

# 油藏复杂驱动体系物理模拟相似准则研究进展\*

白玉湖<sup>1,2,†</sup> 周济福<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院力学研究所, 北京 100190

<sup>2</sup> 中国海洋石油研究中心, 北京 100027

**摘要** 综述了水驱油、化学驱油、蒸汽驱、混相驱及非混相驱等复杂油藏驱替体系物理模拟相似准则的研究现状. 系统介绍了相似参数敏感性分析方法, 定义了表征目标函数对相似参数依赖程度的敏感因子, 结合数值方法便可定量地确定复杂体系主要相似参数, 并实际应用于工程问题. 讨论了水驱和聚合物驱物理模拟应优先满足的相似准则及其随参数范围的变化.

**关键词** 物理模拟, 相似准则, 水驱油, 聚合物驱, 敏感性分析

## 1 引言

随着我国油田逐渐进入高含水中后期开发阶段, 含水率高达 80% 以上, 开发难度越来越大<sup>[1]</sup>. 与此同时, 经济发展对原油需求的激增使我国石油战略安全面临着严峻的挑战, 因此, 需要开展提高石油采收率研究<sup>[2]</sup>. 分析油藏复杂流体的分布和运移规律对提高采收率研究是很重要的, 单靠现场测试及理论预测并不能完全解决这个问题. 以相似理论为指导的物理模拟能够在短时间内低成本地再现驱油过程, 预测开发效果, 指导现场先导性试验和工业性开发方案的设计和优选. 然而, 由于油藏复杂驱动是多相多组分流体在多孔介质中渗流的过程, 其涉及到众多的物理参数: 包括岩石多孔介质参数, 如孔隙度、压缩系数、绝对渗透率、润湿性、热传导性等; 多相多组分流体参数, 如流体的密度、黏度、压缩性、组分变化、流体相态变化、流体饱和度、油气水相对渗透率等; 各种物理化学过程参数, 如对流、扩散、弥散、吸附与解附、化学剂的捕集、滞留、相间和组分间的传质等. 流体在多孔介质中流动时, 受到的作用力主要是驱动力、黏滞力、毛管力、重力、惯性力等. 众多的控制参数和复杂的物理化学过程导致了控制物理模拟的相似参数很多, 可达十几个甚至几十个, 同时满足这些相似参数, 模拟各种力的综合作用

会产生矛盾或者不切实际的实验条件. 因此, 就必须确定在物理模拟过程中, 哪些相似参数是主要的, 应该优先满足, 而哪些是次要的, 可以相对放松, 以实现尽量接近油藏原型的部分相似模拟. 本文首先对水驱、热力驱、化学驱、混相驱与非混相驱等复杂驱动体系相似方面的研究进行综述, 而后系统地介绍了解决这一问题的方法——相似参数敏感性数值分析方法<sup>[3]</sup>.

## 2 复杂驱动体系物理模拟研究进展

### 2.1 水驱油物理模拟相似准则研究

水驱是目前世界上应用最为广泛的一种油田开发方法. 利用相似准则对水驱过程进行研究是从 Leverett<sup>[4]</sup> 开始的. Rapoport 和 Leas<sup>[5]</sup> 报告了注水开采“成比例的”实验研究结果. Geertsma 等<sup>[6]</sup> 用检查分析法和量纲分析法导出了冷水驱、热水驱和溶剂驱的相似准则, 并且进行了可行性讨论, 考察了油藏的比例模拟应该满足的要求. 认为比例模型仅在平均孔隙度大小不需要成比例时才能实现, 而且在大多数实际情况下可以忽略惯性力的影响, 因此不考虑雷诺数 ( $\rho vk^{0.5}/\mu$ ) 的影响, 并且当孔隙平均尺寸远远小于油藏的最小尺寸时, 无量纲数  $k/l^2$  可以忽略. 其中  $k$  是岩石的绝对渗透率,  $l$  是油藏的几何尺寸,  $\rho$  为油藏孔隙内流体

收稿日期: 2007-09-25, 修回日期: 2008-08-11

\* 国家重点基础研究发展计划 (973)(2005CB221300) 和中国科学院知识创新工程 (KJ CX-SW-L08) 资助项目

† E-mail: byh\_2002@163.com

的密度,  $\mu$  为油藏流体的黏度,  $v$  为流体的流动速度. 在热水驱模拟中, 由于放松了孔隙介质的相似, 重力作用得以模拟, 而油藏压降、毛管压力、残余油饱和度、相对渗透率不能很好地模拟. Perkins 等<sup>[7]</sup> 在两相流动控制方程的基础上推导出水驱油的相似参数, 提出了用折算饱和度和

$$s_w = (s_w - s_{cw})/\Delta s$$

和折算渗透率

$$\bar{k}_w = K_w/K_{row}, \quad \bar{k}_o = K_o/K_{cwo}$$

表示的相渗曲线, 以解决不同多孔介质和驱替体系中  $K_o$ 、 $K_w \sim s_w$  曲线形状差异很大的问题. 同时对毛管力曲线也作了同样的处理. 其中  $\Delta s = 1 - s_{cw} - s_{ro}$ ,  $K_o$  为油的渗透率,  $K_w$  为水的渗透率,  $s_w$  为水的饱和度,  $s_{cw}$  为束缚水饱和度,  $s_{ro}$  为残余油饱和度,  $K_{cwo}$  为束缚水条件下油的渗透率,  $K_{row}$  为残余油条件下水的渗透率. Khan 等<sup>[8]</sup> 进行薄油层自然水驱动的室内物理模拟实验, 采用了一系列的无因次参数, 包括井的无因次钻开深度, 无因次岩层厚度, 动边界流度比, 定边界流度比, 水侵含油砂岩后水的相对渗透率, 流量参数等, 比较系统地研究了每变化一个参数而其他参数不发生变化时累计产油量和累计产液量的关系, 分析了各个无量纲参数的影响情况. Khan 等<sup>[9]</sup> 用模型实验研究底水锥进的情况, 认为, 除非把油井的产量控制在经济极限以下, 否则是不可能消除底水锥进的. 他给出了几种相似参数条件下, 油水接触面的锥进过程, 同时也把均质情况下的无量纲参数作了推广, 适应于非均匀条件. 沈平平<sup>[10]</sup> 对纵向二维多孔介质水驱油相似理论进行了研究, 明确了每个相似参数的物理意义, 并且通过实验验证了驱动力和毛管压力之比、驱动力与重力之比是纵向二维多孔介质驱油实验必须满足的力学条件, 这两个相似参数控制水在多孔介质中的运动规律. 朱志宏<sup>[11]</sup> 详细探讨了低压物理模拟水驱的可行性, 认为无论是高压模型还是低压模型都没有完全模拟油藏弹性能量, 如果不考虑弹性能量, 可以在低压条件下采用疏散的岩心来模拟水驱油藏, 若采用与原型相同的孔隙结构必须忽略毛管力才可能实现, 但是这样会带来较大的偏差. 孔祥言等<sup>[12]</sup> 以 5 点法井网为基础, 推导了水驱油物理模拟相似准则, 但其忽略重力影响、且假定束缚水和残余油饱和度在全场是均匀分布. 他认为在微可压缩并且渗透率较大情况下, 主要相似参数为油

水流度比、无因次时间、无因次压力以及折算含水饱和度. 王家禄等<sup>[13]</sup> 建立水平井二维物理模拟系统, 观察水平井开采底水油藏时水脊脊进过程, 研究水脊形成与发展机理、见水时间和采收率的变化规律.

