



中国石油勘探开发研究院出版物

Theory and New Experimental Methods of Chemical
Imbibition Oil Recovery

化学渗吸采油理论与 实验新方法

张 翼 马德胜 朱友益 著



科学出版社

化学渗吸采油理论与实验新方法

Theory and New Experimental Methods of Chemical
Imbibition Oil Recovery

张 翼 马德胜 朱友益 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以作者近年来在化学渗吸采油理论方面的最新实验研究成果及新进展为基础,主要阐述了渗吸采油的基本理论、渗吸作用与储层物性关系、渗吸剂属性与渗吸效果、渗吸实验方法、渗吸实验仪器、渗吸剂研制与筛选及油田应用等内容。对提高特低/超低渗透率、特殊岩性及致密油油藏的采收率具有较好的参考价值。

本书可供从事化学渗吸法采油、油藏工程及相关专业的院校师生、专业技术人员及科技管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

化学渗吸采油理论与实验新方法 = Theory and New Experimental Methods of Chemical Imbibition Oil Recovery / 张翼, 马德胜, 朱友益著. —北京: 科学出版社, 2018.4

ISBN 978-7-03-054856-6

I. ①化… II. ①张… ②马… ③朱… III. ①低渗透油层-石油开采-油田化学-研究 ②低渗透油层-石油开采-油田化学-实验 IV. ①TE39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 254438 号

责任编辑: 万群霞 冯晓利 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 4 月第一次印刷 印张: 20 3/4 插页: 2

字数: 500 000

定价: 178.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

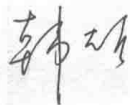
序

张翼现为中国石油勘探开发研究院提高石油采收率国家重点实验室教授，也是中国石油天然气股份公司三次采油重点实验室学术带头人，近年来一直致力于化学渗吸采油理论与实验新方法、化学复合驱规律和驱油新体系方面的研究工作，取得了较多的研究成果。

张翼教授在化学复合驱规律研究中提出了“乳化综合指数”的概念，发现了乳化综合指数与驱油效率间的关系，指明在驱油剂优化中可以将乳化综合指数作为驱油剂体系主要指标用于驱油剂的优化和评价。

在化学渗吸剂的室内设计与优化中探索性研究了界面张力、接触角、乳化稳定性、黏度比和渗透性等属性对渗吸效率的影响规律，发现不同渗吸剂体系在低渗透油藏中存在最佳的孔喉适应值，提出了用于表征渗吸剂在储层中渗透与扩散性能的物理量——“渗透力”的概念，同时建立了该参数的定义式和测试方法，使渗吸剂在渗透性能评价方面有了定量的方法。为了更好地判断渗吸剂对孔隙岩石表面上原油的启动能力，她提出了“黏附功降低”的概念，从理论上给出了岩石表面原油启动的热力学初步判别式；在多年的研究中她还发现了在岩心静态渗吸过程中，渗吸采收率与渗吸时间之间存在指数多项式关系，首次给出了实际渗吸时间与渗吸效率关联的动力学方程。该方程可以直观地判断化学渗吸剂在单位时间内的渗吸效果，便于优化和选择高效渗吸剂；在探索渗吸效率影响因素的过程中，她发现了渗吸剂属性中的几个主要影响因素，并将这几个属性因素对渗吸效率的影响利用数学理论中多元分析方法进行了排序，建立了多因素交互影响的结构方程，这一实验结果可以帮助研究人员更好地理解渗吸规律。

该书是张翼教授及其研究团队多年来研究成果的部分总结，她将自己的一些新发现、新认识、新方法、新工艺、新仪器及理论方面的新进展都融入书中，相信该书的出版定会为化学渗吸采油技术的矿场应用提供重要参考。



中国工程院院士

2017年10月

前 言

石油是我国能源结构中仅次于煤炭的第二大重要能源,长期以来影响着国民经济的发展,在“十三五”甚至今后更长的时间里,在新的能源未能发挥主导作用之前,石油、天然气等化石能源仍然起着不可替代的作用。但随着我国国民经济的迅速发展,石油需求量日益增长,供需矛盾日益突出。从2005~2011年全球石油消费量统计结果看,我国的石油消费量逐年提升,消费量由世界第4位上升到第2位,而储量位于全球第13或14位。我国2010年石油年产量2亿t,需求3.8亿t,缺口1.8亿t;2012年产量2.05亿t,消费量4.93亿t,石油净进口量为2.84亿t,对外依存度由2000年的28.2%上升到58%;2015年上升到60.69%,首次突破了60%的大关。预计至2020年,需求4.5亿t,自给2.2亿t,缺口一半以上。而截至2013年年底,我国石油与天然气分别占全球探明储量的1.1%和1.8%。据有关专家测算,按照《能源发展战略行动计划(2014~2020年)》,到2020年,我国一次能源消费总量控制在48亿t标准煤左右,其中天然气消费比重达10%以上,这相当于3600亿 m^3 。自2015年以来,国际油价持续低迷,给新的石油开采技术带来了前所未有的挑战。

