

文章编号: 0253-2697(2014)02-332-08 DOI:10.7623/syxb201402014

## 稠油溶解气驱渗流特征物理模拟和数值模拟

鹿 腾<sup>1</sup> 李兆敏<sup>1</sup> 李松岩<sup>1</sup> 刘尚奇<sup>2</sup> 李星民<sup>2</sup> 王 鹏<sup>1</sup> 王壮壮<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学石油工程学院 山东青岛 266580; 2. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

**摘要:** 为了改善稠油冷采开发效果,通过物理模拟实验和数值模拟方法研究了稠油溶解气驱渗流特征。首先测定了稠油和气体在不同压力下的界面张力,然后通过微观可视化实验和填砂管驱油实验研究了溶解气驱不同阶段渗流特征,最后对室内实验结果进行了数值模拟。研究表明:溶解气驱过程中气体逐渐由分散相聚并形成连续相;泡沫油会增大流体的弹性能量,有利于维持溶解气驱地层压力和增大生产压差,从而改善稠油溶解气驱开发效果。在室内实验的基础上,通过 3 种气体组分(溶解气、分散气和连续气)的转化来描述稠油溶解气驱渗流过程,数值模拟值和物理实验值拟合效果较好。

**关键词:** 泡沫油;溶解气驱;稠油;物理模拟;数值模拟

中图分类号: TE357.44

文献标识码: A

### Physical and numerical simulations of flow characteristics in solution gas drive for heavy oils

Lu Teng<sup>1</sup> Li Zhaomin<sup>1</sup> Li Songyan<sup>1</sup> Liu Shangqi<sup>2</sup> Li Xingmin<sup>2</sup> Wang Peng<sup>1</sup> Wang Zhuangzhuang<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To improve the performance of cold production in heavy oil, the flow characteristics of solution gas drive in heavy oil were studied by means of physical experiments and numerical simulations. Firstly, the interfacial tensions between heavy oil and gas under different pressures were measured, and then the flow characteristics of different stages in solution gas drive were appraised through micromodel test and sandpack flooding test. Finally, physical experiment results was numerically simulated and historically matched. The study results indicated that: gas was developed from the dispersed phase to the continuous phase gradually; foamy oil can increase the flow elastic energy, which can maintain the reservoir pressure, increase the production pressure drop and improve the performance of solution gas drive. Base on the physical experiments, three dynamical reaction equations describing the conversion process of different gas components were proposed to simulate the solution gas drive in heavy oil. A better agreement between the physical measured and numerical simulated results could be obtained.

**Key words:** foamy oil; solution gas drive; heavy oil; physical simulation; numerical simulation

近年来,由于稠油热采开发成本较高以及油藏适应性的限制<sup>[1-5]</sup>,利用溶解气驱开发稠油的相关技术已在委内瑞拉和加拿大成功应用,并取得了较好的开发效果。由于油藏的地层压力低于泡点压力时,生产气油比并没有迅速增大,而是保持低值,降压速度也较慢,溶解气驱采收率均超过 10%。且油藏的井口油样呈现出油包气的泡沫状态,渗流特征非常复杂,很多学者认为其是导致溶解气驱开发效果较好的原因之一<sup>[6-12]</sup>。

Smith<sup>[13]</sup>首次系统研究了稠油溶解气驱,其用“油气混合物”来描述气体以小气泡形式分散在稠油中的

特殊物质。Maini 等<sup>[14]</sup>认为这是以油相为连续相,气体为非连续相的分散体系,并用泡沫油流来描述这一流动状态。Sheng 等<sup>[15]</sup>开展了泡沫油稳定性评价实验,其认为原油黏度越高,溶解气含量越大,降压速度越大,泡沫油稳定性越好。Kumar 等<sup>[16]</sup>利用岩心溶解气驱实验研究了降压速度对气相流度的影响,发现气相流度受降压速度的影响,随着降压速度的增大,气相流度逐渐减小。王伯军等<sup>[17]</sup>开展了委内瑞拉超重泡沫油 PVT 特性系列实验,并揭示了泡沫油开采“拟泡点”特性,总结出了一套泡沫油 PVT 参数的非常规测试方法。秦积舜等<sup>[18-20]</sup>通过物理模拟实验认识了

基金项目:国家重大科技专项“重油油藏和油砂经济高效开发技术”(2011ZX05032-001)资助。

第一作者及通信作者:鹿 腾,男,1985 年 10 月生,2008 年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,现为中国石油大学(华东)石油工程学院博士研究生,主要从事稠油油藏开发理论和技术研究。Email:lutengyujing@126.com

