)
第一节 国内外出砂机理研究现状	(143)
第二节 油层出砂原因及出砂方法预测	(146)
第三节 裸眼完井出砂预测模型的确定	(150)
第四节 射孔完井出砂预测模型的确定	(156)
第五节 裸眼完井与射孔完井优劣性的比较	(158)
第六节 弱胶结砂岩油藏防砂措施及对策探讨	(161)
第十二章 油气井生产套管的损坏机理	(164)
第一节 套管损坏的基本理论及文献调研	(164)
第二节 江汉油田王广地区套管损坏	(166)
第三节 中原油田盐膏层套管	(169)
第四节 盐岩蠕变分析	(171)
第五节 盐膏层套管柱的外载计算	(174)
第六节 盐膏层套管设计	(182)
第七节 软泥岩的套损分析	(187)
参考文献	(188)

绪 论

岩石力学是近代发展起来的一门新兴学科和边缘学科,也是一门应用性和实践性很强的基础学科。它的应用范围涉及采矿、土木建筑、水利水电、铁道、公路、地质、地震、石油、地下工程、海洋工程等众多的与岩石工程相关的工程领域。

1966年,美国科学院岩石力学委员会给予以下定义:“岩石力学是研究岩石的力学性状的一门理论和应用科学,它是力学的一个分支,是探讨岩石对周围物理环境中力场的反应。”这一定义是从材料的“概念”出发的,带有材料力学和固体力学的深深烙印。随着岩石力学理论研究和工程实践的不断深入和发展,人们对岩石的认识有了突破。

岩石力学的发展和人类工程实践活动分不开的。最初,由于工程数量少,规模也小,从事工程建筑时,测试技术受到当时技术水平的限制,往往凭经验来解决问题,因此岩石力学学科的形成和发展要比土力学晚得多。随着工程建筑事业的发展,工程规模越来越大,所遇到的地质条件越来越复杂;加上一些重大工程事故,如美国的圣·弗朗西斯重力坝、意大利的瓦依昂大坝、马尔帕塞大坝等失事的惨痛教训,使人们认识到为了选择相对优良的工程场址,防止重大事故,保证顺利施工,必须对建筑场地进行系统的岩石力学试验研究和理论分析,以准确预测岩体在压力场作用下的变形和稳定性,为合理的工程设计提供可靠的岩石力学数据。

因此近20年来,岩石力学这门新兴学科有了突飞猛进的发展。我国自20世纪50年代末以来,在许多工程中应用岩石力学理论、方法及试验研究,成功地解决了和正在解决着一系列复杂的岩石力学问题。诸如长江葛洲坝、乌江渡水利水电工程、大冶露天铁矿边坡工程等。

今天,由于世界上在矿产资源勘探、能源开发以及地球动力学研究方面的需要,对岩石力学提出了更多更高的要求。当前,国际上正建的大坝高达325m,水电站地下厂房的跨度达51m,地下矿井的开挖深度超过3000m,露天开采深度达300~500m,石油开采深度已达9000m,而在研究地壳变形时涉及的深度达50~60km、温度在1000℃以上,必须考虑的时间效应为几百万年。另外,当前世界上正在建筑的一些超巨型工程,都使岩石力学面临许多前所未有的问题。因此迅速发展岩石力学理论和方法和提高其研究水平,已成为当前十分紧迫的问题。

岩石力学与工程作为一门学科在21世纪国民经济发展中所起的作用将愈来愈重要。在岩石力学与工程这个领域中最常涉及的对象就是岩石或岩体,岩石力学工作者最为关心的就是岩石或岩体在受力情况下的变形、屈服、破坏以及破坏后的力学效应等现象。而这些现象的发生与发展并不像某些金属(均质)材料那样,有较明确的规律可循。岩石或岩体是赋存于自然界中的十分复杂的介质,它是天然地质作用的产物,是自然界中各种矿物的集合体,在自然界中多姿多彩、纷繁复杂。不同岩石在其形成的过程中经历了各自不同的成因特点,同时各类岩石或岩体在形成之后的漫长地质年代中又遭受了不同的地质作用,包括地应力变化、各种构造地质作用、各种风化作用以及人类各种活动的作用等。上述作用的综合使得各种岩石甚至是同种岩石的受荷历史、成分和结构特征都各有差异,从而使岩石或岩体呈现明显的非线性、不连续性、不均质性和各向异性等复杂特性。