## 2.2 化学驱物理模拟相似准则研究

水驱是经济有效的方法, 但水驱后仍然将有 60% 以上的石油储量遗留在地下. 水驱后的残余油在地层中以岩石表面油膜、盲端状残余油、毛管力作用下的孔吼残余油、非均质部分未被水波及的残余油等形式存在, 很难大量流动. 这时黏滞力与毛管力之比即毛管数在  $10^{-6}$  左右, 采用化学驱可以大大地降低界面张力, 最大可以降低 3~4 个数量级<sup>[14]</sup>. 常用的化学驱方法有聚合物驱油、表面活性剂驱油和碱水驱油. 聚合物驱就是向地层注入高分子聚合物水溶液, 控制和改善流度比, 提高波及系数, 从而提高采收率. 碱驱就是通过碱水与原油中的酸性活性组分相互作用, 就地生成表面活性物质, 使岩石的润湿性发生改变, 或者使油水之间的界面张力大幅度降低, 原油被乳化、富集, 然后采出. 从目前的化学驱发展趋势来看, 已经不是单纯的聚合物驱、表面活性剂驱和碱水驱, 而是彼此相互结合, 各种化学剂协同作用, 反应机理更为复杂, 协同效应的效果远远大于单元驱的效果<sup>[15]</sup>.

Islam 等<sup>[16]</sup> 从聚合物驱、乳化驱油和泡沫驱油的数学方程出发, 用检验分析法得出了一系列化学驱动的相似准则. 因为相似准则非常复杂, 不可能在一次物理模拟中完全满足所有的相似参数, 所以为了模拟驱替过程中主要的物理机理, 必须放松一些相似参数. 考虑了几种情况下的相似准则: (1) 模型与原型采用相同流体, 不同孔隙介质, 不同压力降. 能够实现几何、黏性力、重力的相似, 无法模拟扩散和毛管力的影响. 因为采用的多孔介质不同, 束缚水饱和度、阻力系数、吸附和相对渗透率的模拟就成了问题. (2) 模型与原型采用相同流体, 相同孔隙介质, 相同压力降, 几何相似. 可以模拟那些依赖于压力的各种性质, 同时可以精确模拟不可减少孔隙体积、相对渗透率、吸附, 但无法模拟重力和高速下扩散的影响. (3) 模型与原型采用相同流体, 相同孔隙介质, 相同压力降, 放松几何相似条件. 为了采用同样的流体和多孔介质在相似的压力条件下实现重力的模拟, 必须放松几何相似条件, 这种条件下的垂向几何尺寸为:  $x_{2R} =$

$\rho_{aR}g_R L^2/p_{aR}$ . 但这种方法无法实现毛管力和扩散的影响模拟. (4) 模型与原型采用相同流体, 相同孔隙介质, 相同压力降, 放松几何相似条件, 给定垂向几何尺寸:  $x_{2R} = (\phi_R s_{aR} K_R d_{pR} L)^{0.5}$  以实现模拟横向扩散占主导作用的过程, 但无法模拟重力和毛管力的影响. (5) 模型与原型采用相同流体, 不同的孔隙介质, 不同的压力降等. 该方法中给定的垂向几何尺寸为:  $x_{2R} = \rho_{aR}g_R L^2/P_{aR}$ , 试图在模化横向扩散时平衡黏性力和重力, 但无法模拟毛管力. 因采用不同的孔隙介质, 所以相对渗透率和束缚水饱和度无法得到模拟. 而且, 时间是原型的 4/5 幂次, 这就意味着相当长的实验时间. 其中  $x_{2R}$  为垂向的几何尺寸,  $\phi_R$  为岩层的孔隙度,  $g_R$  为重力加速度,  $K_R$  为岩石的渗透率,  $d_{pR}$  为岩石平均颗粒直径,  $L$  为水平方向的特征尺度,  $P_{aR}$  为含水相的特征压力,  $\rho_{aR}$  为含水相的密度,  $s_{aR}$  为含水饱和度.

Islam 等<sup>[17]</sup>首次对表面活性剂、碱、聚合物的复合驱动作了详细的相似分析, 从控制流动和化学反应的方程出发, 得出了一系列的相似准则数. 在推导的过程中作了以下的假设: 认为孔隙度、渗透率张量都是坐标的函数; 原始的物理和化学的性质是均匀的; 注入水, 地层中的水等都具有相同的物理性质; 水相中存在聚合物、表面活性剂和碱, 而油相中存在有表面活性剂和聚合物. 控制方程中考虑了动态的表面张力、毛管力和相对渗透率; 考虑了聚合物、碱和表面活性剂在岩石表面的吸附. 以实现质量传输和表面张力的动态模拟为目的, 建立了可以实现的 4 种情况下的相似准则, 见表 1.

表 1 模型与原型在不同情况下的相似准则

	流体	孔隙介质	压力降	几何形状
情况 1	相同	相同	相同	相似
情况 2	相同	相同	相同	放松
情况 3	相同	相同	相同	放松
情况 4	相同	相同	相同	相似

以上所有的情况都认为模型与原型具有相同的温度分布.

彭可综等<sup>[18]</sup>建立了考虑聚合物溶液非牛顿特性的聚合物驱油相似准则, 并且理论分析了实验室内可行的 5 种模化方法. 定义了模型与原型不相似时的畸变系数和影响系数, 其基本的思想为: 假如第  $i$  个  $\pi$  数不满足, 即:  $\pi_{im} \neq \pi_{ip}$ , 定义畸变系数为  $w_i = \pi_{im}/\pi_{ip}$ , 影响系数  $\beta_{kj} = (s_o - s_{kj})/s_o$ , 这里  $s_o$  表示非畸变模型采收率曲线的下围面积,  $s_{kj}$  表示对  $\pi_i$  畸变且畸变系数取值为

$w_j = w_k^o$  时畸变的采收率曲线的下围面积. 影响系数表示  $\pi_j$  对采收率的影响程度. 计算各个无因次  $\pi$  数对采收率的影响系数, 先取定一系列的畸变系数  $w_1^o, w_2^o, w_3^o, \dots, w_m^o$  作为指标序列, 而各个  $\pi$  数作为影响因素. 从影响系数的大小来判定相似参数的主次关系. 影响系数的定义在某些情况下未能很好地反映参量变化的影响程度, 因为在计算中发现两条采收率曲线存在着交叉的情况, 在这种情况下, 如果仍然采用文献中的影响系数的定义方法, 势必会得到不确切的结果, 因而有必要对影响系数进行修正. 李宜强等<sup>[19,20]</sup>分别给出了三元复合驱和泡沫复合驱的相似准则, 并且采用文献 [18] 的方法对相似参数和相似准则进行了分析. 该方法是通过改变无量纲数中的有量纲量来实现相似参数的畸变, 在人为地改变其中一个无量纲数时, 另外的含有该有量纲量的无量纲数都会发生改变, 因而所计算出来的影响系数应该是有量纲参数的影响系数而不是相似参数的影响系数. 徐晖等<sup>[21]</sup>用高温高压复杂驱动体系三维物理模拟系统研究聚合物驱提高原油采收率的宏观渗流机理.