Orinoco 原油溶解气驱开发特征和泡沫油油气相渗规律,并通过微观可视化实验认识了泡沫油的微观渗流特征。

为了改善稠油冷采开发效果,笔者通过物理模拟实验和数值模拟方法研究了稠油溶解气驱渗流特征。通过实验测定了稠油和气体在不同压力下的界面张力,利用微观可视化实验和填砂管驱油实验研究了溶解气驱不同阶段渗流特征,并对室内实验结果进行了数值模拟。

## 1 稠油溶解气驱物理模拟

### 1.1 实验材料

实验用油为委内瑞拉某区块脱气原油,该区块油藏原始溶解气油比为  $18 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,油藏温度下 ( $53.7^\circ\text{C}$ ) 脱气原油密度为  $1016 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,黏度为  $14488 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,原油中饱和烃、芳香烃、胶质和沥青质的含量分别为  $22.25\%$ 、 $42.51\%$ 、 $21.73\%$  和  $13.51\%$ 。

活油由脱气原油和溶解气通过高温高压配样器配制而成,溶解气由  $\text{CO}_2$  与  $\text{CH}_4$  组成,摩尔分数分别为  $13\%$  和  $87\%$ 。饱和压力为  $6.0 \text{ MPa}$ ,溶解气油比为  $18 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , $53.7^\circ\text{C}$  下活油黏度为  $8121 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,密度为  $986 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 界面张力的测定

实验装置为法国 Teclis 生产的 Tracker 液滴界面张力仪(图 1)。以原油为内相,气体为外相,利用该装置测试了  $54^\circ\text{C}$  不同压力下稠油与气体之间的界面张力。实验步骤为:①使用丙酮充分清洗高压观察窗,然后将气体注入高压观察窗内;②待观察窗内的压力和温度稳定后,注射针管形成油滴;③通过摄像机采集不同时间下油滴的动态图片,并通过软件进行图像处理,从而得到气体与稠油的动态界面张力;④在该压力下,重复测试 3 次;⑤改变测试压力并重复步骤①—步骤④。

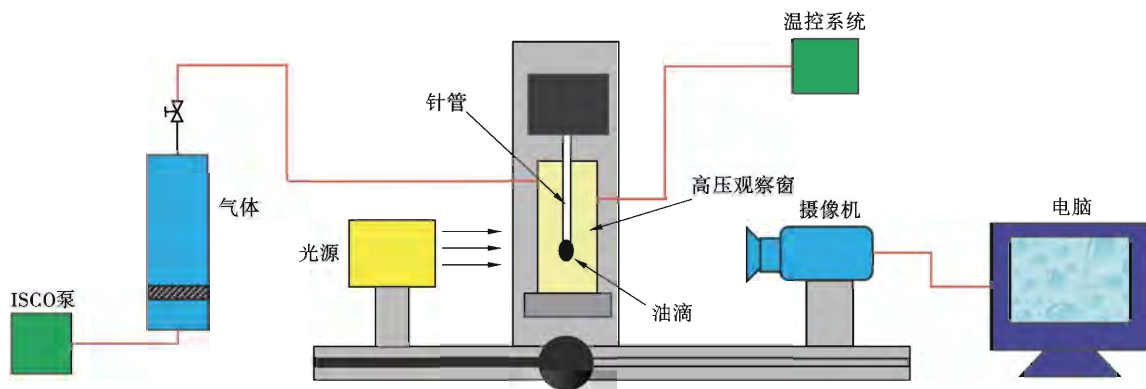


图 1 Tracker 界面张力仪

Fig. 1 Tracker interfacial tensiometer

#### 1.2.2 微观可视化实验

微观实验所用设备主要包括微观玻璃刻蚀模型(外观尺寸为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 、孔道直径为  $40 \sim 50 \mu\text{m}$ )、数字显微摄像系统、ISCO 泵等,实验温度为  $54^\circ\text{C}$ 。实验步骤为:①根据泡点压力、温度以及溶解气油比等条件复配活油;②将微观模型抽真空后,饱和蒸馏水;③设置回压为  $6.5 \text{ MPa}$  (大于泡点压力  $6.0 \text{ MPa}$ ),微观模型饱和活油;④以  $10 \text{ kPa}/\text{min}$  的压降速度降低回压,并采集溶解气驱实验过程图像;⑤分析驱替图像。

