

屈王 展萍 著

泥页岩井壁 蠕变损伤失稳研究



科学出版社

泥页岩井壁蠕变损伤失稳研究

屈 展 王 萍 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在系统分析泥页岩组成性质、分类、水化作用机理以及泥页岩井壁岩石弹塑性性能的基础上,进一步结合损伤力学、流变力学,运用核磁共振、三轴蠕变等实验手段,重点考察泥页岩井壁岩石内部存在的微缺陷损伤、钻井液及地下流体物化作用造成的流变效应影响,构建并引入由核磁共振 T_2 谱表征的水化损伤变量,建立泥页岩井壁蠕变损伤模型、多场耦合流变模型以及蠕变损伤屈服破坏强度准则,并对泥页岩井壁围岩初始微缺陷萌生、传播、扩展到破坏失稳的演化过程进行了数值分析。

本书可供高等院校、相关企事业单位油气井工程、油气田开发工程以及工程力学等专业师生、工程科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

泥页岩井壁蠕变损伤失稳研究 / 屈展, 王萍著. —北京: 科学出版社, 2016.9
ISBN 978-7-03-050035-9

I. ①泥… II. ①屈… ②王… III. ①油气钻井—板岩—井壁稳定性—研究 IV. ①TE21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 231868 号

责任编辑: 杨向萍 宋无汗 王 苏 / 责任校对: 张怡君

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 红叶图文

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 10 月第一次印刷 印张: 12 3/4 插页: 3

字数: 257 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

井壁失稳问题在世界各大油气田的勘探开发过程中普遍存在，是困扰钻井工程界的重大复杂问题之一，严重制约了油气资源勘探开发的进程。井壁失稳造成的如缩径、卡钻、坍塌、漏失等井下复杂事故，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，有时甚至会导致井眼报废，造成巨大的经济损失。因此，对井壁失稳问题开展系统深入的研究，为有效解决钻井过程中的井壁失稳问题提供可靠的科学依据，对实现优质、安全、高效和低成本钻井有着十分重要的理论与实际意义。

本书主要运用损伤力学与流变力学相结合的方法，利用理论分析、力学实验、现代影像技术和数值模拟等研究手段，重点考察泥页岩井壁岩石内部存在的微缺陷损伤，以及钻井液、地下流体物化作用造成的流变效应等的影响，通过建立力学化学耦合下泥页岩井壁蠕变损伤失稳相关模型，以及蠕变损伤屈服破坏强度准则等，力图揭示泥页岩井壁水化后初始微缺陷萌生、蔓延、传播、归并、扩展、贯通到坍塌破坏的蠕变损伤失稳演化过程，形成泥页岩井壁蠕变损伤失稳研究的基本方法。

20 世纪 90 年代以来，西安石油大学的研究团队在多个科研项目，特别是国家自然科学基金的连续资助下，结合工程应用，对井壁失稳机理的理论与实验评价问题开展了深入研究。本书主要是基于上述科研成果撰写而成的。

本书由屈展、王萍等撰写，屈展统稿。崔莹、毕刚、李小和、林红先、肖江和刘海峰等也参与了本书部分内容的编写。本书的出版得到了西安石油大学学术著作出版基金的资助。

近年来，尽管有关井壁稳定性理论和实验的研究有了很大发展，但仍然存在大量复杂艰巨的问题，亟待解决。期待通过石油与天然气工程界同行的共同努力，在井壁稳定性研究以及相关领域不断取得更多、更新的成果。

由于时间仓促和作者水平所限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 4 月于西安

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 井壁失稳的基本问题	2
1.2.1 井壁失稳的因素	2
1.2.2 井壁失稳的形式	2
1.3 井壁失稳研究进展	3
1.4 岩石蠕变损伤研究进展	4
1.4.1 流变理论在岩石力学中的应用	4
1.4.2 损伤理论在岩石力学中的应用	7
1.4.3 岩石细观力学实验研究	9
1.5 本书的主要内容	11
参考文献	11
第 2 章 泥页岩组成性质及分类	16
2.1 泥页岩的成岩	16
2.2 泥页岩的矿物组成	16
2.2.1 黏土矿物	17
2.2.2 非黏土矿物	19
2.2.3 孔隙介质	19
2.3 泥页岩的物理特征	19
2.4 泥页岩的细观结构特征	22
2.4.1 内部细观结构	22
2.4.2 裂缝的成因	24
2.4.3 裂缝的分类	26
2.5 泥页岩分类	26
参考文献	27

