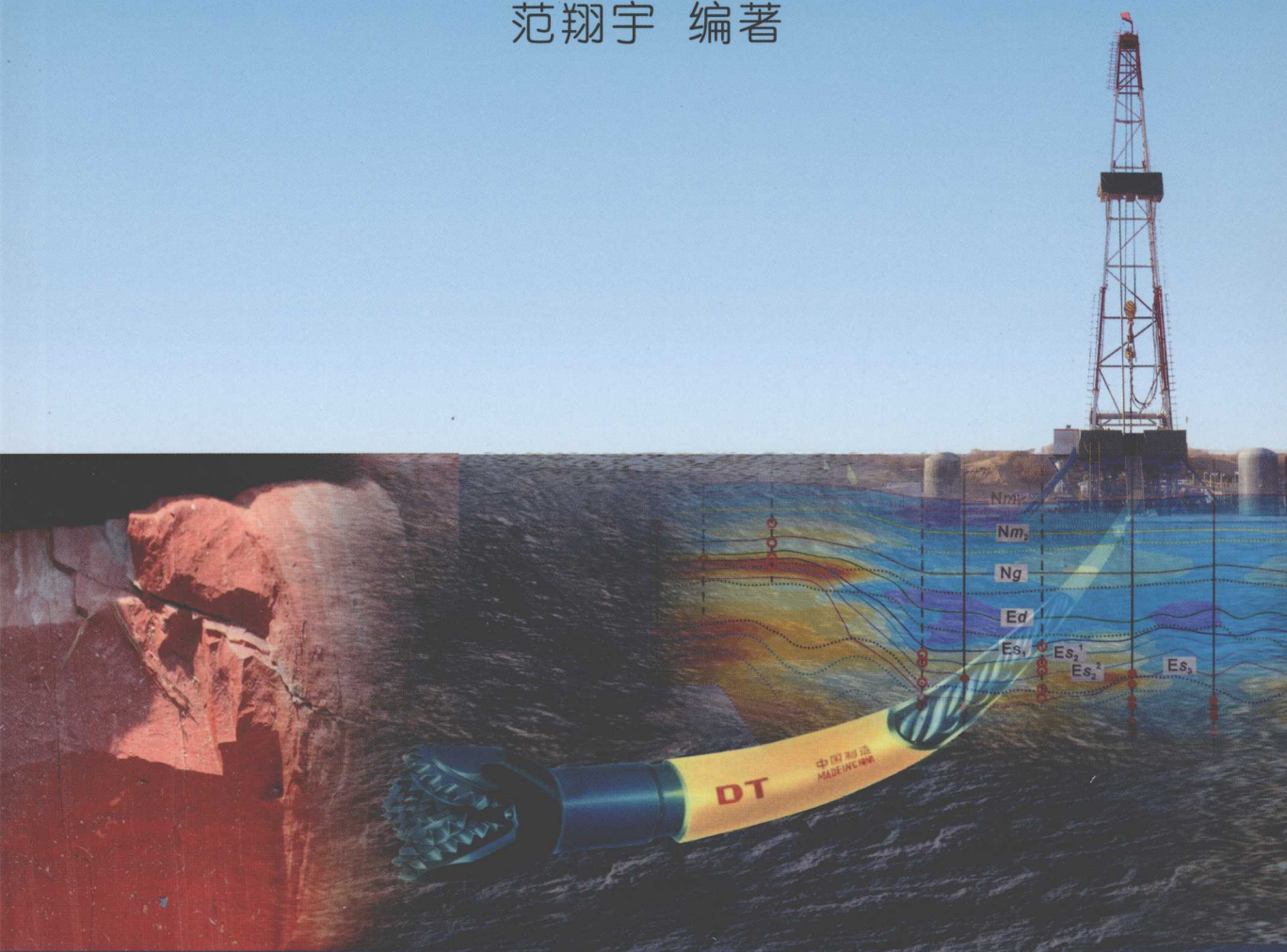


钻井储层污染损害 精细评价方法

范翔宇 编著



石油工业出版社

油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学)资助

钻井储层污染损害精细评价方法

范翔宇 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了钻井储层污染损害评价方法,建立了钻井液侵入、污染损害储层的动态过程及数学模型。主要介绍了储层污染损害的电阻率时间推移解释方法、钻井液侵入的测井响应特征与评价系列选取、储层四性的解释方法、钻井液储层侵入深度的定量计算、模拟工况条件下的砂岩储层钻井液污染损害程度的实验分析、钻井储层污染损害评价指标的测井解释模型、储层污染损害后油气产能的测井综合预测等七个方面的内容,是一本综合运用测井、地质、试井、钻井技术解释钻井过程中造成的储层污染损害的读物。

本书既适用于从事钻井、井下作业、测井、开发、油藏工程等专业的技术人员以及石油院校相关专业师生,也可以供煤田及工程地质部门的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钻井储层污染损害精细评价方法/范翔宇编著.

