

孔喉尺度弹性微球 深部调驱新技术

雷光伦 著



中国石油大学出版社

KONGHOU CHIDU TANXING W
SHENBU TIAOQU XINJISHU

孔喉尺度弹性微球 深部调驱新技术

| 雷光伦 著 |

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

孔喉尺度弹性微球深部调驱新技术/雷光伦著. —
东营:中国石油大学出版社,2011.5
ISBN 978-7-5636-3475-0

I. ①孔… II. ①雷… III. ①石油开采—提高采收率
IV. ①TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 070335 号

书 名: 孔喉尺度弹性微球深部调驱新技术
作 者: 雷光伦

责任编辑: 穆丽娜(0532—86981531)

封面设计: 九天设计

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: shiyoujiaoyu@163.com

印 刷 者: 青岛星球印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 185×260 印张: 8.5 字数: 142 千字

版 次: 2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 22.00 元

。前言。

油田注水开发过程中,油藏平面和纵向上的非均质性、油水黏度的差异和注采井网内部的不平衡性,导致了注入水向生产井方向舌进和向高渗透层突进的问题。注水井调剖技术是高含水后期改善注水开发效果、实现老油田稳产的经济有效的手段。

目前,颗粒型调剖剂具有较高的调剖强度,能封堵高渗透层,但由于其粒径较大,往往只在注水井附近的油层起封堵作用,而水会很快绕流并再次进入高渗透层,因此它仅改善了注水井附近的渗流状况,而对深部的调剖作用较小,提高采收率程度有限。地下有机交联类调驱体系具有可运移性,能够实现深部调驱,但交联体系仍属流体,强度较低,对于高渗透带的封堵强度不够,易产生再次突破,有效期短。特别是有机交联体系,它由多组分构成,地层岩石对体系各组分的吸附程度不同,体系各组分的最佳配比发生变化,造成不成胶或成胶强度差等问题;另外,该体系成胶前其黏度受地层温度和矿化度影响严重,再次影响了成胶后的体系强度。在施工方面,因目前的聚合物调驱体系黏度较大,所以需要专门的大型调驱泵,所需车辆多、场地大、施工复杂、费用较高,对于有限的井场面积,如海上平台,施工难度较大。目前的聚合物类深部调驱体系还无法在施工过程中根据地层压力等动态参数变化,对调驱方案进行动态调整,以实现满足油藏动态需求的智能化在线长期调驱。

孔喉尺度弹性微球深部调驱技术是充分依据岩石孔隙结构特征及渗流特点,吸取现代微材料合成技术而发展起来的一项新型深部调驱技术。

油层砂岩平均孔隙喉道具有微米级尺度特征;在油层中既能通过单个或多个微球架桥封堵喉道而使水绕流,又能因其弹性变形而通过喉道,并可不断向油层深部运移的微球尺度应是微米级的。

因此,根据能封堵并能变形通过岩石喉道的微球直径要求,研究设计合成了纳米级、微米级系列孔喉尺度聚合物弹性微球。其调驱特点是:

(1) 数量庞大。计算表明,1 kg 尺寸为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的微球,其数量约为 10×10^8 个;1 kg 尺寸为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的微球,其数量约为 100×10^8 个。这众多的微球广泛分布在岩石孔隙中,对水流产生阻碍作用而致水绕流。

(2) 良好的悬浮分散性。微球密度小、粒度细,能很好地分散悬浮于水中,而不增加水的黏度,因此,调驱时不需要专门的调剖泵,可用比例泵直接打入注水管线进行在线注入。

(3) 膨胀性和良好的弹性。微球注入油层后会逐渐吸水膨胀,微球封堵喉道后会因变形而通过喉道,具有运移、封堵、再运移、再封堵的特征,可以有效地增大油层,尤其是深部和油井附近的油层的波及体积。

(4) 良好的耐温和耐矿化度特性。微球在高温下反应合成,适用温度在 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,矿化度在 $35\text{ }000\text{ mg/L}$ 以上。

