

油气藏地质及开发工程国家重点实验室系列丛书

岩石力学与石油工程

刘向君 罗平亚 编著



石油工业出版社

油气藏地质及开发工程国家重点实验室系列丛书

岩石力学与石油工程

刘向君 罗平亚 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

石油工业出版社

内 容 提 要

本书结合石油工业的特殊性,全面系统地介绍了岩石力学的相关内容,包括岩石的分类及性质、岩石的强度及判定准则、岩体中的地应力、粘土矿物对岩石强度和应力的影响、岩石与外来流体的相互作用、流体流动和岩石变形的耦合、油气开采方式对岩石强度及其变形、破坏规律的影响等,本书还结合岩石力学在石油工业中的应用论述了石油开采活动可能对地下岩层稳定性造成的不良影响,引导石油工作者主动地利用岩石力学,为油气田高效开发服务。同时,还就利用地下岩石的力学特征预测和研究裂缝性地层裂缝分布、发育、动态变化规律,以及岩石力学在钻井、完井和油气田开发中的应用等进行了阐述。

本书可供石油勘探、开发、钻井等领域的工程技术人员和研究人员参考,也可供石油工程专业的本科生和研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩石力学与石油工程/刘向君等编著.
北京:石油工业出版社,2004.10
ISBN 7-5021-4781-0

- I. 岩…
- II. 刘…
- III. 油气钻井-岩石力学
- IV. TE21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 091734 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.cn

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:13

字数:326 千字 印数:1—1000 册

书号:ISBN 7-5021-4781-0/TE·3346

定价:35.00 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

在石油工业中，岩石力学贯穿了整个石油工业勘探与开发的全过程，岩石力学的研究和应用也越来越受到国际石油工程界的普遍重视。在地质勘探方面，天然裂缝的形成、扩展、演化与分布规律；钻井过程中，岩石的破碎、井眼轨迹控制、井壁稳定性以及井身结构的优化设计；完井工程中，完井管柱的优化设计、完井方式的优选及完井优化设计，射孔优化设计；固井工程中，套管完整性预测和套管挤毁机理分析；油田增产措施中，水力压裂裂缝的形成、扩展，以及缝高、缝宽的优化设计；在油田开发过程中，储集层裂缝、孔隙随地层压力的动态变化规律及其对流体流动的影响，以及低孔低渗、特低孔特低渗储集层的开发和利用等都与岩石的力学行为密切相关。因此，可以认为，岩石力学已越来越成为了当今石油工业的基础。与其他工程领域相比，在石油工业领域的各个环节中都不可避免地存在着流体与岩石的相互作用过程和流体的流动过程，而现有的岩石力学书籍多以矿山坑道开采为研究对象，缺乏对石油工业领域涉及的岩石力学行为的特殊性及其工程应用的系统论述，因此，现有的“一般”的岩石力学已不能满足日益发展的石油工业的需要，围绕油气资源的勘探和开发特点，编写一本系统阐述岩石强度及其变形规律，涵盖岩石力学在石油工业中的应用的书籍具有极其重要的意义。本书就是在这样的背景下产生的。

自1992年以来，本书作者及其课题组成员围绕岩石力学在岩石强度和地应力的评价方法、钻头选型技术、钻井井壁稳定性分析、出砂机理、防砂完井，以及低渗透裂缝性油气藏裂缝动静态特征研究和描述方面作了大量的研究工作，取得了一定的成果，本书就是在这些研究成果的基础上编写而成的。同时考虑到本书内容的系统性，书中还编入了“岩石强度”、“应力与应变”等研究岩石力学学科的研究成果。由于岩石力学行为的复杂性和工程应用的多样性，因此，本书仅仅只是岩石力学浩瀚海洋中的冰山一角，但作者由衷地希望通过本书的出版，能够使更多的石油工程技术人员和研究人员更多地了解岩石力学，更主动地将岩石力学的理论和方法应用到油气的勘探和开发过程中，为石油与天然气工业的发展作出更大贡献。

本书第六章第二节、第十章第一节的“二、岩石破裂压力”、第二节由西南石油学院李传亮教授编写。油气藏地质及开发工程国家重点实验室孙良田教授对全书进行了审读，并提出了许多修改意见；资源与环境工程学院戴洪明副教授对本书部分章节内容也提出了宝贵的修改意见。研究生陈杰、梁利喜、刘洪对本书的完成作了大量艰苦细致的资料准备和校对工作，没有他们的辛勤工作，也就没有这本书的问世。在此一并向他们表示感谢。

