

doi:10.3799/dqkx.2013.083

# 多孔介质中水气交替注入微观渗流模拟

杨永飞, 尹 振, 姚 军\*, 李亚军, 王晨晨

中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580

**摘要:** 针对水气交替注入(water-alternating-gas, WAG)过程中, 油气水三相渗流的微观机理认识不足和油气水三相流体在多孔介质中分布规律认识不准确等问题, 基于三维孔隙网络模型, 应用孔隙级模拟方法, 从微观角度模拟了不同润湿性多孔介质中的 WAG 驱替过程。结果表明: 连通性较好的多孔介质中, 原油主要在前两轮的 WAG 循环中被驱替出来; 在前两轮 WAG 驱替之后, 流体饱和度和分布规律达到比较稳定的状态, 但在完全水湿模型中油相仍然在多孔介质中流动。得出的 WAG 驱替过程中各相流体饱和度的变化规律、各相流体分布规律和驱替类型, 较好地阐述和解释了多孔介质中的微观驱替机理。

**关键词:** 水气交替注入; 微观机理; 三相流; 三维孔隙网络模型; 多级驱替链; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2013)04-0853-06

收稿日期: 2013-01-10

## Pore-Scale Simulation of Microcosmic Flow during Water-Alternating-Gas (WAG) in Porous Media

YANG Yong-fei, YIN Zhen, YAO Jun\*, LI Ya-jun, WANG Chen-chen

School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

**Abstract:** In order to better understand the pore-scale physics of three phase flow during water-alternating-gas (WAG) injection, we simulate the WAG process in different wettability systems based on a 3-D pore-scale network model in this study, and the saturation paths, occupancy statistics and displacement statistics are obtained. The results show that oil is almost displaced during the first 2 WAG cycles; then, saturation and occupancy statistics of fluids reach a steady condition; the existence of double and multiple displacement chains enhances oil recovery. The obtained fluid saturation variation, fluid distribution and displacement type during WAG give good interpretation for the micro displacement mechanism in porous media.

**Key words:** water-alternating-gas; pore-scale physics; three-phase flow; 3-D network model; multiple displacement chain; petroleum geology.

## 0 引言

自 20 世纪 50 年代, 水气交替注入(water-alternating-gas, WAG)就已经作为一种提高原油采收率的技术得到了工业化应用。Christensen *et al.* (1998)统计了 1957—1996 年之间全世界所实施的 59 个 WAG 项目, WAG 项目总数量呈逐年递增的趋势。1996 年之后, 特别是进入 21 世纪以来, 国内外有越来越多的油田进行了 WAG 的现场应用。如:

西委内瑞拉油田(Manrique *et al.*, 1998)、新疆的葡北油田(Yang *et al.*, 2000)、马来西亚的杜兰(Dulang)油田(Nadeson *et al.*, 2004)、安哥拉的基松巴(Kizomba)B 油田(Mane, 2007)等。

水气交替注入(WAG)通过控制流体流量, 减少气和水的窜流, 可以提高驱替相的驱油效率; 气体可以通过较小的孔道驱油, 而水可以通过较大的孔道驱油, 二者相互配合提高了总的波及面积。水气交替注入虽然已经在世界上 60 多个油田成功应用, 但是

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. 11072268, 51234007); 教育部科学技术研究重大项目(No. 311009); 山东省自然科学基金(No. ZR2011EEQ002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 11CX04022A); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(No. 20120133120017); 长江学者和创新团队发展计划资助(No. IRT1294)。

