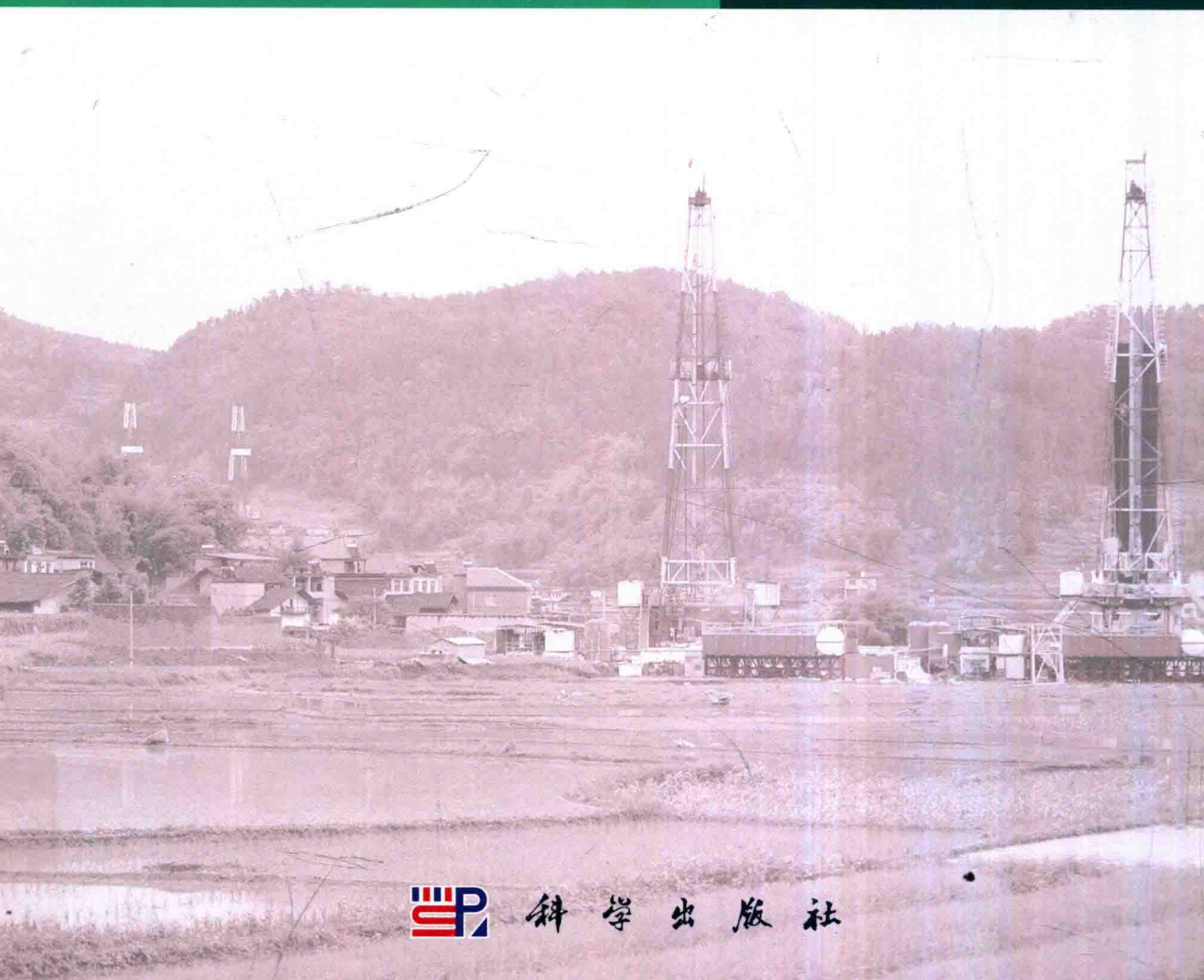


The Theory and Practice in
Shale Gas Development Engineering

页岩气开发工程中的 理论与实践

曾义金 杨春和 张保平◎著



科学出版社

页岩气开发工程中的理论与实践

The Theory and Practice in Shale Gas Development Engineering

曾义金 杨春和 张保平 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合我国页岩气勘探开发实际,根据页岩气开发工程中的理论研究成果编著而成,主要介绍用岩心试验、测井资料与地球物理求取页岩储层甜点的方法,钻井过程中页岩井壁围岩失稳机理、破坏规律、计算模型和控制方法,大型压裂过程中页岩裂缝起裂机理和延伸规律,压裂后裂缝监测与评估方法,页岩气试井解析与产能评价方法。本书注重理论与实践相结合,通过具体事例介绍基础理论的应用方法。本书为了帮助读者理解和掌握理论与方法在页岩气勘探开发工程中的系统应用,提出地质工程一体化技术,以钻井、压裂为重点,示范了应用方法。

