

Mechanisms and Evaluation Techniques of
Water Blocking Damage in Low-permeability Tight Sandstone Reservoirs

低渗透致密砂岩 水锁损害机理 及评价技术

李皋 孟英峰 唐洪明 等 著

四川出版集团 四川科学技术出版社

Mechanisms and Evaluation Techniques of
Water Blocking Damage in Low-permeability Tight Sandstone Reservoirs

低渗透致密砂岩

水锁损害机理 及评价技术

李皋 孟英峰 唐洪明 等 著

四川出版集团 四川科学技术出版社
· 成都 ·

图书在版编目(CIP)数据

低渗透致密砂岩水锁损害机理及评价技术 / 李皋等著.
- 成都: 四川科学技术出版社, 2012.7
ISBN 978-7-5364-7453-6

I. ①低… II. ①李… III. ①低渗透储集层-致密
砂岩-砂岩油气藏-水锁效应-研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 157119 号

低渗透致密砂岩水锁损害机理及评价技术

著 者 李 皋 孟英峰 唐洪明 等
责任编辑 何 光
特邀编辑 钟水清
封面设计 张维颖
责任出版 周红君
出版发行 四川出版集团·四川科学技术出版社
成都市三洞桥路12号 邮政编码610031
成品尺寸 260mm×185mm
印张10 字数180千
印 刷 成都双流鑫鑫印务有限公司
版 次 2012年7月成都第一版
印 次 2012年7月成都第一次印刷
定 价 68.00元
ISBN 978-7-5364-7453-6

■ 版权所有·翻印必究 ■

■ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

■ 如需购本书,请与本社邮购组联系。

地址/成都市三洞桥路12号 电话/(028)8773408

邮政编码/610031 网址:www.scjpu.com

内容提要

本书较全面地阐述了低渗透致密砂岩气藏水锁所涉及的基本机理、基本评价方法以及预防和解除措施。水锁是低渗透致密砂岩气藏储层损害的主要类型之一,它严重制约了气藏的经济有效开发。本书旨在通过一系列的室内实验研究、现场调研和理论分析,认识水锁损害的机理、影响因素以及对预防和解除措施效果进行评价。内容包括了低渗透致密砂岩气藏水锁损害机理、黏土矿物对水锁损害的影响、水锁损害评价方法和水锁损害的预防及解除措施等。

本书对从事低渗透致密砂岩气藏储层保护的现场技术人员和管理人员具有重要的参考价值,同时对从事低渗透致密砂岩气藏储层保护研究的相关科研院所的研究人员也具有一定的参考价值。

前 言

由于天然气的高效益和对环境的低污染以及天然气储量的不断发现和天然气工业的巨大发展,天然气在世界能源消耗中所占的比重越来越高,已经从 20 世纪 50 年代的 9.7% 上升到了目前的 23.76%。能源专家普遍认为,天然气将成为 21 世纪的全球能源。

据国际能源机构(IEA)估计,世界非常规天然气资源量为 $922 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中致密砂岩气为 $210 \times 10^{12} \text{ m}^3$,煤层气为 $256 \times 10^{12} \text{ m}^3$,页岩气为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。低渗透致密砂岩气藏是天然气增能上产的重要领域之一,具有巨大的勘探开发潜力,对其进行勘探开发的研究受到了油气勘探开发工作者的重视。水锁是低渗透致密砂岩气藏储层损害的主要类型之一。水锁损害会导致气井低产,甚至无产,阻碍气层的及时发现和真实评价,降低最终采收率,增加勘探开发的成本和周期,已成为对低渗透致密砂岩气藏勘探开发的主要障碍之一。因此,深入系统地研究低渗透致密砂岩气藏水锁损害的机理,并探索有效的预防及解除方法,具有极其重要的意义和迫切的需求。

