

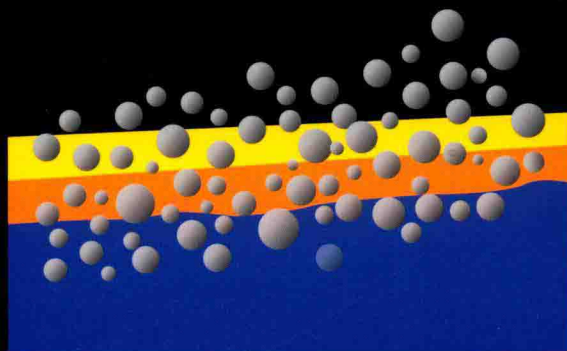
# 聚合物弹性微球 深部调驱技术与矿场实践

TECHNOLOGY AND FIELD PRACTICES ON DEEP PROFILE CONTROL AND  
FLOODING BY POLYMERIC ELASTIC MICROSPHERE

姜亦栋 徐赋海 赵明宸 马代鑫 李明川 著

石油石化  
学术文库

THE ACADEMIC LIBRARY  
OF PETROLEUM AND  
PETROCHEMICALS



中国石化大学出版社

CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

# 聚合物弹性微球 深部调驱技术与矿场实践

TECHNOLOGY AND FIELD PRACTICES ON DEEP PROFILE CONTROL AND  
FLOODING BY POLYMERIC ELASTIC MICROSPHERE

姜亦栋 徐赋海 赵明宸 马代鑫 李明川 著



中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

聚合物弹性微球深部调驱技术与矿场实践/姜亦栋等著. —东营:中国石油大学出版社,2017.8

ISBN 978-7-5636-5733-9

I. ①聚… II. ①姜… III. ①含水层—化学驱油  
IV. ①TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 210765 号

书 名: 聚合物弹性微球深部调驱技术与矿场实践  
作 者: 姜亦栋 徐赋海 赵明宸 马代鑫 李明川

---

责任编辑: 秦晓霞(电话 0532—86983567)

封面设计: 悟本设计

---

出 版 者: 中国石油大学出版社

(地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编: 266580)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子邮箱: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

排 版 者: 青岛汇英栋梁文化传媒有限公司

印 刷 者: 青岛国彩印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm

印 张: 10.5

字 数: 256 千

版 印 次: 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5636-5733-9

定 价: 58.00 元

# Preface



## 前言

在东辛油田注水开发过程中,油藏平面和纵向上的非均质性、油水黏度差异和注采井网不完善性,导致注采井间形成严重的优势渗流通道,表现出注入水利用率不高、综合含水率高、采出程度低和开发效益低等特点。实践证明,开展高含水期油田调驱结合、以调为主,提高采收率技术研究,扩大注入水波及体积,降低油水界面张力,改善水驱开发效果,增加可采储量,提高油田最终采收率和开发效益,具有重大的现实意义。

近年来三次采油技术取得了较好的效果,高含水期油田在提高采收率方面,仍然以扩大注入水波及体积为主、提高注入水洗油效率为辅,所以改善注水开发效果的主要途径仍然是提高注入水的波及系数。从根本上说,须采取调剖堵水技术改善吸水剖面,使注入水尽量波及高含油饱和度区域,将剩余油区中的原油驱出。调剖剂可用于封堵高渗透层或增加高渗透层的渗流阻力,减小高渗透层的吸水能力,调整吸水剖面、提高垂向波及系数。调剖剂可对后续注入水分流,使原来沿高渗透、低渗流阻力方向流动的水改变流向,扩展到低渗透区,从整体上改善注水开发效果,最终达到扩大注入水波及体积、提高水驱采收率的目的。

传统的调剖技术一般采用强度大的调剖剂对主要吸水层进行封堵,控制含水量的上升,改善差油层的动用程度。对于层内矛盾严重的油藏,传统调剖技术只能在近井附近的高渗透带形成封堵,当注入水超过调剖封堵位置后会在此进入低渗带,若高、低渗透层之间无隔层,则注入水会绕回到高渗透层,沿着高渗透层突进,其有效期较短,增产效果差,难以满足油田增产稳产的需求。深部调驱技术是指注入能够对大孔道进行封堵的调剖剂,伴随注入水不断向地层深部移动,直到停留在不能再移动的远井低渗透层位置,对低渗透层产生封堵,从而使液流转向深部。深部调驱技术立足于高含水期油田开发后期实际需要,能有效调整油藏层内层间矛盾,扩大注入水波及体积,改善注水油田开发效果,增加生产井产油量,提高油田采收率。针对传统调剖技术和常规深部调驱技术存在调驱效果失效、永久性伤害储层和封堵效果不理想的缺点,结合聚合物弹性微球有弹性、微球会发生形变、突破孔喉后运移至深处可再次形成封堵的特点,进而引入了弹性微球深部调驱技术的必要性。

本书共分为五章:第一章主要结合调剖堵水技术,简述了油田深部调驱技术,引出了弹



性微球深部调驱技术的必要性;第二章结合实验室弹性微球合成技术,表征了其结构特征,并对微球和冻胶微球复合体系进行了性能评价;第三章建立了微球粒径及强度理论模型和微球体系通过孔喉的压降、封堵和运移数学模型,结合微球的压降影响因素对微球的封堵机理和深部转向机理进行了深入剖析;第四章对微球深部调驱进行了工艺设计,主要从微球配伍性、微球调驱方案工艺设计和微球调驱效果及优化决策方面进行了论述;第五章结合东辛油田永8断块油藏地质开发特征,开展了油藏优势渗流场特征、定量描述方法和参数描述技术研究,最后对永8油藏微球调驱的配产、单井设计和微球施工效果评价方面开展了详细的论述。

