

二氧化碳驱数学模型研究进展及发展方向

廉黎明^{1,2}, 秦积舜^{1,2}, 杨思玉^{1,2}, 杨永智^{1,2}

(1. 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, 北京 100083;

2. 中国石油勘探开发研究院 国家能源二氧化碳驱油与埋存技术研发(实验)中心, 北京 100083)

摘要: 中国陆上高含水 and 低渗透油田的勘探发现现状为二氧化碳驱提高采收率技术的应用提供了广阔的空间, 二氧化碳驱数值模拟正是此项技术的关键手段, 对二氧化碳驱数学模型进行分析、分类描述并研究其发展前景十分必要。在广泛调研中外文献的基础上, 通过分析各种模型如何考虑相和组分, 将二氧化碳驱数学模型分为基于黑油模型的二氧化碳驱替模型、传输—扩散模型、近组分模型、全组分模型(闪蒸计算模型)以及新型组分模型等5大类并分别进行描述。通过对比5类模型的特点, 揭示了其优缺点, 得到的认识是: 基于简化全组分模型的新型组分模型, 既能够较为清楚地描述实际现象、较为周全地考虑实际条件, 又符合实际精度的要求, 同时满足计算简便、运算速度快的应用要求。最后, 提出了有关二氧化碳驱数学模型在地质表征、相态计算、流体拟组分划分及实用方法应用等提高模型精度方面的发展方向。

关键词: 数学模型 二氧化碳驱 提高采收率 模型分类描述 发展方向

中图分类号: TE34

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)02-0077-06

目前, 中国陆上老油田大多进入高含水开发阶段, 新增的低—特低渗透油藏石油地质储量比例逐年增加^[1], 而该类型油藏依靠常规开发方法难以较大幅度提高采收率, 开采难度大, 若要实现持续稳产, 亟需发展大幅度提高采收率的接替技术。气驱尤其是二氧化碳驱技术是提高此类油藏采收率的有效技术之一。早在1920年就有文献记载通过注二氧化碳采出原油^[2], 1952年美国Whorton等^[3]申请了第1个二氧化碳驱油专利后, 此项技术在室内研究和现场实施都发展迅速。中外研究和实践表明, 二氧化碳驱技术具有显著增加原油体积、降低原油粘度、油气混相压力相对较低、气源易获得、经济环保等诸多特点, 对高含水 and 低渗透油田都有较好的适应性, 具备良好的发展前景。随着全世界对气候变化的持续关注, 中国先后设立了一批关于二氧化碳驱油利用与埋存相结合的重大项目, 二氧化碳混相驱的实验室研究及矿场试验工作也有了一定进展。这对二氧化碳驱油理论和实验研究提出了更高要求。数学模型研究作为二氧化碳驱油理论研究的关键之一, 日益受到重视。鉴于此, 笔者对二

氧化碳驱数学模型进行总结, 对模型分类论述并分析比较, 旨在明确各个模型的优缺点, 以期为今后模型改进及数值模拟技术的应用提供参考和支持。

1 二氧化碳驱数学模型研究进展与分析

二氧化碳驱油理论研究源于20世纪中叶, 到20世纪60—70年代开始出现描述性数学模型^[4]。目前模型可分为5种主要类型, 分别是: 基于黑油模型的二氧化碳驱模型、传输—扩散模型、近组分模型、全组分模型(闪蒸计算模型)及新型组分模型。

1.1 基于黑油模型的二氧化碳驱模型

最早的二氧化碳驱模型是在黑油模型的基础上发展起来的, 对黑油模型的改进主要集中在辅助方程或者相态方程, 并没有改变模型的实质。

基于黑油模型的二氧化碳驱模型包括油气水相方程、溶解气相方程和辅助方程, 分别为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_1}{B_1} \right) = \nabla \cdot \left(\frac{KK_{rl}}{\mu_1 B_1} \nabla \Phi_1 \right) - q_1 \quad (1)$$