本书结合水锁损害的研究现状,利用现代分析测试手段,通过一系列的室内实验研究和现场调研以及深入的理论探讨,对低渗透致密砂岩气藏的水锁损害的机理进行了全面研究,并对各种水锁损害预防和解除措施进行机理分析和效果评价,探讨了新的解除水锁的方法——微波加热解除低渗透致密砂岩气藏水锁损害的方法。本书从低渗透致密砂岩气藏的地质特征入手,系统地研究了水锁损害的内外因素、形成过程及本质特征;深入研究了黏土矿物对低渗透致密砂岩储层特征的影响及其在水锁损害中的行为机理;研究了水锁损害对气体渗透率的影响、岩石自吸规律、气水微观分布特征以及水锁—应力敏感性综合效应;明确了水锁损害的预防及解除原则,探讨了常见的预防和解除措施的有效性;深入探讨了欠平衡钻井预防水锁损害的机理,研究了欠平衡逆流自吸规律,并提出了基于产能保护和毛细管力自吸效应的欠压值确定原则以及必须采用气体钻井技术的条件;首次探讨了微波加热解除水锁损害的可行性,深入研究了微波加热对储层岩石及流体的作用机理,提出了微波加热解除水锁损害的概念设计;研究形成了一套水锁损害防治技术体系的基本构架。

本书共五章,第一章由李皋、孟英峰编写;第二章由李皋、孟英峰编写;第三章由李皋、唐洪明编写;第四章由李皋编写;第五章第一节、第二节、第五节由李皋、孟英峰编写,第三节、第四节由李皋、钟水清、罗兵编写;第六节由李皋编写。此外,陈一健、李永杰、万里平、刘厚彬、魏纳、龙俊西、李小林、林小琰等人也参与了本书的编写和书稿审查。其主要内容包括低渗透致密砂岩的水锁损害机理,黏土矿物对水锁损害的影响,水锁损害的评价、预

防及解除的方法等,对于低渗透致密砂岩气藏的水锁损害机理、预防和解除的研究有重要的参考价值。本书可供油气勘探领域研究人员参考。

限于编者的水平,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

著 者

2011 年 10 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 我国能源需求形势与低渗透致密砂岩气的重要地位	1
一、天然气资源勘探开发的现状与紧迫形势	1
二、低渗透致密砂岩气藏及其重要意义	2
第二节 低渗透致密砂岩气藏水锁损害及其研究意义	3
一、水锁损害的基本概念及其影响	3
二、水锁损害研究现状及存在的主要问题	5
三、研究取得的一些认识	7
第二章 低渗透致密砂岩气藏水锁损害机理	10
第一节 低渗透致密砂岩气层岩石学特征	10
一、砂岩成分特征.....	10
二、主要成岩作用及其影响.....	12
第二节 低渗透致密砂岩气藏孔隙结构特征	13
一、孔隙结构的测量与描述.....	13
二、低渗透致密砂岩气藏孔隙结构的一般特征.....	15
三、低渗透致密砂岩气藏孔隙结构的分形特征.....	17
第三节 异常低原始含水饱和度特征	21
一、气藏原始含水饱和度和束缚水饱和度.....	21
二、异常低原始含水饱和度形成原因.....	21
三、气藏原始含水饱和度的确定.....	23
第四节 低渗透致密砂岩气藏水锁损害的本质	27
一、内因——不利的地质条件.....	27
二、外因——不利的作业条件.....	28

三、毛细管力的单向阀效应与侵入水相的滞留	29
四、侵入水对气层特性的影响	32
第三章 黏土矿物对水锁损害的影响	34
第一节 黏土矿物概述	34
一、黏土及黏土矿物的基本概念	34
二、黏土矿物晶体化学特征	35
第二节 低渗透致密砂岩储层黏土矿物特征	38
一、黏土矿物成因	38
二、低渗透致密砂岩黏土矿物类型及分布	39
三、低渗透致密砂岩黏土矿物微观结构特征	39
第三节 黏土矿物对低渗透致密砂岩气藏特性的影响	40
一、黏土矿物对孔喉空间的充填和分割作用	40
二、黏土矿物对孔隙表面特性的影响	43
三、黏土矿物对原始含水饱和度的影响	47
第四节 黏土矿物对水锁损害的影响	48
一、黏土矿物的水-岩石作用结晶学分析	48
二、黏土矿物与水作用后的显微结构变化	50
三、黏土矿物膨胀对渗透率的影响	54
四、黏土膨胀对低渗透致密砂岩孔隙结构的影响	55
五、非膨胀性黏土矿物对水锁损害的影响	56
第四章 水锁损害评价方法	58
第一节 岩心流动实验评价	58
一、实验方法	58
二、有关室内建立束缚水饱和度的讨论	59
三、岩心流动实验结果分析	60
第二节 岩心自吸实验研究	62
一、自吸过程的流体推进状态	62
二、自吸过程的气体束缚现象	65
三、自吸含水量变化特征	66