由于岩石或岩体的上述特性,岩石力学具有一个很重要的特点就是以实验为重要基础。随着力学、数学的蓬勃发展,特别是计算机的出现,岩石力学工作者可以进行复杂的、大量的计算。近年来,人们已经逐步认识到,数值计算的结果是定量的,但对模型的量化分析并不等于是对原型的定量描述,数值计算的结果是否具有真正的定量意义取决于研究者对原型研究的程度和对模型力学参数取值的可靠性。如果计算缺乏必要的地质基础,在没有搞清或搞不清模型边界条件的基础上就进行大量的计算,其结果只能是游戏式的演算,经不起实际工程的检验。

对原型的研究程度和对模型力学参数取值的可靠性,归根结底取决于对岩石或岩体的认知能力。岩石力学工作者必须具备这种能力,必须认识你所研究的对象——岩石或岩体的基本构成和基本分类,必须了解岩石的主要物理性质和力学性质及其影响这些性质的主要因素。其中,岩石或岩体的基本构成和基本分类尤为重要,它将从根本上影响岩石的物理性质和力学性质,是岩石力学计算模型的根本。

一、岩石力学的发展历史和概貌

岩石力学是伴随着采矿、土木、水利交通以及石油等岩石工程的建设 and 数学、力学等学科的进步逐步发展形成的一门新兴学科,按其发展过程可以分为四个阶段。

1. 初始阶段(19世纪末~20世纪初)

这是岩石力学的萌芽时期,产生了初步理论以解决岩体开挖的科学计算问题。例如,1912年海姆(A. Heim)提出了静水压力的理论。他认为地下岩石处于一种静水压力状态,作用在地下岩石工程上的垂直压力和水平压力相等,均等于单位面积上覆岩层的重量。由于当时地下岩石工程埋藏深度不大,因而曾一度认为这些理论是正确的。但是随着开挖深度的增加,越来越多的人认识到上述理论是不正确的。

2. 经验理论阶段(20世纪初~20世纪30年代)

该阶段出现了根据生产经验提出的地压理论,并开始用材料力学和结构力学的方法分析地下工程的支护问题。最有代表性的理论就是普罗托吉雅柯诺夫(MM. Jipotbrkohob)提出的自然平衡拱学说,即普氏理论。太沙基(K. Terzahi)也提出相同的理论,只是他认为塌落拱的形状是矩形,而不是抛物线形,靠假定的松散地层压力来进行支护设计是不合实际的。尽管如此,上述理论在一定历史时期和一定条件下还是发挥了一定作用。

3. 经典理论阶段(20世纪30年代~20世纪60年代)

这是岩石力学学科形成的重要阶段,弹性力学和塑性力学被引入岩石力学,确立了一些经典计算公式,形成围岩和支护共同作用理论。结构面对岩体力学性质的影响得到了重视,岩石力学文献和专著的出版、实验方法的完善、岩体工程技术问题的解决,这些都说明岩石力学发展到该阶段已经成为一门独立的学科。

4. 现代发展阶段(20世纪60年代~现在)

此阶段是岩石力学理论和实践的新进展阶段,其主要特点是:用更为复杂的多种多样的力学模型来分析岩石力学问题,把力学、物理学、系统工程、现代数理科学、现代信息技术等的最新成果引入了岩石力学。而电子计算机的广泛应用为流变学、断裂力学、非连续介质力学、数值方法、灰色理论、人工智能、非线性理论等在岩石力学与工程中的应用提供了可能。

二、岩石力学的基本研究内容和研究方法

1. 研究内容

岩石力学服务对象的广泛性和研究对象的复杂性,决定了岩石力学研究的内容也必须是广泛而复杂的。但对任何岩石工程领域来讲,下列的基本内容都是要首先进行研究的。

(1)岩石、岩体的地质特征。内容包括:岩石的物质组成和结构特征;结构面特征及其对岩体力学性质的影响;岩体结构及其力学特征;岩体工程分类。

(2)岩石的物理、水理与热力学性质。

(3)岩石的基本力学性质。内容包括:岩块在各种力学作用下的变形和强度特征以及力学指标参数;影响岩石力学性质的主要因素,包括加载条件、温度、湿度等;岩石的变形破坏机理及其破坏判据。