本书是东辛采油厂勘探地质与开发工作者集体长期研究与实践的劳动成果。本书前言与第一章由姜亦栋编写;第二章由姜亦栋、徐赋海编写;第三章由李明川、赵明宸编写;第四章由姜亦栋、李明川编写;第五章由赵明宸、徐赋海编写。全书由姜亦栋统稿、审定。

在本书编写过程中,中国石油大学(华东)、胜利油田勘探开发研究院、东辛采油厂地质研究所、东辛采油厂工艺研究所等的多名同志提供了研究成果和有关资料,胜利油田勘探开发研究院杨勇院长、东辛采油厂王洪宝厂长和中国石油大学(华东)雷光伦教授等提出许多宝贵意见,还参照了相关资料文献,在此一并致谢。尽管作者竭尽所能,但由于水平和知识所限,书中难免存在片面和不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2018年3月

# Contents



## 目 录

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第一章 弹性微球深部调驱概述 .....     | 1   |
| 第一节 调剖堵水技术概述 .....       | 1   |
| 第二节 油田深部调驱技术概述 .....     | 4   |
| 第三节 弹性微球深部调驱技术概述 .....   | 8   |
| 第二章 弹性微球基本性能评价 .....     | 10  |
| 第一节 弹性微球室内合成技术 .....     | 10  |
| 第二节 微球配方及结构表征 .....      | 12  |
| 第三节 微球及复合体系性能评价 .....    | 23  |
| 第三章 弹性微球深部调驱机理研究 .....   | 40  |
| 第一节 弹性微球粒径及强度 .....      | 40  |
| 第二节 弹性微球调驱体系数学模型 .....   | 48  |
| 第三节 弹性微球深部调驱机理 .....     | 58  |
| 第四章 弹性微球深部调驱工艺设计 .....   | 64  |
| 第一节 弹性微球调驱配伍性 .....      | 64  |
| 第二节 弹性微球调驱方案工艺设计 .....   | 73  |
| 第三节 微球调驱效果及优化决策 .....    | 81  |
| 第五章 永8断块弹性微球深部调驱实践 ..... | 94  |
| 第一节 永8断块油藏地质开发特征 .....   | 94  |
| 第二节 永8断块油藏优势渗流场描述 .....  | 102 |
| 第三节 永8断块油藏微球深部调驱实践 ..... | 136 |
| 参考文献 .....               | 158 |

# 第一章

## 弹性微球深部调驱概述

随着油田进入高含水或特高含水期,以调、驱相结合的提高采收率技术可经济有效地改善油田注水开发效果,是老油田实现稳产的重要手段。传统的调驱技术有效期较短,增产效果差,难以满足油田增产稳产的需求。深部调驱技术立足于高含水期油田开发后期实际需要,能有效调整油藏层内层间矛盾,扩大注入水波及体积,改善注水油田开发效果,增加生产井产油量,提高油田采收率。

### 第一节 调剖堵水技术概述

对于注水开发的油田,由于受储层非均质性的影响,不同储层物性的层段开发效果不同,使得注入水沿大孔道或高渗透层突进到油井,降低了水驱开发效果。为了提高油层的开发效果,需要合理有效地在油井上采取堵水,在水井上采取调剖——调剖堵水措施。

#### 一、调剖堵水技术

##### 1. 调剖堵水概念

由于油层存在非均质性,会出现水在油层中的“突进”和“窜流”现象,严重影响油田的开发效果。封堵油藏中高渗透水流通道可使地层中流体“定势流向、定势压力场”改变,扩大水驱波及体积,提高产油量,降低产水量,从而提高注水开发油田的水驱采收率(图1-1-1);它还可以改善高含水或特高含水油田水驱开发效果,延长油藏稳产时间和实现剩余油挖潜。调剖堵水分为注水井和生产井堵水两类。

对于注水井,由于地层的非均质性,地层的每一层的吸水量都是不平衡的,表现为吸水剖面上的不均匀性,为了提高吸水剖面的波及系数,需要封堵吸水能力强的高渗透层,称为调剖。调剖通过注水井封堵或降低水井高渗透层吸水能力,以达到增加低渗透层吸水、调整注水层段的吸水剖面的目的。

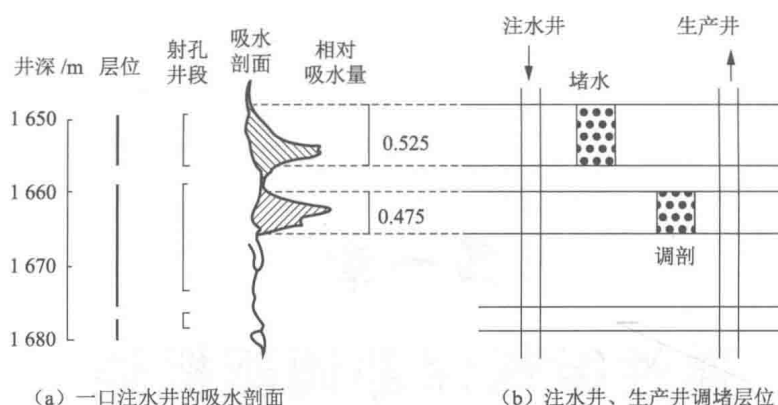


图 1-1-1 吸水剖面及封堵示意图

对于油井,由于地层的非均质性,每一层与每一层的不同部分,产油量与含水率不一定相同,其产液剖面不均匀,为提高产油层的驱替效率,需要封堵高产水层以改善产液剖面,称为堵水。堵水就是封堵油井高渗水流通道,调整产液剖面,改变水在地层中的流动特性,降低油井含水,增加产油量,改善高含水或特高含水油田水驱开发效果,延长油藏稳产时间,实现剩余油挖潜。