第三节 侵入水相在孔隙中的微观分布	70
一、孔隙结构流动实验研究	70
二、离心法实验研究	72
三、压汞与水相在孔隙中的分布	73
四、岩样浸泡实验研究	73
第四节 应力敏感性与水锁效应	75
一、低渗透致密砂岩的应力敏感性特征	75
二、水锁效应中的应力敏感性评价	76
第五节 水锁损害程度的预测	77
第五章 水锁损害的预防及解除方法	80
第一节 水锁损害的预防和解除原则	80
一、预防水锁损害的技术原则	80
二、解除水锁损害的技术思路	81
第二节 气驱法	82
一、实验方法及讨论	82
二、室温气驱实验	83
三、加热气驱实验	84
四、气驱蒸发阶段的计算	86
第三节 化学剂减轻水锁损害效果评价	87
一、甲醇对水锁损害的影响	88
二、表面活性剂对水锁损害的影响	89
第四节 压裂穿越水锁损害带	90
一、爆炸压裂	91
二、水力压裂	92
三、泡沫压裂	94
四、高能气体压裂	96
五、液态气体压裂	97
第五节 欠平衡钻井预防水锁损害	97
一、低渗透致密砂岩气藏正压差作业存在的储层损害	97
二、欠平衡钻井技术预防低渗透致密砂岩气藏水锁损害	100

三、低渗透致密砂岩气藏水基欠平衡自吸效应研究	104
四、考虑毛细管力自吸效应和产能保护的欠压值设计	111
第六节 井下微波加热法解除水锁损害	117
一、基本原理	117
二、微波加热岩石的温度	120
三、微波加热对低渗透致密砂岩储层特性的影响	124
四、井下微波加热解除水锁的概念设计	136
参考文献	141

第一章 绪 论

第一节 我国能源需求形势与低渗透致密砂岩气的重要地位

一、天然气资源勘探开发的现状与紧迫形势

作为一种环保优质能源,天然气是世界能源构成中的一个重要组成部分。20 世纪 70 年代以来,在煤炭、石油、天然气世界三大能源中,天然气需求量增长率高达 60% 以上,而煤炭只有 40% 左右,石油不到 10%^[1]。从全球范围来看,天然气资源极为丰富。据国际能源机构(International Energy Agency, IEA)估计,全球常规天然气可采资源总量为 $471 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 已累计采出 $66 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 目前剩余为 $405 \times 10^{12} \text{ m}^3$; 非常规天然气资源量为 $922 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中致密砂岩气为 $210 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 煤层气为 $256 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 页岩气为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。但资源分布极不均衡, 主要分布在中东、原苏联地区, 2010 年世界前十大天然气资源国的探明储量占世界总储量的 77%^[2]。《BP 全球能源统计报告 2011》指出, 在 2011 年全球天然气剩余探明可采储量为 $187.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 生产总量为 $3\,193.3 \times 10^9 \text{ m}^3$, 较 2010 年增长 7.3%, 消费总量为 $3\,169.0 \times 10^9 \text{ m}^3$, 较 2010 年增长 7.4%。预计到 2030 年以前, 天然气仍将是世界各国能源发展的重点, 消费量将以年均 1.7% 的速度增长^[2]。根据国际能源机构 2011 年 6 月 6 日公布报告, 天然气需求总量有望在 2035 年达到 $5.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 届时将占全球能源需求的约 25%。因此, 21 世纪是天然气的世纪。