第3章 泥页岩水化作用分析	29
3.1 泥页岩水化的主要因素	29
3.1.1 内在因素	29
3.1.2 外在因素	30
3.2 泥页岩水化的主要机理	31
3.2.1 水力压差和化学势差引起泥页岩水化	32
3.2.2 电势差引起泥页岩水化	33
3.2.3 毛管力引起泥页岩水化	34
3.3 泥页岩水化应力	35
3.4 泥页岩水化对岩石力学特性的影响	38
3.4.1 单轴抗压强度测试	38
3.4.2 三轴抗压强度测试	40
3.4.3 蠕变特性的实验分析	47
3.5 泥页岩储层钻井液优化方法研究	59
3.5.1 钻井液的技术对策	59
3.5.2 钻井液体系配方	59
3.5.3 钻井液堵漏技术	61
3.5.4 液体聚合物微球堵漏剂	61
参考文献	62
第4章 泥页岩井壁稳定的弹塑性分析	64
4.1 井壁围岩的应力分布	64
4.1.1 垂直井壁围岩的应力分布	64
4.1.2 斜井壁围岩的应力分布	66
4.2 水化后井壁围岩应力分布	69
4.2.1 水化后井壁围岩应力计算	69
4.2.2 泥页岩的水化膨胀应变	72
4.2.3 井壁围岩吸水规律	72
4.3 岩石破坏的强度准则	74
4.3.1 剪切破坏强度判断准则	74
4.3.2 拉伸破坏强度判断准则	75
4.4 坍塌压力和破裂压力	75
4.4.1 井壁坍塌处的应力	75
4.4.2 井壁坍塌压力的数值计算	76
4.4.3 破裂压力	77

4.5 井壁稳定的弹塑性分析	78
4.5.1 井周应力的理想弹塑性解	79
4.5.2 塑性增量方程	83
4.5.3 泥页岩膨胀变形的本构方程	84
参考文献	85
第5章 泥页岩水化损伤的核磁共振分析	87
5.1 损伤力学的基本原理	87
5.2 岩石类材料的损伤现象和损伤机制	88
5.3 损伤的观察和测量	89
5.4 基于核磁共振的泥页岩水化损伤细观实验	91
5.4.1 核磁共振测试方法	91
5.4.2 水化损伤核磁共振测试方案	96
5.4.3 泥页岩水化损伤核磁共振分析	96
5.5 损伤变量的建立	104
5.5.1 损伤变量	104
5.5.2 基于核磁共振的损伤变量	105
参考文献	107
第6章 泥页岩蠕变损伤失稳分析	108
6.1 岩石流变的力学性质	108
6.1.1 岩石流变的概念	108
6.1.2 岩石蠕变与损伤	109
6.2 岩石蠕变模型	110
6.2.1 经验蠕变模型	110
6.2.2 内时模型	111
6.2.3 屈服面流变模型	111
6.2.4 元件组合模型	112
6.3 泥页岩弹性-黏弹性-黏塑性损伤模型	118
6.3.1 泥页岩弹性-黏弹性-黏塑性模型	118
6.3.2 初始水化损伤	121
6.3.3 蠕变损伤	122
6.3.4 模型参数的确定方法与验证分析	124
6.4 工程应用	131
参考文献	135

第 7 章 泥页岩多场耦合流变模型	137
7.1 泥页岩力学与化学耦合分析	137
7.1.1 总吸附水量相关法	137
7.1.2 等效孔隙压力法	138
7.1.3 总水势增量弹性理论	139
7.2 泥页岩多场耦合模型	140
7.2.1 耦合模型基本假设	140
7.2.2 岩石有效应力原理	140
7.2.3 平衡方程	142
7.2.4 连续性方程	142
7.3 多场耦合流变模型	150
参考文献	152
第 8 章 泥页岩流变与裂纹扩展数值模拟	154
8.1 泥页岩多场耦合流变数值模拟	154
8.1.1 平衡方程的离散	155
8.1.2 连续性方程的离散	157
8.1.3 总体控制方程	159
8.1.4 模拟验证及结果分析	159
8.2 泥页岩井壁围岩裂纹扩展数值模拟	165
8.2.1 井壁围岩裂纹扩展几何模型	165
8.2.2 数值模拟结果分析	166
参考文献	170
第 9 章 泥页岩井壁蠕变损伤强度分析	172
9.1 岩石力学中常用的强度准则	172
9.1.1 Mohr-Coulomb 强度准则	172
9.1.2 Drucker-Prager 强度准则	175
9.1.3 Griffith 强度准则	177
9.2 双剪统一强度理论	177
9.2.1 双剪应力单元体	178
9.2.2 双剪统一强度理论表达式	179
9.3 双剪统一强度理论在井壁稳定性分析中的应用	182
9.3.1 井壁坍塌压力统一解表达式	182
9.3.2 井壁坍塌压力计算实例	184