调剖堵水技术对油田稳产增产有重要意义,随着高含水油藏水驱问题的日益复杂,对该领域的技术要求越来越高,推动着调剖堵水及相关技术的不断创新和发展。

## 2. 调剖堵水技术现状

我国先后发展了 6 套有关油田的调剖堵水技术。

### (1) 机械堵水技术。

机械堵水技术是用封隔器将出水层位在井筒内隔开,或者用填砂及下入胶塞封堵下层水,以防止水流入井内。机械堵水作用的范围只限于井筒,由于施工简单,成本较低,往往成为优先考虑的堵水方法。技术比较成熟的机械堵水管柱结构有两大类:自喷井堵水管柱和机械采油井堵水管柱。

### (2) 油井化学堵水技术。

油井化学堵水技术是用化学剂控制油气井出水量和封堵出水层的方法。化学剂从油井注入高渗透层段,降低近井地带流体的渗透率,控制水的产出。根据化学剂对油层和水层的堵塞作用,化学堵水可分为非选择性堵水和选择性堵水两种。

### (3) 以注水井为主的调剖技术。

注水井调剖技术是指从注水井调整注水地层的吸水剖面的技术,一般采用化学封堵方法。化学方法是向高渗透层注入调剖剂以降低近井地带的渗透率,调节高低吸水层吸水量,从而改善吸水剖面,提高注入水的波及系数。

### (4) 以油水井为主的调剖堵水技术。

它是指将注水井调剖和油井堵水结合起来进行,以达到同时改善注水井吸水剖面和油井产液剖面的目的,提高对应油井的注水和采油效果。

### (5) 以油田区块为目标的调剖堵水技术。

随着单井调剖堵水效果的变差,以油田区块为整体目标,选择部分注水井作为调剖目标井进行调剖。该技术根据整体开发的要求辅以压裂、酸化、补孔、调渗等措施,达到以油田区

块整体为目标开发的效果。

#### (6) 深部调剖技术。

深部调驱剂通过段塞法或者大剂量法注入油藏深部,其注入深度根据油藏开发的特点而确定。例如对具有明显大孔道的注水井可采用  $1/2$  井距,使调驱剂在油藏更深部封堵高渗透层,迫使注入流体在地层深部转向,扩大注入水波及体积,提高开发效果。

## 二、调剖堵水材料

调剖堵水材料在调剖堵水技术中占有极其重要的地位,历来受到人们高度重视,发展也十分迅速。我国研究和开发了如下 7 类化学剂:

#### (1) 沉淀型调剖堵水剂。

沉淀型调剖堵水剂是指两种或多种能在水中反应生成沉淀封堵高渗透层的化学物质,多为无机物。该类调剖堵水剂一般采用双液法施工,即将两种或多种工作液以  $1:1$  的体积比分别注入地层,中间用隔离液分隔。当其向地层推进一定距离后,隔离液逐渐变稀、变薄,失去分隔作用,注入的不同工作液相遇,反应生成沉淀,封堵高渗透层。

#### (2) 冻胶类调剖堵水剂。

冻胶类调剖堵水剂是以水溶性线性高分子材料(聚丙烯酰胺、聚丙烯腈、木质素磺酸盐等)为主剂,以高价金属离子(铬、铝、钛等)或醛类为交联剂,在地层条件下发生交联反应,生成具有网状结构的不溶于水的冻胶,堵塞地层孔隙,阻止注入水沿高渗透层流动。

#### (3) 颗粒类调剖堵水剂。

颗粒类调剖堵水剂主要是通过颗粒自身充填于地层孔喉或岩石骨架间,并在地层中遇水膨胀、固结,通过颗粒间的协同效应及  $1/9 \sim 1/3$  架桥理论捕集滞留堵塞地层中的高渗透层或大孔道,降低高渗透层或大孔道的渗透率,改善地层的非均质性。比较常用的颗粒类调剖堵水剂有黏土类、石灰乳、水泥类、粉煤灰类、预交联凝胶颗粒、聚合物水膨体类、生物钙粉和各种矿物粉类等。

#### (4) 泡沫类调剖堵水剂。

泡沫类调剖堵水剂主要是将二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、氮气( $\text{N}_2$ )等气体与泡沫剂一起注入地层,在地层起泡,形成稳定气体泡沫,利用自身较高的视黏度性能对大孔道或高渗透层产生良好的封堵。泡沫的外相为水,稳定存在于出水层,应用贾敏效应有效地封堵来水。在油层,泡沫剂被原油吸收,浓度降低,泡沫稳定性变差,引起泡沫破坏,所以不堵塞油层,具有良好的选择性。常用的起泡剂为磺酸盐型表面活性剂。为提高泡沫稳定性,可在起泡剂中加入稠化剂,如羧甲基纤维素(CMC)等。

