

油田开发后期调剖堵水^和 深部调驱提高采收率技术

付美龙 张顶学 柳建新 刘 勇 著

石油工业出版社

油田开发后期调剖堵水和 深部调驱提高采收率技术

付美龙 张顶学 柳建新 刘 勇 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书针对油田开发后期采收率降低的现状,以作者多年来参与的调剖堵水和深部调驱开发项目为基础,系统介绍了多项油田开发后期调剖堵水和深部调驱提高采收率技术,并阐述了这些技术的最新研究成果和国内外进展。

本书可供从事油田开发的相关技术人员阅读,也可供现场施工人员及广大石油院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油田开发后期调剖堵水和深部调驱提高采收率技术 /付美龙等著.

— 北京:石油工业出版社,2017.7

ISBN 978-7-5183-1657-1

I. ①油… II. ①付… III. ①油田开发—后期管理—提高采收率
IV. ①TE34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 279900 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部:(010)64256990 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京苏冀博达科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:18

字数:448 千字

定价:89.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

随着石油开采技术的不断提高,油田现场开发进入后期,剩余油难以开采出,含水率升高,采收率降低,需要对油田实施系统的调堵调驱工作以提高采收率。所以如何进行油田后期的调剖堵水和深部调驱就成为广大石油工作者所面临的难题。笔者以多年来所参与的油田开发后期调剖堵水和深部调驱开发项目为基础,以最新的研究结果和进展为材料来源,经过系统整理编写成此书。书中通过大量的模拟实验和现场状况研究与实验,向读者介绍了多项油田开发后期调剖堵水和深部调驱以提高采收率的有效技术。

本书共分为三篇。第一篇介绍了油田进入开发后期后存在的主要问题,并对调剖堵水和深部调驱技术进行了概述;第二篇针对油田开发后期调剖堵水和深部调驱技术进行了大量的室内实验研究,包括交联聚合物调驱技术研究、微球乳液调驱技术研究、裂缝—孔隙型地层调剖堵水技术研究等;第三篇深入油田开发现场,对油田开发后期调剖堵水和深部调驱技术的优化决策、施工方案设计等方面做出了详细阐述,着重进行了低渗透油藏弱凝胶调驱技术和低渗透裂缝型储层复合调驱技术的研究,也开展了相关的现场应用,取得了系统、全面的成果。

本书第一篇由长江大学的柳建新博士执笔,第二篇由长江大学的付美龙教授执笔,第三篇由长江大学的张顶学副教授和长庆油田分公司第九采油厂的刘勇共同执笔。硕士生周璇、舒雪琴做了一些文字处理工作和部分章节的参编工作。全书由付美龙统稿,长江大学石油工程学院的领导及广大同仁们也在成书过程中提出了宝贵的意见和建议,在此表示感谢。

油田开发后期调剖堵水和深部调驱提高采收率技术涉及的相关学科较多,在理论和应用方面尚存在许多问题需进一步探讨,加之编者水平有限,欠妥或错误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

著 者
2017年3月

目 录

第一篇 油田开发后期调剖堵水和深部调驱技术概述

第一章 油田开发后期存在的主要问题	1
第一节 水驱窜流对宏观波及效率的影响	1
第二节 地层非均质性对水驱窜流的影响	2
第三节 其他油井产水原因	4
第二章 调剖堵水和深部调驱技术简介	5
第一节 调剖堵水和深部调驱的基本概念	5
第二节 调剖堵水和深部调驱体系的分类	6
第三节 调剖堵水和深部调驱技术的发展趋势	8
第三章 调剖堵水和深部调驱体系在复杂油藏开发中的应用	9
第一节 低渗透及裂缝型油藏	9
第二节 高温高矿化度油藏	10
第三节 稠油油藏	11

第二篇 调剖堵水和深部调驱提高采收率室内实验研究

第四章 交联聚合物调剖堵水及深部调驱提高采收率技术	12
第一节 耐盐交联聚合物体系实验研究	12
第二节 交联聚合物调驱提高采收率技术	22
第三节 梳型聚合物调剖提高采收率技术	31
第四节 鲁克沁深层稠油稠化水驱替技术研究	54
第五节 弱凝胶调驱提高采收率技术	80
第六节 结论与认识	89
第五章 微球乳液调剖堵水和深部调驱提高采收率技术	91
第一节 微球乳液调堵研究工区概况	91
第二节 微球乳液的性能测试	95
第三节 微球乳液驱油机理研究	97
第四节 油藏适应性评价和注入参数优化	101
第五节 结论与认识	121
第六章 裂缝—孔隙型地层调剖堵水技术	122
第一节 研究工区基本概况	122
第二节 适用于裂缝—孔隙型地层调堵剂的筛选	131

第三节	裂缝—孔隙模型调堵实验研究	155
第四节	裂缝—孔隙介质渗流规律研究	164
第五节	研究区块调剖堵水工艺参数研究	172
第六节	结论与认识	177
第七章	油田开发后期调剖堵水和深部调驱室内方案设计	179
第一节	赵凹油田安棚主体区基本概况	179
第二节	研究区块调剖目的及依据	180
第三节	研究区块调剖井选择	181
第四节	调剖方式及相关参数确定	182
第五节	调剖效果预测及实施要求	194