近年来,我国探明油气资源品位走低,难采储量占比逐年升高。延缓老油田产量递减和加快非常规油气投入开发,都需要提高采收率技术方面有革命性的突破。由于我国原油资源结构较差,随着勘探开发程度的不断加深,原油品质呈现总体变差的非常规化趋势,原油产能重心逐年向老油田低效储量和油田低品位储量转移。截至2011年年底,我国石油处于高含水、高采出程度(“双高”)阶段的老油田年产量占全年总产量的58%,处于“双高”阶段油藏剩余可采储量占总剩余可采储量的44%;而难采储量已达42亿t,其中已开发低效难采储量18亿t,未动用低品位难采储量24亿t。

低效难采储量和低品位储量是我国油田未来开发的主战场。在几十年的开发历史中,技术人员积极攻关,在开发方式上狠下工夫,采用井网加密、超前注水、体积压裂等一系列强制措施,取得了提产、稳产的效果。但这一系列措施将步入瓶颈的阶段,如何持续保持产量,进一步提高低渗透油藏和低品位油藏的采收率的问题是“十三五”以后石油工作者面临的重大课题。

渗吸作用起源于毛细管力及毛细现象,在自然界中普遍存在。渗吸采油的概念于20世纪50年代提出,起初的发现、理解和相关研究多集中在水的自发渗吸方面,如理论模型、数值分析、渗流理论的改进、渗吸方式及如何通过人工压裂加强水的渗吸过程等。在工程实际应用中也为水的吞吐,缺少基于深入认识储层润湿性的基础上通过改善润湿性、利用渗吸剂作用强化渗吸方面的研究。本书即通过探索渗吸采油基本理论、研究储层特征与渗吸作用的相关性、渗吸作用的实用条件、渗吸剂的室内实验方法和优化方法等,为读者展示了国内外最新研究进展和笔者的最新成果。

本书研究内容得到了中国石油勘探开发研究院“超前储备”项目的支持,以及“十

一五”中国石油勘探生产分公司和国家科学技术部重大专项的部分支持。感谢对本书给予大力支持的宋新民院长、中国石油勘探开发研究院开发一路及科研管理处的领导；感谢参与研究的中国石油提高采收率国家重点实验室的李建国、蔡红岩、高明、樊剑、高建、严守国、侯建锋、王友净、秦勇、李佳鸿、张文旗、赵丽莎等，以及参与实验工作的中国地质大学(北京)的博士研究生王德虎、江敏、陈海汇，博士后刘化龙，硕士研究生翟文静、王兴伟、倪非、唐蒙、孙蕴；感谢陈海汇、杨欢、巩芳鸽等同学为本书做了图表制作、排版及资料翻译工作。

特别感谢在渗吸理论及基础研究中给予辛勤指导的韩大匡院士，在应用研究中提出宝贵建议的马德胜、朱友益所长！

由于水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

张 翼

2017年9月30日

目 录

序 前言

第 1 章 渗吸采油基本原理	1
1.1 低渗透油藏开发中存在问题	1
1.2 渗吸采油理论	6
1.2.1 渗吸作用微观解释	6
1.2.2 渗吸动力学模型	8
1.2.3 渗吸过程热力学	19
1.2.4 渗吸过程的研究方法	21
1.3 油藏岩石润湿性测试方法	21
1.3.1 动态接触角法	22
1.3.2 渗吸与排驱法	24
1.3.3 离心法——USBM 润湿性指数法	25
1.3.4 Washburn 法	25
1.3.5 色谱润湿性指数法	26
1.3.6 浮选法	26
1.3.7 核磁共振方法	26
1.3.8 电阻测量方法	27
1.4 恢复和调整润湿性的方法	27
1.4.1 保持岩心状态的方法	27
1.4.2 影响油层初始润湿性的因素	27
1.4.3 恢复润湿性的方法	28
1.4.4 实验室中润湿性的人工调整	29
1.5 渗吸采油的影响因素概述	29
1.5.1 岩石类型的影响	30
1.5.2 油藏物性特征的影响	33
1.5.3 润湿性的影响	34
1.5.4 流体的影响	36
1.5.5 其他影响因素	39
1.5.6 发展趋势	41
参考文献	41
第 2 章 渗吸作用与储层物性关系	47
2.1 储层润湿性与评价方法比较	49
2.1.1 定量测定方法	50
2.1.2 定性测量方法	53
2.1.3 现场测定法	55

