

保护油气层技术

◎ 主编 吕开河



中国石油大学出版社

保护油气层技术

常州大学图书馆开河
藏书章

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

保护油气层技术/吕开河主编. —东营:中国石油大学出版社,2010.9

ISBN 978-7-5636-2797-4

I. ①保… II. ①吕… III. ①油层—保护②气层—保护 IV. ①TE258

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 169177 号

书 名: 保护油气层技术
主 编: 吕开河

责任编辑: 刘 云 (电话 0532—86981530)

封面设计: 赵志勇

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: suzhijiaoyu1935@163.com

印刷者: 青岛锦华信包装有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社 (电话 0546—8391809)

开 本: 185×260 印张:16.25 字数:405 千字

版 次: 2010 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 22.00 元

前言

PREFACE

《保护油气层技术》主要是为石油高等院校石油工程专业本科生和相关专业研究生编写的教材,也可作为从事石油与天然气钻采工作的现场技术人员、管理人员和有关科研院所研究人员的参考用书。

本书共有八章,主要内容包括:绪论、油气层损害机理、油气层损害的评价实验、钻井过程中的保护油气层技术、完井过程中的保护油气层技术、采油与注水过程中的保护油气层技术、井下作业过程中的保护油气层技术和油气层损害的现场评价技术等。其中第一章至第三章为基础部分,主要介绍油气层保护的概念、损害机理及评价技术;第四章至第七章主要针对不同的石油工程作业过程,介绍不同作业过程中的油气层损害机理及配套的保护技术;第八章主要介绍油气层损害的现场评价技术。

在本书的编写过程中,我们收集和参考了大量国内外文献,汇集了本学科近年来的新技术和新成果,突出系统性、实用性和新颖性。本书力求用比较精炼的语言,准确地阐述保护油气层技术的基本原理和技术要点,以便使学生通过课堂教学和自学,能在较短时间内达到教学计划的要求。本书的特点是理论联系实际,并尽力反映该项技术的近期研究成果和技术进展。

本书在编写过程中得到邱正松、蒋官澄和樊泽霞等专家的热心指导,在此向他们表示衷心的感谢。

由于本书涉及领域较广,且作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者
2010年8月

目 录

CONTENTS

第一章 绪 论	1
第一节 保护油气层的重要性.....	1
第二节 保护油气层研究的思路.....	2
第三节 保护油气层技术发展概况.....	4
第二章 油气层损害机理	7
第一节 固相颗粒堵塞造成的油气层损害.....	7
第二节 外来流体与油气层岩石不配伍所造成的损害	14
第三节 外来流体与油气层流体不配伍所造成的损害	37
第四节 岩石毛细管阻力造成的油气层损害	58
第五节 应力敏感性损害	61
第三章 油气层损害的评价实验	64
第一节 评价实验的目的、程序及方法.....	64
第二节 岩心分析实验	67
第三节 岩心流动实验	93
第四节 辅助实验.....	108
第四章 钻井过程中的保护油气层技术	110
第一节 钻井过程中油气层损害原因及影响因素.....	110
第二节 保护油气层的钻井液技术.....	114
第三节 保护油气层的钻井技术.....	144
第四节 保护油气层的固井技术.....	154
第五章 完井过程中的保护油气层技术	165
第一节 完井方式的选择.....	165
第二节 裸眼完井的保护油气层技术.....	166
第三节 射孔完井的保护油气层技术.....	169
第四节 防砂完井的保护油气层技术.....	177
第五节 试油过程中的保护油气层技术.....	188
第六章 采油与注水过程中的保护油气层技术	189
第一节 采油与注水过程中油气层损害的特点.....	189
第二节 采油过程中的保护油气层技术.....	190

第三节	注水过程中的保护油层技术	199
第七章	井下作业过程中的保护油气层技术	207
第一节	酸化作业中的保护油层技术	207
第二节	压裂作业中的保护油气层技术	218
第三节	修井作业中保护油气层技术	226
第八章	油气层损害的现场评价技术	238
第一节	油气层损害现场评价的重要性	238
第二节	油气层损害的试井评价	239
第三节	油气层损害的测井评价	242
第四节	油气层损害的生产动态评价	248
参考文献	251