由于作者水平和知识面的限制，书中不免会有一些不当之处，敬请批评、指正。

作 者

2004年2月于成都新都

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 岩石力学与一般工程力学的区别	(1)
第二节 岩石力学的主要应用	(1)
第三节 石油工业中岩石力学的重要性和独特性	(2)
第二章 岩石的分类及性质	(4)
第一节 岩石的分类	(4)
一、地质学分类	(4)
二、完整岩石的工程分类	(5)
三、岩体的工程分类	(7)
第二节 岩石的物理性质	(9)
一、岩石的基本物理性质指标	(9)
二、岩石的水理性	(11)
三、岩石的热理性	(12)
第三节 岩石的非均质性和各向异性	(13)
一、非均质性	(13)
二、各向异性	(14)
第三章 岩石强度及破坏准则	(15)
第一节 岩石的弹性模量和泊松比	(15)
第二节 岩石的抗压抗张强度以及抗剪切强度的实验室测试方法及测试手段	(19)
一、抗压强度	(19)
二、抗拉强度	(20)
三、抗剪强度	(22)
第三节 岩石机械强度参数的矿场获取	(25)
一、采用钻速方程预测岩石的抗压强度	(25)
二、利用测井资料预测岩石的抗压强度、抗剪强度	(26)
第四节 岩石强度破坏准则	(27)
一、最大正应力强度理论	(27)
二、最大正应变强度理论	(27)
三、最大剪应力强度理论	(28)
四、莫尔 (Mohr) 强度理论及 Mohr - Coulomb 强度破坏准则	(28)
五、八面体应力强度理论	(31)
六、Drucker - Prager 准则	(33)
七、Griffith 强度理论	(34)
八、修正的格里菲斯强度理论	(36)

九、Hoek - Brown 岩石破坏经验准则	(37)
十、Lund Borg 岩石破坏经验准则	(37)
第五节 岩石结构面对岩石强度的影响	(38)
一、岩石结构面	(38)
二、岩石结构面受力分析	(39)
三、岩石弱胶结结构面对岩石强度的影响	(41)
第六节 影响岩石力学性质的因素	(42)
一、岩石的矿物组成	(42)
二、岩石的结构特征	(42)
三、岩石构造	(43)
四、温度的作用	(43)
五、水的作用	(43)
六、风化作用	(43)
第四章 应力—应变及地应力测试技术	(45)
第一节 应力及应力状态分析	(45)
一、基本概念	(45)
二、应力张量的分解	(47)
三、应力平衡微分方程	(48)
第二节 应变及应变状态分析	(50)
一、应变	(50)
二、应变与位移的关系	(51)
第三节 岩石的应力—应变关系	(51)
一、岩石的变形类型	(51)
二、岩石的应力—应变关系曲线	(52)
三、力学本构关系	(53)
第四节 原地应力测试技术	(56)
一、室内岩心测试技术	(56)
二、现场获取技术	(62)
第五节 地层孔隙压力预测	(67)
一、地层孔隙压力预测方法评述	(67)
二、利用测井资料预测地层孔隙压力	(71)
三、用于评价地层孔隙压力的测井资料选取	(73)
第五章 粘土矿物水化对岩石强度和地应力的影响	(74)
第一节 粘土矿物	(74)
一、粘土矿物的概念	(74)
二、粘土矿物类型及结构特征	(75)
三、粘土矿物的性质	(75)
第二节 粘土矿物与水的相互作用	(78)
一、粘土矿物中的水	(78)
二、粘土矿物的水化机理	(79)

三、影响粘土水化的因素	(79)
第三节 粘土矿物水化对岩石强度和应力分布的影响	(80)
一、水化膨胀应力和应变	(80)
二、粘土矿物水化对岩石强度的影响	(81)
第六章 流固耦合	(84)
第一节 流固耦合及其研究进展	(84)
一、流固耦合	(84)
二、流固耦合的研究进展	(84)
第二节 岩石的有效应力	(86)
一、岩石变形机制	(86)
二、岩石有效应力	(87)
第三节 岩石变形对渗流的影响	(90)
一、流体的存储效应	(90)
二、应力系数	(91)
三、边界条件对孔弹性应力变化的影响	(92)
第四节 流固耦合方程	(92)
一、单相流流固耦合方程	(92)
二、油水二相渗流的流固耦合方程	(93)
三、储层油、气、水三相渗流的流固耦合方程	(94)
第七章 基于岩石力学开展裂缝静动态特征研究	(96)
第一节 裂缝发育影响因素与裂缝分类	(96)
一、影响裂缝发育的因素	(96)
二、裂缝分类与等级划分	(97)
第二节 裂缝的预测和特征研究	(98)
一、裂缝描述参数	(98)
二、基于岩石力学进行裂缝的识别与描述	(99)
第三节 裂缝应力敏感性研究	(103)
一、裂缝渗透率与静应力的关系	(104)
二、利用有限元方法数值计算分析裂缝开启状况的动态变化规律	(104)
三、裂缝闭合临界流体压力解析计算模型推导	(108)
第八章 岩石力学在钻井工程中的应用	(110)
第一节 岩石的研磨性和可钻性	(110)
一、岩石的研磨性	(110)
二、岩石可钻性	(113)
第二节 井壁稳定和合理钻井液密度	(118)
一、井壁围岩应力	(118)
二、井壁有效应力	(120)
三、井壁稳定性分析	(121)
四、钻井液滤失对井壁稳定性的影响	(123)
五、温度扰动对井壁稳定性的影响	(125)