收稿日期: 2013-01-09。

作者简介: 廉黎明, 男, 在读博士研究生, 从事油藏数值模拟、渗流物理和二氧化碳驱方面的研究。联系电话: (010)83595012, E-mail: LLMXH@163.com。

基金项目: 国家“863”计划“CO₂驱油提高石油采收率与封存关键技术研究”之02课题“CO₂驱油的油藏工程设计技术研究”(2009AA063402), 国家“973”计划“二氧化碳减排、储存和资源化利用的基础研究”之04课题“孔隙介质中相态实验与理论研究”(2011CB707304)。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_w}{B_s} + \frac{R_{so} S_o}{B_o} \right) \right] = \nabla \left[K \left(\frac{K_{rs}}{\mu_s B_s} \nabla \Phi_s + \frac{R_{so} K_{ro}}{\mu_o B_o} \nabla \Phi_o \right) \right] - q_s \quad (2)$$

$$S_o + S_w + S_g = 1 \quad (3)$$

式中: t 为时间, d; ϕ 为孔隙度; S_l 为 l 相的饱和度; l 代表 o, g 或 w , 分别为油、气或水; B_l 为 l 相的体积系数; K 为绝对渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_{rl} 为 l 相相对渗透率; μ_l 为 l 相粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; Φ_l 为 l 相相势; q_l 为 l 相源汇项, m^3/d ; S_w 为地层水的饱和度; B_s 为溶解气的体积系数; R_{so} 为溶解气油比, m^3/m^3 ; S_o 为含油饱和度; B_o 为原油体积系数; K_{rs} 为溶解气的相对渗透率; μ_s 为溶解气粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; Φ_s 为溶解气相势; K_{ro} 为油的相对渗透率; μ_o 为地层原油粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; Φ_o 为原油相势; q_s 为溶解气源汇项, m^3/d ; S_g 为含气饱和度。

针对粘度修正, Fong等在1996年建立了地下液相流体粘度的预测公式^[5], 可预测模型中原油混合二氧化碳后的流体粘度, 适用油藏条件包括: 地层原油粘度为 $0.2 \sim 4 \times 10^6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 油藏压力为 $0.101 \sim 50 \text{ MPa}$, 油藏温度为 $20 \sim 125 \text{ }^\circ\text{C}$, 对于高压和低压下流体各有一套粘度处理方程。但他们仅考虑了气油混合的影响, 针对二氧化碳在水中的溶解现象, Chang等在1996年对二氧化碳驱数值模拟三维三相多组分模型进行了研究^[6]。模型应用二氧化碳逸度因子表对二氧化碳的溶解度进行了计算, 而这个表中的数据是对油藏温度下作为压力函数输入的二氧化碳溶解度数据进行内部变换得来的。

针对实际地质情况, 2003年, Cicek在天然裂缝油藏系统中进行了二氧化碳注入非等温模拟^[7]。模型描述了基质和裂缝2套渗流系统, 但本质还是改进的黑油模型。模型的主体是三维四相物质平衡方程, 考虑单孔单渗和双孔双渗。烃在油藏中被分为轻烃、中间烃和重烃3个视组分。两相方程决定物质在油气间及气固间的传质。该模型能够描述物理传质及天然裂缝系统。

除此之外, 李东霞等也对基于黑油模型的二氧化碳非混相驱模型进行了拓展研究^[8]。

1.2 传输—扩散模型(溶剂模型)

传输—扩散模型的实质与改进的黑油模型相似, 只在模型中将二氧化碳作为溶剂相用以描述二氧化碳和油之间的传输—扩散效应。

模型只需油、水、溶解气和溶剂的守恒方程, 不

分析流动的精细结构, 用考虑弥散效应的经验混合规则来考虑油与溶剂的部分混合, 假设流动为层流, 恒温, 液体且有非挥发性, 油不溶于水, 相间存在热力平衡, 并且无固体析出。