近十几年我国天然气勘探取得一系列重要突破。“八五”期间探明地质储量约为前 40 年的总和, 年增储量首次超过 $2\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, “九五”期间年探明储量又是“八五”期间的两倍以上。先后在中西部地区发现了陕北气田和川东气田, 西部地区的塔里木、吐哈、柴达木等盆地也相继发现了塔北、塔中、丘东、台南等一批气田, 东海和南海北部发现了平湖、东方、乐东和宝云亭等气田。“十五”期间, 我国探明天然气储量大幅增长, 累计探明天然气地质储量 $2.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 较“九五”期间增加 $1.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 增长 117%。2011 年全国天然气勘查新增探明地质储量 $7\,659.54 \times 10^8 \text{ m}^3$, 同比增长 29.6%。新增探明技术可

采储量 $3\,956.65 \times 10^8 \text{ m}^3$, 同比增长 37.6%。全国天然气勘查新增探明地质储量中四川盆地新增 $2\,783.70 \times 10^8 \text{ m}^3$, 鄂尔多斯盆地新增 $2\,297.17 \times 10^8 \text{ m}^3$, 塔里木盆地新增 $1\,083.88 \times 10^8 \text{ m}^3$, 松辽盆地新增 $398.05 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总数的 85.7%。目前我国天然气的探明程度依然较低。截至 2010 年 11 月, 我国陆地上的天然气探明程度为 10.38%, 远远低于世界 40% 的平均水平, 也低于我国陆地上的石油资源 24.88% 的平均水平, 而且海上的勘探开发仍处于初始阶段^[3]。由此可见, 我国天然气发展具有巨大的潜力。然而, 我国天然气资源中低渗透、深水、深层、含硫化氢的资源占有较大比重, 且埋藏较深的天然气资源比重较大, 而世界天然气资源丰富的俄罗斯、伊朗及中东地区天然气资源埋藏深度约为 1 500 m。因此, 我国天然气的开采成本必定要远远高于世界平均水平。

天然气探明储量和产量增长的同时, 全国天然气消费量也快速增长, 并且增长速度大于产量增长速度。2007 年全国天然气产量为 $693 \times 10^8 \text{ m}^3$, 天然气消费量为 $673 \times 10^8 \text{ m}^3$, 在能源消费结构中占 3.4%; 2008 年国内天然气产量为 $760.82 \times 10^8 \text{ m}^3$, 天然气消费量为 $807 \times 10^8 \text{ m}^3$, 成为天然气的进口国; 2009 年进口量达 $78 \times 10^8 \text{ m}^3$, 对外依存度超过 8%; 2010 年中国天然气产量 $952.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 同比增长 13.2%, 但缺口达 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$, 对外依存度升至 12.8%; 2011 年中国天然气产量首次突破千亿立方米, 为 $1\,011.15 \times 10^8 \text{ m}^3$, 同比增长 7.3%; 预防到 2015 年, 中国进口天然气将占天然气消费总量的 30%。因此, 21 世纪初我国天然气资源勘探开发任务极其繁重, 并面临极大的考验, 提高天然气资源的探明程度和对已探明天然气资源的开发效率, 以满足快速增长的天然气需求形势, 是我国天然气工业面临的客观现实和迫切要求。

二、低渗透致密砂岩气藏及其重要意义

1. 低渗透的概念

天然气资源大体可以分为 3 级: 常规资源、非常规资源、可能资源或潜在资源。各类天然气资源大体呈金字塔结构^[4]。随着技术进步, 低级资源转化为高级资源已成为增加天然气产量的重要途径。主要是加大煤层气、致密砂岩气、页岩气以及水合物天然气等非常规天然气资源的勘探开发力度。国际和国内近年来勘探开发实践证明, 低渗透砂岩气藏是未来增储上产的重要领域之一。所谓低渗透是一个相对的概念, 目前国内外还没有统一的界定标准, 并且已有的大多数划分是针对油藏提出的。

