

胜利油区 油气层保护技术

SHENGLI YOUQU YOUQICENG BAOHU JISHU

史建刚 编著

中国石油大学出版社

胜利油区

油气层保护技术

▣ 史建刚 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

胜利油区油气层保护技术/史建刚编著. —东营:中国
石油大学出版社, 2009. 12

ISBN 978-7-5636-2735-6

I. 胜… II. 史… III. ①油层—保护—技术—东营市
②气层—保护—技术—东营市 IV. TE258

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 206981 号

书 名: 胜利油区油气层保护技术

作 者: 史建刚

责任编辑: 邵 云(电话 0532-86981537)

封面设计: 赵志勇(电话 0546-8773275)

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: sanbianshao@126.com

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546-8392565, 8399580)

开 本: 185×260 印张: 16.75 字数: 407千字

版 次: 2009年12月第1版第1次印刷

定 价: 28.00元

前

言

Preface

油气层损害损失油气资源,增加生产成本,因此对石油天然气工业来说是一个非常复杂而严重的问题。在钻井、完井、采油、增产、修井等作业中都可能破坏油气藏岩石的矿物组分和其中所含流体的物理、化学、热动力学、水动力学平衡状态,从而损害油气层。近年的理论研究、科学实验和生产实践使我们认识到保护油气层技术是一项保护油气资源和“少投入、多产出”的重要技术,是一项涉及多学科、多部门、多专业的系统工程。

国外对油气层损害及保护技术研究较早,现已形成一套比较系统的理论和比较完整的配套技术,在实际生产中取得了巨大的经济效益。我国自“七五”以来对油气层保护技术的研究一直未松懈,形成了不同类型油气藏比较完整的研究方法、损害机理、保护措施,但随着油气藏开发难度的日益增大,必须研究开发、采取新的油气层保护技术,保护地下油气资源,实现石油工业“增储、增产、稳产”,“稳定东部、发展西部”的战略方针。

本书是在我们十几年来研究保护油气层技术的科研成果和大量生产实践资料的基础上进行总结提高,充实完善而成的。

长期的科学研究和生产实践表明油气层损害贯穿油气勘探、开发过程的始终。一般来说,油气层损害包括外来流体进入油气层和油气层流体进入井筒的过程中,对油气层产生的一系列物理、化学变化,堵塞油气流通道,进而降低油气渗流能力的两大过程。为此,本书采用理论与实践相结合的方法论述了油气层损害的原因、机理和系列分析评价新技术;针对钻井过程中国内外主要采取屏蔽暂堵钻井液技术的不足,详细论述了广谱油膜暂堵保护油气层钻井液新技术,使钻井液对油气层的保护效果上了一个新台阶,并进一步指出了无损害钻井液将是以后发展的方向,以及国内外其他保护油气层钻井液新技术;对于修井作业过程中油层损害较频繁、严重的问题,介绍了修井作业中的油层暂堵、高密度低损害压井液和不开井作业新技术;针对疏松砂岩油藏开发过程中出砂严重、导致油层损害较严重的现实问题,阐述了油井出砂类型判断,因出砂形成“松散、亏空”状况定量模拟,防砂方法优化决策,以及防砂堵水一体化新技术;针对注聚驱,介绍了聚合物对油层的损害机理及解除聚合物堵塞新技术;稠油油藏是我国的后备储量,润湿反转是该类油藏损害的主要特点,本书介绍了稠油油藏岩石润湿性对注水采收率的影响,以及消除润湿性对注水采收率影响的最佳措施;完全避免油气层损害几乎是不现实的,尽量减轻油气层损害和对已损害的油气层实施有效解堵是石油工作者的主要任务,本书针对油田开发过程中油气层损害的多样性、复杂性、动态性

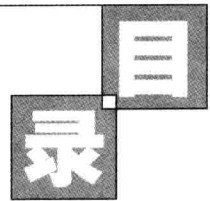
等,阐述了油气田开发过程中油气层损害原因、类型和程度的定量诊断、解堵措施优化决策、解堵工艺优化设计新技术等。概括而言,本书全面阐述了油气层损害机理的分析与评价,以及钻井、采油、修井、增产、防砂等作业过程中的一系列新技术。

本书在编著过程中得到胜利油田海洋钻井公司、胜利油田钻井技术公司、胜利油田孤东采油厂、大港油田采油工艺研究院等单位的大力支持,在此表示衷心的感谢!

由于本书涉及的领域较广,且作者水平有限,如有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

史建刚

2009年10月10日



Contents

第一章 绪论	1
第一节 油气层保护技术的意义和定义.....	2
第二节 保护油气层防止损害技术的主要内容.....	8
第三节 保护油气层技术的主要思路、研究程序和工作方法.....	16
第二章 岩心分析技术	19
第一节 岩心分析概述	19
第二节 X 射线衍射(XRD)技术	24
第三节 扫描电镜(SEM)技术	31
第四节 薄片分析技术	35
第五节 压汞法测定岩石毛管压力曲线	38
第六节 岩心分析技术应用展望	40
第三章 油气层损害评价方法	43
第一节 概述	43
第二节 实验前的准备	46
第三节 敏感性评价实验	50
第四节 储层敏感性预测技术	64
第五节 工作液对油气层损害静态评价	66
第六节 模拟井下条件的动态实验	69
第七节 其他评价实验	79
第八节 油气层损害室内评价技术新进展	85
第四章 油气层损害机理	92
第一节 油气层潜在损害因素	92
第二节 外因作用下引起的油气层损害.....	103