9.3.3 井壁坍塌压力统一解的特点及意义	185
9.4 泥页岩蠕变损伤强度准则	186
9.4.1 基于双剪统一强度理论的岩石蠕变损伤变量	186
9.4.2 蠕变损伤强度准则	187
9.4.3 泥页岩蠕变损伤强度准则的适用性	188
9.4.4 泥页岩蠕变损伤强度准则的特点及意义	190
参考文献	190

彩图

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

油气钻井工程是打开地下油气藏的通道,将蕴藏在油气藏中的石油与天然气开采到地面的根本途径。钻井过程中,钻开地层岩石打破了井眼周围原先的地应力平衡状态,使井壁岩石失去原有支撑,钻井液取而代之,其应力场发生重新分布,井壁附近产生了复杂高发的应力集中,从而导致井壁不稳定现象极易出现。井壁失稳的基本原因是井壁岩石的力学失效,多发生在泥岩和页岩地层中。每年因此造成的损失达数亿美元,占到了钻井成本的5%~10%。井壁失稳问题在世界各大油气田的勘探开发过程中普遍存在,是困扰钻井工程界的重大复杂问题之一,严重制约了油气资源勘探开发的进程。因此,认真分析、正确认识和有效评价井下复杂的围岩环境,系统深入地研究井壁失稳机理,科学有效地解决井壁失稳问题,是实现优质、安全、高效和低成本钻井的关键问题之一,具有十分重要的理论与实际意义。

多年来,国内外研究者对井壁失稳这一难以掌控但又亟待解决的问题非常重视,一直致力于该问题的研究。然而,随着对井壁失稳问题的深入研究,发现按照以往的理论来描述井壁岩石内部存在的天然微缺陷损伤、钻井液及地下流体渗流中物化作用造成的流变效应,都存在着很大的不足。由于岩石类材料存在初始微缺陷,从开始变形直至屈服破坏是一个损伤累积和逐渐劣化的过程,也是一个损伤随时间由小到大直至破坏的量变到质变的过程。在各种因素的影响下,井壁岩石的初始微缺陷会萌生、蔓延出微裂纹,随着其不断地传播、归并,继而出现显而易见的裂纹,再进一步地扩展、贯通形成裂缝,直至破坏失稳。岩石的最终宏观断裂与其内部微结构和微缺陷紧密相关。在外载、环境的作用下,由内部包含的微结构缺陷引起材料或结构的劣化过程,称为损伤。损伤力学是研究含损伤介质的材料性质,以及在变形过程中损伤演化发展直至破坏的力学学科。损伤力学的基本特点在于研究演化的过程,用于研究具有初始微缺陷岩石类材料的力学特征将更为恰当。此外,对于井壁岩石来说,不仅受到地下流体环境的影响,同时受到入井钻井液侵蚀的强化学作用,产生明显的流变效应。岩石与钻井液、地下流体之间的力学与化学耦合、流体与固体耦合作用,使得井壁岩石软化临界荷载或长期强度降低,力学参数和结构进一步恶化,大大降低了井壁围岩的力学强度,减弱了井壁围岩的支撑能力。流变是指材料的应力-应变关系与时间因素有关

的性质,包括诸如蠕变、应力松弛和弹性后效等现象。流变力学主要研究材料在应力、应变、温度、湿度、辐射等条件下与时间因素有关的变形和流动的规律。对于井壁岩石,尤其是对于遇水敏感的泥页岩井壁失稳问题,利用流变力学的方法来进行描述才会更为确切。泥页岩井壁岩石遭遇钻井液及地下流体后,发生水化反应,改变了岩石孔隙、颗粒等细观结构,进一步加剧了初始微缺陷的萌生、蔓延。初始损伤在宏观裂纹出现之前已经影响了岩石材料与结构的强度及寿命,水化更是加剧了这种作用。遇水后细观缺陷的这一改变和扩展被称为水化损伤。通过损伤力学与流变力学的方法来分析泥页岩井壁岩石这种具有流变特性和行为的含损伤介质材料以及损伤的演化与破坏是科学有效的。

