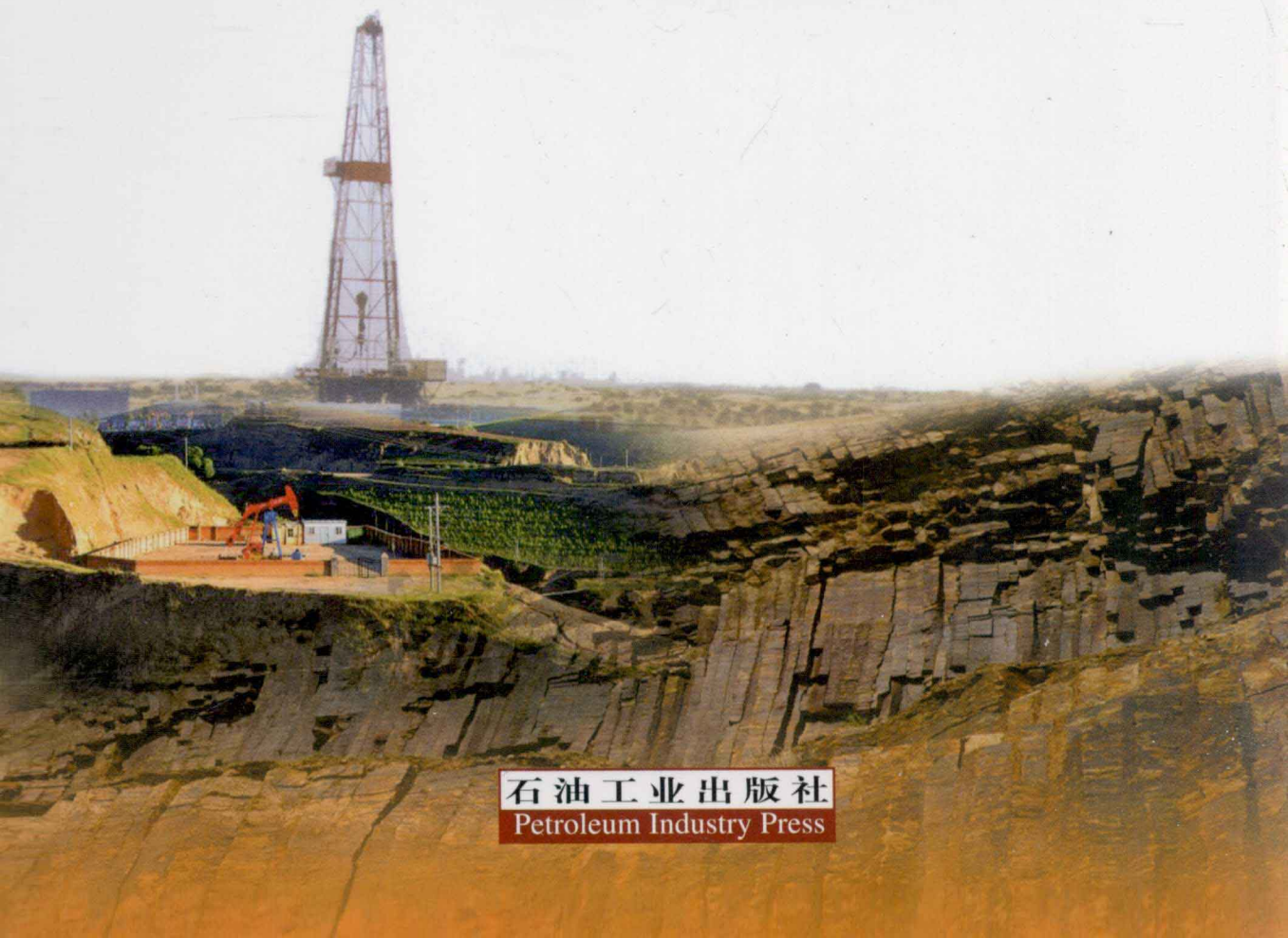




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

石油工程岩石力学基础

陈勉 金衍 张广清 编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

石油工程岩石力学基础

陈 勉 金 衍 张广清 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是石油工程岩石力学的入门教材。全书以岩石的结构特点、力学性质、强度理论为基础,通过对油田地应力与井壁围岩应力状态的分析,系统阐述了井壁坍塌与缩径、井壁破裂、水力压裂、油气井出砂、声波测井与地震资料的应用等石油工程中的岩石力学问题。

本书可作为石油工程、油气储运工程、地球物理勘探等专业的本科生、研究生教材,也可供现场从事钻井、采油、油藏、测井等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

石油工程岩石力学基础/陈勉,金衍,张广清编.
北京:石油工业出版社,2011.6
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5021-8537-4

I. 石…

II. ①陈… ②金… ③张…

III. 石油工程—岩石力学—高等学校—教材

IV. TE21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 128919 号

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

编辑部:(010) 64523579 发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油报印刷厂

2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:8.25

字数:206 千字

定价:15.00 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

岩石包括组成岩石的固体骨架、孔隙、裂缝以及其中的流体，因此岩石力学往往会应用到弹性力学、塑性力学、流体力学、渗流力学等力学学科的诸多理论方法。岩石的性质几乎牵涉到所有力学分支，岩石力学的研究是各种力学理论的综合运用。不同岩石力学问题的研究，可能包括瞬时变形运动，也可能包含与地质演化时间相关的长期变形运动。

