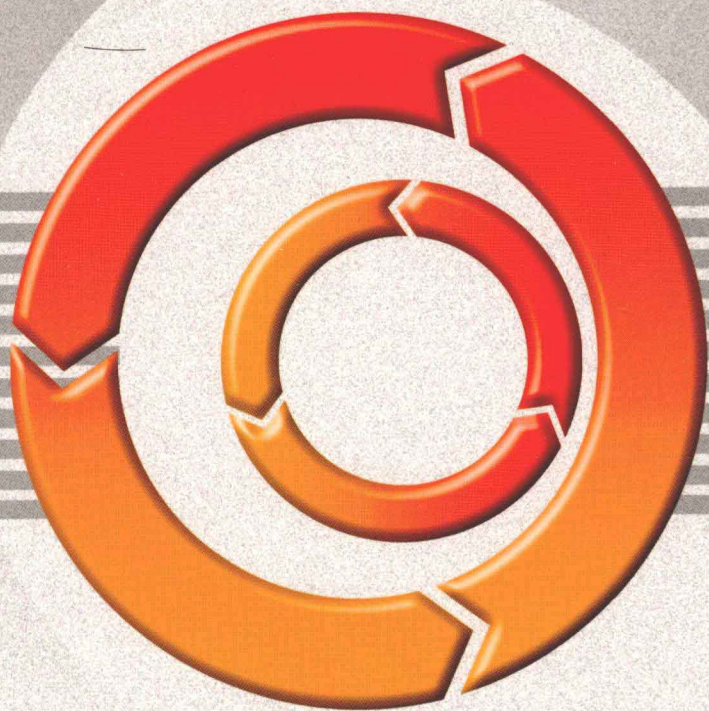


油藏物理模拟

YOU CANG WULI MONI

王家禄 等著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书论述了两个方面的内容,一是油藏物理模拟的基础部分,包括油藏物理模拟相似理论、油藏物理模拟制作技术、油藏物理模拟新技术;二是油藏物理模拟研究成果,包括三元复合驱油藏物理模拟、水平井开采的油藏物理模拟、聚合物驱与凝胶调驱油藏物理模拟。

本书可供从事油田开发的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油藏物理模拟/王家禄等著.

北京:石油工业出版社,2010.02

ISBN 978-7-5021-7613-6

- I. 油…
- II. 王…
- III. 油藏-物理模拟
- IV. TE311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 021436 号

油藏物理模拟

王家禄 等著

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523536 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:15

字数:382 千字 印数:1—1000 册

定价:60.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

近年来,油藏数值模拟技术取得了显著的进步,在油田开发中发挥着重要作用。但是,随着各种类型油藏的开发,在开发过程中遇到的问题越来越复杂,使得提高石油采收率工作的难度也越来越大,这些问题仅依靠数值模拟研究是不能解决的,需要开展复杂条件下的油藏物理模拟研究,研究油藏开采机理和提高石油采收率的新方法,为油田高效开发提供实验和理论依据。

随着科学技术的进步,研究手段更加多样化,高科技手段的应用是近年来油藏物理模拟实验技术的重要标志。油藏物理模拟的重点从静态转向动态、从定性转向定量,研究工具从物理实验为主逐渐转为物理、化学、数学及计算机等多种手段相结合,无损检测技术[如应用计算机 X 射线层析摄影技术(CT)和核磁共振技术(NMRI)]已经应用到了油藏物理模拟研究领域。

本书主要是总结作者近年来在油藏物理模拟研究方面的一些成果,包括承担国家重点基础研究发展规划项目“大幅度提高石油采收率的基础研究”和“化学驱与微生物驱提高石油采收率的基础研究”的研究成果、“九五”国家科技攻关项目“高凝油侧钻水平井开采机理及优化设计研究”的研究成果、“油层物理与渗流力学重点实验室”的研究成果、中国石油天然气集团公司科技攻关项目及油田科技服务项目的研究成果。全书共分 7 章,涵盖两个方面的内容:油藏物理模拟的基础部分,包括油藏物理模拟相似理论、油藏物理模拟制作技术、油藏物理模拟新技术;油藏物理模拟研究成果,包括三元复合驱油藏物理模拟、水平井开采的油藏物理模拟、聚合物驱与凝胶调驱油藏物理模拟。

参与本书研究工作的还有中国石油勘探开发研究院秦积舜教授、张祖波高级工程师、田玉玲高级工程师、江如意高级工程师、贾旭高级工程师,大庆油田勘探开发研究院杨清彦高级工程师,胜利油田地质研究院王建高级工程师,西南石油学院孙良田教授。感谢首席科学家沈平平教授和袁士义院士对本书研究工作的指导。还有许多其他参与和关心本书的同志,在此一并表示谢意。

由于油藏物理模拟研究涉及的范围比较宽,内容也比较多,本书仅介绍了作者自己近年来的研究成果,还有许多其他人的研究成果在本书中没有涉及,并且随着科学技术进步,油藏物理模拟技术也在不断发展。因此,希望通过本书与同行专家进行交流,进一步发展我国的油藏物理模拟方法和技术。由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,希望读者批评指正。