北京:石油工业出版社,2012.8

ISBN 978-7-5021-9117-8

I. 钻…

II. 范…

III. 油气藏-储集层-油污染-油层损害-评价

IV. ①P618.130.2②TE258

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 131249 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:<http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010)64240656 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:14

字数:355 千字

定价:40.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

钻井全过程中的每一个作业环节,钻井液侵入地层后或多或少都将对地层造成污染损害,导致流体产出或注入能力降低。储层污染损害的实质就是储层孔隙结构变化导致的渗透率下降,渗透率下降包括绝对渗透率的下降和相对渗透率的下降。钻井过程中储层污染损害主要包括:机械损害、化学损害、热力损害等。本书利用测井、地质、钻井、油气层保护技术、试井分析方法等知识,阐述了储层污染损害的评价方法、钻井液污染损害地层数学模型、钻井液污染损害地层后测井技术如何评价储层污染损害、钻井储层污染损害深度的定量计算、储层污染损害后油气产能的测井综合预测研究等,并结合实例介绍了钻井液污染损害程度的实验分析。

20世纪70年代,储层污染损害问题研究便在国外得到了较快的发展。1974年,美国石油工程协会召开了油气层损害防治的国际性专题学术会议,储层损害问题得到了广泛重视。但多年来很少见到综合运用测井、地质、钻井、油气层保护技术、试井分析方法等来评价钻井过程中的储层污染损害。

近年来,国内外许多石油单位较为重视钻井过程中储层污染损害课题的研究,同时也找出了一些治理污染损害的方法,如酸化、压裂等。这些污染损害包括了储层敏感性造成的污染损害、钻井液固相侵入污染损害、钻井液与储层流体不配伍造成的污染损害、应力损害、钻井时近井地带温度变化造成的损害等。本书运用多学科理论综合评价出钻井液对储层的污染损害程度,在知道储层的污染损害情况后便能找到改造污染损害储层的最佳方法,同时为以后钻井过程中如何保护储层提供了理论依据。本书将为从事钻井、井下作业、测井、油气田开发、油藏工程等专业领域的同仁认识钻井储层污染损害提供有益的帮助。

本书由范翔宇负责组织编撰,在编写过程中借鉴了著名专家陈福焯教授、孙建孟教授、徐同台教授、何更生教授、李晓平教授、中国石油天然气集团公司刘晓红工程师的一些公开发表的论著内容,同时还得到了西南石油大学夏宏泉教授、陈平教授的指导以及西南石油大学研究生黄亮、王俊瑞、张萍等的帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

另外,本书的编纂还得到油气藏地质及开发工程国家重点实验室、西南石油大学科研处、人事处的资助。

钻井储层污染损害评价是一门涉及多学科、多部门的新技术,在该领域内,还需展开全面深入的研究。由于笔者水平有限,书中必定存在不少错误和不妥之处,恳请专家和广大读者予以批评指正。

编著者

2012年2月

目 录

第一章 储层污染损害机理概述.....	1
第一节 物理作用污染损害.....	2
第二节 化学作用污染损害.....	7
第三节 其它作用污染损害	10
第二章 储层污染损害评价方法概述	13
第一节 储层污染损害的实验室评价方法	13
第二节 储层污染损害的试井评价方法	16
第三章 钻井液侵入地层数学模型及侵入剖面电特性	22
第一节 钻井液滤液侵入地层物理全过程	22
第二节 钻井液滤液侵入地层的数学模型	32
第三节 钻井液滤液侵入剖面图集的编制	35
第四节 侵入剖面数学模型计算结果检验	37
第五节 储层物性和含油气性与钻井液滤液侵入深度的关系	43
第四章 钻井液侵入储层的动态过程与主要影响因素	49
第一节 钻井液侵入地层物理模拟实验理论基础	49
第二节 钻井液侵入地层的渗流规律研究	52
第三节 钻井液侵入地层的影响因素分析	56
第五章 储层污染损害的电阻率时间推移测井解释方法	61
第一节 电阻率时间推移测井方法的基本原理和特点	61
第二节 电阻率时间推移测井的三种方法	63
第三节 电阻率时间推移测井定性定量解释	63
第六章 钻井液侵入的测井响应特征研究与评价系列选取	69
第一节 电阻率测井响应随钻井液矿化度变化关系研究	69
第二节 相同钻井液矿化度情况下电阻率测井动态响应特征研究	71
第三节 钻井液侵入油气层的其它测井响应特征研究	77
第四节 钻井液侵入与污染损害储层的测井评价系列优选	80
第七章 储层三性和敏感性的测井解释	87
第一节 基于多矿物模型的储层三性解释	87
第二节 储层敏感性的测井评价解释	96
第八章 钻井液储层侵入深度的定量计算方法.....	103
第一节 孔隙性砂岩储层的钻井液侵入深度计算.....	103

第二节 裂缝性砂岩储层的钻井液侵入深度计算·····	115
第三节 基于灰色动态模型的钻井液侵入深度计算预测·····	138
第九章 模拟工况条件下的砂岩储层钻井液污染损害程度的实验分析·····	149
第一节 砂岩储层钻井液污染损害程度的实验研究·····	149
第二节 实验研究结论·····	163
第十章 基于核磁共振测井确定储层钻井污染损害程度·····	167
第一节 核磁共振测井概述·····	167
第二节 基于 T_2 截止值分布揭示岩石孔隙结构 ·····	175
第三节 基于核磁共振分析储层损害实例·····	181
第十一章 钻井储层污染损害评价指标的测井解释模型·····	183
第一节 渗透率损害比测井解释模型的建立·····	183
第二节 表皮系数的测井解释模型的建立·····	187
第三节 钻井液侵入深度与储层污染损害深度间的关系·····	197
第十二章 储层污染损害后油气产能的测井综合预测研究·····	201
第一节 储层产能的影响因素和理论方程·····	201
第二节 储层产能测井解释模型的建立·····	202
第三节 产能预测效果分析·····	210
参考文献·····	213