**作者简介:** 杨永飞(1982), 男, 讲师, 博士, 从事油气田开发相关科研和教学工作。E-mail: feiyongyang@163.com

\* **通讯作者:** 姚军, E-mail: reogfr\_upc@126.com

人们对于它的孔隙级传输物理过程和提高采收率的机理却没有完全掌握,因为这其中涉及到复杂的油气水三相渗流问题。

国内有些学者从宏观角度进行了 WAG 的数值模拟,李华昌等(2000)考察了水气比、注入段塞、注入次序、渗透率、注入水的粘度和密度等对采收率的影响。杨永飞等(2010b)研究了水湿油藏中油气水三相渗流的模拟后得出:在每次驱替之后,油气水的分布表现为水相占据小孔隙,气相占据大孔隙,油相占据中间孔隙;并得出了各相流体的相对渗透率与流体饱和度的关系。在国外,Pereira(1999)定性的描述了水驱后气驱流动特征,结果表明二级驱替链( $g \rightarrow w \rightarrow o$ )在驱动过程中占据较大的比例。Van Dijke *et al.* (2004, 2006, 2010)对 Sohrabi *et al.* (2004)的水气循环交替注入实验结果进行了孔隙级模拟,分析了三相流体分布、原油采收率、多级驱替链类型和驱替链的长度。Dong *et al.* (2005)研究了水湿微观模型中存在大量油相铺展层的 WAG 实验,WAG 过程可以大幅降低剩余油,主要原因是部分剩余油被气相驱替到了含水孔隙中,再次注水后,水相又将这些剩余油驱替出来。本论文应用三维孔隙网络模型,对不同的多孔介质在 WAG 过程中的微观渗流规律进行了研究。

## 1 三维孔隙网络模型

进行水气循环交替注入微观模拟研究,需要对三相渗流机理有全面的认识。三维孔隙网络模型是进行 WAG 微观渗流模拟研究的重要方法之一,课题组应用此模型已经进行了三相微观渗流理论初步研究,取得了较理想的结果(杨永飞等,2010b)。基于相同的研究方法,针对常规砂岩油藏,本文建立了完全水湿介质的 WAG 三维孔隙网络模型,称为基础模型(base case, BC)。为了揭示润湿性的影响规律,同时设计了混合润湿模型(MWL, MWS)和接触角分布模型(DCA)进行对比研究。具体模型(图 1)参数如下。

(1) 孔隙尺寸:孔隙半径  $r$  服从指数分布函数

$$f(r) = \frac{e^{-\frac{r}{\beta}}}{\beta(e^{\frac{r_{\max}}{\beta}} - e^{\frac{r_{\min}}{\beta}})} . \text{ 最小孔隙半径 } r_{\min} = 5 \times$$

$10^{-6} \text{ m}$ , 最大孔隙半径  $r_{\max} = 25 \times 10^{-6} \text{ m}$ , 属于常规砂岩孔喉半径范畴(Van Dijke *et al.*, 2004)。

(2) 孔隙配位数  $Z=4$ , 体积指数为 1, 传导率指

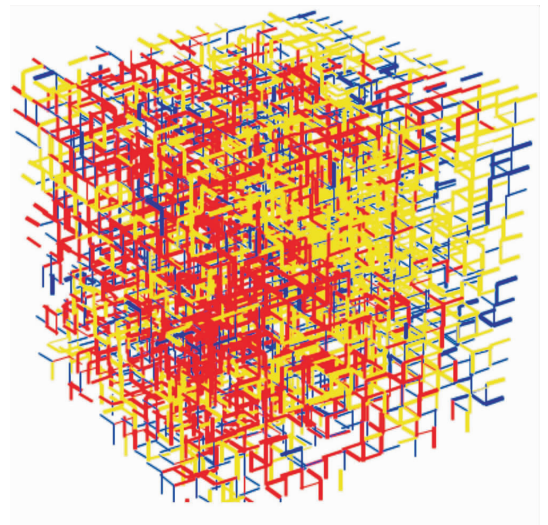


图 1 三维孔隙网络模型

Fig. 1 Three-dimensional pore network model

表 1 不同模型的油水接触角数值

Table 1 Contact angle of pores in the three models

模型方案	油水接触角( $\theta_{ow}$ )
基本模型(Base Case, BC)	0
混合润湿模型 A(MWL)	0, 140
混合润湿模型 B(MWS)	0, 140
接触角分布模型(DCA)	0~30

MWL: 水湿孔隙  $r \leq 15 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,  $\cos\theta_{ow} = 1$ ; 油湿孔隙  $r \geq 15 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,  $\cos\theta_{ow} = -0.77$ . MWS: 水湿孔隙  $r \leq 15 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,  $\cos\theta_{ow} = -0.77$ ; 油湿孔隙  $r \geq 15 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,  $\cos\theta_{ow} = 1$ . 油水接触角分布模型(DCA): 接触角在所有孔隙中随机分布,  $0.5 \leq \cos\theta_{ow} \leq 1$ . 目标饱和度定义为每一次驱替后驱替相的饱和度, 每次驱替的目标饱和度和为 1, 其他 3 个模型每次驱替的目标饱和度根据 BC 模型设定。