作 者

2010 年 2 月于北京

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 油藏物理模拟的意义	(1)
1.2 油藏物理模拟与数值模拟	(1)
1.2.1 物理模拟	(1)
1.2.2 数值模拟	(2)
1.2.3 物理模拟和数值模拟的关系	(2)
1.3 国内外油藏物理模拟研究进展	(3)
参考文献	(5)
第2章 油藏物理模拟相似理论	(6)
2.1 相似理论	(6)
2.1.1 相似方法	(6)
2.1.2 相似模型	(6)
2.1.3 相似定理	(7)
2.1.4 油藏物理模拟相似理论简介	(8)
2.2 相似准则推导方法	(8)
2.2.1 方程分析方法	(8)
2.2.2 量纲分析方法	(8)
2.2.3 方程分析方法与量纲分析方法的比较	(8)
2.3 油藏物理模拟相似理论研究进展	(9)
2.3.1 水驱相似准则	(9)
2.3.2 火烧油藏相似准则	(9)
2.3.3 蒸汽吞吐相似准则	(9)
2.3.4 非混相二氧化碳驱相似准则	(9)
2.3.5 化学驱相似准则	(9)
2.3.6 混相驱相似准则	(10)
2.3.7 蒸汽驱相似准则	(10)
2.3.8 水平井开采相似准则	(10)
2.4 水驱油藏物理模拟相似准则推导	(11)
2.4.1 描述多孔介质的流体流动方程	(11)
2.4.2 基本量的守恒方程	(11)

2.4.3	单组分流体的物性	(11)
2.4.4	各组分流体的相互影响	(11)
2.4.5	多孔介质中流动方程组讨论	(11)
2.4.6	边界条件和初始条件	(12)
2.4.7	用方程分析方法推导无量纲相似准数	(13)
2.4.8	用相似模型比例模拟油藏的可行性讨论	(15)
2.5	聚合物驱油藏物理模拟相似准则	(16)
2.5.1	聚合物在多孔介质中的流动机理	(16)
2.5.2	聚合物驱的流动方程	(16)
2.5.3	聚合物驱油藏物理模拟的相似准则	(19)
2.5.4	聚合物驱油藏物理模拟相似准则应用	(22)
2.6	三元复合驱油藏物理模拟相似准则	(25)
2.6.1	三元复合驱的驱油机理与重要物理化学现象	(25)
2.6.2	三元复合驱的流动方程组	(25)
2.6.3	流动方程组的无量纲化及相似准则推导	(26)
2.6.4	三元复合驱的相似准则	(30)
2.7	水平井开采的油藏物理模拟相似准则	(33)
2.7.1	水平井开采的油藏物理模拟相似准则	(33)
2.7.2	油藏物理模拟原型介绍	(35)
2.7.3	模型按比例设计	(35)
	符号说明	(39)
	参考文献	(40)
第3章	油藏物理模型制作技术	(42)
3.1	微观物理模型制作技术	(42)
3.1.1	微观刻蚀模型制作技术	(42)
3.1.2	微观填砂模型制作技术	(46)
3.2	烧结物理模型制作技术	(48)
3.2.1	人造模型研制的发展过程	(48)
3.2.2	人造模型制作方法的选择	(48)
3.2.3	烧结模型制作技术	(50)
3.3	胶结物理模型制作技术	(56)
3.3.1	模型渗透率控制方法	(56)
3.3.2	模型孔隙度控制方法	(57)
3.3.3	模型润湿性控制方法	(58)

3.3.4	模型孔隙结构控制方法	(58)
3.4	填砂物理模型制作技术	(59)
3.4.1	填砂物理模型结构	(59)
3.4.2	石英砂配比	(59)
3.4.3	装填模型	(60)
	参考文献	(60)
第4章	油藏物理模拟新技术	(61)
4.1	三维油藏物理模拟饱和度测量技术	(61)
4.1.1	饱和度测量探针的研制	(61)
4.1.2	饱和度测量实验研究	(64)
4.1.3	理论计算端面饱和度与出口位置实测饱和度对比	(67)
4.1.4	一维模型三元复合驱饱和度测量实验	(71)
4.2	高温、高压三维油藏物理模拟系统	(73)
4.2.1	实验模型	(74)
4.2.2	驱动系统	(74)
4.2.3	加热保温系统	(75)
4.2.4	压力控制系统	(75)
4.2.5	油、气、水三相流量测量系统	(76)
4.2.6	测量与控制系统	(79)
4.2.7	测量控制系统软件	(81)
4.2.8	三维油藏物理模拟渗流场动态可视化技术	(82)
4.3	高温、高压微观物理模拟实验装置	(82)
4.3.1	微观物理模型实验装置构成	(82)
4.3.2	微观物理模拟的实验步骤	(84)
4.3.3	微观物理模型在油藏物理模拟中的应用	(84)
4.4	CT技术在油藏物理模拟中的应用	(87)
4.4.1	CT技术概述	(87)
4.4.2	CT测量原理	(87)
4.4.3	CT扫描系统	(89)
4.4.4	CT扫描系统在油藏开发中的应用	(90)
4.4.5	应用CT技术研究岩石孔隙变化特征	(93)
4.5	核磁共振技术在油藏物理模拟中的应用	(103)
4.5.1	核磁共振技术的基础原理	(103)
4.5.2	核磁共振技术的石油应用原理	(104)

