

低渗透油藏 提高采收率方法

曹 毅◇著



中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

低渗透油藏提高采收率方法

曹 毅◇著

中国石化出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

低渗透油藏提高采收率方法/曹毅著.

—北京:中国石化出版社,2018.8

ISBN 978-7-5114-4963-4

I. ①低… II. ①曹… III. ①低渗透油层-油田开发

IV. ①TE348

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 166542 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号

邮编:100020 电话:(010)59964500

发行部电话:(010)59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 7.5 印张 206 千字

2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

世界范围内的低渗透油藏分布广泛,目前勘探发现的新油田75%以上属于低渗透油藏。低渗透油藏的基本特征是孔隙度和渗透率低、微裂缝比较发育,自然能量开发效果差,在注水/注气开发过程中,容易产生驱替介质窜流的问题。驱替介质的无效流动严重影响了低渗透油藏的开发效果,增加了油藏开发成本。为了提高低渗透油藏的开发效率和最终采收率,研究适用于低渗透油藏的调剖封窜体系及其影响因素,为低渗透油藏高效开发提供有力的技术支撑势在必行。

为了深入研究适用于低渗透油藏的提高采收率方法,笔者在多年研究的基础上,经过不断地积累完善,编写完成了《低渗透油藏提高采收率方法》一书。全书共分为五章,第一章主要介绍了低渗透油藏窜流问题研究过程中涉及的基本概念和国内外对于窜流问题的研究现状;第二章对比分析了分散体系、弱凝胶体系、强凝胶体系、含油污泥调剖体系四大类调剖封窜体系的评价方法,重点介绍了笔者建立的凝胶调剖性能评价方法;第三章通过调剖剂性能评价实验和物理模拟实验研究了聚合物微球乳液、含油污泥调剖体系和凝胶型调剖封窜体系在低渗透油藏中的适应性;第四章以凝胶强度和成胶时间为主要指标研究了地下聚合凝胶调剖剂性能的主控因素,通过复合凝胶微观结构分析和物理模拟实验,明确了无机-有机凝胶复合作用机理及调剖封堵能力;第五章通过矿场实验评价了地下聚合凝胶调剖剂在低渗透油藏中的应用效果。

本书由“西安石油大学优秀学术著作出版基金”资助出版。同时,笔者参考了陕西省教育厅重点实验室重点科研项目“低渗透油藏注气(氮气、二氧化碳)提高原油采收率(项目编号09JS036)”的部分科研成果。在编写过程中,得到了中国石油大学(北京)岳湘安教授、赵仁保副教授,西安石油大学陈军斌教授、徐建平教授、聂向荣博士、龚迪光博士的指导和帮助,在此一并表示衷心的感谢。另外,对本书所引用的相关研究资料的作者和相关研究人员表示感谢,由于篇幅有限在此不能一一列举,深表歉意。

限于笔者水平,书中难免存在不妥之处,敬请专家同行和读者批评指正。

第一章 概述	(1)
第一节 窜流的普遍性	(1)
第二节 窜流对原油生产过程的影响	(3)
第三节 抑制气体窜流的方法	(4)
第四节 窜流模拟方法	(8)
第五节 二氧化碳驱油藏封窜剂	(11)
第二章 深部调剖剂性能评价方法	(14)
第一节 常规深部封窜剂评价方法分析	(14)
第二节 设计制作凝胶强度测试装置	(19)
第三节 建立凝胶强度评价方法	(21)
第三章 几类典型调剖剂在低渗透油藏中适应性评价	(27)
第一节 聚合物微球乳液深部调剖适应性评价	(27)
第二节 含油污泥深部封窜剂适应性评价	(43)
第三节 凝胶型深部调剖封窜剂适应性	(50)
第四节 三类调剖剂的对比分析	(56)
第四章 地下聚合凝胶调剖剂关键技术	(58)
第一节 成胶时间影响因素及控制方法	(58)
第二节 复合凝胶制备与强度评价	(67)
第三节 凝胶微观结构	(78)
第四节 地下聚合凝胶调剖剂特征	(81)
第五章 低渗透油藏深部调剖封窜现场实验	(87)
第一节 实验井区地质概况及开发现状	(87)
第二节 实验井区深部调剖方案及效果分析	(91)
第三节 实验井区深部调剖效果分析	(94)
第四节 矿场实验总结	(104)
参考文献	(106)

第一章 概 述

我国的低渗透油藏分布广泛，在已探明地质储量中所占比重越来越大。在近几年新增探明储量中，低渗透油藏超过 75%，由此可见，随着石油勘探开发程度的进一步加深，低渗透油藏的开发已经成为我国石油勘探开发领域的重中之重。

低渗透油藏的基本特征是：储层物性差、孔隙度和渗透率低，沉积矿物成熟度低，油藏基质渗透率和裂缝渗透率差异大，导致驱替流体难以注入，基质剩余油难以启动，开发难度大。国内外低渗透油藏平均采收率仅为 20% ~ 30%，大部分原油滞留在油层基质中未被开采出来，因此采用多种提高采收率技术方法，提高低渗透油藏基质采收率是目前油田稳产的主要手段。

