



中国石油大学(北京)学术专著系列

石油工程岩石力学

陈 勉 金 衍 张广清 著



科学出版社
www.sciencep.com

中国石油大学（北京）学术专著系列

石油工程岩石力学

陈 勉 金 衍 张广清 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了石油工程岩石力学的基本概念、基本原理,包括岩石力学的基本变形理论和强度理论,讨论了孔隙弹性理论的有效应力定律和本构方程.介绍了深部地层地应力的各种测量方法以及在地应力、井内压力和泥浆化学联合作用下的各种井眼围岩的应力状态.特别以井壁稳定、水力压裂、套管损坏、油井出砂和地层参数的地震、测井解释为重点,阐述了岩石力学在石油工程中应用的研究进展.书中教学推导较详尽,有关试验方法和资料亦有翔实介绍.

本书可供高等院校钻井工程、油气田开发工程、油气储运工程、测井工程、地球物理勘探、工程地质、土木工程、岩石力学、工程力学等专业的师生,以及相关科技人员参考应用.

图书在版编目(CIP)数据

石油工程岩石力学 / 陈勉, 金衍, 张广清著. —北京: 科学出版社, 2008
(中国石油大学(北京)学术专著系列)

ISBN 978-7-03-021608-3

I. 石… II. ①陈… ②金… ③张… III. 石油工程-岩石力学 IV. TE21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 048882 号

责任编辑: 杨 震 黄 海 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 7 月第一次印刷 印张: 26 1/4

印数: 1—2 000 字数: 513 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

丛 书 序

大学是以追求和传播真理为目的,并为社会文明进步和人类素质提高产生重要影响力和推动力的教育机构和学术组织.1953年,为适应国民经济和石油工业发展需求,北京石油学院在清华大学石油系并吸收北京大学、天津大学等院校力量的基础上创立,成为新中国第一所石油高等院校.1960年成为全国重点大学.历经1969年迁校山东改称华东石油学院,1981年又在北京办学,数次搬迁,几易其名.在半个多世纪的历史征程中,几代石大人秉承追求真理、实事求是的科学精神,在曲折中奋进,在奋进中实现了一次次跨越.目前,学校已成为石油特色鲜明,以工为主,多学科协调发展的“211工程”建设的全国重点大学.2006年12月,学校进入“国家优势学科创新平台”高校行列.

学校在发展历程中,有着深厚的学术记忆.学术记忆是一种历史的责任,也是人类科学技术发展的坐标.许多专家学者把智慧的涓涓细流,汇聚到人类学术发展的历史长河之中.据学校的史料记载:1953年建校之初,在专业课中有90%的课程采用前苏联等国的教材和学术研究成果.广大教师不断消化吸收国外先进技术,并深入石油厂矿进行学术探索.到1956年,编辑整理出学术研究成果和教学用书65种.1956年4月,北京石油学院第一次科学报告会成功召开,活跃了全院的学术气氛.1957~1966年,由于受到全国形势的影响,学校的学术研究在曲折中前进.然而许多教师继续深入石油生产第一线,进行技术革新和科学研究.到1964年,学院的科研物质条件逐渐改善,学术研究成果以及译著得到出版.党的十一届三中全会之后,科学研究被提到应有的中心位置,学术交流活动也日趋活跃,同时社会科学研究成果也在逐年增多.1986年起,学校设立科研基金,学术探索的氛围更加浓厚.学校始终以国家战略需求为使命,进入“十一五”之后,学校科学研究继续走“产学研相结合”的道路,尤其重视基础和应用基础研究.“十五”以来学校的科研实力和学术水平明显提高,成为石油与石化工业的应用基础理论研究和超前储备技术研究以及科技信息和学术交流的主要基地.

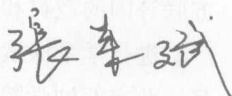
在追溯学校学术记忆的过程中,我们感受到了石大学者的学术风采.石大学者不但传道授业解惑,而且以人类进步和民族复兴为己任,做经世济时、关乎国家发展的大学问,写心存天下、裨益民生的大文章.在半个世纪的发展历程中,石大学者历经磨难、不言放弃,发扬了石油人“实事求是、艰苦奋斗”的优良作风,创造了不凡的学术成就.