4.5.3	聚合物驱油藏物理模拟核磁共振成像研究	(107)
	参考文献	(110)
第5章	三元复合驱油藏物理模拟	(111)
5.1	三元复合驱微观驱油机理物理模拟	(111)
5.1.1	实验装置与实验方法	(111)
5.1.2	柱状残余油的驱替机理	(113)
5.1.3	簇状残余油的驱替机理	(114)
5.1.4	膜状残余油的驱替机理	(114)
5.1.5	孤岛状残余油的驱替机理	(116)
5.1.6	“油墙”的形成有利于提高驱油效率	(117)
5.2	三元复合驱一维物理模拟	(119)
5.2.1	实验装置与实验方法	(119)
5.2.2	开采效果分析	(119)
5.2.3	三元复合驱提高波及效率与提高驱油效率分析	(121)
5.3	三元复合驱二维可视化物理模拟	(123)
5.3.1	实验装置与实验方法	(123)
5.3.2	纵向非均质模型实验结果	(124)
5.3.3	平面非均质模型实验结果	(126)
5.4	三元复合驱层间非均质剖面模型油藏物理模拟	(127)
5.4.1	实验装置与实验方法	(127)
5.4.2	开采效果分析	(128)
5.4.3	压力场变化	(131)
5.4.4	饱和度场变化	(134)
5.4.5	开采效果与渗流场变化对比分析	(138)
5.5	三元复合驱纵向非均质三维油藏物理模拟	(138)
5.5.1	实验装置与实验方法	(138)
5.5.2	开采效果分析	(139)
5.5.3	压力场变化	(139)
5.5.4	饱和度场变化	(142)
5.6	三元复合驱三维非均质有隔层油藏物理模拟	(144)
5.6.1	实验装置与实验方法	(144)
5.6.2	开采效果分析	(145)
5.6.3	饱和度场变化	(147)
5.7	三元复合驱三维非均质无隔层油藏物理模拟	(148)

5.7.1	实验装置与实验方法	(148)
5.7.2	开采效果分析	(149)
5.7.3	饱和度场变化	(149)
5.8	三元复合驱化学剂浓度变化的实验研究	(151)
5.8.1	实验装置与实验方法	(152)
5.8.2	实验结果及分析	(154)
	参考文献	(161)
第6章	水平井开采油藏物理模拟	(162)
6.1	高温、高压水平井三维物理模拟系统	(162)
6.1.1	实验装置介绍	(162)
6.1.2	水平井三维物理模拟误差分析	(164)
6.1.3	水平井三维物理模拟系统主要功能	(164)
6.2	侧钻水平井开采的油藏物理模拟	(165)
6.2.1	模型设计	(165)
6.2.2	实验方法	(166)
6.2.3	直井开采效果变化	(167)
6.2.4	侧钻水平井对开采效果的影响	(168)
6.2.5	侧钻水平井开采的压力场变化	(171)
6.3	水平井开采三维物理模拟实验研究	(175)
6.3.1	模型设计	(175)
6.3.2	水平井注、水平井采的开采效果变化	(176)
6.3.3	直井注、水平井采的开采效果变化	(177)
6.3.4	直井注、水平井采和水平井注、直井采的开采效果对比分析	(179)
6.3.5	直井注、直井采和直井注、水平井采的开采效果对比分析	(179)
6.3.6	直井注、直井采和水平井注、直井采的开采效果对比分析	(180)
6.3.7	直井注、直井采和水平井注、水平井采的开采效果对比分析	(181)
6.3.8	水平井开采的压力场变化	(182)
6.4	水平井开采的二维可视化油藏物理模拟	(183)
6.4.1	实验装置与实验方法	(184)
6.4.2	水平井的水脊形成与发展	(184)
6.4.3	水平井见水时间与含水率的变化	(185)
6.4.4	水平井采收率的变化	(187)
	参考文献	(188)

第7章 聚合物驱与凝胶驱油藏物理模拟	(189)
7.1 聚合物驱纵向非均质三维油藏物理模拟	(189)
7.1.1 实验装置与实验方法	(189)
7.1.2 开采效果分析	(190)
7.1.3 压力场变化	(190)
7.1.4 饱和度场变化	(192)
7.2 聚合物驱三维非均质有隔层油藏物理模拟	(194)
7.2.1 实验装置与实验方法	(194)
7.2.2 开采效果分析	(195)
7.2.3 饱和度场变化	(197)
7.3 新型耐温抗盐聚合物驱非均质油藏物理模拟	(199)
7.3.1 实验装置与实验方法	(199)
7.3.2 开采效果分析	(201)
7.3.3 压力场变化	(202)
7.3.4 产出液聚合物浓度变化	(203)
7.3.5 模型内聚合物滞留量分布	(207)
7.3.6 实验结果分析与讨论	(208)
7.4 流动凝胶纵向非均质物理模拟	(208)
7.4.1 实验装置与实验方法	(208)
7.4.2 开采效果分析	(209)
7.4.3 压力场变化	(210)
7.5 交联聚合物封堵平面非均质油藏物理模拟	(215)
7.5.1 实验装置与实验方法	(215)
7.5.2 开采效果分析	(216)
7.5.3 压力场变化	(218)
7.6 调剖后弱凝胶驱三维油藏物理模拟	(220)
7.6.1 实验装置与实验方法	(221)
7.6.2 开采效果分析	(223)
7.6.3 压力场变化	(226)
参考文献	(230)