低渗透油藏普遍采用的提高采收率方法是注水/注气开发，但是由于低渗透油藏储层非均质性强、裂缝相对发育，导致注入流体容易发生窜流，驱替流体沿着裂缝和高渗透层带迅速窜流至油井，使油井含水率急剧增加，甚至造成油井暴性水淹，降低了低渗透油藏采收率。针对驱替流体的窜流问题，研究适用于低渗透油藏的调剖封窜剂，选择合理的调剖封窜方法治理窜流问题显得尤为重要。

第一节 窜流的普遍性

一、窜流的定义

在驱替流体注入储层过程中，驱替介质的无效流动现象都可以归结为“窜流”。一般来说，将油藏中所有导致高速无效运移的通道都称为“窜流通道”，包括：大（或特大型）孔道、天然和人工裂缝、特高渗透条带等。实际上“窜流”也是一个相对的概念，一般是指任何情况下，注入流体在油藏中的不均匀推进。低渗透油藏基质孔隙致密，流体流动阻力大，渗流规律偏离达西定律，地层压力下降速度快，依靠降低井底流压、加大生产压差提高产液量增加产油量的能力非常有限。而采用注水或者注气开发时，注入流体必然向油井流动，并沿着高渗透层带迅速突进，最终完全突破。不同油藏、不同注入工艺，驱替流体突破的时间不同。在裂缝性低渗透油藏注水或者注气过程中，注入流体突破时间和产油状况受地质条件和注入井位置等因素影响。

二、国内外窜流研究现状

1994 年, Skauge A 介绍了挪威布拉盖油田 Fensfjord 层开始非混相水气交替注入。根据模拟研究结果, 在 3 个月后观测到气体突破。示踪剂突破能早期监测注入气突破时间和方向, 并获得有关注采井间连通的重要信息。Sognesand S 提到的奥塞贝格油田位于北海 30/6 和 30/9 区块的挪威管辖区中, 油藏监测表明: 尽管一些水平井中出现气窜现象比预计的要早, 但是气驱前缘仍稳定地演变。Lee J. I. 提到, 布拉佐河 A、D 油藏经过 10 多年的烃混相驱开采已出现大面积气窜, 导致油层压力下降, 并在油藏底部留有 20 ~ 30m 厚的未波及油柱。Хркмодичев М. Н 介绍了美国两个油田注二氧化碳开采的成功经验。尤诺卡尔公司在达拉尔霍特油田注入二氧化碳, 注入过程中发现, 二氧化碳被重新采出的程度很高, 3/4 的井中发现二氧化碳气窜。Spivak A 主要介绍了向重油油藏注入不混溶二氧化碳机理研究的模拟方法, 注气 1 个月后, 注入气沿着中间层窜流进入采出井, 注气体积为油藏孔隙体积的 14%, 增产原油占地质储量的 3%。

三、窜流的主要类型

依据形成的主要原因可以将窜流分为以下三种类型。

1. 指进

由于两种流体物理性质的差异, 在接触时会形成不稳定界面, 驱替流体会形成特征为手指状的流体柱伸入被驱替流体中, 其主要原因是排驱相流体的黏度低于被驱替相流体的黏度, 因此也常称为“黏性指进”。

黏性指进会导致驱替前缘不稳定, 降低驱油剂在储层中的波及效率。驱替流体的黏度低于地层原油, 不利的流度比将导致黏性指进, 降低波及效率。因此, 在低渗透油藏水驱过程中, 黏性指进的发生是不可避免的, 但通过增加驱替流体黏度和降低驱替速度可以适度控制指进现象的发展。

2. 非均质窜流

非均质窜流是指驱替流体沿着高渗透层带迅速突进的现象。主要原因是由于低渗透储层纵向上存在的非均质性, 比如在正韵律油层中进行注水开发, 注入水将沿着油层下部的高渗透层迅速突进至采油井。

3. 裂缝性窜流

低渗透油藏裂缝比较发育, 除去天然裂缝外, 随着油层改造的进行, 大量的人工裂缝同样广泛存在, 天然裂缝和人工裂缝彼此连通形成裂缝网络。裂缝渗透率远远大于储层基质渗透率, 因而驱替流体在裂缝中的流动能力强, 渗流阻力小; 裂缝性砂岩油田采用注水或者注气开发, 注入流体很容易沿裂缝窜进, 从而使注入流体无效循环, 这种现象十分普遍, 是裂缝性砂岩油田注水/注气开发的普遍特征。

第二节 窜流对原油生产过程的影响

低渗透油藏开发过程中,注入流体的窜流现象对油田生产过程的影响主要表现在以下两个方面。

一、窜流对生产动态参数的影响

1. 注入压力的影响

注水开发过程中,注入井的泵压随着开发动态而波动。开发初期,由于储层渗透率低,渗流速度慢,导致注入压力较高;随着油田注水开发的深入开展,在形成明显的窜流通道以后,注入压力呈明显下降趋势,表明注入水进入地层后,开始沿着窜流通道向油井突进。注二氧化碳开发过程中,初期注气压力较高,主要是因为近井地带存在污染,随着注入气量的增大,注气压力趋于稳定,气体发挥了气注入性好、扩散能力强的优势,逐步进入储层深部,但是,随着注气量的进一步增加,气体沿着裂缝发生窜流,注气压力呈明显下降趋势,表明二氧化碳气体沿着窜流通道迅速向油井突进。