数为 2。

(3) 参考文献(van Dijke *et al.*, 2004), 流体的界面张力 (IFT) 设为:  $\sigma_{go} = 24 \text{ mN/m}$ ,  $\sigma_{ow} = 32 \text{ mN/m}$ ,  $\sigma_{gw} = 48 \text{ mN/m}$ 。

(4) 已知油水接触角余弦值, 气油接触角和气水接触角可以根据以下的公式计算。

$$\cos\theta_{go} = \frac{1}{2\sigma_{go}} \{C_{s,o} \cos\theta_{ow} + C_{s,o} + 2\sigma_{go}\}, \quad (1)$$

$$\cos\theta_{gw} =$$

$$\frac{1}{2\sigma_{gw}} \{ (C_{s,o} + 2\sigma_{ow}) \cos\theta_{ow} + C_{s,o} + 2\sigma_{go} \}, \quad (2)$$

其中, o 表示油相, g 表示气相, w 表示水相;  $\cos\theta_{ow}$ ,  $\cos\theta_{go}$  和  $\cos\theta_{gw}$  分别表示相应两相的接触角余弦值;  $\sigma_{ow}$ ,  $\sigma_{go}$  和  $\sigma_{gw}$  分别表示相应两相的平衡界面张力, 单位:  $\text{mN/m}$ ;  $C_{s,o}$  为油相铺展系数,  $C_{s,o} = \sigma_{gw} - \sigma_{go} - \sigma_{ow}$ , 单位:  $\text{mN/m}$ 。

(5)对于模型设计 4 轮 WAG 循环,依次为:第一次水驱(W1)→第一次气驱(G1)→第二次水驱(W2)→……→第四次水驱(W4)→第四次气驱(G4). 模型初始状态为 100%饱和油.

(6)为了研究不同润湿条件下的 WAG 渗流规律,根据参考文献中润湿性的定义和划分方法,本文设定了 4 种润湿性模型用来模拟不同的油藏润湿条件(Buckley *et al.*, 1996; Van Dijke *et al.*, 2010),具体参数详见表 1.

## 2 模拟结果分析

### 2.1 饱和和路径分析

图 2 绘制了各个模型在 WAG 过程中流体饱和度的变化过程. 为方便模型间的对比,根据 BC 模型的饱和路径,设定了 MWL、MWS 和 DCA 模型的目标饱和度. 从图 2 中,可以看出所有模型中大部分的原油都是在第一次水驱过程中被驱替出来的,第一次气驱和第二次水驱也驱替了微量的油;除 MWL 外,其余模型在随后的驱替过程中,很少原油被驱替出来. BC 模型在每次气驱之后,水相饱和度都变成了 0,这是因为 BC 模型为完全水湿体系,水为连续润湿相,连续存在的水相润湿膜使得气相可以完全把水相驱替出来. 下文的分析中还可以得出,后两轮的 WAG 驱替主要是改变了各个体系中的流体在模型内部的分布,而每次驱替之后的流体饱和度变化不大.

图 3 给出了各个模型在每一次驱替之后的油相饱和度的变化规律. 从图 3 中可以更明显看出,原油主要在前两轮 WAG 中被驱替出来(对于模型 BC、MMS、DCA,油相在 W2 后就基本停止产出). 第二次气驱中,模型 MWL 的剩余油饱和度有了大幅的降低,而另外 3 个模型的剩余油饱和度基本不变. 经过对比发现,剩余油饱和度与模型的润湿程度有很大的关系,最终的剩余油饱和度关系为: MWS > DCA > BC > MWL.

下面从流体微观分布规律和多级驱替过程 2 个方面来分析上述现象产生的原因.

### 2.2 流体微观分布规律

为了更加直观和深入的研究 WAG 注入过程中的驱替机理,理解各相流体的流动状态,研究分析了每次驱替之后各相流体在孔隙中的分布规律.