第一章 储层污染损害机理概述

储层污染损害（通常简称为污损）是指在油气钻井、完井、生产、增产、EOR 等全过程中的每一个作业环节，发生流体产出或注入能力显著下降的现象或作用。油气层损害实质就是储层孔隙结构变化导致的渗透率下降。渗透率下降包括绝对渗透率的下降（即渗流空间的改变，孔隙结构变差）和相对渗透率的下降。

外来固相侵入、水敏性损害、酸敏性损害、碱敏性损害、微粒运移、结垢、细菌堵塞和应力敏感损害等都改变渗流空间；引起相对渗透率下降的因素包括水锁（流体饱和度变化）、五敏、润湿反转和乳化堵塞等。

储层污染损害主要发生在井筒附近区域，因为该区是工作液与储层直接接触带，也是温度、压力、流体流速剧烈变化带。钻井完井过程的污染一般限于井筒附近，而增产改造、开发中的损害可以发生在井间任何部位。

导致地层污染损害的原因是多方面的，归纳起来有以下几种：

(1) 内在因素（潜在损害因素）：由储层本身的岩性、物性、油气水性质等决定。

(2) 外在因素（生化或机械作用）：

一类外在因素：外来流体与储层发生作用，它包括：①外来固相颗粒的堵塞与侵入；②工作液侵入及不配伍的注入流体引起敏感性损害；③储层内部微粒运移；④出砂；⑤细菌堵塞。

二类外在因素：外来流体与地层流体不配伍，它包括：①乳化堵塞；②无机结垢堵塞；③有机结垢堵塞；④铁锈与腐蚀产物的堵塞；⑤地层内固相沉淀的堵塞。还有射孔、固井、修井水泥浆等会对储层造成一些特殊损害，也属二类外在因素。

井周储层受各种工作液（钻井液、固井液、完井液、压井液、开采过程中的驱替液等）的影响会使储层一直发生动态变化，破坏原有的平衡状态，致使储层发生各种各样的物理化学变化。

但目前比较普遍接受的分类分成四大类：(1) 机械损害；(2) 化学损害；(3) 生物损害；(4) 热力损害，然后再进行细分。表 1-1 的分类体系说明，即使是一种看起来较简单的类型，也包含着多种复杂的作用过程。

表 1-1 储层损害类型及其分布结构（据徐同等，《保护油气层技术》）

大 类	亚 类	三 级	四 级	作 业 环 节
机械作用	微粒运移、相侵入	钻井液、完井液固相		钻井完井、增产改造、修井、注水注气、EOR
		注入流体固相		
	相圈闭	水基工作液		
		油基工作液		
		泡沫状油		

续表

大 类	亚 类	三 级	四 级	作 业 环 节
机械作用	机械损害	岩面釉化		气体流体钻井、斜井钻井
		岩粉挤入		
	射孔损害	压实损害		射孔完井
	应力损害	剪切膨胀		钻井、油气生产
		地层压实		
化学作用	岩石与外来流体不配伍	敏感性损害	粘土矿物损害、非粘土矿物损害	钻井完井、增产改造、修井、注水注气、EOR
		处理剂吸附	聚合物、阴离子	
	地层流体与外来流体不配伍	有机垢沉积	石蜡、沥青沉积	
		无机垢沉积	盐类沉积、水合物、类金刚石石物	
		乳状液堵塞		
	润湿性反转			
生物作用	分泌聚合物			注水和 EOR 过程为主
	腐蚀损害			
	流体酸化			
热力作用	矿物溶解、矿物转化、润湿性变化			热力采油为主

第一节 物理作用污染损害

物理作用损害是指钻井、完井、压井、增产措施中设备和工作液直接与地层发生物理变化造成的渗透率下降，有时生产中地层流体本身性质的变化也可能发生物理作用损害。

一、微粒运移

多数油气层都含有一些细小矿物，称为地层微粒，包括粘土矿物、非晶质硅、微晶石英、微晶长石、云母碎片和碳酸盐矿物等，其粒径通常小于 37 μm ，是潜在的可运移微粒源。微粒在流体流动作用下首先从孔隙或裂缝壁面脱落、运移，在流动通道变窄或流速减低时，单个或多个微粒在孔喉处发生堵塞，造成油气层渗透率下降，这就是微粒运移损害（图 1-1）。

使油气层微粒开始运移的流体速度称为临界流速。只有流速超过临界流速后，众多的微粒才能运移，发生堵塞。由于油气层中流体流速的大小直接受生产压差的影响，即在相同的油气层条件下，一般生产压差越大，相应的流体产出速度就越大，因此，虽然微粒运移是由流速过大引起，但其根源却是生产压差过大。同样，注入井注入压差过大，也会使注入流体的流速超过临界流速而产生微粒运移损害。压差过大就会使地层流体的流速超过临界流速，这时微粒发生运移，导致孔隙发生物理堵塞。

临界流速与下列因素有关：（1）油气层的固结程度、胶结类型和微粒粒径；（2）孔隙几

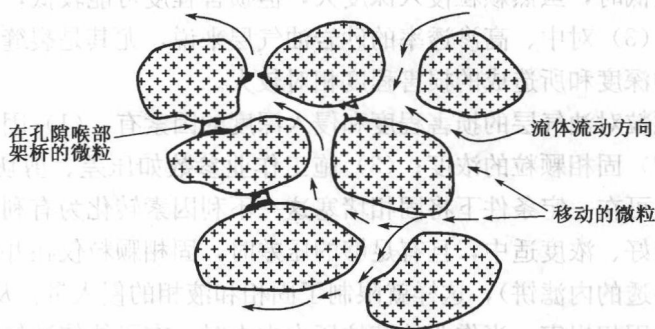


图 1-1 微粒运移堵塞示意图 (据徐同台等,《保护油气层技术》)