第五章 保护油气层的钻井液技术·····	124
第一节 钻井过程中造成油气层损害的原因·····	124
第二节 目前常用的保护油气层钻井液技术·····	127
第三节 广谱油膜暂堵保护油气层钻井液技术·····	138
第四节 钻井液对油气层损害程度的室内评价新技术·····	162
第五节 国内外保护油气层钻井液技术的其他新进展·····	174
第六章 保护油气层钻井完井液优化设计系统·····	187
第一节 目前国内外钻井完井液设计技术简介·····	188
第二节 保护油气层钻井完井液优化设计技术·····	195
第三节 钻井完井液优化设计软件开发·····	205
第七章 修井作业中的油气层保护技术·····	219
第一节 油气田开发生产中保护油气层的重要性及特殊性·····	219
第二节 修井作业对油气层的损害及修井液的选择·····	221
第三节 修井作业中的油层暂堵技术·····	225
第四节 高密度低损害 HL 压井液研究·····	238
第五节 不压井作业技术·····	250
参考文献·····	260

第一章 | Chapter One

绪 论

实践表明,在钻井、完井、修井以及增产措施的每段施工过程中,都可能由于措施不当对油气层造成人为的损害,严重影响油气井的产能,美国岩心公司总结了全世界约 4 000 口井的资料,得出了各作业环节油气层损害严重性的相对规律和排序(见表 1-1)。据报道,用一般钻井完井液完井的井,日产原油 31.7 m³、天然气 56 m³,而用无固相清洁完井液完井的井日产原油 270.3 m³、天然气 560 m³。又有报道,用一般钻井液完井,单井最大原油日产量为 2.59 m³,而邻井改用 W/O 乳化钻井液完井,原油日产量提高到 45 m³。可见,设计合理的钻井完井液可大幅度减小油气层损害,提高油气井产量。在钻井、完井、修井等作业过程中,如何保护好油气层是一项十分重要而又紧迫的任务,多年来一直为许多产油国家和石油公司所重视。比如:美国石油工程师协会(SPE)从 1974 年起每两年举行一次油气层损害的学术会议,至今已发表数百篇有关这方面的论文。前苏联使用低质量钻井完井液完井使产能普遍下降 33%~50%。我国虽然起步较晚,但发展速度很快,特别是“七五”、“八五”、“九五”重点攻关以来,发展了自己的配套油气层保护技术,取得了很大的成就。油气层一旦受到损害,恢复到原来水平是相当困难的,因此在各作业环节实施良好的油气层保护技术具有十分重要的意义。

表 1-1 建井和开采的各个不同阶段油气层损害严重性相对大小(据 J. O. Amaefnle 等)

问题类型	建井阶段			油田开采阶段			
	钻井固井	完井	修井	增产	中途测试	开采	注液开采
钻井液固相颗粒堵塞	****	**	***	—	*	—	—
微粒运移	***	*****	***	*****	*****	***	*****
黏土膨胀	****	**	***	—	—	—	**
乳化堵塞	***	*****	**	*****	*	*****	*****
润湿反转	**	****	***	*****	—	—	***
相对渗透率下降	**	***	*****	***	—	**	—
有机垢	*	*	***	*****	—	*****	—
无机垢	**	***	*****	*	—	*****	***
外来颗粒堵塞	—	*****	***	***	—	—	*****
次生矿物沉淀	—	—	—	*****	—	—	***

续表 1-1

问题类型	建井阶段			油田开采阶段			
	钻井固井	完井	修井	增产	中途测试	开采	注液开采
细菌堵塞	**	**	**	—	—	**	*****
出砂	*	***	*	*****	—	***	**

注：“—”表示不存在该类储层损害；“*”表示存在该类储层损害的严重程度。

国外在认识、研究和防止油气层损害的过程中，随着问题的深入、技术的进步，对防止油气层损害的研究大致经历了三个阶段，见表 1-2。

表 1-2 国外油气层保护技术的发展历程

时 间	技术发展阶段	发展原因	技术发展水平	存在的问题
20 世纪 50 年代	认识阶段	石油价格低、基本忽略油气层损害的问题	有些学者开始提出油井投产时存在油气层损害问题	重视降低原油成本，忽略提高油井产量
20 世纪 60~70 年代中期	初级阶段	西方国家出现能源危机，油价上涨，开始重视防止油气层损害，提高油井产量	运用实验室研究分析手段，研究油气层损害机理，开始研究无损害工作液和添加剂，以及有关的配套工艺	主要体现在实验室工作上，各研究成果对现场有一定应用，但未进行大面积使用
20 世纪 70 年代中期至今	发展阶段	认识到油气层损害的严重性，轻者使油气井产能下降，重者使油气井不出油气	每两年召开一次油气层损害会议，继续加强实验室分析研究工作，将研制和发展的无损害工作液、添加剂，以及有关配套工艺技术运用到现场，并收到良好的技术经济效益	仍有一定程度的工作量停留在实验室里，研究成果在现场得到不同程度的应用，在应用中尚有不足之处，有待进一步研制和发展