学术事业的发展有如长江大河，前浪后浪，滔滔不绝，又如薪火传承，代代相继，火焰愈盛。后人做学问，总要了解前人已经做过的工作，继承前人的成就和经验，在此基础上继续前进。为了更好地反映学校科研与学术水平，凸显石油科技特色，弘扬科学精神，积淀学术财富，学校从2007年开始，建立“中国石油大学（北京）学术专著出版基金”，专款资助教师们以科学研究成果为基础的优秀学术专著的出版，形成《中国石油大学（北京）学术专著系列》丛书。受学校资助出版的第一部专著，均经过初审评议、校外同行评议、校学术委员会评审等程序，确保所出版专著的学术水平和学术价值。学术专著的出版覆盖学校所有的研究领域。可以说，学术专著的出版为科学研究的先行者提供了积淀、总结科学发现的平台，也为科学研究的后来者提供了传承科学成果和学术思想的重要文字载体。

石大一代代优秀的专家学者，在人类学术事业发展尤其是石油石化科学技术的发展中确立了一个个坐标，并且在不断产生着引领学术前沿的新军，他们形成了一道道亮丽的风景线。“莫道桑榆晚，为霞尚满天”。我们期待着更多优秀的学术著作，在园丁们灯下伏案或电脑键盘的敲击声中诞生，展现在我们眼前的一定是石大寥廓辽远、星光灿烂的学术天地。

祝愿这套专著系列伴随新世纪的脚步，不断迈向新的高度！

中国石油大学（北京）校长



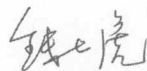
2008年3月31日

序

岩石力学经过半个多世纪的发展,在许多领域中的应用日臻深入,取得长足的进展,而岩石力学在石油工程中的应用则是近 20 年来的事.随着石油工程技术的发展,石油天然气勘探开发所涉及的地质环境日趋复杂,非常规的钻井和开发方式越来越多地被采用,这给相应的岩石力学研究提出了新的挑战.在与石油工程有关的岩石力学研究中,所涉及的地层深度在 1000~8000m,研究对象以沉积岩层为主体,岩石处于较高的围压(可达 200MPa)、较高的温度(可达 200℃)和较高的孔隙压力(可达 200MPa)作用下.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.中国岩石力学与工程学会将这部分研究领域划分到深层岩石力学专业委员会,国际岩石力学学会也下设了相应的专业委员会.

近十几年来陈勉教授的研究团队在国家自然科学基金、霍英东基金、国家“863”项目和中国石油天然气集团公司(中石油)、中国石油化工股份有限公司(中石化)、中国海洋石油总公司(中海油)科研项目的连续支持下,一直从事岩石力学在石油工程中的应用研究,《石油工程岩石力学》就是在这些科研工作的基础上撰写而成的.书中以石油工程为背景,研究深层岩石的力学性质以及在工程中的应用,反映了作者在石油工程岩石力学方面理论研究与应用实践的新成果.例如,各向异性多重孔隙岩石的有效应力理论、地应力测量的复合方法、井壁稳定的钻前预测技术、水力压裂的物理模拟技术等.

我认为,《石油工程岩石力学》在理论和应用上都有独到和创新之处,具有科学意义和实用价值,对于需要研究或了解深层岩石力学及其石油工程应用的读者无疑是一本很好的参考书.我期望这本书的出版能对这一学科领域的发展起到促进作用.



中国工程院院士

中国岩石力学与工程学会理事长

2007 年 11 月 28 日于北京

前 言

我从 1992 年开始为中国石油大学(北京)的钻井工程、油气田开发工程和地球物理等专业的研究生和本科生讲授石油工程岩石力学的有关课程,同时在国家自然科学基金、霍英东基金、国家“863”项目以及中国石油天然气集团公司(中石油)、中国石油化工股份有限公司(中石化)、中国海洋石油总公司(中海油)的支持下,从事石油勘探开发中有关地应力、井壁稳定性、水力压裂、套管损坏和油井出砂等问题的研究.本书中相当篇幅的内容反映了我所在研究小组的研究成果.