本书适合从事页岩气地质力学、钻井工程、压裂工程、测试工程及相关专业的科研人员阅读,也可作为现场专业技术人员、高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

页岩气开发工程中的理论与实践 = The Theory and Practice in Shale Gas Development Engineering / 曾义金, 杨春和, 张保平著. —北京: 科学出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-03-052220-7

I. ①页… II. ①曾… ②杨… ③张… III. ①油页岩—油田开发—研究 IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 049248 号

责任编辑: 吴凡洁 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 无极书装

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

北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第一版 开本: 787×1092 1/16

2017年3月第一次印刷 印张: 28 1/2

字数: 672 000

定价: 298.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

页岩气是一种赋存于泥页岩中的清洁非常规油气资源，以游离和吸附状态赋存于富有机质页岩纳米级孔隙中，具有自生自储的特点。国内外勘探开发实践证明，采用水平井钻完井技术及大型水力分段压裂技术是实现页岩气商业开发的关键。

我国页岩气资源具有类型多、分布广、潜力大的特点，2012年国土资源部公布我国页岩气可采资源量为 $25.08 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，页岩气有利分布区主要集中在四川盆地及其周缘、鄂尔多斯盆地等地区。在北美，页岩气的开发主要在地面条件较好、埋深适中的海相沉积盆地。与之相比，我国海相页岩气目的层埋藏深、年代老、有机质演化成熟度偏高，经历多期构造改造，并且富集区多位于山地、丘陵地区。上述特点与差异决定了我国不能简单复制国外成熟的页岩气开发工程技术。近十年来，通过广大工程技术人员的不懈努力，基本形成了适合我国海相页岩气勘探开发的水平井钻完井及分段压裂等关键技术，为我国页岩气勘探开发做出突出贡献。我国在四川盆地焦石坝页岩气勘探开发的重大突破，揭开了我国页岩气商业性开发的序幕。

近十年来，本书作者及其团队结合页岩气勘探开发生产实践，针对工程技术基础理论问题开展一系列技术攻关，主要包括页岩储层地质力学与工程“甜点”分析方法、页岩地层井壁失稳机理与控制方法、压裂过程中裂缝起裂机理与延伸规律、页岩气产能评价方法等。通过攻关，提出岩石力学参数与工程甜点求取方法和计算模型，揭示页岩地层井壁围岩失稳机理；建立压裂过程中页岩多尺度大变形裂缝分析方法，阐释压裂过程中地面与井下岩体变形机理及裂缝监测方法，构建多因素影响下页岩气井产能预测技术等。这些卓有成效的研究成果，为解决页岩气勘探开发重大工程技术理论问题奠定了坚实的基础，促进了我国页岩气工程技术的发展。

本书注重理论与实践相结合，每个章节都对工程技术理论及其使用方法进行系统论述，第六章地质工程一体化应用技术作为本书理论体系的总结，结合涪陵、彭水等我国页岩气主要勘探开发主力区块的作业实践，从岩石力学求取、工程甜点的分析、水平井钻井技术、分段压裂技术和产能评价方法等方面，详细阐述工程技术理论和一体化技术应用方法，对页岩气勘探开发具有重要的指导作用和参考价值。

我国页岩气勘探开发工作还处于初期阶段，本书可为我国页岩气勘探开发工程技术

提供理论指导和成功借鉴，不失为我国现阶段页岩气勘探开发工程技术领域的重要成果，它既可供从事页岩气勘探开发工程技术研究与应用的科研人员和技术人员参考，也适合从事岩石力学、石油钻井、完井工程、压裂及相关专业的技术人员阅读，还可作为高等院校相关专业的教学参考书。

马永生

中国工程院院士

2016年3月

前言

页岩气是非常规天然气之一，成分以甲烷为主，是一种清洁、高效的能源资源。页岩气具有自生自储、分布广、生产周期长等特点，其一般以吸附态或游离态蕴藏于泥岩、页岩、泥页岩及粉砂岩夹层中。约有 25% 的页岩气以游离态赋存于页岩天然裂缝、孔隙等储集空间，约 75% 的页岩气以吸附态存在于干酪根、矿物颗粒表面及煤热裂解物，在一定地质条件下聚集成藏并达到经济开采价值。与常规储层气藏的最大区别在于，页岩不仅是烃源岩，还是页岩气藏的储集层和封盖层。