2.1.4 各种润湿性测定方法的评价	56
2.1.5 化学剂对储层润湿性及渗吸效果关系	56
2.1.6 实验结果	62
2.2 渗透率与孔隙度	65
2.2.1 岩石渗透率的影响	65
2.2.2 岩石孔隙度的影响	68
2.3 含油饱和度	69
2.4 储层孔隙与裂缝的影响	70
2.4.1 储层孔隙与喉道的影响	70
2.4.2 裂缝性油藏的渗吸	76
参考文献	79
第3章 渗吸实验方法	81
3.1 静态渗吸实验	81
3.1.1 早期实验方法	82
3.1.2 新建立的实验方法	85
3.1.3 测试实验和结果分析	86
3.1.4 渗吸采收率的计算	87
3.1.5 渗吸效果评定	87
3.2 动态渗吸实验	90
3.2.1 压力脉冲法	90
3.2.2 周期注水法	91
3.2.3 动态渗吸和静态渗吸组合法	92
3.3 渗透力的定义与测试方法	93
3.3.1 毛细管举升系数(S_c)	93
3.3.2 渗透速度的测试方法	95
3.3.3 渗透力的结果与分析	97
3.4 乳化性能测试方法	100
3.4.1 乳化力及测试方法	100
3.4.2 乳化稳定性及测试方法	106
3.4.3 乳化强度综合指数及评价方法	107
3.5 洗油效率实验方法	112
3.5.1 背景	112
3.5.2 洗油效率评价方法	113
3.6 渗吸剂的综合筛选方法	114
3.6.1 背景	114
3.6.2 渗吸剂筛选步骤	114
参考文献	120
第4章 渗吸剂属性与渗吸效果	121
4.1 实验条件	122
4.1.1 实验材料	122
4.1.2 实验仪器与方法	123

4.2 界面张力与渗吸效果	123
4.3 黏度与乳化性能	127
4.3.1 黏度的影响	127
4.3.2 乳化性能的影响	129
4.4 黏附功与接触角	132
4.4.1 黏附功变化	132
4.4.2 接触角	134
4.5 渗吸剂的渗透性	137
4.5.1 毛细管举升系数实验	137
4.5.2 渗透速度实验	137
4.5.3 渗透性评价	138
4.6 渗吸剂属性与渗吸效率相关性综合分析	139
4.6.1 数学方法与分析软件	139
4.6.2 分析方法介绍	142
4.6.3 主成分分析法的基本思想	145
4.6.4 分析软件的选择和功能性介绍	146
4.6.5 回归分析	150
参考文献	224
第5章 渗吸实验仪器	225
5.1 静态渗吸仪	225
5.1.1 研制背景	225
5.1.2 结构与特征	225
5.1.3 自吸仪操作与计量	226
5.2 耐压渗吸仪	227
5.2.1 研制背景	227
5.2.2 结构特征	227
5.2.3 操作规程	228
5.3 洗油效率测试装置	229
5.3.1 洗油效率测试刻度瓶	229
5.3.2 洗油效率测试装置	230
5.4 乳化稳定性评价仪	232
5.4.1 乳化稳定性评价仪研制	232
5.4.2 技术指标与操作规程	234
5.5 毛细管实验装置	235
5.5.1 结构与功能	235
5.5.2 操作规程	236
5.6 油砂制备装置	236
5.6.1 结构特征	237
5.6.2 实体设计的改进	238
参考文献	239

第 6 章 渗吸剂研制与筛选	240
6.1 实验材料	240
6.1.1 原油和水	240
6.1.2 油砂与岩心	244
6.1.3 化学剂的准备	245
6.2 渗吸剂性能评价	252
6.2.1 不同类型渗吸剂的定量分析	252
6.2.2 吸附损耗	269
6.2.3 表面活性剂的 HLB 值	270
6.2.4 表面活性剂临界胶束浓度的测定	273
6.3 室内筛选与优化	277
6.3.1 优化实验	277
6.3.2 动/静态渗吸实验	281
6.3.3 渗吸剂的吸附性能评价	287
参考文献	289
第 7 章 油田应用	291
7.1 应用条件	291
7.1.1 油藏条件	291
7.1.2 注入工艺	297
7.2 应用实例	301
7.2.1 国外应用	302
7.2.2 国内应用	306
参考文献	321