2. 动态含水率及气油比的影响

注水开发窜流发生前,生产井原油含水率较低,基本处于无水采油期,低渗透油藏的无水采油期较短,有些油井甚至没有无水采油期。随着注入液量的增加,开始出现窜流现象,油井含水率迅速上升,发生严重水窜时,油井含水率上升速度特别快,甚至出现暴性水淹。而注气开发时,气窜前,生产井的气油比基本与开发初期相当;随着注气量的增加,生产井的气油比开始上升,这个阶段是油井注气开发的主要见效阶段,气油比稳定,日产油稳定;到了注气开发后期,气油比急速上升,生产井油量则明显下降,表明二氧化碳沿着窜流通道迅速突进,发生严重气窜。

3. 注入流体突破时间的影响

低渗透油藏注水后,各生产井产油量将发生明显变化,渗透率相对较高,连通性较好的生产井产量迅速增加,而渗透率相对较低,连通性较差的生产井产油量没有明显变化。随着注水开采程度提高,注入水沿着高渗透层快速突进,加快了注入流体突破速度,导致储层平面波及效率低,开发极不均衡,缩短了突破时间,此时,必须采取有效措施治理窜流问题,否则油井产油量迅速降低,导致最终采收率低。而注二氧化碳开发过程中,注气初期各生产井产出气没有明显变化,随着注气量的增加,生产井的产气量呈现上升趋势,这是由于气体具有极低的黏度和良好的扩散性能,二氧化碳气体容易快速突破,其突破速度明显比水驱突破速度快,气体突破之后,将导致垂向波及效率迅速降低,而且直接影响生产井泵效和油产量,气窜后泵效逐月降低,必须采取下气锚以及环空放气等措施,以维持油井正常生产。

二、窜流对油井产出物的影响

油田开发过程中,出现窜流问题后,油井产出的原油物性发生明显变化,快速水窜导致储层中岩石微小颗粒和层间胶结物被采出,使采出原油杂质含量升高,增加了原油处理难度。注气开发时导致产出的原油物性发生明显变化,注气后产出的原油密度明显变小,并有二氧化碳气体产出,主要原因是二氧化碳气体对原油中的轻质组分具有抽汲作用,原油中大量轻质组分被开采出来,而原油中的重质组分依然残留在油层中,而形成沥青质沉积,对油层条件造成损伤,同时油井采出水中总矿化度和碳酸氢根离子明显增加,这是因为二氧化碳与储层中的原油和岩石的相互作用,产生大量碳酸根和碳酸氢根离子,以及二氧化碳驱动束缚水流动等原因引起的。

第三节 抑制气体窜流的方法

“窜流”的发生对油田的开发影响很大,因此需要采取有效的对策来防止或治理窜流。各种抑制窜流的方法适应范围和应用效果有较大差异,需要针对具体油藏特点和窜流类型来选择和应用。同时,近年来也不断发展了一些新的抑制窜流或深部调剖的方法和技术,主要有:

一、气体增黏

近几年,一些研究者开展了二氧化碳气体增黏方法研究,二氧化碳气体增黏主要有三种技术思路:一是在助溶剂存在情况下,向二氧化碳中加入不同相对分子质量的高分子化合物,增加气体黏度,聚合物可以通过缔合、氢键或胶束的形式而形成一种具有增稠作用的空间网络结构,从而增加二氧化碳气体的黏度,增加气体在储层中的渗流阻力,降低气体流动速度;二是通过物理方法使二氧化碳处于高黏性时的物理状态,因为在超过二氧化碳气体临界温度和临界压力的条件下,超临界二氧化碳的黏度迅速增加,只要调整注入过程的控制条件,就可以改善二氧化碳的黏度;三是近年来开展的有关新型增稠剂的合成,一类是高相对分子质量的聚氟代丙烯酸盐;另一类是低相对分子质量的缔合增稠剂。

J. H. Bae 经过系列实验认为聚乙基硅氧烷聚合物 (Polydimethyl Siloxane Polyer) 在甲苯作为助溶剂的条件下混溶在二氧化碳中效果最好。此聚合物的动力黏度为 $600\text{mPa}\cdot\text{s}$, 为证明此效果,他分别进行了聚合物优选实验、助溶剂优选实验、以及岩心采收率实验。在聚合物优选实验中, J. H. Bae 是采用最小溶解压力 (MSP) 来评价增稠效果的,高于溶解压力时,两种物质混溶为单相,低于最小溶解压力时,为两相,并且有盐分析出。分别