油相、水相、溶解气相和溶剂相的质量守恒方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_o}{B_o} \right) = \nabla \left(\frac{K K_{ro}}{\mu_o B_o} \nabla \Phi_o \right) - \frac{q_o}{\rho_{osc}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{S_w}{B_w} \right) = \nabla \left(\frac{K K_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w \right) - \frac{q_w}{\rho_{wsc}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_w}{B_s} + \frac{R_{so} S_o}{B_o} \right) \right] = \nabla \left[K \left(\frac{K_{rs}}{\mu_s B_s} \nabla \Phi_s + \frac{R_{so} K_{ro}}{\mu_o B_o} \nabla \Phi_o \right) \right] - \frac{q_s}{\rho_{ssc}} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_g}{B_g} + \frac{R_{go} S_o}{\mu_o B_o} + \frac{R_{gw} S_w}{\mu_w B_w} \right) \right] = \nabla \left[K \left(\frac{K_{rg}}{\mu_g B_g} \nabla \Phi_g + \frac{R_{go} K_{ro}}{\mu_o B_o} \nabla \Phi_o + \frac{R_{gw} K_{rw}}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w \right) \right] - \frac{q_g}{\rho_{gsc}} \quad (7)$$

式中: q_o 为原油源汇项, m^3/d ; ρ_{osc} 为原油标准态密度, kg/m^3 ; B_w 为地层水体积系数; K_{rw} 为水的相对渗透率; μ_w 为地层水粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; q_w 为地层水源汇项, m^3/d ; ρ_{wsc} 为地层水标准态密度, kg/m^3 ; ρ_{ssc} 为溶解气的标准态密度, kg/m^3 ; B_g 为气体体积系数; R_{go} 为气油比; R_{gw} 为气水比; K_{rg} 为气的相对渗透率; μ_g 为气体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; Φ_g 为气相相势; q_g 为气体源汇项, m^3/d ; ρ_{gsc} 为气体的标准态密度, kg/m^3 。

此模型最早是在1972年由Todd^[9]在Koval等^[10]的研究成果上, 考虑油、水、溶解气和溶剂4个组分建立的。李菊花等也对其进行了研究^[11]。其后, 由于近组分模型的出现, 传输—扩散模型逐渐被气液平衡常数模型代替。

1.3 近组分模型(气液平衡常数模型)

以上几种模型均不能完整描述二氧化碳驱的组分及相态性质的变化, 因此后来的学者建立了气液平衡常数模型(K Value模型)对驱替过程进行描述^[12], 其特点是: 本构方程符合全组分模型; 相态计算过程中为了简化求解, 给出气液平衡常数的经验公式进行拟合。这一模型较好地解决了组分模型的本构模型。流动体系的质量守恒方程和能量守恒方程分别为

$$\frac{\partial A^k}{\partial t} = F^k + q^k \quad k=1,2,3,\dots,N_c \quad (8)$$

$$\frac{\partial A^{N_c+1}}{\partial t} = F^{N_c+1} + q^{N_c+1} \quad (9)$$

式中: A^k 为单元体内组分累积项; k 表示第 k 个组分; F^k 为单元体内组分流动交换项; q^k 为单元体内组分源汇项, m^3/d ; N_c 为组分数。

辅助方程中在处理气液平衡常数时采用的是适用于烃类的气液平衡常数,用经验公式^[13]给出,不参与迭代计算。

近组分模型的实质是全组分模型在相态计算部分的简化,在国外相当长的一段时间内占据主导地位,美国的得克萨斯大学奥斯汀分校、得克萨斯 A&M 大学以及科罗拉多矿业大学等几个大学对这方面的研究比较深入。在中国,1998年张茂林等^[14]也进行了较细致的研究,并在反凝析气藏中进行了应用。

1.4 全组分模型(闪蒸计算模型)

近组分模型中,由于气液平衡常数的人为拟合,会造成组分计算的误差,因此,利用闪蒸过程模拟气液平衡的算法(闪蒸计算)还是常被使用。闪蒸计算模型^[15]是完全的纯组分模型,不存在对组分计算过程的省略和简化,因而更符合实际情况。