油气层损害损失油气资源，增加生产成本，因此对石油天然气工业来说是一个非常复杂而严重的问题。在钻开油气层之前，油气藏岩石及其矿物组分和其中所含流体基本处于一种物理的、化学的、热动力学的和水动力学的平衡状态。油气层损害可以由物理的、化学的、生物的及其复合作用产生。在钻井、完井、采油、增产、修井等作业中都有可能破坏这种平衡状态，从而导致油气层损害。

近年来的理论研究、科学实验和生产实践使我们认识到保护油气层技术是一项极为重要的技术，是一项保护油气资源和“少投入、多产出”的重要技术，是一项涉及多学科、多部门、多专业的系统工程。

第一节 油气层保护技术的意义和定义

石油天然气勘探开发工作者，首先要懂得保护油气层技术的重要性和必要性，认识油气层被损害的原因，明确保护油气层防止损害技术的基本概念。

一、研究保护油气层技术的重要性

国内外大量生产实践表明油气层损害可导致以下结果：

- ① 降低产能及产量，影响试井与测井资料解释的正确性，严重时可导致误诊、漏掉油气

层甚至“枪毙”油气层,还会造成储量和产能估算不准,影响开发方案的合理制定等。

② 增加试油、酸化、压裂、解堵、修井等井下作业的工作量,从而增加油气生产成本;特别是在低油价时,如果井下作业技术费用过高,就不能进行井下作业甚至被迫停止油气生产。

③ 影响最终采收率,即损伤油气资源。任何一个国家,任何一个油田,资源(即储量)总是有限的。特别是随着油气藏剩余储量的减少和勘探开发成本的增加,油气迟早要达到或接近临界盈利状态,油气层损害往往增加井下作业次数,从而产生经济损失。

④ 油气层损害的结果还不只是上述三方面。从理论上讲,油气层的损害有可能是无限的,而增产措施的效果是有限的,且很难达到一口井原始的潜在产能。

同时,油气层被损害后,不得不采用酸化等措施来处理和改善,这不仅要关井停产,还要付出相当高的作业费用。特别是在海洋和沙漠等石油开发区和地面作业环境恶劣的情况下,以及深井、超深井开发条件下,作业费用往往很高,以至于在生产中不可能采用井下作业措施来改善已被损害的油气层。这就更加说明了保护油气层防止油气层损害的重要性。

二、油气层损害的定义

油气层损害一词来源于国际上英文通用词“Formation Damage”(地层损害),严格来说,应该指油气层损害。

油气层损害的原因是复杂的,认识油气层损害需要多学科的知识,主要有矿物学(特别是黏土矿物学)、岩类学和岩相学、无机和有机化学、油气层地质学、物理化学、胶体和界面化学、热动力学、油层物理学、流体力学、渗流力学以及钻井、采油、试井、开发、增产等专业知识。不同类型的油气层有不同的损害规律和特征,油气层损害存在于钻井、固井、完井、采油等各个作业环节中,从状态上说是离散的。油气层损害是动态的,其状态参数随油气层开采时间的变化而变化,油气层损害是可以控制的,但有时是无法恢复原始生产能力的。油气层损害的普遍性和复杂性决定了分析研究要用系统的观点,需要组织多学科的技术人员和统筹协调各个作业部门进行工作。

由于油气层损害的原因是复杂的,认识和诊断油气层损害需要多方面的知识,综合评价油气层损害要分析对比一系列评价参数。所以,为了科学地认识、诊断、评价、预防和处理好油气层损害,给油气层损害一个恰当而准确的定义是很有必要的。

理论和实践证明,在油气层中的油气流入井底的过程中,压力损失集中在井底附近的近井壁带。这也就告诉我们近井壁带连通条件的好坏,该区实际渗透性的好坏,即被损害的程度或受保护的效果,对油气井的生产乃至油气层的采收率都有着极其重要的意义。所以,近井壁区是一个很重要的、需要认真研究的区带。据此,我们认为油气层损害较确切的定义为:任何阻止流体从井眼周围流入井底的现象均称为油气层损害。或在钻井、完井、井下作业及油气田开采全过程中,造成油气层渗透率下降的现象称为油气层损害。

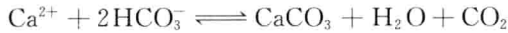
保护油气层技术要区别不同类型油藏的特点,具有针对性,并在弄清油气层特性的基础上,在查实损害原因的前提下,配套优化各项作业技术,将油气层损害减小到最低程度。

三、油气层损害的原因

油气层损害的原因是多方面的,也是复杂的,但是必须找出原因准确判断才能进行有效预防和处理,举例如下:

美国阿拉斯加北坡沿岸 Prudhole Bay 油田,在开发不久发现一些油井产量急剧下降,

年下降率为 50%~70%，而其他一些油井产量的年下降率仅为 10%~20%。经过仔细观察，发现了碳酸钙在井筒附近岩层里沉淀是造成损害的主要原因。该油田产层的地层水含 200 mg/L Ca^{2+} 和 2 000 mg/L HCO_3^- ，在油藏原始情况下，它们与地层里的二氧化碳和碳酸钙处于平衡状态，可用下式表示：



随着油田的开发，油藏压力降低， CO_2 压力也降低，上式的平衡由左向右产生化学反应，就生成了 CaCO_3 沉淀：



找到原因后，便可对症下药，通过向油藏注入 CO_2 使油藏压力恢复，该油田有些区块的生产逐步恢复了正常。这个例子有力地说明油藏原始平衡状态的破坏往往会导致油气层损害。