岩石力学是一门研究天然材料变形、破坏等力学性质的学科，它与以金属材料为主要研究对象的材料力学、弹性力学、结构力学不同，其研究对象很少是均质的，甚至也不是各向同性和连续的。岩石力学与以液体、气体为主要研究对象的流体力学、气体动力学也不同。岩石材料赋存于地下，其力学性质难于直接测试和观察，而若将其取至地面进行测试则岩石的力学性质往往发生了较大的变化，加之岩石中的流体存在于裂隙或孔隙之中，与岩石骨架相互作用，使岩石的受力情况更加复杂。

近年来，越来越多的大学在石油工程、地球物理勘探、测井等专业开设石油工程岩石力学课程，但是有关石油工程岩石力学的教材尚少。1992年起，笔者在中国石油大学（北京）为石油工程、地球物理勘探、测井、物理等专业的本科生、研究生讲授石油工程岩石力学课程，深感迫切需要一本适用于石油类专业学生的岩石力学教材。为此，1997年，笔者与金衍教授合作编写了《石油工程岩石力学》讲义，2006年以此讲义为基础，申报为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

科学技术是不断发展的，岩石力学也是不断发展的。近十余年来，石油工业界对岩石力学的认识有了许多变化，岩石力学理论已经更广泛地应用于石油工程之中。2008年，笔者与金衍、张广清两位教授合作在科学出版社出版了《石油工程岩石力学》。但是，那本书的篇幅和理论体系作为大学生教材并不适用。本书是在《石油工程岩石力学》讲义的基础上，吸收最新的教学研究成果完善而成的，主要是面向石油类专业本科生和研究生。它当然不是一本深入论述石油工程岩石力学理论和技术知识的专著，而是介绍石油工程岩石力学基础知识的入门教材。在内容的选取上，尽量注意少而精；在内容的讲解上，力图低起点，仅仅要求读者提前掌握水力学、材料力学等基础力学知识。

本书由陈勉、金衍、张广清共同编写完成，其中第1章、第2章、第3章由陈勉编写，第4章、第5章、第6章、第7章、第9章和第10章由金衍编写，第8章由张广清编写。

美国亚利桑那州立大学的陈康平教授从力学学术和人才培养的角度，与笔

者进行了多次交流，使笔者受到许多有益的启发。笔者的博士研究生侯冰、陈军海和杨沛参与了本教材的资料收集和后期校对工作。还有不少老师、同事、研究生，对本书提出了许多宝贵意见，笔者在此一并表示感谢。

“石油工程岩石力学”目前尚无完整而系统的理论技术体系，笔者恳请专家学者提出宝贵意见，并参与完善这一理论技术体系，这将是一件非常有益、有趣的事情。

陈 勉

2010年6月于中国石油大学（北京）

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石力学概述	1
1.2 岩石力学发展历史	2
1.3 岩石力学的研究方法	3
1.4 石油工程岩石力学研究对象及特点	4
思考题.....	4
第 2 章 岩石的力学性质和变形特征	5
2.1 岩石的力学性质	5
2.2 岩石单轴压缩试验	7
2.3 岩石三轴抗压试验.....	12
2.4 岩石的拉伸破裂试验.....	13
2.5 岩石蠕变及其机理.....	15
思考题	17
第 3 章 岩石的强度理论	18
3.1 Mohr - Coulomb 准则	19
3.2 Drucker - Prager 准则	23
3.3 Griffith 准则	24
3.4 Griffith 准则的 Murrell 推广.....	25
思考题	26
第 4 章 岩石中的流体压力和流动	27
4.1 岩石孔隙度和渗透率.....	27
4.2 孔隙中的流体流动.....	28
4.3 常用的岩石物理模型.....	29
4.4 一维固结问题.....	30
4.5 岩石的有效应力.....	31
思考题	33
第 5 章 油田地应力与井壁围岩应力状态	34
5.1 孔隙压力.....	34
5.2 油田地应力分析.....	35
5.3 直井井壁围岩应力分布.....	36
5.4 大斜度井、水平井井壁围岩应力分布.....	38
5.5 油田地应力的确定方法.....	41
5.6 油田地应力的预测模型.....	48
思考题	50

第 6 章 井壁坍塌与缩径	51
6.1 井壁坍塌.....	51
6.2 塑性地层的井眼缩径.....	57
6.3 黏弹性地层的井眼变形.....	58
6.4 水敏性泥页岩地层的临界坍塌时间.....	61
思考题	64
第 7 章 井壁破裂	65
7.1 直井井壁破裂的力学机理.....	65
7.2 破裂压力的工程预测模型.....	66
7.3 大斜度井的井壁破裂.....	69
7.4 大斜度井的钻井液密度窗口.....	70
思考题	74
第 8 章 水力压裂	75
8.1 水力压裂概述.....	75
8.2 水力压裂数值模拟.....	79
8.3 小型压裂.....	86
8.4 水力压裂物理模拟.....	90
思考题	93
第 9 章 油气井出砂	94
9.1 油气井出砂概述.....	94
9.2 砂拱数学模型.....	98
9.3 常见的出砂工程预测方法	100
9.4 防砂方法及其选择	102
思考题.....	104
第 10 章 声波测井与地震资料在岩石力学中的应用	105
10.1 弹性介质中的纵波与横波.....	105
10.2 利用声波测井确定岩石的弹性和强度参数.....	107
10.3 利用声波测井确定三个压力.....	110
10.4 地震资料的工程预测理论.....	114
思考题.....	119
参考文献	120