本书体现了课题组十余年来的研究成果:总结分析了目前的调驱技术及存在的不足,论证了孔喉尺度弹性微球深部调驱的理论根据;详细介绍了孔喉尺度弹性微球的合成方法、配方研究和合成条件研究的成果;介绍了合成的孔喉尺度弹性微球的物化性质、力学性质,其在多孔介质中的运移能力、封堵能力、致水绕流能力以及阳离子微球与地层残留聚合物的功能反应等;建立了弹性微球运移数学模型、调驱数学模型以及微球调驱的方案设计方法;提出了在线调驱和智能化动态调整的新概念和新方法。

本课题组研究生贾晓飞、李会荣、王浩志、张增丽等为本书内容做了大量的研究工作,其他研究生也为本书的完成做了积极的贡献,在此一并表示感谢。

雷光伦

2011 年 3 月

• 目 录 •

第一章 调剖技术现状及微球深部调驱特点	1
第一节 有机凝胶类深部调剖	1
第二节 无机盐沉淀与泡沫类深部调剖	4
第三节 其他深部调剖方法	6
第四节 现有技术的不足及微球深部调驱的特点	8
第二章 岩石孔喉尺度特征及弹性微球的合成	10
第一节 岩石孔喉尺度特征	10
第二节 孔喉尺度弹性微球的合成	12
第三节 微米级弹性微球的合成	13
第四节 纳米级弹性微球的合成	23
第五节 阳离子微球的合成	27
第三章 孔喉尺度弹性微球基本性质表征	34
第一节 孔喉尺度弹性微球的形态和粒径分布	34
第二节 孔喉尺度弹性微球的酸碱性及悬浮分散性	40
第三节 弹性微球的黏弹性	41
第四节 孔喉尺度弹性微球的耐盐性与耐温性	45
第五节 弹性微球的耐酸碱性	55
第四章 孔喉尺度弹性微球调驱的性质	57
第一节 微球调驱的微观实验	57
第二节 微球调驱的压力及阻力系数变化特征	59
第三节 微球调驱的影响因素	66
第四节 微球调驱提高采收率对比	70

第五节 聚合物驱后的阳离子微球调驱	72
第五章 微球深部液流转向及提高采收率机理	76
第一节 剩余油形成机理与驱替方法	76
第二节 微球深部液流转向提高采收率的机理	81
第六章 微球渗流规律及调驱数学模型	84
第一节 微球在地层中的渗滤及储层参数的变化	84
第二节 孔喉尺度弹性微球调驱数学模型的建立	97
第三节 数学模型的数值求解方法的研究	105
第七章 微球的在线调驱及动态调整方法	111
第一节 适应储层参数的微球直径的确定方法	111
第二节 调驱微球用量的等压力梯度设计方法	114
第三节 调驱方案设计及动态调整方法	118
第四节 微球在线调驱工艺方法	120
第五节 现场实例应用	120
参考文献	124

第一章

调剖技术现状及微球深部调驱特点

油田注水开发过程中,油藏平面和纵向上的非均质性、油水黏度的差异和注采井组内部的不平衡性,导致了注入水向生产井方向舌进和向高渗透层突进的问题。注水井调剖技术是高含水后期可经济有效地改善注水开发效果、实现老油田稳产的手段。通过调剖,可有效改善注水井的吸水剖面,扩大注水波及体积,增加可采储量,降低自然递减速度,提高油田的开发水平。随着油田进入高含水或特高含水开发期,油田水驱问题越来越复杂,调剖等控水稳油技术的难度及要求越来越高。传统调剖剂的调剖半径较小,在非均质性严重的油藏,后续注入水会很快绕过封堵区,窜流回到原优势渗流通道,增产有效期短,效果差,已经不能满足调剖要求。为解决这一矛盾,深部调剖(驱)技术应运而生。立足于高含水油藏开发后期的实际需要,在精细油藏描述及油藏数值模拟研究的基础上,以开发廉价长效的深部调剖(驱)剂为核心,深入开展调剖(驱)机理及理论研究,完善准确、快捷的决策技术及相关配套工艺技术,形成深部调剖(驱)技术的工业化应用规模,已成为国内外专家学者的共识。

