

泥页岩 多尺度力学

基础理论与应用技术

韩强◎著

SHALE MULTISCALE MECHANICS
BASIC THEORY
AND APPLIED TECHNOLOGY



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

泥页岩多尺度力学 基础理论与应用技术

韩 强◎著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书在系统分析泥页岩组成性质、微结构特征的基础上,进行了泥页岩多尺度组成分类评价,并进一步结合多尺度力学、微断裂力学,运用微/细观力学测试技术,核磁共振、三轴压缩等实验手段,重点分析泥页岩微/细观弹性特征与宏观属性的变化关系,采用多尺度均匀化理论构建泥页岩在微观和细观尺度下的强度均匀化模型,根据量纲分析和有限元仿真模拟进行求解,并对泥页岩细观初始裂纹萌生、传播、扩展的演化过程进行了实验分析,对泥页岩细观Ⅰ型断裂韧度参数进行了有效性评价。

本书为从事岩石力学、钻井、压裂等方面的研究人员和工程技术人员提供指导和参考,也可作为石油院校油气井工程和工程力学等专业师生的参考书籍使用。

图书在版编目(CIP)数据

泥页岩多尺度力学基础理论与应用技术 / 韩强著

—北京:中国石化出版社,2019.9

ISBN 978-7-5114-5506-2

I. ①泥… II. ①韩… III. ①板岩-岩石力学-研究
IV. ①TD31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 183194 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号

邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

850×1168 毫米 32 开本 6.5 印张 205 千字
2019 年 9 月第 1 版 2019 年 9 月第 1 次印刷

定价:42.00 元

前 言

泥页岩力学性质是页岩油气开发所必需的基础技术参数，通过对泥页岩储层力学性质的有效认知，可以较好地实现页岩油气的安全、高效开采。泥页岩是一种多孔复合介质材料，由黏土矿物、石英和硅酸盐等非黏土矿物组成，由于其组成和微结构上的各向异性，使得岩石在局部和全局上的力学属性不一致，极易造成钻井过程中的井壁失稳。常规泥页岩力学参数评价体系的形成基于经典连续介质力学理论，但存在实验耗时、测井仪器下入困难、地震解释精度不高等问题。如何在勘探开发早期及时获取泥页岩力学性质，确保安全、高效施工，是当前岩石力学研究面临的一大难题。因此，对泥页岩力学问题的深入研究，为有效解决施工问题提供可靠的力学基础和科学依据具有十分重要的理论与实际意义。

本书主要运用微/细观力学测试和多尺度力学分析相结合的方法，利用理论分析、力学实验、现代成像技术、量纲分析和数值模拟等研究手段，重点考察泥页岩组成和微结构特征，通过微/细观力学测试及其影响因素评价，明确测试对弹性模量和压入硬度的影响机制，基于耗散能原理建立由多尺度组成的均匀化模型，以及岩石微断裂响应分析，力图揭示泥页岩力学特性与组成和结构间的变化规律，揭示岩石微裂纹从产生、蔓延、扩展到宏观破坏的演化过程，形成泥页岩多尺度力学预测的基本方法。

本书获“西安石油大学优秀学术著作出版基金”“国家自然科学基金(51704233)”“陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JQ—466)”联合资助。感谢西安石油大学屈展教授、王萍副教授、崔莹副教授、李小和、赵晓皎、于洋和张坤等老师在本书编写过程中给予的悉心指导和无私帮助,感谢西南油气田、长庆油田的科技工作者在资料收集方面给予的支持,感谢赵凯博士、曲冠政博士、雷鑫博士在本书审阅过程中提出的宝贵意见和建议。