第一章 绪 论

生产实践表明,在钻井、完井、修井以及增产措施等施工过程中,都有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,导致油气资源的浪费及开发成本的提高。而油气层一旦受到损害,恢复到原来的水平是相当困难的,因此,在作业过程中保护好油气层至关重要。

第一节 保护油气层的重要性

一、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”。油气层损害是指当进行钻井、完井、采油、增产和修井等各种作业时,在油气层造成流体(包括液流、气流和多相流,也可能在流体中还含有固体微粒)产出或注入自然能力下降的现象。也有资料定义为,油气层损害是指在钻井、完井、修井等作业过程中,造成油气层渗透率下降的现象。

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、岩类学和岩相学、无机和有机化学、油气层地质学、物理化学、胶体与界面化学、动力学、油层物理学、流体力学、渗流力学以及钻井、完井、试井、开发、增产、修井等专业知识。

二、油气层损害的危害

国内外大量的生产实践证明,油气层损害可导致以下问题:

(1) 降低油井的产能和产量,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,还会造成储量估算不准,影响制定合理的开发方案。

(2) 增加试油、酸化、压裂、解堵、修井等井下作业工作量,因而提高油气井生产成本。如果由于油气层损害导致井下作业费用过高,有可能从经济上导致不能进行井下作业甚至被迫停止油井生产。

(3) 影响最终采收率,损失油气资源。任何一个油气田,其资源总是有限的。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,迟早要达到或接近临界盈利状态。油气层损害往往会增加井下作业成本,导致经济损失,加速油气田达到临界盈利状态,损失油气资源。

油气层损害后可通过一定的增产措施进行处理,降低油气层损害造成的影响。但增产

措施的效果是有限的,且很难达到一口井原始的潜能。同时,通过增产措施对油井进行处理和改善时,不仅要付出相当高的作业费用,还要关井停产,损失生产时间。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,以及深井和超深井的开发条件下,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。这说明保护好油气层是至关重要的。

三、保护油气层的重要性

保护油气层是指防止或避免油气层在各个作业环节中受到不应有的损害。保护油气层的直接目的就是保护产能和提高最终采收率。保护油气层的重要性主要体现在以下几个方面:

(1) 勘探过程中,保护油气层效果的好坏直接关系到能否及时发现油气层,并影响到能否对储量进行正确评价。

(2) 保护油气层有利于油气井产量及油气田开发经济效益的提高。

(3) 油田开发生产各项作业中,保护油气层有利于油气井的稳产和增产,实现少投入多产出的目标。

油气层损害尤其对中、低渗透性油气层的危害很大,对高渗透性油气层渗透率的影响也不可忽视。当损害程度严重时,有可能完全堵塞油气孔道,以致得不到任何油气显示。在这种情况下,要想进行有效的恢复是十分困难的,而且费用也是相当高的。因此,保护油气层技术已经成为当前石油工业中一项确保油气田高产、稳产的极为重要的关键技术。为了取得保护油气层的最终效益,需要将钻井、完井以及开采增产作为整体进行规划、分析和逐一治理,即必须将保护油气层作为一项系统工程来抓。

国内外不少实例已证实了生产过程中油气层损害存在的事实;同时也证明了,若采用保护油气层技术,就会增加油井产量,降低生产成本。

冀东油田高 94-1 井 1993 年进行过多次修井作业,由于采用高密度压井液,导致压井液大量进入油气层,使近井地带堵塞损害严重,后来采用解堵剂进行解堵作业,才逐渐恢复了 5~6 t 的日产能。

吐哈温米油田是一个低渗油田,依据开发方案设计,完井后需采用压裂投产。但该油田所钻 167 口开发井,从钻井到完井投产,全面推广应用与该油田油层特性相配伍的保护油层技术,射孔后全部自喷生产,单井产量比原开发方案设计产量提高了 20%~30%。

第二节 保护油气层研究的思路

一、油气层损害的特点

对石油天然气工业来说,油气层损害是一个非常复杂而且严重的问题。油气层损害具有以下特点:

1. 不同类型油气层具有不同的损害规律和特征

不同类型油气层具有不同的岩石学特征及孔隙和喉道特征,油气水性质也有很大的差异,故呈现出不同的损害规律和特征。进行油气层保护时,应针对不同类型油气层的特征,

有针对性地采取合理的技术对策和措施。

2. 油气层损害存在于石油工程的各个作业环节中

油气层损害的原因是十分复杂的,油气层损害存在于石油工程的各个作业环节中。建井和开采的各个不同阶段,油气层损害严重性的相对大小见表 1-1。

表 1-1 建井和开采的各个不同阶段油气层损害严重性的相对大小

损害类型	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	***	*****	***	*****	*****	***	*****
粘土膨胀	****	**	***	—	—	—	**
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	—	—	—	*****	—	—	***
细菌堵塞	**	**	**	—	—	**	*****
出砂	*	***	*	*****	—	***	**

注:“—”表示不存在该类油气层损害,“*”表示存在该类油气层损害的严重程度。

3. 油气层损害是动态的

油气田一旦投入开发生产,油层温度、压力以及其储渗特征都在不断地发生变化。如工作液与油气层粘土矿物不配伍,工作液进入油气层后,粘土矿物将发生水化膨胀、分散,引起油气层储渗空间减少,严重时堵塞孔道,导致油气层渗透率降低。

4. 油气层损害是可以控制的

在弄清油气层特性的基础上,查清油气层损害机理,制定出合理的保护技术措施并科学实施,可使油气层损害降至最低程度。

油气层损害的普遍性和复杂性决定了分析研究油气层损害问题要用系统的观点,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。

二、保护油气层的技术思路

保护油气层技术的制定,必须针对具体油气层类型,从油气层特性分析研究入手,以室内敏感性实验和模拟实验为基本依据,从机理上进行损害原因的诊断,从综合现场生产资料和测试评价资料出发,进行全面的调查研究。用系统工程和最优化的方法来制定施工设计和指导施工作业。保护油气层研究的技术思路如下:

(1) 首先分析油气层孔隙结构的特点,所含粘土矿物的分布、类型及数量,地层水的性质及各种微粒的类型,研究油气层中的潜在危害。

(2) 根据油气层的潜在影响因素,进行敏感性评价,确定出油气层的敏感程度。

(3) 从潜在影响因素和敏感性出发,研究油气层损害机理。

(4) 根据损害机理,研究或选择工作液的类型、成分,以及作业施工工艺技术;提出油气层保护技术措施。

(5) 按油田作业工序,逐一实施保护油气层措施。

(6) 用测井或试井的办法评价油气层保护技术的对应效果,由反馈效果定量研究机理,完善油气层保护技术。

可以看出,油气层敏感性评价是研究油气层损害原因和制定保护油气层工作液措施的重要基础。为了达到保护油气层的目的,在制定保护油气层技术时要做到以下几点:

(1) 不该进入的工作液、外来流体和固相,要使之不进入(至少要少进入)油气层。主要措施是确定合理的井身结构,采用欠平衡钻井,必要时采用屏蔽暂堵技术等。

(2) 不可避免要进入的流体应是良性的、配伍性好的,最好是无固相的;进入的深度应尽量控制在有限的范围内。为此,要做各种敏感性试验、系列流体渗透率评价试验等。

(3) 凡已进入油气层的流体和固相,能用化学方法或物理方法解堵、排液。

(4) 施工作业时,强化技术组织管理,力争减少井下事故和复杂情况,降低工作液对油气层的浸泡时间。

(5) 保护油气层要以预防为主,解堵为辅。由于油气层的渗透率一旦受到损害,很难完全恢复,有些损害无法进行解堵,即使可以解堵,但所花费的费用也很高。

第三节 保护油气层技术发展概况

一、国外保护油气层技术发展概况

保护油气层工作在国外起步较早,20世纪30年代,油气层损害的问题就引起了美国等一些产油大国石油公司的注意。50年代开始机理研究,至70年代中期,油气层保护影响加大。1974年,美国石油工程师学会(SPE)召开了第一届“控制地层损害国际会议”,此后每两年召开一次,国际油气层保护研究工作从此纳入了正规化的发展轨道。根据历届会议发表的论文内容和数量统计,国际油气层保护技术的发展大致可分为三个阶段。

1. 20世纪70年代前

20世纪70年代前的油气层保护以钻井、完井液基本成分损害特征为主要研究内容。这个阶段的机理研究工作进展缓慢,只限于经验性和定性的阶段;评价油气层损害的方法主要以岩心流动试验为基础;钻井液、完井液技术发展较快。深井钻井液、石膏钻井液、氯化钾钻井液及乳化钻井液都是这个阶段发展起来的。