#### (5) 树脂类调剖堵水剂。

油田上曾将树脂类调剖堵水剂用作永久性堵水剂,主要有脲醛树脂、酚醛树脂、环氧树脂、糠醇树脂、热缩性树脂等。树脂类调剖堵水剂是低分子物质经过缩聚反应产生的高分子物质,具有强度高、有效期长等优点,适用于封堵裂缝、孔洞、大孔道和高渗透层。其主要作用原理是各组分经化学反应形成树脂类堵塞物,在地层条件下固化不溶,造成对出水层的永久性封堵。例如酚醛树脂的化学反应分两步进行,先将苯酚与甲醛在酸性或碱性条件下制备成羧甲基酚和多羟甲基酚混合物,然后以该混合物为原料在酸性条件下与硬化催化剂进



一步聚合成热固性树脂。

#### (6) 微生物类调剖堵水剂。

用于堵水、调剖的微生物的菌株接种物类型有葡聚糖  $\beta$  球菌,硫酸盐还原菌,需氧和厌氧的充气污泥细菌,生成生物聚合物的细菌(如肠膜明串珠菌),生成表面活性物质、助表面活性物质的菌种和生成聚合物(多糖和气体)的菌种 6 种。微生物菌种一般最佳生长温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,不能超过  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;耐矿化度( $\text{NaCl}$  质量浓度)不能高于  $1\times 10^5\text{ mg/L}$ ;兼性厌氧与地层原生菌相容生长。因而其对渗透率  $20\text{ }\mu\text{m}^2$  以下的岩心堵塞率大于  $90\%$ ,对  $20\text{ }\mu\text{m}^2$  以上的岩心堵塞效果较差。

#### (7) 其他类调剖堵水剂。

其他类调剖堵水剂:改性水泥类调剖堵水剂,主要包括油基水泥、超细水泥、泡沫水泥等调剖堵水剂等;改变岩石润湿性的堵水剂,主要有阳离子型表面活性剂,如季铵盐类表面活性剂等;稠油类堵剂,包括活性稠油(油基)、水包稠油和偶合稠油等;复合类调剖堵水剂,根据油藏的特点和段塞组合的需要,为满足调剖堵水的需求,研制了复合阳离子堵剂、复合型 HS-1 调剖堵水剂等。

近年来发展起来的一种新型深部调剖堵水技术,即聚合物微球调驱技术,具有受外界影响小、可用污水配制、耐高温高盐等优点。它的作用机理是依靠纳(微)米级聚合物微球遇水膨胀和吸附来逐级封堵地层孔喉以实现其深部调剖堵水的目的。

## 第二节 油田深部调驱技术概述

传统的调剖堵水技术,调剖堵水范围不大,一般为几米到十几米。在层间窜流严重的油藏,后续注入液绕过封堵区仍窜回高渗透层,使得油井增产有效期短,增产效果差,无法满足油田增产稳产的要求。为解决这一矛盾,深部调驱技术应运而生。

### 一、深部调驱技术

#### 1. 调驱技术

调剖和驱油的结合称为调驱。调剖是指注水地层吸水剖面的调整,驱油是指注入的工作液对油的驱动。调驱具有提高波及系数和驱油效率的双重作用。

调驱不仅是“驱”,而是以堵为主的一种工艺措施,“驱”只是调剖剂运移过程中的一种附带作用,因而从本质上讲,它称为“堵驱”或“液流转向技术”。在调驱作业时,“调剖”已不是目的,其目的主要是实现流体在油层深部的转向,扩大波及体积,近井地带的转向作用已十分重要。

调驱是调剖的发展,它不仅调整了吸水剖面,改善了油层深部的非均质性,而且改善了流动比或提高了驱油效率。调驱又是化学驱的“先导试验”,调驱用的交联聚合物(或表面活性剂,或碱)是化学驱用的驱油剂,由这些化学剂在调驱中的效果可以预见它们在同一油藏中化学驱的效果。

调驱用的化学试剂叫作调驱剂。调驱剂是指既有调剖作用也有驱油作用的化学剂。调驱剂分两类,即单液法调驱剂和双液法调驱剂。① 调驱时只用一种工作液的调驱剂叫作单液法调驱剂。例如聚丙烯酰胺溶液,它首先进入含水饱和度高的层(调剖剂特征),使注入压

力逐渐升高,然后迫使它依次进入含油饱和度高的中、低渗透层,驱出其中的油(驱油剂特征),起提高采收率作用。CDG(胶态分散凝胶)也是一种单液法调驱剂。② 双液法调驱剂是指调驱时必须用两种工作液的调驱剂:一种起调剖作用,即调剖剂;另一种起驱油作用,即驱油剂。注入时,调剖剂注在前,优先进入高渗透的高含水饱和度的层;驱油剂注在后,它注入含油饱和度高的中、低渗透层起驱油作用。

调驱技术是油田高含水油藏提高水驱采收率的重要技术,由油田的油藏地质特征、所处的开发阶段和调驱技术的特点决定。调驱是一项集成技术,涉及地面配制和注入技术、井筒管柱工具设计技术和调驱剂在油层中的分布控制技术——放置技术等。