表 1-3 是 Basan 1985 年对油气层损害的类型及原因的归纳和分类，这属于经验性总结分析。

表 1-3 油气层损害的类型与原因

损害类型	产生原因
毛细现象：① 相对渗透率受影响；② 润湿性受影响；③ 孔隙液锁	① 在孔隙中水、油、气的相对含量改变；② 表面活性剂侵入；③ 黏性流体侵入
固相侵入	有机和无机微粒侵入
结垢	盐的沉淀
岩石的损害：① 分散运移；② 微粒运移；③ 矿物沉淀；④ 晶格膨胀；⑤ 非胶结	① 离子环境改变；② 胶结颗粒的松散溶解；③ 矿物的溶解及重新化合；④ 过多的水进入晶格；⑤ 地层结构疏松

从美国岩心公司对全世界约 4 000 口井的资料分析得到各损害因素对各作业环节油气层损害严重性的相对排序(表 1-1)可知，微粒运移不仅在各种作业阶段都可能发生而且是最普遍、最严重的，其次是乳化堵塞和水锁，再次是润湿反转和结垢。(需要指出，表 1-1 中所列的 12 种损害中每一种都至少在某一两个作业条件下出现 4 个“*”号，所不同的只是这 4 个“*”号的出现与发生几率。)

大量文献资料从以下几方面阐述了油气层损害的原因：

① 在油井建成(钻井、完井、修井、增产作业)和油藏开采(测试、一次采油、二次采油、三次采油等)期间的任何阶段都有可能发生油气层损害，表 1-4 概括地说明了各作业环节对油气层的潜在损害原因及一般性预防、处理方法。

表 1-4 各作业环节对油气层的潜在损害问题

生产作业	损害来源及机理	预防及处理方法
钻开油层	① 井内压差对油气层损害的影响最大。Alaska 某油田将压差小于 10.34 MPa 钻成的井与压差大于 10.34 MPa 钻成的井相比，其产能平均高于 320 m ³ /d。在碳酸盐地层由于正压差过大可能造成井漏(随后必然要堵塞)，这往往会导致严重损害；而负压差过大可能造成井喷(随后必然要压井)，这往往也导致严重损害。② 井液滤液与产层接触，产生水敏、速敏、盐敏等效应。③ 完井液中固相侵入带有孔隙或自然裂缝的地层，侵入深度达几厘米到几十厘米，损害渗透 10%~100%，这取决于颗粒侵入的深度。④ 环空流速过大，冲蚀井壁，井径扩大，井内固相含量增加。⑤ 浸泡时间过长	① 用平衡钻井或近平衡钻井的工作方式。② 用优质完井液：a. 不损害油层的无固相清洁液或低固相完井液；b. 酸溶的完井液；c. 无固相高密度盐水完井液；d. 必要时使用特种钻井液、完井液。③ 注意工作液的配伍性。④ 控制合理的环空返速，防止井径扩大，保证井下正常。⑤ 提高钻速，减少非生产时间，缩短油气层浸泡时间