由于笔者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 研究背景与意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
第 2 章 泥页岩多尺度组成与结构特征	(17)
2.1 泥页岩储层地质特征	(17)
2.2 泥页岩矿物组成与孔隙分布特征	(21)
2.3 泥页岩多尺度组成分类	(34)
2.4 泥页岩黏土堆积密度	(36)
第 3 章 泥页岩多尺度力学测量原理与分析方法	(40)
3.1 基本原理	(40)
3.2 多尺度测试方法	(46)
3.3 力学分析方法	(57)
3.4 测试影响因素	(72)
3.5 泥页岩微/细观力学分析	(88)
3.6 宏观实验验证	(100)
第 4 章 均匀化理论基础	(107)
4.1 基本概念	(107)
4.2 微观均匀化模型	(113)

4.3	细观均匀化模型	(117)
4.4	等效弹性模量均匀化方法	(127)
第5章	泥页岩多尺度强度评价	(137)
5.1	基本原理	(137)
5.2	泥页岩微观强度均匀化模型	(146)
5.3	泥页岩细观强度均匀化模型	(152)
5.4	量纲分析与有限元模拟	(155)
5.5	宏观实验验证	(165)
第6章	泥页岩Ⅰ型断裂韧度评价	(167)
6.1	基本原理	(167)
6.2	断裂韧度的显微力学分析方法	(169)
6.3	泥页岩细观断裂力学测试及其影响因素分析	(181)
6.4	宏观巴西圆盘实验	(186)
6.5	泥页岩细观断裂韧度评价	(190)
参考文献		(193)

第1章 概 述

1.1 研究背景与意义

随着社会对清洁能源需求的不断增大,天然气价格不断上涨,人们对泥页岩勘探开发技术的认识也在不断加深。页岩气具有资源分布连片、技术集约程度高、生产周期常等开发特点,在全球有广泛的分布。全球页岩气储量约 $456.24 \times 10^{12} \text{m}^3$, 主要分布在北美、中亚和中国、中东北非、拉丁美洲等地。根据国际能源机构统计,2014 年加拿大实现产量 $59.35 \times 10^8 \text{m}^3$ 、中国 2014 年的产量为 $13.20 \times 10^8 \text{m}^3$ 。通过对页岩气井的建井工厂化、水平井段水力压裂工艺的提升,页岩气的生产效果较为显著。在我国的四川、云南、贵州、湖南等地,陆续开展了页岩气勘探评价和先导实验,获得了初步发现和突破。我国页岩气资源丰富、类型多样,但开发地质条件复杂,对泥页岩的力学机理研究、单井产量和有效开发等方面仍存在一些问题,制约了页岩气高效的开发。现有资料显示,四川盆地的页岩气水平井在钻井过程中井壁失稳现象较为常见,井壁失稳造成的卡钻、埋钻等井下事故,会严重延长钻井周期、损坏井下设备、增加钻井成本,并给后续工作带来不利影响,有时甚至还会导致井眼报废,造成巨大经济损失。每年因此造成的损失占到了钻井成本的 5% ~ 10%, 严重制

约了油气勘探开发工程的发展。

由于页岩气主要赋存于低孔隙度、低渗透率的泥岩层中，泥页岩储层的前期研究对后续的钻探开采就显得尤为关键。我国泥页岩在各地质时期都较为发育，四川盆地海相泥页岩的五峰—龙马溪组、鄂尔多斯盆地的上叠统延长组、准噶尔盆地和吐哈盆地等都有页岩气藏的发现。虽然我国页岩气藏的储量相当可观，并且开采初见成效，但是由于其特殊的地质构造和储层特征，与美国在经济开采程度上还有巨大的差异，遇到的问题已严重制约我国页岩气开发的规模。

对井壁泥页岩力学特性的有效认知，贯穿于建井的全生命周期。其力学参数可用于井壁稳定性分析、钻头选型与钻井参数优化等领域，为井下安全施工和节约钻井成本提供保障，通过泥页岩断裂韧度、脆性指数等参数的分析，可以为泥页岩储层水力压裂设计及支撑剂选型提供科学依据。作为准脆性材料，泥页岩由于存在天然的内在微缺陷，其破坏表现出突然的断裂，在裂缝扩展前不存在明显的裂尖塑性区。泥页岩由黏土矿物、非黏土矿物和孔隙裂缝等组成，其组分和分布的非均质性使得泥页岩在平行和垂直层理方向上的力学属性存在差异。如何在钻井、开采发生早期，超前或及时获取泥页岩损伤断裂行为并准确作出异常情况预警，确保工程施工的安全和高效，是当前岩石力学面临的一大难题。因此，深化泥页岩破损机理研究具有重要的科学意义和实用价值。