全球页岩气资源丰富，根据美国能源信息署 (Energy Information Administration, EIA) 发布的统计数据显示，2015 年，全球页岩气的技术可采资源量预测为 $2.15 \times 10^{14} \text{m}^3$ ，其中北美地区拥有 $4.9 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，位居第一；亚洲拥有 $4.8 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，位居第二；非洲拥有 $4.0 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，位居第三；欧洲拥有 $2.5 \times 10^{13} \text{m}^3$ ，位居第四；全球其他地区拥有 $5.3 \times 10^{13} \text{m}^3$ 。美国是页岩气开发最早、最成功的国家。1863 年，在伊利诺斯盆地西肯塔基州的泥盆系和密西西比系黑色页岩中发现了页岩气。20 世纪 20 年代，页岩气钻井已经发展到西弗吉尼亚州、肯塔基州和印第安纳州，并开始页岩气现代化工业生产，70 年代中期步入规模化发展阶段。进入 2000 年后，开始大规模页岩气的技术攻关，目前形成了以岩心分析和水平井分段压裂为核心的增产技术，实现规模效益开发，已成为非常规天然气的主体，2015 年，美国页岩气年产量达 $4.250 \times 10^{11} \text{m}^3$ 。根据美国 EIA 预测，到 2035 年，美国页岩气产量预计将增至 $7.645 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，占天然气总产量的 67.9%。页岩气产量的快速上涨，改变了美国的能源消费结构，降低了其对能源的对外依赖，实现了能源自给。页岩气勘探开发已在北美洲、亚洲、欧洲、南美洲、大洋洲等地区蓬勃兴起，爆发一场“页岩气革命”。

我国页岩气资源类型多、分布广、潜力大。我国海相沉积分布面积多达 $3.00 \times 10^6 \text{km}^2$ ，海陆交互相沉积面积为 200 多万平方千米，陆上海相沉积面积约为 $2.80 \times 10^6 \text{km}^2$ ，形成了海相、海陆交互相及陆相多种类型富有机质页岩层系。2012 年国土资源部评估页岩气可采资源量为 $2.508 \times 10^{13} \text{m}^3$ (中国工程院公布的数据为 $1.0 \times 10^{13} \sim 1.2 \times 10^{13} \text{m}^3$)，与美国评估的 $2.83 \times 10^{13} \text{m}^3$ 大致相当，经济价值巨大。我国页岩气的勘探开发时间虽不长，但发展迅速，2010 年在四川盆地寒武系九老洞组黑色页岩和志留系页

岩中钻探的 W201 井试气后日产天然气为 $2.46 \times 10^4 \text{m}^3$ ，实现了中国页岩气开发的首次突破。2012 年 11 月，在重庆涪陵 JY1HF 志留系龙马溪组压裂测试日产气为 $2.03 \times 10^5 \text{m}^3$ ，获高产工业气流，实现国内页岩气勘探开发重大突破，揭开了涪陵页岩气勘探开发的序幕，实现了我国第一个页岩气田规模开发，2015 年已建成产能为 $5.0 \times 10^9 \text{m}^3$ ，2020 年预计建成产能 $1.00 \times 10^{10} \text{m}^3$ 。目前，我国页岩气勘探开发主要集中在四川盆地及其周缘、鄂尔多斯盆地、辽河东部凹陷等地。2013 年我国设立了长宁-威远、昭通、涪陵、延安四个页岩气开发示范区，截至 2015 年已建成页岩气产能超过 $7.5 \times 10^9 \text{m}^3$ ，“十三五”规划到 2020 年将力争超过 $3.00 \times 10^{10} \text{m}^3$ ，2025 年达到 $6.00 \times 10^{10} \sim 1.000 \times 10^{11} \text{m}^3$ 。