续表 1-4

生产作业	损害来源及机理	预防及处理方法
注水泥	<p>① 因压差更大、水泥浆失水大,更易使油气层中的黏土膨胀、分散。② 水泥浆或钻井液中的固体颗粒堵塞油气层孔隙或裂缝。③ 水泥浆颗粒进入油气层的裂缝或孔隙中水化后固结成水泥石,损害油气层。④ 水泥浆滤液与地层中的硅起化学反应形成一种胶结化合物——硅酸钙水化物</p>	<p>① 研制与使用低密度水泥。② 用降失水剂控制水泥浆失水量。③ 加入惰性添加剂,起桥接作用;调整密度,减少 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 过饱和的可能性</p>
射 孔	<p>① 射孔过程所造成的孔眼周围的压实损害。② 压差影响。③ 射孔孔径、射孔密度、射孔穿透深度等射孔参数的影响。④ 射孔液质量的影响</p>	<p>① 采用负压射孔,合理的负压值是确保孔眼完全清洁的重要条件。合理的负压值应根据油气层条件而确定,最好是用岩心靶流动实验来确定。② 使用深穿透射孔技术使射孔深度能穿透损害深度。③ 使用优质射孔液。④ 优化射孔参数</p>
试 油	<p>① 试油方式及作业参数不当(例如压力、压差、流量等)可能造成速敏。② 试油作用有时也造成乳化堵塞、水锁及沉积物堵塞等损害。③ 试油作业时间过长也可能损害油气层</p>	<p>① 正确选用试油作业时的作业参数。② 试油作业时尽量使用高密度压井液,并使用优质工作液。③ 在全面完成试油要求的前提下,尽量缩短试油作业时间</p>
采油、气 作业过程	<p>① 油层中微粒运移、疏松砂层、粉砂、钻屑、黏土颗粒、各种砂屑及胶结物不同程度地堵塞油层。不恰当地强采强注往往激化微粒运移等,在成岩性差的油气层中尤易发生。② 无机结垢的形成和堵塞。美国阿拉斯加州 Prudhole 湾有一些投产不久产量急剧递减的井就是由于 CaCO_3 的沉淀和地层水形成水垢引起的。③ 有机结垢物的形成和堵塞,统称为石蜡。包括石蜡的主要组成部分直链烃到非石蜡的沥青。④ 铁锈及铁锈抑制剂、腐蚀抑制剂、石蜡抑制剂进入地层后对渗透率均有影响。⑤ 出砂乳化堵塞和水锁等,使油层有效渗透率明显下降</p>	<p>① 加强油藏动态分析研究,有针对性地选择方法和各类防垢剂。加深穿透深度能有效地解决无机结垢损害,酸洗射孔眼是清除水垢损害和提高短期产能的经济方法。② 防止微粒的办法:a. 黏土稳定剂(羟基铝、锆);b. 用氢氟酸、混合酸酸化地层。③ 选择合适的排液速度,以免引起速敏效应</p>
注 水	<p>① 注入水质不配伍往往发生水敏、水锁、润湿反转和乳化堵塞等损害,注入水悬浮粉砂、黏土、结垢油和细菌以及不同水质之间发生反应生成沉淀。② 注入速度过大,超过临界流速往往造成微粒运移和速敏损害等。③ 腐蚀产物如铁。④ 注气堵塞(注气保持压力作业时,不在气体进入井口前清除压缩机润滑油使表面堵塞)</p>	<p>① 用井下及地面过滤器,先进的精细过滤器可除 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒。② 严格检查水质。③ 因采油后期油层物化条件变化引起结垢,可应用防垢剂。④ 慎重选择高压注水方法</p>
修井与 再修井	<p>① 修井用的液体,如矿场水、油、配制的水、混合水、炼制油等质量易变化,严重影响作业效果,造成的损害较钻井液还严重。② 微粒、乳化油、添加剂、沉淀的有机物和无机物、与地层不配伍的水都会严重影响渗透率。③ 原油沥青、氯化物、树脂、含蜡原油、含污染物的工业盐制成的盐水都严重影响渗透率</p>	<p>① 使用与地层相配伍的液体。② 使用过滤器清洁入井液体。③ 减少压差,减少失水。④ 用混合酸或刮管器清洗入井管柱</p>
压 裂	<p>① 裂缝支撑剂中的堵塞是严重影响裂缝导流率的因素,如压裂残渣、凝胶团块、断不开的黏性液块、捕集剂和降失水剂。② 裂缝闭合使产能下降:a. 支撑剂嵌入或破碎;b. 微粒运移,使有效孔隙率下降。③ 某些地层需要抑制剂防止裂缝壁堵塞</p>	<p>① 使用必要的抑制剂,如氯化钾,防止微粒运移。② 选用合乎标准的支撑剂和压裂液。③ 使用铝矾土高强度支撑剂,若无铝矾土,可用细砂。④ 用清洁液作为压裂液,投入时尽可能控制排液速度,不能放喷</p>
酸 化	<p>① 氢氟酸反应产物沉淀,地层中的含钙矿物和钠黏土与酸反应形成不可溶的沉淀。② 酸化砂岩地层伴随释放出细小的颗粒和地层坍塌,其原因:a. 微粒运移和桥堵;b. 稳定原油乳化剂。③ 酸不能穿透岩石或结垢表面上的有机覆盖层而处理失败。④ 不干净的管柱是酸化堵塞物的一个来源。⑤ 酸化碳酸盐岩释放颗粒。⑥ 铁反应物的沉淀,特别是氢氟酸反应物堵塞油层。⑦ 胶体残渣的堵塞、酸与原油接触减小了它的 pH 而生成主要与沥青质、树脂、石蜡和其他高分子烃组成的沉淀</p>	<p>① 盐酸预冲洗其他可溶于酸的盐。② 常用互溶剂(油、水)减少左栏①②的影响。③ 用溶剂或酸-溶剂混合物预冲洗有效覆盖层。④ 保持 $\text{pH} < 5$,避免铁的沉淀物生成;采用多价螯合剂可防止沉淀发生。⑤ 酸的浓度不宜太大。⑥ 深井处理加乳化剂。⑦ 使用配伍性好的混合酸液。⑧ 清洗注入管柱,保证管柱干净</p>

② 在各种井下作业过程中,各种工作液要有一定的密度,通常用固相颗粒来调节工作液的密度,因此在工作液中都有一定数量的固相颗粒,以及钻屑和井壁垮塌物等。井眼周围的油层孔隙很容易被这些外来的固相颗粒堵塞。若井内流体中固相颗粒的尺寸分布与油藏岩石孔隙尺寸分布不相匹配,固相颗粒就会侵入油藏岩石中。在低孔低渗层这种固相颗粒的侵入带,井眼周围往往只有1~2 cm,甚至几个毫米,而在中高渗透和有裂缝的地层,侵入深度有时可达1 m以上,在裂缝和溶洞发育的地层或由于井漏等原因能导致固相颗粒侵入到地层更深处。

③ 许多油气层损害问题都是由外来液体与油气层内液体、外来液体与油气层岩石的相互作用造成的。例如:水相流体的滤液侵入井眼附近区域,使得含水饱和度增加甚至超过原始饱和度,导致碳氢化合物的相对渗透率降低和侵入深度达1~2 m的地带毛管性能改变。因此,若井眼需要再次投入生产,只有把外来水除掉才能进行工业性油气开采,而这是很困难的。另外,水相滤液能活化任何水湿微粒并导致微粒运移问题。