2. 20世纪80年代

20世纪80年代是以机理性研究兴起为标志的发展阶段。这个阶段在油气层的测试技术和方法、损害机理,以及预防和处理地层损害的工艺技术等方面都取得了很大的进展。其主要表现为:

(1) 对油气层损害机理作了较为系统、全面的研究,并开始从油气层本身的性质来研究地层损害。

- (2) 开始应用物理模型和数学模型研究损害机理。
- (3) 研制了不同类型的动态模拟装置。
- (4) 相继发展了近平衡压力钻井、负压钻井和负压射孔等新技术。
- (5) 电镜扫描是研究损害机理的重要手段。

3. 20 世纪 90 年代及以后

20 世纪 90 年代是油气层保护各项技术大发展的阶段。在这个阶段,机理性、智能性分析,预测、评价技术,以及钻井、完井、采油各个作业环节中的油气层保护工作都得到了突飞猛进的发展。主要表现为:

- (1) 机理分析已由定性、半定量向着完全定量发展。
- (2) 逐步利用数值模拟和人工智能专家系统实现油气层损害的机理性预测和评价。
- (3) 在岩相分析技术方面,发展和应用了矿物学分析技术、X-射线荧光分析技术、CT 扫描技术、岩相图像分析等。

- (4) 防止地层损害的新措施不断出现。
- (5) 三次采油和水平井油气层保护技术兴起。

目前,国外油层保护主要进行以下几个方面的研究:

- (1) 模拟地层条件下的油气层损害程度和机理研究。
- (2) 地层孔隙压力和破裂压力的准确预测与随钻监测研究。
- (3) 油气层岩性和物性的预测与随钻监测研究。
- (4) 保护油气效果好、适用范围广、负面影响小的钻井液、完井液及相应的添加剂。
- (5) 射孔、油气层改造和测试联作技术的进一步完善和提高。
- (6) 计算机在保护油气层技术中的应用研究。

二、国内油气层保护技术发展概况

我国的油气层保护研究工作起步较晚,真正有意识地将油气层保护提到石油系统的工作日程上是在 20 世纪 80 年代末。经过“七五”、“八五”的科技攻关,已取得了巨大进展,尤其是 20 世纪 90 年代以后发展很快,获得了明显的经济效益。

1. 油气层损害分析评价技术

油气层损害分析评价技术在“八五”和“九五”期间取得了很大进展,主要表现在:

- (1) 室内评价技术更加符合油藏实际条件。
- (2) 多种评价资料的综合解释及评价方法进一步优化。
- (3) 油气层损害微观机理的深化与量化。
- (4) 宏观研究领域的拓宽。
- (5) 机理性分析保护数据库和知识库的建立。
- (6) 损害机理研究逐步向数值模拟和智能化软件技术方向发展。
- (7) 机理分析为油气服务的趋势加强。

2. 优化钻井液、完井液保护油气层技术

目前,我国针对不同油气藏特点,已经形成水基、油基和气体型三大类多种配方,已基本满足了各类油藏保护油气层的需要。

3. 完井射孔作业中保护油气层技术

20世纪90年代以来,我国射孔技术迅速发展,开展了负压射孔及优质射孔液的现场试验。目前,射孔优化设计、油管输送式射孔、射孔测试联作技术已大量应用并实现了国产化。

4. 开发过程中的保护油气层技术

通过多年的研究和生产实践,我国不同油田根据自身的油气层特性,制定了较为完善的保护油气层技术措施,初步形成了采油、注水、酸化作业、压裂作业、修井作业和提高采收率作业等作业过程中的系列保护油气层技术。

第二章 油气层损害机理

油气层损害机理是指在油气井作业中,油气层受到损害的原因及物理化学变化过程。不同的油气层具有不同的油气层特征,造成损害的机理也不相同。要制定一个有针对性防止油气层损害的措施及保护方案,必须弄清油气层的损害机理。因此,研究油气层损害机理是保护油气层技术的一项基础工作。

在原始的地层条件下,油气层岩石、矿物和流体是在一定的物理、化学环境下处于一种物理、化学的平衡状态。开发油气层时,钻井、完井、修井、注水和增产等作业都有可能改变原来的环境条件,使原来的平衡状态发生改变,这就可能造成油气层的渗透率降低,导致油气层损害。所以,油气层损害是在外界条件影响下油气层内部性质发生变化造成的,即油气层损害的原因可分为内因和外因。