全组分模型的控制方程形式与近组分模型相同(参考近组分模型)。

辅助方程中加入表征组分的 Rachford-Rice 方程

$$\sum_{k=1}^{N_c} (y_k - x_k) = \sum_{k=1}^{N_c} \frac{z_k(K_k - 1)}{1 + V(K_k - 1)} = 0 \quad (10)$$

限制条件为

$$\begin{cases} L + V = 1 \\ Lx_k + Vy_k = z_k \\ \sum_{k=1}^{N_c} x_k = \sum_{k=1}^{N_c} y_k = \sum_{k=1}^{N_c} z_k = 1 \\ K_k = \frac{y_k}{x_k} \end{cases} \quad (11)$$

式中: x_k , y_k , z_k 分别为第 k 个组分的液相、气相和总体的摩尔分数; K_k 为第 k 个组分的气液平衡常数; V 为气相摩尔体积, mol ; L 为液相摩尔体积, mol 。

通常总摩尔组成 (z_i) 与压力或者温度,或者温度与气体摩尔分数是已知的,在泡点和露点压力时, $V=0$ 或 $V=1$,仅存在 K 与压力 (p) 2个未知量,估算 K ,可以求解 Rachford-Rice 方程。

对特定压力、温度及组成 i 的流体进行稳定实验,如果存在两相,需要估算 K 值,应用热动力学平

衡的气液逸度平衡。通过相平衡时气相液相逸度相等的条件,可以得到

$$f_k^L = f_k^V \Rightarrow px_k \phi_k^L = py_k \phi_k^V \Rightarrow K_k = \frac{y_k}{x_k} = \frac{\phi_k^L}{\phi_k^V} \quad (12)$$

式中: f_k^L 和 f_k^V 分别为第 k 个组分的液相和气相逸度; ϕ_k^L 和 ϕ_k^V 分别为第 k 个组分的液相和气相逸度系数。

进行牛顿迭代求解,每迭代一次,通过逸度平衡计算求取新 K 值。牛顿迭代残差为

$$R_k = \ln K_k + \ln \phi_k^V + \ln \phi_k^L \quad i=1,2,\dots,N \quad (13)$$

式中: R_k 为第 k 个组分的牛顿迭代残差。

全组分模型在二氧化碳驱中的应用可追溯到1972年, Van-Quy 等^[16]引入一维两相组分模型描述二氧化碳驱过程,忽略重力和毛管压力。通过应用三分量公式,保证了临界点附近相组成和性质的连续性,同时结合实验对比多次接触混相的一维模拟结果。闪蒸计算模型在混相驱中的应用源自1973年 Metcalfe 等^[17]的研究,分别应用于模拟多级接触混相驱和蒸发气驱。针对模型相态计算部分, Fussell 等^[18]在1978年基于 Redlich-Kwong 状态方程,应用迭代方法计算相平衡。

为了突破上述组分模型的一维条件,1980年 Coats^[19]建立了三维三相组分模型,考虑粘性指进、重力等影响,用状态方程计算相平衡。重点研究了临界点附近多次接触混相过程中的相态变化,忽略分子扩散作用。针对渗流过程中水相的处理, Nghiem 等^[20]在1981年基于 Nolen 的组分模型,对水组分方程进行变换,利用迭代求解油相压力、水相饱和度及总摩尔分数,利用相平衡计算油、气组成及饱和度,并重复计算至收敛。施文等^[21]在1995年研究了一维三相全组分混相驱模型,该模型考虑了临界点附近闪蒸计算的收敛性、混相驱过程中的组分分配、相态变化等过程。

刘昌贵等^[22]在2002年总结了多相渗流的几种数学模型,重新梳理组分模型,利用多组分混合物来描述油、气、水三相,并写出每一组分的守恒方程,用状态方程计算闪蒸相平衡。沈平等^[23]在2009年对二氧化碳混相驱油机理进行了室内实验研究,并建立了考虑相间传质的一维多相多组分数学模型。模型考虑油、气、水三相,满足达西定律,水组分不参与传质。同时,该模型被用于研究混相相态变化规律及渗流特征。