## 2. 深部调驱技术

浅调对于层内矛盾严重的油藏,只能在近井附近的高渗透带形成封堵,当注入水超过调剖剂封堵位置后,会绕回到高渗透层,沿着高渗透层继续突进,因此浅调对于提高注入水的波及系数和采收率效果相当有限。深部调驱能够使调剖剂向地层深部移动,对高渗透层产生封堵,增加调剖的作用半径,提高注入水的扫油面积,实现流体在油层中深部转向的目的(图 1-1-2)。因此可见常规调剖技术的作用机理是使注入水在油井中调转方向,扩大注入水的波及体积,改善并调整吸水剖面,从而提高采收率。

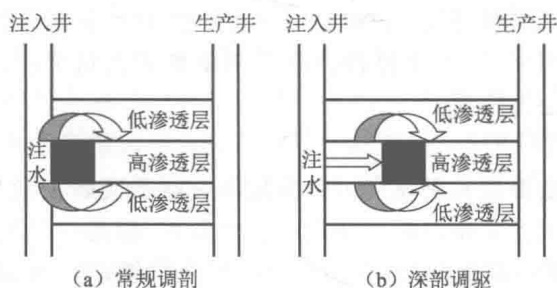


图 1-2-1 常规调剖与深部调驱示意图

深部调驱技术在常规调剖的基础上增加了驱油的作用,具有一定的封堵强度,可以封堵注入水窜流的高渗透层,使流体在油层深部转向,从而扩大注入水的波及体积。在后续注入水的作用下,不断向地层深部做活塞式的移动驱油。由此可见深部调驱技术是能有效调整层内层间矛盾、改善注水油田开发效果的工艺技术,能起到扩大注入水波及体积的作用;同时能有效控制连通性较好的生产井的含水上升速度,解放中、低渗透层储量,增加生产井产油量,提高油田采收率。

深部调驱技术作用机理为:

(1) 动态调剖,使注入水在地层深部转向。

调驱剂因为受到后续注入流体的驱替作用不断在大孔道中向前移动,凝胶调驱剂(CDG)在地层中进入更小孔道时是移动还是形成封堵,取决于凝胶的突破压力和外界的压差。在调驱剂不断移动的过程中,水的冲刷和地层的剪切作用会使凝胶变小,直到遇到更小孔喉形成封堵,更好地在平面和纵向进行调剖。当后续水遇到封堵时便流向地层深部,驱替更小、更多孔隙的残油,进而不同程度地扩大注入水波及体积。

(2) 改变附着力,促进移动。

调驱剂进入地层或者孔喉后,孔喉内的压力平衡瞬间被打破,使孔隙中残余油的附着力改变,迫使部分残余油变成可动油。



### (3) 改善流度比。

部分调驱剂具有增黏性,可以改善地层流体的流度比,使原来水驱不到而压差大于凝胶转变压力范围的剩余油得到很好驱替。

深部调驱技术具有如下优势:

(1) 降低油井的含水率,提高产油量。封堵或卡封高含水层,减少油水井的层间干扰,使原来不能正常工作的低渗透层的作用得到发挥,改变了注入水的流线方向,扩大了注入水的波及体积,有效提高油井的日产油水平。

(2) 改善注水井的吸水剖面。注水井深部调驱后将使注水井的吸水剖面发生改变,纵向上可控制高渗透层过高的吸水能力,从而使低渗透层的吸水能力相应提高,某些不吸水层开始吸水,从而扩大注入水的波及体积,扩大油井的见效层位和方向,改善井组的注水开发效果。

(3) 提高注入水的利用率,改善注水驱替效果。

(4) 从整体上改善注水开发效果。油田区块的整体处理效果表现为整个区块开发得到改善,区块含水上升速度减缓,产量递减速度下降,区块水驱特征曲线斜率变缓。

## 二、深部调驱材料

深部调驱是有效封堵高渗透层、改善地层非均质性的重要措施之一。深部调驱剂可笼统划分为聚合物类深部调驱剂、柔性材料类深部调驱剂和无机类深部调驱剂等。其中以聚合物类深部调驱剂应用最为广泛。

### (1) 聚合物类深部调驱剂。

它根据注入过程中是否加入交联剂可分为地下交联剂交联反应型调驱剂和地下非交联剂交联反应型调驱剂。前者主要包括交联聚合物弱凝胶、胶态分散凝胶(CDG)、交联聚合物溶液(LPS)三种不同类型的调驱剂,后者主要包括聚合物纳(微)米球深部调驱剂、阴阳离子聚合物深部调驱剂、黏土胶聚合物絮凝深部调驱剂。

#### ① 交联聚合物弱凝胶。

弱凝胶是由低浓度聚合物和低浓度交联剂形成的具有三维网络结构的弱交联体系,其交联是以分子间交联为主及分子内交联为辅的,黏度在  $100 \sim 10\,000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  之间。在弱凝胶溶液中加入少量交联剂,使之在地层内缓慢形成弱交联体系。该体系能对地层中的高渗透通道产生一定的封堵作用,使调驱后的注入水绕流至中、低渗透层,起到调驱的作用;弱交联体系在后续注入水的推动下还可以逐步向地层深部移动,产生类似聚合物驱一样的效果,从而更大限度地扩大波及体积,提高驱油效率。