第一节 有机凝胶类深部调剖

凝胶类深部调剖剂主要包括延缓交联型深部调剖剂和预交联凝胶颗粒类深部调剖剂。

一、延缓交联型深部调剖

1. 弱凝胶

弱凝胶是由低浓度的聚合物和低浓度的交联剂形成的弱交联体系,以分子间交联为主、分子内交联为辅,黏度为 $100 \sim 10\,000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,具有三维网络结构。弱凝胶一般选择高分子量聚丙烯酰胺作为主剂,质量浓度为 $800 \sim 3\,000 \text{ mg/L}$ 。交联剂主要由树脂、二醛和多价金属离子类等组成。美国使用最多的交联剂是乙酸铬、柠檬酸铝和乙二醛;中国应用较多的是酚醛复合体、树脂预聚体、乙酸铬、乳酸铬、柠檬酸铝等。形成的弱凝胶强度通常为 $0.1 \sim 2.5 \text{ Pa}$,现场应用需根据地层及生产状况选择凝胶强度。

微观驱替实验表明,弱凝胶沿原先被水占据的大孔道流动,并且可以通过变形挤入窄小的孔喉,在弱凝胶的前沿存在稳定的水胶界面。在后续注水过程中,存在于大孔道的弱凝胶迫使后续注入水改向而进入未被注入水波及的小孔隙,小孔隙中被驱替的残余油滴逐渐聚集并形成油墙。弱凝胶的流体改向作用是提高微观波及效率和采收率的主要原因;弱凝胶的黏弹作用有利于其在油藏深部进行深部调剖。

影响弱凝胶性能的因素较多,每一具体油田对应的弱凝胶体系的配方差异大,且多不抗盐,因此,使用时应重点考虑交联聚合物体系与地层流体、配液用水、油藏温度和油藏地层特征的配伍性。

2. 本体凝胶

本体凝胶(DDG)中应用较多的是聚丙烯酰胺类本体凝胶,主要由聚丙烯酰胺和交联剂两部分组成。一般选择相对分子质量为 $500 \times 10^4 \sim 1\,200 \times 10^4$ 的聚丙烯酰胺为主剂,质量分数为 $0.08\% \sim 0.25\%$ 。在聚合物和交联剂的选择中应重点考虑其与地层水的配伍性及其与储层渗透率的适应性。对低渗透油藏,可选择低分子质量、高浓度的聚丙烯酰胺为主剂;对高渗透油藏,特别是裂缝性油藏,一般选择高分子质量的聚合物为主剂。

从交联剂的使用情况看,主要有树脂类、二醛类和多价金属离子类。Seright 对美国过去 15 a 中交联剂使用情况的调研发现,使用最多的是 Cr^{3+} 、柠檬酸铝和乙二醛。韩明等对乙二醛的交联特性进行了研究,发现乙二醛作为交联剂时对 pH 值敏感,且形成凝胶的热稳定性较差。

本体凝胶的强度可调,能封堵高渗透层。剪切对本体凝胶有一定的破坏作用,但剪切后的凝胶团又具有一定的驱油作用。本体凝胶对低渗透层会产生一定污染,且在配液和注入时,需随时监控配液质量。

3. 胶态分散凝胶

胶态分散凝胶(CDG)与本体凝胶的一个显著区别在于交联作用点不同;DDG的交联反应主要发生在聚合物分子之间,以分子间交联为主、分子内交联为辅,形成具有三维网状结构的凝胶整体;CDG的交联反应主要发生在分子内的各交联活性点之间,以分子内交联为主、分子间交联为辅,形成分散的凝胶线团。CDG的特点为聚合物和交联剂的质量浓度低,聚合物的质量浓度可低至100 mg/L。交联剂一般是多价金属离子,如柠檬酸铝、乙酸铬等。