何形状和流道表面粗糙度；(3) 岩石和微粒的润湿性；(4) 液体的离子强度和 pH 值；(5) 界面张力和流体粘滞力；(6) 温度。

影响微粒运移并引起堵塞的因素有：(1) 微粒级配和微粒浓度是影响微粒堵塞的主要因素，当微粒尺寸接近于孔隙尺寸的 $1/3 \sim 1/2$ 时，微粒很容易形成堵塞；微粒浓度越大，越容易形成堵塞；(2) 孔壁越粗糙，孔道弯曲越大，微粒碰撞孔壁越易发生，微粒堵塞孔道的可能性越大；(3) 流体流速越高，不仅越易发生微粒堵塞，而且形成堵塞的强度越大；(4) 流速方向不同，对微粒运移堵塞也有影响。

生产井：由于流体是从油气层往井眼中流动，因此当井壁附近发生微粒运移后，一些微粒可通过流道排到井眼，一些微粒仅在近井地带造成堵塞。

注入井：流体是从井眼往油气层中流动，在井壁附近产生的微粒运移不仅在井壁附近产生堵塞，而且会造成油气层深部微粒的沉积堵塞。

控制微粒运移的措施：(1) 降低产量或注入量，这种做法可以解决问题但并不是最佳选择；(2) 对于射孔完井，通过高密度射孔增加流动通道面积，降低流速；(3) 条件允许时，尽可能采用裸眼完井；(4) 应用水平井增大与油气层接触的泄流面积，适当降低流速；(5) 采用水力压裂技术；(6) 疏松砂岩油气层可采用压裂—砾石充填完井技术；(7) 工作液中加入适当的粘土防膨剂和地层微粒稳定剂；(8) 控制油气井过早见水和含水率。

二、固相侵入

钻井液、完井液等各种工作液以及压井流体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及桥堵剂、暂堵剂等；另一类是有害颗粒、杂质、岩屑、砂子等固相物质及固相污染物质。它们在正向压差作用下先是进入井周储层堵塞孔喉，然后在井壁附近沉积下来形成泥饼。固相颗粒侵入程度与孔喉结构关系密切。形成的泥饼特性与流体的滤失性能、固相颗粒大小及粒级级配、固相含量、压差、温度、浸泡时间等有关。固相侵入深度可达 $2 \sim 5\text{cm}$ ，个别地层侵入可达 10cm 。侵入越深对储层损害就越大。

当井眼中液柱压力大于油气层孔隙压力时，固相颗粒就会随流体一起进入油气层，在井眼周围或井间的某些部位沉积下来，从而缩小油气层流道尺寸，甚至完全堵死油气层。

固相损害特点：(1) 颗粒一般在近井地带造成较严重的损害；(2) 颗粒粒径小于孔径的

十分之一，且浓度较低时，虽然颗粒侵入深度大，但损害程度可能较低，此种损害程度会随时间的增加而增加；(3) 对中、高渗透率的砂岩油气层来说，尤其是裂缝性油气层，外来固相颗粒侵入油气层的深度和所造成的损害程度相对较大。

控制外来固相颗粒对油气层的损害程度和侵入深度的因素有：(1) 固相颗粒粒径与孔喉直径的匹配关系；(2) 固相颗粒的浓度；(3) 施工作业参数如压差、剪切速率和作业时间。(4) 应用辨证的观点可在一定条件下将固相堵塞这一不利因素转化为有利因素，如当颗粒粒径与孔喉直径匹配较好、浓度适中，且有足够的压差时，固相颗粒仅在井筒附近很小范围形成严重堵塞（即低渗透的内滤饼），这样就限制了固相和液相的侵入量，从而降低损害深度。

井漏引起严重的固相损害。当作业的液柱压力太大时，有可能使油气层破裂，或使已有的裂缝开启，导致大量的工作液漏入油气层而产生损害。影响这种损害的主要因素是作业压差和地层的岩石力学性质。

固相损害防治措施：

- (1) 固相侵入浅时，射孔完井可以得到一定程度的消除；
- (2) 固相侵入深时，侧钻或重钻产层，或压裂投产；
- (3) 对于裸眼井或未水泥固井的衬管完成井，固相损害表现十分严重，提高返排恢复率，酸洗清除滤饼；
- (4) 水平井大部分采用裸眼或衬管完井，酸液和氧化剂清除滤饼；
- (5) 应用屏蔽暂堵原理设计无损害的钻井液与完井液；
- (6) 欠平衡作业是抑制固相侵入损害的有效途径；
- (7) 现场一般通过对压井液、射孔液、修井液、酸液、压裂液、注入流体的严格过滤来避免固相侵入损害。

三、相圈闭

相圈闭与不利的毛管压力和相对渗透率效应有密切关系。相圈闭的基本表现是，由于某一相流体（气、油、水）饱和度暂时或永久性地增加而造成我们所希望产出或注入流体相对渗透率的下降。