④ 如果滤液的化学性质(离子浓度、组分和pH)和地层流体的化学性质不完全相同,那么岩石孔隙网格中任何膨胀性黏土如蒙脱石、伊蒙混层都会发生膨胀、分散、运移;非膨胀黏土如高岭石也能分散,且易和其他微小颗粒一起随流动着的流体而运移,从而堵塞有效的流动通道。在采油过程中,热动力学和水动力学条件的微小变化都会导致微小颗粒的沉积和运移。

⑤ 入侵的滤液与地层流体化学特性的差异可能会发生有害的化学反应,从而产生有机垢(石蜡、沥青质)和无机垢(CaCO_3 、 BaSO_4 、 SiSO_4 、 FeCO_3)。

⑥ 油田上不同作业过程中经常使用的许多化学添加剂(乳化剂、防腐剂、除氧剂、碱度控制剂和杀菌剂)如果配伍性不好,亦能与地层流体、岩石发生有害的化学反应,从而改变油水界面张力和地层岩石的润湿性。这种变化必然降低碳氢化合物在近井壁附近侵入带的有效渗透率。

⑦ 伴随这些表面性能和界面性能改变而来的是外来油与地层水或外来水相流体与地层中的油混合,形成油或水作为外相的乳化物(即油包水或水包油的乳化物、乳状液)。这些乳状液在有乳化剂、微粒及黏土颗粒时能稳定存在,比孔喉尺寸大的乳状液滴能堵塞孔隙、增加黏度、降低碳氢化合物的有效流动能力,从而损害产能。

⑧ 如果增产作业及参数(如酸化、压裂参数)和完井作业及参数(如射孔密度、设计流速参数)相对于油气层岩性不是最优的话,就会对油气层造成进一步的损害。用HF/HCl酸化砂岩骨架颗粒将会释放出矿物微粒,产生沉淀反应物(氟化钙、氢氧化铁、氟硅酸钾钠)。

⑨ 水泥浆对油层的损害究竟有多大,是一个比较复杂的问题。水泥浆的滤失量(特别是初始滤失量)比钻井液失水量要大得多。更糟糕的是,水泥浆滤液往往具有高浓度的钙离子和氢氧根离子($\text{pH}>12$),这种滤失量很大的水泥浆要比滤失量小得多的后置水泥浆先在油气层段循环、接触。水泥浆滤液(甚至水泥颗粒)增加了对油气层的损害程度,从而导致水泥浆对油层的损害不一定轻于钻井液对地层的损害,这在裂缝性油气层中尤其突出。更值得注意的是,大量水泥浆(而不只是水泥浆滤液)可能漏失到油、气生产层中去。而水泥浆漏失的原因,预防措施和情况、方法都不同于钻井液滤液的侵入。挤水泥作业也往往使油气层受到不同程度的损害。水泥浆滤液侵入造成油气层内部黏土矿物的膨胀、絮凝可能导致水泥浆滤液与地层水反应生成沉淀物以及水泥浆滤液与钻井液滤液相互作用,因化学反应生

成沉淀等影响。关于注水泥浆的注替速度问题,过去多数人认为要保持足以形成紊流流态的注替速度,因为紊流有助于提高顶替效果,有助于提高固井质量。最近有人认为注水泥浆的注替速度如果过高,在紊流状态下会使滤失量猛增,所以不期望井下出现紊流。从保护油气层的角度来说,这是需要研究的新课题。

需要指出,固井过程中水泥浆对油气层的损害也可能要比钻井液对油气层的损害小。其中的原因之一是在水泥浆滤液进入地层以前,钻井液滤液已进去了一部分,这就使得水泥浆滤液不像钻井液滤液那样容易进入。另一个原因是水泥浆凝固前在井下的时间短,故对油气层造成损害的时间是有限的。还有一个原因是因为水泥浆滤液中钙离子浓度高,所以它比钻井液对油气层的损害小。

关于井壁上的泥饼,长期以来从提高水泥环与井壁的紧密固结作用来看,宜在注水泥前使用刮泥器或其他方法将泥饼刮去。但是,从保护油气层的角度来说,泥饼在控制水泥浆对油气层损害方面是有好作用的,所以不应该在油气层段使用刮泥器而应尽量保护好钻进过程中已经形成的优质泥饼。为了兼顾这两方面的要求,特别是从保护油气层技术来说,在油气层段,使用暂堵技术在油气层近井壁带形成质量很好的内泥饼就很有必要了,这样即使使用刮泥器刮掉井壁上的外泥饼,也不会引起水泥浆对油气层的损害。

总之,水泥浆对油气层的损害是一个多因素的复杂问题,而这方面的研究工作较少,所以更需要开展这方面的研究工作。

张绍槐、罗平亚曾把油气层损害原因概括为下述四个方面:

① 油气层本身黏土含量高,黏土中易吸水膨胀、水敏性强的黏土(如蒙脱石或伊蒙混层)比例大,外来液体(与地层水矿化度不同的水基液)侵入后引起油气层内黏土膨胀,堵塞孔隙(尤其是孔喉部位),降低岩石的天然渗透率。酸敏性矿物(如含铁的绿泥石)遇配伍性差的酸液就引起酸敏,也会降低渗透率。油气层岩石的润湿性以及毛细效应引起油气层中形成残余水带等都将降低渗透率。