第三篇 油田开发后期调剖堵水和深部调驱现场试验研究

第八章	调剖堵水优化决策技术	196
第一节	选井决策	196
第二节	堵剂决策	205
第三节	调剖施工参数优化	208
第四节	调剖堵水优化决策软件的研制	213
第九章	调剖堵水施工方案设计	215
第一节	调剖施工工艺	215
第二节	调剖工艺参数	216
第三节	调剖效果评价	218
第十章	低渗透油藏弱凝胶调驱技术及现场应用	221
第一节	区块概况	221
第二节	HPAM/Cr ³⁺ 弱凝胶体系研制	224
第三节	铝交联弱凝胶体系研制	226
第四节	弱凝胶在多孔介质中驱替的微观研究	233
第五节	现场应用	235
第十一章	低渗透裂缝型储层复合调驱技术及现场应用	240
第一节	区块基本概况	240
第二节	复合调剖体系调驱原则	243
第三节	凝胶颗粒配方及性能评价	244
第四节	酚醛交联弱凝胶配方及其性能评价	259
第五节	现场应用效果	266
参考文献		278

第一篇 油田开发后期调剖堵水和深部调驱技术概述

第一章 油田开发后期存在的主要问题

油藏在注水开发中,由于储层的非均质性及油水黏度上的差异,容易产生舌进和黏性指进现象,严重影响了开发效率。对于储层物性好、渗透率高的油层,经过长期高速注水开发,易在储层中形成高渗带。这些大孔道加剧了油层的层间矛盾,注入水利用率低,水驱波及体积小,导致油井含水率上升快,大大降低了水驱油的效率;对于储层物性差、非均质性严重的油层,随着对酸化、压裂等储层改造措施的进行,加剧了储层的非均质性。目前调剖堵水和深部调驱是实现油田开发后期稳油控水的主要措施。了解水驱窜流对采收率的影响机理和相关技术是有效实施控水增油措施的基础。

第一节 水驱窜流对宏观波及效率的影响

水驱采收率 η 取决于波及效率 E_s 和洗油效率 E_D ,由下式决定:

$$\eta = E_s \cdot E_D \quad (1-1)$$

水驱油波及效率:对于注水开发油藏,从注入井到生产井之间的含油区域不能完全被注入水所波及,水波及体积占该油藏体积的百分比称为波及效率,由面积波及效率和垂向波及效率构成,即:

$$E_s = \frac{V_s}{V} = \frac{A_s}{A} \cdot \frac{h_s}{h} = E_A \cdot E_h \quad (1-2)$$

式中 V_s, A_s, h_s ——驱替相波及到的体积、面积和厚度;

V, A, h ——油藏的体积、面积和厚度。

注入水波及不到的区域形成剩余油。所谓剩余油是指由于波及效率低,注入水尚未波及的区域内所剩余的原油(局部死油区内的油)。剩余油在宏观上连续分布,其形成与油藏平面和厚度上的宏观非均质性、注采井网的布置以及注入工作剂的流度有关。

一、层间矛盾

如图 1-1 所示,对于注水开发油藏,由于垂直方向上存在层间非均质性,在水驱油过程中

易于产生舌进现象。由于油水的密度差异,也会导致重力舌进现象,此时水驱前缘沿着高渗透层快速突进,并最早出现突破。舌进现象会造成垂向波及效率降低。

因此,舌进的起因为层间非均质性和较大的油水黏度差,高、低渗透层的水驱油速度差与它们的渗透率差成正比。随着水驱的不断进行,高渗透层的油不断被驱替出来,层内阻力减小,而低渗透层阻力变化不大,高、低渗透层阻力差不断增大,水更多地沿着阻力更小的高渗透层流动,而低渗透层更难以启动。因此垂向波及效率很低。

当吸水剖面和产液剖面不均匀时,现场一般采用分层配注、分层配产工艺。也可采用调剖堵水技术,封堵高渗透层降低高渗透层的水窜,有效启动低渗透层。

二、层内矛盾

在水驱过程中,由于平面上的微观非均质和油水黏度的差异,造成驱替前缘呈手指状穿入油区的现象,称为黏性指进现象(图 1-2)。此时水的流度大,水驱油流度比高,造成平面波及效率较低。

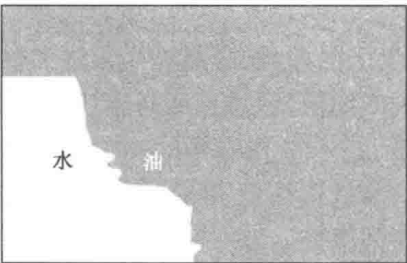


图 1-1 舌进现象剖面示意图



图 1-2 黏性指进现象示意图

第二节 地层非均质性对水驱窜流的影响

一、地层非均质性对波及效率的影响

勘探开发多年实践证实,复杂非均质油藏高含水期剩余油分布特征是总体分散、局部集中。受油藏分割性控制,仍存在较多的剩余油富集区。剩余油富集区控油模式一般包括断层分割控油、夹层分割控油和优势渗流通道控油。大量研究表明,地层非均质性是影响水驱窜流的主要原因,因此在实施控水增油措施前,除了了解地层孔隙度、渗透率等基本物性外,还需深入了解裂缝、断层等地质特征,对于长期注水开发的油藏还需摸清水驱形成的高渗透带和大孔道分布情况。准确认识优势渗流通道的类型和分布对确定适宜的控水措施具有特别重要的意义。

地层的非均质性主要是由沉积条件造成的。不同的沉积条件会造成地层物性在平面、垂直剖面上有极大的差异:平面非均质会导致平面上水线推进不均匀,使有的生产井过早见水和水淹;垂直非均质会导致油层水淹厚度上的不均一,易导致高渗透层见水早及效率低。地层的非均质性可以分为宏观非均质和微观非均质两种类型。前者主要是指油层岩石宏观物性参数(孔隙度、渗透率)的非均质性,一般认为宏观非均质性是影响波及系数的主要原因;后者主要是指岩石的孔隙结构特征,它表现为孔隙大小分布、孔隙孔道的曲折程度、毛细管力作用以及表面润湿性等,是影响洗油效率的主要原因。