苏联一般以 100 mD 作为低渗透的上限。美国和加拿大有以 100 mD 作为低渗透上限, 有的以 50 mD 作为低渗透上限^[5-6]。唐曾熊(1994 年)建议以一个数量级作为划分各类储层渗透率的范围, 即特低渗透为小于 10 mD, 低渗透率为 10 ~ 100 mD, 中渗透率为 100 ~ 1 000 mD, 高渗透率为大于 1 000 mD。罗蛰潭、王允诚(1986 年)把渗透率小于 100 mD 的储层称为低渗透油层。阎庆来(1994 年)通过实验研究发现, 低渗透储层有与一般中、高渗透储层不同的渗流特征, 即: ①低渗透储层具有启动压力梯度, 呈非达西型渗流特征;

②低渗透储层渗透率对原油采收率具有明显影响,认为 40 mD 是低渗透储层的上限。李道品^[7]及曾大乾等^[8]认为,低渗透油层渗透率的上限为 50 mD 是比较恰当的。尽管在渗透率上限的划分上存在分歧,但对于油藏,较为普遍的观点是,低渗透储层很难在不进行增产措施以前依靠油井的自然产能来获得经济有效的工业产量^[5]。

对于气藏,由于天然气在储层中的流动阻力小,低渗透的划分上限要低于油藏。美国的划分标准是岩心的地表气测绝对渗透率小于 20 mD,在气层原始条件下,渗透率小于 1 mD,甚至多数情况下渗透率在 0.01 ~ 1 mD 之间。但更多的定义是针对致密砂岩气给出的,比如美国天然气政策条例规定,渗透率小于或等于 0.1 mD 的为致密天然气藏^[9]。

实践证明,仅仅利用渗透率作为划分低渗透致密砂岩气层的定量标准,其根据是不充分的。在划分过程中还应当采用综合参数来确定,这些参数包括地层渗滤容量性质、产能及产层开发效果的经济标准。根据研究的需要,考虑到在此渗透率范围内的砂岩气藏中水锁损害对其产能的影响尤为重要,笔者采用地表气测绝对渗透率 20 mD 作为低渗透致密砂岩气藏的上限,并采用 0.01 mD 作为其下限。

2. 低渗透致密砂岩气藏的重要意义

在近几十年来,世界上一些含油气盆地陆续发现了非常规低渗透致密砂岩气藏,其巨大的资源潜力,使低渗透致密砂岩气藏的开发成为非常规气藏开采的焦点。美国、加拿大、德国等国先后发现了大型低渗透致密砂岩气藏。我国的低渗透致密砂岩气藏资源十分丰富,广泛分布在鄂尔多斯上古、四川西部中生代和塔里木库车山前白垩系等地区,其中致密砂岩气资源量约为 $12 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[10]。

我国在低渗透致密砂岩气藏的开发方面水平较低,与世界先进技术相比还有一定的差距。我国低渗透致密砂岩气探明储量和生产规模与巨大的资源量相比极不相称。钻井完井和增产改造中地层损害普遍存在,有时甚至相当严重,从而极大地制约了致密砂岩天然气勘探开发技术水平的提高。防止各项作业中产生的损害,经济有效地开发利用低渗透致密砂岩气藏对于我国缓解能源压力具有重要的现实意义。

第二节 低渗透致密砂岩气藏水锁损害及其研究意义

一、水锁损害的基本概念及其影响

当外来的水相流体渗入油气层孔道后,会将储层中的油气推向储层深部,并在油气—水界面形成一个凹向油相的弯液面。由于表面张力的作用,任何弯液面都存在一个附加压力,即产生毛细管阻力,其大小等于弯液面两侧水相压力和油气相压力之差,并且可由任意曲界面的拉普拉斯方程确定。欲使油气相驱动水相而流向井筒,就必须克服这一毛

细管阻力和流体流动的摩擦阻力。若储集层能量不能克服这一附加的毛细管压力,就不能把水的堵塞消除,最终影响储层的采收率,这种损害称为“水锁损害”^[11-13]。

目前国内外各种文献中出现的“水锁”(water blocking)、“水锁损害”(water blocking damage)、“水锁效应”(water blocking effect)、“水相圈闭”(aqueous phase trapping)基本是同一概念。“水相圈闭”强调形成过程,“水锁损害”更多强调液相侵入对储层渗流能力和最终产能的影响,笔者趋向于使用“水锁损害”一词。