六、岩石软弱面对井壁稳定性的影响·····	(129)
第三节 粘土矿物水化对泥页岩地层井壁稳定性的影响·····	(132)
一、力学和物理化学耦合定量研究水敏性泥页岩地层井壁稳定性·····	(132)
二、水敏性地层坍塌应力和破裂压力的变化规律·····	(134)
第四节 井眼轨迹及井身结构设计·····	(140)
一、地应力分布对井眼轨迹设计的影响·····	(140)
二、地质力学性质对井身结构设计的影响·····	(143)
第九章 岩石力学在完井工程中的应用·····	(148)
第一节 在套管柱强度优化设计中的应用·····	(148)
一、套管柱强度优化设计的影响因素·····	(148)
二、套管强度及套管受力分析·····	(148)
第二节 在射孔优化设计中的应用·····	(150)
一、地层强度对射孔深度的影响·····	(150)
二、地应力对射孔方位的影响·····	(150)
三、负压射孔设计·····	(151)
第三节 在出砂及防砂中的应用·····	(152)
一、油气井出砂机理·····	(152)
二、油气井出砂趋势判别·····	(153)
三、地应力和油藏压力状态对弱胶结砂岩油藏出砂的影响·····	(155)
四、生产压差对射孔孔壁最大周向应力和地层出砂的影响·····	(162)
五、变温对地层结构稳定性和出砂的影响·····	(164)
六、井眼倾斜角和倾斜方位对裸眼完井地层出砂的影响·····	(167)
七、防砂方法·····	(168)
第四节 在套损机理研究中的应用·····	(169)
一、套管物理损坏机理·····	(170)
二、套管损坏的工程技术因素·····	(170)
第十章 岩石力学在油气田开发工程中的应用·····	(172)
第一节 压裂设计中的岩石力学·····	(172)
一、水力裂缝产状与地应力的关系·····	(172)
二、岩石破裂压力·····	(173)
三、压裂施工排量与地应力·····	(178)
四、支撑剂的选择与地应力·····	(178)
五、水力裂缝的几何尺寸的模拟与地应力·····	(179)
六、裂缝的扩展延伸·····	(180)
第二节 岩石压缩系数·····	(180)
一、定义·····	(180)
二、固体骨架压缩系数·····	(181)
三、岩石压缩系数·····	(181)
四、岩石应变状态·····	(183)
第三节 开发井网部署与地应力分布·····	(186)

一、开发井网部署原则.....	(186)
二、地应力分布对开发井网部署的影响.....	(186)
参考文献	(188)

第一章 绪 论

第一节 岩石力学与一般工程力学的区别

岩石是经过地质作用而天然形成的一种或多种矿物的集合体，是地壳的主要构成部分。岩石力学以岩石为基本研究对象，是研究岩石的力学形态的理论和应用的科学，是探讨岩石对其周围物理环境中力场反应的学科，具体而言，就是研究岩石在载荷作用下的应力、变形和破坏规律以及工程稳定性等问题。因此，岩石力学包括岩石的强度和应力两个重要组成部分。

现代岩石力学的主要研究领域有^[1]：

(1) 基本原理：包括岩石材料的变形、破坏理论，以及应力—应变关系等；

(2) 测试技术：包括获取岩石材料强度、原岩应力以及岩石在载荷作用下变形特征的各种实验室和现场测试方法和技术；

(3) 工程应用：包括将岩石材料的变形、破坏理论、应力—应变关系以及强度、地应力资料应用于地表岩石地基、地表挖掘、地下洞室、岩石破碎、岩石爆破、能源开发、各种地质作用以及地质灾害预防等工程实际问题的研究中。

一般工程力学主要研究均质、各向同性材料或分层分区均质各向同性材料的各种受力状态。由于各专业的侧重点不同，包含的内容也不尽相同，但一般都包括理论力学（静力分析、运动分析和动力分析）和材料力学（刚度分析和稳定分析）两部分。

与一般的工程力学相比，岩石力学有明确的研究对象——岩石，这一具有孔隙性的物质。由于岩石材料孔隙结构的多样性、非均质性，以及与外来不同流体接触时表现出的强度特征、变形特征的不确定性，决定其研究过程更注重与现场实际应用相结合，研究内容也更加复杂多样。