在有甲苯作为助溶剂或者没有助溶剂的条件下,比较了不同聚合物的稠化条件,结果表明聚乙基硅氧烷聚合物的稠化效果最好,而且证明最小溶解压力只与助溶剂的性能有关,而与聚合物的浓度无关。在助溶剂优选实验中,尽管其他助溶剂具有很好的溶解性能,但是考虑到在实际运输过程中的经济费用问题,还是采用甲苯作为助溶剂。六组四根岩心的采收率实验表明,二氧化碳增稠后不但可以加快并且提高原油采收率,而且可以延缓气体突破时间。J. H. Bae 等还利用硅聚合物和甲苯作为助溶剂,通过与水气交替、单纯气体驱替相比较,结果表明增稠后的二氧化碳可以有效地控制二氧化碳气窜。Jianhang Xu 等采用氟化丙烯酸酯与苯乙烯的共聚物来对二氧化碳增稠,结果表明二氧化碳的黏度随共聚物浓度的增加而增加。

二、水气交注

水气交替注入法(WAG)是注气驱油技术和注水驱油技术组合而成的提高原油采收率方法,主要目的是为了控制二氧化碳与原油的流度比,防止二氧化碳过早窜流。第一次采用气水交替注入的油田可以追溯到1957年加拿大阿尔伯塔省(Alberta)的Nirth Pembina油田。随后,对WAG方法的研究开展得很迅速。目前,许多水气交替注入是在水驱开采之后,为提高水驱开发效果而加以应用的。水驱开发油田中,以非均质严重的正韵律油层的开发效果最差,是水气交替注入的重点研究对象。

1. 水气交替注入提高采收率的机理

同水驱开采相比,水气交替注入的开采机理可归纳为:通过水气交替注入降低水油流度比,从而达到增加水驱波及体积的目的;通过水气交替注入,降低水驱过的油层残余油饱和度,提高驱油效率;在重力分异作用下,注入气可以波及到正韵律油层中上部未波及区域,注入水可以波及到正韵律油层中下部未波及区域,提高二氧化碳的波及效率和驱替效率;水气交替注入同时也降低了气相的渗透率,从而降低了气体的流度,减缓了气窜的发生。

WAG驱的方案设计和实施对提高采收率项目的操作和经济效益至关重要。通过研究预计每次注入流体段塞为0.1%~2%孔隙体积,水气比为0.4~0.5可使WAG水循环过程中含水饱和度提高,气循环过程中含水饱和度降低。WAG过程引起的驱替机理出现在三相区域内,水气交替注入的周期特性产生吸液和泄气特点,是WAG提高注入能力的原因之一。假如油和水有相同的流速,那么它应该是气水交替注入驱油的最优条件。由于油藏中存在各种因素,这一最优化条件在油藏中的有限范围内可能会发生,通常发生在水气混合带。因而,针对每一个油藏最优的水气交替注入方案是不一样的,对特定的油藏最优的设计有其特殊性,往往还需要进行特殊的研究。

2. 水气交替注入的影响因素

在WAG驱替时要考虑如下几方面的因素:

(1) 水气比。水气比在一定程度上控制了水、气在油层中的流动速度,如果水的流速

比较快,水可以捕集气体不能驱替的残余油;如果混相的气体流速比较快,驱替前沿将向原油相指进突破,从而导致段塞完整性地破坏。因此,两种流体应当在适当的比例下注入,在该比例下,流体在地层中的流速(大致)相等。

(2) 水、气交替注入量。用于计算水气比的理论是假设水、气同时流动,然而水、气都是交替注入的,这样做一方面是由于施工的方便,另一方面是可以在井底附近产生混合液体,以降低气体流动能力。当注入水在储层中水平流动时,气体的流动是不稳定的,水、气依次交替注入,可以改变水、气在油层中的相互分离的状态。

(3) 随注入段塞的增加采收率也随之增加,但是必须考虑经济效益的合理性。油田试验的二氧化碳段塞多为40% HCPV(烃孔隙体积)左右。对于每一个具体的油田都存在一个最优的经济参数,但是都是倾向使用较大的段塞。

3. 水气交替注入的制约条件

在水气交替注入法应用过程中,逐渐认识到影响WAG特性的重要技术因素主要有:非均质性(层理和各向异性);润湿性;流体性质;混相条件;注入技术(与恒定的WAG设计相反的锥形WAG设计);WAG参数;物理弥散;流体流动几何形状(线性流、径向流和井网方式的影响)等。但同时,在应用过程中,该方法也遇到了一些缺点。以二氧化碳水气交替为例:首先,WAG法中引入的流动水可能造成水屏蔽;其次,WAG法可能引起潜在的重力分层问题;第三,二氧化碳和水之间的密度差异常使它们在注入过程中就迅速分离,使水防止二氧化碳指进与窜流的能力大大降低。频繁地交替注水,将增加油层的水相饱和度,一方面引起二氧化碳向水相中分配而损耗,另一方面会增强水相水阻效应、降低二氧化碳与原油的接触效率;第四,在二氧化碳与原油进行多次接触的混相驱时,水气交替注入会破坏二氧化碳抽提作用的连续性,使混相带难以形成,因而导致二氧化碳的驱油效率降低;而且,二氧化碳与水混合会生成强腐蚀的碳酸。这样就要求相关设备使用特殊金属合金材料和镀防腐层。不同的水气决定了水 and 气在油层中流动速度不同。依据驱替前缘的推进速度控制合理的气水比,保证气和水在有层中流速基本相等,防止驱替前缘推进速度过快和气体的突破。水气交注过程中必须重视这些问题对整体驱替效果的影响。