当油基工作液进入气层、或者含油污水注入地层中可形成油相圈闭；凝析气藏开发一段时间后，当井底压力低于气藏露点压力时，凝析液在井眼附近聚集形成油相圈闭；黑油油藏若在低于泡点压力下开采，溶解气的溢出使气相饱和度增加，可出现气相圈闭。水基工作液滤液进入油气层后，会增加水相的饱和度，降低油或气的饱和度，增加油气流动阻力，导致油气相渗透率降低（图 1-2）。

（一）水相圈闭

在作业引起的相圈闭损害类型中，水相圈闭较常见。根据产生毛管阻力的方式，可分为水锁损害和贾敏损害。水锁损害是由于非润湿相驱替润湿相而产生的毛管阻力，从而导致油相渗透率降低。贾敏损害是由于非润湿液滴对润湿相流体流动产生附加阻力，而导致油相渗透率降低。对低渗透油层和致密气层来说，由于初始含水饱和度经常低于束缚水饱和度，且储层毛管压力大，水相圈闭损害应引起高度重视。

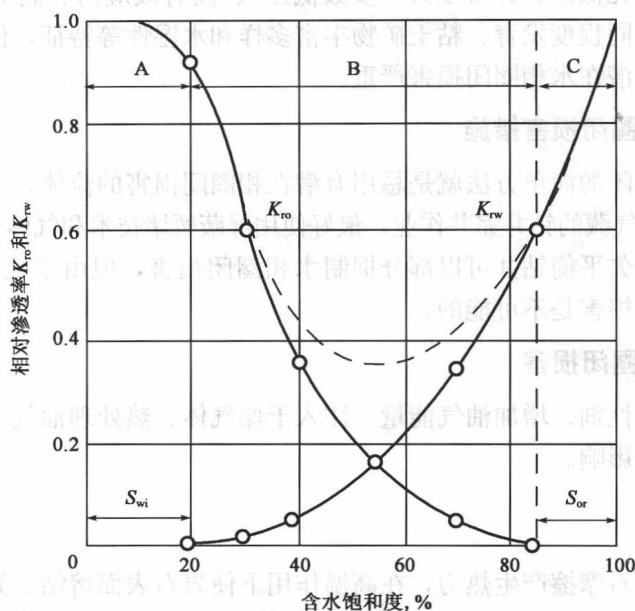


图 1-2 含水饱和度与油相渗透率的关系 (据何更生,《油层物理》)

K_{ro} —油的相对渗透率; K_{rw} —水的相对渗透率; S_{or} —残余油饱和度; S_{wi} —束缚水饱和度

(二) 影响水相圈闭损害的因素

(1) 储层孔隙结构。储层喉道半径越小, 毛管压力越大, 产生自吸和滞留作用越明显, 水相圈闭损害越严重。

(2) 储层初始含水饱和度 S_w 与束缚水饱和度 S_{wi} 差异。对一定储层岩石而言, 束缚水饱和度一定, 初始含水饱和度越低, 初始含水饱和度与束缚水饱和度之间的差值越大, 不考虑液体蒸发等情况, 侵入储层的工作液或井底积液排出时, 液相饱和度只能恢复到束缚水饱和度。

(3) 低流体饱和度区间油或气—水相对渗透率曲线形态。岩石物性影响相对渗透率曲线形态, 岩石越致密, 曲线越陡峭。由于孔隙介质不混相流体的多相干扰作用, 在相对渗透率曲线非常弯曲的情况下, 滞留水饱和度稍有增加, 油气相对渗透率就显著降低。

(4) 油气藏可提供的最大压降和滤液侵入深度。流体饱和度与施加的毛管压力梯度直接相关, 压差越大, 产生的毛管压力梯度就越高, 残余水饱和度就越低。侵入深度越大, 返排越困难, 因为在同样压差下, 侵入越深, 相应的压力梯度越小, 水流动越困难, 水相圈闭问题越严重。

(5) 岩石润湿性。水湿性油气藏, 水作为润湿相在毛管力或正压差作用下优先占据岩石较小孔隙并以薄膜形式覆盖岩石孔喉表面, 而作为非润湿相的油气只能位于一些较大孔隙中心, 虽然水膜的厚度很小, 但由于岩石是水湿的, 束缚水能力强, 只有附加一个压力梯度, 才能引起水化膜的破坏而开始流动。

(6) 流体性质。气水界面张力和侵入液体的粘度越大, 排液时间越长, 水相圈闭损害越严重。

致密砂岩气藏低孔低渗、异常压力（多数低压）、高有效应力、高毛管压力、超低含水饱和度、天然裂缝不同程度发育、粘土矿物丰富多样和水湿性等特征，使其表现为强毛管自吸和液相滞留趋势，潜在水相圈闭损害严重。

（三）预防水相圈闭损害措施

- （1）防止水相圈闭的简单方法就是忌用有潜在相圈闭损害的流体。
- （2）低渗—致密气藏的钻井完井作业，最好使用屏蔽暂堵技术和气体类型的欠平衡钻井。
- （3）水基工作液欠平衡钻井可以部分抑制水相圈闭损害，但由于毛管自吸作用的存在，要完全消除水相圈闭损害是不可能的。