(4)结构面力学性质。内容包括:结构面在法向压应力及剪应力作用下的变形特征及其参数确定;结构面剪切强度特征及其测试技术和方法。

(5)岩体力学性质。内容包括:岩体变形与强度特征及其原位测试技术与方法;岩体力学参数的弱化处理与经验估计;影响岩体力学性质的主要因素;岩体中地下水的赋存、运移规律及岩体的水力学特征。

(6)原岩应力(地应力)分布规律及其测量理论与方法。

(7)工程岩体的稳定性。内容包括:各类工程岩体在开挖载荷作用下的应力、位移分布特征;各类工程岩体在开挖载荷作用下的变形破坏特征;各类工程岩体的稳定性分析与评价等。

(8)岩石工程稳定性维护技术。包括岩体性质的改善与加固技术等。

(9)各种新技术、新方法与新理论在岩石力学中的应用。

(10)工程岩体的模型、模拟试验及原位监测技术。

2. 研究方法

由于岩石力学是一门边缘交叉学科,研究的内容广泛、对象复杂,这就决定了岩石力学研究方法的多样性。根据所采用的研究手段或所依据的基础理论所属学科领域的不同,岩石力学的研究方法可大概归纳为以下四种。在进行研究方法论述的时候也涉及一些研究内容,可作为上述研究内容的补充。

1) 工程地质研究方法

该方法着重研究岩石和岩体地质特征。如用岩矿鉴定方法,了解岩体的岩石类型、矿物组成及结构构造特征;用地层学方法、构造地质学方法及工程勘察方法等,了解岩体的成因、空间分布及岩体中各种结构面的发育情况等;用水文地质学方法了解赋存于岩体中地下水的形成与运移规律等。

2) 科学实验方法

科学实验是岩石力学发展的基础,它包括实验室岩石力学参数的测定、模型试验、现场岩体的原位试验及监测技术。随着岩石力学的不断发展,其涉及的实验范围也越来越宽。如地质构造的勘测、大地层的力学测定等,可为岩石力学提供必要的研究资料。另一方面,室内岩石的微观测定也是岩石力学研究的重要手段。近代发展起来的新的实验技术都已不断地应用于岩石力学领域,如遥感技术、极光散斑和切层扫描技术、三维地震勘测成像、三维地震 CT 成像技术、微震技术等,都已逐渐为岩石工程服务。

3) 数学力学分析方法

数学力学分析是岩石力学研究中的一个重要环节。它是通过建立工程岩体的力学模型和利用适当的分析方法,预测工程岩体在各种力场作用下的变形与稳定性,为岩石工程设计和施工提供定量依据。其中建立符合实际的力学模型和选择适当的分析方法是数学力学分析中的关键。

4) 整体综合分析方法

该方法是以系统工程为基础对整个工程进行多种方法的综合分析。这是岩石力学与岩石工程研究中极其重要的一套工作方法。

三、岩石力学在石油工程中的应用

近年来,随着石油勘探开发工作的不断深入,岩石力学在石油工程领域的应用受到了许多有识之士的高度重视。它在解决油气藏开发中复杂技术问题的同时,也促进了与油气开发相关的岩石力学的飞速发展。目前岩石力学不仅在降低钻采事故、进行油藏工程研究、制订合理可行的开发方案、提高经济油气采收率、防止储层破坏和延长油气经济开采年限等领域得到了广泛应用,而且已形成了固定的发展和研究方向。

解决油气藏开发中存在的复杂问题的客观要求,促进了与油气藏开发相关的岩石力学的研究与发展。目前国内外油气开发中岩石力学的研究主要集中在以下几个方面:

- (1) 实际环境下的岩石力学性质及在开采过程中的变化规律;
- (2) 石油开采中的流固耦合问题及孔隙结构的变形和坍塌;
- (3) 应力场、渗流场和温度场作用下的流固耦合分析;
- (4) 油气藏开采引起的地层错动、蠕变和地面沉降研究;
- (5) 地应力测试技术;
- (6) 地应力场的演变及天然裂缝的形成与扩展的分布规律;
- (7) 实际地层环境下的岩石物性和声学的响应特性;
- (8) 岩石物理力学性质的井下地球物理解释;
- (9) 井眼稳定、储层出砂、优化射孔、稠油冷热采等井下工程研究;
- (10) 水力压裂力学研究;
- (11) 流固耦合油气藏数值模拟理论和方法研究。