第1章 绪 论

随着各种类型油藏开发遇到的问题越来越复杂,提高石油采收率工作的难度也越来越大,需要开展复杂条件下的油藏物理模拟研究,研究油藏开采机理和提高采收率的新方法,为油田高效开发提供实验和理论依据。同时,随着科学技术的进步,研究手段更加多样化,油藏物理模拟的重点从定性转向定量,研究工具从物理实验为主逐渐转为物理、化学、数学及计算机等多种手段相结合,计算机 X 射线层析摄影技术(CT)和核磁共振技术(NMRI)也已经应用到了油藏物理模拟研究领域。本章主要讨论油藏物理模拟的意义、油藏物理模拟和数值模拟的关系,以及油藏物理模拟研究的进展。

1.1 油藏物理模拟的意义

油藏工程研究的根本任务是为油田提供最佳的开采方法。首先,提供油藏开发所需要的数据、资料,例如储层的基础数据和资料,包括岩石的粒度组成、矿物组成和胶结物的化学成分;岩石的孔隙度、渗透率、饱和度;岩石的压缩性、毛管力、润湿性等;油、气和水的化学成分和物理性质。其次,观察与开采有关的各种物理化学现象,研究这些现象的机理,进一步建立描述这些现象的方程和求解方法,例如模拟各种驱替现象和分析研究机理。第三,制定开发技术政策、研究各种开发方案,预测开发前景,进行方案的筛选和优化,开展先导试验,最终推广到油田开发应用。这三方面任务是相互关联的,前项任务是后项任务的基础,目的是完成最后的任务,提供经济、高效的开发方案。

通过对上述油藏工程三方面研究任务的分析可以看出,油藏物理模拟扮演着重要的角色。可以说油藏工程研究的每一步都离不开它,概括地说就是:物理模拟直接服务于基本数据测量,服务于基本现象观察和机理研究,服务于开发方案的试验和优选。

近年来,各种油藏开发中碰到的问题越来越困难,越来越复杂。面对这些问题,油藏工程研究如何回答?著名的油藏工程学者 Redford(1987)提出了现代油藏工程研究必须解决和满足3个主要需求:第一,开创性研究的需要——产生崭新的开采概念,并对它们进行评价;第二,发展先进能力的需要——保持先进的技术能持续发展,使之能够系统、积极地评价从实验室到油田的复杂开采方法;第三,对油田出现的问题迅速作出反应,并应用先进的技术手段迅速解决需要。由于油藏的勘探、开发成本不断上升和提高采收率工作的难度加大,开展复杂条件下油藏物理模拟研究的意义是不言而喻的。

1.2 油藏物理模拟与数值模拟

1.2.1 物理模拟

油藏物理模拟可以分为“基本机理模拟”和“按比例相似模拟”两种。基本机理模拟是用实际(模拟)油藏岩石和流体进行实验,模拟油藏的一个单元或一个过程,可以不按比例或部

分按比例进行机理实验。基本机理模拟研究对于理解一些油藏开采机理起着重要作用。基本机理模拟研究结果不能直接用于油田,但是可以通过数值模拟扩展到油田开发方案设计和开采前景预测。

按比例相似模拟的物理模型是根据相似原理设计出来的。在模型设计、实验操作、数据处理,以及用实验结果来解释油藏原型等各个研究阶段都离不开相似理论指导。按比例相似物理模型与油田原型之间,油藏大小、流体性质和岩石物性都按比例给定,不同力的比例在油藏原型和物理模型中是相同的。按比例相似模拟的结果可以直接用于油田。但是,要达到全部按比例模拟是不可能的,使所要研究的重要现象按比例模拟就行了。

1.2.2 数值模拟

油藏数值模拟是根据达西定律,以及相关的物理化学定律进行数值计算,研究油藏内流体流动特征。进行油藏数值模拟研究时,将油藏分成许多网格块,在每一个网格块上应用多孔介质基本流动方程,对油藏进行详细的研究。

油藏数值模拟在油田开采领域中可以解决大量复杂的油藏工程问题,如油层的各向异性及非均质性,重力、毛管力、黏性力、弹性力等各种作用力,多相、多组分间的相平衡问题,注蒸汽、火烧油层、化学驱、混相注气等物理化学过程,裂缝及气顶底水等复杂油藏问题,在水平井、多分枝井及三次采油等新的开采技术应用中都得到广泛的应用。

油藏数值模拟是油田开发方案和调整方案编制、动态预测等油藏管理的重要技术手段和基本工具,从某种意义上说,油藏数值模拟是现代油藏开发必不可少的重要手段之一。近年来由于计算机的高速发展,油藏数值模拟技术,特别是计算方法、程序设计及计算结果的图像处理等方面都取得了长足的进步,因此油藏数值模拟在现代油藏开发管理中正发挥着越来越重要的作用。

1.2.3 物理模拟和数值模拟的关系

物理模拟研究是数值模拟研究的基础,所有的数学模型都是通过物理模型建立起来的,特别是准备采用一种新的生产方式时,物理机理还不清楚或尚不肯定时,必须用物理模型去研究它。但是实际油田十分复杂,影响的因素非常多,在同一个物理模型中要严格满足多个相似准则是非常困难的,甚至是不可能的。数学模型虽然理论上很严格,技术上很完善,但实际问题太复杂,数学模型总要进行一些简化和假设。再加上油层深埋地下,各种参数都不能取得很准确,计算结果完全与油田实际结果相吻合是不可能的。