第 1 章 绪 论

1.1 岩石力学概述

岩石力学是力学的一个分支。在《中国大百科全书 力学卷》中对岩石力学的定义为：“岩石力学是运用力学和物理学的原理研究岩石的力学和物理性质的一门科学，目的在于充分掌握和利用岩石的固有性质，解决和解释生产建设中的实际问题”。美国科学院岩石力学委员会 1966 年曾给岩石力学下过定义：“岩石力学是研究岩石力学性能的理论 and 应用的科学，是探讨岩石对其周围物理环境中力场的反应的力学分支”。比较而言，第二个定义更加强强调岩石材料全部赋存于地质环境中，这些材料的自然特征取决于其形成的方式和周围的地质作用。

地球的表层称为地壳，其上部最基本的物质是岩石，人类的一切活动和生产实践活动都是局限在地壳的表层范围内，因而岩石和岩石派生出来的土构成了人类生存的物质基础以及生活和生产实践活动的环境。

岩石是由矿物或岩屑在地质作用下按一定规律聚集而形成的自然物体。岩石有其自身的矿物成分、结构和构造。岩石的结构是指组成岩石最主要的物质成分、颗粒大小和形状以及相互组合的情况。例如，沉积岩内存在有碎屑结构、泥质结构和生物结构等结构特性。岩石的构造是指其组成成分的空间分布及其相互间的排列关系，例如，沉积岩的层理构造和变质岩中的片理构造等。岩石中的矿物成分和性质、结构、构造等的存在和变化，都会对岩石的物理力学性质产生影响。

岩石按其成因可分为三大类——岩浆岩、沉积岩和变质岩。

(1) 岩浆岩是岩浆冷凝而形成的岩石。由于组成岩浆岩的各种矿物的化学成分和物理性质较为稳定，它们之间的联结是牢固的，因此岩浆岩具有较高的力学强度和较强的均质性。

(2) 沉积岩是由母岩（岩浆岩、变质岩和早已形成的沉积岩）在地表经风化剥蚀而产生的物质，通过搬运、沉积和固结成岩作用而形成的岩石。组成沉积岩的主要物质成分为颗粒和胶结物。颗粒包括各种不同形状及大小的岩屑及某些矿物。胶结物常见的成分为钙质、硅质、铁质以及泥质等。沉积岩的物理力学性质不仅与矿物和岩屑的成分有关，而且与胶结物的性质有很大的关系，例如硅质。钙质胶结的沉积岩胶结强度大，而泥质胶结的沉积岩和一些黏土岩强度就较小。另外，受沉积环境的影响，沉积岩具有层理构造，这就使得沉积岩沿不同的方向表现出来不同的力学性质，通常具有层状各向异性或正交各向异性特性。

(3) 变质岩是指地壳中原有岩石受构造运动、岩浆活动或地壳内热流变化等内应力影响，使其矿物成分、结构构造发生不同程度变化而形成的岩石。它在矿物成分、结构构造上具有变质过程中所产生的特性，也常常残留有原岩的某些特点。因此，它的物理力学性质不仅与原岩的性质有关，而且与变质作用的性质及变质程度有关。

岩石是岩块、岩体的统称。岩块是不包含岩石宏观结构特征的最小岩石单元，通常体积很小，便于室内研究。岩体是包括宏观结构特征的岩石，一般赋存于天然状态中，通常体积很大，不便于室内研究。

岩石的物理力学性质可以在实验室里采用一定标准的实验进行测定。实验所用的岩石试件是在钻孔中获取的岩心或是在工程中用爆破以及其他方法所获得的岩块经加工而制成的。用这些方法所采集的标本仅仅是自然地质体中的岩石小块，所以称为岩块。因为岩块是不包含显著弱面的岩石块体，所以通常都把它作为连续介质以及均质体来看待。

除了岩块为主要组成部分外，地层岩体还包含有各种节理、裂隙、孔隙、孔洞等。这些地层岩体经历了漫长的地质历史过程，经受过各种地质作用。在地应力的长期作用下，在地层岩体内保留了各种各样的永久变形和地质构造形迹，使地层岩体内部存在着各种各样的地质界面，例如不整合、褶皱、断层、层理、片理、劈理和节理等。由此可见，这种由岩块和各种各样的结构面共同组成的综合体称为岩体。在确定岩体的强度和稳定性能时，仅从局部岩块力学性质判断往往是不准确的，需要研究岩块与结构面的综合力学性质。许多工程实践表明，在某些岩石强度很高的工程中，发生大规模的变形和破坏的原因，不是岩石强度不够，而是岩体的整体强度不够，岩体中结构面的存在将大大地削弱岩体的整体强度，导致其稳定性降低。

1.2 岩石力学发展历史

岩石力学的发展是与人类活动紧密联系的。但是，作为一门学科，岩石力学是近六十年才发展起来的。

1951年，在奥地利成立了国际上第一个地区性的地质力学学会——奥地利地质力学学会。自1957年法国J. Talobre的《岩石力学》专著出版以来，有关岩石力学的著作如雨后春笋，不断涌现。1962年，由奥地利地质力学学会发起，建立了国际岩石力学学会（International Society for Rock Mechanics，简称ISRM）。1965年，由美国地球物理联合会（AGU）、矿冶研究所（AIMMP）、土木学会（ASCE）、材料学会（ASTM）、地质学会（GSA）、矿业学会（AIME）等单位联合组成岩石力学学会委员会（Intersociety Committee for Rock Mechanics，简称ICRM），后改称联邦岩石力学委员会（U. S. National Committee for Rock Mechanics，简称USNC/RM），把岩石力学在各个领域中取得的成果进行交流推广。随后，又成立了美国岩石力学协会，进一步推动了岩石力学的发展，并从1965年起每年举行一次全美岩石力学学术大会，至今没有间断过。1966年，国际岩石力学学会在里斯本召开了第一届国际岩石力学学术大会。在这个时期，岩石力学作为一个独立的学科开始进入了新的阶段。国际岩石力学学会出版了《岩石力学》（季刊）和《国际岩石力学及矿业科学学报》，并附有岩土力学文摘（International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract）。