在以上众多的研究方向上,油气开发过程中的岩石力学性质求取及变化规律、油气储层流固耦合理论、水力压裂理论、地应力测试技术和流固耦合油气藏数值模拟理论,以及这些理论方法在油气开发中的应用等课题,均为当前国内外研究的热门项目。

第一章 岩石的结构和组织特点

第一节 岩石的基本构成和地质分类

岩石是自然界中各种矿物的集合体,是天然地质作用的产物。一般而言,大部分新鲜岩石质地均较坚硬致密、孔隙小而少、抗水性强、透水性弱、力学强度高。

岩石是构成岩体的基本组成单元。相对于岩体而言,岩石可看作是连续的、均质的、各向同性的介质。但实际上只要稍微深入研究,就不难发现岩石中也存在一些如矿物解理、微裂隙、粒间空隙、晶格缺陷、晶格边界等内部缺陷,统称微结构面。因此,自然界中的岩石又是一种受到不同程度损伤的材料。

一、基本构成

岩石的基本构成是由组成岩石的物质成分和结构两大方面来决定的。

(一)岩石的主要物质成分

岩石中主要的造岩矿物有:正长石、斜长石、石英、黑云母、白云母、角闪石、辉石、橄榄石、方解石、白云石、高岭石、赤铁矿等。它们的含量,因不同成因的岩石而异。

岩石中的矿物成分会影响岩石的抗风化能力、物理性质和强度特性。

1. 岩石的矿物成分与抗风化性

岩石中矿物成分的相对稳定性对岩石抗风化能力有显著的影响。各矿物的相对稳定性主要与其化学成分、结晶特征及形成条件有关。从化学元素活动性来看,Cl 和 SO_4 最易迁移;其次是 K、Na、Ca、Mg;再次是 SiO_2 ;最后是 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 。至于低价铁则易氧化。

碱性和超碱性岩石主要是由易于风化的橄榄石、辉石及碱性斜长石组成,所以非常容易风化;酸性岩石主要由较难风化的石英、闪长石、酸性斜长石及少量暗色矿物(多为黑云母)组成,故其抗风化能力比起同样结构的碱性岩要高;中性岩则居两者之间,变质岩的风化性状与岩浆岩类似;沉积岩主要由风化产物组成,大多数为原来岩石中较难风化的碎屑物或是在风化和沉积过程中新生成的化学沉积物。因此,它们在风化作用中的稳定性一般都较高。但是矿物成分并不是决定岩石风化性状的惟一因素,因为岩石的性状还取决于岩石的结构和构造特征,所以不能将矿物抗风化的稳定性与岩石的抗风化性等同起来。

通常可以将造岩矿物分为非常稳定、稳定、较稳定和不稳定四类。并按其稳定性顺序列于表 1-1。

表 1-1 主要造岩矿物抗风化相对稳定性

抗风化稳定性	非常稳定			稳定		较稳定				不稳定			
	石 英	钙 长 石	白 云 母	正 长 石	钠 长 石	酸性斜 长石	角 闪 石	辉 石	黑 云 母	碱性斜 长石	霞 石	橄 榄 石	黄 铁 矿
矿物 名称													

2. 岩石的矿物成分与力学性质

新鲜岩石的力学性质主要取决于岩石的矿物成分和颗粒间的联结。对于具有结晶联结的岩石,其矿物成分的影响要大一些。应当指出,岩石中矿物的硬度和岩石的强度是两个既有联系而又不同的概念。例如,即使组成岩石的矿物都是坚硬的,岩石的强度也不见得一定是高的。因为矿物之间的联结可能是弱的。但就大部分岩石来说,两者之间还是有相应关系的。如在许多岩浆岩中,其强度常随暗色矿物(辉石,特别是橄榄石)的增加而增加;在沉积岩中砂岩的强度常随石英相对含量的增加而增大;石灰岩的强度常随其硅质混合物含量的增加而增大,随粘土质含量的增加而降低;在变质岩中,任何片状的硅酸盐类矿物、盐岩矿物,如云母、绿泥石、滑石、蛇纹石等的存在将使岩石强度降低,特别是当这些矿物呈平行排列时。