② 固体颗粒堵塞,尤其是堵塞孔隙喉道,降低原始渗透率。这又有两类情况:

- a. 外来颗粒(如钻井液中的有害固相颗粒、水泥微粒等)的侵入。
- b. 在成岩性差及非胶结性、弱胶结性的砂岩油气层中,由于速敏效应(流体流速过大,超过某一临界流速后,油气层本身的微粒脱落)导致油气层部分胶结不好的微粒运移,堵塞孔隙及孔喉。

③ 由于工作液与地层流体的不配伍性,或由于生产过程导致温度、压力变化在油气层内产生化学反应,形成沉淀、结垢以及稳定的油水乳化物。

④ 由于施工作业不当或发生井下事故等工程原因,使油气层不正常裸露、浸泡时间过长以及压力波动等也会导致油气层损害。在碳酸盐岩油气层中由于“井漏—堵漏”以及“井喷(井涌)—压井”等不正常作业往往严重损害油气层,这就成为碳酸盐岩地层油气藏钻井和开发各作业中的难点和损害特点。

以上初步从理论上原则性地说明了油气层损害的各种可能原因。在工作中要根据具体的油藏类型有针对性找出每个油层损害的可能原因并通过油层敏感性(水敏、酸敏、速敏等)评价实验对每一个油层进行具体的诊断,从而准确找出具体的原因,为制定有效的预防和治理技术措施提供可靠的依据。

第二节 保护油气层防止损害技术的主要内容

20世纪80年代以来保护油气层技术在国际上已发展成为包括在钻井、完井、采油、增产等油气生产作业全过程中对油气藏预防损害、进行保护和有效处理的一项重要技术。

一、保护油气层技术所涉及的技术范围

保护油气层技术是一项多因素多学科的综合配套技术,它所涉及的技术范围很广,主要内容有以下18个方面:

- ① 油气层岩石学、岩相等地质学的研究。
- ② 油气层特性、油(气)藏研究。
- ③ 生产试井(含完井测试、投产测试)。
- ④ 钻柱测试(DST),我国目前已推广江斯顿测试。
- ⑤ 固井作业和补注水泥作业。
- ⑥ 完井及再次完井设计和计划。
- ⑦ 井底结构的选择、设计和完井装置设计。
- ⑧ 射孔(配套)技术。
- ⑨ 钻井液、完井液、再次完井液、修井液等(共6种工作液)。
- ⑩ 防止油气层损害的机理研究及评价标准与方法。
- ⑪ 测井作业(含裸眼和套管内测井)。
- ⑫ 生产测井(即开发测井)。
- ⑬ 油井诊断与分析(包括用人工智能、专家系统进行诊断分析)。
- ⑭ 防砂及各种井底结构(井底装置)。
- ⑮ 油井处理(包括增产及生产处理)。
- ⑯ 控制腐蚀与结垢。
- ⑰ 作业的经济评价。
- ⑱ 油藏工程研究。

油井的每一个作业环节都可能使油气层受到损害。在整个生产过程中油气层各个油藏的物理参数都是变化的,是个动态过程。越到油井生产后期,随着油田和油井的老化,越需要更加仔细地、更加精心地研究。所以“损害—保护”的研究范围和保护技术配套措施是广泛的而不是狭窄的,是动态的而不是静态的。

二、保护油气层技术的主要内容

1. 岩性测定与分析工作

要求在油气层段选取有代表性的岩心并正确进行岩样的钻取和岩样处理。按油藏类型和区块做全剖面(油气层整个连续剖面)和岩心全性能测定、分析工作。这是一项重要的基础工作。

全性能是指岩性(岩相学)、物性、电性、化性(油、气、水流体性质)、表面性质及力学性质

等参数。

前苏联有些著作提出应按下列次序确定其性质：

- ① 孔隙度及储藏能力。
- ② 渗透率及流通能力。
- ③ 毛管压力和饱和度。
- ④ 孔隙率与渗透率、饱和度和渗透率等的相互关系。
- ⑤ 岩性系数及由 X 衍射仪、电镜和铸体薄片等测定的岩性。
- ⑥ 电性。
- ⑦ 一些新的测定方法,如用 X 射线确定饱和度等(其他现代实验方法,如 CT 扫描技术等)。
- ⑧ 用数据统计原理(求其平均值)找出规律性。
- ⑨ 储量计算。

当前国内外普遍把岩心测定分为三大类。

(1) 普通(常规)岩心分析技术。

普通岩心分析技术包括：

① 常规岩心分析。主要测定孔隙率、渗透率、饱和度等油气层的物理参数;还要分析测定地层流体(油、气、水)的性质。

② X 衍射分析。它除了能鉴定一般矿物外,在对微量细分散的黏土矿物及黏土矿物的内部结构分析方面尚有独特之处。例如,弄清油气层中常见的混层黏土矿物的种类及混层比,以及其中膨胀层所占的比例等。又如能分清绿泥石是二八面体的还是三八面体的(前者是含铁绿泥石,后者几乎不含铁),这就避免一提绿泥石就认为是酸敏的,必然产生 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀的错误结论。它还能测黏土矿物的相对含量及绝对含量,以及非晶质的黏土矿物等。往往要求多次使用 X 衍射分析以配合“三敏实验”进行分析等。