二、地层非均质性的表征参数

目前国内外表征储层非均质性的参数很多,常用的有突进系数、渗透率级差、渗透率变异系数等。

渗透率突进系数表征的是一定井段内渗透率最大值与其平均值的比值,该方法简单明了,但可对比性差,其计算公式为:

$$T_K = \frac{K_{\max}}{\bar{K}} \quad (1-3)$$

式中 T_K ——渗透率突进系数;

$K_{\max}$ ——渗透率最大值;

$\bar{K}$ ——渗透率平均值。

渗透率级差表征的是一定井段内渗透率最大值与最小值之比,它忽略了中间数值对储层非均质性的影响,不够全面,同时也存在可对比性差的问题,其计算公式为:

$$R = \frac{K_{\max}}{K_{\min}} \quad (1-4)$$

渗透率变异系数反映的是样品偏离整体平均值的程度,它是一个数理统计的概念,常用于表征渗透率的变化特征,其计算公式为:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2 / (n - 1)}}{\bar{K}} \quad (1-5)$$

式中 σ ——变异系数;

K_i ——第 i 个样品的渗透率值;

$\bar{K}$ ——所有样品渗透率的平均值;

n ——样品数。

三、地层沉积韵律对水驱窜流的影响

地层沉积韵律反映了岩性在垂直剖面上的变化,注水开发过程中地层沉积韵律对水驱窜流的影响不尽相同。地层沉积韵律一般分为正韵律、反韵律和复合韵律。针对不同沉积韵律的油层,应采用不同的开发措施。

正韵律油藏形成于水动力较稳定或水动力较弱的稳定沉积环境下,主要表现为纵向上孔隙度、渗透率向上变小,物性变差,残余油富集于油层顶部。其代表性沉积相是曲流河点沙坝和分流河道沉积,水驱特征为水淹厚度和波及体积小,且随渗透率级差的增大而减小;水淹段的水洗程度高,含水率上升快;平面上水淹面积大,注入水沿底部高渗透段快速突进,纵向上水淹厚度增加慢,故开发效果最差,非均质性影响很大。改善注水开发的关键是对砂岩底部高渗透段进行封堵及对顶部低渗透带进行压裂,促使注入水沿顶部低渗透带驱替,增加波及体积。

反韵律油藏形成于碎屑物局部增多、水动力增强及河流侧向迁移的沉积环境下。主要表现为纵向上孔隙度、渗透率向上变大,物性变好,残余油富集于油层底部。其代表性沉积相是三角洲间席状砂、三角洲前缘砂体、岸外沙坝和分流河道沉积的河口部位等受波浪作用较强的地带。由于注入水的重力作用,水淹厚度和波及体积较大,含水率上升慢,开发效果最好。对

于反韵律含油的砂体,改善注水开发的关键是对顶部加大注水压力,增大水洗程度,对底部低渗透段采取补孔措施,增加波及体积。

复合韵律油藏形成于水动力变化的沉积环境下,主要表现为,纵向上孔隙度和渗透率的变化决定于层内沉积微相环境,即表现为层内较高渗透带所处的相对位置,残余油富集呈空间立体分带分部。其代表性沉积相是水下天然堤、废弃河道和河口沙坝的边部沉积。其水淹厚度和水洗程度均介于正、反韵律之间,决定于渗透率级差的大小及储集空间的非均质程度。依据层内较高渗透段所处的相对位置,而采取类似于正、反韵律的开发措施。

低渗透层油水前缘的压力高于同一垂直剖面上高渗透层的压力,导致注入低渗透层的水在驱替前缘向高渗透层窜流,降低注水效率。通过调剖堵水措施可有效抑制水驱窜流对波及效率的不利影响。

第三节 其他油井产水原因

底水油藏由于渗透性好,油藏动用情况较好,总体开发效果往往好于其他依靠天然能量开采的油藏。但由于油气井生产时在地层中造成的压力差破坏了由重力作用建立起来的油水平衡关系,使原来的油水界面在靠近井底部位呈锥形升高,会形成所谓的“底水锥进”现象,如果采用水平井开发方式,则易形成“底水锥进”现象,如图 1-3 所示。其结果是导致底水进入井内,造成含水率上升,产油量下降,甚至油井水淹。我国底水油藏一般采油速度较高,油田含水上升率也比较快。因此底水油藏开发中存在的最突出问题是有效防止底水的锥进或脊进(图 1-4),尽可能地延长无水采油期,实现较高的无水采收率;当底水锥进以后,如何抑制底水的快速锥进,避免油井过早水淹报废。对于非均质底水油藏,如果开发方式不当还会导致注采比失调,使注入水及边水沿高渗透层及高渗透区不均匀推进,在纵向上形成单层突进,在横向上舌进,使油井过早水淹。