#### 1.2.3 岩心驱替实验

实验采用的填砂管管长为  $60 \text{ cm}$ ,直径为  $2.54 \text{ cm}$ ,选配  $80 \sim 100$  目的石英砂作为填砂模型基本材料,模型渗透率为  $9.21 \text{ D}$ ,孔隙度为  $38.45\%$ 。实验步骤为:①根据泡点压力、温度以及溶解气油比等条件复

配活油;②填砂管模型抽真空  $4 \text{ h}$ ,饱和水,测量岩心渗透率和孔隙度,恒温箱温度为  $54^\circ\text{C}$ ;③岩心饱和活油,回压设为  $7.0 \text{ MPa}$ ,根据产出水计算初始含油饱和度;④设置压降速度为  $10 \text{ kPa}/\text{min}$ ,逐渐降低回压压力,记录衰竭开发过程中产油量、产气量随压力的变化关系。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 油气界面张力

通过  $54^\circ\text{C}$  两条典型的不同压力下气体与稠油的动态界面张力曲线可以看出[图 2(a)],气体与稠油的动态界面张力随时间变化较小,这说明气体与稠油的界面很快达到稳定状态。通过不同压力下气体与稠油间的平衡界面张力也可以看出[图 2(b)],油气界面张力随压力的增大近似呈现线性下降关系,该规律与气体在原油中的溶解度随压力变化规律一致。

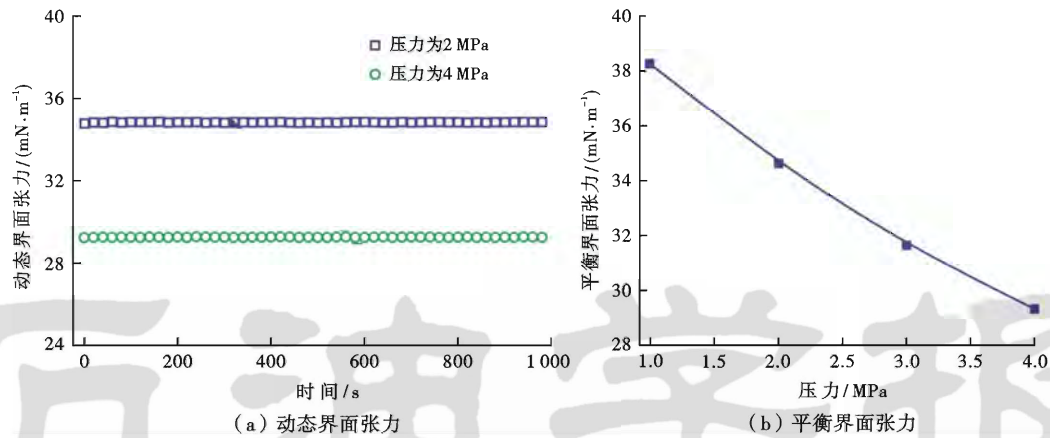


图2 不同压力下气体与原油的界面张力关系

Fig. 2 Interfacial tension relationship between oil and gas under different pressures

## 2.2 微观渗流特征

通过不同压力下稠油溶解气驱微观渗流图片可以看出:当压力高于泡点压力时,气体无法从原油中析出,该阶段为单相渗流[图 3(a)];随着压力逐渐低于泡点压力,可以看出原油中的气体逐渐析出,并且以小气泡的

形式分散于原油中,形成泡沫油渗流状态[图 3(b)],此时气体为分散相。从图 3(b)可以看出,该阶段气泡较小,气泡直径小于或接近孔喉直径,气泡可以在孔喉内自由移动,并没有观察到明显的气泡变形和聚并现象,只观察到了少量的气泡分裂现象。