### 2.3 蒸汽驱物理模拟相似准则研究

蒸汽驱用来开采石油已经有很多年的历史, 其主要驱油机理就是热降黏. 一些室内研究希望弄清楚整个过程的驱替机理, 并把这些机理用于实际的油田数值模拟预测. 另外一些实验则是用比例模型研究各种机理之间的关系, 希望观察到和油田相似的实验结果, 用来预测油田开发的结果. 蒸汽驱的比例模型可以用来预测蒸汽驱动过程中各种参数之间的影响, 这些参数包括: 注入速率、生产压力、段塞尺寸、完井方式、蒸汽添加剂、底水、油藏的非均质性、蒸汽的质量等. 比例模型也可以用来完善数值模拟, 观察各种机理之间的影响, 而数值模拟却很难在这方面做得很好. 蒸汽比例模型包括高压模型 (在油藏压力下), 低压模型 (远低于油藏的压力). Stegemeier 等<sup>[22]</sup>的低压比例模型标准用的最为广泛, 该模型是在低于大气压力下工作, 这具有可用非金属模型进行实验的明显优点, 模型可以用砂子充填, 在真空条件下可视作刚性容器. 模型外较高的压力 (大气压) 可防止流体沿侧壁形成流道. 因为模型的压力和温度与原型完全不同, 为了相似, 必须调整流体的特性, 必须调整水的黏度以补偿增加的阻力, 流体性质的修正可以通过使用人造合成油和用聚乙二醇

增加水的黏度来实现。可以证明,这类按比例物理模型在模拟蒸汽带内各点的流速上要比高压模型好。以 Pujol 和 Boberg<sup>[23]</sup> 为代表的高压比例模型标准应用的最为广泛,高压模型常常采用与油田相同的流体,这种系统的缺点是整个系统都是在很高的压力和温度下运行。该模型可以模化岩石与流体的相互作用、流体性质、乳化、蒸汽的蒸馏、气体的溶解和压缩性等。低压模型在这些参数的模拟却不是很理想,但是,低压模型比较容易建立和操作,由于它能够很好地模化饱和度和压力、温度的关系,因而,可以更好的模拟温度和速度的分布。低压模型往往要求需要与油田不同的流体以满足相似的标准,但是实际上,很难找到能够满足所需标准的流体。Prats 等<sup>[24]</sup> 应用这些准则研究了 Peace River 的沥青砂,发现用真空模型可以很好地模拟压力循环过程中压力降低而引起的蒸发现象。Kimber<sup>[25]</sup> 建立了含有添加剂的蒸汽驱的数学模型,以此出发推导出含有添加剂的蒸汽驱的相似准则,并讨论了一系列模拟方法及其优点。朱志宏<sup>[26]</sup> 用一套相似准则针对反 9 点井网地质模型设计出真空相似物理模型。利用该模型研究了不同注入率下蒸汽的超覆现象、生产动态以及注入率对采收率、油气比的影响。研究结果表明:采收率和油气比总是与注入率直接相关的,并存在一个获得较高采收率和油气比的最佳注入率。Doan 等<sup>[27]</sup> 改进了前人关于水平井井段有无限的导流能力,即流动阻力很小的假设,认为其有效导流能力有限,在相似分析过程中,同时考虑了油藏中流体流动和水平井筒内的流动,分别得到了油藏、水平井筒内的无量纲相似参数。物理模拟中考虑了变水平段井筒直径、套管以及注入速率对于采收率的影响。Nasr 等<sup>[28]</sup> 以冷湖油田砂岩油藏 5 点法的 1/8 单元为基础,采用高压模型物理模拟了通过底水层的蒸汽驱潜能。发现当蒸汽注入速率较低时,所得到的热效率和 Prats 的一致,但是随着蒸汽注入速率的提高,实验结果和 Prats 的相差越来越大。Franenfeld 等<sup>[29]</sup> 分别采用 Pujol 和 Boberg 以及 Kimber 所建立的相似准则,部分相似地对油和沥青在蒸气吞吐过程中的驱动机理进行研究,认为实验模型中重力、不可压气体和毛管力对油的流动有明显的影响,但是在现场实践中,毛管力的影响会相对小一些,Pujol 和 Boberg 的模型更能够很好地代表蒸气吞吐。王利群等<sup>[30]</sup> 用两个不同的相似准则确定在蒸汽驱过程中冷油带和蒸汽带油的黏度。陈永忠等<sup>[31]</sup> 为了改变注采井

网关系,在蒸汽驱高压比例物理模型和蒸汽驱真空比例模型基础上,建立了蒸汽驱低压比例物理模拟。Doan 等<sup>[32]</sup> 研究了 Saskat- chewan 地区均质、含有底水的稠油油藏蒸汽驱过程,分析了注蒸汽过程的热量分布,包括热量注入、热量损失、热量聚集以及采出的热量,建立了理论的热损失模型。陈永忠等<sup>[33]</sup> 从控制油藏注蒸汽后油水流动规律以及反映热力学变化特点的基本物理法则入手,推导出蒸汽驱物理模拟相似准则,可以与方程分析法及量纲分析法互为补充。杨立强等<sup>[34]</sup> 应用高温高压比例物理模拟方法,研究了水平井布于直井斜下方时蒸汽辅助重力驱 (SAGD) 中蒸汽腔的形成和扩展过程。

#### 2.4 混相驱和非混相驱物理模拟相似准则

一半以上的稠油油藏因为油层厚度薄、或埋藏深度大、或地层渗透率太低、或含油饱和度较低、亦或孔隙度较低而不适合用热采法<sup>[35]</sup>。根据对国外 113 个矿场试验结果的分析,发现非混相二氧化碳驱比较适合开采这类中等黏度的稠油油藏。非混相二氧化碳开采稠油的主要机理是:降低原油黏度、使原油膨胀、降低界面张力、乳化作用及降压开采<sup>[36]</sup>。由于 CO<sub>2</sub> 在油中的溶解度大,因此在一定的温度及压力下,当原油与 CO<sub>2</sub> 接触时,原油体积就会增加,黏度就会降低,CO<sub>2</sub> 在原油中的溶解还可降低界面张力及形成酸性乳化液,CO<sub>2</sub> 在油中的溶解度随压力的增加而增加,当压力降低时,CO<sub>2</sub> 就会从饱和了 CO<sub>2</sub> 的原油中溢出,形成溶解气驱。与 CO<sub>2</sub> 驱相关的另一个开采机理是由 CO<sub>2</sub> 形成的自由气饱和度可以部分代替油藏中的残余油。混相驱可以分为垂直混相驱和水平混相驱两种,混相驱替就是利用了混相后界面张力等于零,理论上采收率可以达到 100%<sup>[37]</sup>。

Pozzi 等<sup>[38]</sup> 指出如果要精确模拟横向扩散同时满足几何相似的要求,就需要一个不切实际的很大的几何模型和非常长的实验时间。他们认为在某些特殊的情况下,可以放松几何相似及黏性和重力之比来满足混相驱替的要求,这也适应于由于分子弥散和对流扩散引起的横向混合的情况。Slavash 等<sup>[39]</sup> 进行了线性油藏中二氧化碳驱替水驱之后的残余油的物理模拟研究,给出了 5 个相似准则数,分别是重力和黏性力之比、分子扩散和黏性力的比值、雷诺数、系统的总长度和单位长度内孔隙个数的比值、毛管力和黏性力的比值。Ekwere<sup>[40]</sup> 以水平柱状岩心为研究对象,建立了柱

坐标下非混相驱替控制方程,以检验分析方法推导出了不稳定驱替的相似准则,和稳定驱替相比多出一个相似参数,即径向相似参数.在研究不稳定驱动时该相似参数必须满足. Rojas 等<sup>[41]</sup>在用相似模型研究二氧化碳非混相驱替稠油时发现,在横向扩散相似参数满足  $D_T L / W^2 v < 4 \times 10^{-4}$  时,突破前采收率受横向扩散影响很小,或者纵向扩散相似数满足  $D_T L / W D_L < 0.3$  时,突破前采收率受到纵向扩散影响很小,其中  $D_T, D_L$  分别为横向和纵向扩散系数,  $W, L$  分别为油藏的宽和长. Rojas 等<sup>[42]</sup>用比例模拟研究薄油层稠油油藏的二氧化碳/盐水驱的动力学特性.认为在二氧化碳注入过程中,黏性力起主导作用,二氧化碳和稠油之间的质量传递有助于盐水驱的稳定. Meszaros 等<sup>[43]</sup>研究了水平井中的气体辅助重力驱动.采用了两套尺度模型,一套是二维模型,给出了相似准则,另一套是高压水平井尺度模型. Rojas 等<sup>[44]</sup>在假定油藏内瞬间达到平衡基础上,从非混相二氧化碳驱动的控制方程,利用检验分析的方法和量纲分析法得到了 26 个无量纲数.在放松了毛管力和弥散作用时,模型与原型采用相同的流体,并且在相同的温度和压力条件下进行试验,可以满足下列相似参数:几何比、重力和黏性力之比、水-气段塞体积之比. Mangalsingh 等<sup>[45]</sup>室内研究了连续注入二氧化碳和水气交替注入的非混相驱替,发现采用水气交替注入的非混相驱替的采收率较高,并且在小孔隙中会获得比大孔隙更高的采收率. Grattoni 等<sup>[46]</sup>在研究重力控制的气顶驱动时,在两相流动的两个无量纲数 Bond 数  $N_B$  和毛管数  $N_C$  的基础上,对其进行了修改,可以应用于三相的重力分异的流动,并且引进了一个新的无量纲数  $N$ ,  $N = N_B + A(\mu_d / \mu_g) N_C$ ,  $A = -17225$ , 该无量纲数考虑了在气体驱动过程中各个阶段中重力,黏性力和毛管力共同的影响.  $N_B$  表示重力和毛管力的相对强弱,毛管数  $N_C$  表示黏性力和毛管力的相对大小.