油气层损害的内因是指受外界条件影响而导致油气层损害的内在因素,如岩性、物性、孔隙结构、岩石的表面性质和油气层流体性质等。油气层损害的外因是指在施工作业时,任何能够引起油气层微观结构改变或流体原始状态发生改变,并使油气层渗透率降低的各种外部作业条件。各种外部条件是各作业过程中对油气层造成损害的环境因素,即破坏油气层原始的平衡状态的各种因素,主要指压差、温度、作业时间和入井流体的性质等等。

内因是油气层损害的客观条件,也称为油气层损害的潜在损害因素或潜在可能性。这些潜在可能性只有在一定外因的作用下才起作用,即是潜在损害成为真实损害。油气层损害内因与外因的综合作用主要是外来流体和油气层岩石及油气层流体的相互作用,根据它们的适应性的匹配程度,决定着产生什么样的损害及损害程度。

油气层损害机理必须从内因、外因及内外因的结合上来进行认识和研究。

第一节 固相颗粒堵塞造成的油气层损害

固相颗粒对油气层渗流通道的堵塞是存在于各生产环节中最为普遍的一种损害现象。固相颗粒的来源有两个:一是外来的固相颗粒,即在钻井、完井、修井、增产、注水等生产环节中进入油气层的固相颗粒;二是油气层本身存在大量的微粒,这些微粒可以随油气层内流体的流动而发生运移。

无论是外来的固相颗粒,还是油气层本身的微粒运移,其最终结果均是堵塞孔隙喉道,导致油气层渗透率降低。

一、外来固相颗粒对油气层的损害

钻井液、完井液及压裂液等各种工作液和注入流体往往含有两类固相颗粒：一类是为保持工作液密度、粘度和流变性等而添加的有用颗粒，如钻井液中的粘土颗粒及加重剂等；另一类是机械杂质甚至岩屑等固相污染物。在施工过程中，这些外来的固相颗粒随工作液进入油气层，堵塞孔隙和裂缝，导致油气层的渗透率降低。

例如，新疆某井由于含杂质的压井液大量漏失，使产油量大大下降，由原来的 $800 \text{ m}^3/\text{d}$ 下降为 $180 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下。室内岩心流动实验证明，由于压井液中固相颗粒的堵塞，使岩心渗透率下降了 $40\% \sim 60\%$ 。

影响外来固相颗粒对油气层损害程度及侵入程度的因素很多，主要有以下几个方面：

1. 固相颗粒粒径与孔隙直径的匹配关系

对于固相颗粒的粒度大小对堵塞作用的影响，Abrams 等人的研究表明，颗粒进入油气层的深度和数量主要取决于颗粒大小与油气层孔喉大小的匹配程度。若匹配程度较好，固相颗粒可在井眼周围形成较好的内泥饼。这种内泥饼可以阻止固相颗粒侵入油气层深部，从而降低进入油气层的颗粒量，减轻对油气层深部的损害。

例如在钻井液中，如果 $d_{\text{孔隙}} < 3d_{\text{颗粒}}$ ，即含有足够量直径大于 $1/3$ 平均孔隙直径的颗粒时，这些颗粒便会通过架桥作用在井眼周围 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 的半径范围内形成滤饼，从而避免更多的钻井液滤液和颗粒渗入油气层深部地层。这种钻井液体系对井眼周围 3 cm 半径之外的油气层造成的损害很小，而 3 cm 以内的滤饼对油气层的堵塞可通过反排、溶解、射孔等措施予以解除。这一结论常被称作“三分之一粒径架桥规则”。其含义是，只有满足颗粒粒径大于岩石孔径的 $1/3$ 这一条件，才容易通过架桥形成滤饼。如果颗粒变小，粒度范围满足 $3d_{\text{颗粒}} < d_{\text{孔隙}} < 10d_{\text{颗粒}}$ ，则钻井液中的固相颗粒容易进入油气层，形成内泥饼，引起较大损害，此时侵入深度一般为几厘米。当颗粒进一步变细，达到 $10d_{\text{颗粒}} < d_{\text{孔隙}}$ 时，这些颗粒很容易随滤液一起进入油气层深部，直到微粒沉积下来为止。从而在井眼周围形成一个半径较大的固相侵入带，造成更为严重的损害。