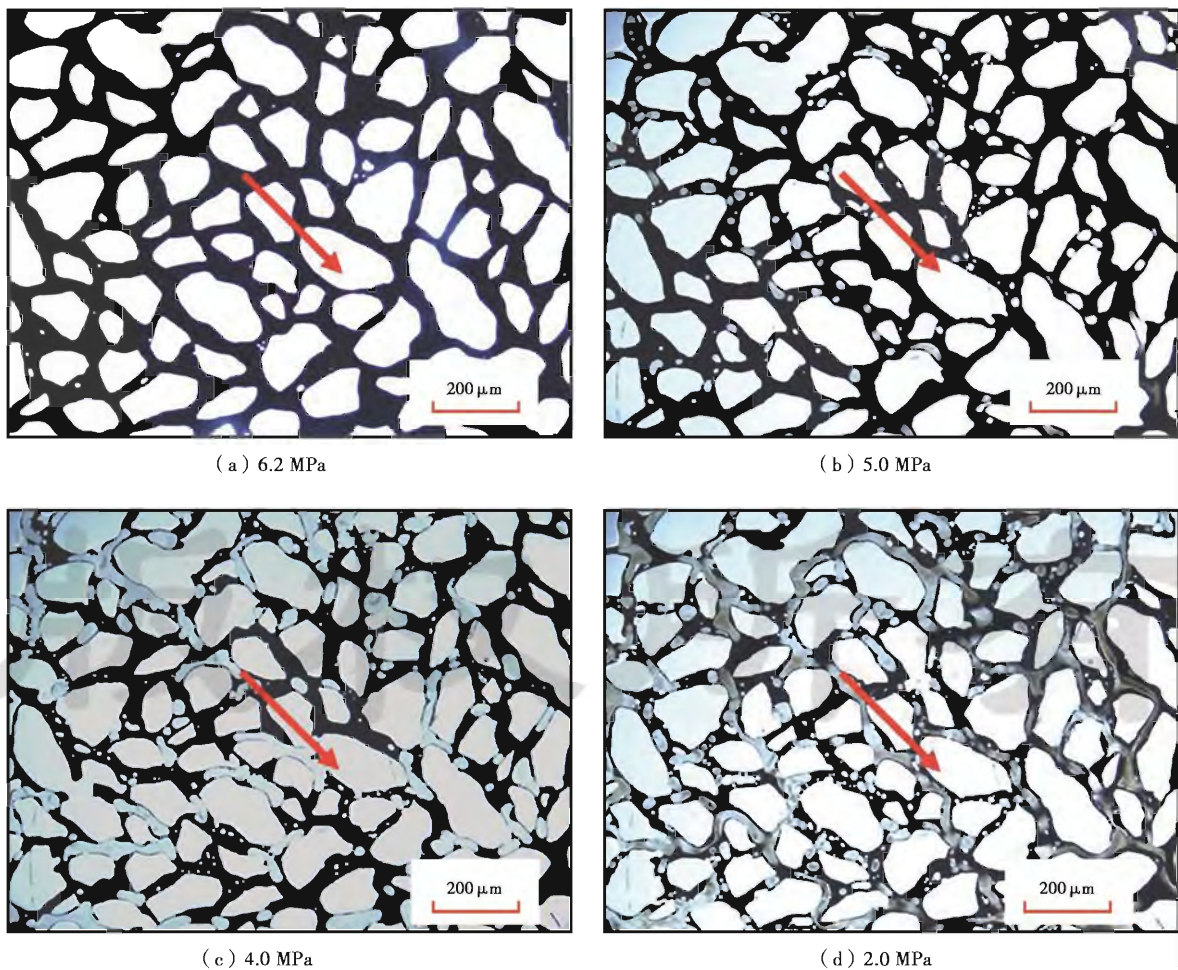


图3 不同压力下溶解气驱微观渗流显微图片

Fig. 3 Microscopic images under different pressures during solution gas drive

随着压力继续降低,气泡直径逐渐大于孔喉直径[图3(c)],气泡在通过孔喉时发生变形(图4),这降低了气泡流动速度,因此气泡容易在孔喉处聚集,并且聚并形成大气泡(图5)。聚并形成的大气泡在流动过程中又被砂砾剪切形成小气泡(图6)。分散气泡有时也会聚并形成连续气相,但很快又被剪切形成分散气泡(图7)。微观实验观察发现,该阶段气泡分裂现象要多于气泡聚并现象。这是由于泡沫油是气泡分散于原油中的分散体系,气泡会自发地聚并以降低分散体系的界面面积和界面能,使泡沫油体系趋于热力学稳定。在保持界面面积不变的情况下,降低分散介质(气泡)和分散相(原油)的界面张力,也可实现降低界面能的目的,即油气界面张力越低,泡沫油体系越稳定。从图2也可以看出,油气界面张力随着压力的降低而逐渐增大,即压力越高,泡沫油体系越稳定。在该阶段压力相对较高,油气界面张力较低,气泡不容易发生聚并。并

且由于模型内的压力较高,气泡流动速度较快,大气泡很容易被剪切成小气泡。因此该阶段以气泡的变形、分裂为主,以气泡的聚并为辅。

随着压力的进一步降低,油气界面张力逐渐增大,气泡运移速度逐渐降低。油气界面张力的增大会导致气泡更容易发生聚并,而气泡运移速度的降低会导致气泡不容易被分裂形成小气泡。气泡的聚并速度逐渐增大,分裂速度逐渐降低,最终气泡的聚并和分裂处于动态平衡状态,在该阶段观察到了明显的气泡变形、聚并和分裂现象。