### 3 物理模拟相似准则研究中存在的问题

由于油田开发方式的多样性,复杂驱动体系相似准则的研究还有很多方面,诸如电加热物理模拟相似准则<sup>[47,48]</sup>研究、火烧油层物理模拟相似准则<sup>[49,50]</sup>研究等,只是这些方法的应用远不如以上所列方法广泛.目前物理模拟的主要手段和方法是:对于已经有了明确的数学模型的复杂驱替

体系,用检验分析法对控制方程进行分析,得到一系列的相似准则数,而后结合室内条件对相似准则数进行分析,或者放宽相似条件,或者忽略不可能实现的准则数,抓住控制主要物理机理的相似参数进行物理模拟,研究油藏的驱动机理,为开发方案的调整和设计提供参考.对于那些机理还不是很清楚的驱替行为,则采用量纲分析法,抓住控制物理过程的几个主要的参数,忽略次要的参数,进行物理模拟设计.在进行室内模拟时,根据所研究的具体对象,对问题进行简化,往往只满足部分相似条件,使实验容易实现,所得结果能够说明一部分问题,但其局限性也显而易见.比如,要同时模拟驱动力、毛管力和重力的作用,就需要不切实际的模型渗透率,或者需要大大地提高模型中的重力加速度,这些要求在实验室内是很难实现的.在模拟横向扩散的同时如果满足几何相似条件,则需要不切实际的大模型和很长的实验时间<sup>[38]</sup>.此外,很多参数的模拟也是非常困难的,比如渗透率分布的模拟,油层的渗透率变化复杂,室内模拟不可能做到渗透率分布完全和油层一致,只能抓住油田渗透率的主要矛盾把油层渗透率典型化、规范化.几何相似的实现有时也比较困难,比如油层厚度 10m,井距在 500m 左右,长宽比为 50,室内模型工艺一般能做到 1m 左右的人造模型,要达到完全几何相似,则模型厚度只能小于 2cm,不能很好地模拟油水在纵向上的运动情况,因此常常放松这个相似准则.沈平平<sup>[10]</sup>认为当垂直于层的速度分量变化很小时,且非均质油层垂向渗透率比水平渗透率低时,就可以放松几何相似的要求.

尽管很多研究者通过对某些相似参数的放松而实现部分相似模拟,但都面临着一个共同的问题,就是不能确认所放松的相似参数对于模拟实验究竟有多大的影响,也无法得知模型实验的结果和原型(实际地层)结果的偏离程度.同时,也无法得知当几个相似参数互相矛盾时应该优先满足哪些,放松哪些.这些问题影响到物理模拟结果向生产实践反演的精度.因此,必须知道在众多的相似参数之中,哪些相似参数是重要的,而哪些相似参数是次要的.采用理论分析方法,只能定性地得到部分相似参数的重要程度;用物理模拟实验的方法来确定相似参数对于实验结果的影响程度,从众多的相似参数中分析出主要的和次要的相似参数,工作量势必很大,而且也不大可能实现. Bai 等<sup>[51]</sup>在李家春院士的指导下,提出了采用数值方法来定量分析相似参数重要程度的方法,可以定

量地分析出所有相似参数的主次关系, 为物理模拟的设计和运行提供了参考。

#### 4 相似参数敏感性分析方法

复杂驱动体系相似参数敏感性分析方法<sup>[51]</sup>的基本原理是采用数值实验的方法分析各个相似参数的微小改变对于表征实验结果的目标函数的影响程度, 通过比较影响程度的大小来定量判断相似参数的主次关系, 即相似参数的敏感性数值分析。为此, 定义敏感因子

$$S_i = \frac{\partial[f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)/f_p]}{\partial(\pi_i/\pi_{ip})}, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

它表示第  $i$  个相似参数发生微小变化而其他的保持不变时, 表征实验结果的目标函数的相对变化程度, 即相似参数的敏感性。其中,  $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$  是评价物理模拟实验结果的目标函数, 可以是采收率, 压力, 饱和度等。但现在石油开采中, 我们最关心的是采收率, 因此定义  $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$  为

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N) = \int_0^{T_D} \eta(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N, t_D) dt_D$$

其中  $\eta(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N, t_D)$  表示采出程度, 采出程度曲线示意图, 见图 1。  $T_D$  表示无因次开发时间。在实际数值计算中, 敏感因子可以写成

$$S_i = \frac{\Delta a_{im}/a_0}{|w_i|}$$

其中

$$w_i = \frac{\pi_{im} - \pi_{ip}}{\pi_{ip}}$$

为畸变系数,

$$a_0 = \int_0^{T_D} \eta_p(\pi_{1p}, \pi_{2p}, \dots, \pi_{Np}, t_D) dt_D$$

表示模型与原型相似时采收率曲线和无因次时间轴所围的面积

$$\Delta a_{im} = \int_0^{T_D} |\eta_m(\pi_{1m}, \pi_{2m}, \dots, \pi_{im}, \dots, \pi_{Nm}, t_D) - \eta_p(\pi_{1p}, \pi_{2p}, \dots, \pi_{Np}, t_D)| dt_D$$

表示第  $i$  个相似参数畸变后的采收率曲线与完全相似时采收率曲线的偏离程度, 下标  $m, p$  分别表示模型和油藏原型。通过计算比较各个相似参数敏感因子  $S_i$  的大小, 就可以分析相似参数对于实

验结果的影响程度关系。下面以水驱和聚合物驱为例, 阐述相似参数敏感性数值分析的方法。

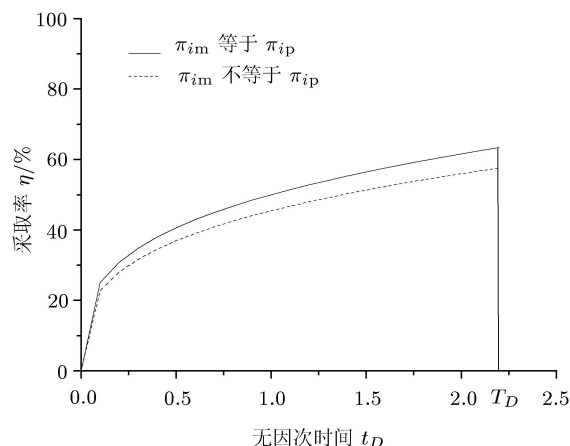


图 1 原型与模型完全相似时的采收率曲线和第  $i$  个相似参数发生微小改变的部分相似模型的采收率曲线示意图

#### 4.1 水驱油相似参数的敏感性分析

水驱油的基本假设: 油藏中存在油水两相流体, 并且流动符合 Darcy 定律; 油藏中岩石和流体均可压缩; 考虑毛管压力、重力的影响。在此假设条件下, 从数学模型出发, 经过推导可以得到水驱油的相似参数包括<sup>[52]</sup>