图 4 给出了 BC 模型在第一次注气过程中各相流体在不同尺寸孔隙中的分布变化规律. 第一次水

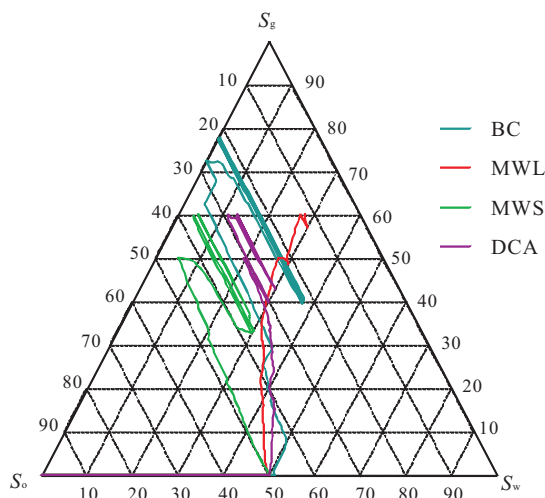


图 2 饱和路径图的对比(%)

Fig. 2 Saturation paths comparison

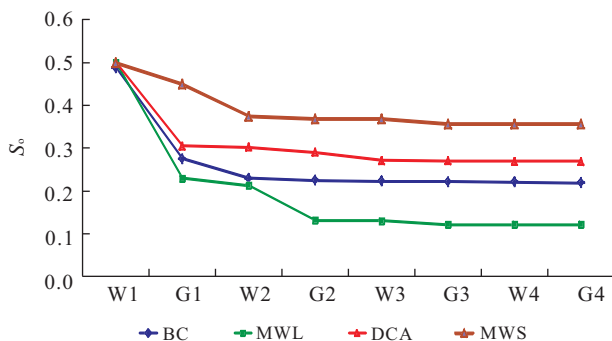


图 3 WAG 过程中剩余油饱和度变化

Fig. 3 Residual oil saturations during WAG for the three models

驱之后,该模型中的剩余原油只残留在较大的孔隙中. 注气后,该部分原油被驱替到小孔隙中,气体占据了大孔隙空间. 值得注意的是,气体将全部的水都驱替了出来. 此外,在后几轮的 WAG 循环中,每一次注气之后水相均完全被驱替出来.

在第一次注气过程中,气体首先进入半径较大的孔隙,将原油驱替出模型. 根据:

$$P_{e,g}(r) = P_o + \frac{2\sigma_{go} \cos\theta_{go}}{r}, \quad (3)$$

其中,  $P_{e,g}(r)$  为气相的入口压力,MPa;  $P_o$  为被驱替的油相压力,MPa. 由式(3)可知,这是由大孔隙的毛细管入口阻力低造成的,这也是第一次气驱的前半过程有原油采出的原因. 此外,参照图 5 和图 6 可以看出,与此同时一部分原油也以  $g \rightarrow o$  或  $g \rightarrow o \rightarrow w$  的形式进入小孔隙中,同时水相完全为被驱替相. 故而,当第一次注气之后,原油基本完全分布在小孔隙中,而连续的水相完全被驱替出来.

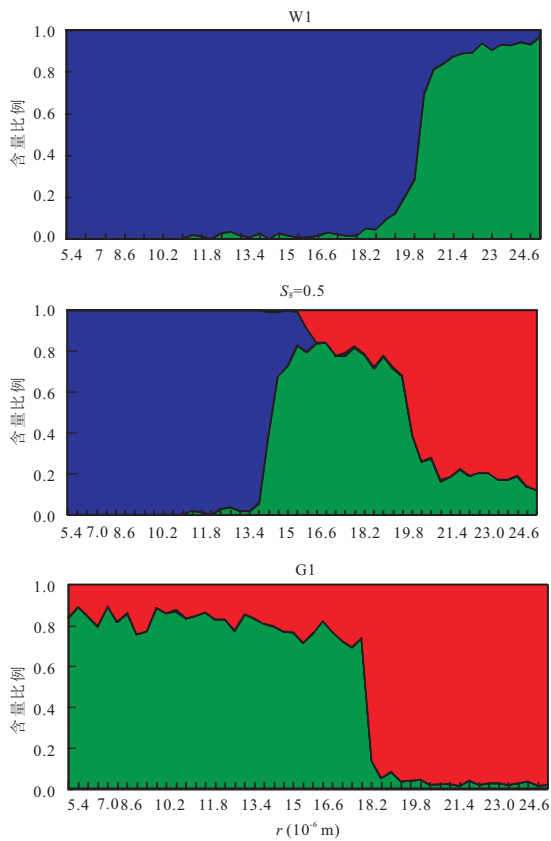


图 4 BC 模型在第一次气驱过程中流体的分布规律(蓝色代表水,红色代表气,绿色代表油;下同)