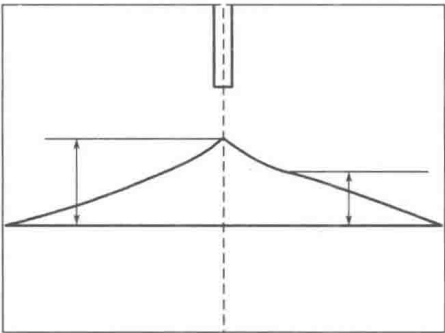


图 1-3 直井中底水锥进现象示意图

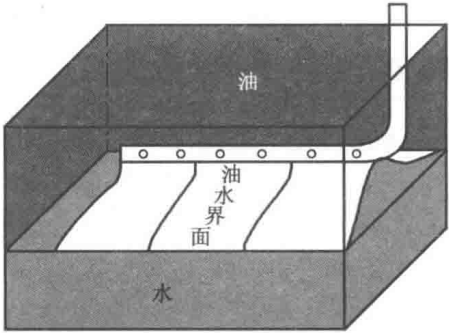


图 1-4 水平井中底水脊进现象示意图

第二章 调剖堵水和深部调驱技术简介

目前控水增油技术主要是通过封堵高产水层,改变注入水流动方向,迫使其向低渗透层流动,通过提高注入水波及效率来提高注水效率,最终获得较高的产量和原油采收率,该技术主要包括调剖技术和堵水技术。

第一节 调剖堵水和深部调驱的基本概念

调剖是指采用机械的或化学的方法,限制或降低注水井高渗透层或高渗透层段的吸水能力,以达到调整注水井吸水剖面,进而改善水驱波及体积的作用,其工作对象是注水井。

堵水是指采用机械的或化学的方法,限制或降低生产井出水层或高渗透层的产水能力,有效启动其他含油层或低渗透层的产油潜力,从而达到降低油井含水率、提高原油产量的目的,其工作对象是油井。

传统的调剖剂凝胶强度大、流动性差、封堵半径较小,水流绕过封堵部位后仍可进入到高渗透层,导致措施效果逐渐变差。近年来发展的深部调驱技术充分发挥可动凝胶在“调”和“驱”两方面的作用,具有较大的技术优势。可动凝胶是指在储集层多孔介质中可以移动的凝胶。它一方面可以调整驱动方向,通过可动凝胶对高渗透水流通道的暂堵作用,使后续的注入流体转向原来水驱冲洗强度较低和水未驱到的部位,有效地扩大波及体积和提高冲洗强度;另一方面在“调”的基础上依靠后续的注入流体有效地驱出所扩大波及范围内的那些分散的剩余油,从而提高水驱采收率。凝胶对原来的老通道形成暂堵以后,这些可动凝胶受到的压力梯度会有所增加,当其增高到一定程度后,就可以使具有柔性的可动凝胶突破原来暂堵住的部位并向前移动,直到在某个新的部位再次暂堵住新的高渗透水流优势通道,如图 2-1 所示。可动凝胶在地层中就不断地“暂堵—突破—再暂堵—再突破”直到油藏的深部,从而不断地扩大注入液流的波及体积,并驱出更多的分散剩余油。相比常规的聚合物驱,可动凝胶深部调驱化学剂的用量更少,施工效果和经济效益更为显著。

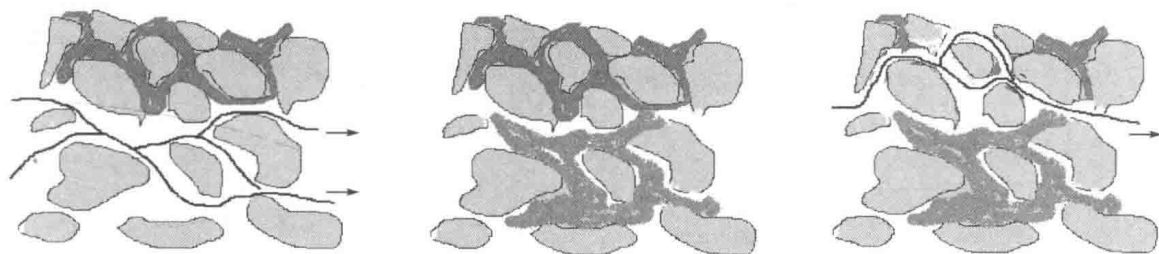


图 2-1 可动凝胶调驱示意图

第二节 调剖堵水和深部调驱体系的分类

调剖堵水技术分为机械堵水和化学堵水两种方法。机械堵水是利用封隔器和井下配套工具将油井中的出水层位进行卡封,将油层与高含水层分开从而实现堵水的一种工艺。它的缺点是没有选择性,只有将封隔器准确定位、封隔严密,才能起到堵水的作用。

化学堵水是利用化学封堵剂进行出水层位封堵的一种堵水工艺。化学堵水的原理是利用化学堵水剂的化学性质或者化学反应产物在储油中出水大孔道内进行封堵,使驱替水进入中低渗透层,提高采收率,降低油井的综合含水率。机械堵水容易受到地质条件的限制,而化学堵水由于现场操作相对灵活、堵水选择性强而被广泛使用。

一、选择性堵剂

选择性堵剂是指只与水作用而不与油作用的化学剂,即堵水不堵油的化学剂,包括水基堵剂、油基堵剂和醇基堵剂,分类如图 2-2 所示。水基堵剂是选择性堵剂中应用最广、品种最多、成本较低的一种堵剂。属于水基选择性堵水剂的有聚合物类、凝胶类、微生物类和预交联颗粒深部调剖剂。尽管人们对凝胶的作用机理还有争议,但是聚合物凝胶通过被地层吸附使渗透率不均衡降低,从而使水相渗透率降低幅度大于油相和气相渗透率降低幅度已得到证实。凝胶类选堵剂有代表性的有延缓交联型凝胶堵水剂、互穿聚合物网络型油田堵水剂、预凝胶和二次交联凝胶。油基堵剂主要包括有机硅类堵剂(SiCl_4 、氯甲硅烷和低分子氯硅氧烷等)、聚氨酯堵剂、稠油类堵剂等。稠油类堵剂包括活性稠油、耦合稠油和稠油固体粉末等。在选择性堵剂中,部分水解聚丙烯酰胺有独特的堵水选择性,且易于交联形成凝胶或冻胶,适用于不同渗透率地层,逐渐引起人们的重视。醇基堵水剂种类较少,较早使用的有松香二聚物的醇溶液,它易溶于低分子醇(如乙醇)而不溶于水,在出水层饱和并以固态析出,对水层有较高的封堵能力,使用温度可以达到 100°C 。