在我国，从20世纪50年代开始，随着国民经济建设的发展，陆续建立了一些岩石力学的研究机构，如中国科学院岩土力学研究所等。从1979年起，中国以团体会员国名义参加了国际岩石力学学会并成立了国际岩石力学学会中国小组，1985年，成立了中国岩石力学与工程

学会。通过岩石力学界的不断努力探索,我国在世界岩石力学界的地位逐步提高。1997年,在黄荣樽教授的倡议下,中国岩石力学与工程学会成立了以石油工程为主要研究对象的深层岩石力学专业委员会,黄荣樽教授任首届主任委员。2001年以后,由陈勉教授任主任委员。2010年5月18日,国际岩石力学学会(ISRM)理事会在香港大学召开,我国学者冯夏庭教授当选国际岩石力学学会(2011—2015年)主席。这是ISRM成立以来,中国人第一次当选为该学会主席。目前,中国国家小组已经拥有502名会员,是ISRM最大的会员国。

1.3 岩石力学的研究方法

岩石力学是一门边缘交叉学科,它与工程实践密切联系而得到发展。岩石具有特殊的固体介质力学特性,这个特殊的力学性质与它所处的环境有关,如天然岩石所处应力状态一般称为岩石的初始应力状态。在岩石受到工程活动扰动后,岩体的应力出现了变化,这时岩石所处的应力状态称为次生应力状态。此时将岩石力学和工程地质相结合进行研究是十分重要和必要的。对于节理岩体,特别需要了解岩体结构面的分布、网络特性、岩体结构类型,才能进行岩体的数值模拟和分析。

为了准确了解岩石的力学特征和赋存环境,需要进行大量的工程试验和理论研究。

岩石工程实践包括勘探、现场原位测试、工程结构监测、岩体构造定位、地应力测试、岩石力学参数测试、工程开挖、爆破、地下流体压力试验、岩体网络测定、声波测试等,这些工程实践可为了解岩石的基本特征提供基础性的参数。

研究岩石的力学性质,除了宏观工程试验方法,还可以开展细观试验和微观分析方法,例如电镜扫描、层析技术等。

一般而言,岩石力学的研究方法可分为如下四大类:

(1) 地质研究方法:对岩体进行地质方面的研究始终是岩石力学研究的基础,在整个岩石工程过程中,地质性质的研究应当列在第一位。①岩石岩相、盐层特征的研究,如软弱岩体的成分、可溶盐类、含水蚀变矿物、不抗风化岩体成分以及原生结构。②岩体结构的地质特性研究,如断续结构面的几何特征、岩体力学特征、软弱面的充填物及地质特性。③赋存地质环境的研究,如地应力的成因、地下水分布与化学特征以及地质构造对环境的影响。

(2) 物理力学研究方法:①岩体结构的探测,应用地球物理化学方法和技术来探查各种结构面的力学特征和化学特征。②地质环境的物理性质分析与测量,如地应力的形成机制及分布、地质环境中热力与水力存在的性状、水化学的分布特征,应用大规模地质构造层析技术、地质雷达探测技术确定岩体构造。③岩体物理力学性质的测定,如岩块力学特性的室内试验、原位岩体的力学性质测试、钻孔测试、工程变形监测、位移反分析等。主要运用的手段是基于震动的动态测试,如超声波测试、地震波测试、电磁波测试、计算机层析方法(CT)测试。这些测试利用岩体的波动特性,来研究岩体的力学特性。

(3) 数学力学分析方法:岩石力学的研究,除了以上地质方法、物理力学方法的研究外,还要进行数学力学方法研究,从而构成岩石力学的理论基础,包括:①岩石本构关系的研究——对岩石进行宏观到细观甚至微观的力学特性研究。②数值分析方法。由于计算机计算性能的发展,岩石力学的数值分析方法得到了长足的发展。在数值分析方法方面,已由线

性发展到非线性，由岩体连续力学发展到非连续力学，出现了离散元法（DEN）和不连续变形分析法（DDA）、流形法（BEM）、无单元法（EFM）和快速拉格朗日法（FLAC）。③多元统计和随机分析。这两种方法可以深入地研究因岩体介质的随机分布特性而造成传统方法难以解决的问题。④物理和数值模拟仿真分析。

（4）整体综合分析法：就整个工程进行多种分析的方法，并以系统工程为基础的综合分析。

1.4 石油工程岩石力学研究对象及特点

在与石油工程有关的岩石力学研究中，所涉及的地层深度大多在 1000~8000m 范围内，研究对象以沉积岩层为主体，岩石处于较高的围压、温度和孔隙压力作用下其性质已完全不同于浅部地层，它可能经过脆—塑性转变成塑性，也可能由于高孔隙压力的作用呈现脆性破坏。这与水电站的坝基设计、高边坡稳定、隧道和巷道的开挖及支护、建筑的桩基工程、地下洞室以及城市地铁建造等不超过 1000m 深度的地表或浅层问题不同，也不同于以火成岩和变质岩为研究主体、深度超过万米的下地壳与上地幔岩石物理力学问题。