三、二氧化碳泡沫

对泡沫应用于石油领域中的研究始于20世纪50年代,1958年,Bond和Holbrook在其申请的专利“Gas Drive Oil Recovery Process”中就首次提出了在气驱过程中利用泡沫降低气体流度的思路。泡沫提高采收率主要归功于气体渗透率的降低延缓了气体的突破速度。二氧化碳泡沫抑制窜流的优势在于:一方面,泡沫黏度大于组成泡沫的气体和表面活性剂的黏度,泡沫驱替时黏滞阻力增大,有利于抑制二氧化碳气体的窜流;另一方面,大量的二氧化碳气体束缚在孔隙中占据了气体流动通道,提高了微观驱替效率并降低了气体突进速度。

二氧化碳泡沫封堵及提高驱油效率的机理主要是泡沫较高的黏度改善了与原油的流度

比,可以控制气体指进、降低气液产量比、推迟二氧化碳气体的突破时间,从而大幅度提高采收率。二氧化碳泡沫的封堵及提高驱油效率的机理表现在:①泡沫对高渗透带的选择性封堵;②泡沫对高含水层的选择性封堵;③泡沫封堵后能产生液流转向作用;④泡沫的液相成分中含有表面活性剂,能大幅度降低油水界面张力,提高驱油效率;⑤泡沫的液相具有较高的黏度,可改善与油的流度比,减少指进,提高波及体积;⑥泡沫中的气组分在气泡破裂后产生重力分异,波及到注入水难以进入的微小孔隙,扩大了波及体积,提高了驱油效率。

虽然二氧化碳泡沫能有效地抑制气体窜流,但是在应用二氧化碳泡沫抑制窜流时,同样存在其自身缺点,当体系温度和含盐度增高至某一临界值后,即使是水溶性很强的表面活性剂也将失去稳定二氧化碳泡沫的能力,有原油存在时这种情况更为明显。而且选择起泡剂作为气、水交替注入技术的流度控制剂时,应综合考虑起泡剂的静态和动态性能测试评价结果。许多高温高盐油藏,对于泡沫剂的选择要求更为苛刻,主要的选取原则有:稳定性好;发泡能力强;岩石吸附损失小;在地层盐水中能溶解;物理化学性质稳定;来源广,价格便宜。

四、凝胶深部封窜技术

水气交替、泡沫被用来控制早期气窜,但是其封堵强度较小,对于特低渗透储层的剩余油启动并不是非常有效,针对这一问题,学者们研究了封堵强度更大的凝胶深部调剖封窜剂来抑制驱替流体的窜流。

堪萨斯州大学针对此应用进行了室内实验研究。实验主要研究了三种方法来控制砾岩中的超临界二氧化碳,其中前两种方法利用的是一种叫 KUSP1 生物聚合物,此聚合物在 pH 值大于 10.8 时溶解,但是当 pH 值小于 10.8 时就会生成凝胶。第三种方法采用磺基化间苯二酚与甲醛反应生成凝胶。KUSP1 的凝胶研究通过了两种方法,第一种方法是在低压下向饱和有碱溶性聚合物溶液中的砂岩岩心注入二氧化碳,发现渗透率降低 80% 左右,(二氧化碳和盐水)当用超临界二氧化碳来促使成胶时,也可以得出相似的结果,并且继续注入大量 PV 超临界二氧化碳后,凝胶仍能够保持稳定。第二种现场成胶方法采用了一种酯,乙二邻苯二甲酸酯在碱性溶液里水解导致 pH 值下降进而生成凝胶,并且岩心渗透率降低到 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,封堵效率达到了 95% ~ 97%。第三种凝胶体系,是由磺甲基间苯二酚与甲醛反应,这种胶被称作 SMRF,在于盐水和超临界二氧化碳解除条件下就地成胶,二氧化碳气测渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或者更低,这相当于自封堵前盐水水测渗透率降低了 99% 左右,并且凝胶有很好的稳定性。

Martin 采用铬元素作为交联剂交联聚丙烯酰胺或者磺原胶聚合物,生成的凝胶来封窜。为了使铬元素能够很好地交联聚合物,正六价的铬离子(如重铬酸钠)通过使用还原剂(如偏亚硫酸氢钠、硫脲、硫代硫酸钠)降价到正三价的铬离子。然后将三价铬离子的物质混溶在聚合物溶液中。另外一种方法是直接注入丙烯酰胺单体使之就地