彩图

第1章 渗吸采油基本原理

我国发现的低渗透油田占新发现油藏的一半以上,而低渗透油田产能建设的规模则占油田产能建设规模总量的70%以上,低渗透油田已经成为油田开发建设的主战场^[1]。

从我国每年提交的石油地质储量看,低渗透油田地质储量所占比例逐年增高、但动用程度较低。1989年,探明低渗透油藏的石油地质储量为9989万t,占当年总探明储量的27.1%。1990年,探明低渗透油藏地质储量为21214万t,占当年总探明地质储量的45.9%。1995年,探明低渗透油藏的石油地质储量为30796万t,占当年探明储量的72.7%。2004年,我国探明的低渗透油藏的石油地质储量为52.1亿t,动用低渗透油藏地质储量26.0亿t,尚有一半的储量未动用。2012年,我国石油新增探明地质储量15.2亿t,同比增长13%,新增可采储量2.7亿t,同比增长7%。例如,姬塬油田是中国石油天然气股份有限公司新增探明地质储量最大的陆上油田,新增2.02亿t,属于特低孔隙度、特低渗透率的岩性油藏。红河油田新增探明石油地质储量为1.2亿t,属于低孔隙度、特低渗透率的岩性油藏。我国低渗透油田广泛分布在全国的各个油气区,探明储量为63亿t,约占探明总储量的28%。2011~2015年探明储量中低渗透油田储量的比重已增至50%~60%,剩余石油资源中低渗透油田的储量也占到76.5%,其中松辽、鄂尔多斯、柴达木、准噶尔四大盆地低渗透油田储量比例均在85%以上。在低渗透油气资源中,探明储量大于2亿t的油区有大庆、吉林、辽河、大港、新疆、长庆、吐哈、胜利、中原9个油区。低渗透油田最基本的特点就是流体渗透能力差、产能低,通常需要进行油藏改造才能维持正常生产,如何经济高效地开发低渗透油藏是当前世界油田开发中的一大难题^[2-4]。

现有技术条件下采收率较低。我国低渗透油田平均采收率只有21.4%,比中、高渗透油田的34%低12.6%。目前有50多个油田年平均开采速度小于0.5%,这些低速、低效油田的地质储量约3.2亿t,其平均采油速度仅有0.27%。如果通过改造、挖潜、实施新方法,使低渗油田能够年均提高采收率2%,就相当于增产3500万~4000万t原油,相当于发现一个大油田。可见,低渗油田提高采收率新技术是当前及今后石油行业将长期面临的开发问题。

因此,国内外石油开采现状对化学剂的要求更为苛刻,已经提升到高效、低廉、绿色环保的水平,老油田的挖潜改造及新技术的推广都步入了十分艰难的境地,亟须环境友好、廉价高效的技术。

1.1 低渗透油藏开发中存在问题

1. 国内技术现状

我国低渗透油藏的分布较广,中国石油天然气股份有限公司(简称中石油)的低渗透油藏主要有长庆、大庆、吉林、辽河、新疆、大港、吐哈、塔里木、延长等油区。我国

第一个规模开发的低渗透油田是中石油长庆油田分公司的安塞油田,是一个特低渗透油田,1997~2008年,产量由100万t提高到300万t,11年间增产2倍,年均增长10.5%,并为长庆油田分公司开创了“安塞模式”,为我国原油产量稳定增长做出了重大贡献,也为我国低渗透油田的开发积累了技术和经验。中石油吉林油田分公司、中石油新疆油田分公司和中石油大庆油田分公司也针对本油区低渗透油田特征开展技术攻关,并取得了不同程度的突破。但目前低渗油田水驱已进入开发的中后期,主要面临以下几方面的共性问题:①特低渗透油田采收率低。依靠天然能量采收率仅能达到8%~11%,注水开发采收率为17%~22%,普通低渗油田采收率为28%~35%。②采油速度低。依靠天然能量开采,特低渗透油田的采油速度在1%以下,注水开发特低渗透油田采油速度在1%左右,而一般低渗油田采油速度在2%以上。③油井产量递减快、产能低。我国低渗透油田的地层能量普遍较低,渗透率低、导压系数小、压力传递慢,油井供液不足、产量递减快,低产井普遍存在。④注水困难。大多数低渗透油田都存在不同程度的注水困难问题,吸水能力差,达不到配注要求,有些层位根本不吸水,存在启动压力。⑤注采工艺、设备滞后。目前,多数油田采用杆式抽油泵,泵效低、抽油系统机械效率低是地层供液不足、供采不平衡的一个重要原因。

特低渗透油田能够开发的主要原因是油藏中存在裂缝,水驱提高采收率的机理主要依靠渗吸作用将基质中的油替换出来进行采油。化学渗吸剂的特殊属性能够在降低毛细管的黏滞力、增强水分子的渗透和扩散力、原油的流动能力等方面发挥独特的作用,可更进一步提高水驱采收率,将成为特低/超低渗透油田开发的重要方法。