由于低渗透致密砂岩气藏普遍具有低孔、低渗的特点,气、水及少量的油赖以流动的通道很窄,渗流阻力很大,液-固界面及液-气界面的相互作用力很大,使水锁效应和应力敏感性明显增强,并导致油、气、水渗流规律发生变化,使得低渗透致密砂岩气藏损害具有不同于油藏的特殊性:一方面,由于孔喉、孔道狭小,外来工作液中液相侵入储层引起的损害比固相颗粒侵入造成的堵塞和微粒运移堵塞严重得多。一旦工作液中的水相侵入储层,就会在井壁周围孔道中形成水相堵塞。另一方面,由于低渗透致密砂岩气藏常有微裂缝发育,并且喉道类型以狭长片状、弯片状喉道发育为主,渗透率对周围应力变化更为敏感,应力的变化可以引起的微裂缝和渗流通道的闭合收缩,造成气藏渗透率下降。国内外研究显示,水锁损害已成为低渗透致密砂岩气藏的主要损害类型之一,严重影响着气藏开发的效果^[14]。水锁损害可以导致下列严重后果:

(1)妨碍气层及时发现和准确评价

气层显示活跃,但测试时储层表现为超低渗透,产气量很低,出水量极小或无,乃至判定为干层,不具开采价值。测井解释通常给出异常高的含水饱和度,储量计算偏差大。

(2)增加作业成本

如果已经确认气藏具有经济开采价值,一旦水锁损害出现,当射孔无法穿越损害带时,必须采取诸如水力压裂等补救或改造措施。有时误认为是固相堵塞,采取酸化作业后效果适得其反。

(3)降低天然气采收率

通过天然裂缝系统而形成的水锁损害,使被裂缝系统所围限的基块成为相对孤立的中央气饱和区以及边缘水饱和带,孤立气区很难开采,造成储量损失。从开采井网角度来看,存在严重水锁损害的井不能有效泄流,气井不均衡开采会导致某些井过早见水或水淹。

(4)减缓开发进程,资金回收期延长

存在严重水锁的井,不得不进行补救作业。注入管线干气需要时间少则数周,多则几个月才能明显见效。使用水基压裂液改造后,部分井甚至在一年后产量仍未恢复至压前水平,并有一定的压裂液永久滞留地下。

二、水锁损害研究现状及存在的主要问题

文献[11]认为,水锁效应与毛细管的润湿性密切相关,还与束缚水饱和度有关;解除这种损害的方法是用表面活性剂或醇类物质进行处理,以降低油-水界面张力,从而使毛细管力减小。Keelan 等^[15]指出,外来流体侵入储层后,出现油相相对渗透率降低的起因往往是发生了水锁效应,或者说油相渗透率的降低是水锁损害的表现形式。文献[16]对长庆安塞油田长6低渗透储层的水锁损害问题进行了研究,发现水锁效应对长6油层的损害严重,最大损害率可达52%,最小损害率也在10%以上,同时,当气测渗透率增大时,水锁损害减轻。该文献还对驱替压力与水锁损害的关系进行了研究,认为随着驱替压力的增加,油相渗透率逐渐增大,水锁损害率趋于下降。

文献[17]对水锁损害的预测方法进行了研究,在预测水锁损害程度时,主要考虑了岩心的渗透率、岩心的孔隙度和储层的孔喉半径,通过多元逐步回归分析的方法,建立了水锁损害渗透率恢复值与储层渗透率及孔隙度之间的函数关系式。文献[18]建立了灰色理论预测水锁效应的模型,指出水锁效应影响程度的顺序是:油水界面张力、气层渗透率和原始含水饱和度;储集层中油水界面越高,外来流体侵入储集层后的水饱和度越高,水锁损害越严重,气测渗透率越大,水锁损害程度越小。文献[19]根据达西公式及相对渗透率曲线和毛细管压力曲线的表达式,提出了一个描述水锁机理及其影响因素的简化数学模型;该模型表明,外来水黏度高,侵入深或储层致密时可出现明显的暂时性水锁;固相堵塞储层孔隙或储层原生饱和度异常低时,可出现永久性水锁。文献[20]对水锁损害机理进行了分析,主要考虑了毛细管力的影响,认为引起低渗透致密砂岩地层水锁损害的因素包括气藏的孔隙结构、原始含水饱和度和束缚水饱和度之间的差异、气-水的相对渗透率曲线形态、作业压差和气藏掩饰润湿性等。文献[21-22]对川西侏罗系蓬莱镇组浅层低渗透气藏水锁损害进行了研究,认为减少水基工作液接触和侵入储层、控制合理作业压差和时间及削弱毛细管效应等措施能减轻低渗透致密砂岩气藏的水锁损害。