页岩气藏具有资源丰度低、低孔隙度、低渗透率、低日产量、投产递减快等特征，北美的成功经验证明，需要大型水力分段压裂和水平井钻完井技术才能经济开采。与常规钻井相比，页岩气钻完井主要实现四个方面的要求：第一，直井快速钻井，为了节省时间降低钻井成本，往往采用特殊钻机实现连续批量钻井；第二，水平段快速侧钻，在钻井过程中，随钻掌握岩石储层物性，实现水平段准确着陆；第三，固井水泥石有足够的韧性和强度封闭环空，为分段压裂提供条件，实现采气最大化；第四，由于页岩气的赋存方式和成藏机理更加复杂，页岩气压裂产生体积压裂，并形成网络缝。

通过近几年的攻关与实践，我国已建立一套符合中国页岩气地层特点、适应性良好的水平井优快钻井、长水平段压裂试气、试采开发配套等具有自主知识产权的页岩气开发配套系列技术，积极推进“井工厂”作业、压裂运行新模式，施工效率持续提高。但是，我国的页岩气勘探开发时间不长，钻完井周期长、压裂改造效果不理想、开发成本高等问题普遍存在，还未完全达到经济有效开发的效果。其原因除了我国还需要完善经济、有效、实用的页岩气核心工程技术外，更重要的是还存在对地质的认识和评价不足、页岩气开发工程中的理论滞后、地质与工程一体化设计脱节等问题，而解决该问题的关键是掌握页岩气储层特性和地质力学规律，攻克开发工程中关键理论，并采取地质工程一体化技术，以实现页岩气经济有效开采，推动我国页岩气勘探开发进程及发展目标的实现。

本书的目的是解决页岩气开发工程中的有关理论问题，为页岩气开发工程奠定基础。全书分六章，第 1 章阐述页岩气甜点的内涵，从地球物理、测井和岩心测试三个方面论述地质与工程甜点求取方法和数学模型；第 2 章在分析页岩地质特性的基础上，提出页岩地层分类新方法，揭示页岩地层井壁围岩失稳机理与分析计算模型；第 3 章在大型物理模型的基础上，分析压裂过程中页岩多尺度大变形裂缝起裂与延伸规律，建立裂缝变形分析数学方法，提出大型压裂设计中的理论模型；第 4 章介绍裂缝监测方法，数值模拟压裂过程中地面与井下大地变形，建立准确获取裂缝方位、倾角、尺寸裂缝数学计算方法；第 5 章提出页岩气水平井流动模型，分析页岩气孔渗结构特征、渗流机理、吸附及滑脱效应对产能的影响规律，给出页岩气藏的试井数学分析模型，建立页岩气井的产能预测方法；第 6 章指出当前页岩气开发工程中存在的问题，提出一体化工程作业方法，形成地质工程一体化技术，以钻井、压裂为重点，示范使用方法。为了让读者更

好地了解本书的理论方法，本书每个章节都通过一定量的现场具体事例加以说明。

为了更好地反映技术的先进性，作者在近几年研究成果的基础上，结合国内外最新的成果及中国页岩气地质条件和勘探开发现状编著成书。在编写时力求做到先进、简洁和实用。

本书受到页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室的资助，得到中国石油化工股份有限公司页岩气地质工程技术人员的大力支持，特别是陈军海、王怡、杨勤勇、郭印同、庞伟、廖东良、周健、张金成、臧艳彬、蒋廷学、李双明、刘双莲、王海涛给予大力帮助，得到“页岩油气富集机理与有效开发”国家重点实验室的大力支持，马永生院士为本书作序，在此一并表示衷心的感谢。

本书涵盖的专业范围较广，而国内页岩气勘探开发实践相对较少，因此编著难度较大，加之作者水平有限，编著时间紧迫，书中难免有不足之处，敬请读者提出宝贵意见和建议，以便修订时补充完善。

作 者

2016年2月

目录

序

前言

第 1 章	页岩储层甜点评价方法	1
1.1	页岩储层甜点试验分析评价方法	1
1.2	页岩储层甜点测井资料评价分析方法	27
1.3	页岩气地球物理甜点预测方法	66
第 2 章	页岩井壁围岩失稳机理与控制方法	95
2.1	页岩特性与分析方法	95
2.2	水化性页岩地层井壁围岩失稳机理及模型	117
2.3	硬脆性页岩地层井壁围岩失稳机理及模型	138
2.4	页岩气井井壁稳定技术	177
第 3 章	页岩裂缝起裂与延伸规律	182
3.1	不同弹塑性地层起裂与延伸规律	182
3.2	地应力对水力压裂破裂模式影响研究	185
3.3	不同页岩特征对页岩水力压裂破裂模式影响分析	188
3.4	页岩水力压裂大型物理模拟分析	200
3.5	页岩水平井水力压裂诱导应力场分析	214
第 4 章	压裂裂缝监测原理与方法	244
4.1	裂缝监测基本方法	244
4.2	测斜仪裂缝监测方法	245
4.3	微地震裂缝监测方法	284