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{K_{cwo}}{K_{row}}, \quad \pi_2 = \frac{K_o}{K_{cwo}}, \quad \pi_3 = \frac{K_w}{K_{row}} \\ \pi_4 &= \frac{y_R}{x_R}, \quad \pi_5 = \frac{x_R}{z_R}, \quad \pi_6 = \frac{x_p}{x_R} \\ \pi_7 &= \frac{y_p}{y_R}, \quad \pi_8 = \frac{r_{eo}}{x_R}, \quad \pi_9 = \frac{r_o}{x_R}, \\ \pi_{10} &= \frac{s_{cw}}{\Delta s}, \quad \pi_{11} = \frac{s_{ro}}{\Delta s}, \quad \pi_{12} = \frac{s_{wi} - s_{cw}}{\Delta s} \\ \pi_{13} &= \frac{\sigma \sqrt{\frac{\phi_0}{K}} \cos \theta K_{row} h}{q_1 \mu_w}, \quad \pi_{14} = \frac{\mu_o}{\mu_w} \\ \pi_{15} &= \frac{\rho_{o0}}{\rho_{w0}}, \quad \pi_{16} = \frac{K_{row} h}{q_1 \mu_w} \rho_{w0} g z_R \\ \pi_{17} &= \frac{C_o q_1 \mu_w}{K_{row} h}, \quad \pi_{18} = \frac{C_w q_1 \mu_w}{K_{row} h} \\ \pi_{19} &= \frac{C_\phi q_w \mu_w}{K_{row} h}, \quad \pi_{20} = \frac{p_{w0} K_{row} h}{q_1 \mu_w} \\ \pi_{21} &= \frac{p_{o0} K_{row} h}{q_1 \mu_w}, \quad \pi_{22} = \frac{p_{wf} K_{row} h}{q_1 \mu_w} \\ \pi_{23} &= \frac{p_{oi} K_{row} h}{q_1 \mu_w}, \quad \pi_{24} = J(\bar{s}_w) \end{aligned}$$

这 24 个相似参数的物理意义依次为:  $\pi_1$  表示束缚水条件下油相渗透率和残余油条件下水相渗透率

之比;  $\pi_2$ 、 $\pi_3$  分别表示无因次油相、水相渗透率;  $\pi_4$ 、 $\pi_5$  为几何相似参数;  $\pi_6$ 、 $\pi_7$ 、 $\pi_8$ 、 $\pi_9$  表示井相对位置和井径相似参数;  $\pi_{10}$  表示束缚水饱和度和可流动油饱和度之比;  $\pi_{11}$  表示残余油饱和度和可流动油饱和度之比;  $\pi_{12}$  表示初始折算含水饱和度和;  $\pi_{13}$  表示毛管力和注入量为  $q_1$  时的层内压差之比;  $\pi_{14}$ 、 $\pi_{15}$  分别表示油水黏度和密度之比;  $\pi_{16}$  表示重力和驱动力的之比;  $\pi_{17}$ 、 $\pi_{18}$ 、 $\pi_{19}$  分别表示注入量为  $q_1$  时的层内压差引起的油、水和岩石体积相对变化量;  $\pi_{20}$ 、 $\pi_{21}$  分别表示油水的某一指定压力和注入量为  $q_1$  时的层内压差之比;  $\pi_{22}$ 、 $\pi_{23}$  分别表示生产井底流压、油层初始压力和注入量为  $q_1$  时的层内压差之比;  $\pi_{24}$  表示无因次毛管力函数. 其中  $p_o, p_w, p_c$  分别为油相压力, 水相压力以及油相和水相之间的毛管力;  $p_{oi}$  为油层的初始压

力;  $p_{o0}, p_{w0}$  为某一个指定状态下的油相和水相的压力;  $s_o, s_w$  分别为油相和水相的饱和度;  $\mu_o, \mu_w$  为油和注入水的动力黏性系数;  $K$  为油层岩石的绝对渗透率;  $K_o, K_w$  分别为油相和水相的有效渗透率;  $\rho_o, \rho_w$  分别为原油和水的密度;  $\rho_{o0}, \rho_{w0}$  分别为指定的某一压力状态下的油相和水相的密度;  $C_o, C_w, C_\phi$  分别为油, 水和油藏岩石孔隙的压缩系数;  $\phi$  为油层岩石的孔隙度;  $\phi_0$  为某一个指定状态下的岩石的孔隙度;  $g$  为重力加速度;  $x_p, y_p$  为生产井所在位置的坐标;  $\sigma$  为油相和水相的表面张力;  $\theta$  为油相和水相之间的润湿角;  $r_o$  为生产井和注水井的井眼半径;  $J(s_w)$  为毛管力函数;  $q_1$  表示注入井在单位时间内向油层注入的水的体积.

由此可以得到包含这 24 个相似参数的无量纲控制方程<sup>[52]</sup>

$$\begin{aligned} & \pi_1 \pi_4 \frac{\partial}{\partial x_D} \left( \rho_{oD} \frac{K_{oD}}{\mu_{oD}} \frac{\partial p_{oD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\pi_1}{\pi_4} \frac{\partial}{\partial y_D} \left( \rho_{oD} \frac{K_{oD}}{\mu_{oD}} \frac{\partial p_{oD}}{\partial y_D} \right) + \pi_1 \pi_4 \pi_5^2 \frac{\partial}{\partial z_D} \left( \rho_{oD} \frac{K_{oD}}{\mu_{oD}} \frac{\partial p_{oD}}{\partial z_D} \right) + \\ & \pi_{16} \pi_1 \pi_4 \pi_5^2 \frac{\partial}{\partial z_D} \left( \rho_{oD}^2 \rho_{o0D} \frac{K_{oD}}{\mu_{oD}} \right) + \pi_1 \rho_{oD} \frac{\pi K_{oD} (p_{wfD} - p_{oD})}{2 \ln r_{eoD} / r_{oD}} \delta(x_D - \pi_6) \delta(y_D - \pi_7) = \\ & \frac{\partial(\phi_D \rho_{oD} \bar{s}_o)}{\partial t_D} + \pi_{11} \frac{\partial(\rho_{oD} \phi_{oD})}{\partial t_D} \\ & \pi_4 \frac{\partial}{\partial x_D} \left( \rho_{wD} K_{wD} \frac{\partial p_{wD}}{\partial x_D} \right) + \frac{1}{\pi_4} \frac{\partial}{\partial y_D} \left( \rho_{wD} K_{wD} \frac{\partial p_{wD}}{\partial y_D} \right) + \pi_4 \pi_5^2 \frac{\partial}{\partial z_D} \left( \rho_{wD} K_{wD} \frac{\partial p_{wD}}{\partial z_D} \right) + \\ & \pi_{16} \pi_4 \pi_5^2 \frac{\partial}{\partial z_D} \left( \rho_{wD}^2 K_{wD} \right) + \rho_{wD} \left[ \frac{1}{4} \delta(x_D) \delta(y_D) + \frac{\pi K_{wD} (p_{wfD} - p_{wD})}{2 \ln r_{eoD} / r_{oD}} \delta(x_D - \pi_6) \delta(y_D - \pi_7) \right] = \\ & \frac{\partial(\phi_D \rho_{wD} \bar{s}_w)}{\partial t_D} + \pi_{10} \frac{\partial(\rho_{wD} \phi_D)}{\partial t_D} \end{aligned}$$

采用表 2 中相关参数值, 即可得到所有相似参数的值, 从而可对控制方程进行离散求

解, 得到每个相似参数的敏感因子, 如表 3 所示.