3. 岩石的矿物成分与物理性质

岩石中某些易溶物、粘土矿物、特殊矿物的存在,常使岩石物理力学性质复杂化。一些易溶矿物,如石膏、芒硝、岩盐、钾盐等在水的作用下易被溶蚀,从而使岩石的孔隙度加大,结构变松,强度降低。一些含芒硝的岩石,由于芒硝的物态变化(液态变固态、不含结晶水变含结晶水)能引起体积的变化,因此,在温度由 32.5°C 以上变成 32.5°C 以下,或由于干燥变潮湿时,会导致芒硝由液态变固态,由无水变含水,体积增大,引起岩石膨胀;含石膏的岩石,也由于石膏(CaSO_4)转变为水化石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)时体积增大而发生膨胀。

另外,粘土岩石中的蒙脱石遇水膨胀且强度降低,凝灰岩中一些不稳定的物质极易分解成斑脱土,遇水也易膨胀和软化。还有某些玻璃质和次生矿物(如沸石等),能促进岩石与磷之间的化学反应。

(二)常见的岩石结构类型

岩石的结构是指岩石中矿物(及岩屑)颗粒相互之间的关系,包括颗粒的大小、形状、排列、结构联结特点及岩石中的微结构面(即内部缺陷)。其中,以结构联结和岩石中的微结构面对岩石工程性质影响最大。

岩石中结构联结的类型主要有两种,分别为结晶联结和胶结联结。

1. 结晶联结

岩石中矿物颗粒通过结晶相互嵌合在一起,如岩浆岩、大部分变质岩及部分沉积岩的结构联结。这种联结使晶体颗粒之间紧密接触,故岩石强度一般较大,但随结构的不同而有一定的差异。如在岩浆岩和变质岩中,等粒结晶结构一般比非等粒结晶结构的强度高,抗风化能力强;在等粒结构中,细粒结晶结构比粗粒的强度高;在斑状结构中,细粒基质比玻璃基质的强度高。总之,晶粒愈细,愈均匀;玻璃质愈少,则强度愈高。粗粒斑晶的酸性深成岩强度最低,细粒微晶而无玻璃质的基性喷出岩强度最高。如粗粒花岗岩抗压强度一般只有 120MPa ,而同一成分的细粒花岗岩则可达 260MPa 。

具有结晶联结的一些变质岩,如石英岩、大理岩等情况与岩浆岩类似。

沉积岩中的化学沉积岩是以可溶的结晶联结为主,联结强度较大,一般以等粒细晶的岩石强度最高,如成分均一的致密细粒石灰岩其抗压强度可达 260MPa 。但这种联结的缺点是抗水性差,能不同程度地溶于水,对岩石的可溶性有一定的影响。

固结粘土岩的联结有一部分是再结晶的结晶联结,其强度比其他坚硬岩石要差得很多。

2. 胶结联结

指颗粒与颗粒之间通过胶结物在一起的联结。如沉积碎屑岩、部分粘土岩之结构联结。

对于这种联结的岩石,其强度主要取决于胶结物及胶结类型。从胶结物来看,硅质、铁质胶结的岩石强度较高,钙质次之,而泥质胶结强度最低;从胶结类型来看,根据颗粒之间以及颗粒与胶结物间的关系,碎屑岩具有三种基本类型:

(1)基质胶结类型:颗粒彼此不直接接触,完全受胶结物包围,岩石强度基本取决于胶结物的性质。如图 1-1(a)所示;

(2)接触胶结类型:只有颗粒接触处才有胶结物胶结,胶结一般不牢固,故岩石强度低,透水性较强。如图 1-1(b)所示;

(3)孔隙胶结类型:胶结物完全或部分地充填于颗粒间的孔隙中,胶结一般较牢固,岩石强度和透水性主要视胶结物性质和其充填程度而定。如图 1-1(c)所示。

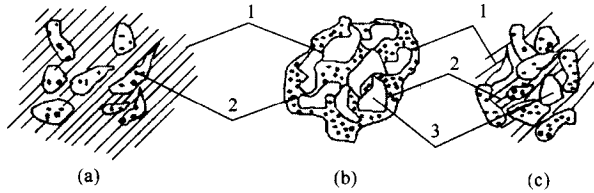


图 1-1 碎屑岩胶结类型
(a)基质胶结类型;(b)接触胶结类型;(c)孔隙胶结类型
1—胶结物质;2—颗粒;3—未充填之孔隙

3. 岩石中的微结构面

岩石中的微结构面(或称缺陷),是指存在于矿物颗粒内部或矿物颗粒及矿物集合体之间微小的弱面及空隙。它包括矿物的解理、晶格缺陷、晶粒边界、粒间空隙、微裂隙等。

矿物的解理面指矿物晶体或晶粒受力后沿一定结晶方向分裂成的光滑平面。它往往平行于晶体中最紧密质点排列的面网,即平行于面网间距较大的面网。某些主要的造岩矿物,如黑云母、方解石、角闪石等具有极完全或完全解理,正长石、斜长石等也具中等解理。它们都是岩石中细微的弱面。