第 5 章 页岩气井试井与产能评价方法	306
5.1 页岩气水平井流动模型	306
5.2 页岩气井试井分析方法	316
5.3 页岩气井产能评价	325
5.4 实例分析	354
第 6 章 地质工程一体化应用技术	363
6.1 一体化设计技术	363
6.2 在水平井钻井中的应用	366
6.3 在水平井分段压裂中的应用	406
参考文献	434

Contents

Chapter 1 Sweet spot evaluation method of shale	1
1.1 Experimental evaluation methods	1
1.2 Well logging evaluation methods	27
1.3 Sweet spots prediction methods from geophysics	66
Chapter 2 Borehole failure mechanism and control measures	95
2.1 Shale characteristics and analysis method	95
2.2 The mechanism and model of rock failure around borehole due to hydration	117
2.3 The mechanism and model of brittle shale failure around borehole	138
2.4 Wellbore strengthening techniques of shale	177
Chapter 3 The rules of fracture initiation and extension	182
3.1 The rule of fracture initiation and extension in different elastic and plastic formations	182
3.2 The effect of in-situ stresses on fracture initiation mode	185
3.3 The effect of shale properties on shale fracture mode	188
3.4 Physical simulation analysis method of shale fracturing	200
3.5 Induced stress analysis of horizontal fracturing of shale	214
Chapter 4 The mechanism and methods of hydraulic fracturing	244
4.1 Fracturing monitoring methods	244
4.2 Fracturing monitoring with tiltmeter	245
4.3 Microseismic fracture monitoring method	284

Chapter 5 Well testing interpretation and productivity evaluation of shale reservoir	306
5.1 Flow model of horizontal wells of shale gas	306
5.2 Well testing analysis of shale gas wells	316
5.3 Productivity evaluation of shale gas wells	325
5.4 Examples	354
Chapter 6 The application of combined geological and engineering techniques	363
6.1 Design techniques	363
6.2 The application in horizontal well drilling	366
6.3 The application in staged horizontal well fracturing	406
Reference	434

第 1 章 页岩储层甜点评价方法

页岩气储层甜点是指最佳的页岩气勘探与开发的区域或层位。周德华和焦方正(2012)指出,好的页岩气储层甜点的页岩厚度大(大于30m),其处于“生气窗”,有机含量高,岩石脆性好,地层压力高,是钻井和压裂等高效开发方案设计和实施的主要依据。页岩本身的复杂性与非均质性更强,一般从两个方面来评价页岩气储层,即地质甜点和工程甜点,其中,地质甜点的评价参数主要包括:总有机碳(TOC)含量、干酪根类型及成熟度、含气性等;工程甜点的评价参数主要包括:岩石力学参数、地应力、孔隙压力、天然裂缝系统特征、脆性指数、可压性指数等。必须从多种角度对储层进行综合评价分析,才能达到钻完井设计、储层改造设计与储层特性的最佳匹配,才能最大限度地发挥工程技术的作用,实现页岩气藏的成功开发。

当前,评价页岩气甜点因素的手段主要有试验分析、测井解释和地震预测。试验分析可以直接准确地测试得到页岩储层的地质力学参数、岩性及物性特征等,但试验分析的层段和样品数量一般较少。地震和测井资料反映了地层地质信息,且资料丰富,依据地震分析及测井解释理论方法,可以实现页岩储层甜点因素的预测、检测和区域性三维描述。为保证解释分析结果的准确性,地震分析和测井解释方法都需要对试验分析结果进行修正。因此,页岩储层甜点评价需要综合运用试验分析、测井解释和地震预测三种手段,从点、线、面立体描述区域页岩储层的甜点。

1.1 页岩储层甜点试验分析评价方法

页岩气地质力学分析包括岩石学分析(岩石结构、特征岩心描述等,重点观察分析黏土矿物的微孔隙和微裂缝)、地球化学分析[有机碳测定、岩石热解、有机成熟度(R_o)和干酪根显微组分等]、含气量分析(含气量由三部分组成,即含气量=实测气量(解吸气量)+残余气量+逸散气量,页岩含气量测定和等温吸附是重点)以及岩石力学分析。本节将重点介绍页岩岩石力学试验分析方法,包括岩石力学、地应力、脆性特征等测试分析方法,对岩石的岩性物性、TOC等地球化学特性、含气性等不进行分析。