物理模拟和数值模拟各有其特点。物理模拟除了能与数值模拟方法一样,对机理已经很清楚的物理过程进行研究外,更擅长于对机理还不清楚的各种现象进行研究,寻找规律性和普遍性。反之,数值模拟由于以数学方程为基础,可以比较方便地观察各种参数对结果的影响,进行不同现象结果的对比,指出哪一些参数是重要的,哪些参数是不重要的。数值模拟的优点是它能够模拟实际生产过程,可以代替复杂的数学计算和物理模拟试验。

物理模拟和数值模拟是相辅相成的关系。物理模拟研究能观察到新现象、发展新方法和探索新理论。如果数值模拟研究被物理模拟研究所验证,能够很容易地应用到油田实际生产中去,数值模拟还能够帮助物理模拟设计物理模型。

1.3 国内外油藏物理模拟研究进展

通常把达西实验(1856)作为最早的渗流物理模拟实验。Leverett 等人(1942)较早地进行了反映油水两相驱替特征的水驱油藏物理模拟研究;随后 Engelberts 和 Klinkenberg 等人(1951),Rapoport(1951,1955),Croes 和 Schwarz 等人(1955),Geertsma 等人(1956)从理论和研究方法上对水驱油藏的物理模拟进行了补充和完善。他们的研究结果为后期的油藏物理模拟研究奠定了理论和方法基础。

随着油气田开发类型的增加和油气田开发技术的发展,油藏物理模拟研究不断深入。Greenkorn 等人(1965)首先进行了描述非等温条件下单相混相驱的物理模拟研究。Binder 等人(1967)进行了火烧油层的物理模拟研究,考虑了单相气体流动和传导换热,干式燃烧实验结果与 3 个主要矿场试验结果非常一致。Niko 和 Troost(1971)进行了蒸汽吞吐的物理模拟研究,使用了一个与孔隙介质相串联的水力模拟容器,巧妙地解决了模拟油的可压缩性难题,这个实验成功地模拟了油田的开采效果。Rojas(1986)进行了非混相 CO_2 驱的油藏物理模拟研究,在比例模型上进行了实验,使用 Alberfeldy - Lloydminster 稠油,找出一种最佳开采方式(用最少的 CO_2 ,得到最高的采收率)。Shen 等人(1988)在高压三维比例模型上进行了注蒸汽实验,研究了产出井射孔位置、注入低干度蒸汽、注热量逐渐减少及添加氮气等开采方式对提高采收率的影响。

Bulter(1981)应用三维比例模型进行了水平井开采稠油的物理模拟研究,在油藏底部一上、一下钻两口平行的水平井,上井为注汽井,下井为产油井。注入的蒸汽向上移动,形成一个蒸汽腔,蒸汽在腔的边缘上凝结,并将热量传给稠油。一个加热了的薄油层沿着腔的边界泄入下面的生产井。随着时间的推移,蒸汽腔不断向上和向旁边扩大,直到达油藏顶部。最后当大部分油采出的时候,生产井发生蒸汽突破,这就是蒸汽辅助重力泄油的概念。通过对油藏内温度场和压力场测量,观察了蒸汽腔的形成、发育以及最终在产出井出现蒸汽突破的现象。

Islam 和 Furuq Ali(1987)进行了包括聚合物驱、乳状液驱和泡沫驱的物理模拟研究,仅进行了非比例模拟实验,定量的实验结果还不能用于油田,只能用于确定各种主要机理的作用,为推导按比例模拟的相似准则提供数据。

我国油藏物理模拟实验经历了从无到有、从单一学科到多学科相结合的发展历程,为解决生产难题和重大科研课题研究作出了重要贡献。

在 20 世纪 50 年代,通过引进苏联的实验设备和技术,初步建成了油藏物理模拟实验室和师资队伍,在培养我国石油工程技术人才方面发挥了重要的作用。20 世纪的 50 年代后期至 60 年代中期,以玉门油田为基地,开展了提高采收率的驱油机理研究,例如火烧油层、稠化水驱、活性水驱等的物理模拟实验研究。随着大庆油田和胜利油田的发现和投入开发,进行了大量的水驱油机理的物理模拟研究,为我国陆上油田的开发积累了宝贵的经验。沈平平(1978)系统地进行了水驱油藏物理模拟相似理论、反韵律亲水厚油层和正韵律亲油厚油层的油水运动规律物理模拟研究。推导出了实验室内物理模拟需要满足的相似准数,提出了重力和毛管力比值,驱动力与毛管力比值是水驱油过程中必须要满足的力学相似准数。观察到渗透率是影响油水运动的基础,是控制因素,单层渗透率大小、级差、韵律组合形式均对采收率有较大的影响。毛管力和重力作用扩大了水淹厚度,重力作用在岩石是亲水时能够更好地发挥出来。

20 世纪 80 年代,中国石油勘探开发研究院应用高温、高压三维比例模型对我国各油田的稠油区块进行了模拟研究。进行了水平井蒸汽驱、蒸汽辅助重力泄油、热流体环空加热蒸汽驱、一口直井注汽两口水平井采油的物理模拟研究。研究表明:水平井蒸汽驱有明显的优势,由于水平井与油层接触面积较大,克服了直井蒸汽驱所存在的严重蒸汽超覆现象,蒸汽带在纵向上和平面上的波及系数有大幅度的提高。