（四）缓解水相圈闭损害

通过加入表面活性剂、增加油气能量、注入干燥气体、热处理油气层、压裂等措施可以缓解水相圈闭损害的影响。

四、机械损害

钻头破岩、与岩石摩擦产生热力，在高温作用下使岩石表面熔结、光化的现象称岩面釉化。在井眼中钻具偏心转动、滑动使一些微粒和钻屑被挤入地层的现象称为岩粉挤入，这在定向井、水平井钻井作业中表现明显。这种机械损害在室内模拟实验研究比较困难，但通过井壁取心和全尺寸岩心分析可以说明该现象的存在。

天然气钻井和空气钻井易出现岩面釉化损害，因为与水基工作液相比，气体的传热能力大大降低。增加工作液的润滑性、提高流体的携屑和清洗井眼的能力可减小岩粉挤入损害。

五、射孔损害

射孔损害主要来自射孔枪弹爆炸的碎片、岩石破碎带、压实带。地层震动后，粘土矿物等微粒更容易失稳进入射孔孔眼。

六、应力损害

油气层岩石在地下受到垂向应力（ S_v ）、水平应力（ S_H ， S_h ）和孔隙流体压力（即地层压力 p_p ）的共同作用。上覆岩石产生的垂向应力仅与埋藏深度和岩石的密度有关，对于某点岩石而言，上覆岩石压力可以认为是恒定的。井眼形成后，由于岩石变形和应力的重新分布，井壁岩石的压缩和剪切膨胀可以产生应力损害。损害程度决定于井眼轨迹取向、岩石力学性质和原地应力场参数。

应力敏感损害控制因素：

- （1）油气层压力与油气井的开采压差和时间有关。随着开采的进行，油气层压力逐渐下降，这样岩石的有效应力（ $\sigma = S_v - p_p$ ）就增加，使流道被压缩，尤其是裂缝—孔隙型流道更为明显，导致油气层渗透率下降而造成应力敏感性损害，影响应力敏感损害的因素包括压差、油气层自身的能量和油气藏类型。
- （2）当油气层较疏松时，若生产压差太大，可能引起油气层大量出砂，进而造成油气层坍塌，产生严重的损害。此时，一定要采取防砂措施，并控制压力开采。

第二节 化学作用污染损害

化学作用污染损害包括不利的岩石—外来流体反应和地层流体—外来流体反应造成的油气层损害。

一、外来流体与地层岩石不配伍产生储层污染损害

(一) 水敏性损害

美国学者摩尔指出,一般油层中含粘土 1%~5% 是最好的储层,若粘土量达 5%~20% 则储层性能较差,尤其若含水敏性粘土,则完全可能把油层孔道堵死。在地层条件下,粘土矿物与地层水处于相对平衡,但当与外来的矿化度较小的流体接触时(如与注入水接触时),粘土便膨胀,使岩石渗透率迅速降低。

油气层水敏性损害的规律:(1) 当油气层物性相似时,油气层中水敏性矿物含量越高,水敏性损害程度越大;(2) 油气层中常见的粘土矿物对油气层水敏性损害强弱影响顺序为:蒙皂石>伊/蒙间层矿物>伊利石>高岭石、绿泥石;(3) 当油气层中水敏性矿物含量及存在状态均相似时,高渗透油气层的水敏性损害比低渗油气层的水敏性损害要低些;(4) 工作液的矿化度越低,引起油气层的水敏性损害越强;工作液的矿化度降低速度越大,油气层的水敏性损害越强;(5) 工作液矿化度相同的情况下,含高价阳离子的成分越多,引起油气层水敏性损害的程度越弱。

(二) 碱敏性损害

高 pH 值的工作液侵入油气层时,与其中的碱敏性矿物发生反应造成粘土微结构失稳、分散或脱落、新的硅酸盐沉淀和硅凝胶体生成,导致油气层渗透率下降,这就是油气层碱敏性损害。

油气层产生碱敏损害的原因为:(1) 粘土矿物的铝氧八面体在碱性溶液作用下,使边面的负电荷增多,导致晶体间斥力增加,促进分散;(2) 隐晶质石英和蛋白石等较易与氢氧化物反应生成不可溶性硅酸盐,这种硅酸盐可在适当的 pH 值范围内形成凝胶而堵塞流道。

影响油气层碱敏性损害程度的因素有:碱敏性矿物的含量、工作液 pH 值和侵入量,其中 pH 值起着重要作用,pH 值越大,造成的碱敏性损害越大,见表 1-2。

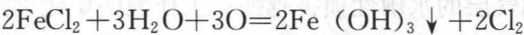
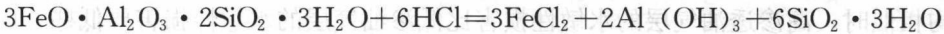
(三) 酸敏性损害

油气层酸化处理后,释放大量微粒,矿物溶解释出的离子还可能再次生成沉淀,这些微粒和沉淀将堵塞油气层的流道,轻者可削弱酸化效果,重者导致酸化失败。酸化后导致油气层渗透率降低的现象就是酸敏性损害。

能与酸反应的矿物并不都称为酸敏矿物,只有那些与酸反应后容易生成沉淀而堵塞孔道引起渗透率降低的矿物才称为酸敏矿物。例如,富铁绿泥石,当二价铁离子含量达到 30%,在酸化时,除因粘土膨胀因素外,还因富铁绿泥石酸溶后当 pH 值为 5~6 时,Fe²⁺ 呈胶体沉淀,伤害油层,其反应式为:

表 1-2 部分矿物的 pH 值

矿 物		pH 值
中文名称	分子式	
锐钛矿	TiO ₂	7.2
石英	SiO ₂	2
凝胶	SiO ₂	1.0~2.5
锆石 (硅酸锆)	ZrSiO ₄	5
长石	SiO ₂	2.0~2.4
高岭石	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀] · (OH) ₈	3.5~4.6
蒙皂石		<2.5
钠长石	NaAlSi ₃ O ₈	2
纤蛇纹石		>12.0
伊利石		2.8
方解石	CaCO ₃	8~9



Fe(OH)₃ 是一种片状结晶，通常其体积比喉道还大，故可以堵塞喉道。

造成酸敏性损害的无机沉淀和凝胶体还有：Fe(OH)₂、CaF₂、MgF₂、氟硅酸盐、氟铝酸盐沉淀以及硅酸凝胶。这些沉淀和凝胶的形成与酸的浓度有关，其中大部分在酸的浓度很低时才形成沉淀。控制酸敏性损害的因素有：酸液类型和组成、酸敏性矿物含量、酸化后返排酸的时间。

(四) 化学剂吸附

工作液和注入流体中的聚合物及其它高分子处理剂易在岩石基块和裂缝表面的粘土矿物上吸附和滞留，由于它们具有较大的分子尺寸，从而降低了有效的流道空间，导致储层渗透率下降。

对于低渗一致密油气藏，高分子化学剂吸附损害不可忽视。室内评价实验有助于筛选合适的处理剂，并且当损害发生时采用氧化剂或酶可以解除这种损害。

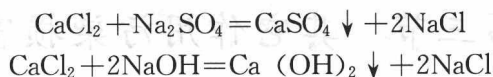
二、外来流体与地层流体不配伍产生储层污染损害

当外来流体的化学组分与地层流体的化学组分不相匹配时，将会在油气层中产生沉积、乳化、促进细菌繁殖等，最终影响储层渗透性。

(一) 无机垢沉积

由于外来流体与油气层流体不配伍，可形成 CaCO₃、CaSO₄、BaSO₄、SrCO₃、SrSO₄ 等无机垢沉淀。

影响无机垢沉淀的因素有：(1) 外界液体和油气层液体中盐类的组成及浓度。一般情况下，当这两种液体中含有高价阳离子（如 Ca^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Sr^{2+} 等）和高价阴离子（如 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 等），且其浓度达到或超过形成沉淀的溶度积时，就可能形成无机沉淀。(2) 液体的 pH 值。当外来液体的 pH 值较高时，可使 HCO_3^- 转化成 CO_3^{2-} 离子，引起碳酸盐沉淀，同时，还可能引起 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等氢氧化物沉淀的形成。反应如下：



(二) 有机垢沉积

外来流体与油气层原油不配伍，可生成有机沉淀。有机沉淀主要是指石蜡、沥青质及胶质在井眼附近的油气层中沉积，这样不仅可以堵塞油气层的孔道，而且还可能使油气层的润湿性发生反转，从而导致油气层渗透率下降。

影响形成有机垢的因素有：(1) 外来液体引起原油 pH 值改变而导致沉淀，高 pH 值的液体可促使沥青絮凝、沉积，一些含沥青的原油与酸反应形成沥青质、树脂、蜡的胶状污泥；(2) 气体和低表面张力的流体侵入油气层，可促使有机垢的生成；(3) 注入流体的冷却效应，如冬季注水、压裂酸化排量过高可能引起石蜡、沥青沉积。

(三) 乳状液堵塞

外来流体常含有许多化学添加剂，这些添加剂进入油气层后，可改变油水界面性能，使外来油与地层水或外来水与油气层中的油相混合，形成油或水为外相的乳状液。

乳状液造成的油气层损害有两方面：一方面是比孔喉尺寸大的乳状液滴堵塞孔喉，另一方面是提高流体的粘度，增加流动阻力。

影响乳状液形成的因素有：(1) 表面活性剂的性质和浓度；(2) 微粒的存在；(3) 油气层的润湿性。

三、地层流体的平衡状态遭破坏

油气层流体在采出过程中，必须具有一定的生产压差，这就会引起近井地带的地层压力低于油气层的原始地层压力，从而形成无机和有机沉淀物而堵塞油气层，产生结垢损害。此时垢类型可能与流体不配伍时相同，但是成垢机理却不相同。

压力降低时的结垢机理为：(1) 无机垢的形成，由于油层压力的下降，流体中气体不断脱出，在脱气之前， CO_2 以一定比例分配在油、水两相之中，脱气之后 CO_2 就分配在油、气、水三相中，使得水相中的 CO_2 量大大减小， CO_2 的减少可使地层水的 pH 值升高，这有利于地层水中 HCO_3^- 的解离，使平衡向 CO_3^{2-} 浓度增加的方向移动，促使更多的 CaCO_3 沉淀生成；(2) 有机垢生成，油气层压力降低，使原油中的轻质组分和溶解气挥发，石蜡在原油中的溶解度降低，促使石蜡沉积，造成堵塞。

四、润湿性反转

岩石由水润湿变成油润湿后，造成不利的后果。原油从占据孔隙中央部分变成占据小孔隙角隅或吸附在颗粒表面，大大地减少了油的有效流道；使毛管力由原来的驱油动力变成驱

油阻力。这样不但使采收率下降,而且大大地降低油气有效渗透率。

油气层由水润湿转变为油润湿后,可使油相渗透率降低 15%~85%。对润湿性改变起主要作用的是表面活性剂,影响润湿性反转的因素有: pH 值、聚合物处理剂、无机阳离子和温度。