1.5 新型组分模型

全组分模型虽然能够较好地表征二氧化碳驱

过程中的各种现象,但是也存在一定的缺陷:由于考虑组分变化过程中的因素较多,造成了方程形式复杂、参数数量繁多、求解过程繁琐,并且相态计算部分无法对地质因素进行较好得考虑。因而在2000年之后,研究者把更多的精力放在了对组分模型的精简和快速求解以及考虑实际条件方面。研究主要分为4小类:①用拟组分代替全组分精简方程数量;②用流线法加快求解速度;③实际流体条件,包括二氧化碳溶解性、热力学平衡、粘度修正、粘性指进等;④实际油藏条件,包括非均质性、各向异性和重力效应压缩性等。

针对粘性指进现象,Rubin和Blunt等建立了描述粘性指进的组分模型^[24-25]。在考虑地层均质的情况下,忽略重力、毛管压力以及扩散作用的影响,指进区域只由总流度比决定,利用Koval模型描述一次接触混相指进前缘有效流度。李东霞等也针对粘性指进的问题进行了进一步研究^[26]。

2006年,Bennion等研究了界面张力和毛管压力分布或毛管压力对二氧化碳—盐水系统中二氧化碳相对渗透率的影响^[27]。总结了10多种硅酸盐岩及碳酸盐岩的孔隙的大小、毛管压力和界面张力对相对渗透率的影响。

二氧化碳注入地层后,因与原油接触程度以及注入条件的不同,大部分都介于完全混相与非混相之间。此时,二氧化碳与原油间界面张力虽减小却仍存在,被称为近混相或者部分混相。针对这一实际情况,加拿大学者曾对Steelman储层进行过详细的二氧化碳近混相驱实验室研究,得出关于最小混相压力的一系列结论。2005年和2006年,加拿大的LaForce等建立了三相近混相数学模型,考虑一维扩散的质量守恒方程,并进行了实验分析^[28-30]。此方法虽然建立了三相流动时的数学模型,但是并没有考虑对于二氧化碳在驱替过程中引起的驱替相以及被驱替相流动性质的变化,比如二氧化碳粘度的修正、原油在溶解二氧化碳后粘度的修正。之后又出现了用近混相假设来改进受粘性指进控制的驱替模型。

2009年,秦积舜等^[31]针对流体在油藏中流动的实际条件,对二氧化碳—原油在多孔介质中的复杂流态进行了研究,并导出其运动方程。这一成果在当年的中国力学学会学术大会上发表。

张烈辉等^[32]在1999年提出了拟四组分混相驱油模型,兼有黑油模型稳定性好和多组分模型可模拟凝析气藏和混相驱的部分优点。2002年,朱维耀等^[33]建立了热力学平衡组分方程。模型假设:满足

达西定律;等温渗流;考虑组分相间传质及相态变化,相平衡瞬间完成;体系含多个拟组分;水组分单独处理,不参与传质;考虑可压缩性、重力效应、各向异性等对相对渗透率的影响。2004年,侯健等^[34]基于流线方法建立了二氧化碳混相驱数学模型。模型假设:考虑油、水和二氧化碳三组分;油和二氧化碳一次接触混相;完全混相时,只含水和烃类混合物两相,但油和二氧化碳仍具各自的分流量;忽略岩石和流体压缩性;达西渗流;忽略重力、毛管压力;平面均质、层间非均质。模型所需参变量较少,计算量小,并能够对边界进行较好处理。同时,修正相对渗透率曲线和有效粘度。2006年,张小波^[35]对蒸气—二氧化碳—助剂吞吐开采技术进行了研究,包括二氧化碳—稠油的热物性特征研究,概括了二氧化碳的溶解度公式和由此修正原油粘度的公式;研究指出,二氧化碳溶解度主要取决于温度和压力,受原油密度影响较小。2007年,郭平等^[36]对低渗透砂岩注二氧化碳混相条件进行了研究,介绍了细管实验条件、油藏温度、注入气组成及原油的组成与性质对混相压力的影响,并针对中国地层温度高和地面原油粘度大的现状,提出开展降低最小混相压力技术及加强防止气体突破技术研究的建议。