Holditch^[23]的研究表明,如果孔隙中含水饱和度过高,而地层的压力不足以克服完井后仍滞留在岩石中的液体的毛细管压力,就不会有产能,部分水锁也会使产能降低,只有当孔隙中的液体被完全驱出,才能获得理想产能。低渗透地层与中高渗透地层相比,存在严重的水锁效应。Raible 等^[24]研究了压裂液对气藏的损害问题,研究了不同液体饱和度下岩石的气测渗透率,认为孔隙中的液体和其中聚合物的多少以及驱替压力决定渗透率恢复大小,但没有给出定量关系。

Bennion 等^[25]对气藏的水锁损害机理进行了一些探讨。一般认为,液相在气藏中聚集或滞留是水锁损害的主要因素。气藏渗透率越低,影响越严重。液相包括水及碳氢化合物,液相在气藏中聚集的数量和对储层的损害程度主要取决于原始含水饱和度与作业后外来液体入侵形成的束缚水饱和度之差。该差值越大,损害越严重,渗透率下降越大。

此外,水锁损害与孔隙介质的表面性质、液相侵入储层的深度、多次液相侵入引起的滞后效应以及液相和气相的相对渗透率曲线形状等因素有关。

从对低渗透油气藏水锁损害的研究现状可以看出,目前主要是通过对水锁前后以及解除前后气体渗透率变化的实验研究结果,分析影响水锁损害的因素,所采取的数据处理方法仍然采用回归分析的方法,由于实验条件、实验手段和实验方法的不同,不同的研究者得出的结果也不尽相同,如有的研究者认为初始水饱和度越大,渗透率的下降程度减轻。一般解释为,初始水饱和度较高,他较接近于真实的束缚水饱和度,有减小水自发吸渗的倾向。但近来又有实验结果表明孔隙中含水饱和度越高,水锁损害越严重。同时,各种文献在考虑水锁效应影响因素时的出发点不同,从不同的角度得到的结论也有差异。根据目前的研究结果统计出影响水锁效应的因素包括:油与水或水与气之间的表面张力的大小;岩石孔隙尺寸的大小及孔隙的连通性;含水饱和度的大小;储层的原始渗透率和孔隙度的大小;碳氢化合物的滞留聚集及液相的侵入深度;岩石表面的润湿性;驱替压力的大小;储层温度等。

低渗透致密砂岩气藏水锁损害研究中有待深入的问题一方面来自于水锁损害的机理研究,另一方面来自于水锁损害的预防和解除技术研究。具体分述如下:

(1)对于水锁形成机理的理论探讨目前还主要停留在对基于毛细管力的 Laplace 公式以及基于 Poiseuille 定律的毛细管渗流的讨论,对于水锁损害过程中气、水分布状态及水相在孔隙中的行为机理还缺乏深入的实验研究和理论研究。对于低渗透致密砂岩气藏水锁损害的特殊性还缺乏足够的认识。

(2)大部分对于水锁损害影响因素的研究主要考虑了工作液性质对水锁损害程度的影响,对于水相侵入引起的气层孔喉结构以及与孔隙结构有关的气层特性的改变还缺乏研究。

(3)虽然黏土矿物在气藏中起着十分重要的作用,但黏土矿物在水锁损害中重要地位还未引起足够的重视,对于黏土矿物在水锁损害中的微观行为机理以及对水锁损害的影响缺乏研究。