当压力降至较低水平时,气体逐渐由分散相聚并形成连续相,形成油气两相渗流状态[图3(d)]。这是由于当压力较低时,油气界面张力较高,气泡很容易发生聚并,并且由于气泡流速较慢,聚并形成的大气泡很难被剪切成分散气泡,因此该阶段以气泡的变形和聚并为主,以气泡的分裂为辅,最终导致了连续气相的形成。

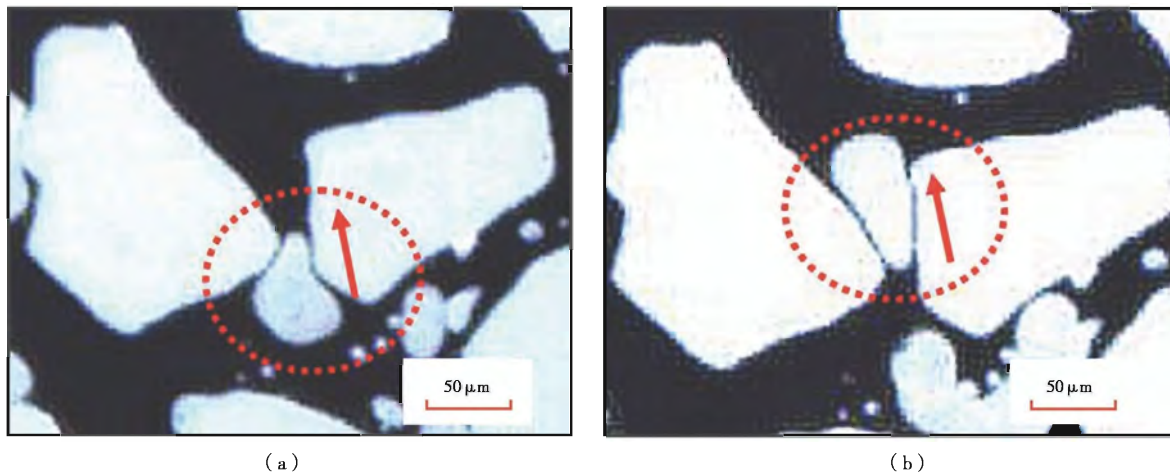


图4 气泡变形通过孔喉过程  
Fig. 4 Bubble deformation through pore-throat process

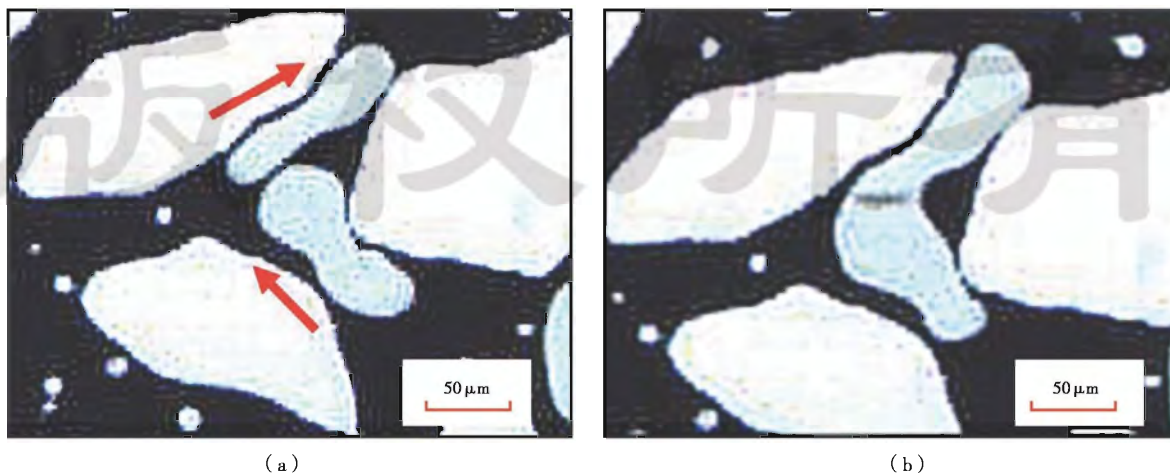


图5 气泡聚并过程  
Fig. 5 Bubbles merging process

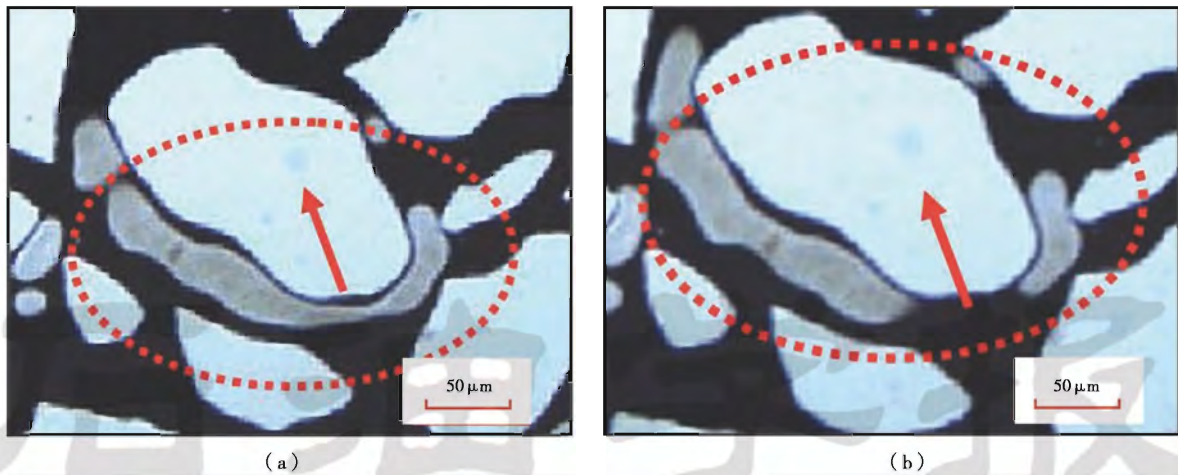


图6 气泡分裂过程

Fig. 6 Bubbles division process