第二节 岩石力学的主要应用

从远古时代使用石制工具开始，到近代开挖矿石、巷道，以及到现代修建大型水利工程、建设桥梁隧道、钻采石油等，人们都一直与岩石打着交道。由此可见，岩石力学的应用非常广泛，涉及国计民生的多个方面，是许多重大工程领域的基础依托。概括起来，其最主要的应用领域有以下几个方面：

(1) 采矿工程，包括地表开采和地下开采。地表开采需要用岩石力学来分析人工和天然岩石边坡的稳定问题；地下开采所涉及的采矿坑道的稳定性分析和地下岩体的破碎都依赖于岩石力学的发展和应用。

(2) 能源的开发和利用，包括地下发电场建设、地下油气储存库建设、地下核废料处理以及水利资源、地热资源和石油资源的开发都离不开岩石力学的发展。反过来，近代能源的开发和利用也推动着岩石力学的不断发展。特别是 20 世纪 50 年代以来，世界上大型水利工

程，如巴西的伊太普水电站、中国的葛洲坝水利工程、三峡水利工程等的兴建都对岩石力学的发展起到了重大的推动和促进作用。

(3) 在交通运输领域里，越来越多的桥梁、隧道等的修建都涉及围岩的稳定、变形和加固问题，如著名的英吉利海峡海底隧道。

(4) 随着世界上越来越多的高层建筑物的修建，岩石力学在建筑工程领域内的重要性日渐突出，广泛地应用于地基稳定性和变形分析中。

(5) 在军事领域，各种战备隧道、地下掩体工程，机场、港口等的修建都离不开岩石力学的发展。

(6) 岩石力学还广泛应用于地质构造研究方面。如探讨岩石圈运动、地壳变形与构造应力场之间的相互关系，研究高温高压条件下岩石变形与破坏规律，以及与时间效应有关的岩石蠕变特性，裂缝的形成、扩展、演化与分布规律等。

(7) 地震预测及地质灾害分析方面。岩石力学重点研究工程活动，如各种大型水利设施、高层建筑兴建、地下采矿等引起的岩体中应力场重新分布，包括岩石的动力学特征，并进而对岩体破坏进行预测。

在石油工业中，岩石力学贯穿了整个石油工业勘探与开发的全过程。在地质勘探方面，天然裂缝的形成、扩展、演化与分布规律；钻井过程中，岩石的破碎、井眼轨迹控制、井壁稳定性以及井身结构的优化设计；完井工程中，完井管柱的优化设计、完井方式的优选及完井优化设计，射孔优化设计；固井工程中，套管完整性预测和套管挤毁机理分析；油田增产措施中，水力压裂裂缝的形成、扩展，以及缝高、缝宽的优化设计；在油田开发过程中，储集层裂缝、孔隙随地层压力的动态变化规律及其对流体流动的影响，以及低孔低渗、特低孔特低渗储集层的开发和利用等都与岩石的力学行为密切相关。因此，可以认为，岩石力学已越来越成为了当今石油工业的基础。

第三节 石油工业中岩石力学的重要性和独特性

近年来，随着石油勘探开发工作的不断深入，岩石力学在石油勘探和开发领域内的应用越来越受到人们的重视，它在解决油气藏勘探开发中的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。在石油勘探领域，通过对地应力的研究，使人们能够更加清楚地认识地下圈闭构造，掌握油气生成和运移的环境；在油气藏开发中，岩石力学在防止和降低钻采事故、进行油藏工程研究、制定合理可行的开发方案、提高经济油气采收率、防止储集层破坏和延长油气田经济开采年限等领域得到了广泛的应用。

与在其他工程领域里的应用相比，岩石力学在石油勘探与开发中的应用具有以下显著特点：

(1) 石油开采涉及的地层深度变化范围很大，从几百米的浅层油气藏到几千米的深层油气藏，都是人们勘探开发的目标。而一般的矿藏资源的开发，集中在地表以下几十到一两米的范围以内。此外，石油开采涉及面积很大，可达数十、数百平方千米。因此，在石油领域里需要研究岩石在不同温度、应力作用下的变形特征及稳定性等一系列的问题。

(2) 与矿山坑道式开采、水电大坝内的应力监测方式不同，人们不可能亲自下到井眼内，对井壁及其周围地层岩石的力学性质等进行直接观察。虽然可以从地下取出一定数量的岩心，在地面通过各种力学试验来获知地下岩石的特性，但是由于取心费用昂贵，不可能每

一口井都钻取岩心，而且实验室也不能完全模拟地下几千米的高温高压状态，所以，石油工作者只能借助地震、测井等地球物理方法间接地对地下岩石的各种物理性质作一定的分析和判断，这无疑增加了工作的难度。