#### ② 胶态分散凝胶(CDG)。

胶态分散凝胶是低浓度聚合物分子在交联剂的作用下形成的以分子内交联为主、几个分子间交联为辅的分散胶束溶液,并不形成三维网状结构,因此被称为胶态分散凝胶(Colloidal Dispersion Gel, CDG)。CDG 体系中聚合物的质量浓度可低至  $100 \text{ mg/L}$ ,交联剂一般使用多价金属离子,如柠檬酸铝、乙酸铬等。低浓度的聚合物和交联剂交联形成较大分子的凝胶颗粒,既具有交联聚合物深部调驱的技术特点,又具有调节油藏内部流体流度的作用。胶态分散凝胶在高渗透层形成比较大的流动阻力和残余阻力,以改善水驱开发效果,也可用于聚合物驱油。

#### ③ 交联聚合物溶液(LPS)。

交联聚合物溶液(Linked Polymer Solution, LPS)是在 HPAM/AlCit 凝胶体系中加入

不同浓度的柠檬酸铝后,部分水解聚丙烯酰胺水溶液而形成的一种交联体系。交联聚合物溶液是交联聚合物分子线团分散在水中的体系,同时具有胶体和溶液的特性,有黏度低、流动性好、有选择性封堵地层的特点,具备较好的深部调驱、提高采收率的性能。LPS 在注入地层后,优先进入渗透率较高的地层,交联聚合物线团在孔道中吸附滞留,逐步增加流动阻力,使后续驱替液流向低渗透区。交联聚合物线团并未将孔道完全堵死,在一定压力下可被冲开,被推向地层更深处,再次吸附滞留,逐步产生层内和层间的液流改向,从而逐步调整驱替剖面,提高波及系数和原油采收率。

#### ④ 聚合物纳(微)米球深部调驱剂。

聚合物微球是采用国内外研究较多的乳液、微乳液及分散聚合技术制备而来的。微球尺寸可控,分散性能好,可用油田污水配制工作液,在油田中后期开发中使用。它由尺寸可调的纳(微)米球构成。根据地层孔喉调整微球尺寸,微球经过水化、溶胀后达到设计尺寸,有一定的强度。当微球尺寸大于地层孔喉尺寸或架桥封堵时,可满足“堵得住”的要求;微球具有弹性,在一定突变压力下变形而向前移动,逐级逐步实现液流改向,可满足“能移动”的要求,即聚合物微球可满足深部调驱剂应具有的特征。

#### ⑤ 阴、阳离子聚合物深部调驱剂。

阴、阳离子聚合物深部调驱剂是在生产井和注入井分别同时注入阴、阳离子聚合物,或在注入井中交替注入阴、阳离子聚合物。岩石表面呈负电性,从油井中注入的阳离子聚合物溶液优先进入高渗透层和大孔道中,先期吸附于岩石表面,此时从注入井注入阴离子聚合物,阴、阳离子聚合物在地层中相遇后生成不溶性沉淀物,使高渗透层的渗透率降低,迫使后续注入的阴离子聚合物和驱替液进入中、低渗透层,提高波及系数,从而实现深部调驱的目的。

#### ⑥ 黏土胶聚合物絮凝深部调驱剂。

黏土胶聚合物絮凝深部调驱剂是将钠膨润土配制成悬浮液,利用膨润土水化后颗粒能与聚合物形成絮凝体系在地层孔喉处产生堵塞,起到调驱的作用。该体系主要调驱机理为絮凝堵塞、积累膜和机械堵塞。尽管该技术取得了成功,但存在局限性,具体表现为调驱剂自然选择性较差、现场施工需要专用设备、注入性较差、大剂量注入受到限制等。

#### (2) 柔性材料类深部调驱剂。

柔性材料类深部调驱剂以 SR-3 深部液流转向剂为代表。该体系具有任意变形、环境赋形、黏附能力强、拉伸韧性强、化学稳定性好、具有一定的二次黏结能力 6 个特征。该调驱剂注入地层后,在大孔道中的运移类似于蚯蚓在土壤中的运动,在高于临界压差条件下能有效适应地层的孔隙变化,自身发生形变通过地层喉道,在低于临界压差条件下同样能有效适应地层孔隙变化,自身发生形变堵住喉道。当粒径小于孔隙时,柔性剂颗粒可通过吸附和一定的黏连作用在多孔介质中发生滞留、堆积,封堵多孔介质,迫使后续注入水转向,扩大注入水波及体积;当粒径大于孔隙时,柔性剂颗粒可通过挤压变形在多孔介质中运移,提高后续注入水的液流阻力,迫使后续注入水转向,扩大注入水波及体积。

#### (3) 无机类深部调驱剂。

无机类深部调驱技术以醇致盐沉积法为代表。以醇致盐沉积法深部调驱技术是指向饱和和电解质水溶液中加入非电解质(如乙醇等)溶液,以降低溶液中电解质的溶解度,使部分电解质从溶液中析出并形成固体沉淀的现象。向油层注入高浓度的盐水,盐水像常规的注入



水一样首先绕过低渗透的含油层,选择性地进入高含水层或高渗透含水通道。在盐水段塞注完后,注入非电解质(如乙醇)段塞,其在与盐水的接触和混合过程中会降低盐在水中的溶解度,使注入水在所波及的高含水渗流通道内形成固体盐沉淀,从而产生局部堵塞使水相渗透率降低,迫使后续注入水改道进入低渗透含油层或高渗透层内尺寸较小的含油通道。