表 2 模型中主要参数取值

变量	取值	变量	取值	变量	取值
$l/m$	140	$\rho_r/kg \cdot m^{-3}$	$2.5 \times 10^3$	$C_\phi/Pa^{-1}$	$6.0 \times 10^{-10}$
$w/m$	140	$p_{wf}/Pa$	$1.0 \times 10^6$	$\phi_0$	0.25
$h/m$	10	$q_1/m^3 \cdot s^{-1}$	$8.0 \times 10^{-3}$	$\mu_w/Pa \cdot s$	$1.0 \times 10^{-3}$
$\rho_{o0}/kg \cdot m^{-3}$	800	$R_{k \max}$	1.5	$\mu_o/Pa \cdot s$	$5.0 \times 10^{-3}$
$n$	0.68	$r_{eo}/m$	0.1	$A_{p3}$	0.63
$p_{oi}/Pa$	$1.20 \times 10^7$	$C_a/Pa^{-1}$	$5.0 \times 10^{-10}$	$D_0/m^2 \cdot s^{-1}$	$1.346 \times 10^{-9}$
$\rho_{w0}/kg \cdot m^{-3}$	1000	$\hat{C}_{ad \max}/kg \cdot kg^{-1}$	$3.0 \times 10^{-6}$	$F$	5.88
$C_o/Pa^{-1}$	$8.0 \times 10^{-10}$	$A_{p1}$	1.02	$d_p/m$	$8.57 \times 10^{-4}$
$b$	0.12	$A_{p2}$	0.18		

表 3 各个相似参数的敏感因子

$i$	1	2	3	4	5	9	10
$S_i$	$1.847 \times 10^{-1}$	$1.845 \times 10^{-1}$	$1.864 \times 10^{-1}$	$3.713 \times 10^{-2}$	$4.065 \times 10^{-3}$	$1.148 \times 10^{-3}$	$7.885 \times 10^{-3}$
$i$	11	12	13	14	15	16	17
$S_i$	$9.974 \times 10^{-4}$	$1.160 \times 10^0$	$3.952 \times 10^{-4}$	$1.848 \times 10^{-1}$	$1.014 \times 10^{-1}$	$4.742 \times 10^{-3}$	$2.164 \times 10^{-3}$
$i$	18	19	20	21	22	23	24
$S_i$	$2.879 \times 10^{-3}$	$3.049 \times 10^{-3}$	$1.560 \times 10^{-3}$	$1.272 \times 10^{-2}$	$3.260 \times 10^{-2}$	$2.755 \times 10^{-2}$	$3.952 \times 10^{-4}$

从表 3 中我们可以发现, 各个相似参数的敏感因子量级在  $10^{-4} \sim 10^0$  之间, 敏感因子大, 说明该相似参数对于实验结果影响程度大, 从而定量地确定了各个相似参数的主次关系. 如果认为敏感因子在  $10^{-1} \sim 10^0$  之间的相似参数是主要的, 则主要相似参数为

$$\frac{K_{cwo}}{K_{row}}, \quad \frac{K_o}{K_{cwo}}, \quad \frac{K_w}{K_{row}}, \quad \frac{s_{wi} - s_{cw}}{\Delta s}, \quad \frac{\mu_o}{\mu_w}, \quad \frac{\rho_{o0}}{\rho_{w0}}$$

可见在本算例条件下的水驱油物理模拟中, 束缚水条件下油相渗透率和残余油条件下水相渗透率之比、无因次油相和水相渗透率、油水的黏度比和密度比、初始含水饱和度是非常重要的相似参数, 要尽量满足. 这几个主要的相似参数恰恰反映了物理模拟多相流体在多孔介质中渗流的最本质最核心的因素: 多孔介质和多相流体. 前 3 个主要相似参数说明: 影响多相渗流的多孔岩石的主要性质——渗透率和饱和度关系必须是相似的; 而最后两个则是反映了多相流体的主要性质——黏度和密度的相似性. 其他的因素诸如重力、油水和岩石的压缩性, 毛管力等因素则相对次要一些, 对它们放松引起的误差要远小于对主要相似参数的放松所引起的误差, 因此在它们和主要的相似参数发生矛盾时是可以进行放松的.

## 4.2 聚合物驱油相似参数敏感性分析

把所提出的方法应用于聚合物驱油物理模拟中. 聚合物驱附加假设为: (1) 认为聚合物驱过程是一个油相和水相两相流动过程, 油相中仅含有油, 水相中含有水和聚合物, 因此, 水与油或者聚合物与油之间的质量交换可以忽略不计. (2) 在各向同性、均质介质中的流动是等温的; (3) 地层水、配置聚合物溶液的水都有着相同的物理特性; (4) Fick 定律适用. 在聚合物驱数学模型的基础上得到 37 个相似参数<sup>[53]</sup>, 其中比水驱多的 13 个相似参数分别为

$$\begin{aligned} \pi_{25} &= R_{k \max}, \quad \pi_{26} = \frac{\rho_r b \hat{C}_{ad \max}}{\phi_0 \Delta s} \\ \pi_{27} &= \frac{\rho_r b \hat{C}_{ad \max}}{\Delta s}, \quad \pi_{28} = b C_{awp}, \quad \pi_{29} = \frac{D_0 \Delta s h}{q_1 F} \\ \pi_{30} &= \frac{\delta d_p \phi_0 \Delta s}{R_{k \max} x_R}, \quad \pi_{31} = n \\ \pi_{32} &= \frac{q_1}{h x_R \gamma_{\min} \sqrt{K_{row}}}, \quad \pi_{33} = c' \phi_0 \Delta s \\ \pi_{34} &= A_{p1} C_{awp}, \quad \pi_{35} = A_{p2} C_{awp}^2 \\ \pi_{36} &= A_{p3} C_{awp}^3, \quad \pi_{37} = \frac{C_{api}}{C_{awp}} \end{aligned}$$

它们物理意义为:  $\pi_{25}$  表示最大渗透率降低系数;  $\pi_{26}$ 、 $\pi_{27}$ 、 $\pi_{28}$  表示与岩石性质相关的吸附特性;  $\pi_{29}$  表示分子扩散面积与单位时间聚合物波及面积之比;  $\pi_{30}$  表示平均岩石颗粒尺寸与油藏几何尺寸的比;  $\pi_{31}$  为剪切速率指数, 表示聚合物溶液性质偏离牛顿流体的程度;  $\pi_{32}$  为聚合物溶液在地层中的剪切速率和拟塑性范围内最小剪切速率之比;  $\pi_{33}$  表示岩石孔隙迂曲度, 亦属于岩石性质范畴;  $\pi_{34}$ 、 $\pi_{35}$ 、 $\pi_{36}$  表示聚合物溶液黏性本构关系的参数;  $\pi_{37}$  表示初始聚合物的浓度分布. 其中  $C_{ap}$  为水相中聚合物的浓度;  $\hat{C}_{ad}$  为聚合物在单位质量岩石表面的吸附量;  $C_{awp}$  为注入井底水相中聚合物的浓度;  $D$  为扩散系数;  $R_{k \max}$  为最大渗透率下降系数;  $\hat{C}_{ad \max}$  为单位质量岩石的最大吸附能力;  $\gamma_{\min}$  为拟塑性范围内的最小剪切速率;  $\gamma$  为聚合物溶液的剪切速率;  $n$  为剪切速率指数;  $A_{p1}$ 、 $A_{p2}$ 、 $A_{p3}$  为待定系数.

经过推导, 可以得到包含 37 个相似参数的无量纲控制方程组<sup>[53]</sup>, 采用表 2 中相关参数值, 可以得到各相似参数, 从而对包含相似参数的无量纲方程进行数值求解, 可以得到聚合物驱相似参数的敏感因子, 如表 4.