自发渗吸采油在我国已有成功的应用,如大庆油田分公司的头台油田茂111井,1996年10月投产一年半时间就因东西向8口油井水淹,日产油由最初的108t,下降到54t(50.2%),含水由12%上升到52%。1996年12月进行注采系统调整,注水井停注,高含水井关井后,渗吸作用起了决定作用,启抽后初期日产油由50t增至56.8t,含水由63%下降到43.6%。至2008年,井区日产油52t,保持了较好的稳产形势。还有四川莲池油田大安寨油藏,孔隙度低于2%、渗透率平均在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以下。1999年7月在莲7井区,渗吸注水投入矿厂试验,采用低速周期注水,其中9口水利井和2口水害井到2005年统计增减产平衡结果时,净增产2618t^[5-7]。

2. 国内技术发展趋势

要解决前述“三低一难”(低速度、低产量、低采收率和注水难)的客观问题,需要对地质特征、储层特征、渗流特征等相关问题,以及开发历史和存在的工程与工艺问题有清楚的认识了解。我国在人工压裂、井网加密、水平井等方面加大了开发力度,解决了大部分可流动油的问题,也取得了较好的效果。但要保持稳定增长的采收率状态,还需要将目光更多地投向特低/超低渗透储层中滞留着的大部分不可流动油和水驱不可及的油区域。强制渗吸是通过利用化学剂的特殊作用和环境因素的改善、强化渗吸过程的一种方法。利用化学剂可以改善岩石润湿性、增强毛细管正向作用力,降低原油在岩石表面的黏附功、克服黏滞力,促进基质与裂缝的渗透与互换,进而提高采收率,是启动不可流动油的有效方法。注入性、能量的补给和注入速度是相辅相成的统一体,注入

性是关键。

对低渗透油气藏未来的攻关方向,要掌握其开采的特点,找到影响低渗透油田开发效果的主要矛盾,有针对性地采取措施,形成配套技术,全力提高油井产量、提高开采速度、提高采收率。尤其应采用现代油藏经营管理模式,多学科协同、统筹规划、分步实施、适时调整,才可能实现低渗透资源开发利用的最大利益化。

3. 国外技术现状

低渗透油田在美国、俄罗斯和加拿大等都有广泛的分布,且小而复杂的低渗透油田的所占的比例越来越大。例如,俄罗斯近几年来在西西伯利亚地区新发现的低渗透、薄层等低效储量已占探明储量的50%以上。国外在低渗透油田开发技术方面主要以室内研究和现场试验为主。如美国运用各种先进技术,发挥地质、地震、测井、试井、压裂增产等多种研究方法,在二次采油中取得不少新认识,但受油价、政治、经济及国家税收等因素的制约,进行工业开采动用的量较少,特别是化学驱技术在1986年后很少有矿场应用。但美国能源部对提高采收率的基础研究仍十分重视,研究项目的80%资金由能源部提供。有关提高采收率(enhanced oil recovery, EOR)的四个方面研究内容中有两个与化学驱相关:①通过诊断和图像系统研究油藏岩石性质和岩石、流体相互作用对采油过程的影响,如研究流体在岩石表面上的黏附或吸附趋势,即润湿性和渗吸对流体通过岩石流动速度的影响;②开发或改善经济有效的采油过程,包括开发廉价的表面活性剂和控制水流动的聚合物的研制。

苏联动用的低渗透油田储层渗透率都在 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上,如喀尔巴阡地区油田储层渗透率平均为 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,十月油田渗透率为 $10 \times 10^{-3} \sim 80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。国外开发的低渗油田中,如大庆外围油田储层渗透率只有 $1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,丰度只有 $10 \times 10^4 \text{t/km}^2$ 的实例很少。但国外在渗吸采油理论方面的研究很多,也取得了很好的认识。包括对渗吸方式、细小孔隙中流体的渗流规律、影响渗吸效率的动力学规律和因素方面的研究都很深入,但认识不尽一致^[8-10]。

4. 国外技术发展趋势

国外油气田开发中形成了以下技术系列:①低渗透油田表征技术;②低渗透油田钻井、完井技术;③油田增产改造技术;④油田保护技术;⑤水平井、多分支井开采技术;⑥注水、注气开采技术;⑦低渗透油田井网优化技术;

1952年, Brownscombe 和 Dyes 提出了渗吸驱油的概念^[11]。美国西得克萨斯的斯普拉伯雷裂缝性砂岩油田、伊拉克的基尔库克裂缝性灰岩油田、卡塔尔的杜汉油田及北海的 Ekofish 油田等都进行过渗吸注水采油,尤其是20世纪80年代中期投入开发的 Ekofish 油田以渗吸物理模拟为依据进行渗吸采油取得了显著的开发效果。但由于渗吸剂种类、数量和经济成本的限制,以及对渗吸方式和渗吸工艺研究的滞后,使渗吸采油技术在国外的工业应用实例较少。但随着化学剂设计理论和日用化学工业的迅猛发展,为低廉环保型高效渗吸剂的应用提供了平台,也为强制渗吸采油技术的应用带来