针对上述问题,本书主要运用损伤力学与流变力学相结合的方法,利用理论分析、力学实验、现代影像技术和数值模拟等研究手段,重点考察泥页岩井壁岩石内部存在的微缺陷损伤,以及钻井液、地下流体物化作用造成的流变效应等的影响,分析岩石水化损伤劣化扩展特性、不同含水状态下泥页岩蠕变特性、多场耦合流变特性,并对井壁失稳的演化过程进行模拟,力图揭示泥页岩井壁水化后初始缺陷蔓延、归并、贯通到坍塌破坏的蠕变损伤失稳演化过程。

1.2 井壁失稳的基本问题

井壁稳定是指油气钻井形成的井眼在钻井作业过程中保持规则的尺寸和形状。而井壁失稳则是指钻井过程中由于各种复杂的原因,这种规则的尺寸和形状被破坏,发生井眼缩径、井壁坍塌或地层破裂等现象。

1.2.1 井壁失稳的因素

井壁失稳与地层的物理特性、受力情况、胶结程度、钻井液的侵入作用和钻开地层后应力的释放等有关。井壁失稳的原因主要归结为力学、化学、钻井工艺等方面的因素。大致可以分为天然因素和人为因素两个方面。天然因素主要包括:地质的构造类型及原地应力、地层所含黏土矿物类型、岩性产状、弱面的存在及其倾角、层面胶结情况、地层的强度、裂纹的发育、孔隙度、渗透率以及孔隙压力等。人为因素主要包括:钻井液性能(失水、黏度、密度)、泥页岩和钻井液之间的化学作用强弱(水化膨胀)、井壁围岩附近的钻井液侵入带的范围与深度、井眼裸露时间、钻井液循环速度对井壁的冲刷作用、起下钻引起的抽吸压力和循环液引起的波动压力、井眼的轨迹形状以及钻柱和井壁之间的摩擦与碰撞等。

1.2.2 井壁失稳的形式

从力学的角度上分析井壁失稳的机理,井壁失稳存在两种基本形式:压缩剪

切破坏和拉伸破坏。压缩剪切破坏是钻井液密度过低, 不足以满足地层岩石强度和应力集中的要求所造成的。根据井壁失稳后的井眼形态, 破坏形式可分为两种形式: 井眼扩大和缩径。井眼扩大通常发生在低强度的脆性地层, 井壁破坏后, 在环空钻井液流体的冲刷作用下, 井壁岩石坍塌、崩落掉块。井眼扩大对测井和固井极为不利, 坍塌是钻头或钻具卡钻的原因之一。缩径通常发生在泥页岩、砂岩和盐膏岩等延性软岩地层, 地层在高应力差的作用下产生不同程度的塑性变形, 引起井眼直径减小。当钻井液液柱压力增大到一定程度后, 有效切向应力超过岩石的抗拉强度会产生拉伸破坏, 使原有微裂纹张开延伸并形成新的裂纹或裂缝, 使地层破裂。拉伸破坏是造成钻井液漏失的主要原因, 严重的井漏可使钻井液液柱压力大幅度降低, 埋下井喷隐患。

1.3 井壁失稳研究进展

井壁失稳问题研究经历了从力学研究、化学研究, 到力学与化学耦合研究, 再到力学、化学、热力学、电学耦合研究。其中纯力学研究又经过了弹性、多孔介质弹性到弹塑性力学阶段。20 世纪 90 年代之前, 通过力学和化学角度来研究井壁失稳机理及对策的过程是彼此独立进行的。力学研究侧重于从岩石力学和流固耦合的角度去分析, 而化学研究则侧重于从水化应力的角度去分析。90 年代之后, 井壁稳定性的力学与化学耦合研究才开始逐步进入定量化的数学描述阶段。