此后,中国石油大学^[37]和中国石油勘探开发研究院采收率所^[38]等也分别对低渗透条件下的二氧化碳提高采收率方法进行了研究。

2 二氧化碳驱数学模型特点

以黑油模型为基础的二氧化碳非混相驱模型是在修正黑油模型流体参数基础上建立的二氧化碳驱数学模型,将二氧化碳看作多维多相模型中的一相,与油、气、水并列,相之间不发生传质,能够较好地模拟二氧化碳非混相驱过程。

以黑油模型为基础的二氧化碳混相驱模型对流动结构和组分变化没有加以考虑,仍然采用黑油模型的控制方程,用混合参数近似处理粘度关系,能够模拟各种指进现象,以及指进对面积驱扫效率起控制作用的首次接触混相驱过程,其优点表现在模型较为简单、计算量小、稳定性好、能够较好地吻合实际的混相驱过程;但只能近似地模拟二氧化碳驱,不能充分体现出传输—扩散的机理和过程,精度较差,对混合参数需要作适当评估是模型的缺点。与组分模型相比,该模型更适合于描述分散作用,而不是相态传质。

二氧化碳驱传输—扩散模型把流体人为分成油和溶剂2种组分,并考虑较强的扩散作用,对混相驱的过程有一定的适应性,但该模型未充分描述和修正流体的性质,不能真正反应二氧化碳驱过程中流体相间和组分间的变化,并且驱替前缘求解过程中存在严重数值弥散。

二氧化碳驱近组分模型(以K Value模型为主)是在传输—扩散模型之后发展起来的用于组分计算的模型,其计算方式与纯组分模型类似,只是在平衡常数 K 的迭代上有所简化,即只赋予 K 一个与压力、温度和组分相关的计算公式,而不用参与迭代修正。该模型的平衡常数 K 会随着模型参数变化,并且计算量较小,适合在实验回归出K Value方程的快速计算,但是由于没有进行逸度方程以及气液平衡常数等的迭代求解,对于组分的描述不十分准确。

二氧化碳驱全组分模型(以闪蒸计算模型为主)能够较好地模拟传质与组分变化,可以模拟气化、凝析、膨胀等过程,同时能够考虑相态、多次接触混相等过程。然而,组分模型虽对二氧化碳驱的描述较准确,却也存在一定局限。对于二氧化碳复杂的驱油过程及二氧化碳按照分子极性和摩尔质量分级抽提原油的过程,考虑不完善。同时,缺少对流体密度和粘度等参数的修正。

二氧化碳驱新型组分模型同时兼有组分模型和黑油模型的双重优势,可以在模拟传质与组分变化的基础上提高计算速度;又将诸多实际条件加入研究范围,可以考虑二氧化碳的溶解性、岩石和流体的压缩性、地层的非均质性和各向异性、流体的重力效应以及流体密度、粘度、溶解度和相对渗透率的修正等。就实用效果而言,新组分模型更符合实际应用。

3 发展方向

地质表征 加入更多表征地质条件的参数,将组分模型放入多孔介质而非PVT釜中进行计算,考虑毛管压力、微尺度效应的影响以及不等温渗流过程。

流体拟组分和相数的划分 发展更实用的拟组分划分方法,减少参与计算的组分数;同时考虑三维多相的模型,对于二氧化碳驱油过程中因为萃取生成的重组分和因为反应生成的随流体流动的沉淀都可分别作为单独的相加以考虑。

相态计算 修正相态方程并使之能够与实际情况接近,寻求更好的计算三相相对渗透率的方法。

化学反应的加入 对二氧化碳与原油或储层间的化学反应进行表征,考虑其中的能量交换。

实用方法应用 应用图版法和查表法加快模型的计算速度,对各种不同组分的配样进行模拟的时候,不断学习,形成图版和表格,这样在遇到新的计算样本时可以进行查表或与图版比对之后,不经过或少经过计算便可以得到结果。