1.1.1 岩石力学试验分析方法

通过开展压缩试验、抗拉试验、硬度试验、连续刻划试验等可以测试页岩的抗压强度、弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角、抗拉强度、硬度等参数,并且根据应力-应变-时间关系评价页岩的力学属性(弹性、塑性、黏性),结合页岩的变形与破坏关系,还可以评价页岩的力学特性是脆性力学特性,还是延性力学特性。

1. 岩石压缩试验分析方法

岩石压缩试验是通过压缩标准试验岩样的形式测试岩石力学基本特性，是最常见的室内测试方式。该类试验一般是在液压伺服控制下的试验机上进行的。试验过程中通过实时采集岩样的轴向与径向变形、承受载荷等信息，采用有关方法针对这些信息进行处理即可得到岩石力学参数。根据试验条件，岩石压缩试验又分为单轴压缩试验和常规三轴压缩试验，单轴压缩试验是在无围压和无孔隙压力条件下直接加轴向载荷测试，常规三轴压缩试验则是在施加围压或施加围压和孔隙压力条件下进行的岩石压缩试验。页岩力学参数对岩样发育的裂缝、非均匀性、取心或岩心处理过程中所产生的裂缝极为敏感，从而产生很大的随意性，可以在较小的围压下做常规三轴抗压试验，这样可以消除岩石中非固有裂隙的影响。

根据国际岩石力学试验建议方法，岩石压缩试验用标准试验岩样为圆柱体，为了减少端部效应的影响，其高与直径之比为 2.0~3.0，目前，国际上通用的岩样的高与直径之比为 2.0，采用 1in (1in=25.4mm)、1.5in、2in 等几种直径。另外，为了保证试验结果的精确度，要求岩样两端面平整误差要小于 0.02mm，岩样轴的垂直度不应超过 0.001rad。因此，岩石压缩试验对岩样要求高，而通常页岩本身的页理、微裂隙发育，给岩样制备带来很大困难，要求页岩样品钻取设备旋转稳定性好，循环冷却介质可采用液氮和清水（含有易水化矿物的不可采用），岩样端面处理通常采用切、磨的方式，但岩样固定夹持要求具有缓冲作用，防止夹持器与岩样硬接触而破坏岩样。

1) 岩石单轴压缩试验

通过开展单轴压缩试验可以获得应力 - 应变曲线，图 1-1 为岩石在正常加载速率单轴加压条件下的应力 - 应变全过程，大致可分为五个阶段：① $O-a$ 段体积随压力增加而压缩；② $a-b$ 段岩石的应力 - 轴向应变曲线近呈直线（线弹性变形阶段）；③ $b-c$ 段岩石的体积由压缩转为膨胀；④ $c-d$ 段岩石变形随应力迅速增长；⑤ d 点往后为残余应力阶段。以上五个阶段可对应四个特征应力值：弹性极限（ b 点）、屈服极限（ c 点）、峰值强度（或单轴抗压强度）（ d 点）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。页岩脆性特征显著，且岩石裂缝等发育，应力 - 应变曲线一般都难以划分出这五个变形阶段，通常