试验表明，由于钻井液中固相粒径与孔隙直径不相匹配而造成的最大固相侵入深度可达 30.48 cm ，这种损害很难通过射孔或反排来加以消除。一般情况下，为了能够有效地防止固相颗粒侵入油气层内部，外来流体中粒径大于地层平均孔径 $1/3$ 的颗粒含量应不少于流体中固相总体积的 5% 。

国内部分学者在“三分之一粒径架桥规则”的基础上提出了进一步的看法。研究结果表明，当架桥颗粒直径等于孔隙平均直径的 $2/3$ 时，桥堵效果为最好，此时不再有微粒运移现象发生。而当架桥颗粒直径为孔径的 $1/3$ 时，形成的桥堵实质上是颗粒在地层孔喉处的堆积，这时仍观测到较严重的微粒运移现象。并提出，如果钻井液中含有不少于 3% 粒径等于 $2/3$ 孔径的架桥粒子，以及 2% 左右粒径等于 $1/4$ 孔径的充填粒子和 1% 左右可变形的充填粒子，则可在井壁附近 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 范围内形成一个渗透率极低的屏蔽暂堵带，从而避免了更多固相颗粒和钻井液滤液进入油气层内部。形成的暂堵带可通过射孔和油流反排实现解堵。该项技术的有关内容将在后面进一步介绍。

2. 固相颗粒的浓度

在清洁钻井液、压裂液、修井液及注入水中，固相颗粒的浓度越高，进入油气层的颗粒越

多,损害也越严重。最近研究表明,以膨润土分散体系为基础配制的钻井液,其固相含量的高低对油气层损害没有明显的因果关系。

3. 压差

压差对固相侵入的影响是有条件的。如果钻井液中固相颗粒的大小与油气层孔隙不匹配,或射孔液、压井液不清洁,含有大量远小于孔隙直径的杂质,则在较高的正压差下,这些颗粒会随大量滤液的滤失而进入孔隙,并在其中自由运移直至沉积。压差的增加会加速颗粒运移到油气层深部,形成一个大的固相颗粒损害带,射孔及反排都很难将之消除。

但是,在钻进过程中,如果钻井液中有足够的架桥粒子和足够的充填粒子,则压差适当增大对快速形成稳定、致密的浅层内泥饼很有利。此时,压差的增大反而成为一个防止固相颗粒侵入油气层深部的有利因素。但是,由于油层井段的孔喉直径分布范围较广和分布不均匀,要选适当的架桥粒子和充填粒子来形成较好的内泥饼是相当困难的,所以,最好还是使用近平衡或欠平衡钻井技术来减少固相的侵入。

4. 工作流体与油气层的接触时间

固相颗粒对油气层渗透率的损害将随着工作流体与油气层接触时间的延长而加剧。注水时,如果注入水中的固相含量达不到要求,则随着注入时间的延长,固相堵塞造成的损害半径增大,损害越严重。如果含有固相的修井液、压井液大量渗漏,则随着时间的推移,渗漏量越多,固相损害越严重。钻井时,钻井液在油层段浸泡时间越长,进入油层的钻井液滤液和固相越多,对保护油气层越不利。

由图 2-1 可以看出,岩心在钻井液内的浸泡时间越长,侵入深度越深,损害程度也越大。特别是当动循环时间较长、泥饼质量较差时,损害更为严重。正如 krueger 所指出,无论使用何种类型的钻井液,最成功的井往往是那些油气层与钻井液相接触的时间最短的井。