Fig. 4 Occupancy statistics of BC model during the 1st gas flood

对于第一次注气后的另外 3 组模型: MWL 模型中,水相依然保留在半径  $r < 15 \times 10^{-6}$  m 的孔隙中,并未被气相和油相侵入,同时在油湿的大孔隙中,有少量的水以水簇的形式分散残留;原油仍然主要分布在较大的油湿孔隙中. MWS 模型中的流体分布与 MWL 模型截然相反,只有大孔隙中的少量原油被采出,  $r < 15 \times 10^{-6}$  m 的小孔隙中的油相在整个过程中未发生运动,反而大孔隙中的水相被采出. 在 DCA 模型中,流体规律的分布介于强水湿模型和混合润湿模型之间;其油气水三相的分布规律类似于 MWL 模型,但是三相分布对应的孔隙尺寸的范围都更为广泛. 此外, MWL 模型和 DCA 模型的流体分布规律与强水湿模型截然不同.

混合润湿 MWL 模型是这 4 个模型中最复杂的一个,故下面以 MWL 模型为例,分析整个 WAG 循环中流体分布的变化规律.

对于模型 MWL,水湿、油湿孔隙的分界半径为  $r = 15 \times 10^{-6}$  m (Van Dijke *et al.*, 2004). 再将孔径的大小分为大( $r > 23 \times 10^{-6}$  m)、较大( $r = 15 \sim 23 \times$

$10^{-6}$  m)和小( $r < 15 \times 10^{-6}$  m)3 个等级. 如图 5 所示,第一次水驱驱替了小孔隙中的原油和大孔隙中的大部分原油,较大孔隙中的原油基本没有发生变化. 因为  $r < 15 \times 10^{-6}$  m 的孔隙是完全水湿的,  $r \geq 15 \times 10^{-6}$  m 的孔隙为强油湿;小孔隙中水相的毛管压力  $\frac{2\sigma_{wo} \cos \omega_o}{r}$  为负值,根据公式(4)可得其入口压力  $P_{e,w}(r)$  最小,并且润湿膜的存在使得水相为连续相,因此水相完全进入了小孔隙.

$$P_{e,w}(r) = P_o + \frac{2\sigma_{wo} \cos \omega_o}{r}, \quad (4)$$

其中,  $P_{e,w}(r)$  为水相的入口压力,MPa;  $P_o$  为被驱替的油相压力,MPa.

而在  $r \geq 15 \times 10^{-6}$  m 的油湿孔隙中,由公式(4)可得出孔隙半径越大,水相的入口压力就会越低,因此水相进入了大孔隙中. 再次结合式(3)的毛细管入口压力公式,很好的解释了 MWL 模型在第一次气驱中驱替了较大孔隙中残留的原油和大孔隙中的水;第二次水驱中,流体的分布基本没有变化,只有大孔隙中有少量的气体被驱出;第二次气驱后的流体分布虽是对第一次气驱的重复,但也驱替出了一定量的原油.

在更高次(次数  $n \geq 3$ )的 WAG 循环中,流体的分布状态基本没有变化,原油的产出停止,BC、DCA 和 MWS 模型在更高次的 WAG 循环中也出现了这种现象. 与 BC 模型不同的是,在高次的 WAG 循环中, MWL、MWS 和 DCA 模型中原油的流动基本停止,而 BC 模型内油相的分布在每次驱动后都会重复发生变化(原油在每次气驱后,都从大孔隙流动到小孔隙;水驱后,油相又被驱替到了较大的孔隙中),这说明油相在完全水湿的多孔介质内部仍然发生运动.

### 2.3 多级驱替过程

在微观 WAG 驱替过程中,油气水三相流体通过多级驱替链的方式发生流动. 本文定义多级驱替链为从出口端到入口端的一系列分散的流体簇组成的. 多级驱替链数据包括驱替链的长度和类型,例如,气驱油驱水  $g \rightarrow o \rightarrow w$  为二级驱替链,长度为 2,其驱替类型包括气驱油  $g \rightarrow o$  和油驱水  $o \rightarrow w$  两种方式. 图 6 给出了 BC、MWL、DCA 模型的多级驱替数据.