清华大学核能技术研究院与新疆油田采油工艺研究所(1985)应用真空三维比例模型,对新疆的稠油区块进行了物理模拟研究,先后进行了蒸汽辅助重力泄油、单相汽驱和双向汽驱 3 种方式,有直井对、水平井对和直井—水平井组合 6 种方式共 58 次注汽模拟实验。实验结果观察到:直井注汽蒸汽辅助重力泄油转直井注汽—水平井采油蒸汽驱比较适合新疆稠油区块的开发,在蒸汽可注入性较好或蒸汽吞吐能够有效加热的油层中,采用直井注汽—水平井采油可以获得较好的开发效果。

20 世纪 90 年代,由于水平井开采技术发展的需要,中国石油勘探开发研究院与美国德士古石油公司合作建立了高温、高压水平井开采三维物理模拟系统(1999),该系统主要研究水平井在油藏条件下(高温、高压)提高石油采收率和油井产能的流动机理和规律。根据水平井开采物理模拟的相似准则设计了物理模型,先后对辽河油田侧钻水平井开采和塔里木油田水平井开采进行了三维物理模拟研究。观察到了由于侧钻水平井改变了油藏渗流压力场,使油藏内流体改变了流动方向,原来死油区内不流动的流体向水平井方向流动,开采出了死油区内的剩余油,提高了原油采收率。

21 世纪初,为了更深入地研究复杂驱动体系提高采收率技术基础理论,中国石油勘探开发研究院建立了“高温、高压复杂驱动体系三维油藏物理模拟系统”(2004)。三维油藏物理模拟系统指的是根据相似原理将油田现场按相似比例设计实验模型,在模拟油藏温度和压力下借助于现代科学技术最新成果,如计算机技术、先进的传感技术、图像处理技术、自动控制技术等,在三维模型上进行复杂驱动体系的物理模拟实验研究。通过物理模拟研究,可以得到聚合物驱和化学复合驱的不同驱替过程对开采效果的影响,同时获得不同类型油藏(如均质、平面非均质、纵向非均质)的三维流场在不同的驱替过程中随时间的变化,通过三维图像处理技术能够非常清楚地研究复杂驱动体系的流动机理和开采效果。高温、高压复杂驱动体系三维油藏物理模拟系统建成将在油藏条件下研究复杂驱动体系渗流机理,为我国大幅度提高石油采收率的研究和应用做出重要贡献。

高科技手段的应用是近年来油藏物理模拟实验技术的重要标志。例如应用计算机 X 射线层析摄影技术(CT)快速、无损地给出岩心样品的孔隙度等物性参数的三维分布,确定岩石类型、层序、层理、孔隙类型、沉积结构、岩性非均质、渗透率变化。应用 CT 进行岩心驱替试验和提高采收率研究,定量测量岩心在驱替过程中饱和度的变化和多相流动过程。

核磁共振技术(NMRI)通过检测流体(油、气、水等)中的氢核(^1H)在磁场中的共振特性,能够检测岩石内的流体量以及流体与岩石表面之间相互作用力的强弱。采用该项技术可以方便地获取不同类型驱油过程(水驱、化学驱等)中任何时刻的油、水分布状况,而且其监测分辨率可以达到很高的水平(微米级)。例如,可将实验岩心分成很多 $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 的正方体小体元(Voxel),然后在小体元基础上研究驱替过程中油、水及化学剂的变化情况。这种高精度的研究方法将极大地增强我们对水驱和化学驱过程的认识。