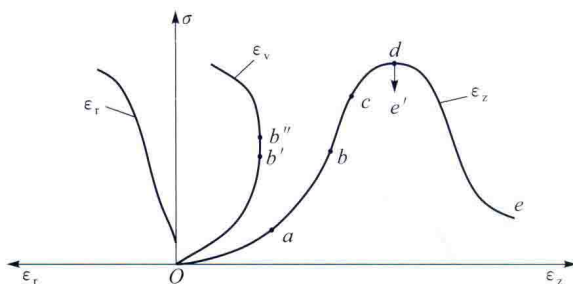


图 1-1 岩石单轴压缩应力 - 应变全过程曲线（陈勉等，2008）

具有明显线弹性变形阶段，可以分析得到页岩的弹性模量，结合变形量可以确定页岩的泊松比大小。

通过开展单轴压缩试验可以测定如下岩石力学参数。

(1) 页岩单轴抗压强度 σ_c 。单轴压缩试验时岩石破坏发生时所承受的最高应力，为最大轴向载荷与岩样横截面积之比。

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

式中， σ_c 为抗压强度，MPa； F 为轴向载荷，N； A 为岩样横向截面积， mm^2 。

(2) 弹性模量。岩石弹性模量 E （也称为杨氏模量）是应力-应变曲线的斜率，即单轴压缩试验时，应力相对应应变的变化率，即

$$E = \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z} \quad (1-2)$$

式中， $\Delta\sigma_z$ 为轴向应力增量，MPa； $\Delta\varepsilon_z$ 为岩样轴向应变增量， mm/mm 。

(3) 剪切模量与体积模量。对于各向同性线弹性岩石，只有两个独立弹性常数 E 和 ν ，利用 E 和 ν 还可以引申得到剪切模量 G 和体积模量 K 。

剪切模量 G ：

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1-3)$$

体积模量 K ：

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1-4)$$

(4) 泊松比。压缩试验中，岩样在径向和轴向方向都会发生变形，试验前后岩样直径的相对变化称为径向应变，岩样长度的相对变化则为轴向应变。泊松比 ν 为径向应变 ε_r 与相应载荷下轴向应变 ε_z 之比，即

$$\nu = -\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_z} \quad (1-5)$$

$$\varepsilon_r = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (1-6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (1-7)$$

式(1-6)和式(1-7)中， D_1 为岩样变形后直径， mm ； D_0 为岩样初始直径， mm ； l_1 为岩样变形后长度， mm ； l_0 为岩样初始长度， mm 。

泊松比是由弹性理论引入的，故只适用于岩石弹性变形阶段，也即只有在荷载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。式(1-5)中引入负号，是考虑到当岩石轴向缩短时，侧边是伸长的，这样可定义泊松比为一个正值。

在单轴压缩破坏试验中,大多数岩石表现为脆性破坏,因此可以直接测得 σ_c 。但是因为应力-应变曲线通常是非线性的,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50%的 σ_c 处取定 E 和 ν 值。从理论上讲,试件上的最大裂缝和裂纹决定了单轴抗压强度值。而且 σ_c 的试验结果值对试件的非均匀性、岩心加工处理过程中所产生的裂缝极为敏感,从而产生很大的随意性。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。

大多数岩石在单轴压缩破坏试验中通常为剪切破坏形式,外观观测为不规则的纵向裂缝(图1-2)。页岩通常发育有裂缝、层理等结构,这些结构的存在对页岩强度有很大影响。针对钻取得到的岩心轴线和层理面法线之间不同角度的样品开展单轴压缩试验,研究表明,页岩强度各向异性强,垂直于层理面的抗压强度最大,平行于层理面的抗压强度较小,与层理面法线夹角为 $45^\circ\sim 75^\circ$ 时,抗压强度最低,仅为最大抗压强度的 $1/6\sim 1/5$ 。可以利用垂直层理面抗压强度比上与层理面成不同角度方向抗压强度来评价页岩的强度各相异性, $R_c=\sigma_{ci}(90^\circ)/\sigma_{ci}(i^\circ)$ (i 为与层理面的不同夹角)(Saroglou and Tsiambaos, 2008)。

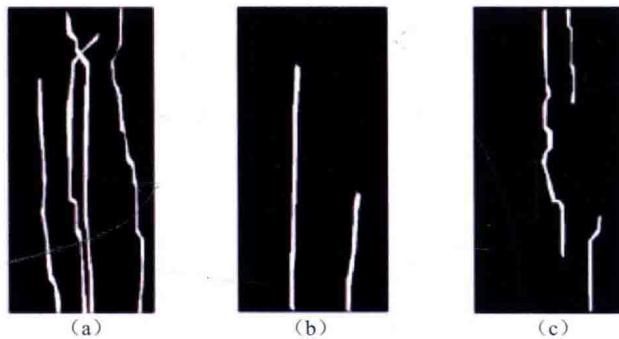


图 1-2 页岩单轴压缩时的破坏形式

2) 岩石常规三轴压缩试验

深层的页岩处于各向异性应力场中,即受到三轴应力作用。在石油钻井或开采过程中,井眼或生产射孔附近的剪切应力值增加。单轴抗压强度是描述井壁稳定的重要强度参数。为了更好地评估井眼或孔隙结构的稳定性,必须了解岩石的力学性能和强度特性是如何随着外荷载的变化而变化的,这种情况就需要开展围压条件下的压缩试验。