本书共分 9 章.第 1 章介绍岩石变形与强度的基础理论;第 2 章介绍孔隙弹性理论和多重孔隙条件下的渗透率、本构方程和有效应力定律,与大多数文献中的假设不同,本章的多重孔隙理论是以各向异性为基础建立的,井壁围岩的应力状态是研究石油工程岩石力学的基础;第 3 章叙述了直井、大斜度井和水平井的井壁围岩应力,同时考虑了钻井液水化作用对应力的影响;在第 4 章中,除了介绍了常规测量地应力的水力压裂方法、井壁崩落方法和岩石声发射 Kaiser 效应方法外,还介绍了几种地应力复合测量方法及动态地应力理论;第 5~9 章重点阐述岩石力学在石油工程中的应用问题.其中,井壁稳定部分包括了直井和斜井井壁稳定问题、含弱面各向异性地层井壁稳定问题、塑性和黏弹性地层缩径问题、水敏性泥页岩地层坍塌周期问题、气体钻井井壁稳定性问题以及油田开发中后期调整井的井壁稳定问题.在水力压裂部分涉及了储层岩石断裂韧性测量预测方法、三维水力裂缝数学力学模型、水力压裂的大型物理模拟技术、非平面裂缝预测理论以及重复压裂等问题.另外,也介绍了套管损坏、油井出砂和地震测井资料应用等问题.

在本书的撰写中作者试图实现以下几点:

(1) 尽可能系统全面地向读者介绍岩石力学在石油勘探开发中各个方面的应用进展.涉及在钻井过程中的深井超深井钻井技术、水平井大位移井钻井技术、欠平衡钻井技术、气体钻井技术、复合盐层钻井技术、老油田调整井钻井技术;储层改造中的三维压裂设计、水平井压裂、重复压裂、非均质地层压裂等;套管损坏问题、油藏地面沉降问题、区域动态地应力问题、地震测井资料的应用等问题.当然,还有许多问题本书没有涉及;如古地应力问题、应力相关的油藏模拟问题、酸化压裂问题、气体压裂问题等,这主要是因为一些问题与其他学科联系极为紧密,或因为本书篇幅有限,更多的原因是由于作者水平有限,未敢贸然涉及.

(2) 努力构建石油工程岩石力学的基础理论体系.与石油工程相关的岩石力学除

了地层深、围压高、孔隙压力高等特点外,所涉及的岩性往往更为复杂,砂岩、泥岩、盐膏、碳酸盐岩等交互并存,孔隙、裂隙、溶洞和人工诱导裂缝并存,油、水、气并存.工程取心成本很高,井下探测手段极为有限.必须从十分有限的资料出发,通过严密的理论分析,认识工程现象.这对基础理论体系的建立提出了更高的要求.

(3)为工程技术人员提供现场工艺选择和施工设计的实用方法.应该说,石油天然气的有效载体是岩石,几乎每一个工艺措施都与岩石相关.但是,由于一些工艺措施规范和设计标准与新技术、新认识的差距,对于复杂工程问题往往缺乏针对性.另外,有关石油工程岩石力学的文献支离破碎,不易系统查询.本书力争使理论方法易于应用,并给出了一些应用实例.

本书的出版得到了科学出版社和中国石油大学(北京)的大力支持和帮助.金衍博士、张广清博士参与了全书的编写.我的研究生陈治喜博士、张旭东博士、杨丽娜博士、李军博士、陈军海博士、赵颖博士、王怀英硕士、庞飞硕士、耿宇迪硕士等为本书的出版提供了重要的材料.赵海峰博士、邱康博士、彭晓佳硕士等参与了繁重的校对清样工作.中国石油大学(北京)刘希圣教授、北京大学殷有泉教授、中国矿业大学姜耀东教授对本书进行了校阅.他们的帮助与支持使得本书的撰写变成了一项愉快的工作.在此向他们表示感谢.

陈 勉

2007年5月1日于北京昌平

目 录

丛书序

序

前言

绪论	1
第1章 岩石的基本性质和变形特征	4
1.1 岩石力学性质室内试验	5
1.1.1 岩石单轴压缩试验	7
1.1.2 岩石三轴抗压试验	12
1.1.3 岩石的拉伸破坏试验	14
1.1.4 岩石蠕变及其机理	16
1.2 岩石的变形与强度	19
1.2.1 Mohr-Coulomb 准则	21
1.2.2 Drucker-Prager 准则	27
1.2.3 Griffith 准则	28
1.2.4 Griffith 准则的 Murrell 推广	30
第2章 岩石力学的孔隙弹性理论	31
2.1 孔隙度和渗透率	31
2.1.1 孔隙度	31
2.1.2 渗透率	32
2.2 静态孔隙弹性理论	34
2.3 多重孔隙介质的有效应力定律	40
2.4 各向异性裂隙介质的应力相关渗透率张量和本构方程	44
2.4.1 应力无关渗透率张量	44
2.4.2 应力相关渗透率张量	45
2.5 油藏压实与地面变形	50
2.5.1 油藏压实与地面变形的机理	51
2.5.2 油藏开采引起的地面变形预测模型	52
第3章 井壁围岩的应力状态	56
3.1 垂直井井壁围岩应力分布	56