参考文献

- 黄瑞瑶,易敏,孙良田等. 1999. 用工业 CT 技术测量储层岩心饱和度分布. 西南石油学院学报,21(2):25-28
- 江如意,王家禄,蒋志祥. 1999. 高温、高压三维水平井物理模拟系统. 石油勘探与开发,26(6):99-101
- 沈平平. 2000. 油水在多孔介质中的运动理论和实践. 北京:石油工业出版社
- 王家禄,江如意,蒋志祥等. 2000. 侧钻水平井开采剩余油的三维物理模拟研究. 石油学报,21(6):50-57
- 周惠忠,查美生,徐元辉等. 1988. 用真空模型研究稠油蒸汽驱开采. 石油学报,9(4)
- 周惠忠,王利群. 1994. 二维油藏物理模拟装置. 清华大学学报,34(3):74-82
- Aziz, Khalid, Settari, Antonin. 2002. Petroleum Reservoir Simulation. Blitzprint Ltd, Canada
- Binder, G G, Elzinga, E R, Tarmy, B L, et al. 1967. Scaled-Model Tests of in Situ Combustion in Massive Unconsolidated Sands. Proc 7th World Pet Congr, Mexico City
- Bulter, R M, Stephene, D J. 1981. The Gravity Drainage of Steam-heated Heavy Oil to Parallel Horizontal Wells. J Canadian Pet Tech, April-June:90-96
- Croos, G A. Schwarz, N. 1955. Dimensionally Scaled Experiments and the Theories on the Water-drive Process. Trans AIME, Vol 204:139-198
- Darcy, Henry. 1856. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Victor Dalmont, Paris
- Doan, Q, Farouq Ali, S M, Georg, A E. 1990. Scaling Criteria and Model Experiments for Horizontal Wells. International Technical Meeting Jointly Hosted by the Petroleum Society of CIM and the SPE in Calgary, June, CIM/SPE:90-128
- Engelberts, W F, Klinkenberg, L J Proc. 1951. Third World Petr. Congress, The Hague, Section II, 544
- Geertsma, J, Croos, G A, Schwarz, N. 1956. Theory of Dimensionally Scaled Models of Petroleum Reservoirs. Trans AIME, Vol 207:118-127
- Greenkorn, R A, Johnson, X R, Haring, R E. 1965. Miscible Displacement in a Controlled Natural System. J Pet Tech, Nov:1329-1335
- Islam, M R, Farouq Ali, S M. 1987. New Scaling Criteria for Polymer, Emulsion and Foam Flooding Experiments. Paper CIM 87-38-76, Presented at the 38th Annual Tech Meeting of the PS of the CIM held in Calgary, June
- Leverett, M C, Lewis, W B, True, M E. 1942. Dimensional-model Studies of Oil-field Behavior. Trans, AIME, Vol 146:175-193
- Niko, H, Troost, P J P M. 1971. Experimental Investigation of the Steam Soak Process in a Depletion-type Reservoir. J Pet Tech, Aug:1006-1014
- Rapoport, L A. 1951. Dimensional Analysis and Theory of Models. John Wiley & Sons, New York
- Rapoport, L A. 1953. Scaling Laws for Use in Design and Operation of Water-oil Flow Models. Trans, AIME Vol 204:139-198
- Redford, D A, Heidrick, T, Prows, D R. 1997. The Role of Reservoir Engineering Research. China-Canada Heavy Oil Technology Symposium Proceedings, Zhuozou, China, Oct.
- Rojas, G A, Farouq Ali, K M. 1986. Scaled Model Studies of Carbon Dioxide/Brine Injection Strategies for Heavy Oil Recovery.
- Shen C W. 1988. Application of a Scaled Three-dimensional High-pressure Physical Model to Steamflooding. 7th Annual Convention of the Proceeding Indonesian Petroleum Association, October, IPA88-21. 05

第2章 油藏物理模拟相似理论

相似理论是油藏物理模拟的理论基础。应用相似理论可以指导物理模型设计、实验操作、数据处理,以及用实验结果解释油田现场的生产结果。本章主要回顾国内外关于不同提高石油采收率方法的油藏物理模拟相似准则研究的进展,着重介绍水驱油藏物理模拟相似准则和推导方法,讨论聚合物驱、三元复合驱和水平井开采的流动机理和相似准则,以及相似准则在油藏物理模拟中的应用。

2.1 相似理论

2.1.1 相似方法

相似的概念最初产生于几何学中(图2-1),几何相似是各种物理现象的基础。人们在探索自然规律的过程中,用几何学作指导,已经建立了一种研究自然界和工程技术中相似现象的新方法——相似方法。

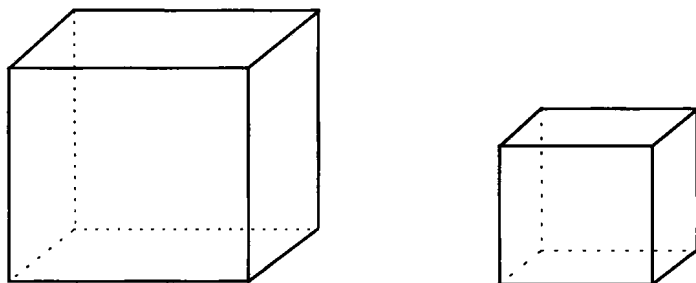


图2-1 空间几何相似

相似方法是把原型与模型看做两个系统,如果描写两种系统的动力和运动状态的特征方程在形式上相同,且两种系统的要素之间存在一一对应的关系时,则通过建立模型、进行模拟实验,认识和研究原型系统的动力和运动状态的特征和规律。因此,给相似方法下这样的定义:相似方法是一种可以把个别现象的研究结果推广到所有相似现象的科学方法。因此,相似方法也是现象模拟方法或实验方法的基础。

相似方法与模型实验关系密切,是现象研究的两个组成部分。在科学研究中是相辅相成的,模型实验促进了相似方法的发展,相似方法的进步,奠定了模型实验的基础。

近年来,由于科学技术的进步,促进了相似理论的发展和完善。人们在认识未知的事物和现象时越来越多地应用相似方法。

2.1.2 相似模型

相似模型就是将某种物理现象的长度、时间、力、速度等缩小或扩大来进行实验的装置。在用相似模型做实验时,必须能够再现原来的现象本质,要用比较容易、比较迅速、比较方便的方法再现实际发生的现象。

当原来的现象(原型)过大、变化过程太慢,或是实验的费用昂贵,而难于处理情况下,可以用相似模型作为容易处理的代用品进行实验。为了用相似模型进行实验,必须知道相似模型究竟能否作为原型的代用品来使用,必须预先知道什么样的物理法则支配着原来的现象。进行模型实验时,支配模型的物理法则与支配原型的物理法则必须相同,其作用机理也必须相同。