目前，国内外对泥页岩破损起裂的室内研究，主要参照岩石物理与力学特性关系，通过宏观实验获取力学属性并选择适当的破坏准则进行分析与工程应用。该方法虽然可以得到页岩的基本力学特性，但存在制样体积相对较大、实验耗时长、解释精度较低、个体差异性较大的问题。受泥页岩性质和现有技术制约，测

井仪器测量范围有限或有时无法下入目的层段,常会导致测井资料品质不高、测量与真实值误差较大。在基础理论方面,通过开展断裂的裂纹尖端应力和裂纹扩展规律分析,描述裂纹扩展的有效判据和裂纹对自身结构的影响因素,分析裂缝的形成、发育、扩展等特征,建立了宏观损伤演化本构关系。但是,传统的宏观唯象模型没有考虑泥页岩内部的非均质性对宏观破坏的响应特征,无法从根源上揭示泥页岩力学的形成机理。

针对上述问题,本书主要运用多尺度力学分析方法和微/细观力学测试手段,利用理论分析、力学实验和数值模拟等研究手段,重点分析泥页岩组成、微结构与其力学属性间的关系,建立泥页岩多尺度均匀化模型并开展尺度耦合分析,形成多尺度弹性和强度预测方法,通过细观微断裂理论与实验研究,揭示页岩细观断裂、损伤失稳的演化规律。本研究有助于进一步认知泥页岩组成与力学形成的深层机理,通过对泥页岩钻屑的多尺度力学测试与模型预测,可以及时认知井下泥页岩储层的力学状态,对页岩油气精细勘探、高效开发具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 岩石力学测试现状

对岩石的力学分析较早见于岩石静水压力理论,此后经过经验理论和弹塑性力学的研究,逐渐发展为基于连续介质力学的系统化评价方法,主要分类如下:

1. 室内实验方法

目前,常用实验方法有单轴压缩、三轴压缩、剪切、巴西圆

盘等，应力测量经历了从机械到电法的测量过程，可以在一定范围内获取力学属性参数，但由于测试仪器等原因会存在解释精度和环境干扰等问题。宏观实验仪器对试样尺寸大小有严格的标准，存在实验耗时较长，目的层精细描述不佳（参数剖面不连续）等问题，同时泥页岩的硬脆性使其制备样品失败率较高，这些给工程应用带来了一定的困难。采用岩屑实验获得的方法可分为两类：一类是岩屑声波法，利用岩石的声学特性获得岩石的力学性质，需要通过岩石力学与声学特性的标定关系来实现；另一类是岩屑压入法，通过在岩屑上的压入实验获取岩石力学性质，该方法对于非均质较强的页岩材料，力学表征误差较大、形成机理不明确。目前，对于岩石弹性模量的动静态转换问题，通过声波测井动态参数与室内静态力学实验结果进行比对和拟合，给出经验公式，没有考虑参数的微观差异。葛洪魁等在不考虑温度因素条件下，开展了动、静态弹性力学参数的微观机理研究。席道瑛等在不考虑压力因素条件下，进行了温度对弹性模量和波速的影响因素分析。

一些学者针对高地应力条件下的岩石进行了常规的三轴实验及复杂应力路径下的多轴力学实验研究。徐松林等在对大理岩常规三轴压缩全过程和峰前、峰后卸载全过程进行的系统研究，模拟开挖引起的应力路径演化，得到了大理岩的强度特征和变形特征。陈景涛等通过三轴实验模拟了高地应力条件下引起的复杂应力路径的演化。