聚合,这样得到的聚合物就和一种有机物发生交联,美国阿肯色州的非混相采油中采用了后一种方法。

中国石油大学(北京)岳湘安课题组研制了一种耐温耐盐聚丙烯酰胺类堵剂,在一定的条件下,当在硅酸钠溶液中加入丙烯酰胺单体、交联剂 N-N 亚甲基双丙烯酰胺以及引发剂过硫酸钾后,丙烯酰胺单体发生聚合反应形成聚丙烯酰胺,具有一定的网络结构,这样就将强度不大的硅酸钠无机凝胶嵌套在网络结构中,形成了一种聚合物凝胶和无机凝胶的复合材料,大大加强了无机凝胶的强度。另外,由于硅酸钠凝胶的存在,增加了网络结构自身强度,生成的凝胶与岩石颗粒有一定的黏接力,从而明显提高了体系的封堵强度。

五、沉淀法深部封窜技术

1. 化学反应沉淀

化学沉淀法封窜其基本原理就是水解呈碱性的盐溶液(如镁盐、钙盐、钡盐)与注入的二氧化碳气体反应生成碳酸盐化学沉淀,从而达到封堵的效果。P. S. Puon 等对此问题进行了一定程度的研究并开展了部分室内评价实验。实验分为静态、动态实验、选择性流量控制实验。

2. 盐沉淀

Zhu 等提出通过在岩心中注入浓的盐溶液作为前置液,然后再注入乙醇,由于乙醇降低盐类在盐水中的溶解度,从而致使无机盐在岩心中或者油藏中形成沉淀,由于其良好的选择性,可以提高后继的二氧化碳驱的体积波及效率。一般采用的无机盐是 NaCl,这是因为此类盐在酒精与盐水的混合液中溶解度很小,而且对于地层环境没有污染。由于其黏度很小,所以不可能发生黏性指进,具有很好地选择性。实验结果表明,盐沉淀能够很好地封堵高渗层位,通过高低渗平行管实验可知,注入 6.4 ~ 8.8 PV 的乙醇可以提高采收率 16% ~ 24%。

显然,要充分利用二氧化碳驱作用,最大限度地提高原油采收率,关键在于注入二氧化碳气体的同时,如何抑制气体在非均质油藏及裂缝中的突进及窜流。这就要求对二氧化碳气体在非均质油藏及裂缝性油藏中的突进及窜流规律及影响因素进行全面分析及探索,从而找出影响气体突进及窜流的主控因素,并调整这些参数,削弱气体突进及窜流作用对二氧化碳驱油效果的不利影响,提高原油采收率。

第四节 窜流模拟方法

目前,国内外研究驱替流体窜流的方法主要有两种:一种为物理模拟,另一种为计算机数值模拟。物理模拟主要是应用 Hele-Shaw Cell 装置观测指进现象。计算机数值模拟一

是应用有限扩散凝聚模型,通过调整参数,形成不同的指进图形,并计算其分形维数;二是格子波尔兹曼方法。

一、物理模拟

指进物理模拟研究最早可以追溯到 1898 年 Hele-Shaw 所进行的平行板间黏性流动模拟。1958 年, Saffman P G 和 Taylor G I 首次将 Hele-Shaw 实验模型用于多孔介质中水驱油的黏性指进模拟。Hele-Shaw 实验模型的主体部分是两块间距极小的平行透明玻璃板,所以有时也称之为平板玻璃模型,两板间的狭缝就是流体驱替的场所。根据透明玻璃板的形状及放置位置, Hele-Shaw 模型可以分为水平径向 Hele-Shaw 元胞和垂直 Hele-Shaw 槽。在此基础上,为了解决不同的实际问题,该模型被适当地改进,制作成玻璃微珠模型和填砂模型。

1. 改变板间充填物材质得到新的模型

由这种方法得到的模型中,比较有代表性的是夹珠模型(又称玻璃微珠模型)和砂粒充填模型(又称填砂模型)。研究者在两平行板间充填微小的玻璃珠,以模拟岩石孔隙结构对地层流体指进过程的影响,但是,这些等径球的平面堆积易形成有规则的晶态结构,具有空间长程周期性,而多孔介质中的孔隙分布是没有空间周期性的无规分形结构。因此,玻璃微珠模型不能完全反映多孔介质的特征。另一种模型是采用砂粒充填两平行板间的间隙,形成与实际岩石更为相似的结构。

2. 改变板的材质和形态得到新的模型

主要有改变平行板面的粗糙程度和采用不同材质平行板两种做法。Chen 等提出的刻蚀玻璃模型属于前者,基本做法是将玻璃平板内侧进行非均匀刻蚀,形成长短不同、深浅不一的沟槽,以反映裂缝表面的粗糙度或者孔隙空间的非均质性。也有一些研究人员通过改变平行板的材质而得到不同的模型: Davies 等就采用透明树脂板进行了大尺度的酸液指进模拟;朱双玉等采用小尺寸的真实砂岩岩心进行了黏性指进实验;李小刚等采用“大理石板+钢化玻璃”形成模拟裂缝,模拟了前置液酸压缝内化学反应和重力影响下的酸液指进现象。