模型精度提高 利用高阶有限元,提高模型的数学精度。

4 结束语

二氧化碳驱提高采收率是较为有效的利用和减少二氧化碳排放的措施,并且能够较大幅度提高原油采收率,是适合中国环保、能源工业和经济需要的一举多得的措施。

黑油模型是二氧化碳驱渗流模型的基础,包含物质平衡方程、渗流方程、动量守恒方程、能量守恒方程、状态方程、控制方程等;之后,无论是溶剂模型、K Value模型还是组分模型都是以此为基础发展的,而现有的数值模拟软件Eclipse, CMG, VIP等的核心都有相当一部分是黑油模型。因而,虽然在描述二氧化碳驱的过程中,组分模型占据主要地位,黑油模型仍然是不可缺少的基础,还需要进一步研究发展。

对于一相划为1个组分的情况(如油、气、水三相分为油、气、水3个组分),修正的黑油模型更为适用;对于组分间传质现象不明显的情况,K Value模型可以达到较好的计算精度,并且对于多个组分的计算速度更有保障;对于组分间传质现象十分强烈的情况,应用全组分模型计算精度更好;而新型组分模型能够在计算精度与计算速度中找到平衡点,适用于实际应用。

参考文献:

- [1] 江怀友,沈平平,卢颖,等. CO₂提高世界油气资源采收率现状研究[J].特种油气藏,2010,17(2):5-10.
- [2] Khatib A K, Earlougher R C. CO₂ injection as an immiscible application for enhanced recovery in heavy oil reservoirs [C].SPE 9928-MS,1981.
- [3] Whorton L P, Brownscombe E R, Dyes A B. Method for producing oil by means of carbon dioxide.US,2623596[P].1952-12-30.