### 第三节 弹性微球深部调驱技术概述

深部调驱技术能有效调整注水井吸水剖面、生产井产液剖面,提高储层动用程度,调整层间矛盾。常用的深部调驱技术在油田的实际应用中取得了一定的效果,但仍然存在许多问题。

#### 一、弹性微球深部调驱的必要性

现有的深部调驱剂的调驱效果不佳,以下对不同体系的调驱剂的优、缺点进行简要分析,以说明采用弹性微球深部调驱技术的必要性。

微球类调驱剂一般具有较好的注入性能和较高的强度,能够对优势渗流通道进行有效封堵。但是其颗粒粒径较大,经常只是对近井地带产生封堵,随着后续注入水的不断注入,流体很快绕行至封堵面的后方,再次沿着原来的优势渗流通道前进,调驱效果失效快。

无机调驱体系具有较高的强度,能够封堵高渗透层带;但是堵得死、堵得浅、不移动、易绕流、有效期短,不利于深部调驱,给以后的重复调驱带来极大困难。有机调驱体系堵而不死、可运移、能够实现深部调驱;但强度低,堵不住高渗透带,即使堵住也容易被注入水突破,有效期短。有机无机复合调驱体系封堵强度高、适用范围广;但施工劳动强度大,对机械设备的磨损比较严重,可能永久性严重伤害储层。

地下交联类调驱体系施工工艺方便简单,注入性能好,对施工设备的磨损低,对地层的选择性好,对低渗透层的污染程度低,调剖剂成胶强度中等,具有良好的运移性能。但体系由多组分构成,地层岩石对体系各组分的吸附程度不同,造成体系在地下各组分的最佳配比发生变化,导致不成胶或成胶效果差;同时体系成胶前黏度受地层温度和矿化度的影响严重,地下交联形成的颗粒的强度较弱,易发生形变,封堵效果并不理想。

聚合物弹性微球深部调驱剂的调驱机理是微球注入地层后吸水发生膨胀,对高渗流孔道进行封堵,降低高渗透层的渗透率,直接实现液流改向,降低水相的指进。这类调驱剂是胶核的聚合物凝胶微粒,具有一定的弹性,当压力达到一定值时,微球会发生形变,在孔喉结构中形成突破并运移至与之粒径相匹配的孔喉处再次形成封堵,从而实现深部调驱的作用。

#### 二、弹性微球深部调驱的技术特点

在现有的各种深部调驱技术中,聚合物驱油技术是最为有效的技术,矿场实践证明,具有一定黏度的聚合物在进入油藏后,最先进入高渗水通道,封堵和调节渗水剖面,造成驱替液液流改向,提高驱替液的波及系数。

聚合物弹性微球深部调驱剂是生产成本较低的逐级深部调驱材料,其平均尺寸为几十~几百纳米,在水中可以膨胀,在油中不会膨胀。根据施工要求调节调驱剂注入浓度,可保证有效深部调驱所需微球的浓度;微球在水中分散后变成溶胶,在水中的稳定性与溶液一

样,不会产生沉淀现象,提高了进入油藏深部的能力;控制聚合物微球的交联程度,可保证在水中膨胀的倍率、机械弹性和封堵强度的可调节性。弹性微球深部调驱技术特点具体如下:

(1) 该调驱剂可以进入地层深部,进入的部位可以根据工程和工艺的需要进行调节。一般说来,现有的开发高渗透油田的孔隙度为 $10\%\sim 35\%$ ,一般的高渗透层渗水通道直径在几到几十微米,孔喉直径在500纳米到数微米,这就要求调堵材料在起作用前的尺寸小于孔喉直径。聚合物微球所生产的材料原始尺寸可以调节,品种的最小直径在几十到200纳米,完全达到进入深部的目的。

(2) 该调驱剂在水中稳定存在,不会发生分相沉淀。由于在水中微球的最外部会形成聚合物溶液形态,与水之间没有明显的界面,提供了材料溶液的稳定性。

(3) 该调驱剂具有相当的机械强度,可以形成有效的封堵。微球的内核为一交联聚合物凝胶,在水中无论怎样浸泡和剪切都很难被破坏,它在水中可以膨胀,达到最大体积后不会发生变化,因此,在孔喉处可以形成有效封堵。

(4) 该调驱剂逐级深入调剖。该材料由于耐温、抗盐、耐剪切,在工作压差存在下可以突破对孔喉的封堵,在通过一个孔喉时不会发生变化,在通过下一个孔喉处形成封堵,解决了聚合物驱油中突破即无效的问题。

(5) 该调驱剂注入容易,形成封堵强度大。材料在遇水的初期并无明显的体积增大,即使是很高的浓度也几乎没有黏度,只有在经历足够的水化时间后,微球膨胀达到一定体积时,才具有一定黏度,因此注入非常容易。地层中封堵不是依靠黏度,而是依靠材料的弹性和形变,通过交联度和材料组成的设计,可以形成强大的封堵。

(6) 封堵强度的调节能力很强。它既可以通过微球原始尺寸和结构调节,也可以通过打入两种在初始阶段性质完全相同、在水化后性质不同,容易发生交联的方式进行增强。

(7) 适用范围广。材料本身是纳(微)米凝胶,高分子链段的舒展性与水动力学体积与材料的封堵性能无关,因此,具有良好的耐温、抗盐性能,在一般的高温、高盐矿区均可以使用,极大地扩大了聚合物驱油的适用范围。

(8) 综合驱油成本大幅度降低。矿场实践证明弹性微球深部调驱产生有效封堵需要的化学剂量比聚合物调驱下降很多,在产生相同效果的油水比变化和产液量变化时,所使用的化学剂用量和注入能耗都小。同时,无需清水配制,减少污水排放。