但是物理模型中存在一些不可忽略的问题:①关注材质与结构的相似而忽略了几何、动力相似等关键问题。大多数 Hele-Shaw 模型各方向的几何尺寸都没有实现等比例缩放,而是几何相似模型,此类模型与原型动力相似性很难得到保证。②模拟中还未同时实现温度、压力、流量等重要参数的相似,物理模型中的流动与油藏条件下实际的流动现象有所差异。③物理模拟过程的自动控制、图像自动采集、分析还有待提高,如何在非透明 Hele-Shaw 模型中实现指进图像的精确采集,是物理模拟技术发展必须解决的问题。④所进行的指进 Hele-Shaw 模拟绝大多数是二维的,而实际上存在很多三维的指进现象,较少空间维数可能引起模拟结果的不可靠。

二、计算机数值模拟

数学模拟可以追溯到 1959 年 Chuoke 等关于非混相驱替过程的研究,以及稍后的 Peaceman 和 Rachford 为计算矩形区域混相驱非稳定性所建立的有限差分算法。随着计算技术的发展,数学模拟主要围绕扩散、黏度比、密度与黏度分布、重力和非牛顿流变性等因素对驱替过程非稳定性的影响进行研究。根据建模理论基础和求解方法的不同,指进数学模拟可分为:基于连续介质理论的模拟和基于元胞自动机的模拟。

1. 基于连续介质理论的模拟

基于连续介质理论的模拟,其模型一般包括了实际问题的简化、描述现象的微分方程(大多是偏微分方程)以及定解条件。模型求解方法有:有限元方法、边界元方法、有限差分方法和有限体积方法等。Stevenson 等采用二维网格模拟方法,探索了地层非均质性和黏度比对二维两相孔隙流体混相流动特征的影响,发现黏度比的变化将导致指进流动与非指进流动形态交替出现;Sheorey 等针对高温有压水流驱替地层稠油所产生的指进现象,建立了表征流体压力、毛管力效应、热传递的数学模型和二维全隐式数值模型,采用域分离技术对模型进行求解,得到了驱替过程的压力场和温度场。

2. 基于元胞自动机的模拟

元胞自动机(Cellular Automata,简称“CA”)是指在空间和时间都离散,物理参量只取有限数值集的物理系统的理想化模型。目前,在指进研究中已经采用的扩散限制凝聚(Diffusion Limited Aggregation,简称“DLA”)模型、格子气自动机(Lattice Gas Automata,简称“LGA”)模型就属于元胞自动机的范畴。

DLA 模型由 Witten 和 Sander 在研究烟尘扩散时提出,已经成功模拟了流体指进、晶体生长、植物根系生长等诸多带有随机因素的非线性生长现象。LGA 模型的基本思想是:将流体的流动空间划分为离散的网格(正方形网格、三角形网格等),并将流体视为由大量仅有质量而没有体积的微小粒子组成,给出离散的流体粒子之间相互作用及迁移的规则,所有粒子根据规则同步地随着离散的整时间步在网格节点上相互碰撞,沿网格线在节点之间运动。LGA 模型是规则简单、内涵非常丰富的计算模型,但它也存在粒子平衡分布为 Fermi-Dirac 分布,而导致非伽利略不变性,统计噪声比较大等缺陷。为此,McNamara 等对 LGA 模型进行了改进,提出了格子波尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method,简称“LBM”),LBM 方法计算简单,容易实现并行计算,可以处理复杂的物理现象和边界条件。Grosfilsa 等运用 LBM 对 Hele-Shaw 流动进行模拟,发现非平衡系统的速度场存在幂律分布特征,并认为这样的速度场分布特征是长程相关或者长时相关非平衡系统的标志;Kang 等采用 LBM 对黏度不同的两种流体在非混相驱替中的指进行为进行了模拟,模拟时考虑了黏度比、毛管数和润湿性的影响,发现当驱替相为流道壁面非润湿流体时,指进生长的趋势增强。

低渗透油藏的主要特点是渗透率低、非均质性严重。在开发过程中,必然存在驱替流

体的窜流,而窜流会导致波及效率降低、开发效果变差。窜流的诱因有很多,例如:黏度、毛管力、密度、重力、扩散、非牛顿流变性、非均质性、裂缝和润湿性等因素,不同的影响因素对窜流的影响程度不同,为了更好地表征不同因素对窜流的影响程度,需定量表征窜流程度,目前提出的窜流程度定量表征指标有以下三个。

(1) 排出率。排出率定义为指进图案面积与以最长指进为半径圆的面积之比,何红海等采用因次分析方法研究不同因素对排出率的影响,得出对排出率影响最大的是两种流体的表面张力之比,其次才是黏度比的影响。

(2) 指进距离。苏玉亮等在研究二氧化碳非混相驱油时提出指进距离表征指进特征,研究了不同注采压差、温度、驱替速度、黏度比、渗透率等对指进程度的影响。

(3) 分形维数。分形生长的扩散限制凝聚 DLA 模型可以定量化研究指进形貌的几何特征和演化动力学问题,通过 DLA 模型求得的分形维数在一定程度上反映了指进现象的复杂性。张建华等研究了分形维数、黏度比和驱油效率的关系,认为黏性指进现象的分维值反映了驱替前缘所扫过的面积对空间的填充情况和指进的内禀有序性。