国外只有TIORCO公司主张使用CDG调驱体系,该公司曾在美国落矶山地区对29个油藏进行了CDG深部处理,其中22个项目获得增产。尽管TIORCO声称是CDG处理,但从各段塞HPAM的质量浓度来看,TIORCO公司做的这些试验仍然是弱凝胶处理(见表1-1)。中国对CDG也曾有过广泛重视,尤其在“九五”期间,中国科学院化学研究所、中国石油勘探开发研究院采收率所、大庆油田等对该技术进行了大量的研究,并在大庆、河南等油田进行了多项先导性现场试验,但使用的聚合物质量浓度大多为800~1 500 mg/L,显然这不是真正意义上的CDG驱。此外,由于指导思想上的分歧,这些试验大多没有取得理想的效果。

表 1-1 NRRU 油田的 CDG 处理参数

段 塞	HPAM 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	柠檬酸铝质量浓度/(mg·L ⁻¹)	处理量/m ³
第一段塞	775	1 000	13 747
第二段塞	1 400	1 000	7 528
第三段塞	1 200	1 000	3 240
第四段塞	300	265	62 025

胶态分散凝胶能有选择性地进入高渗透层,有效减少层间窜流,显著增加波及体积,但它不适合大孔道和特高渗透层的调剖处理,加之CDG耐温、耐盐性能差,成胶条件苛刻,封堵程度低,目前国内外对该技术的研究与应用几乎处于停滞状态。

二、预交联类深部调剖

预交联凝胶颗粒调剖是近几年发展起来的一项新型深部调剖技术,是主要针对非均质性强、高含水、大孔道发育的油田的深部调剖、改善水驱开发效果而研发的新技术。预交联凝胶颗粒遇油体积不变而吸水变软,在外力作用下可发生变形,从而运移到地层深部,在高渗层或大孔道中可产生

流动阻力,使后续注入水分流转向,从而有效改变地层深部因长期水驱形成的压力场和流线场,达到深部调剖、提高波及体积、改善水驱开发效果的目的。该类调剖剂具有以下五个方面的特点:

(1) 它是在地面合成、烘干、粉碎、分筛制备而成,避免了地下交联体系不成胶和抗温、抗盐性能差等弊端,具有广泛的适应性,耐温、耐盐性能好;

(2) 粒径变化大、膨胀倍数高、膨胀速度快,适合存在大孔道、高渗带的高含水油藏深部调剖,改善水驱效果;

(3) 吸水变软,颗粒的形变运移可扩大调剖作用范围,达到液流转向深部调剖的目的;

(4) 深部调剖施工工艺简单、灵活,无风险;

(5) 可单独应用,也可与聚合物弱凝胶体系复合应用于注水开发油藏深部调剖,改善水驱作业,还可用于聚驱前及聚驱过程中的深部调剖。

第二节 无机盐沉淀与泡沫类深部调剖

一、无机盐沉淀深部调剖

沉淀类深部调剖方法可分为单液法和双液法。单液法通常采用笼统注入的方式,通过控制反应条件,利用缓释催化剂的原理来实现堵剂的延缓形成;双液法一般分段塞注入不同的化学剂,两种成分在地下混合,形成无机沉淀,从而对高渗透层产生机械堵塞。应用较多的主要有水玻璃-氯化钙和表面活性剂-酒精类深部调剖剂等。