岩石损伤与断裂的相关研究较早见于 1963 年的脆性岩石压缩实验，此后经过经验理论和断裂模式的研究，逐步形成了非线性断裂力学、裂纹扩展分析和损伤力学理论。岩石断裂力学是固体力学、断裂力学、岩石力学和统计力学等的交叉学科，其基本的理论是在均匀介质结构基础上来研究岩石的破损规律，较少涉

及岩石组成非均匀性引起的应力分布差异和局部集中现象。岩石的不连续性在任何尺度上都是存在的,当这种不连续性结构对所研究的目标尺度来说很小时,就可以将其看成大致连续、均匀的,通过对断层或裂纹等不连续结构的周围介质做均匀化处理进行分析。从20世纪60年代起,断裂力学的发展是迅速的:通过不断地研究提出了考虑裂纹尖端塑性区的带状模型,开展了裂纹顶端张开位移准则的研究,提出了J积分作为断裂扩展的判据等。但是,对于泥页岩多相非均匀介质损伤与断裂过程中的微裂纹扩展、损伤与微断裂机理、微观断裂与宏观断裂的内在关系等问题少见报道,还需要进一步的深入研究。

国内外已有的研究资料表明,泥页岩是典型的非均匀材料,由纳米级的多孔黏土、微米级非黏土夹杂和裂纹、孔洞、位错等组成复杂的微结构,泥页岩的弹性、硬度、强度和变形破坏等属性都与组成有关。唐春安等根据Weibull分布假设,提出了岩石微观非均匀性分析,认为细观非均匀性是造成材料宏观非线性的内在原因。王士民等通过非均匀性对宏观破坏形式的研究,指出材料坡度参数越小,其破坏形式越具有随机性。由于原位微裂纹的存在,不仅可以影响宏观裂纹的萌生,而且会对主裂纹产生屏蔽与劣化的双重作用。由此可以看出,泥页岩的破损实际上就是微裂纹的产生、发育、扩展、直到贯通为宏观裂纹,使其失稳破坏的过程,可以将泥页岩破损过程分为三个阶段:某些孤立点产生应力集中,开裂后可以达到平衡态的起裂过程;随着载荷的增加,介质沿开裂面产生相对滑移,裂纹扩展稳定阶段;当微裂纹相互贯通形成控制强度的宏观裂纹时,进入不稳定扩展阶段,逐渐失去承载能力。

2. 地球物理方法

地球物理勘探方法能够有效预测页岩气甜点的分布范围,为

页岩气井位、井轨迹及压裂方法设计及优化提供了基础性的重要地质成果，其技术主要包括以下三个方面：

(1) 岩石物理分析。

泥页岩储层岩石物理分析涉及岩石储层电学、声学特征实验技术、岩石力学性质室内测试技术和储层地震各向异性岩石物理建模技术，为岩石储层地球物理响应特征评价建立基础。随着页岩气勘探开发的进步，国外逐渐形成了以室内实验为基础，综合测井、地震和地质等数据，基于统计学原理的岩石物性综合分析技术。国内现阶段主要集中于泥页岩物理参数测试方法研究和机理分析。

(2) 页岩气测井评价技术。

页岩气测井评价除了关于地层的岩性、孔隙度、含水饱和度和渗透率等常规测试外，还包含了多组分矿物、有机碳含量、吸附气和游离气含量等的评价。目前，我国在页岩气定量评价方面形成了一套识别和判定页岩气测井的技术方法，主要包含对泥页岩的岩性、物性、电性、烃源岩特性、岩石脆性、含有骑行、地应力各向异性的评价。

(3) 页岩地震资料采集与处理技术。

获得高质量页岩气地震资料是有效预测页岩气甜点的基础。与北美页岩气地震地质条件相比，中国南方海相页岩气处于典型南方山地复杂区，地表起伏大、沟壑纵横、交通不便，地下存在复杂强烈多起构造运动。对地震资料的处理，应加强静校正方法、多域去噪、精细速度建场、叠前及叠后偏移技术的研究和应用，提高成像效果和解释精度。