第五节 二氧化碳驱油藏封窜剂

低渗透油藏注气压力较高,注二氧化碳开发过程中容易产生二氧化碳气体窜流问题,气窜后治理难度大,对于封窜剂的性能要求高,常规的调剖堵水剂由于注入性、封堵强度以及和注入气适应性问题很难应用于低渗透气驱油藏。针对低渗透二氧化碳气驱油藏封窜条件苛刻,研究高温高压下封窜效果好、受温度压力影响小、注入性好的凝胶型封窜剂势在必行。对于二氧化碳气体封窜剂的研究主要考虑的因素为封窜剂的注入特性、封堵强度,封窜剂和二氧化碳气体之间的物理化学反应等等。

一、超临界二氧化碳的性质和特征

超临界二氧化碳之所以得到广泛的研究和应用,得益于其独特的性质。二氧化碳的临界温度(T_c)接近室温,为 31.1°C ,临界压力(P_c)为 7.38MPa ,比较适中。此外,二氧化碳的临界密度 ρ ($0.448\text{g}/\text{cm}^3$)是常用超临界溶剂中密度最高的之一。因此,二氧化碳对许多化合物有较强的溶解能力。超临界二氧化碳独特的物理、化学性质决定了其在化学领域中的重要地位,其特性和优势主要体现在以下几个方面:①对非极性物质溶解能力强,选择性好。溶解能力是衡量溶剂性能的一个重要因素。超临界二氧化碳是非极性溶剂,介电常数于 $1.2\sim 1.5$,因此超临界二氧化碳可溶解大量的非极性物质,并和一些小分子气体完全互溶。②二氧化碳临界压力适中,临界温度接近于室温,操作条件温和,容易应用于工业化过程,并且特别适用于设计热敏性和化

学稳定性差的物质的化学过程。③超临界二氧化碳具有廉价易得、化学惰性及环境友好等特性。二氧化碳的萃取、分离及其反应过程具有产物质量高,安全性好,并且后处理简单等优点。

二、二氧化碳与聚合物相互作用

聚合物的相对分子质量不仅较高,而且有一定的分布,因此在一定意义上聚合物是一些结构、性质相似的物质的混合物,因而超临界二氧化碳与聚合物的相互作用比较复杂。其溶解性能、黏度、扩散行为等对应用都很重要。

1. 溶解度

在适合的温度和压力下,许多含氟和含硅聚合物在二氧化碳中有较大的溶解度。然而,二氧化碳是大多数聚合物的不良溶剂。对于碳氢氧聚合物,超临界二氧化碳仅能溶解低相对分子质量、弱极性的聚合物和共聚物,不能溶解聚烯烃等非极性聚合物,也不能溶解强极性和水溶性聚合物(如聚丙烯酸)。虽然二氧化碳溶解聚合物的能力一般较差,但是它却能溶解在许多聚合物中,使聚合物发生溶胀,对聚合物有很强的增塑作用,使聚合物的玻璃化温度 T_g 和熔点 T_m 降低。例如,浓度为 8% ~ 10% (质量分数) 的二氧化碳可将普通聚合物的玻璃化温度降低几十度。关于近临界二氧化碳和超临界二氧化碳在聚合物中溶解度的研究已经有不少报道。二氧化碳在聚合物中的溶解度取决于聚合物官能团的性质等,溶解度的大小与二氧化碳和聚合物分子间相互作用强弱有关。常用的测定二氧化碳在聚合物中的溶解度的方法主要有相分离法、减压法、重量法和色谱法等。

2. 黏度

这里主要是指二氧化碳对聚合物黏度的影响。由于超临界二氧化碳的密度低且其压缩性比熔融聚合物的,超临界流体在熔融聚合物中溶解使聚合物发生溶胀,即使其自由体积增加,从而使聚合物的迁移性质(黏度和扩散性)得到明显的改善。聚合物共混物的黏度比是指分散相黏度与连续相黏度的比值,是影响共混物形态的关键因素之一。黏度比高时不利于得到尺寸小的分散相,当黏度比趋于 1 时,分散相尺寸一般较小。二氧化碳的加入之所以可以降低聚合物的黏度主要是因为吸附于聚合物链段之间的二氧化碳增加了聚合物的自由体积;另外,小分子的二氧化碳起到了分子润滑剂的作用。在这两种因素的共同作用下,聚合物的黏度明显降低。研究结果表明,各种熔融聚合物的黏度随所溶解二氧化碳浓度的增加而减小,并且发现二氧化碳浓度-聚合物的黏度曲线常常与纯聚合物的黏度曲线形状相似,即类似于增加温度或较小压力的效果。这些相似性表明,二氧化碳对熔融聚合物黏度产生影响的原因与温度、压力对黏度影响的原因相似,主要是由自由体积的变化而引起的。二氧化碳的溶解使聚合物熔体的黏度明显降低,因此用二氧化碳降低熔融聚合物的黏度对于处理高黏度和热敏性聚合物是非常有利的。由于二氧化碳的增速作用,聚合物链运动增加,聚合物链段扩张以及聚合物链缠结的减少都会使聚合物的黏度减小。有