水玻璃-氯化钙在俄罗斯的研究和应用最多,具有价格低廉、原料来源广及施工性能良好等特点。一般要求水玻璃中二氧化硅与氧化钠的物质的量之比为 3.22 左右。在单液法中,要求地层水为高矿化度钙镁型,同时考虑到地层水中形成沉淀的有效成分钙、镁离子不够,因此需在配液中补充一定量的氢氧化钙;配液进入地层后,缓慢地与地层水发生作用,生成硅酸钙沉淀。在双液法中,采用清水或油作隔离液,水玻璃和质量分数为 10%~15% 的氯化钙按 1:1 的比例依次注入,两种成分在地下混合后生成硅酸钙沉淀。

表面活性剂-酒精法利用酒精能显著降低盐的溶解度的特性,在地层中形成盐的沉淀,从而对高渗透层产生堵塞。该处理方法与微生物、凝胶处理方法相比,其显著优点在于适用性广,对低渗透层伤害小,并且不受吸附和其他储层条件(如 pH 值、温度及地层水矿化度等)的影响,其缺点是不适于非均质严重的地层。

针对塔里木油田高温($120\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高地层水矿化度($150\sim 210\text{ g/L}$)的深层油藏($4\ 500\sim 6\ 000\text{ m}$)的调剖问题,研究了一种无机凝胶涂层调剖剂。该调剖剂与油藏高矿化度地层水反应,形成与地层水密度相当的无机凝胶,凝胶通过吸附在岩石骨架表面逐渐结垢,形成无机凝胶涂层,使地层中的流动通道逐渐变窄,形成流动阻力,从而达到使地层流体转向、扩大波及体积的目的。

无机凝胶涂层深部调剖剂适用于超深、高温、高矿化度、中低渗透率、中低孔喉非均质地层注水井的深部调剖。该调剖剂具有极好的耐温、耐盐、耐冲刷及热稳定性,能达到对高渗透多孔介质堵而不死的封堵效果,但是它只有在高矿化度地层水条件下才能达到预期效果。

二、泡沫深部调剖

泡沫通过地层孔隙时,其液珠发生形变,通过叠加的贾敏效应产生流动阻力,在高渗层形成堵塞,使后续注入水转向,从而提高注入水的波及体积。用于注水井的调剖剂一般有三相泡沫深部调剖剂、凝胶泡沫深部调剖剂和蒸汽泡沫深部调剖剂。

1. 三相泡沫深部调剖剂

三相泡沫调剖是依靠稳定的泡沫流体(由气相、液相和颗粒状固相组成)在注水层中叠加的贾敏效应,改变吸水层内的渗流方向和吸水剖面,从而扩大注入水的波及体积。

2. 凝胶泡沫深部调剖剂

将起泡剂溶于硅酸凝胶后注入地层,再注入气体(天然气或氮气),这样就可在地层中先产生以液体为分散介质的泡沫,随后硅酸凝胶胶凝,产生以凝胶为分散介质的泡沫。所用的起泡剂为季铵盐表面活性剂。

3. 蒸汽泡沫深部调剖剂

在稠油注蒸汽开采过程中,由于蒸汽和地下原油间的密度差引起的重力分异作用和黏度差引起的黏滞指进,以及地层的非均质性等诸多因素的影响,产生了蒸汽超覆和汽窜现象,导致驱替波及系数小、采收率低、油藏

动用程度低等问题。因此,蒸汽泡沫调剖作为封堵汽窜通道、控制蒸汽超覆、提高稠油油藏原油采收率的一项技术而得以发展。

第三节 其他深部调剖方法

一、黏土-聚合物絮凝深部调剖

黏土-聚合物絮凝深部调剖属于双液法调剖技术,其主要调剖机理为:絮凝堵塞、积累膜机理和机械堵塞。该体系中的聚合物以 HPAM 的絮凝效果最好,这是因为 HPAM 相对分子质量最大、柔顺性最好,有利于它在黏土颗粒之间通过氢键产生桥接,形成黏土絮凝体,絮凝体一旦形成,就被滞留在大孔道的喉部,从而抑制水的流动,产生调剖效果。积累膜是指交替用两种工作液处理表面后所产生的多层膜。聚合物溶液和黏土悬浮体与地层的大孔道表面交替接触,就可形成黏土的积累膜,从而降低大孔道地层的渗透性。另外,黏土颗粒可以在储层孔喉处进行机械封堵,起到调剖作用。