通常采用的是三轴压缩试验,其必须在一定的围压下(必要时还要考虑温度的作用)进行试验测定,三轴压缩试验又可以分为常规三轴压缩试验和真三轴压缩试验,真三轴压缩试验是指在岩样上三个彼此相正交方向上施加不同的力,即 $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$,而常规三轴压缩试验则是在水平方向两个正交的力相等(也即通常说的围压),即 $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$ 。由于真三轴压缩试验十分复杂,通常用来模拟压裂过程中岩石大变形。而常规三轴压缩试验中,保持围压为一恒定值,逐步增加轴向压力,直至岩样发生破坏,该试验同样可以得到岩样的抗压强度、弹性模量和泊松比,具体计算方法同单轴压缩试验。

针对取自同一块岩心的一组平行岩样，开展不同围压下的常规三轴压缩试验，可以得到一组岩石差应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 与应变的关系曲线，图 1-3 为泥页岩在不同围压下的差应力 - 应变曲线，由图可以看出随着围压的增大，岩石的抗压强度逐步增大，并且，随着围压的增大，泥页岩由脆性特征逐步呈现延展性，也说明泥页岩在破坏前的变形能力逐步增大。施加围压后，页岩剪切破坏形式也发生了改变，由图 1-4 可以看出，破裂缝产生了一定角度，而且破裂缝数量也有所减少，这是因为围压作用抑制了纵向破裂缝的产生和发展。通过做不同围压下的压缩试验，还可以绘制如图 1-5 所示的应力圆包络线，即强度曲线。强度曲线上的每一个点的坐标值表示某一面破坏时的正应力 σ 和剪应力 τ 。莫尔 - 库仑准则将图 1-5 所示的强度曲线简化为一条直线，其与纵轴的交点值称为岩石内聚力 C ，与水平轴的夹角 φ 为内摩擦角，如图 1-6 所示。

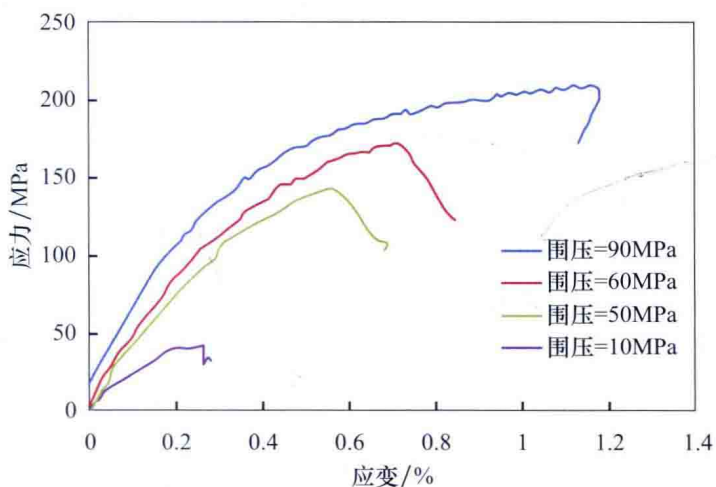


图 1-3 泥页岩在不同围压下的差应力 - 应变曲线 (李庆辉等, 2012)

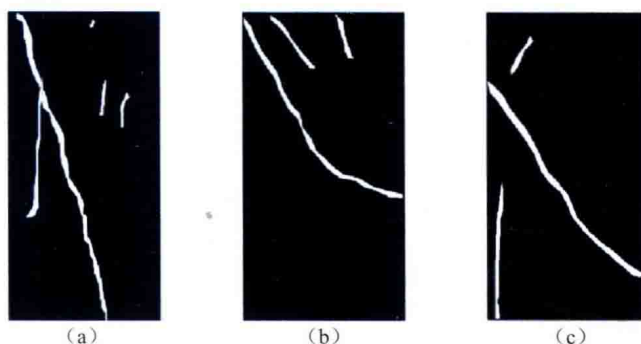


图 1-4 页岩常规三轴压缩试验的破坏形式

莫尔 - 库仑准则认为岩石发生破坏时剪切面上的剪应力 τ 必须克服岩石固有的黏聚力 C 和作用于剪切面上的摩擦力 $\sigma \tan \varphi$ ，用式 (1-8) 描述：

$$\tau = \sigma \tan \varphi + C \quad (1-8)$$