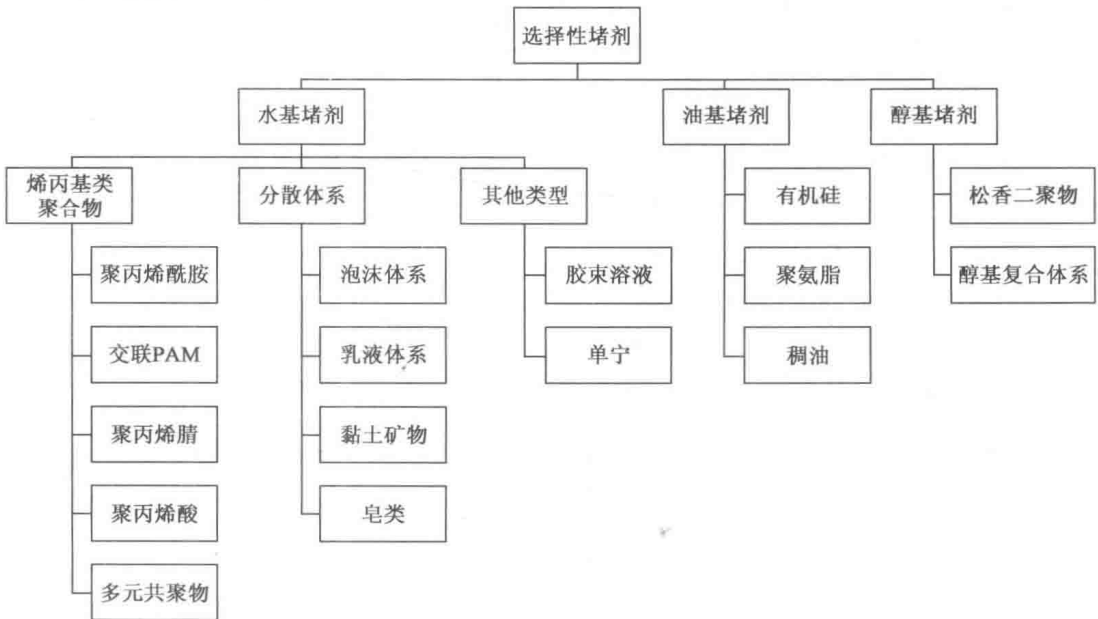


图 2-2 选择性堵剂分类示意图

二、非选择性堵剂

非选择性堵剂是指在油井中能同时封堵油层和水层的化学剂,适用于封堵单一水层或高含水层,分类如图 2-3 所示。非选择性堵水剂既可堵水,也可堵油。施工时,要首先准确找出水层段,并采用适当的工艺措施将油层和水层分开,然后将堵剂挤入水层,造成堵塞。一般说来,对于外来水或水淹后不再准备生产的水淹油层,在搞清楚出水层位并有可能与油层封隔开时,采用非选择性堵水法较为合适。非选择性堵水剂包括:树脂型调剖堵水剂,常采用热固性树脂,如酚醛树脂、脲醛树脂、环氧树脂、糖醇树脂;水泥浆类堵水剂;无机盐沉淀型调剖堵水剂;凝胶型堵剂;冻胶型凝胶,如铝冻胶、锆冻胶、钛冻胶、醛冻胶、铬木质素冻胶、硅木冻胶、酚醛树脂冻胶等。