2.1.3 相似定理

为了使模型与原型全部相似,模型的每个要素必须与原型所对应的要素相似。并且,每个要素不仅仅是几何相似,与其运动相关的时间、速度、力、加速度、变形、压力、应力、电流、温度以及其他有关的变量都必须相似。用数学表达式表达如下:

$$q = q^* q' \quad (2-1)$$

式中 q, q' ——原型和模型所有对应的变数;

q^* ——变量之间的比,即相似比。

由于对应的原型和模型每个要素必须满足这个条件,所以全体必须满足这个条件。

相似理论主要由相似第一定理、相似第二定理和相似第三定理构成:

相似第一定理:凡是相似的现象,在对应瞬间、对应点上的同名相似准则数值相同。

相似第二定理(方程分析相似准定理):微分方程并不是仅仅适用体系中的某一确定的地点,而应该是对体系中任一地方都适用。因此,从微分方程中所取得的准则适用于整个体系。

相似第三定理:对于同类现象,凡单值性条件相似,并且,由单值条件量所组成的定型准则相等,则这些现象相似。

相似理论本身是一个数理逻辑系统,一般化的、普遍适用的定理成立,必须从一般的数理方程出发,以数学方法达到一般性结论。尽管3条定理各有其确定的内容,分别证明,严加区分,但在应用上往往是统筹考虑,一气呵成。

在相似理论中采用相似准则来联系相似现象之间的关系。在相似现象里,对应的相似准则值相等(不是构成相似准则的每个参数值相等)。相似准则是为使模型现象与原型现象相似所必须满足的条件,也是模型设计与模型实验的基本准则。

在相似模拟实验中自始至终都要正确理解和运用相似理论,具体讲要做到以下几点:

(1)为使模型与原型相似,就必须使模型和原型这两个系统中所有的对应无量纲准则相等。

(2)在实验过程中,要测量这些无量纲准则所包括的一切变量。

(3)用这些无量纲准则来表示实验结果。

(4)只有模型与原型相似,才能把模拟实验结果换算到原型中去。

(5)把实验结果换算到原型中去时,必须通过这些相似准则。

对一个复杂的系统,要实现全部相似准则都相等是不可能的。在求相似准则时,我们把以物理法则为基础而导出的相似准数称为主相似准数,也就是说只要使模型与原型主相似准数相等就可以了。

弄清支配现象的物理法则就可以推导出所必需的主相似准数,找出次要作用的物理法则,把它从相似准则中除去,这就是说,一定要模拟最重要影响的主要因素,抓住事物的本质。当然对于相似准则的如何取舍依赖于研究人员的工程实践经验,需分清本质和现象加以判断。

2.1.4 油藏物理模拟相似理论简介

物理模拟、数值模拟和现场实验是研究提高采收率的3个主要手段。因为一个油田只能开采一次,所以矿场试验不宜太大。与矿场试验相比,物理模拟具有费用少、时间短、有重复性和预见性等优点。

油藏物理模拟的理论基础是相似理论。物理模型是用来再现多孔介质中的流动现象。由于时间因素,也由于现场情况难以控制,要研究油藏中的流动是很困难的,有时也是不可能的,为了建造模型,就必须有关于油藏的一些详细资料。就研究油藏工程而言,我们所关心的是按比例缩小,以便在短时间用一个观察尺度获得资料。

相似比例模型是根据相似原理设计出来的。在模型设计、实验操作、数据处理,以及用实验结果来解释油藏原型等各个研究阶段上,都离不开相似理论的指导。

按比例相似模型与油田原型不同,在长度比、力比、速度比、温差比以及浓度差之比方面,都具有相同的数值。由于按比例相似模型的研究结果可以直接用于油田,因此很受欢迎。但是,要达到全部按比例模拟是不能的。能够使研究的重要现象按比例模拟就够用了。放松一些相似准则的要求,是实验中不可缺少的手段。如何进行放松,而不影响一个过程的最主要机理,是一种高超的技巧。

2.2 相似准则推导方法

推导一个物理现象相似准则的过程,也就是应用相似理论对于描述现象的数学方程进行无量纲化的过程,或者对描述该现象的各种变量进行量纲分析的过程。因此推导一个现象的相似准则方法有两种:从描述现象的数学表达式(方程)入手分析的方法,称为方程分析法;从包括这些现象的变量入手进行量纲分析的方法,称为量纲分析法。

2.2.1 方程分析方法

首先要列出描述物理现象的一套完整的方程组。然后对于每个变量都找出其相同量纲的特征量,并使每个变量都表示成为这个变量对应的特征量与一个无量纲量的乘积形式。经过整理,原来的方程组被转化为无量纲方程组,即这个方程组的所有系数都是由各个特征量所组成的无量纲数。这些系数就是无量纲的相似准则数。最后,经过方程分析(工程经验判断),把所有无量纲群加以综合,得到一些新的相似准则群,其准则的个数与原来相同。

2.2.2 量纲分析方法

这种方法是列出所描述过程的全部变量,对它们进行组合得到一套无量纲量,这些无量纲量就是相似准则。这种方法不必列出具体的数学方程组,只要规定方程组所满足的齐次条件,最后进行工程判断。

白金汉(Buckingham)已经提出了这样的法则:完整的一集合无量纲群中,群的数目等于变量的总数减去基本量纲,即质量、长度和时间的数目。

2.2.3 方程分析方法与量纲分析方法的比较

在推导相似准则时,两种分析方法都可以采用。虽然方程分析方法与量纲分析方法的基本原理是一致的,但是两者之间仍存在着差别。