晶粒边界:矿物晶体内部各粒子都是由各种离子键、原子键、分子键等相联结。由于矿物晶粒表面电价不平衡而使矿物表面具有一定的结合力,但这种结合力一般比起矿物内部的键联结力要小,因此晶粒边界就相对软弱。

微裂隙:指发育于矿物颗粒内部及颗粒之间的多呈闭合状态的破裂迹线。这些微裂隙十分细小,肉眼难以观察,一般要在显微镜下观察,故也称显微裂隙。它们的成因,主要与构造应力的作用有关,因此常具有一定方向。有时也由温度变化、风化等作用而引起。微裂隙的存在对岩石工程地质性质影响很大。

粒间空隙:多在成岩过程中形成,如结晶岩中晶粒之间的小空隙,碎屑岩中由于胶结物未完全充填而留下的空隙。粒间空隙对岩石的透水性和压缩性有较大影响。

晶格缺陷:有由于晶体外原子入侵结果产生的化学上的缺陷,也有由于化学比例或原子重新排列的毛病所产生的物理上的缺陷。它与岩石的塑性变形有关。

由上述可见,岩石中的微结构面一般是很小的,通常需在显微镜下观察才能见到。但是,它们对岩石工程性质的影响却是很大的。

首先,微结构面的存在将大大降低岩石(特别是脆性岩石)的强度,许多学者如霍克(Hoek)、布雷斯(Brace)、沃尔什(Walsh)等,根据格里菲斯(Griffith)强度理论,用试验论证了

这一点。

其主要论点是：由于岩石中这些缺陷的存在，当其受力时，在微孔或微裂隙（缺陷）末端，易造成应力集中，使裂隙可能沿末端继续扩展，导致岩石在比完全无缺陷时所能承受的拉应力或压应力低得多的应力值的作用下受到破坏。故有人认为缺陷是影响岩石力学性质的决定性因素。

其次，由于微结构面在岩石中常具有方向性（如裂隙等），因此它们的存在常导致岩石的各向异性。

此外，缺陷能增大岩石的变形，在循环加荷时引起滞后现象；还能改变岩石的弹性波波速，改变岩石的电阻率和热传导率等。缺陷对岩石的影响，在低围压时是明显的，但在岩石受高围压时，缺陷的影响相对减弱，这是因为在高温围压下岩石微裂隙等缺陷被压密、闭合之故。

二、岩石的地质成因分类

自然界中有各种各样的岩石，不同成因的岩石具有不同的力学特性，因此有必要根据不同成因对岩石进行分类。根据地质学的岩石成因分类可把岩石分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。岩石学是一门专门的课程，这里不作详细的探讨，只是简要介绍各类岩石的基本特征。

（一）岩浆岩

地壳下部物质成分复杂，但主要是硅酸盐，并含有大量的水汽和各种其他的气体。由于放射性元素的集中，不断地蜕变而释放出大量的热能，使物质处于高温（1000℃以上）、高压（上部岩石的重量产生的巨大压力）的过热可塑状态。当地壳变动时，上部岩层压力一旦降低，过热可塑状态的物质就立即转变为高温熔融体，称为岩浆。它的化学成分很复杂，主要有 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 MnO 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 等。依其含 SiO_2 量的多少，分为碱性岩浆和酸性岩浆。碱性岩浆的特点是富含钙、镁和铁，而贫钾和钠，粘度较小，流动性较大；酸性岩浆富含钾、钠和硅，而贫镁、铁、钙，粘度大，流动性较小。岩浆内部压力很大，不断向地壳压力低的地方移动，以致冲破地壳深部的岩层，沿着裂缝上升。上升到一定高度，温度、压力都发生降低。当岩浆的内部压力小于上部岩层压力时，迫使岩浆停留，冷凝成岩浆岩。