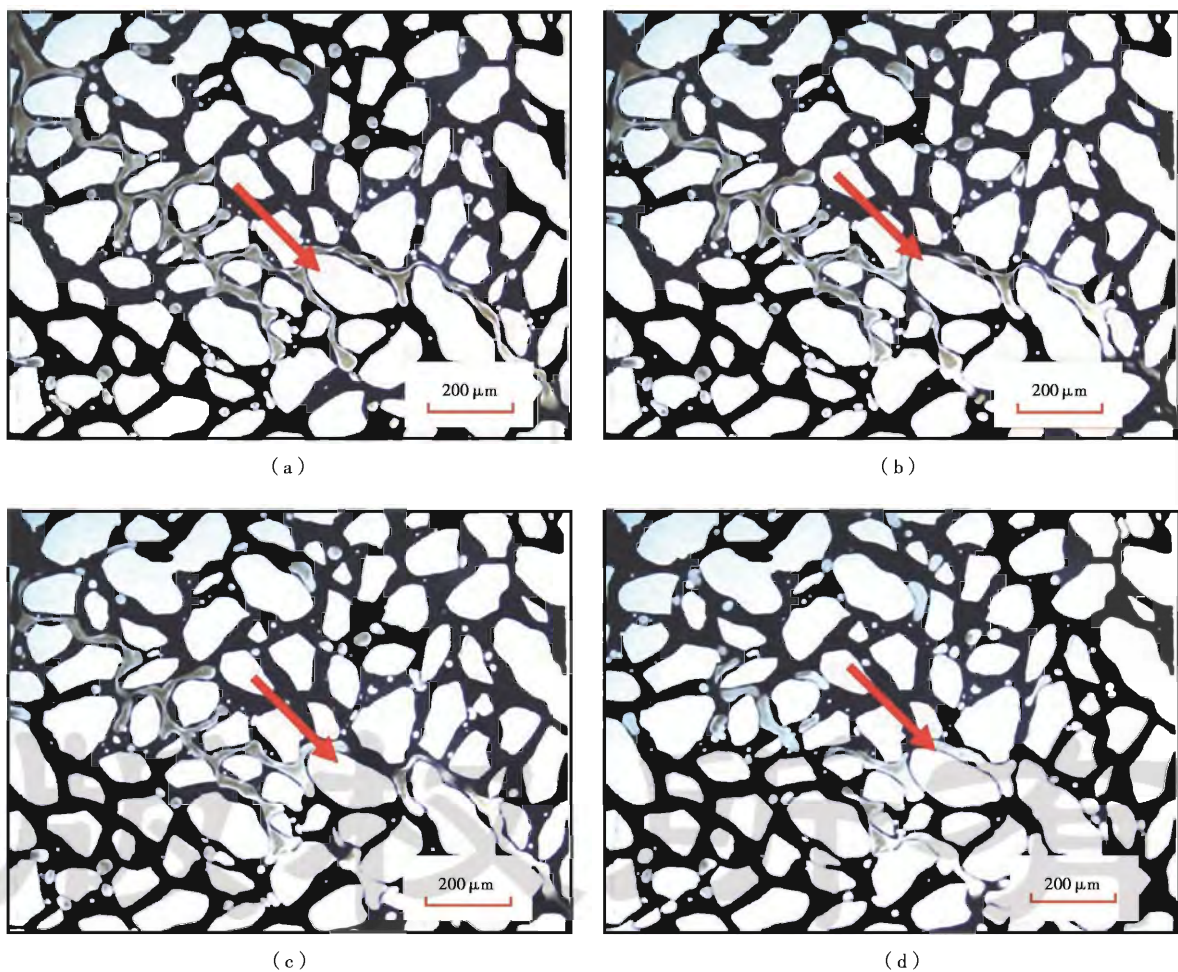


图7 连续气剪切形成分散气泡过程

Fig. 7 Continuous gas divided into separated bubbles process

### 2.3 填砂管驱替实验

通过溶解气驱过程中填砂管内平均压力随产油量的变化可以看出(图8),其中平均压力是根据4个测压点位置的压力通过 Simpson's 1/3 法则加权平均得到的<sup>[21]</sup>,随着原油的产出,填砂管内压力首先迅速下

降,此阶段为原油的单相流动,由于原油的压缩性很差,随着产油油量的增大,压力迅速下降。当压力降至饱和压力(6.0 MPa)时,尽管此时已经有气体析出,但是压力仍然迅速下降,这是由于压力刚低于泡点压力时,析出气泡的体积和数目较少,其对原油性质的影响

很小,因此压力仍然迅速下降。当压力降至 5.02 MPa 时,压力反弹,这是由于随着气泡的体积和数目逐渐增多,形成了泡沫油状态。王伯军<sup>[17]</sup>等通过泡沫油 PVT 实验发现,气体析出形成泡沫油后,泡沫油体系的体积系数增大,也就是说泡沫油体积膨胀,会增大岩心内的压力,此外析出的气体以分散相形式存在,气体没有大量产出,从而避免了岩心压力的继续下降,这也就解释了利用溶解气驱开发稠油油藏压降速度较慢的原因。随着产出油量的进一步增大,压力会缓慢下降,此时气体仍然以分散相随原油流动。当压力降至 2.66 MPa 后,压力迅速下降,这说明分散气泡已经聚并成连续相,形成了油、气两相渗流状态,由于气相流度远高于油相流度,因此气窜现象严重,从而导致了压力的迅速降低。

通过溶解气驱过程中岩心两端压差随产出油量的变化可以看出(图 9),岩心两端压差变化主要分为 3 个阶段:①压差首先迅速增大并达到稳定,该阶段为单相流,原油黏度较大,必须有较大的压差提供驱替原油的动力,压力稳定说明单相流动达到了稳态;②压差逐渐