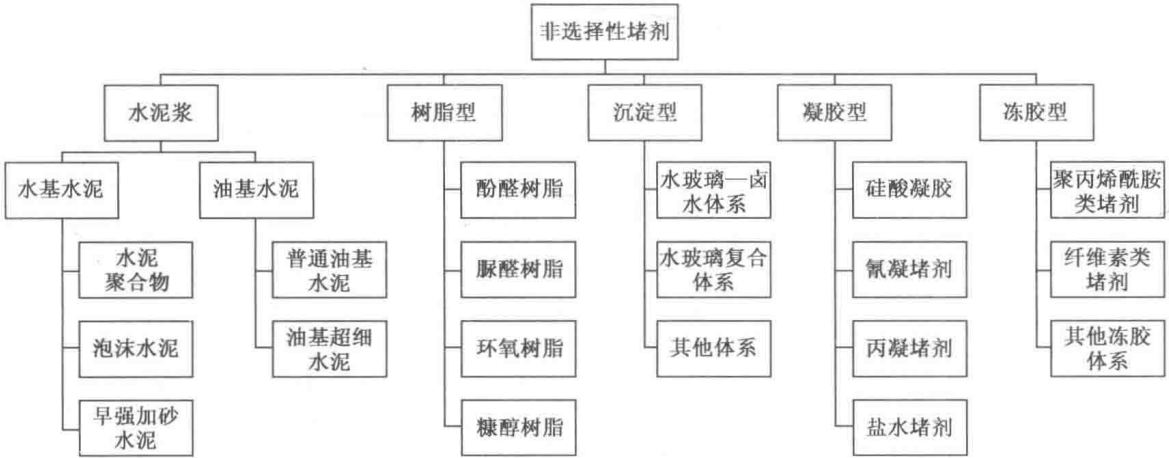


图 2-3 非选择性堵剂分类示意图

三、深部调驱体系

对于交联聚合物弱凝胶深部调驱技术,美国使用最多的是乙酸铬、柠檬酸铝和乙二醛。我国胜利油田和辽河油田在应用交联聚合物凝胶调剖技术后都显著改善了水驱效果。胶态分散凝胶(CDG)是早期用于深部调驱的一种体系,但 CDG 耐温耐盐性能差,成胶条件苛刻,封堵程度低。体膨颗粒深部调剖(调驱)技术是近几年发展起来的一种新型深部调剖技术,利用了颗粒粒径的不同,达到封堵高渗层,迫使后续水驱更好的波及低渗透层位的目的。该技术主要是针对非均质性强、高含水率、大孔道发育的油田深部调剖、改善水驱开发效果而研发的创新

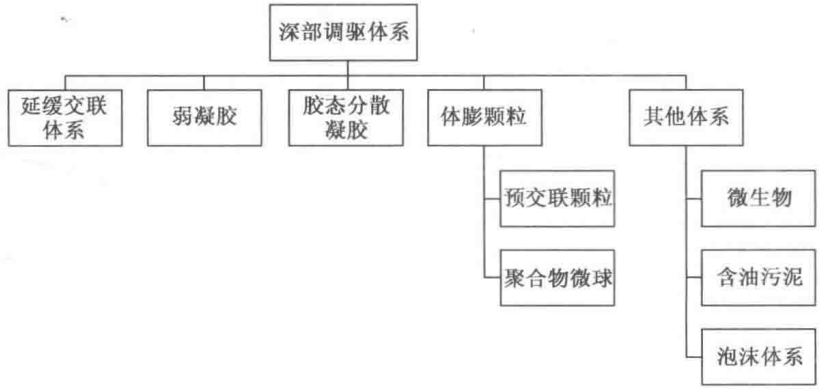


图 2-4 深部调驱体系分类示意图

技术。深部调驱体系的研究与应用方面取得了许多新进展,形成包括弱凝胶、胶态分散凝胶(CDG)、体膨颗粒、柔性颗粒等多种深部调驱技术,分类如图2-4所示。

第三节 调剖堵水和深部调驱技术的发展趋势

国内外调剖堵水研究和应用的情况表明,调堵材料的性能是影响措施效果的关键因素,因此对调堵材料进行改进、创新一直是油田化学工作者研究的重要内容。尤其在增强调堵材料的抗温抗盐性能、提高调堵材料与具体应用油藏地质条件的适应性、实现深部调驱、降低调堵材料成本等方面做了大量工作。

聚合物微球深部调剖技术是近年来发展起来的一种新型深部调剖堵水技术,具有受外界影响小、可用污水配制、耐温盐的优点。其作用机理是依靠纳米/微米级聚合物微球遇水膨胀和吸附来达到逐级封堵地层孔喉实现其深部调剖堵水的目的,如图2-5所示。

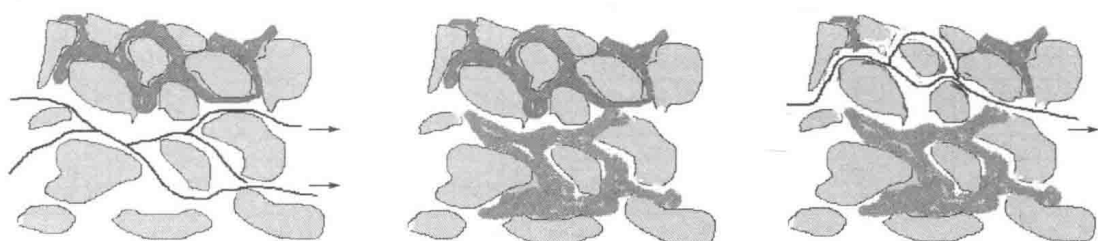


图2-5 聚合物微球封堵示意图

聚合物微球的封堵位置为渗水通道的孔喉,可大幅度提高微球的使用效率;聚合物微球的初始尺寸为纳米或微米级,且水相中呈分散悬浮状态,可以实现进入地层深部;聚合物微球具有较好的弹性,在形成有效封堵的同时,在一定压力下可以发生变形而运移,且因为微球具有良好的分子结构受剪切作用较小,可以形成多次封堵,具有多次工作能力和长寿命的特点;通过各种不同尺寸和不同性质聚合物微球的优化组合,可以实现对不同渗透率、不同地质条件的有效封堵。

近年来,调剖堵水用聚合物微球成为新型堵水材料研究的热点。通过设计与孔喉尺寸相匹配不同粒径的聚合物微球可以实现高效精确堵水;采用反相乳液聚合技术是合成聚合物微球的主要方法,多种类型的聚合物堵水微球已在现场得到应用,如通过孔喉时可发生可逆弹性形变的亚微米尺寸活性微球,内核与外层具有不同性质的核壳结构微球等。这种采用新型聚合技术制备的聚合物微球具有粒径可控、球形度好、粒径分布集中、力学性质灵活可调等多种优良的性质,有望成为深部调驱的高性能堵水材料。