(3) 与其他工程领域相比，在石油勘探与开发领域内岩石的变形受其中孔隙内流体的性质和流动的影响显著，岩石变形与流体流动的相互耦合是影响石油开采与石油分布的重要影响因素。

(4) 与其他工程领域相比，在石油工程领域的各个环节中几乎都有大量的外来流体与地层发生接触，影响着岩体内的应力分布和岩石的固有强度：①钻井过程中，钻井活动在扰动原岩应力，引起井周地应力重新分布的同时，钻井液将与井眼剖面上的“活性”岩石——泥页岩发生物理化学反映。随着钻井液与地层间接触时间的延长，这些岩石的变形和破坏规律也将呈现出随时间增加而变化的动态特征：岩石的强度将降低，最终可能会因大量水化膨胀而呈现出流变性。②油气田开发过程中，随着油气田开发方式的不同，对地下岩石强度及应力分布的影响也不同。衰竭式开采过程中，由于流体大量被采出，孔隙压力衰竭的结果可能使地层发生严重的压实效应，导致地表沉降。注水采油过程中，注入水一方面可能引起地层孔隙中的粘土矿物水化膨胀，导致地层孔隙压力异常；另一方面可能使地层中的泥质胶结物水化膨胀，降低岩石强度，引起地层的剪切变形破坏。对砂岩油气藏，还可能因此导致地层大量出砂。此外，注入流体驱替原油的过程中，还可能导致岩石因润湿性改变而发生强度改变。③稠油热采过程中，大量蒸汽的注入，可能在地层中产生高的热膨胀应力，长期的蒸汽注入可能使地层结构破坏和地表发生抬升与沉降，进而导致不可预测的灾害问题。

根据上述特点可见，与其他工程领域相比，在石油工业领域的各个环节中都不可避免地存在着流体与岩石的相互作用过程和流体的流动过程，而现有的岩石力学书籍多以矿山坑道开采为研究对象，缺乏对石油工业领域涉及的岩石力学行为的特殊性及其工程应用的系统论述，因此，现有的“一般”的岩石力学已不能满足日益发展的石油工业的需要，围绕油气资源的勘探和开发特点，编写一本系统阐述岩石强度及其变形规律，涵盖岩石力学在石油工业中的应用的书籍具有极其重要的意义。

第二章 岩石的分类及性质

第一节 岩石的分类

自然界中，岩石的种类很多，分类标准也很多，随目的不同，分类标准的侧重点不同。下面主要介绍地质学分类和工程分类。

一、地质学分类

在地质学研究领域，人们一般倾向于按成因、岩性和胶结状况对岩石进行分类，有时也根据风化程度进行分类。

1. 成因分类

石油开采过程中，钻遇的岩石按照其形成原因的不同，可以分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。

1) 岩浆岩

岩浆是存在于地壳下面的熔融性硅酸盐物质。岩浆沿地壳的薄弱带向地壳表层侵入或喷出而冷凝固化形成的岩石称为岩浆岩 (Magmatic rocks)，亦称为火成岩，如玄武岩、花岗岩等。岩浆在地表下冷凝形成的岩石称为侵入岩，喷出地表冷凝形成的岩石称为喷出岩。侵入岩按距地表的深、浅程度又分为深成岩和浅成岩。

2) 沉积岩

沉积岩 (Sedimentary rocks) 是指在地表或近地表条件下，由风化作用、生物作用及某些火山作用形成的产物，经过搬运、沉积和成岩作用而形成的岩石，如砂岩、石灰岩等。沉积岩的主要特征是具有层理，矿物成分除原生矿物外，还有碳酸盐类、硫酸盐类、磷酸盐类和高岭土等次生矿物。目前世界油气探明储量的 99% 蕴藏在沉积岩内。

3) 变质岩

地壳中的岩浆岩、沉积岩或早期的变质岩 (Metamorphic rocks) 由于所处地质环境的改变，其矿物成分和结构、构造在新的物理、化学条件下就会发生改造和变质，这种作用称为变质作用，由此形成的新的岩石叫变质岩，如片麻岩、大理岩等。原来的母岩经变质作用后，不仅矿物重新结晶或变成新矿物，岩石结构也会发生变化，但在一般情况下，仍然保持原岩的产状。大多数的变质岩具有片麻状、片状或片理，有的还有变质矿物产生。

2. 按风化程度分类

矿物和岩石在地表条件下发生的机械碎裂和化学分解过程称为风化。地表岩石在原地发生机械破碎而不改变其化学成分，也不生成新矿物的作用称为物理风化作用。如矿物岩石的热胀冷缩、冰劈作用、层裂和盐分结晶等作用均可使岩石由大块变成小块以至完全碎裂。化学风化作用是指地表岩石受到水、氧气和二氧化碳的作用而发生化学成分和矿物成分变化，并产生新矿物的作用，主要通过溶解作用、水化作用、水解作用、碳酸化作用和氧化作用等方式进行。