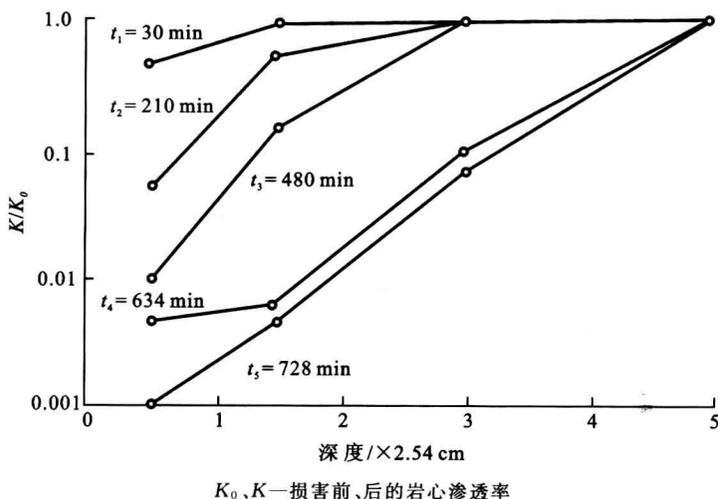
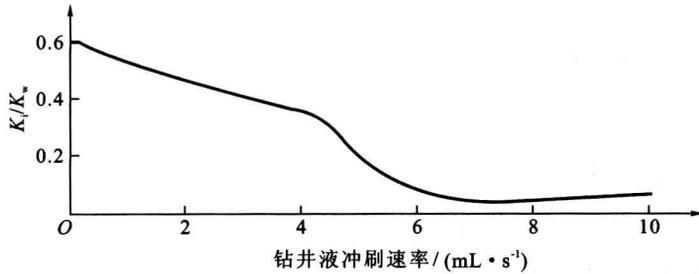


图 2-1 固相颗粒对油气层的损害程度与钻井液浸泡时间的关系

5. 剪切速率对固相侵入的影响

在钻进过程中,剪切作用会破坏外泥饼,给钻井液中的固相颗粒提供更多进入孔喉的机会。如果颗粒直径与孔隙直径不匹配,则在高剪切速率下固相侵入到地层深部的可能性较大;如果颗粒与孔隙相匹配,较高的剪切速率可为进入地层的不同尺寸的粒子在相应孔喉处

桥堵提供一定的机会,有利于内泥饼的形成。但是,过高的剪切速率使粒子的移动速度过快,反而会在一定程度上影响桥堵效果。剪切速率对桥堵效果的影响情况如图 2-2 所示。



K_w 、 K_i —桥堵前、后岩样的渗透率

图 2-2 剪切速率对桥堵效果的影响情况

6. 油气层自身因素的影响

对于低孔隙度和低渗透性的砂岩油气层,按照“三分之一粒径架桥规则”,外来流体中的较小颗粒进入油气层的最大喉道是可能的,但较大颗粒进入油气层主要连通喉道的可能性则很小。因此,一般情况下固相颗粒侵入的深度较浅而且量也较少。相对于滤液侵入后造成的损害来说,固相颗粒所造成的损害不是主要的。但是,对于具有中、高孔隙度和渗透率的砂岩油气层来说,外来固相颗粒侵入油气层的深度和对渗透率的损害程度均会相应增大。由于碳酸盐岩油气层的原始孔隙度一般比砂岩油气层大,特别是在其裂缝发育的情况下,外来固相颗粒的侵入更加容易,对油气层的损害也更为严重。因此,在判断损害程度时,不能忽视油气层自身潜在的影响因素。

综上所述,影响固相颗粒侵入油气层的因素很多。其中很重要的一点是颗粒粒径与孔隙直径的匹配问题。只要孔隙能为固相颗粒提供足够的运动空间,它们就会随滤液一起乘虚而入,通过运移、沉积而堵塞流动通道。

二、油气层内部微粒运移造成的损害

微粒运移(fines migration)被认为是造成油气层损害最主要的原因之一。在所有油气层中,都含有许许多多粒度极小的粘土、石英、云母、长石及其他矿物的微粒。在未受到外力作用时,这些微粒附着在岩石表面被相对固定。但在一定外力作用下,它们会从孔壁上分离下来,然后随孔隙内的流体一起流动。当运移至孔隙喉道位置时,粒径大于孔喉直径的微粒便会被捕集而沉积下来,对孔隙造成堵塞。也可能几个微粒同时聚集在孔喉处形成桥堵,然后更细的微粒充填进来,对渗透率造成严重的损害。微粒在孔隙与喉道内的运移如图 2-3 所示。

Amaefule 对近 4 000 口井的统计资料表明,在各个生产环节都会发生微粒运移造成的油气层损害。在所有损害机理中,因微粒运移引起损害是最普遍的。正如 sharma 等人所指出:“早期文献一般都认为粘土膨胀是导致油气层渗透率下降的第一位原因,而现在人们已公认粘土和其他矿物微粒的运移是最重要的损害机理。”