利用聚合物驱后地层中吸附滞留的残余聚合物进行交联进而实现深部调驱是一种低廉的调驱措施,目前作为聚驱后提高采收率的一种重要技术得到广泛应用,该技术提高了残余聚合物的利用率及岩心的封堵效果。含油污泥在水中呈稳定的悬浮乳状液状态,难以分离和处理,通过加入适当添加剂增加悬浮时间可作为注水井深部调剖材料,其中的泥质吸附胶沥质和蜡质,并通过它们粘联聚集形成较大粒径的“团粒结构”,沉降在大孔道中,使大孔道通径变小,封堵高渗透层带,也是一种良好的调堵材料。

第三章 调剖堵水和深部调驱体系 在复杂油藏开发中的应用

第一节 低渗透及裂缝型油藏

我国低渗透油藏储量所占比例高达 60% ~ 70%, 是未来石油工业可持续发展的主要攻关研究方向。在储层沉积、成岩等地质过程综合作用下低渗透油藏一般都具有较强的非均质性。我国大部分低渗透油田经过长期注水开发, 综合含水率已达到 85% 以上, 但采出程度并不高, 中高渗层位继续开采潜力较小, 剩余油主要集中在渗透率较低的层位。主要表现在注水井的层间吸水强度不均, 油井产液剖面的产液强度不均, 各砂组的地层压力分布极不平衡。因此导致油田低采出高含水, 大部分注入水由大孔道进行无效循环, 经济效益逐年变差。

同时我国还有大量低渗透油藏的裂缝较为发育, 属双重孔隙介质, 裂缝和基质的储集和渗流能力有很大差异。采用常规注水开发水流易沿着裂缝窜流, 造成油井水淹, 含水率迅速上升, 油井注水见效及水淹特征的方向性十分显著, 一般注水井注入压力较低、吸水能力强、注水指示曲线存在明显拐点。常规的调剖堵水技术控水增油效果较差, 其主要原因是堵剂强度较低, 大裂缝未能实现有效封堵; 或者部分堵剂进入微裂缝, 由于微裂缝堵塞造成油流通道不畅导致产液量大幅度下降。

对于非均质性较强的低渗透油藏, 一般采用地下成胶的调剖堵水体系, 即堵剂和交联剂在地层条件下发生交联反应, 形成强度较大的冻胶体系封堵高渗流通道。而对于裂缝性油藏, 常规的地下成胶体系适应性较差, 一般采用预交联调剖堵水复合体系, 即首先通过地面预交联方法形成可流动的弱凝胶体系, 由于弱凝胶分子尺寸较大无法进入微裂缝, 只能沿着大裂缝流动; 在地层温度条件下弱凝胶继续发生交联反应, 生成强度较大的冻胶体系封堵大裂缝, 实现堵水。近年来采用预交联的凝胶颗粒在低渗透裂缝性油藏的调剖堵水中应用更加广泛, 表现出良好的应用前景。

河南油田采用高强度调剖剂对某非均质性严重、大孔道发育的油藏进行油层深部调剖, 整体封堵水窜, 同时结合聚驱进行流度调整。对 7 口注聚井、18 口生产井进行了矿场实验, 取得了增油 $9.39 \times 10^4 \text{t}$, 提高采收率 6.5% 的良好效果。

胜利油田应用弱凝胶深部调驱技术, 采用 HPAM/乙酸铬体系在孤东油田西区进行了 3 个井组处理, 调剖后注水井的注水压力平均上升了 3MPa 左右, 累计增油 9800t。

辽河油田采用酚醛复合交联的弱凝胶体系进行了 6 个井组的整体调剖作业, 处理后注水压力上升 0.6 ~ 2MPa 左右, 累计增油 30000t, 水驱开发效果显著改善, 有效期长达 3 年以上。

长庆油田某裂缝性低渗透油田应用预交联颗粒/水驱流向改变剂/缔合聚合物凝胶复合深部调剖体系, 共实施封堵井 18 口, 取得明显治理效果。实施后注水井恢复正常注水, 对应油

井产量逐步恢复正常,含水率下降,部分油井有效期长达 18 个月以上,累计增油 11489t,累计降水 75493m³。平均水驱指数由 2.43 上升到 3.10,井组递减率从 9.05% 下降到 4.46%。

长庆油田对某微裂缝发育的油藏采用聚合物微球进行深部调驱,注入 20 天后,注水压力均出现了不同程度的抬升,平均最高上升 1.1MPa。压力缓慢滞后上升,说明微球注入后不是封堵到近井地带,而是进入到地层深部。注水指示曲线均上移,表明高渗透层段得到了一定封堵,注入 40 天后相继出现了 7 口低产井产量上升,3 口高产井产量下降的现象,平面矛盾得到了一定的调整,月度递减率由注入前的 1.15% 下降到注入后的 0.82%。

第二节 高温高矿化度油藏

我国目前有较多的高温高矿化度油藏难以采用提高采收率措施,这主要是因为目前大部分化学驱使用聚丙烯酰胺类增稠剂,但聚丙烯酰胺抗温抗盐性能较差。高温条件下,聚丙烯酰胺的酰胺基会发生不可逆的水解反应,过量水解形成的羧酸根对温度极其敏感;并且高温会导致聚丙烯酰胺发生热降解,这两者的共同作用会使聚合物分子严重收缩,溶液黏度大幅降低,严重影响聚合物的应用效果。在高矿化度条件下,溶液中的 Na⁺ 会屏蔽聚合物链段上的羧酸根之间的静电斥力,促使聚合物线团采取收缩构象,导致溶液的黏度迅速降低。因此目前聚丙烯酰胺多运用于温度低于 75℃、矿化度低于 30000mg/L 的油藏。