了新的契机^[12, 13]。

从渗吸内涵上看, 由油水间被动自发渗吸向主动强化的化学渗吸转化; 在渗吸剂的构成上由单一剂类向复合和多功能体系转变; 面向对象由普通低渗向特低/超低渗透油田转变; 渗吸采油方式上由静态自发渗吸向动态的强制渗吸转变, 使渗吸速率大大提高、渗吸效果更为显著。基于“十一五”和“十二五”的研究基础, 在“十三五”及今后一段时期首先解决的部分关键技术如下。

(1) 特低/超低渗透油田影响采收率的主控因素研究。

通过对储层润湿性、渗透率、孔隙度、含油饱和度、裂缝大小及分布、渗吸速率等参数对渗吸效率的影响研究, 初步揭示各参数与渗吸采收率的相关性。为强制渗吸工艺的建立提供依据。

(2) 特低/超低渗透、甚至致密油藏孔隙介质中化学渗吸剂的渗透与扩散动力学研究。

利用微观模型观测毛细管中渗吸剂分子与岩石、油水的作用规律的研究揭示微观渗吸动力学过程; 通过孔喉尺寸、含油饱和度、岩石润湿性变化、油水界面张力等因素揭示渗吸采油的残余油启动规律, 建立启动功判据。

(3) 适用于特低渗透储层的强制渗吸剂体系优化。

针对长庆油田、吉林油田、大庆外围油田、胜利油田、吐哈油田等特低/超低渗透裂缝储层, 优化出具有渗透性好、扩散速度较快, 洗油效率和渗吸效率较高的环保型渗吸剂配方体系。

(4) 适用于特低/超低渗透裂缝性油藏的强制渗吸工艺研究。

结合特低/超低渗透储层的物性特征和孔喉要求, 通过岩心物模实验, 初步建立动态渗吸工艺, 建立适合于特低渗透裂缝性油田的动态渗吸工艺。

(5) 适用于裂缝型低渗油田的数值分析模型的建立及开发方案的编制。结合储层特征及生产动态因素对渗吸过程的影响规律研究, 建立合适的数值分析模型, 进而设计编制开发方案。

5. 我国低渗透油田的特征及开发中的关键问题

(1) 油藏类型单一: 以岩性油气藏和构造油气藏为主。

(2) 储层物性差: 孔隙度小, 渗透率低($0.1 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), 孔喉细小(平均为 $1.12 \mu\text{m}$) [图 1.1(a)], 溶蚀孔发育。

(3) 油层原始含水饱和度高。

(4) 储层敏感性强。

(5) 非均质性严重: 人工和天然(微)裂缝发育, 造成水线推进极不均匀, 水驱波及程度低。

(6) 非达西渗流, 启动压力梯度高[图 1.1(b)], 流度一般小于 $1.0 \text{mD}/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。

解决这些问题的关键取决于毛细管大小和剩余油分布状态, 毛细管越细小, 毛管阻力越大。对于相同润湿的储层, $\cos\theta$ (θ 为润湿角) 相同, 对相同的地层水来说, 在不同粗细的毛细管中毛细管力相差很大, 如表 1.1 计算结果。