在 BC 模型的多级驱替数据中(图 6a 和 6d),第一次水驱的驱替为  $w \rightarrow o$ . 第一次气驱中,出现了二级驱替链,约占 75%,类型为  $g \rightarrow o \rightarrow w$ ,其余为单级



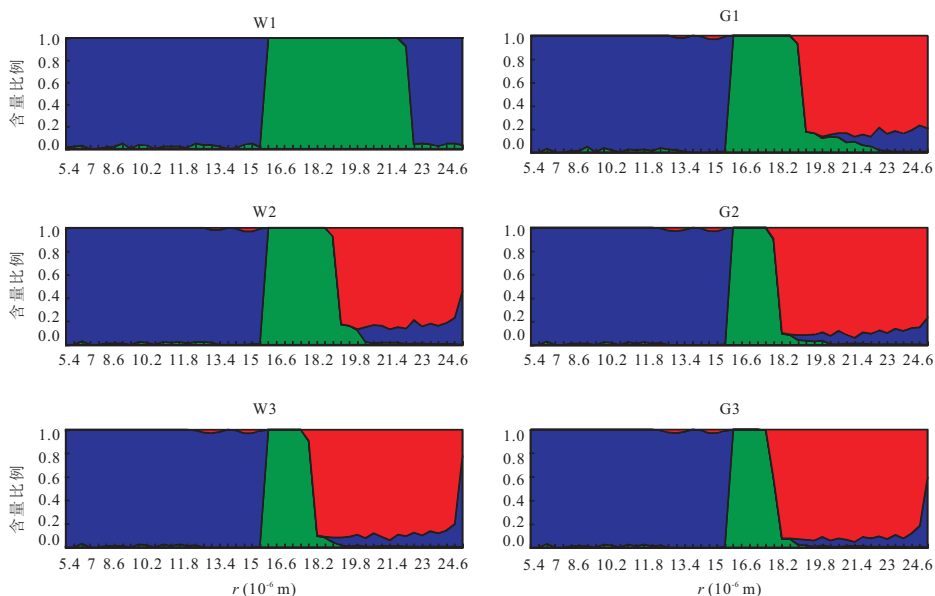


图 5 混合润湿模型(MWL)在每次驱替之后的流体分布规律  
Fig. 5 Occupancy statistics of MWL Model during WAG Cycle

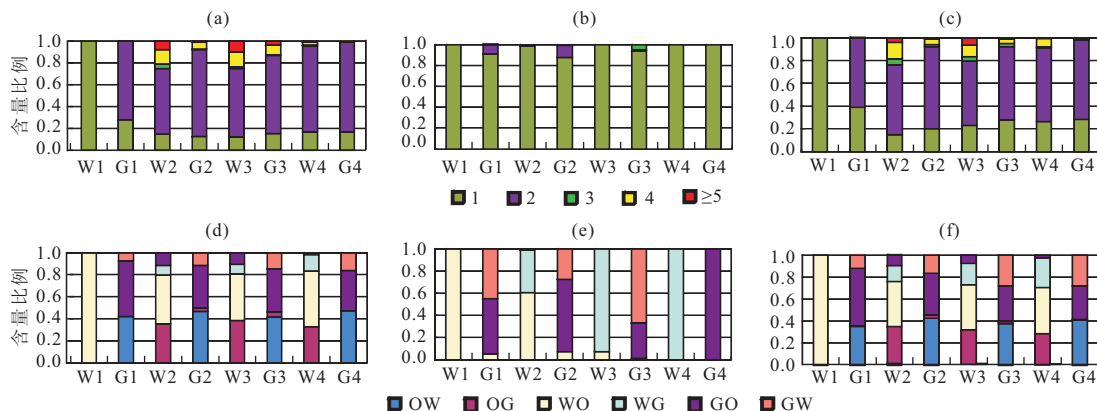


图 6 WAG 循环中三组模型的多级驱替链(图 a,b,c 表示驱替链的长度及其分布规律,例如数字 1、2 代表驱替链的长度;图 d,e,f 表示驱替类型及其分布规律,例如“GO”代表气驱油)

Fig. 6 Multiple displacement chains during WAG floods for three models  
a. BC; b. MWL; c. DCA; d. BC; e. MWL; f. DCA

驱替链,类型为  $o \rightarrow w$  或  $g \rightarrow w$  或  $g \rightarrow o$ . 在更高次的循环中,更长的多级驱替链出现,然而二级驱替链和单级驱替链仍然占绝大部分. 总之,这些多级驱替链成为了油相流体的主要运动方式. 在第二次水驱过程中,虽然出现了长度最高为 14 的驱替链,但只是少量存在,可以忽略.