从力学角度来说, 井壁岩石所受到的破坏应力大于原始强度是井壁失稳的主要原因。基于此, 研究人员展开了广泛深入的研究。早期的研究可以追溯到 1940 年 Westergard^[1]对直井周围弹-塑性井眼的应力分布情况进行了描述。在 1957 年, Hubbert 和 Willis^[2]引入液柱压力和垂直应力与两个大小不同的水平应力的作用; Faithurst^[3]给出了考虑倾斜地层、倾斜井眼、三向不均匀应力场下线弹性的应力状态解。Terzaghi^[4]提出了有效应力原理, 随后研究人员将其运用到井壁稳定性分析中, 对孔隙压力的影响进行了修正。Biot^[5]在 1955 年提出了多孔弹性介质理论, 并应用到井壁稳定性的研究当中。Bowen^[6]提出了可压缩的多孔介质模型。Lubinski^[7]采用热弹性相似比拟法来计算多孔弹性介质, 给出了多孔材料弹性本构方程。Yan 等^[8]考虑渗流井斜角、方位角和弱节面的影响, 建立考虑渗流和弱节面斜井井壁稳定性的力学模型。Lee 等^[9]研究了页岩的各向异性, 建立了考虑层理面方向和地应力场的井壁稳定性模型。刘玉石等^[10]综合材料损伤后的应变软化特性, 在不考虑渗流作用的前提下, 给出了井壁围岩失稳的临界井眼压力。李敬元和李子丰^[11]在井壁破裂压力的计算中, 将地层岩石视为多孔介质, 并将渗流作用和孔隙压力计算在内。李忠华和潘一山^[12]以弹塑性理论和损伤力学为基础, 将井壁围岩视为多孔介质, 计算渗流的影响, 给出了考虑渗流作用井壁稳定的孔隙压

力的临界值。袁俊亮等^[13]引入渗流与应力耦合的作用,得到了考虑渗流作用的孔隙压力计算模型,对硬脆性岩石孔隙压力和坍塌压力的计算模型进行了一系列的研究。金衍和陈勉^[14]、卢运虎等^[15]应用弱面破坏准则分析了考虑强度各向异性地层直井井壁稳定性问题。

泥页岩的井壁稳定性研究初期,人们一直认为井壁岩石所受到的破坏应力大于原始强度是井壁失稳的原因,认为井壁失稳问题是一个单纯的力学问题。到了20世纪中期,在采用气体钻井的井场中,发现某些泥页岩地层井壁维持了良好的稳定性,使得人们对泥页岩井壁失稳的关键问题有了新的认识,认为钻井液的侵蚀引起了泥页岩水化,导致井壁失稳。在随后的十余年,Chenevert^[16]、Gray和Darley^[17]指出:井壁失稳的一个重要原因是泥页岩水化,而不仅仅是纯力学问题。此后,研究人员开始对含黏土岩石水化的问题及泥页岩水化对井壁稳定性的影响开展研究。1969年,Chenevert^[18]通过实验测量水化膨胀压力的方法对泥页岩水化问题进行研究。Gray和Darley从理论上分析了页岩水化对井壁稳定性的影响,提出了应通过现场地质数据和实验来研究井壁稳定性问题。在泥页岩中水活度这一概念的基础上,Chenevert提出了活度平衡和非理想半透膜的概念,采用活度平衡钻井液较好地防止了页岩水化。Darley对半透膜原理进行了解释,并进行了模拟实验,指出内相的高浓度盐水会使页岩水析出,有利于井眼稳定。Yan等^[8]提供了一种新的测量页岩水化的扩散系数实验方法,建立了页岩力学参数和水含量之间的关系。根据实验结果,建立井壁稳定性力学化学耦合模型。Rutqvist等^[19]通过多相流体流动、热和地质力学过程的数值模拟研究了地层岩石力学性能和井壁稳定性。Zeynali^[20]通过研究钻井液特性及与地层的相互作用在井筒周围引起地应力大小和分布的改变,将力学和物理化学结合起来研究井壁稳定性。对于泥页岩井壁岩石来说,泥页岩中含有水敏性黏土矿物,受到地下流体和钻井液侵蚀的作用,黏土矿物层间发生水化反应,造成颗粒间膨胀,产生了流变效应。泥页岩水化膨胀不仅改变了井眼周围的应力分布,而且由于吸水降低了泥页岩的强度。因此,可见膨胀性黏土是泥页岩井壁失稳的另一主要原因。

1.4 岩石蠕变损伤研究进展

1.4.1 流变理论在岩石力学中的应用

岩石的流变力学主要讨论岩石在一定的环境力场作用下与时间有关的变形、受力和破坏的规律性。岩石的变形不仅呈现弹性和塑性,而且也具有流变性质。流变一般包括蠕变、应力松弛和弹性后效。蠕变是当应力保持不变时,变形随时间增加而增大的现象;应力松弛是当应变保持不变时,应力随时间增加而减小的现象;弹性后效是加载或卸载时,变形滞后于应力延迟恢复的现象。1948年,荷