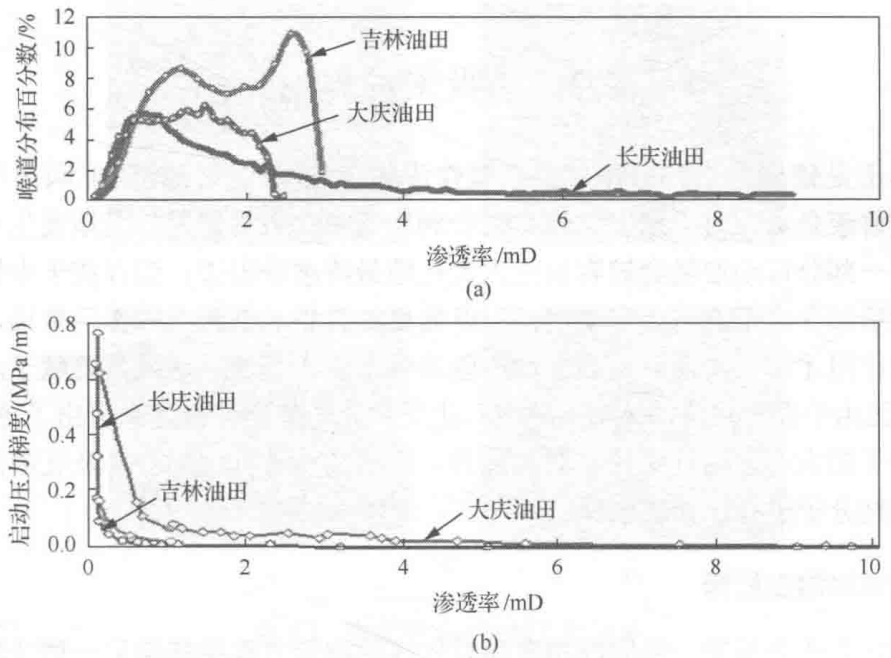


图 1.1 三个低渗油田的喉道分布及启动压力对比

表 1.1 毛细管力随孔隙半径变化的结果

毛管半径/ μm	$P_c = 2\sigma\cos\theta/R_1$	P_c 变化倍数	设定值
R_1	P_{c1}	/	
$10R_1$	$0.1P_{c1}$	1/10	①润湿性为弱油湿, $\cos\theta = \text{定值}$;
$100R_1$	$0.01P_{c1}$	1/100	②因在相同水相中, σ 相同, 设:
$1000R_1$	$0.001P_{c1}$	1/1000	$2\sigma\cos\theta = A$

注: P_{c1} 为对应毛管半径为 R_1 时的毛细管力大小; σ 为体系中油水界面张力, 当润湿角和界面张力一定时; A 是一个固定值。

因此, 对于特低/超低渗透储层的细小或超细孔隙来说, 毛细管力的作用无论是正向或负向, 都是不能忽视的力(表 1.2), 对于超低渗透的裂缝油藏及致密油油藏, 渗吸作用更不可忽视^[14, 15]。

表 1.2 不同渗透率区块的喉道半径对比^[14, 15]

代表区块	类别	渗透率 (K_a)/mD	平均喉道半径/ μm	毛细管力 P_c 倍数
西峰/陇东	超低渗透/特低渗透/低渗透	0.1~1	0.01	>2000
姬塬 6	超低渗透/特低渗透/低渗透	1~10	1	>20
马岭	超低渗透/特低渗透/低渗透	10~50	5	>4
吉林/大庆	中渗透	100~500	15	>1.3
大庆/辽河	高渗透	500 以上	>20	设为 P_0

1.2 渗吸采油理论

渗吸作用是依靠毛细管力作用使润湿性流体自发吸入孔隙排驱非润湿性流体的过程。如果驱替液是水,对于水湿性油藏就会利用毛细管力的作用自发地发生水吸入排驱油的作用,一部分可动油就会较容易进入大孔隙最终被采出来,而存在于中性或油湿性岩石表面的那部分水不能携带和动用;所以需要加强正毛细管力的作用效果,或降低负毛细管力的作用才可以实现启动残余油和驱动残余油的目的。这就需要赋予水分子更多的功能,但又由于孔隙尺度的限制,对注入化学剂分子或驱替液体系提出了更高的要求,如化学剂分子的大小、回旋半径、润湿能力、洗油功能、乳化功能等及孔隙的制约性,需要对化学剂分子进行设计和选择。

1.2.1 渗吸作用微观解释

通常把在多孔介质中一种润湿相流体只依靠毛细管力作用置换另一种非润湿相流体的过程称为渗吸。陈俊宇等^[16]认为毛细管力为渗吸驱油动力之一,毛细管力的表达式为

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (1.1)$$

式中, σ 为界面张力, mN/m; θ 为润湿接触角, ($^\circ$); r 为毛管半径, μm 。由式(1.1)可知,岩石的毛管半径越小,其毛管渗吸驱油动力和效率就越好。但在实际渗吸驱油过程中,渗吸驱油动力能否有效发挥作用,取决于两个条件:①需要克服裂缝系统与基质系统之间的毛细管力末端效应;②毛管半径应大于液膜在岩石固体表面的吸附厚度,因为固体表面的液膜吸附层具有反常的力学性质和很高的抗剪切能力,当孔隙半径等于或小于吸附层厚度时,孔道因液膜吸附层的反常力学特性而成为无效渗流空间,在毛细管力曲线中表现为束缚液相饱和度,毛细管力在这类无效渗流空间中没有实效的驱油价值。在实际应用中,可借助于岩石渗透率与孔隙平均毛管半径来研究孔隙结构对渗吸驱油效率的影响关系,二者的关系如式(1.2)所示:

$$K = \frac{\phi r^2}{8\tau^2} \quad (1.2)$$

式中, K 为渗透率; ϕ 为孔隙度; τ 为孔道迂曲度。

图 1.2(a)和图 1.2(b)为微观驱油过程中的几个典型瞬间^[17]。图 1.2(a)是水驱结束后注入润湿性反转剂初期,润湿性反转剂沿壁面流动,将油膜缓慢剥离,油膜渐渐变薄,此时主要体现了润湿性反转剂吸附于岩石表面的过程。图 1.2(b)显示出油膜变薄的结果,而且发现油膜被剥离后,在孔道轴心处形成油丝或油带向前运移;随着驱替的进行,油膜渐渐变少,润湿性反转剂占据了孔道表面,岩石表面的润湿性逐渐改变。图 1.2(c)、图 1.2(d)为驱替结束后的图片,残余油呈柱状或珠状,说明岩石表面的润湿性已由亲油变为亲水或中性,达到了改变岩石表面润湿性的目的。试验直观反映了润湿性反转剂作用前后的油水渗流过程。注入润湿性反转剂之前,原油主要沿孔道壁面流动,注入水占

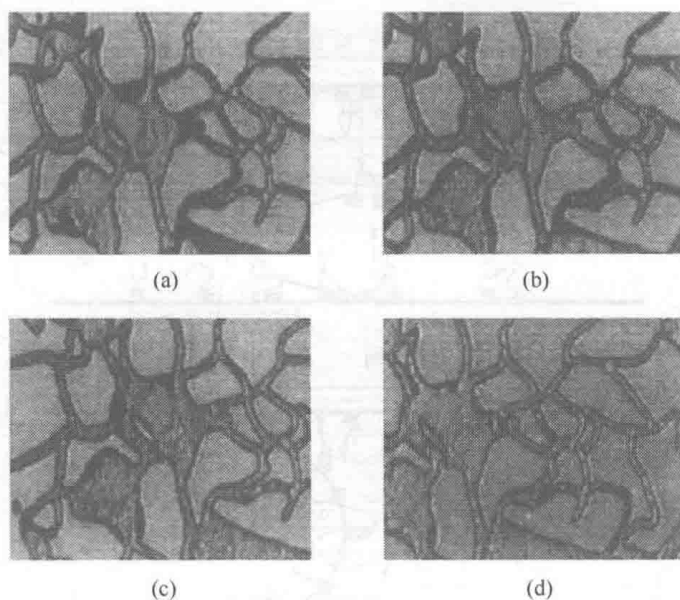


图 1.2 微观驱油过程的几种结果

据孔道轴心位置,原油逐渐被注入水驱替出来。随着原油越来越少,附着在孔道壁面的油膜越来越薄,其流动阻力也越来越大,至最后剩余一层油膜附着在岩石壁上驱不出来,一些小孔道中的原油甚至没有被驱动。注入润湿性反转剂后,润湿性反转剂使油水界面张力减小,油膜变薄,而润湿性反转剂在孔道壁上的吸附,使壁面的亲油性逐渐变弱,油膜在壁面上吸附力减小,当驱替力足够大时,油膜就被剥离下来,而小孔道则会由于润湿性的改变而产生自动渗吸,驱替液进入小孔道中将原油驱替出来,剥离和驱替出来的原油在大孔道中流动时,在孔道的轴心处形成油桥,渗流阻力大大降低,如此不断作用,孔道壁面的亲水性变强,残余油逐渐被驱替出来。

Karpyn 等^[18]研究在毛细管驱替作用下不均匀裂缝地层中的流动机理。使用人工纵向裂缝的层状 Berea 砂岩样品,发现有三种不同的流动阶段:前期、中期和后期渗吸。在渗吸前期,岩石结构中岩层平面的存在能影响渗吸前期渗吸前沿的形状。在渗吸中期,层间的流体交换趋于将渗吸前沿变平,在渗吸前期和中期,反向流动控制着流体的运输,局部排驱和局部渗吸区域在反向流动时共存。在后期同向和反向流动机理共存。

Baldwin 和 Spinler^[19]通过对水湿性的白垩岩心的渗吸研究发现存在两种可能的同向水流动机理:在初始水饱和度低时,可能的机理是局部毛细管力的作用;在初始水饱和度高时,可能的机理是岩石表面的水膜的厚度增加,导致连接更好并且减小了水流动的阻力;当处于中等水饱和度时,两种机理同时起作用。

Standnes 和 Austad^[20]用油湿性白垩岩心,Alehi 等^[21]用砂岩讨论了阳离子和阴离子表面活性剂的渗吸机理。阳离子表面活性剂渗吸机理首先是岩石表面负电荷的有机物质的解吸附,其次是毛细管力作用下的水的渗吸;阴离子表面活性剂渗吸机理是疏水的表面活性剂头与疏水的岩石表面形成了双层(double layer),这种疏水键很弱,因而这是一种完全可逆的润湿性转变,另外,加入其他种类的阴离子表面活性剂使水无法发生渗吸,进而证实了EO(乙氧基)基团对渗吸机理有着十分重要的作用(图 1.3)。