虽然所有的岩石都会风化，但并不是都按同一条路径或同一个速率发生的。岩石特征、气候和地形条件是控制岩石风化的主要因素。不同的岩石具有不同的矿物组成和结构构造，不同矿物的溶解性差异很大。节理、层理和孔隙的分布状况和矿物的粒度，又决定了岩石的易碎性和表面积。风化作用总的结果是使岩石的强度降低，因此，研究岩石的风化对于地表岩土工程施工具有重要意义。表 2-1 列出了岩石按风化程度分类的情况。

表 2-1 岩石按风化程度分类^[2]

岩石类别	风化程度	野外特征
硬 质 岩 石	未风化	岩质新鲜，未见风化痕迹
	微风化	组织结构基本未变，仅节理面有铁锰质渲染或矿物略有变色，有少量风化裂痕
	中等风化	组织结构部分破坏，矿物成分基本未变化，仅沿节理面出现次生矿物，风化裂隙发育，岩体被切割成 20~50cm 的岩块，锤击声脆，且不易击碎，不能用镐挖掘，用岩心钻方可钻进
	强风化	组织结构已大部分破坏，矿物成分基本已显著变化，长石、云母已风化成次生矿物，裂隙很发育，岩体破碎，岩体被切割成 2~20cm 的岩块，可用手折断，用镐可挖掘，干钻不易钻进
	全风化	组织结构已基本破坏，但尚可辨认，且有微弱的残余结构强度，可用镐挖，干钻可钻进
残积土		组织机构已全部破坏，矿物成分除石英外，大部分已风化成土状，锹镐易挖掘，干钻易钻进
软 质 岩 石	未风化	岩质新鲜，未见风化痕迹
	微风化	组织结构基本未变，仅节理面有铁锰质渲染或矿物略有变色，有少量风化裂痕
	中等风化	组织结构部分破坏，矿物成分发生变化，节理面附近的已风化成土状，风化裂隙发育，岩体被切割成 20~50cm 的岩块，锤易击碎，用镐难挖，用岩心钻方可钻进
	强风化	组织结构已大部分破坏，矿物成分发生显著变化，含大量粘土质粘土矿物。风化裂隙很发育，岩体破碎，岩体被切割成碎块，干时可用手折断或捏碎，侵水或干湿交替时可较迅速地软化或崩解，用镐或锹可挖掘，干钻可钻进
	全风化	组织结构已基本破坏，但尚可辨认，且有微弱的残余结构强度，可用镐挖，干钻可钻进
残积土		组织机构已全部破坏，矿物成分已全部改变，并风化成土状，锹镐易挖掘，干钻易钻进

此外，油气勘探开发过程中，对碎屑岩地层，还常常进一步根据岩石的胶结程度、岩性将岩石分为胶结岩石、弱胶结岩石；按胶结物类型不同可以将岩石划分为泥质胶结、硅质胶结、钙质胶结和铁质胶结的岩石。可见，根据研究目的的不同可以将岩石划分为不同的类型。

二、完整岩石的工程分类

在岩石力学及岩石破碎力学领域，一般以工程实用为目的对岩石进行工程分类。为方便工程技术人员合理地选择工程布局及采用相适应的技术处理方法，在对岩石进行工程分类时，一般采用明确的概念和严谨的数据去区分岩石。目前国内外有关完整岩石（或岩块）的工程分类方法很多，比如按岩石的单轴抗压强度和弹性模量、硬度、可钻性和研磨性等分类。

岩石的单轴抗压强度是岩石材料最早的分类依据，结构面不发育的完整或较完整的岩体

(或岩块)可以根据岩石的单轴抗压强度进行分类,我国在20世纪50年代曾广泛使用这种单因素的岩石分类方法^[3]。根据岩石的单轴抗压强度将岩石分为硬质岩石、中等坚硬岩石及软质岩石三个等级,分别称之为I、II、III级岩石。其中,I级岩石的单轴饱和抗压强度(σ_c) $>80\text{MPa}$,代表性岩石有中细粒花岗岩、闪长岩、辉绿岩等;II级岩石的单轴饱和抗压强度(σ_c) $=30\sim 80\text{MPa}$,代表性岩石有大理岩、白云岩、砂岩等;III级岩石的单轴饱和抗压强度(σ_c) $<30\text{MPa}$,代表性岩石有泥质岩、泥质灰岩等。在这种岩石分类中,不同类别岩石的界限明确、使用方便,但是岩石材料的强度性质是多因素共同作用的结果,抗压强度相同的岩石,其变形破坏规律可能会存在较大差异,因此,综合岩石材料的多个力学特征参数,从多因素的角度对岩石进行分类十分必要。在多因素的岩石分类方法中,20世纪60年代初由米勒(Miller)和迪尔(Deere)提出的、基于岩石的单轴抗压强度和弹性模量的分类方案曾经对工程界产生了巨大影响,被国内外广泛推荐^[4]。Miller和Deere分类方法的步骤和要点可以概括如下:

(1) 根据岩石的单轴抗压强度将岩石划分为五个等级,如表2-2所示。

表 2-2 按岩石单轴抗压强度 (σ_c) 分级岩石

岩石等级	岩石强度	代表性岩石
A	强度极高 $\sigma_c > 225\text{MPa}$	石英岩、硅质岩、辉长石、硅化灰石及致密玄武岩等
B	强度高 $\sigma_c = 112\sim 225\text{MPa}$	大多数岩浆岩、深变质岩、胶结良好的砂岩、坚硬页岩、灰岩及白云岩等
C	中等强度 $\sigma_c = 56\sim 112\text{MPa}$	多孔细砂岩、各种片岩及大部分页岩等
D	强度低 $\sigma_c = 23\sim 56\text{MPa}$	多孔隙或低致密岩石,包括易碎砂岩、多孔隙凝灰岩、粘土岩、泥质页岩、岩盐及各种风化岩石等
E	强度极低 $\sigma_c < 23\text{MPa}$	

(2) 根据岩石的模量比将岩石划分为三个等级,如表2-3所示。所谓岩石的模量比,即是指岩石的弹性模量(E)与单轴抗压强度(σ_c)之比值 E/σ_c 。

(3) 综合考虑岩石单轴抗压强度(σ_c)、弹性模量(E)及模量比(E/σ_c),将岩石划分为AM、BL、CM及CH等15种类型。例如 $\sigma_c > 225\text{MPa}$ 、 $E/\sigma_c = 200\sim 500$ 的强度极高、模量比中等的岩石归为AM类。为方便实际应用,采用如图2-1的图解形式表示。图中的纵、横坐标均取对数坐标,分别代表弹性模量及单轴抗压强度,两根平行线分别代表模量比(E/σ_c)的分界线。左上方的分界线为 $E/\sigma_c = 500:1$,右下方的分界线为 $E/\sigma_c = 200:1$,介于两者之间的属于中等模量比M区,其左上方范围属于高模量比H区,右下方范围属于低模量比L区。

表 2-3 按岩石模量比 (E/σ_c) 分级岩石

岩石等级	模量比
H	模量比高, $E/\sigma_c > 500$
M	模量比中等, $E/\sigma_c = 200\sim 500$
L	模量比低, $E/\sigma_c < 200$

任何一种岩石均能落在图 2-1 中的一定范围内, 而且岩石的单轴抗压强度和弹性模量对岩石的矿物组成、组构变化及物理力学性质的各向异性十分敏感, 因此, 这种同时考虑了岩石的单轴抗压强度及弹性模量的组合分类方案在工程上得到了广泛应用。

硬度是指岩石抵抗某种外来机械作用特别是刻、划作用的能力, 通常用摩氏硬度计测定。摩氏硬度标准分为十个等级, 分别以十种岩石代表其硬度。岩石由于其组成物质和结构不同, 硬度也不同, 因此, 岩石也可简单地按照其坚硬程度分类。

此外, 在石油钻井工程中, 还常常根据岩石的可钻性、研磨性等对其进行划分, 为优化钻头程序提供依据。这部分内容将在第八章详细介绍。

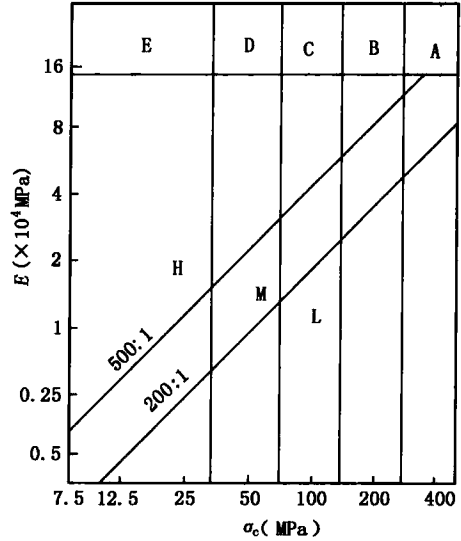


图 2-1 岩石分类综合图解^[4]