由表 4, 可见聚合物驱相似参数敏感因子的量级为  $10^{-5} \sim 10^0$ , 其中在  $10^{-1}$  左右的主要相似参数为



$$\frac{K_{cwo}}{K_{row}}, \frac{K_o}{K_{cwo}}, \frac{K_w}{K_{row}}, \frac{s_{oi} - s_{ro}}{\Delta s}, \frac{\mu_o}{\mu_w}, \frac{\rho_{o0}}{\rho_{a0}}$$

$$R_{k \max}, bC_{awp}, n$$

即聚合物驱的主要相似参数除了包含水驱的主要相似参数外还包含体现聚合物驱特殊性的相似参数, 即地层的最大渗透率降低系数, 表征地层岩石吸附能力的参数, 聚合物溶液的剪切速率指数. 这 3 个额外的相似参数恰好反映出聚合物驱区别于水驱的主要特点. 聚合物驱油就是在水驱的基础上在注入水中加入水溶性聚合物而改进注入液的特性, 因此聚合物驱油一定包含了水驱油的机理, 这反映在聚合物驱的主要相似参数包含了水驱所有的主要相似参数. 由于加入的水溶性聚合物改

善了驱替液的性质, 所以聚合物驱油有着明显的特殊机理, 体现在聚合物驱比水驱多 3 个主要相似参数, 正是这 3 个特有的相似参数反映了聚合物驱油提高采收率的主要机理, 就是聚合物溶液降低水相渗透率而几乎不改变油相的渗透率, 聚合物在地层中的吸附能够进一步降低水相的渗透能力, 因此就在一定程度上减少水的流动能力, 降低油井含水率, 提高采收率. 聚合物溶液的幂率指数反映水相的本质特性——非牛顿性. 聚合物溶液的黏度要高于普通水的黏度, 从而可以降低油水的流度比, 提高水相的波及面积, 增加了驱替能力, 为提高采收率提供了可能. 这些主要相似参数的改变都会对模拟结果产生较大的影响, 而其他因素, 诸如毛管力、吸附滞留、扩散等对于模拟结果的影响相对要小一些.

表 4 聚合物驱相似参数的敏感因子

<i>i</i>	1	2	3	4	5	9	10
<i>S<sub>i</sub></i>	1.604×10 <sup>-1</sup>	1.604×10 <sup>-1</sup>	1.915×10 <sup>-1</sup>	2.249×10 <sup>-2</sup>	6.861×10 <sup>-2</sup>	1.542×10 <sup>-4</sup>	1.829×10 <sup>-3</sup>
<i>i</i>	11	12	13	14	15	16	17
<i>S<sub>i</sub></i>	3.124×10 <sup>-3</sup>	1.261×10 <sup>0</sup>	1.254×10 <sup>-3</sup>	1.614×10 <sup>-1</sup>	2.816×10 <sup>-1</sup>	3.304×10 <sup>-2</sup>	2.158×10 <sup>-3</sup>
<i>i</i>	18	19	20	21	22	23	24
<i>S<sub>i</sub></i>	3.741×10 <sup>-3</sup>	2.384×10 <sup>-3</sup>	5.036×10 <sup>-4</sup>	1.47×10 <sup>-2</sup>	1.81×10 <sup>-2</sup>	6.536×10 <sup>-3</sup>	1.254×10 <sup>-3</sup>
<i>i</i>	25	26	27	28	29	30	31
<i>S<sub>i</sub></i>	9.818×10 <sup>-2</sup>	2.98×10 <sup>-4</sup>	7.194×10 <sup>-5</sup>	9.430×10 <sup>-2</sup>	1.130×10 <sup>-5</sup>	1.581×10 <sup>-4</sup>	1.004×10 <sup>-1</sup>
<i>i</i>	32	33	34	35	36	37	
<i>S<sub>i</sub></i>	2.217×10 <sup>-2</sup>	1.11×10 <sup>-2</sup>	4.374×10 <sup>-2</sup>	6.249×10 <sup>-3</sup>	1.963×10 <sup>-2</sup>	1.706×10 <sup>-2</sup>	

### 4.3 参数变化对相似参数敏感性的影响

前面在给定的一组参数条件下, 分别获得了水驱和聚合物驱物理模拟中应优先满足的主要相似参数. 在研究中发现, 随着油藏及生产参数的变化, 相似参数的主次关系是发生变化的. 针对水驱油田, 文献 [52] 给出了渗透率, 注入速度, 油黏性等参数在不同的取值范围时, 相似参数的主次关系的变化规律. 发现在高黏、高速注入、低渗条件下, 驱动力起主要作用, 而其他的诸如重力, 毛管力等, 则相对是次要的. 在高驱动力条件下, 压缩性应该给予考虑. 同样, 高黏、过高的注入速度以及低渗条件意味着较低的石油采收率, 此时束缚水和残余油的影响增大, 在物理模拟中应该给以充分的考虑. 同样我们也分析了聚合物油过程中, 相似参数主次关系随主要参数的变化情况, 发现在高黏、低渗、高注入速度条件下, 即高驱动力条件下, 聚合物驱油的特殊性表现得更加明显; 而在

低黏原油、高渗、低注入速度条件下, 即低驱动力条件下, 聚合物驱油的特殊性表现不明显, 大体上呈现出水驱油的特性 [53].

## 5 结束语

作者提出了相似参数敏感性分析方法, 定义了具有物理意义的、普适的敏感因子, 以表征目标函数对相似参数依赖程度. 以水驱油和聚合物驱油为例, 用数值实验的方法定量地确定这两种驱油体系物理模拟应该优先满足的相似参数, 在一定程度上为物理模拟提供了理论依据和设计指导.

本文是以采收率为目标函数, 实际上, 针对不同的物理模拟目的, 可以推广应用到其他目标函数的情况, 如: 驱动压力、饱和度等. 鉴于方法的普适性, 可以期望应用于其他复杂物理问题的研究 [54].

值得注意的是, 在参数范围发生变化时, 相似

参数的主次关系会有所变化, 而主要的相似参数也相应发生变化. 文献 [52,53] 根据油藏工程实践, 对一些重要的、变化范围较大的参数进行分析, 得到的结果能在一定的范围内适用.

我们还要指出方法的局限性. 因为模型中众多参数的变化范围是连续的, 敏感性分析工作量大, 往往会变得不可行. 因此, 后续的工作应该通过理论分析和敏感性方法定性、定量相结合, 排除明显可以满足和忽略的参数, 随后对余下难以判断的参数进行敏感性分析, 可以极大地减小工作量, 从而使得本方法更加切实可行.