在 MWL 模型(图 6b、图 6d 和图 6e)每一轮的驱替过程中,单级驱替链占有绝对比例(图 6b). 在第一次气驱和第二次气驱过程中出现了一定比例的二级驱替链,比例在 10%~20%之间,主要为:  $g \rightarrow w \rightarrow o$ . 故而 MWL 模型在这两次驱替中都驱替出了相当可观的原油(见图 3). 第三次气驱过程中出现了

少量 3 级驱替链,结合图 5 可知,主要为  $g \rightarrow w \rightarrow g \rightarrow o$  或  $g \rightarrow w \rightarrow g \rightarrow w$ . 对于单级驱替链,在第一、二、三次气驱过程中,出现的主要是  $g \rightarrow w$  和  $g \rightarrow o$ . 第二、三次水驱过程中主要出现的是  $w \rightarrow g$  和  $w \rightarrow o$ ;第四次水驱完全为  $w \rightarrow g$ ,油相的运动完全停止.

对于剩余油饱和度较高的 DCA 模型,从第一次气驱开始,二级驱替链在每一轮的驱替中都占据了最高的比例,大约为 60%,综合上文内容及图 6 可知,二级驱替链在第一次气驱过程中很大程度上提高了采出程度,该过程的二级驱替链为  $g \rightarrow o \rightarrow w$ ;此后几轮 WAG 中,虽涉及到油相的运动,但没有油相采出.

将各个模型的驱替链进行对比发现,在更高次 WAG 循环中(次数 $\geq 3$ ),不仅流体分布规律重复变化,而且水驱或者气驱之后分别对应的驱替链长度和类型也重复出现。

### 3 结论

应用所建立的三维孔隙网络模型,模拟了完全水湿、混合润湿(MWL、MWS)和润湿角随机分布(DCA)这 4 种润湿条件下的 WAG 驱替,得出水气交替注入驱替的三相渗流机理如下:

(1)在连通性较好的网络模型中,前两轮 WAG 循环之后原油就已经停止采出,模型中流体达到了比较稳定的状态,但在完全水湿介质中的流体分布仍然发生变化.在后两轮的 WAG 中,每次驱替之后对应的流体分布规律、驱替过程中的多级驱替数据重复出现。

(2)四组模型之间的饱和路径、流体分布规律截然不同,根本的原因是润湿参数不同,润湿参数的不同导致了每次驱替过程中驱替方式的不同,驱替方式直接影响了驱替结果。

(3)驱替数据统计表明,在第一次气驱之后,出现了大量二级和多级驱替链,流体以驱替链的形式发生流动;二级和多级驱替链在很大程度上增加了原油的采出。

致谢:作者感谢英国赫瑞—瓦特大学 Van Dijke, M. I. J. 博士提供三维网络模型。

### References

Buckley, J., Bousseau, C., Liu, Y., 1996. Wetting Alteration by Brine and Crude Oil: From Contact Angles to Cores. *SPE Journal*, 1(3): 341—350. doi: 10. 2118/30765—PA

Christensen, J. R., Stenby, E. H., Skauge, A., 1998. Review of WAG Field Experience. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 4(2): 97—106. doi:10. 2118/71203—PA

Dong, M., Forai, J., Huang, S., et al., 2005. Analysis of Immiscible Water-Alternating-Gas (WAG) Injection Using Micromodel Tests. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 44(2): 17. doi:10. 2118/05—02—01

Li, H. C., Zeng, Y., Luo, H. T., et al., 2000. A Study of Numerical Simulation of Water Alternating Gas Injection for Condensate Gas Reservoirs. *Natural Gas Industry*, 20(3): 62—66 (in Chinese with English abstract).