(9) 工艺简单。纳(微)米调驱剂无论产品是油状物还是干粉形态,在水中均可迅速溶解和分散,无需像聚合物驱油工程一样建立大型溶解、陈化和混合设备,可以直接在污水管线上注入,大幅度减少设备投资。

## 第二章

# 弹性微球基本性能评价

微球的室内实验研究主要从微球的室内合成、微球配方及结构表征、微球粒径与性能评价几个方面展开论述。

### 第一节 弹性微球室内合成技术

#### 一、弹性微球合成方法

弹性微球的合成方法主要包括：反相乳液聚合法、反相微乳液聚合法和反相悬浮聚合法。

本次合成研制出热沉淀聚合装置(图 2-1-1)，利用不同口径的喷枪将含有各单体的分散相喷洒到一定温度和搅拌速度下的分散介质中，分别进行反相乳液、分散和悬浮聚合，形成 nm、 $\mu\text{m}$  和 mm 级不同粒径的弹性微球系列产品。

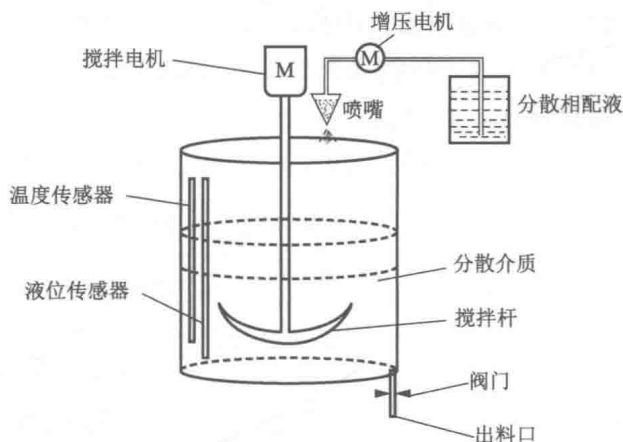


图 2-1-1 热沉淀聚合装置示意图

(1) 反相乳液聚合法。

油在水中分散而形成的胶体分散体为乳液。正相乳液聚合是指将油溶性单体分散在水中而得到的水包油型的乳液聚合;反之以非极性的液体作为分散介质,将水溶性的单体分散在介质中,形成的油包水型乳液进行的聚合反应为反相乳液聚合。

反相乳液聚合法的特点是反应速度快、制得产品的相对分子质量分布范围较窄且相对分子质量高,制得产物可以被制成粉末或直接应用,但是乳化剂夹杂在油相或者产品中,不易被除去;聚合反应油相使用大量溶剂,成本高;与常规乳液相比,其乳液聚合稳定性差,乳液中的胶粒碰撞概率大,易凝聚,导致微球粒径分布宽。

(2) 反相微乳液聚合法。

在反相乳液聚合理论与技术发展基础上,出现了反相微乳液聚合法。它具有清亮透明或半透明、大小均一,以及稳定性高的特点。

反相微乳液聚合法的特点是反应速度很快,所以此聚合法对反应条件非常敏感,特别是在单体浓度以及水相含量较高的体系中,引发剂的选择以及用量都对反应产物影响很大。制得微球的粒径以及转化率极易受到反应条件微小变化的影响,所以,对反相微乳液聚合法中反应条件的研究具有现实意义。

(3) 反相悬浮聚合法。

它是以油类为分散介质,单体溶液作为分散相,以小液滴状悬浮分散在油中,形成油包水体系,单体在小液滴内引发聚合作用的合成方法。单体中溶有引发剂、交联剂等,一个小液滴就相当于一个小的本体聚合单元。从单体液滴转变为聚合物弹性微球,中间要经过聚合物-单体黏性粒子阶段,为了防止粒子聚并,需加分散稳定剂,在聚合物粒子表面形成保护层。反相悬浮聚合体系的形成主要受油水比、搅拌速度和分散稳定剂等因素的控制。

反相悬浮聚合法制备聚合物微球的工艺简单,后处理以及除掉聚合热容易,实现工业化容易。目前,针对丙烯酰胺(AM)类微球的制备,反相悬浮聚合法技术相对成熟且应用广泛。

三种合成方法比较结果见表 2-1-1。

表 2-1-1 三种合成方法比较结果

| 比较项                     | 反相悬浮聚合法 | 反相微乳液聚合法       | 反相乳液聚合法 |
|-------------------------|---------|----------------|---------|
| 单体存在场所                  | 颗粒、介质   | 单体珠滴、乳液粒、胶束、介质 | 颗粒、介质   |
| 引发剂存在场所                 | 颗粒、介质   | 介 质            | 颗粒、介质   |
| 稳定剂                     | 需 要     | 不需要            | 需 要     |
| 乳化剂                     | 不需要     | 需 要            | 不需要     |
| 合成微球粒径范围/ $\mu\text{m}$ | 20~200  | 0.06~0.5       | 0.5~2.0 |

二、弹性微球合成技术

根据油藏主力层孔隙直径,采用反相微乳液聚合、反相乳液聚合技术合成大小可控、水化速度可调、具有较好变形性能的聚合物微球体系作为深部调剖剂。

1. 弹性微球实验用品

实验药品:丙烯酰胺(AM)、丙烯酸、N,N'-亚甲基双丙烯酰胺(NMBA)、甲基丙磺酸