1. 微粒的矿物组成

微粒是指油气层中粒径在 $0.5 \sim 37 \mu\text{m}$ 范围内的矿物颗粒。从其成分来看,有粘土矿物,也有非粘土矿物;有晶形物质,也有非晶形物质;还包括一些化学沉淀物质。例如, Muecke 对从砂岩岩心中排出的微粒做了电镜、X 射线衍射和筛析分析,发现这些微粒的最

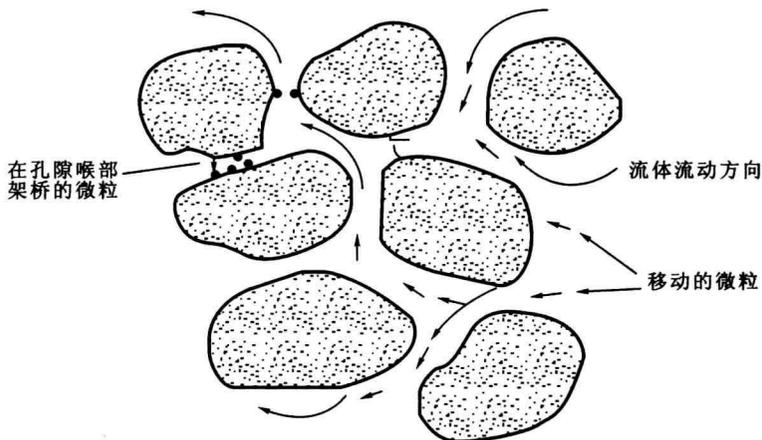


图 2-3 微粒在孔隙与喉道内的运移

大粒径为 $37\ \mu\text{m}$ 。组成微粒的物质包括粘土、石英、其他矿物和非晶形物质四个大类，其中粘土类平均约占微粒总质量的 11%，石英约占 38.7%，其他矿物约占 17.8%，非晶形物质约占 32.5%。以上统计数据表明，在研究与解决微粒运移问题时，粘土微粒的影响只是其中的一小部分，对其他三类物质的影响亦必须加以重视。

使用 X 射线衍射分析技术，对国内几个油田砂岩油气层中微粒矿物成分的分析结果表明，石英微粒含量仍居最多。在粘土矿物中，绿泥石、伊利石和高岭石的微粒所占的比例较高，蒙脱石微粒所占比例很低。

另据电镜照片分析结果可知，典型砂岩中石英微粒相当发育，在一定的离子环境和较高的流速下，会发生运移，从而堵塞孔喉。高岭石微粒由于其粒径较大，在砂粒表面附着不紧，当外来流体流速较大时，易从孔壁或砂粒表面释放出来而随流体一起运移，发生孔喉堵塞。伊利石和云母在电镜下观察呈毛发状，对淡水具有一定的水敏性。它们常在孔隙内生成毛发状结晶，也可能在孔道中架桥。当外来流体流速达到一定值时，结晶被冲碎，其中的微细颗粒掉入孔隙内形成堵塞。蒙脱石或伊蒙混层有较大的比表面和亲水性，遇水后发生水化膨胀，然后分散成微细颗粒进入流体，当运移至相应的孔喉处，亦形成堵塞。

2. 分散运移和颗粒运移

一些研究者将发生在油气层内的微粒运移分为两种不同的情况——分散运移和颗粒运移。

(1) 分散运移。

分散运移是引起油气层损害最重要的原因。发生分散运移的物质一般为粘土矿物。分散原因主要是油气层流体的离子强度和 pH 发生了改变。当外来液体，特别是淡水和高 pH 的液体侵入地层后，无论对于膨胀性粘土还是非膨胀性粘土，都会因离子环境和酸碱度的改变而破坏原来聚集的平衡条件，促使其水化分散。

通过用盐水和淡水对标准岩心的试验证明，岩心中因粘土分散而引起的渗透率下降是相当严重的。但是，目前还很少有人认真地从机理上对此进行深入研究。人们都知道向地层中注入淡水是危险的，但却往往未注意到各种无机或有机添加剂对油气层损害的影响。产生晶格膨胀的粘土矿物（如蒙脱石和伊蒙混层），除了其膨胀作用外，还会引起粘土的物理不稳定性，促进其分散运移，对油气层渗透率有更大的损害。但是，蒙脱石等膨胀性粘土矿