(4)对于低渗透致密砂岩气藏水锁损害的有效预防和解除方法有待深入研究。对于目前已经提出的各种预防和解除方法的特点和具体应用效果还有待进一步探讨,新的有效的水锁损害预防和解除技术值得研究。

(5)对于钻井完井过程中水锁损害的各种预防措施还存在争论;对于欠平衡钻井过程中流体逆流自吸效应对水锁损害的影响程度还缺乏正确的认识,对于其自吸规律还缺乏探讨;基于逆流自吸效应的欠压值设计还缺乏定量和科学的依据,导致对欠压值设计与所要保护的产能之间的定量关系还缺乏科学的预测方法。

(6)对于裂缝与水锁损害机理的研究还有待进一步深入。

综上所述,水锁损害严重制约着低渗透致密砂岩气藏的有效勘探开发,针对目前水锁

损害研究中存在的问题,通过对水锁损害机理的系统深入研究,进一步探索经济有效的预防及解除技术具有十分重要而迫切的意义。

三、研究取得的一些认识

通过有关水锁损害机理、预防及解除技术的实验研究和理论探讨,形成以下几点认识:

(1)易受损害、损害机理复杂、损害程度严重、难于解除是低渗透致密砂岩气藏水锁损害的本质特征。毛细管力自吸和正压差的综合作用使得气井工作液得以侵入气层,降低气相渗透率;细小的孔喉、高的水相束缚能力、毛细管力的单向阀效应、气水微观分布以及水相侵入后的非达西渗流特征使得侵入水相在孔隙中得以滞留,靠气藏自身能量难以反排,产生水锁损害,并导致了复杂的水-岩石反应和孔隙结构的改变。

(2)黏土矿物对孔喉形成充填和分割,并粗化颗粒表面,导致岩石的强亲水性,增强了低渗透致密砂岩气藏的水相自吸和束缚势能。黏土矿物与侵入和滞留水相之间复杂的水-岩石反应进一步引起低渗透致密砂岩孔喉变小、孔喉分布改变。黏土矿物还与侵入水相形成水-黏土块状堵塞,使得水锁损害难以解除。

(3)水相侵入和滞留导致低渗透致密砂岩气体渗透率降低,达到束缚水饱和度时已产生严重水锁损害。自吸过程中,存在气体束缚现象,水相前缘在宏观上呈活塞式推进,随自吸时间增加岩石含水饱和度增加,自吸最大含水饱和度与岩石的原始束缚水饱和度无关。侵入水首先在岩石中较大的孔喉中分布,束缚气主要在较小孔喉或由较小孔喉包围的大孔喉中分布。水锁损害和应力敏感性损害的综合作用可使低渗透致密砂岩气藏的损害程度加剧。

(4)对于低渗透致密砂岩气藏水锁损害,总的原则是“预防为主,解除为辅”。采用增大损害带压降、延长关井时间来解除水锁损害意义不大。室内可以在较大压降梯度下通过气驱的方法来解除水锁损害,但在气藏实际生产中,这种方法受气藏压力和注气设备能力的限制。降低表面张力是减轻水锁损害的一种途径,但低表面张力体系对润湿性和黏度的改变可能影响其减轻和解除水锁损害的效果。

(5)在正压差和毛细管力逆流自吸效应的双重作用下,液相在基块孔隙和沿裂缝滤失在缝面造成的水锁损害是低渗透致密砂岩气层最为严重的损害形式。采用气体欠平衡钻井可以从根本上避免润湿液相引起水锁损害。欠平衡条件下逆流自吸作用遵循一定的规律并受欠压值、时间、围压、黏土膨胀、表面张力等多种因素影响,其中欠压值是最主要的影响因素。根据储层特征,通过合理的欠压值设计,全过程的水基欠平衡钻井可有效地预防水锁损害,保护储层。如果根据产能保护比例所确定的欠压值超过目前钻井工艺条件和设备能力的上限,则必须采用气体钻井来实现气井产能保护。

(6)通过微波加热可以快速有效解除水锁损害。微波作用区域正是水锁损害最严重