（1）石油工程岩石力学所涉及的围压可达 200MPa。事实上，地层的围压来源于非均匀的原地应力场，若垂向应力源于地层自重，那么应力梯度平均为 0.023MPa/m，多数地区最大水平应力往往大于垂向应力，且两个水平地应力梯度的比值常达到 1.4~1.5 以上。在山前构造带地区，不但地应力梯度高，最大和最小水平地应力的比值也很大。因此在研究地应力分布规律（包括数值大小及主方向）时，主要依靠水力压裂、岩石声波发射试验、岩石剩磁分析、差应变分析、地震和构造资料反演、测井资料解释等间接方法。

（2）石油工程岩石力学所涉及的温度可达 250℃。一般的地温梯度是 3℃/100m，高的可超过 4℃/100m，具体的地温梯度往往需要实际测定。当温度超过 150℃后，温度对岩石性质的影响将变得十分明显。

（3）石油工程岩石力学所涉及的沉积岩层的孔隙和裂隙中的高压流体（包括各种液体和气体）的孔隙压力可达 200MPa。常规的静水孔隙压力梯度为 0.00981MPa/m，而异常高压可超过 0.02MPa/m。

思 考 题

1. 与主要研究金属材料材料力学、弹性力学相比，岩石力学在研究方法和研究对象上有哪些不同点？
2. 石油工程岩石力学与水利水电、地下工程等的岩石力学相比，有哪些差别？

第 2 章 岩石的力学性质和变形特征

2.1 岩石的力学性质

应力和变形分析是岩石力学的基础。在岩石力学中，压应力、压缩变形最为普遍，因此按照岩石力学的惯例，本书规定压应力、压缩变形的符号为正；拉应力、拉伸变形的符号为负。这一点与材料力学、弹性力学中应力应变的符号规定不同。

2.1.1 岩石力学性质的分类

岩石的力学性质主要通过室内岩石试验进行研究。根据岩石的应力—应变—时间关系（图 2.1.1），可将其力学性质划分为弹性、塑性和黏性。

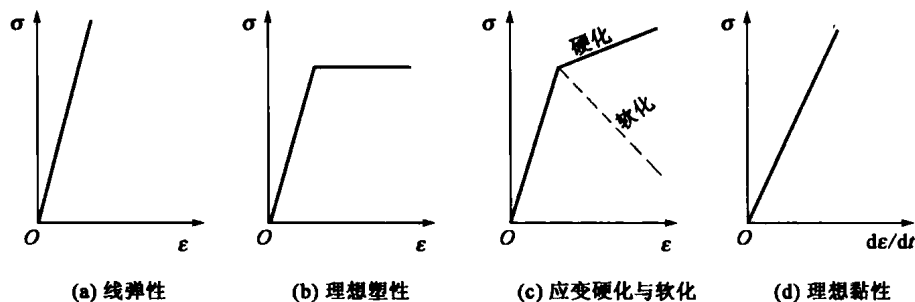


图 2.1.1 材料的应力—应变—时间关系

σ —应力； ϵ —应变； t —时间

(1) 弹性是指在一定的应力范围内，物体受外力作用产生变形，而去除外力（卸荷）后能够立即恢复其原有的形状和尺寸的性质，其产生的变形称为弹性变形。一般把具有弹性性质的物质称为弹性介质。弹性按其应力—应变关系又可分为两种类型：应力应变呈直线关系的线性（或 Hooke 弹性、理想弹性）[图 2.1.1 (a)]，以及应力应变呈非直线的非线性弹性。

(2) 塑性是指物体受力后，在应力超过屈服极限时仍能继续变形而不立即断裂，撤去外力（卸荷）后，变形又不能完全恢复的性质。不能恢复的那部分变形称为塑性变形，或称永久变形、残余变形。物体塑性变形的实质是物体内部晶格之间在剪应力作用下发生的滑动。在外力作用下只发生塑性变形，或在一定的应力范围内只发生塑性变形的物体，称为塑性介质。塑性材料理想的应力—应变曲线如图 2.1.1 (b) 所示，当应力低于屈服极限时，材料性质为弹性；当应力达到屈服极限之后，变形不断增长而应力不变，应力—应变曲线呈水平直线。在屈服点之后，应力—应变曲线上升，说明晶粒滑到新位置之后，粒间相嵌、挤紧和晶粒增大，如使之继续滑动，要相应增大应力，这种现象称应变硬化；应变软化是指在屈服极限之后，进一步变形所需的应力比原来的要小，即应变后材料变软的现象，如图 2.1.1

(c) 所示。

(3) 黏性是指物体受力后变形不能在瞬时完成,且应变速率随应力的大小而改变的性质。理想的黏性材料(如牛顿流体),其应力—应变速率关系为过坐标原点的直线,如图 2.1.1 (d) 所示。应变速率随应力变化的变形称为流动变形,通常简称为流变。

根据岩石的变形与破坏关系,还可以将岩石性质划分为脆性和延性。

脆性是指物体受力后,变形很小时就发生破裂的性质。延性是指物体能承受较大变形而不丧失其承载力的性质。材料的延性与脆性是根据其受力破坏前的总应变及全应力—应变曲线上负坡的坡降大小来划分的。破坏前总应变小,负坡较陡者为脆性,反之为延性。工程上一般以 5% 为标准进行划分,总应变大于 5% 者为延性材料,反之为脆性材料。Heard 以 3% 和 5% 为界限,将岩石划分三类——总应变小于 3% 者为脆性岩石;总应变为 3%~5% 者为半脆性岩石;总应变大于 5% 者为延性岩石。按以上标准,大部分地表岩石在低围压条件下都是脆性或半脆性的。当然,岩石的延性与脆性是相对的,在一定的条件下可以相互转化,如在高温高压条件下,常温常压下的脆性岩石可表现很高的延性。