**致谢:** 感谢我的导师中国科学院力学研究所李家春院士的指导和关怀.

## 参考文献

- 1 王德民, 程杰成, 杨清彦. 黏弹性聚合物溶液能够提高岩心的微观驱油效率. 石油学报, 2000, 21(5): 45~51
- 2 沈平平. 大幅度提高石油采收率的基础研究. 中国基础科学, 2003, 2: 9~14
- 3 白玉湖. 复杂油气藏渗流体系模拟及其相似准则的敏感性分析: [学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2006
- 4 Leverett M C, Lewis W B, True M E. Mechanism of fluid displacement in sands. *AIME*, 1942, 146, 175: 107~116
- 5 Rapoport L A, Leas W J. Properties of linear water floods. *Trans AIME*, 1953, 198: 139~146
- 6 Geertsma J, Core G A, Schwarz N. Theory of dimensionally scaled model of petroleum reservoir. *Tans AIME*, 1956, 207: 118~127
- 7 Perkins F M, Collins R E. Scaling law for Laboratory flow models of oil reservoirs. *Tans AIME*, 1960, 219: 383~388
- 8 Khan A R, Caudle B H. Scaled model studies of thin oil columns produced by natural water drive. *SPE* 2304, 1969. 318~322
- 9 Khan A R. Scale study of water coning. *Journal Petroleum Technology*, 1970, 22(6): 771~776
- 10 沈平平. 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, 2000
- 11 朱志宏. 低压物理模型模拟水驱的可行性. 新疆石油科技, 1997, 7(2): 16~22
- 12 孔祥言, 陈峰磊, 裴柏林. 水驱油物理模拟理论和相似准则. 石油勘探与开发, 1997, 24(6): 56~60
- 13 王家禄, 刘玉章, 江如意, 官长质. 水平井开采底水油藏水脊脊进规律的物理模拟. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 590~594
- 14 朱维耀, 鞠岩. 强化采油油藏数值模拟基本方法. 北京: 石油工业出版社, 2002
- 15 俞稼镛, 宋万超, 李之平. 化学复合驱基础及进展. 北京: 中国石化出版社, 2002
- 16 Islam M R, Farouq Ali S M. New scaling criteria for polymer emulsion and foam flooding experiments. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1989, 28(4): 79~97
- 17 Islam M R, Farouq Ali S M. New scaling criteria for chemical flooding experiments. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1990, 29(1): 29~36
- 18 彭克综, 丁海军, 姚恒申. 聚合物驱油物理模拟的相似准则. 石油学报, 1993, 14(3): 84~92
- 19 李宜强. 三元复合驱物理模拟相似原理. 大庆石油学院学报, 2003, 27(2): 89~92
- 20 李宜强. 泡沫复合驱物理模拟相似原理. 大庆石油学院学报, 2003, 27(2): 93~95
- 21 徐晖, 秦积舜, 王家禄, 姜汉桥. 聚合物驱宏观渗流机理的三维油藏物理模拟研究. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 369~373
- 22 Stegemeier G L, Volek C W, Laumbach D D. Representing steam processes with vacuum models. *SPE* 6787, 1977. 151~174
- 23 Pujol L, Boberg T C. Scaling accuracy of laboratory steamflooding models. *SPE* 4191, 1972. 1~7
- 24 Prats M. Peace revier steam drive scaled model experiments. In: Canada-Venezuela Oil Sands Symp. Edmonton, Alberta, CIM Special 17, 1977. 346~363
- 25 Kimber K D, Farouq Ali S M, Puttagunta V R. New scaling criteria and their relative merits for steam recovery experiments. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1988, 27(4): 86~91
- 26 朱志宏. 反九点井网蒸汽驱物理模拟研究. 江汉石油学院学报, 1989, 11(1): 50~59
- 27 Doan Q, Farouq Ali S m, George A E. Scaling criteria and model experiments for horizontal wells. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1992, 31 (9): 57~65
- 28 Nasr T N, Pierce G E. Steamflooding cold lake oil reservoirs through a bottom water zone: a scaled physical model study. *SPE* 21772, 1993. 94~100
- 29 Franenfeld T W, Kimber K D, Ken Drake. A partially scaled physical model of cyclic steam simulation for recovery of oil and bitumen. *SPE/DOE* 27836, 1994. 593~602
- 30 王利群, 周惠忠. 按比例油藏物理模型的参数设计. 清华大学学报 (自然科学版), 1995, 3: 100~105
- 31 陈永忠, 关文龙. 蒸汽驱低压比例物理模拟改变注采井网试验. 特种油气藏, 1996, 3(2): 51~55
- 32 Doan L T, Doan.Q T, Farouq Ali. Analysis of scaled steamflood experiments. *SPE* 37522, 1997. 93~104
- 33 陈永忠, 陈元春. 应用物理法则推导蒸汽驱物理模拟相似准则. 特种油气藏, 1999, 6(2): 32~36
- 34 杨立强, 陈月明, 王宏远, 田利. 超稠油直井 - 水平井组合蒸汽辅助重力泄油物理和数值模拟. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2007, 31(4): 64~69
- 35 凌建军, 黄鹂. 非混相二氧化碳开采稠油. 油气采收率技术, 1996, 3(2): 13~19
- 36 Jha K N. A laboratory study of heavy oil recovery with carbon dioxide. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1986, March-April: 54~63
- 37 金建. 当代混相驱综述. 海上油气译丛, 1994, 4: 51~54
- 38 Pozzi A L, Blackwell R J. Design of laboratory models for study of miscible displacement. *SPE*, 1963, 3: 28~40
- 39 Slavash Gharib, Todd Mdoscher. Physically scaled model simulating the displacement residual oil by miscible CO<sub>2</sub> in linear geometry. *Society of Petroleum Engineers of AIME*, *SPE* 8896, 1980. 1~10
- 40 Ekwere J P. Scaling Unstable immiscible Displacements. *SPE* 12331, 1983. 1~6

- 41 Rojas G A. Scaled model studies of immiscible carbon dioxide displacements of heavy oil: [Ph.D. Thesis]. Univ. of Alberta, 1985
- 42 Rojas G, Farouq S M. Dynamics of subcritical carbon dioxide/brine floods for heavy oil recovery. SPE 13598, 1988. 81~88
- 43 Meszaros G, Chakma A, Jha K N, et al. Scaled model studies and numerical simulation of inert gas injection with horizontal wells. Society of Petroleum Engineers, SPE 20529, 1990. 586~598
- 44 Rojas G A, Tao Zhu, Dyer S B, et al. Scaled model studies of CO<sub>2</sub> floods. SPE Reservoir Engineering (Society of Petroleum Engineers) 18083, 1991. 169~178
- 45 Mangalsingh D, Jagai T. A laboratory investigate of the carbon dioxide immiscible process. SPE 36134, 1996. 349~361
- 46 Grattoni C A, Jing X D, Dawe R A. Dimensionless groups for three-phase gravity drainage flow in porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2001, 29: 53~65
- 47 王殿生, 关继鹏, 王玉斗. 单井电阻加热采油技术研究. 石油大学学报 (自然科学版), 1998, 22(4): 54~58
- 48 王殿生, 陈月明, 关继鹏. 电加热油藏采油物理模拟研究. 石油大学学报 (自然科学版), 2001, 25(2): 54~58
- 49 Binder G G. Scaled model tests of in-situ combustion in massive unconsolidated sands. In: Proc., Seventh World Pet. Cong., Mexico City, 1967. 477~485
- 50 Allan M G, Redney A G, William E L. Scaled model experiments of fireflooding in tar sands. SPE 9449, 1982. 2158~2166
- 51 Bai Y H, Li J C, Zhou J F. Sensitivity analysis of dimensionless parameters for physical simulation of water flooding reservoir. *Science in China Series E*, 2005, 48(4): 441~453
- 52 Bai Y H, Li J C, Zhou J F. Effect of physical parameter range on dimensionless variable sensitivity in water flooding reservoirs. *Acta Mech Sinica*, 2006, 22(5): 385~391
- 53 Bai Y H, Li J C, Zhou J F. Sensitivity analysis of the dimensionless parameters in scaling polymer flooding reservoir. *Transport in Porous Media*, 2008, 73(1), 21~37
- 54 周济福, 李家春. 相似准则数值优化方法及其应用. 自然科学进展, 2005, 15(11): 1297~1303

## THE ADVANCE IN THE SCALING CRITERIA OF PHYSICAL SIMULATION FOR THE COMPLEX FLOWS SYSTEM IN RESERVOIR\*

BAI Yuhu<sup>1,2,†</sup>      ZHOU Jifu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Division of Engineering Sciences, Institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

<sup>2</sup>Technology Research Dept. CNOOC Research Center, Beijing 100027, China

**Abstract** In this paper, we review the advance of scaling criteria of water flooding, chemical flooding, steaming flooding, and miscible- and immiscible-phase displacements. A numerical approach is proposed to quantify the dominance degree of all dimensionless parameters based on the analysis of the sensitivity factor defined as the variation ration of a target function with respect to the variation of dimensionless parameters. Taking water flooding and polymer flooding as examples, the dominance degree of all the dimensionless parameters is quantitatively determined and the dominant dimensionless parameters in both flooding are successfully singled out.

**Keywords** physical simulation, scaling criteria, water flooding, polymer flooding, sensitivity analysis

\* The project supported by the National Fundamental Research Program of China (973)(2005CB221300) and CAS Innovation Program (KJ CX-SW-L08)

† E-mail: byh\_2002@163.com