我国对黏土类深部调剖剂的应用较多,有钠土类、D-1 黄河黏土类、硅土胶泥类、膨润土类以及石灰乳复合类等多种深部调剖剂。

黏土-聚合物絮凝深部调剖剂具有耐温、耐盐、耐剪切、化学稳定、生物稳定、封堵强度大、对中低渗透层污染少等优点,但其自然选择性、注入性较差,且现场施工需要专用设备。另外,储层温度不宜过高,因为温度越高越不利于积累膜的形成。

二、含油污泥深部调剖

含油污泥是原油脱水处理过程中伴生的工业垃圾,其主要成分是水、泥质、胶质、沥青质和蜡质。其调剖原理为:在含油污泥中加入适量添加剂,将其调配成黏稠的微米级的水包油型乳化悬浮液,当乳化悬浮液在地层中达到一定的深度后,受地层水冲释作用,乳化悬浮体系分解,其中的泥质吸附胶质、沥青质和蜡质,并通过它们的黏联聚集形成较大粒径的“团粒结构”沉降在大孔道中,使大孔道直径变小,增加了注入水的渗流阻力,迫

使注入水改变渗流方向,从而达到提高注入水波及体积、改善注水开发效果的目的。

含油污泥深部调剖剂适用于纵向上渗透率差异大、有高吸水层段、启动压力低的注水井。该类调剖剂具有良好的抗盐、抗高温、抗剪切性能,但由于受原料产地和产量的限制,不易在其他油田推广。

三、阴阳离子聚合物深部调剖

阴阳离子聚合物深部调剖是指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、阳离子聚合物的调剖技术。岩石表面呈负电性,从生产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;同时从注入井注入阴离子聚合物。阴、阳离子型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,迫使后续注入的驱替液进入中低渗透层,产生深部调剖作用。

阴、阳离子的比例及质量浓度必须与储层条件相匹配,且阴、阳离子聚合物交替注入顺序对调剖效果的影响较大,另外,要求地层水矿化度不能太高,因为其黏度随矿化度的增加而下降。

四、微生物类深部调剖

用于深部调剖的菌种接种物主要有葡聚糖 β 球菌、硫酸盐还原菌、需氧和厌氧的充气污泥细菌、生成表面活性物质和助表面活性物质的菌种、生成生物聚合物的细菌(如肠膜明串珠菌)等。微生物用于注水井调剖最早始于美国,把能够产生生物聚合物的细菌注入地层,在地层中游离的细菌吸附在岩石孔道表面后,开始形成附着的菌群;随着营养液的输入,细菌细胞在高渗透条带大量繁殖,繁殖的菌体细胞及细菌产生的生物聚合物等黏附在孔隙岩石表面,形成体积较大的菌团或菌膜;后续有机和无机营养物的充足供给,使细菌及其代谢产出的生物聚合物急剧扩张,孔隙越大,细菌和营养物积聚滞留量就越多,形成的生物团块就越大。细菌的大量增殖及其代谢产出的生物聚合物在大孔道滞留部位迅速聚集,对高渗透条带起到较好的选择性封堵和降低吸水量的作用,并使水流转向,增加中低渗透层位的吸水量,从而扩大波及区域,提高原油采收率。

微生物调剖不需动管柱,施工安全,不污染环境,具有施工简便、易于实施、成本低的特点,但微生物调剖也有很多缺点,如微生物过度生长可能引起井堵塞、菌种的筛选需要考虑的因素繁多、微生物和营养液同时进入低渗透层会对其造成伤害等。