3.2	大斜度井、水平井的井壁围岩应力分布	58
3.3	化学作用对井壁的应力状态的影响	61
3.3.1	水化地层本构方程	62
3.3.2	井壁围岩吸水规律	63
3.3.3	泥页岩的水化膨胀应变	64
3.3.4	泥页岩材料的力学参数 E 、 ν	64
3.4	套管对井壁的应力状态的影响	65
第4章	油田地应力及确定方法	67
4.1	地应力的概念	67
4.1.1	岩体自重产生的地应力	67
4.1.2	构造应力	68
4.1.3	温度变化产生的附加应力	68
4.1.4	总原地应力	69
4.2	地应力的确定方法	69
4.2.1	油田地应力测量方法概述	69
4.2.2	水力压裂法测地应力	70
4.2.3	井壁崩落法确定地应力的方向	72
4.2.4	岩石声发射 Kaiser 效应测定地应力	76
4.2.5	复合地应力测量方法	83
4.2.6	地破试验与差应变结合确定地应力的方法	86
4.2.7	地破试验与多极子测井相结合的方法	91
4.3	分层地应力解释方法	91
4.4	动态地应力理论	93
4.4.1	流动模型	93
4.4.2	考虑有效应力的应力平衡方程	94
4.4.3	耦合算法	96
4.4.4	计算实例	97
第5章	钻井过程中的井壁稳定问题	99
5.1	井壁力学失稳的形式与原因	99
5.2	井壁坍塌剥落	100
5.2.1	岩石破坏的强度准则	100
5.2.2	井壁坍塌处的应力	102
5.2.3	井壁应力的非线性修正	103

5.2.4 井壁坍塌压力的计算	105
5.3 井壁破裂	105
5.4 安全钻井液密度窗口	107
5.5 大斜度井和水平井的井壁稳定	108
5.5.1 安全钻井液密度窗口的确定方法	109
5.5.2 大位移井井壁稳定性影响因素分析	110
5.6 地层各向异性对岩石强度和井壁稳定的影响	114
5.6.1 弱面对强度的影响	115
5.6.2 直井稳定的弱面问题	115
5.6.3 斜井稳定的弱面问题	117
5.7 塑性地层的井眼缩径	118
5.7.1 理想弹塑性模型	118
5.7.2 硬化模型	121
5.7.3 软化模型	122
5.7.4 基于拉格朗日元法的膏盐岩地层的缩径变形分析	125
5.8 黏弹性地层的井眼变形	129
5.8.1 试验技术和方法	130
5.8.2 岩石蠕变微观机制的研究	131
5.8.3 岩石蠕变模型和本构方程	132
5.8.4 盐岩蠕变的本构关系	133
5.8.5 维持不同缩径率所需的安全钻井液密度下限（饱和盐水或油基钻井液）	135
5.8.6 维持不同缩径率所需的安全钻井液密度下限（欠饱和盐水钻井液）的要求	137
5.9 水敏性泥页岩地层临界坍塌时间的确定方法	141
5.9.1 泥页岩水化应力的本构关系	141
5.9.2 泥页岩水化应力的求解	142
5.9.3 地层临界坍塌时间的确定	144
5.9.4 现场应用	144
5.10 维持井壁稳定的充气钻井液密度确定方法	145
5.10.1 井筒温度场控制方程	146
5.10.2 一维两相流条件下井筒压力场	147
5.10.3 维持气井井壁稳定的有效安全钻井液密度的确定方法	148