Mane, P. A., 2007. Angola-Water Alternating Gas-First Surface Deepwater Well Gas to Water Injection Conversion. International Petroleum Technology Conference, Dubai, U. A. E. . doi:10. 2523/11378—MS

Manrique, E., Calderon, G., Mayo, L., et al., 1998. Water-Alternating-Gas Flooding in Venezuela: Selection of Candidates Based on Screening Criteria of International Field Experiences. European Petroleum Conference, Hague, Neth, Society of Petroleum Engineers. doi:10. 2118/50645—MS

Nadason, G., Anua, N. A. B., Singhal, A., et al., 2004. Water-Alternating-Gas (WAG) Pilot Implementation, A First EOR Development Project in Dulang Field, Offshore Peninsular Malaysia. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Perth, Australia, Society of Petroleum Engineers. doi:10. 2118/88499—MS

Pereira, G. G., 1999. Numerical Pore-Scale Modeling of Three-Phase Fluid Flow: Comparison between Simulation and Experiment. *Physical Review E*, 59(4): 4229—4242. doi:10. 1103/PhysRevE. 59. 4229

Sohrabi, M., Tehrani, D. H., Danesh, A., et al., 2004. Visualization of Oil Recovery by Water-Alternating-Gas Injection Using High-Pressure Micromodels. *SPE Journal*, 9(3): 290—301. doi:10. 2118/89000—PA

Van Dijke, M. I. J., Lorentzen, M., Sohrabi, M., et al., 2010. Pore-Scale Simulation of WAG Floods in Mixed-Wet Micromodels. *SPE Journal*, 15(1): 238—247. doi:10. 2118/113864—PA

Van Dijke, M. I. J., Sorbie, K. S., Sohrabi, M., et al., 2004. Three-Phase Flow WAG Processes in Mixed-Wet Porous Media: Pore-Scale Network Simulations and Comparison with Water-Wet Micromodel Experiments. *SPE Journal*, 9(1): 57—66. doi:10. 2118/75192—MS

Van Dijke, M. I. J., Sorbie, K. S., Sohrabi, M., et al., 2006. Simulation of WAG Floods in an Oil-Wet Micromodel Using a 2-D Pore-Scale Network Model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 52(1—4): 71—86. doi:10. 1016/j. petrol. 2006. 03. 014

Yang, D. Y., Zhang, Q., Cui, H. W., et al., 2000. Optimization of Multivariate Production-Injection System for Water-Alternating-Gas Miscible Flooding in Pubei Oil Field. SPE/AAPG Western Regional Meeting, Long Beach, CA, United States, Society of Petroleum Engineers. doi:10. 2118/62858—MS

Xie, X. J., Wang, Y. X., Su, C. L., et al., 2008. Arsenic Mobilization in Shallow Aquifers of Datong Basin: Hydrochemical and Mineralogical Evidences. *Journal of Geochemical Exploration*, 98 (3): 107 – 115. doi: 10.1016/j.gexplo. 2008. 01. 002

**附中文参考文献**

董少刚,唐仲华,刘白薇,等,2008.大同盆地地下水数值模拟

及水资源优化配置评价. *工程勘察*, 3: 30–35.

李军,王正辉,程晓天,等,2005.山西省应县地方性砷中毒流行病学调查报告. *中国地方病学杂志*, 24 (2): 183–185.

裴捍华,梁树雄,宁联元,2005.大同盆地地下水中砷的富集规律及成因探讨. *水文地质工程地质*, 4: 65–69.

王焰新,葛·马·斯贝泽尔,2000.东亚大陆裂谷医疗矿水文地球化学研究——以山西和贝加尔裂谷系为例.北京:中国环境科学出版社.

\*\*\*\*\*

(上接 858)

Yang, Y. F., Yao, J., Van Dijke, M. I. J., 2010a. Effect of Reservoir Rock Wettability on Microcosmic Distribution of Residual Oil after Gas Displacement. *Acta Petrolei Sinica*, 31(3): 467–470 (in Chinese with English abstract).

Yang, Y. F., Yao, J., Wang, C. C., 2010b. Oil-Gas-Water Three-Phase Flow Simulation in Water-Wet Reservoir. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 34(1): 79–83 (in Chinese with English abstract).

**附中文参考文献**

李华昌,曾焱,罗宏涛,2000,等.凝析气藏水气交替注入数值模拟研究. *天然气工业*, 20(3): 62–66.

杨永飞,姚军, Van Dijke, M. I. J., 2010a. 油藏岩石润湿性对气驱剩余油微观分布的影响机制. *石油学报*, 31(3): 467–470.

杨永飞,姚军,王晨晨,2010b.水湿油藏油气水三相渗流模拟. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 34(1): 79–83.