③ 扫描电镜分析。能搞清岩石中矿物的直观形态分布以及孔喉(大小、部位),特别是微孔的类型、大小、连通情况及堵塞情况。在保护油层的室内实验技术中,往往要求多次使用电镜对原始(天然)岩心、污染岩心、保护措施后的岩心等不断进行对比,并配合“三敏或五敏实验”进行分析、评价。

④ 薄片分析。这是最普通、最常用的方法。只是在保护油气层技术中要与“三敏实验”配合并从油气层敏感性角度去观测、分析应得到的信息。薄片分析主要包括偏光薄片分析与铸体薄片分析。

⑤ 化学分析。

⑥ 毛管压力分析(含压汞法及高速离心机毛管压力驱动实验,是一种新的快速评价方法)。用离心法测定毛管压力可定性评价系列流体对地层的损害。实验结果表明离心法毛管压力评价油气层损害的结果与流动实验中的系列流体连续接触实验的趋势是一致的,但不完全符合。这是由于实验中所用的钻井液滤液和完井液滤液大多含有聚合物,溶液的黏度与地层水和注入水的黏度相差较大,而这一因素在计算中未被考虑,使结果有一定偏差。也有人把毛管压力分析列入特殊岩心分析。

普通岩心分析要求弄清楚 15 方面的问题:① 油气层矿物类型;② 黏土类型;③ 孔喉大小、形状;④ 矿物成分及含量;⑤ 黏土化学成分;⑥ 岩石结构;⑦ 基质分布及其成分;⑧ 黏土矿物及敏感性矿物形态分布;⑨ 不同碎屑岩粒度分布(曲线);⑩ 胶结物成分及其分

布;⑪ 孔隙率及储藏能力;⑫ 渗透率及流通能力;⑬ 毛管压力及饱和度;⑭ 孔-渗、饱-渗等的相互关系;⑮ 岩性、电性等参数、系数。

(2) 特殊岩心分析技术。

特殊岩心分析技术包括:① 静态与动态的敏感性(水敏、速敏、盐敏、酸敏、碱敏)实验;② 当量液体渗透率实验;③ 体积流量评价实验;④ 系列流体渗透率评价实验;⑤ 双向(正、反向)流动相对渗透率实验;⑥ 润湿性实验;⑦ 盐度评价实验;⑧ 钻井液损害评价。

(3) 新的分析研究技术。

近几年国内运用和引进了其他行业的先进技术来分析研究岩心和油气层,主要有下面三种:

① 微模型可见实验技术。微模型由两块玻璃板组成,其中一块用化学腐蚀剂的方法把真实岩心的孔隙结构“模刻”其上(属二维平面结构);另一块玻璃板上有进、出孔,以便实验液体和颗粒流进和流出。微模型还可制成层状模型和动滤失模型,以期模拟增产措施中的分层堵塞和钻井施工中的动滤失条件等。微模型块装在一个专门的夹持器里使之密封。实验时用光学显微镜监测并记录在录像磁带上。这种微模型利用可见实验技术可以研究固体颗粒在孔隙介质中的运动情况,可以观察研究内、外滤饼的形成过程,可以研究液流(及含有携带固相颗粒时)在孔隙介质中的(正向、反向)流动状态等。

② CT(Computerized Tomography)。CT扫描技术是用医学上的CT机进行岩性和有关“损害—保护”效果分析的最新实验方法之一。它的主要原理是用X射线照射岩心,得到岩心断面(剖面)上各种岩石颗粒成分的密度数据,构成数值矩阵,再由计算机将此数值矩阵转变成岩心剖面图(显示在荧光屏上,可放大,也可储存)。它可以在不改变岩石外部形态也不改变其内部结构的条件下用X光CT扫描观察岩石的内部结构及其变化。它不仅可以在分析测定岩石的组织结构、成分,还可以观测钻井液等外来液体及固相颗粒侵入岩样的深度、广度以及侵入的空间形态,可以观测岩样被液体浸泡之后孔隙间的变化。

③ 核磁共振扫描成像技术(Nuclear Magnetic Resonance Imaging, NMRI)。这是近年化工和化学界的最新技术,现已用来研究油气层损害和评价油气层保护技术。这种新一代的核磁共振扫描成像技术比原有的核磁共振仪更为先进,后者只能测样品的整体性能(信号),而前者可测样品的局部分布性能,即深入到被测样品的微观领域。使用NMRI可以微观地测试岩石孔隙或裂缝中流体的分布状态及流动情况。所以它比CT扫描技术可以更清楚地观察分析外来流体进入带有流体的岩石孔洞裂缝后所产生的影响,从而深入研究流体与流体之间、流体与岩石之间的相互作用问题,以及润湿性和润湿反转问题、界面张力问题。还可以分析水驱油(或两种流体驱动)时油水界面的形状及动态变化状况等,是研究油气层损害和采收率的最新手段之一。

CT扫描和NMRI扫描技术都是三维的,这比X衍射、电镜等的平面功能好得多。国外研究工作者认为CT扫描技术用于观察、测试、分析样品的骨架部分时更有效,而NMRI扫描技术用于观察、测试、分析样品孔洞、裂缝中的流体部分时更有效。两者不是谁代替谁的问题,而是需要把它们结合起来加强微观领域的深入研究。

2. 损害机理的研究

损害机理研究主要有三方面的内容:

① 从理论和实验技术上弄清各类地层造成损害的可能性(可能的原因)。这就好像医