第四节 现有技术的不足及微球深部调驱的特点

一、现有调驱技术的不足

深部调驱技术能有效调整油藏储层渗透率差异的矛盾,提高储层动用程度。目前常用的深部调驱技术在油田的实际应用中取得了显著的效果,但也存在一些不足。

颗粒型调驱剂具有较高的强度,能够封堵高渗透层带,但由于其粒径较大,往往只在注水井附近的油层中起到封堵作用,水会很快绕流,再次进入高渗透层,因此,它主要是改善注水井附近的渗流状况,提高注水井附近的波及体积,而其深部调剖作用较小,因注水井附近剩余油饱和度较小,因此提高采收率程度不大。地下交联类有机调驱体系具有可运移性,能够达到深部调驱的效果。但封堵强度通常较低,对于高渗透带的封堵效果不佳,即使堵住也容易再次突破,有效期短。特别是该体系由多组分构成,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最佳配比发生变化,从而导致不成胶或成胶效果差。同时该体系成胶前其黏度受地层温度和矿化度的影响严重,因而也影响其成胶后体系的强度。在施工方面,因目前的聚合物调驱体系黏度较大,都需要专门的大型调驱泵,因此具有施工车辆多、场地要求大、施工复杂、费用高等特点,对于井场面积有限的地区,如海上平台,施工难度大。目前的聚合物类深部调驱还无法在施工过程中根据地层压力等动态参数的变化对调驱方案进行动态调整,以实现满足油藏动态需要的智能化在线长期调驱。

二、孔喉尺度弹性微球深部调驱技术特点

油层砂岩孔隙喉道具有微米级尺度特征,在油层中既能通过岩石喉道的单个微球体或多个微球体架桥封堵喉道,使水绕流,又能因微球的弹性变形通过喉道,并不断向油层深部运移的微球尺度应是微米级的。

因此,根据能封堵并能变形通过岩石喉道的微球直径要求,研究设计合成了纳米级、微米级系列孔喉尺度聚合物弹性微球。其调驱特点是:

(1) 数量庞大。计算表明,1 kg 尺寸为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的微球,其数量为 10×10^8 个;1 kg 尺寸为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的微球,其数量为 100×10^8 个。众多的微球广泛分布在岩石孔隙中可对水流产生阻碍作用而致水绕流。

(2) 良好的悬浮分散性。微球密度小、粒度细,能很好地分散悬浮于水中,不增加水的黏度,因此,调驱时不需要专门的调剖泵,可用比例泵直接打入注水管线进行在线注入。

(3) 膨胀性和良好的弹性。微球注入油层后会逐渐吸水膨胀,微球封堵喉道后会通过变形通过喉道,具有运移、封堵、再运移、再封堵的特征,可以有效增大油层,尤其是深部和油井附近的波及体积。

(4) 良好的耐温和耐矿化度特性。微球在高温下反应合成,适用温度在 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,矿化度可达 $35\text{ }000\text{ mg/L}$ 以上。

第二章

岩石孔喉尺度特征及弹性微球的合成

砂岩岩石的孔喉尺度是设计合成与之匹配的深部调驱微球,并保证微球能在岩石孔喉中运移,又能使其中的液流转向的理论依据。与岩石孔喉尺度匹配的微球的合成方法、合成配方、合成工艺条件的研究及其合成,则是微球深部调驱技术的关键。

第一节 岩石孔喉尺度特征

一、岩石孔喉尺度特征

将实际砂岩简化为孔隙空间由等直径的平行毛管束组成的理想岩石(毛管束模型),根据黏滞力与驱动力之间的平衡关系,并假设真实岩石和毛管束模型的渗流阻力相等,推导可得岩石的平均孔喉半径:

$$r = \sqrt{\frac{8k}{\phi}} \quad (2-1)$$

式中 k ——岩石的渗透率, μm^2 ;

ϕ ——岩石的孔隙度, 小数;

r ——岩石的平均孔喉半径, μm 。

当孔隙度取 0.25 时,由式(2-1)计算渗透率与平均孔喉半径之间的关系,结果如表 2-1 所示。