第三节 其它作用污染损害

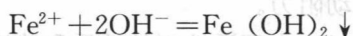
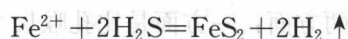
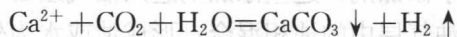
一、生物作用

油气层原有的细菌或者随着外来流体一起进入的细菌,在作业过程中,当油气层的环境变成适宜它们生长时,它们会很快繁殖。油田常见的细菌有硫酸盐还原菌、腐生菌、铁菌等。由于它们的新陈代谢作用,可能在以下三方面产生油气层损害:

(1) 它们繁殖很快,常以体积较大的菌落存在,这些菌落可堵塞孔道;

(2) 腐生菌和铁细菌都能产生聚合物粘液,这些生物聚合物粘液易于吸附并堵塞油气层;

(3) 细菌代谢产生 CO_2 、 H_2S 、 S^{2-} 、 OH^- 等,与井下和地面金属设备表面作用,可引起 FeS_2 、 CaCO_3 、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 等无机沉淀。反应离子方程如下:



影响细菌生长的因素为:环境条件(温度、压力、矿化度和 pH 值)和营养物。防止细菌损害的常用做法是在工作液和注入流体中加入氧化剂和各种杀菌剂。细菌的生物损害比较普遍,而且若发生在井间部位更难于处理,所以必须以预防为主。

二、热力作用

(一) 增加损害程度

一般说油气层的温度越高,这种油气层表现出的各种敏感性的损害程度就越强,因为损害反应的速度迅速增加。温度升高,各种工作液的粘度就越低,控制滤失的能力下降,工作液的滤液就更容易进入油气层,从而导致更为严重的损害。

(二) 引起结垢损害

温度变化时,也可能引起无机垢和有机垢沉淀,从而造成油气层损害。此时的损害机理为:当温度降低时,使放热沉淀反应生成的沉淀物(如 BaSO_4)的溶解度降低,析出无机沉淀,当原油的温度低于石蜡的初凝点时,石蜡将在油气层孔道中沉积,导致有机垢的形成;当温度升高时,使吸热沉淀反应(如生成 CaCO_3 、 CaSO_4 的沉淀反应)更容易发生,从而有可能引起无机垢损害。

(三) 注蒸汽和火烧油层过程中的高温热力损害

1. 矿物溶解

一般而言,随温度增加矿物的溶解度增加,只是碳酸盐矿物具有反向溶解性。长期热力开采使一些矿物溶解,原来被这些矿物所包裹的地层微粒就会释放出来。高温流体注入,温度降低它们又可以再次沉淀析出,释放的地层微粒也能堵塞远井筒区。

2. 矿物转化

当温度超过 180°C ,原来的非活跃性粘土矿物可以向活跃性粘土矿物转化,这样油层的敏感性也会强化,膨胀、分散、运移更容易发生。

3. 润湿性变化

室内实验表明,温度升高,储层倾向于水湿程度增大,使油相渗透率增加,且有利于石油采收率的提高。但由于油藏中一些未被蒸汽作用的部分仍可维持原来的润湿性,这样不论从宏观还是微观上讲,油藏的润湿性分布的非均质性都将显著增加。注入蒸汽和热水前缘推进不均衡,有可能使一些原油被水分割成孤立的“油区”,而这部分油难以被后续的蒸汽和热水驱替,导致油层的采收率和油相渗透率降低。

还有一种情况,当蒸汽吞吐时,热水驱使油层水湿程度增加,残余油占据孔隙中央,或环绕在油珠周围是直接矿物接触的热水;随后蒸汽驱时,热水变成蒸汽,残余油又与矿物直接接触,孔隙表面为油膜覆盖,油层快速地由水湿转变为油湿。润湿性的交替变化降低油相渗透率和采收率。

4. 绝对渗透率降低

在油藏岩石总体积恒定条件下,温度升高矿物颗粒的膨胀程度增加,孔喉必然得到压缩,储层渗透率下降。热应力作用还可形成破裂,增加地层微粒的活化程度,微粒释放变得更容易。

三、生产或作业时间对油气层损害的影响

生产或作业时间对油气层的损害可能产生如下两方面的影响:(1)生产或作业时间延长,油气层损害的程度增加,如细菌损害的程度随时间的增长而增加,当工作液与油气层不配伍时,损害的程度随时间的延长而加剧;(2)影响损害的深度,如钻井液、压井液等工作液,随着作业时间的延长,滤液侵入量增加,滤液损害的深度加深。

油气层自钻开直至开采枯竭的任何作业中都可能发生损害,且每一种作业的损害原因可能是多种,所以油气层损害原因是非常复杂的,其复杂性表现在以下几个方面:

(1)油气层损害原因的多样性。如华北莫32断块的莫32井,该井的产层为 E_{m1} 层位的 3141.0~3153.0m 井段,图1-3为采油曲线。由图可以看出,1988年8月蜡卡洗井前后日产量明显的异常递减。通过实验和分析,认为有两个方面的损害。一是微粒运移,室内岩心流动实验得到该层的临界流速为 1.47m/d ,而油井附近的渗流流速达 5.69m/d ,这样使得油层内微粒发生运移,并堵塞油层孔喉。另一方面是石蜡的沉积,由于开采速度快,井底流压大,气体脱出,造成石蜡沉积在油层孔道中,堵塞油层。