兰的 Geuze 对土流变进行了系统研究。1951 年以后,流变力学的研究和应用在岩土工程领域内取得了长足的进步,并发展成为工程力学的一个独立分支学科。

1. 岩石流变实验

岩石流变实验是认识岩石流变性质的主要途径。早在 20 世纪 30 年代,研究者开展了岩石的蠕变性实验研究。1937 年,Griggs^[21]对砂岩和泥岩等进行了系列蠕变实验,发现这类岩石当荷载达到破坏荷载的 12.5%~80%时,就会发生蠕变。Vouille 等^[22]开展了变温度、偏应力及围压条件下盐岩的单轴和三轴蠕变实验,确定了盐岩的蠕变破坏准则。日本学者 Ito 等^[23-25]对大型花岗岩试件开展了目前持续时间最长——历时 30 年的弯曲蠕变实验,发现花岗岩长期变形呈黏滞流动。Okubo 等^[26]开发了伺服刚性实验机,并在其上进行了岩石单轴压缩蠕变实验,获得了包括初始蠕变、等速蠕变和加速蠕变三个阶段的应变-时间关系曲线,并建立了能完全描述岩石各阶段蠕变特性的流变本构方程。李永盛^[27]进行了粉砂岩等 4 种不同岩性的岩石单轴压缩条件下的蠕变和应力松弛实验,指出岩石材料的蠕变速率有减小、稳定、增大三个阶段。陈宗基^[28]对宜昌砂岩进行了蠕变实验,研究了岩石的蠕变和扩容现象。张向东等^[29]通过对泥岩进行三轴蠕变实验,发现软弱岩石的三轴蠕变呈非线性关系。徐平^[30]、夏熙伦等^[31]进行了三峡花岗岩单轴蠕变实验,给出了蠕变经验公式,提出了应力门槛值。邓广哲和朱维申^[32]的实验研究表明,岩石的蠕变参数和弹性参数是时间的函数,软岩的强度和弹性模量随时间增加而降低,并通过研究得到了裂隙扩展与裂隙岩石强度弱化之间的基本关系^[33]。

2. 岩石流变本构模型

岩石流变本构模型主要是采用经验法、内时理论、元件法或采用非线性流变元件理论等方法来建立。

经验模型是最简单的岩石流变模型,它是通过特定条件下的流变实验,拟合实验数据建立起来的模型。通常采用的是指数型、对数型、幂律型以及三者的混合。岩石流变经验模型的主要缺点是无法对加速流变阶段进行描述。不同的岩石材料,根据不同的条件,可以得到各种各样的流变经验模型。内时理论是通过内变量表征材料内部组织的不可逆变化,得出内变量的变化规律,给出本构方程,其缺点是待定参数较多,不易求解。元件法是岩石流变模型常用的方法,它是根据流变实验曲线将岩石抽象成由一系列弹性元件、黏性元件和塑性元件等基本变形原件组成的体系。常用的岩石流变元件模型有马克斯威尔型、开尔文型、伯格型、宾汉姆型等。这些流变元件模型均是由模型元件线性组合而成,但对于常常表现出非线性流变性质的岩石材料,通常难以反映出其复杂特性。

建立非线性流变模型有两种方法,一种是采用非线性流变元件代替线性流变

元件,与黏性和塑性元件的串并联组合建立的流变本构模型;另一种是通过内时理论、断裂力学和损伤力学理论以及在实验的基础上建立流变本构模型。关于第一种非线性流变本构模型的建立,国外学者 Keedwell^[34]通过变弹性模量和变黏滞系数建立了非线性开尔文模型。在国内,孙钧^[35]依据流变实验提出了一些非线性流变元件。王来贵等^[36]建立了参数非线性蠕变模型。邓荣贵等^[37]提出的非牛顿流体黏滞阻尼元件与传统模型结合,形成了新的流变模型。陈沅江等^[38]将蠕变体和裂隙塑性体同开尔文体及胡克体相结合,建立研究软岩的新型复合流变模型。曹树刚等^[39]采用改进的西原正夫模型,研究了与时间关联的软岩一维和三维本构方程和蠕变方程。杨圣奇^[40]建立了岩石非线性黏弹塑性流变模型,可以反映岩石的加速流变特性。蒋昱州等^[41]建立了一种能够很好模拟岩石非线性蠕变的初始、等速和加速蠕变的模型。赵延林等^[42]改进宾汉姆体与胡克体、村山体串联,建立了新的非线性黏弹塑性流变模型。岩石非线性流变元件模型具有将复杂的性质直观表现出来的优点,因此这种方法得到了广泛的应用。用内时理论和速率过程理论建立的流变本构模型,大多也是非线性的。陈沅江等^[43]建立了基于内时理论的软岩流变本构模型,有效地描述了软岩蠕变过程的力学特性。由于内时流变本构模型的待定参数较多,如若应力条件复杂,则求解较为困难,因此未被广泛推广。