地球物理测井方法是通过岩石力学实验测量及测井响应数据，构建测试参数与力学属性的拟合图版，获取连续的岩石力学参数。虽然该方法可获取连续参数剖面，但由于页岩储层水平井

段井下工况复杂,测井仪器受测量范围的制约,导致测井资料品质不高,力学参数测量容易失真;对于部分复杂工艺井,会存在井下设备的卡、埋等问题,致使测井仪器无法下入目的层段,增大了工程施工风险。地球物理勘探技术是通过地震波源的三维或二维解释,提取或反演解释获取地层属性的方法。具体来说,可通过共振、脉冲和干涉等方法测量岩石中的弹性波速度,标定岩石中的有效衰减量,获取页岩弹性、孔隙压力、岩性等参数。由于受物理勘探方法的尺度与精度制约,解释效果往往不佳,现多用于地质构造描述和开发地质的初期研究。

由此可以看出,目前的宏观力学测试手段由于受其成本、技术等条件的制约,并不能很好地解释地下泥页岩储层的力学属性与分布,急需一种能够较为准确且便捷获取泥页岩力学性质的方法。

1.2.2 多尺度力学分析现状

多尺度理论作为求解复杂材料和工程问题的重要手段之一,是研究不同长度域或时间域以及相互耦合的跨学科科学,涵盖微观、细观和宏观的多个物理、力学领域。目前,针对高聚物、金属、纳米薄膜和涂层等较均匀材料,已开展了纳/微米压入和划入的参数测试,在非晶合金、生物材料和微机电系统等领域,正在进行微尺度力学行为研究。多尺度理论方法的引入,对工程材料和结构分析具有重要的意义:对于复合材料而言,宏观测试无法给出材料的组成和微结构对力学属性的响应。通过将研究目标划分到多个研究尺度(微观-细观-宏观),分析材料显微属性与多尺度间的力学性能、组分及结构间的内在关系,根据均匀化理论研究微尺度组成的等效均匀化特性进行宏观属性预测,或基于微结构设计新型材料。采用多尺度力学分析的目的,就是基于

材料微、细观结构的信息,寻找宏观材料的有效性,其基本思想是均匀化。对于材料在微、细观尺度的属性参数,从应力和应变场出发,通过应力和应变体积平均的关系确定材料的有效属性参数,将具有空间分布的结构抽象为具有一定属性的均匀质点。

多尺度方法对材料的力学评价可分为两类:一类是材料刚度张量,通过特征体积单元等问题的研究,描述材料的弹性变形和塑性变形;另一类是材料损伤失效直至产生破坏形变分析,通过对材料微缺陷受力演化研究,评价材料的受力破坏阈值和程度。宋仲康等通过纳米压入实验的模拟分析了金属材料的弹性模量,明确了其微观力学分析的可行性。Gianpetro 等通过对非连续分子介质和连续介质的研究,揭示了从微观到宏观尺度的时空变化效应;随后, Kogan 通过对脆性材料断裂破坏尺度效应等机理的研究,揭示了材料从微观到宏观的组成结构与力学性质耦合作用机理。冯义辉等从能量的角度分析材料的断裂特征,给出韦氏压头产生的 I 型断裂韧度测试方法。近年来,通过对材料复杂缺陷(孔洞、裂缝、夹杂等)构型(尺寸、形状与位置)改变引起自由能变化的研究发现,基于材料空间发展起来的构型力学为解决复杂缺陷问题提供了新的思路。李群等通过对纳米多孔介质材料的 L 积分、M 积分和 J 积分研究,分析了基于守恒积分与构型力的材料微观尺度损伤演化规律。

基于尺度的可分性条件,对连续微观力学的研究涉及两个方面:微观尺度下,复合材料是非均质的;宏观尺度下复合材料表现出均匀的特性,定义宏观量是微观量的局部平均。通过线性均匀化理论,可从局部微观刚度张量的分布,研究局部的应力-应变关系。假定夹杂和基体均嵌于一参考均匀材料中,并且该材料远处所受应变为材料的平均应变,取参考材料的弹性刚度为非均匀材料的有效弹性刚度时,得到非均匀材料均匀化特征的自治