岩石是矿物的聚合体,具有复杂的成分和结构,因此其力学属性也是复杂的。岩石在外力作用下呈现何种性状,一方面取决于其成分与结构;另一方面还和它的受力条件(如载荷的大小及其组合情况、加载方式及速率、应力路径等)密切相关。例如,在常温常压下,岩石既不是理想的弹性材料,也不是简单的塑性或黏性材料,而往往表现出弹—塑性、弹—黏—塑或黏—弹性等性质。此外,岩石所赋存的条件,如温度、水、地应力等对其性状影响也很大。

2.1.2 岩石力学性质的测定

岩石的力学性质主要通过室内岩石试验进行研究。在评价地层岩石的力学性质时,一般首先应研究应力状态、地层孔隙压力、弹性参数、强度以及岩石的变形形式。

一般需要利用岩心材料和现场所记录的数据(测井、录井、地震、垂直地震剖面和各种试井资料)作为主要的数据来源进行分析。由于测井资料是根据深度连续记录声学、电学等物理数据,所以并不能直接得到岩石力学分析所需要的参数。例如,电缆测井并不能直接确定岩石的强度,而只有采用了适当的解释方法,才有可能得到其估计值。地震、录井的数据也有同样问题。因此必须进行必要的岩石力学室内试验和现场试验,以期取得相关数据。

通常,岩石的强度和静态弹性参数是通过岩心试验直接测定的。但是,实验室中取得的岩心并不一定能完全代表所要研究的岩层性质,而且这些性质在取心和加工过程中可能被改变。这就要求:(1)在进行室内试验时,必须重视试样的采取和制作,使之具有足够代表性,并保持天然结构状态,尽可能不受不必要的影晌;(2)试样的制作要满足精度要求;(3)重视试样的构造描述,如节理裂隙发育程度、分布情况及其方位等;(4)注意试样尺寸(形状、大小和高径比等)、测试条件和环境对试验的影响。虽然通过采取适当的试样准备方法能够解决部分问题,但仍有一部分问题亟待解决。这是由于岩石的力学性质取决于组成晶体、颗粒和胶结材料之间的相互作用,以及诸如裂缝、节理、层面和较小断层的存在。一方面很难根据它的组成颗粒的性质来说明该岩石的力学性质,特别是它的强度;另一方面,裂缝、节理、层面和断层的分布是如此多变,以至于受这种分离影响的大块岩体的力学性质,对于任何其他大块岩体来说很少有共同联系。因此,在确定岩石的最基本的力学性质时,试

样的尺寸应包含足够数量的组成颗粒，同时也要小得足以排除较大的结构不连续性，使试样具备大致均匀的性质。尺寸为几厘米的岩样一般适用于此要求，并且可以很方便地在实验室进行试验。

一般来说，要根据研究目的来选取岩心的力学分析方法。例如，如果要预测油藏的压实性，所采用的试验方法会与井眼稳定性研究方法不同。这是因为，在载荷作用下，岩体实际的破坏情况是相当复杂的，它可能具有一种或多种破坏模式。因此，没有任何一种岩体试验方法能发展到可以排除其他的试验方法。事实上，必须利用各种不同的室内试验和现场试验方法，以适应要解决的问题的特殊性。另外，要根据油田研发计划所提供的资金和允许的时间确定岩心分析的范围。

岩石力学的发展过程中，在工程界，有一个时期很强调现场大型试验，而忽视室内试验，认为后者是“脱离实际”的，不反映天然岩石的真实性态。当然，在一定的条件下，进行现场大型试验是可行的，但有限度，并非越大越好。因为试样大了，要求试验设备也要大，试验条件会变得更加复杂，试验时间也会延长，费用会成倍增加。而且，拿如此高的代价所得来的个别试点的资料，企图直接运用于工程建设上，或许仍有问题。因为不论现场试验大到什么程度，与实际工程比较，无论从载荷条件上、从影响范围上、从载荷历时上，仍然是不可比拟的，而且有的方面还可能有着质的差别。例如把水当作静力载荷施加于岩石表面上，而不管水在天然裂隙岩石介质中的作用情况，可能会出现完全不同的情况。因此，单纯依靠现场大型试验来获得岩石力学的计算参数的办法，不是一个好方法，既不经济，有时也不可能。此外，由于试验设备和条件的限制，有些试验还不能在现场进行，例如，一向受拉，一向受压的试验等。因此，现场大型试验必须与室内试验研究配合进行，才能收到最佳效果。

总之，室内进行岩石试样的试验工作是认识岩石在不同环境下的物理、力学性质的重要途径，也是进行岩石工程应该做好的前期工作。室内试验的目的在于了解岩石的性质，除了进行密度、含水率、孔隙度和渗透性等物理性质试验外，应着重进行岩石的强度特性和变形特性的试验。正确的理论分析，真实可靠的试验结果，可以帮助了解至今还无法直接观察到的地壳深部的存在条件及演化过程。岩石力学发展的现阶段，在试验、理论计算上还存在着不少问题和困难，把试验工作与理论计算相结合并进行现场监测和信息反馈，用以修改设计，是现阶段处理岩石工程较好的方法。

需要指出，岩样的测量结果很大程度上与试验系统有关。根据试验系统所测量的结果外推到不同环境可能是极其错误的，必须尽一切努力来区分岩石性质与试验系统的性质。

2.2 岩石单轴压缩试验

单轴压缩试验，也称无侧向岩石围压压缩试验，是最常用的岩石强度试验。试验的试样通常为圆柱体，为了减少端部效应的影响，长度和直径的比值一般为2~3。在标准的室内压缩试验中，试样通常是经过加工并置于试验机的十字头和工作台之间的。试样所受围压为零，轴向加载系连续加载。通过测量轴向应力及轴向和径向变形来研究岩石的力学性质。