5.10.4	应用实例	149
5.11	油田开发中后期调整井钻井液密度的确定方法	150
5.11.1	储层坍塌压力、破裂压力的变化	150
5.11.2	椭圆状井眼的抗失稳能力	152
5.11.3	现场应用	154
5.12	气体钻井井壁稳定性分析	154
5.12.1	以往气体钻井井壁稳定模型的评价	155
5.12.2	气体钻井井壁稳定力学模型	156
5.12.3	现场验证	160
第6章	水力压裂	162
6.1	水力裂缝的起裂	163
6.1.1	水力裂缝起裂模型	164
6.1.2	斜井中裂缝起裂	167
6.1.3	射孔对破裂压力的影响	174
6.2	三维压裂模型	178
6.2.1	水力压裂的力学模型概述	178
6.2.2	水力压裂三维模型	181
6.3	岩石断裂韧性	196
6.3.1	断裂韧性测试研究现状	196
6.3.2	断裂力学理论	197
6.3.3	SNBD 试件断裂韧性的计算	201
6.3.4	断裂韧性试验研究	203
6.3.5	测井资料预测岩石断裂韧性	211
6.4	水力压裂大型物理模拟试验理论与方法	213
6.4.1	水力压裂模拟试验中的相似准则	213
6.4.2	室内试验装置及检测技术	220
6.5	裂缝干扰	224
6.5.1	水力裂缝相互干扰的机理	224
6.5.2	天然裂缝对水力裂缝的影响	233
6.6	非均质地层压裂	243
6.6.1	分层介质压裂模拟	243
6.6.2	地层中阻流带对水力裂缝的影响	253
6.7	水力裂缝转向	258

6.7.1	井筒附近裂缝转向	259
6.7.2	新井转向压裂	262
6.7.3	水平井压裂	267
6.8	重复压裂	274
6.8.1	重复压裂裂缝重定向机理	275
6.8.2	重复压裂数学模型及有限元数值解	276
6.8.3	重复压裂裂缝因素影响分析	282
第7章	出砂问题	286
7.1	油气井出砂概述	286
7.1.1	出砂的危害	286
7.1.2	油气井出砂的影响因素	286
7.1.3	油气井出砂的机理	289
7.1.4	出砂地层的类型及出砂特征	290
7.2	砂拱数学模型	290
7.2.1	砂拱稳定的数学模型	291
7.2.2	相关的数值模型	292
7.3	常见的出砂工程预测方法	293
7.4	防砂方法简介	295
第8章	岩石动力学与应用	298
8.1	弹性介质中的纵、横波	298
8.2	利用声波测井确定岩石的弹性和强度参数	299
8.2.1	相关测井简介	300
8.2.2	动静态弹性参数	303
8.2.3	强度参数	304
8.3	声波测井在石油工程中的应用	305
8.3.1	孔隙压力检测	305
8.3.2	利用声波测井资料预测地层破裂压力	307
8.3.3	利用测井资料确定井壁的坍塌压力	309
8.4	地震资料的工程预测理论	309
8.4.1	层速度预测地层孔隙压力	309
8.4.2	层速度钻前预测井壁稳定性	311
8.4.3	层速度单因素钻前井壁稳定预测模型与应用	318
8.4.4	层速度钻前井壁稳定预测神经网络模型与应用	322
8.5	地震记录钻前预测井壁稳定性	330

8.5.1	利用地震记录构建测井曲线	330
8.5.2	声波速度与泥质含量、孔隙度的关系	337
8.5.3	流体有效压力	338
8.5.4	利用常规井壁稳定力学方法预测钻前井壁稳定	338
8.5.5	利用非线性函数曲线拟合预测钻前井壁稳定	344
8.5.6	应用实例	347
第9章	复杂地应力条件下的套管损坏问题	350
9.1	引言	350
9.1.1	套管损坏机理	350
9.1.2	套管外挤载荷分析与强度设计	351
9.1.3	复杂地应力条件下定向井套管受力及损坏研究	356
9.2	套管、水泥环及井壁围岩组合体弹塑性分析	356
9.2.1	套管、水泥环及井壁围岩组合体线弹性分析	356
9.2.2	套管、水泥环及井壁围岩组合体弹塑性分析	364
9.2.3	非均匀地应力条件下套管、水泥环及井壁围岩组合体有限元分析	373
9.3	复杂地应力条件下定向井套管受力有限元分析	384
9.3.1	定向井井壁稳定三维有限元分析模型	384
9.3.2	定向井套管受力有限元分析	386
9.4	岩石力学性质正交各向异性对套管受力的影响	391
9.4.1	工程背景	391
9.4.2	各向异性与各向同性条件下井壁围岩应力及套管受力对比	392
参考文献		396

绪 论

一、岩石力学发展概况

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在 1966 年曾给岩石力学下过定义, 认为: “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.” 应该指出, 第二个定义更加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.