依冷凝成岩浆岩地质环境的不同，将岩浆岩分为三大类：深成岩、浅成岩和喷出岩（火山岩）。每一类中又可根据成分的不同分出具体的各类，如表 1—2 所示。它们在结构上有较大的差异，这种差异往往通过岩石的力学性质反映出来。

表 1—2 岩浆岩分类表

化学成分		含 Si、Al 为主			含 Fe、Mg 为主		产状
酸碱性		酸性	中性	基性	超基性		
颜色		浅色（浅灰、浅红、黄色）			深色（深灰、绿色、黑色）		
矿物成分		含正长石		含斜长石		不含长石	
		成因及结构		石英、云母、角闪石	黑云母、角闪石、辉石	角闪石、辉石、黑云母	辉石、角闪石、橄榄石
深成岩	等粒状，有时为斑状，所有矿物皆能用肉眼鉴别	花岗岩	正长岩	闪长岩	辉长岩	橄榄岩、辉岩	岩基、岩株
浅成岩	斑状（斑晶较大且可分辨出矿物名称）	花岗斑岩	正长斑岩	玢岩	辉绿岩	未遇到	岩脉、岩床、岩盘

续表

化学成分		含 Si、Al 为主			含 Fe、Mg 为主		产状
酸碱性		酸性	中性		基性	超基性	
颜色		浅色(浅灰、浅红、黄色)			深色(深灰、绿色、黑色)		
成因及结构		含正长石		含斜长石		不含长石	
		石英、云母、角闪石	黑云母、角闪石、辉石	角闪石、辉石、黑云母	辉石、角闪石、橄榄石	橄榄石、辉石	
喷出岩	玻璃状,有时为细粒斑状,矿物难用肉眼鉴别	流纹岩	粗面岩	安山岩	玄武岩	未遇到	熔岩流
	玻璃状或碎屑状	黑曜岩、浮石、火山凝灰岩、火山碎屑岩、火山玻璃					火山喷出的堆积物

引自:孔宪立主编. 工程地质学. 中国建筑工业出版社, 1997年6月

1. 深成岩

常形成较大的侵入体,有巨型岩体,大的如岩基、岩盘。它们的形成环境都处在高温高压状态之下,在形成过程中由于岩浆有充分的分异作用,常常形成碱性岩、超碱性岩、中性岩及酸性岩等。彼此往往逐渐过渡,有时也突然变化、互相穿插。在逐渐过渡的大型岩基中,有时则具有环形的岩性岩相带,一般外环偏酸性,内环偏基性,有时在外围还出现基性边缘。根据这种分带性,不论是基性或者中、酸性岩体,岩石种类也是很多的,组织结构也有所变化。在侵入岩体的边缘,常有围岩落入火成岩体之中而形成外捕虏体,亦有冷却的基性边缘岩石堕入火成岩中形成内捕虏体。它们的分布与火成岩的流动构造如流线、流层常相一致。围岩在高温高压的作用下,常常形成热力接触变质的混合岩带。接触岩带的规模视侵入体的规模与埋置深度而不同。

深成岩岩性较均一,变化较小,岩体结构呈典型的块状结构,结构体多为六面体和八面体。但在岩体的边缘部分也常有流线、流面和各种原生节理,结构相对比较复杂。

深成岩颗粒均匀,多为粗—中粒状结构,致密坚硬,孔隙很少,力学强度高,透水性较弱,抗水性较强,所以深成岩体的工程地质性质一般比较好。花岗岩、闪长岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等均属常见的深成岩体,常被选作大型建筑场地。如举世瞩目的长江三峡大坝的坝基就是坐落在花岗闪长岩体之上。但深成岩体也有不足的一面。首先,深成岩体较易风化,风化壳的厚度一般比较厚;其次,当深成岩受同期或后期构造运动影响,断裂破碎剧烈,构造面很发育时,其性质将大为复杂化,岩体完整性和均一性被破坏,强度降低;此外,深成岩体常被同期或后期小侵入体、岩脉穿插,有的对岩体或先期断裂起胶结作用,有的起进一步的分割作用,必须分别对待。但总的来说是岩体更加复杂化,破坏了它的均一性,岩体质量降低。深成岩与周围岩体接触,常形成很厚的接触变质带,这些变质带往往成分复杂,有时易风化,形成软弱岩带或软弱结构面,应予以注意。