2.2.1 变形阶段的划分及特征应力值

如图 2.2.1 所示, 岩石以正常加载速率单轴加压条件下的应力—应变全过程大致可分为以下五个阶段:

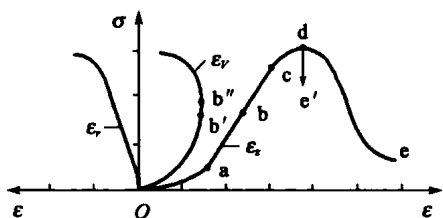


图 2.2.1 岩石单轴压缩试验应力—应变曲线
 σ —应力; ϵ_x —轴向应变;
 ϵ_r —侧向应变; ϵ_v —体积应变

(1) O—*a* 段, 在这一阶段, 岩石的应力—轴向应变 (σ — ϵ_x) 曲线微呈上凹形, 岩石的应力—横向应变 (σ — ϵ_r) 曲线较陡, 体积随压力增加而压缩, 即 ϵ_v 为正值。

(2) *a*—*b* 段, 岩石的应力—轴向应变曲线近似呈直线。*b* 点的应力值称比例极限或弹性极限。

(3) *b*—*c* 段, 曲线由 *b* 点开始偏离直线, 特别是 σ — ϵ_v 曲线, 其斜率随 σ 的增大而变陡直至相反, 岩石的体积由压缩转为膨胀, *c* 点的应力值称屈服极限。

(4) *c*—*d* 段, σ — ϵ_x 曲线斜率迅速减小, 岩石体积膨胀加速, 变形随应力迅速增长。至 *d* 点, 应力达最大值。*d* 点的应力值称为峰值强度或单轴抗压强度, 用 σ_c 表示。

(5) *d* 点以后阶段, 由于普通试验机刚度不够, 加上采用传统的等加载速率的加载方式, 必然使压力机在岩石受压变形过程中储存大量变形能。当岩石达最大承载力之后, 岩石的破裂控制不了压力机变形能的突然释放, 致使岩石急剧破坏 (图 2.2.1 的 *de'* 线) 而得不到 *d* 点之后的曲线。刚性压力机的出现, 使岩石 *d* 点之后的破坏得到控制, 从而获得了岩石应力—应变全过程曲线 *Oabcde*。*d* 点以后的曲线说明, 岩石在破裂点 *d* 之后, 并不是完全失去承载能力, 而是保持较小的数值, 即为残余强度。

由此可见, 通过对岩石应力—应变关系阶段的划分, 可得到四个特征应力值, 即: 比例极限、屈服极限、峰值强度及残余强度。应指出的是, 岩石由于成分、结构不同, 其应力—应变关系不尽相同, 并非所有岩石都可明显划分出五个变形阶段。

通过单轴压缩试验可以测定如下常规岩石参数:

(1) 岩石的单轴抗压强度, 即岩石试样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轴向应力, 通常用 σ_c 表示:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.2.1)$$

式中 σ_c ——单轴抗压强度, Pa;

F ——破坏时所加的载荷, 称为破坏载荷, N;

A ——原始横断面积, m^2 。

显然, 式 (2.2.1) 是假定压缩力在断面上均匀分布时才成立的公式。从本质上讲, 岩石单轴抗压强度就是侧向应力为零时的岩石抗剪切强度。

(2) 弹性模量, 公式为:

$$E = \frac{\Delta\sigma_x}{\Delta\epsilon_x} \quad (2.2.2)$$

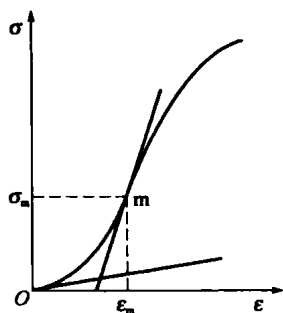


图 2.2.2 岩石的各种模量的确定

式中 E ——弹性模量（应力—应变曲线的斜率，即单轴应力时应力相对应变的变化率），MPa。

$\Delta\sigma_z$ ——轴向应力增量，MPa

$\Delta\epsilon_z$ ——应变增量，无因次。

如图 2.2.2 所示，当轴向的应力—应变关系不成直线时，岩石的变形特征可以用以下几种模量说明：

①初始模量，是应力—应变曲线在原点切线的斜率，即：

$$E_{初}(0) = \left. \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=0} \quad (2.2.3)$$

②切线模量，是对应于曲线上某一点 m 的切线的斜率，即：

$$E_{切}(\epsilon_m) = E_{tan}(\epsilon_m) = \left. \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_m} \quad (2.2.4)$$

③割线模量，是曲线上某一点 m 与坐标原点连线的斜率，即：

$$E_{割}(\epsilon_m) = E_{sec}(\epsilon_m) = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} \quad (2.2.5)$$

割线模量与切线模量的关系为：

$$E_{割}(\epsilon) = \frac{1}{\epsilon} \int_0^{\epsilon} E_{切}(\epsilon') d\epsilon' \quad (2.2.6)$$