人类与岩石的交往也许起源于 70 万 ~ 20 万年前, “北京猿人” 所生活的周口店龙骨山岩石洞穴. 人类对岩石最早的认识也许不过是抛掷石块射杀猎物, 或做成锐器砍剥动物骨肉. 人类与岩石的亲密情感, 大概是从在岩石上刻画开始的. 2000 年考古学家在埃及南部一处荒谷的岩壁上发现刻有古埃及象形文字铭文, 据查这些石刻距今已有 4000 年之久. 595~605 年, 隋朝工匠李春主持建造了世界上现存最古老的石拱桥——赵州桥 (又称安济桥). 古时人们对于岩石的力学性质所知甚少, 唐朝中书令张嘉贞著《安济桥铭》中记载: “赵州蛟河石桥, 隋匠李春之迹也, 制造奇特, 人不知其所以为.” 那时, 岩石给人们的印象是恒久不变的. 关于岩石的流变性, 我们在莎士比亚《十四行诗》中发现这样的诗句: “当岩石, 无论多么险固, 或钢扉, 无论多坚强, 都要被时光熔化.” 雨果在其名著《悲惨世界》中还有关于水力破岩的比喻: “人心和岩石一样, 也可以有被水滴穿的孔.”

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 50 年才发展起来的. 目前, 在水电建设中, 大型电站的坝高可达 300m, 石油地质钻井深度已达 10 000m 以上, 最深的水平井已达 6000m 以上, 而研究地壳变形时, 涉及的深度达五六十千米、温度在 1000℃ 以上, 必须考虑的时间效应为几百万年. 而且更巨大和复杂的岩石工程还在日益增加, 从而有力地促进了岩石力学的发展.

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 Talobre 的专著《岩石力学》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, 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, ICRM), 后改称联邦岩石力学委员会 (U. S. National Committee for Rock Mechanics, USNC/RM), 把岩石力学在各个领域中取得的成果进行交流推广, 之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, 如中国科学院武汉岩土力学研究所等. 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.

二、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, 所涉及的地层深度在 1000~8000m, 研究对象以沉积岩层为主体, 岩石处于较高的围压 (可达 200MPa)、较高的温度 (可达 200℃) 和较高的孔隙压力 (可达 200MPa) 作用下. 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 10^4 m 的下地壳与上地幔岩石物理力学问题.

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 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, 主要依靠水压致裂、岩石声发射试验、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.

石油工程岩石力学所涉及的温度可达 200℃. 一般的地温梯度是 3℃/100m, 高

的可超过 $4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 具体的地温梯度往往需要实际测定. 当温度超过 150°C 后, 温度对岩石性质的影响将变得十分明显.

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 $0.01\text{MPa}/\text{m}$, 而异常高压可超过 $0.02\text{MPa}/\text{m}$.

石油工程岩石力学所研究的地层力学是在高围压、高温度和高孔隙压力状态下, 其性质已完全不同于浅部地层, 它可能经过脆 - 塑性转变变成塑性, 也可能由于高孔隙压力的作用呈现脆性破坏. 因此, 石油工程岩石力学具有与传统岩石力学不同的研究特点.

近 40 年以来, 随着我国大庆、胜利、辽河、长庆、塔里木等油田的开发, 石油工程岩石力学的重要性已经被学者和工程技术人员所广泛认同. 相信随着石油工程岩石力学的深入研究, 不但会进一步丰富岩石力学基础理论, 而且更会促进石油勘探开发新技术的发展.



图 0-1 孔隙压力梯度与深度关系图

图 0-1 孔隙压力梯度与深度关系图. 该图展示了孔隙压力梯度随深度变化的规律. 在浅部地层, 孔隙压力梯度较低, 随着深度增加, 孔隙压力梯度逐渐增大. 这种变化反映了地层中流体压力的分布特点, 对于研究地层力学性质具有重要意义.

图 0-1 孔隙压力梯度与深度关系图. 该图展示了孔隙压力梯度随深度变化的规律. 在浅部地层, 孔隙压力梯度较低, 随着深度增加, 孔隙压力梯度逐渐增大. 这种变化反映了地层中流体压力的分布特点, 对于研究地层力学性质具有重要意义.