法。对于基体和纤维构成的复合材料分析中,广义自洽是通过将夹杂和其周围基体的复合求解,将多夹杂问题分解为单夹杂来考虑。上述概念适用于任何形状的夹杂,由于广义自洽对于复合材料的微结构分布具有较好的描述性,能够充分反映基体和夹杂的属性特征,可以得到精确的解析解。但对于材料局部化力学属性的分析,由于求解的复杂性,目前只对球型模型和长纤维夹杂模型存在解析解。颗粒的随机堆积是球形颗粒试验和模拟的研究重点,通过自洽理论能够较好地进行预测。作为一种多相复合材料介质,多孔材料模型被应用于多个尺度的材料分析中,通常孔隙中会含有饱和或非饱和的流体和气体。目前,较为常用的多孔金属材料,由于其轻便、高强度等特点,被广泛应用于交通运输、航空航天和建筑等行业。对于多孔材料的研究不论在宏观、细观还是微观领域都有非常重要的意义,通过微观多孔结构和力学因素的考量,不仅可以构建出满足要求的新型材料,还可以有效预测现有材料的力学属性。

近年来,随着细观力学方法和相关实验技术的进步,采用细观手段研究岩石力学属性逐渐受到关注。茅献彪等采用细观力学实验方法,根据光学显微镜和扫描电镜对膨胀岩进行分析,研究了膨胀岩在间接拉伸、单轴压缩和三轴压缩过程中的损伤规律,通过观测岩石在受压状态和在水、化学溶剂中的细观破损过程,分析了岩石的动态损伤和破裂机理。随着CT扫描技术的兴起,一些学者开展了基于CT扫描的岩石三轴破坏动态观测分析,初步得到了岩石损伤演化的基本规律。杨更社等基于细观损伤力学分析和CT扫描实验建立了综合损伤变量函数,为识别岩石损伤演化提供了新的分析方法。随着计算机和图形分析的研究发展,数字图像处理技术为岩石定量分析与表征提供了新的研究手段。一些学者通过数字图像处理方法提取砂岩微结构,计算岩石的孔

隙率和渗透率,通过扫描砂岩中的微裂纹,计算应变和裂纹密度的关系。

在多尺度计算求解方面,按照分析层次的不同,可以将其划分为三类:

(1) 多尺度层级非耦合计算方法。

多尺度层级非耦合计算是指在多尺度分析中采用自底向上的模式,首先分析最小尺度上的基本参量信息,然后将数据单向传递到更大尺度,经过不同尺度间的信息传递,最终获得结构宏观尺度载荷工况下的物理量信息,包括位移、应力、应变等,为结构性能的评估提供了便利,而且降低了计算量。

(2) 多尺度层级耦合计算方法。

在多尺度层级耦合计算的过程中,多尺度模型间的数据是双向顺序传递的,通过对小尺度分析获取材料的基础参数后,将数据顺序传递至结构更大的尺度,进而得到宏观材料属性。也可以通过对宏观属性的求解,逆向分析得到小尺度材料物性。该计算方法是基于渐进展开均匀化理论,通过摄动方法建立控制方法来完成相关计算,由于其数学理论推导严格,已在许多方面得到了应用。

(3) 多尺度层级嵌入计算方法。

多尺度层级嵌入计算是指在一次计算中,通过对结构的若干划分,并且在各自划分域内分别计算,然后将各个划分域在公共边界上相互连接,在整体结构计算过程中无须考虑内部细观结构,从而在保证精度的情况下达到大幅降低计算量。

由于泥页岩的非均质、多相复合夹杂等属性,将多尺度方法用于泥页岩的力学分析起步较晚。对于泥页岩等复合材料,Castaneda开展了非线性复合材料波动场研究,Sanahuja等通过有限元模拟,分析了水泥浆的微观弹性特性。在此基础上,Ortega等