流变理论引入损伤断裂理论构建的本构模型的相关研究,也取得了一定的成果。1985年,Kachanov首次引入有效应力和连续损伤因子,对金属蠕变的脆性断裂进行了成功的解释。多年来,通过对流变本构模型的研究,推动了损伤力学和岩石力学的发展。Chan等^[44,45]和 Fossmu等^[46]在盐岩的流变研究中,引入损伤力学。Chan等^[47]构建了盐岩蠕变、损伤断裂多机制耦合模型。Lux和 Hou^[48]提出了考虑盐岩的延展性变形、变形恢复和损伤机制的模型。Aubertin等^[49,50]构建了新的流变模型,是以内部状态变量表述的蠕变方程,适应低孔隙率软岩的半脆性特性。陈智纯等^[51]、缪协兴和陈自达^[52]进行了大量岩石蠕变实验,构建了岩石蠕变损伤方程。韦立德等^[53]通过分析盐岩的变形与蠕变损伤变量的关系,建立了盐岩蠕变损伤本构模型。肖洪天等^[54]对长江三峡永久船闸高边坡的稳定性进行了分析,建立了裂隙岩石的损伤流变本构模型。曹树刚和鲜学福^[55]提出了煤岩蠕变损伤的偏应力检测法。任建喜^[56]首次引入电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)数减小速率的概念来分析岩石蠕变损伤第三阶段的门槛值,对单轴压缩岩石蠕变损伤扩展特性进行了实时分析。Kranz^[57]用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)方法研究了Barre花岗岩在断裂强度荷载作用下裂隙的蠕变扩展。凌建明^[58]通过实验的方法验证了轴向应力和围压之差是导致岩石体积应变的主要原因,且岩石体积应变具有显著的时效特征,蠕变裂隙扩展与损伤累积存在必然联系。邓广哲和朱维申^[32]揭示了裂隙岩石蠕变过程的本质与机制。陈有亮^[59]进行了裂隙时效扩展机理研究。Costin^[60]提出蠕变损伤具有应力阈值的重要结论。

总体来说,岩石流变本构模型对研究岩石时效变形问题起着重要的作用,目前取得了较多的研究成果,并广泛应用于工程实践。岩石流变实验及黏弹塑性本构模型辨识方面的研究受到实验条件和技术的限制,其理论解释及研究成果有待进一步完善。

3. 水化对岩石流变特性影响

经过多年的研究,对泥页岩井壁失稳的主要原因已经有了较为清晰的认识,即泥页岩与钻井液及地下流体的接触导致的泥页岩水化。井壁稳定性问题是一个力学与化学复杂结合的问题,力学状态变化同物理化学变化互为影响、相互改变,最终以力学形式表现出来。岩石遇水后强度降低,岩石内部损伤随时间逐渐加剧及宏观裂纹的流变时效扩展,是导致其时效变形行为及流变破坏的主要原因。岩石的时效变形行为及流变破坏都具有很强的时间效应,水在岩石内部物理化学损伤随时间积累,并从宏观上影响岩石的力学行为。因此,泥页岩井壁岩石的流变特性多表现为蠕变现象,泥页岩水化后,当应力保持不变时,变形随时间增加而增长的流变现象,主要归结为蠕变行为。

1970年,Chenevert^[61]研究发现:页岩吸水会造成强度降低,页岩吸水量与侵入深度与时间存在正比的函数关系。之后出现如三轴应力页岩流动实验装置、CT扫描页岩实验装置等一批研究页岩的实验仪器设备。1989年,Chenevert和Yew^[62]将力学与化学相耦合进行定量分析。李鹏等^[63]探讨了含水率对软弱结构面蠕变特性的影响机制。余成学和崔旋^[64]的研究表明:在高孔隙水压力作用下,岩石的强度降低,承载时间缩短,破坏时的应变也有所降低。阎岩^[65]研究了多孔隙石灰岩在不同应力及渗流和水压作用下岩石试件的流变力学特性。何峰^[66]对煤岩试件在不同的围压、孔压条件下进行渗流-蠕变耦合实验,得出岩石蠕变破裂的发展引起渗透率的变化,渗透率的变化和试样的微裂纹扩展一致的结论。李江腾等^[67]和Cao等^[68]采用分级增量循环加卸载方式,对斜长岩在风干和饱和水条件下进行单轴压缩蠕变实验,结果表明水能加速变形,且饱和水状态试样达到稳定阶段所经历的时间比干燥状态试样经历的时间要长。李男等^[69]对干燥和饱和水砂岩进行了剪切蠕变实验,结果表明水能够增大岩石的蠕变量和蠕变速率,并降低蠕变破坏强度值。不同类别岩石的基本性质差异较大,其含水状态下岩石蠕变特性及其本构模型也不尽相同。