由初始弹性模量和不同轴压下的割线弹性模量可以计算出不同轴压下的切线弹性模量。采用测量应变的方法测量岩石应力常常要用到切线弹性模量。

(3) 岩石的泊松比 ν ，是岩石在单向受压条件下径向应变 ϵ_r （即横向应变）与轴向应变 ϵ_z （即纵向应变）之比，亦即横向伸长与纵向缩短的比率：

$$\nu = -\frac{\epsilon_r}{\epsilon_z} \quad (2.2.7)$$

事实上，由于这一概念是由弹性理论引入的，故只适用于岩石弹性变形阶段，也即只有在载荷不会使裂隙发生或发展的有限范围内，这种比例性才能保持。公式中引入的负号，是由于考虑到当岩石轴向缩短时，环向是伸长的，这样可将泊松比定义为一个正值。

在单轴抗压破坏试验中，大多数岩石表现为脆性破坏，因此可以直接测得 σ_c 。但是由于应力—应变曲线（图 2.2.3）通常是非线性的，所以 E 和 ν 的值会随轴向应力值的不同而不同。在实际工作中，通常在 $\frac{1}{2}\sigma_c$ 处取 E 和 ν 值。

岩石的弹性模量和泊松比受岩石矿物组成、结构构造、风化程度、孔隙度、含水率、微结构面及其与载荷方向的关系等多种因素的影响，变化较大。

从理论上讲，试样固有的裂缝发育程度决定了其单轴抗压强度。而且 σ_c 的试验结果值对试样的非均匀性、取心或岩石心处理过程中所产生的裂缝极为敏感，从而产生很大的随机性。为了减少这种不确定性，可以在较小的围压下做三轴抗压试验，这样可以消除岩石中非固有裂隙的影响。

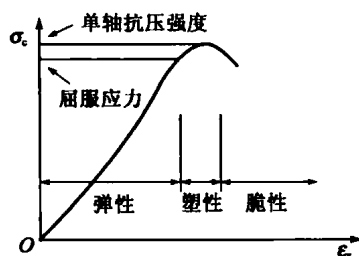


图 2.2.3 单轴抗压试验应力—应变曲线简图

2.2.2 峰值前的变形机理

岩石由于成分、结构不同，其变形机理比较复杂，但大致可归纳为三种类型，如图 2.2.4 所示。

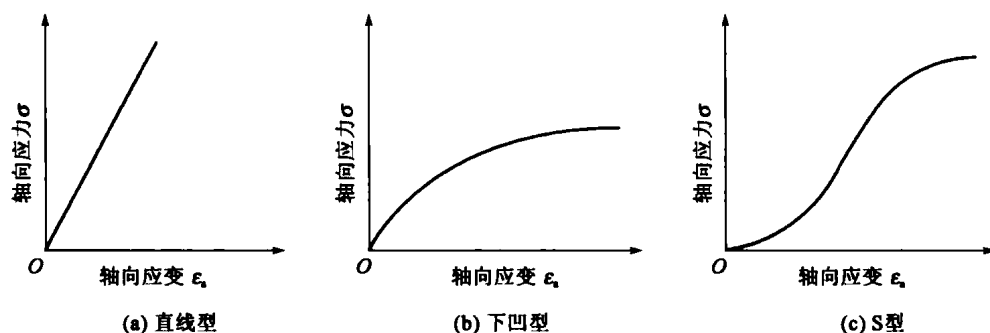


图 2.2.4 岩石峰值前轴向应力—应变曲线的基本类型

1. 以弹性变形为主的变形

以弹性为主的变形，其轴向应力—应变曲线呈直线型 [图 2.2.4 (a)]。一些结构致密、岩性硬的岩石（如石英、玄武岩、硅质灰岩等）的变形，多属这种类型。其特点是：轴向应力—应变曲线不具压密段（图 2.2.1 的 O—a 段），曲线斜率一般较陡，比例极限和屈服极限十分靠近，且很快达到峰值。如果在应力—应变直线段卸载时，变形可完全恢复，则说明岩石的变形主要为弹性变形。也就是说，变形是由岩石内部物质所组成的空间骨架受力发生的压密和错位所引起的。岩石轴向应力—应变曲线的斜率，即代表岩石的固有弹性模量。

2. 以塑性变形为主的变形

以塑性变形为主的变形，其轴向的应力—应变曲线呈下凹型 [图 2.2.4 (b)]。其特点是：变形没有明显的阶段，而是随着压应力的增大而不断增长，卸载后大部分变形不能恢复。应力—应变曲线的斜率不是常数，而是随着应力的增加而降低。这种变形，主要反映了矿物晶格之间、黏土矿物聚片体之间的滑移。这种变形类型，不宜简单地用弹性模量等参数表征，最好还是用应力—应变曲线来描绘。盐岩、饱和水的半坚硬泥岩，在加载速率较低时的变形为这种类型。

3. 以裂纹行为为主导的变形

一些中—粗粒结构的岩石，如花岗岩、大理岩、砂岩等，常具有许多晶间或晶内裂纹，如矿物之间的界面，缝隙、矿物内部节理等。这些裂纹的大小与矿物颗粒直径属同一数量级。它们的存在，对岩石的变形和破坏起了重要的控制作用。这类岩石的应力—应变曲线，主要反映了微裂纹在单轴受压条件下的力学行为。

这类岩石的轴向应力—应变曲线属 S 型 [图 2.2.4 (c)]。在单向受压条件下，岩石变形直至破坏经历了四个阶段：裂纹闭合→线性变形→裂纹稳定扩展的非线性变形→裂纹加速扩展至岩石破裂。这与上述岩石变形阶段的前四个阶段（图 2.2.1）相对应，即：

(1) O—a 段——裂纹压密阶段：在这一阶段，张开裂纹在压应力作用下闭合。随着压应力的增加，裂纹逐渐闭合，岩石刚度加大，应力—应变曲线斜率增大，呈上凹形。岩石的