三、岩体的工程分类

岩体是由结构体(岩块)和结构面组成的复合体, 属于一种非均匀的、各向异性的不连续力学材料, 其力学性质与结构体和结构面的力学性质以及二者的组合方式(即为岩体结构)关系均很密切, 多数情况下则主要取决于结构面的力学性质及岩体结构型式。因此, 上述基于连续介质材料力学的对完整岩石的工程分类方法显然不适用于岩体工程实际。20 世纪 70 年代以来, 岩体的工程分类取得了长足的进展。在岩体的工程分类中, 尤其重视岩体的质量, 往往采取多种手段获得反映岩体工程力学性质的所谓综合特征值, 作为岩体的工程分类依据。现有的岩体的工程分类方案多数是从地下巷道工程中发展起来的, 但对于其他工程施工也具有一定的参考价值。下面首先介绍常用的评价岩体质量的岩石质量指标 RQD, 然后再给出依据岩体质量进行岩体分类的方法——比尼奥斯基岩体工程分类法^[4]。

1. 岩石质量指标

评价岩体质量的标准很多, 例如单轴抗压强度、渗透性、节理密度、产状和力学性质等。而迪尔(1964)提出的岩石质量指标 RQD (Rock Quality Designation) 尤其具有实际意义, 一直被广泛用来评价各种工程作业过程中遇到的岩体的质量。

岩石的质量由修正的取心收获率决定。设钻取岩心总进尺为 H , 实际取出岩心总长度为 L , 其中破碎岩心及软弱夹泥总长度为 l , 则得到修正的取心收获率为 $[(L-l)/H] \times 100\%$ 。修正的取心收获率即被称为岩石的质量指标。岩石质量指标 RQD 虽然能够反映岩石的硬度、结构非连续性及易碎性等特征, 但是却不能反映非连续结构面上岩石的粗糙度及发生了蚀变的充填物的性质和厚度, 而这方面的变化是确定岩体的剪切强度时必须考虑的。因此, 在下面介绍的岩体的工程分类方案中, 岩石质量指标 RQD 只作为一项重要的分类依据, 而并非唯一的因素。当然, 与一般的取心收获率相比, 岩石质量指标能更灵敏地反映岩石的质量。依据岩石的质量指标可以将岩石划分为 5 个等级, 如表 2-4 所示。

2. 比尼奥斯基岩体工程分类

比尼奥斯基 (Z. T. Bieniawski, 1979) 最早提出按照岩体的质量评分对岩体进行工程分

类的方案，这就是所谓利用岩体的“综合特征值”对其进行质量等级划分，长期以来这一分类方案受到了各国岩体工程界的普遍重视。

表 2-4 岩石质量等级^[4]

岩石等级	岩石质量	岩石质量指标 (%)
I	极好	90~100
II	好	75~90
III	不足	50~75
IV	劣	25~50
V	极劣	0~25

在比尼奥斯基的岩体工程分类方案中，采用了节理的状态和产状、RQD、地下水等 5 项因素对岩体质量进行评分 (Rock Mass Rating)，简称为 RMR，见表 2-5。RMR 值为表 2-5 中的五项因素得分总和，而各项因素的评分依据是其对岩体工程质量的影响程度，以及它在对岩体进行工程分类时受重视的程度。

采用 RMR 值对岩体进行工程分类时，首先根据表 2-5 确定 RMR 初值。RMR 值越大，表明岩体质量越好。然后，考虑节理(包括其他裂隙)产状及施工因素，基于表 2-6 对 RMR 初值进行修正，也就是说，RMR 初值扣除由表 2-6 所得的修正评分值，即为修正的 RMR 值。修正的目的在于进一步强调节理、裂隙对岩体稳定产生的不利影响，这种修正的 RMR 值就是岩体工程分类的依据。据此，可以将工程施工的岩体划分为 5 种类型，如表 2-7 所示。

表 2-5 岩体工程分类的参数及评分标准^[4]

1	完整岩石的强度 (MPa)	点荷载指数	>10	4~10	2~4	1~2	此低值区最好采用单轴抗压强度		
		单轴抗压强度	>250	100~250	50~100	25~50	5~25	1~5	<1
	评分		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD 值		90%~100%	75%~90%	50%~75%	25%~50%	<25%		
	评分			20	17	13	8	3	
3	节理间距 (cm)		>200	60~200	20~60	6~20	<6		
	评分			20	15	10	8	5	
4	节理状态		裂开面很粗糙，节理不连通，未张开，两壁岩石未风化	裂开面稍粗糙，缝宽小于 1mm，两壁岩石轻度风化	稍粗糙，缝宽小于 1mm，两壁岩石高度风化	裂开面夹泥，厚度小于 5mm，节理连通	裂开面夹泥厚度大于 5mm，节理连通		
	评分			30	25	20	10	0	
5	地下水状况	隧洞中每 10m 长地段涌水量 (L/min)	0	<10	10~25	25~125	>125		
		节理水压力/大主应力	0	0.0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.5	>0.5		
		隧洞干燥程度	干燥	稍潮湿	潮湿	滴水	涌水		
	评分			15	10	7	4	0	