2. 浅成岩

成分一般与相应的深成岩相似,但其产状和结构都不相同,多为岩床、岩墙、岩脉等小侵入体,岩体均一性差,岩体结构常呈镶嵌式结构,而岩石多呈斑状结构和均粒—中细粒结构。细粒岩石强度比深成岩高,抗风化能力强,斑状结构岩石则差一些。与其他一些类型的岩体相比,浅成岩一般还是较好的,在岩石工程中应尽量加以利用。

花岗斑岩、闪长玢岩和伟晶岩等中酸性浅成岩性质与花岗岩类似,细晶岩强度较高,但由

于产出范围较小,岩性变化比较大,岩体均一位较差。

辉绿岩为常见的基性浅成岩体,岩性致密坚硬,强度较高,抗风化能力较强,但岩体均一性较差;煌斑岩常以岩脉产出,含暗色矿物多,是最容易风化且风化程度较深的一种岩体。

3. 喷出岩

喷出岩型有喷发及溢流之别,喷发式火山岩有陆地喷发、海底喷发;有裂隙性喷发,亦有火山口式喷发。它们往往间歇性喷发及溢流,即轮回交替出现。每次喷发的压力、温度不同,所含物质成分不等。无论是喷发式或溢流式,都导致这类岩石的组织结构及成分有很大的差异,岩性岩相变化十分复杂。总的来说,喷出岩是火山喷出的熔岩流冷凝而成。由于火山喷发的多期性,火山熔岩和火山碎屑往往相间,使喷出岩具类似层状的构造。

喷出岩由于岩浆喷出后才凝固,所以岩石中含有较多的玻璃及气孔构造、杏仁构造,岩石颗粒很细,多呈致密结构,酸性熔岩在流动过程中形成流纹构造。另外,由于喷出岩是在急骤冷却条件下凝固形成的,所以原生节理比较发育,例如玄武岩的柱状节理、流纹岩的板状节理等。

上述的这些特征都使喷出岩的结构比较复杂,岩性不均一,各向异性显著,岩体的连续性较差,透水性较强,软弱夹层的弱结构面比较发育,成为控制岩体稳定性的主要因素。厚层的熔岩岩体结构类型常呈块状结构,一般呈镶嵌结构,薄的呈层状结构。

特别要注意喷出岩当中的松散岩层及松软岩层,如凝灰质碎屑岩及粘土岩等,有些岩层常含有大量的蒙脱石、拜来石及伊利石等粘土矿物,这些矿物往往具有不同程度的膨胀性。

喷出岩以玄武岩最为常见,其次是安山岩和流纹岩。

(二) 水成岩(沉积岩)

水成岩又称沉积岩,是由风化剥蚀作用或火山作用形成的物质,在原地或被外力搬运,在适当条件下沉积下来,经胶结和成岩作用而形成的。其矿物成分主要是粘土矿物、碳酸盐和残余的石英长石等,具层理构造,岩性一般具有明显的各向异性。按形成条件及结构特点,沉积岩可分为火山碎屑岩、胶结碎屑岩、粘土岩、化学岩和生物化学岩等,如表 1-3 所示。

表 1-3 沉积岩分类简表

岩类	结 构	岩石分 类名称	主要亚类及其组成物质
碎屑岩类	火山碎屑岩	粒径 > 100mm	火山集块岩 主要由大于 100mm 的熔岩碎块、火山灰尘等经压实胶结而成
		粒径 100~2mm	火山角砾岩 主要由 100~2mm 的熔岩碎屑、晶屑、玻屑及其他碎屑混入物组成
		粒径 < 2mm	凝灰岩 由 50% 以上粒径小于 2mm 的火山灰组成,其中有岩屑、晶屑、玻屑等细粒碎屑物质
	沉积碎屑岩	砾状结构 粒径 > 2mm	角砾岩: 由带棱角的角砾经胶结而成 砾岩: 由浑圆的砾石经胶结而成
		砂质结构 粒径 2.00~0.05mm	石英砂岩: 石英含量 > 90%、长石和岩屑 < 10% 长石砂岩: 石英含量 < 75%、长石 > 25%、岩屑 < 10% 岩屑砂岩: 石英含量 < 75%、长石 < 10%、岩屑 > 25%
		粉砂结构 粒径 0.05~0.005mm	主要由石英、长石的粉、粘粒及粘土矿物组成