聚合物在交联剂作用下由线状结构转变为体状结构,在高温高矿化度条件下,聚合物线团的收缩受限,表现出一定的抗温抗盐能力;并且交联聚合物具有一定的凝胶强度可封堵水层起到调剖作用,因此在某些高温高矿化度油藏用于替代驱油用线形聚合物。

常规凝胶体系一般使用 Cr³⁺、Al³⁺ 等金属离子做交联剂,与聚丙烯酰胺上的羧酸根形成离子键而成,在高温条件下化学键的热稳定性迅速下降,因此其抗温性能一般较差。目前使用树脂类有机交联剂是提高凝胶体系抗温抗盐性能的主要途径,包括酚醛树脂、脲醛树脂、糠醛树脂等,它的主要反应机理是树脂预聚体中的羟甲基与聚合物的酰胺基之间可发生脱水反应,生成共价键连接的凝胶体系。文献报道表明该体系在 120℃ 仍能保持长期稳定性。

大港某复杂断块高温高盐油藏(矿化度 28000mg/L,温度 80℃)使用高温交联剂/聚合物组成的延缓交联的弱凝胶调剖体系,室内实验表明该体系在 3 天左右开始成胶,15~30 天成胶强度达到最大。由现场施工的注入压力与累计注入调剖剂关系曲线可以发现,经过 40 天施工结束,注入压力升高了 4MPa,以后的 6 个月也基本保持上述水平,投入生产后 6 个月累计增油 600t。

中原油田某高温、高盐、非均质严重的复杂断块油气田使用抗温抗盐的预交联水膨颗粒进行调剖堵水作业。该油田主力油层温度 80~130℃,地层水矿化度 50000~300000mg/L。注水井生产曲线表明,措施后注水井压力指数上升 2.3MPa,启动压力提高 2.1MPa,注水压力提高 1.2MPa,平均有效期 145 天。吸水厚度增加 27.7%,吸水层数增加 25.5%,启动新层 56m/32 层。采油井生产曲线表明,42 口油井中有 35 口井获得增油、降水效果,油井见效率为 83.3%。阶段累计增油 3947t,平均井组增油 263t,综合含水率下降 2.0%。

第三节 稠油油藏

稠油、超稠油油藏在全世界范围内储量丰富,目前主要依靠蒸汽吞吐和蒸汽驱等方法进行开采。我国的稠油油藏一般分布在由河流相或河流三角洲相沉积构成的疏松砂岩地层中,储层胶结疏松,孔隙度大,渗透率高,非均质程度严重。辽河油田、胜利油田等多地的矿场实践表明,在蒸汽吞吐(驱)几个周期后,由于地层构造、储层非均质性、不利的油气流度比及蒸汽超覆等原因,致使产油层的吸汽剖面不均匀,汽窜、指进等现象严重,降低了波及系数,影响了稠油开采效果。因此蒸汽热采井调剖堵水技术对提高稠油油藏的采收率有着特别重要的意义,而实现稠油油藏的高效开发有赖于抗高温(200℃以上)调堵体系的实现。

由于普通聚丙烯酰胺类凝胶在温度达到 90℃ 后降解严重,限制了其在热采过程中的应用。经过磺化改性的淀粉、木质素和栲胶等生物型聚合物与在交联剂的作用下获得的凝胶可用于 200℃ 高温和高矿化度条件下稠油油藏热采中的调剖堵水。固相颗粒型堵剂由于价格低廉、封堵强度高、耐温性好且作用有效期长等优点,在高温封堵大孔道方面应用较为广泛。在堵剂注入过程中,固相颗粒优先进入大孔道沉积,并在孔喉处架桥形成堵塞。目前颗粒类堵剂种类繁多,大体可分为非体膨性颗粒、体膨性聚合物颗粒、矿物颗粒等,但由于固相颗粒粒径分布不均、成分复杂,易引起固相侵入造成储层伤害。泡沫调堵体系和 W/O 乳化稠油调堵体系可充分发挥选择性堵水和贾敏效应的优势,形成抗温 200℃ 以上的抗温调堵体系。

除此之外,通过盐析作用在饱和电解质(如氯化钠等)水溶液中加入醇类等诱导盐析体系,降低溶液中电解质的溶解度,使部分电解质从溶液中析出形成固体沉淀并堵塞大孔道,可实现 300℃ 以上的封堵。但油藏温度和压力对盐析效应影响较大。

孤东油田使用树脂和无机材料组成的高温调剖封窜剂对稠油注汽井进行调剖,其中蒸汽吞吐井 2 口,蒸汽驱井 6 口。有效率 88.9%,平均注汽压力升高 1.9MPa,累计增油 726.8t。

辽河油田某超稠油热采水平井使用凝胶与树脂颗粒相结合技术进行调剖,以封堵高渗透层、改善吸汽剖面、提高蒸汽吞吐效果。施工结果显示注汽压力在排量相同的情况下提升 2.5~4.1MPa,表明油层的吸气状况得到改善,见到水平段调剖效果。

克拉玛依油田使用抗温抗盐聚合物高温凝胶堵剂和木质素高强度树脂堵剂组成的复合体系对某稠油热采水平井进行调剖。调剖前井温剖面测试结果显示水平段温度差异大,存在严重的吸汽不均现象,且温度异常区很可能存在大的汽窜通道。调剖后新一轮注汽结束后井温剖面测试结果与措施前对比结果显示,调剖后井温剖面有了较好改善,水平段动用程度增加,汽窜现象得到有效抑制。