1.4.2 损伤理论在岩石力学中的应用

岩石形成过程中,岩石内部的不同成分在空间分布不同,加之受到不同时期各种力学作用的积累,使岩石在宏观、细观以及微观上的各项差异是不尽相同的。岩石是由一种或多种矿物组合而成的矿物集合体。在这个集合体内有多种矿物颗粒和胶结物质,存在一定的空隙,是一种非均质混合体。岩石经受了漫长的地质

构造运动和各项作用等诸多因素的影响,其内部存在的空隙也表现为分布随机、尺寸各异的孔隙、裂隙和微裂纹。岩石既是极其复杂的非连续体,也是极其复杂的非均质体,表现出各向异性、非线性及随时间变化的流变特性等力学属性。岩石内部缺陷和损伤既是非弹性形变的主要原因,也是岩石宏观力学性质的重要决定因素。工程实践和研究表明,由于岩石类材料存在初始微缺陷,从开始变形直至屈服破坏是一个损伤累积和逐渐劣化的过程,也是一个损伤随时间由小到大直至破坏的量变到质变过程。岩石的最终宏观断裂与其内部初始的微结构和微缺陷紧密相关。

断裂力学理论主要用于研究宏观裂纹或裂缝的扩展过程,而损伤力学理论则用于研究宏观裂纹或裂缝形成前微缺陷的演化发展过程。损伤力学通过引入描述岩石内部微细观结构的内变量,建立微细观结构效应与损伤宏观力学响应之间的定量关系,选择恰当的损伤变量描述损伤及其演化规律。对于具有初始微缺陷的岩石材料,将其内部分布的各种缺陷视为损伤,从损伤力学的观点研究其力学特征将更为合适。近几十年来,损伤力学快速发展,已经成为材料结构变形与破坏理论的重要组成部分,成为了一门新兴的学科。在损伤力学里,损伤被定义为材料内部的微缺陷结构在外载的作用下,引起结构劣化的过程。20世纪70年代末以来,损伤力学理论已在岩石力学与工程领域中得到了应用,涉及岩石边坡设计、水电工程渗流与控制、有害核废料的储存、矿井的疏干降压排水、地下水资源的开发利用等多个方面。

在损伤力学研究中结合流变力学的方法,来分析具有流变特性和行为的含损伤介质的材料,损伤的演化与破坏成为近年来不断发展起来的一个重要方向。同损伤力学研究的内容相比,流变力学主要研究材料在应力、应变、温度、湿度、辐射等条件下与时间因素有关的变形和流动的规律。1997年,Chen^[70]引用损伤力学观点,对盐岩蠕变损伤进行了描述,建立了盐岩蠕变破坏强度准则。2001年,Bellenger和Bussy^[71]利用不可逆热力学理论建立岩石的唯象蠕变损伤演化模型。2006年,Shao等^[72,73]根据蠕变和应力松弛实验曲线,建立了能反映岩石塑性变形、损伤演化、体积膨胀、围压影响下的蠕变损伤本构模型。2009年,Yamamoto等通过对盐水浸泡后花岗岩的单轴压缩变形进行实验研究,结合损伤力学理论建立了腐蚀作用下的单轴膨胀损伤演化模型。1995年,凌建明^[74]在岩石蠕变断裂研究中采用了损伤力学的方法,建立了蠕变裂纹分析的损伤累积模型。1998年Yang^[75]、2000年Ge^[76]、2001年任建喜等^[77]利用CT研究了岩石蠕变损伤演化的初步规律。1999年,张晓春等^[78]描述了岩石微细观裂纹演化及其力学特性,结合工程实例说明了研究岩石流变损伤断裂有着重要的现实意义。2002年,杨春和等^[79]通过对盐岩蠕变实验研究,建立了反映盐岩蠕变全过程的非线性蠕变本构方程。2005年,韦立德等^[80]建立了基于细观力学的盐岩蠕变损伤本构模型。2006年,徐卫亚等^[81]在建立的绿片岩蠕变损伤本构关系中引入了非线性函数。2007年,范庆忠和高延