- [4] 吴忠宝,甘俊奇,曾倩.低渗透油藏二氧化碳混相驱油机理数值模拟[J].油气地质与采收率,2012,19(3):67-70.
- [5] Fong W S, Sandler S I, Emanuel A S. A simple predictive calculation for the viscosity of liquid phase reservoir fluids with high accuracy for CO₂ mixtures[J].SPE Journal, 1996, 1(3): 243-250.
- [6] Chang Yih-Bor Coats, Brian K Nolen, James S.A compositional model for CO₂ floods including CO₂ solubility in water[C].SPE 35164, 1996.
- [7] Cicek O.Compositional and non-isothermal simulation of CO₂ sequestration in naturally fractured reservoirs/coalbeds: development and verification of the model[C].SPE 84341-MS, 2003.
- [8] 李东霞,苏玉亮,高海涛,等.CO₂非混相驱油过程中流体参数修正及影响因素[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(5):104-108.
- [9] Todd M R, Longstaff W J.The development, testing, and application of a numerical simulator for predicting miscible flood performance [J].Journal of Petroleum Technology, 1972, 24 (7) : 874-882.
- [10] Koval E J.A method for predicting the performance of unstable miscible displacement in heterogeneous media [J].SPE Journal, 1963, 3(2):145-154.
- [11] 李菊花,杨红梅,刘滨,等.油藏注气混相驱考虑扩散作用的数值模拟研究[J].油气地质与采收率,2010,17(6):54-57.
- [12] Jim Douglas Jr, D W Peaceman, H H Rachford Jr.A method for calculating multi-dimensional immiscible displacement [C].SPE 1327-G, 1959.
- [13] Bashbush J L. A method to determine K-Values from laboratory data and its applications [C]. SPE 10127-MS, 1981.
- [14] Zhang Maolin, Mei Haiyan, Sun Liangtian, et al. A K-Value compositional model for a retrograde condensate reservoir [C].SPE 39982-MS, 1998.
- [15] Donald F Othmer, L H Teneyck, S Tolin.Equilibrium flash vaporization of petroleum crudes or fractions[C].SPE 4203, 1951.
- [16] Van-quy N, Simandoux P, Corteville J.A numerical study of diphasic multicomponent flow [J].SPE Journal, 1972, 12 (2) : 171-184.
- [17] Metcalfe R S, Fussell D D, Shelton J L. A multicell equilibrium separation model for the study of multiple contact miscibility in rich-gas drives[J].SPE Journal, 1973, 13(3): 147-155.
- [18] Fussell D D, Yanosik J L. An iterative sequence for phase-equilibria calculations incorporating the Redlich-Kwong Equation of State[J].SPE Journal, 1978, 18(3): 173-182.
- [19] Coats Keith H. An equation of state compositional model[J].SPE Journal, 1980, 20(5): 363-376.
- [20] Nghiem L X, Fong D K, Aziz K. Compositional modeling with an equation of state (includes associated papers 10894 and 10903) [J].SPE Journal, 1981, 21(6): 687-702.
- [21] 施文, 桓冠仁, 李福恺.一维三相全组份混相驱模型及其应用[J].石油学报, 1995, 16(4): 75-82.
- [22] 刘昌贵, 孙雷, 李士伦.多相渗流的几种数学模型及相互关系[J].西南石油学院学报, 2002, 24(1): 64-66.
- [23] 沈平平, 黄磊.二氧化碳-原油多相多组分渗流机理研究[J].石油学报, 2009, 30(2): 247-251.
- [24] Rubin Barry, Barker J W, Blunt M J, et al.Compositional reservoir simulation with a predictive model for viscous fingering [C].SPE 25234-MS, 1993.
- [25] Blunt M J, Barker J W, Barry Rubin, et al.Predictive theory for viscous fingering in compositional displacement [J].SPE Reservoir Engineering, 1994, 9(1): 73-80.
- [26] 李东霞, 苏玉亮, 高海涛, 等.二氧化碳非混相驱油粘性指进表征方法及影响因素[J].油气地质与采收率, 2010, 17(3) : 63-66.
- [27] Bennion D B, Bachu S.Dependence on temperature, pressure, and salinity of the IFT and relative permeability displacement characteristics of CO₂ injected in deep saline aquifers [C].SPE 102138-MS, 2006.
- [28] LaForce T, Johns R T. Effect of quasi-piston-like flow on miscible gasflood recovery [C].SPE 93233-MS, 2005.
- [29] LaForce Tara, Johns Russell T.Composition routes for three-phase partially miscible flow in ternary systems [J].SPE Journal, 2005, 10(2): 161-174.
- [30] LaForce T, Cinar Y, Johns R T, et al. Experimental confirmation for analytical composition routes in three-phase partially miscible flow [C].SPE 99505-MS, 2006.
- [31] 秦积舜, 陈兴隆, 张可.CO₂-原油在多孔介质中复杂流态的运动方程[C]. 郑州: 中国力学学术大会, 2009.
- [32] 张烈辉, 张红梅, 鲁友常.模拟混相驱动态的拟四组分模型[J].西南石油学院学报, 1999, 21(4): 64-66.
- [33] 朱维耀, 鞠岩.强化采油油藏数值模拟基本方法[M].北京: 石油工业出版社, 2002.
- [34] 侯健.一种基于流线方法的CO₂混相驱数学模型[J].应用数学和力学, 2004, 25(6): 635-642.
- [35] 张小波.蒸汽-二氧化碳-助剂吞吐开采技术研究[M].石油学报, 2006, 27(2): 80-84.
- [36] 郭平, 李苗.低渗透砂岩油藏注CO₂混相条件研究[J].石油与天然气地质, 2007, 10, 28(5): 687-692.
- [37] 程林松, 李春兰, 陈月明.CO₂在水中溶解的数值模拟方法[M].石油大学学报: 自然科学版, 1998, 22(2): 38-40.
- [38] 杨永智, 沈平平, 宋新民, 等.盐水层温室气体地质埋存机理及潜力计算方法评价[J].吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(4): 744-748.