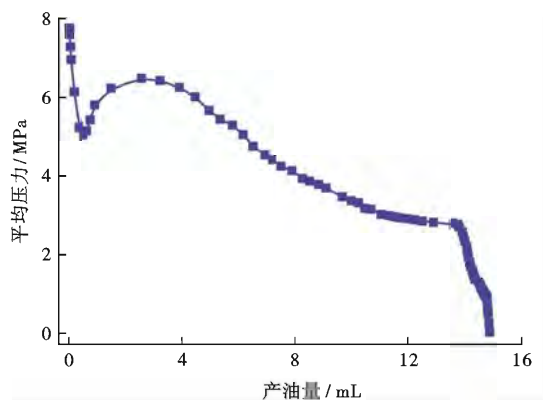


图 8 岩心平均压力随产油量变化

Fig. 8 Changes of average pressure response with cumulative oil production

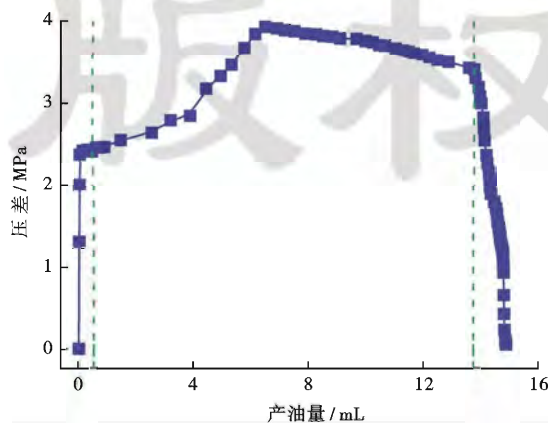


图 9 岩心压差随产油量变化

Fig. 9 Changes of differential pressure response with cumulative oil production

增大,这是由于随着气体的产生,形成了泡沫油状态,泡沫油增大了流体的弹性能量,并且分散气泡在通过孔喉时会产生贾敏效应,从而导致压差逐渐增大,两端压差最大可达到 3.93 MPa;③由于气体已经由分散相发育形成连续相,溶解气驱进入了油、气两相渗流状态,气窜导致了岩心两端压差迅速下降。

### 3 稠油溶解气驱数值模拟

Claridge 和 Pratts<sup>[22]</sup>提出了低黏度泡沫油数学模型来描述泡沫油渗流特征,其认为原油中沥青质会吸附在气泡的表面,这会减少原油中沥青质的含量,从而降低原油黏度,原油黏度的降低是泡沫油提高稠油溶解气驱开发效果的主要机理。但是笔者和 Bora<sup>[23]</sup>等均通过实验发现,活油脱气形成泡沫油后,原油黏度反而增大,因此低黏度泡沫油数学模型并不能准确描述稠油溶解气驱渗流特征。

通过微观可视化实验可以看出,溶解气驱过程中原油中的溶解气随着压力低于泡点压力而逐渐析出,并且以气泡形式分散于原油中,此时的气体并没有形成连续相,而是可以视为油相中的一个组分,称之为“分散气”组分。通过微观可视化实验可以看出,分散气会逐渐聚并形成连续气相,“连续气”组分属于气相,满足常规气体的物理性质。从图 6—图 8 可以看出,一方面分散气可以聚并形成连续气,另一方面连续气也可被剪切形成分散气。因此在通过 3 种气体组分的转化来描述稠油溶解气驱渗流机理的过程中,仅考虑溶解气向分散气的转化或分散气向连续气的转化,而没有考虑连续气剪切形成分散气的过程是不全面的。

#### 3.1 溶解气驱数学模型

数值模拟时将溶解气驱物理模拟实验用填砂管模型进行简化:将长度为 60 cm 和直径为 2.54 cm 的填砂管模型划分为  $30 \times 1 \times 1$  的网格,将截面圆转化为等面积的正方形, $i$  方向每个网格的尺寸为 2 cm, $j$ 、 $k$  方向每个网格的尺寸为 2.2504 cm(图 10)。由于填砂管模型物性较为均质,因此数学模型中每个网格的孔隙度、渗透率和初始含油饱和度都相同,并与填砂管模型物性保持一致。

稠油溶解气驱数值模拟时考虑了水、原油、溶解气、分散气和连续气 5 种组分,其中水相包括水组分,油相包括原油组分、溶解气组分( $G_s$ )和分散气组分( $G_d$ ),气相包括连续气组分( $G_c$ )。每种组分在每个网格中的浓度由质量守恒方程得出。

数学模型中通过溶解气、分散气和连续气的转化来描述稠油溶解气驱渗流过程。第 1 个模型是溶解气向分散气的转化,该反应描述溶解气逐渐析出的过程

( $G_s \rightarrow G_f$ ); 第2个模型是从分散气向连续气的转化, 该反应描述分散气泡聚并形成连续气的过程( $G_f \rightarrow G_c$ ); 第3个模型是从连续气向分散气转化, 该反应描述分散气剪切形成分散气泡的过程( $G_c \rightarrow G_f$ )。3个反应的反应系数可根据质量守恒定律计算得到, 并且第3个模型的反应速度要高于第2个反应的反应速度, 否则分散气无法发育形成连续气。

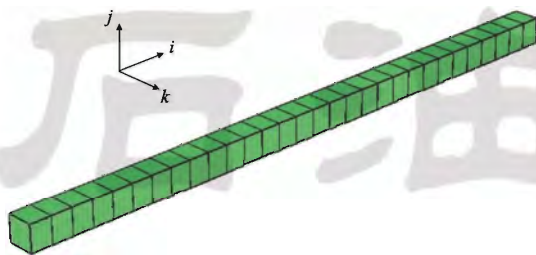


图10 三维数值模型

Fig. 10 3D numerical model

### 3.2 稠油溶解气驱实验拟合

利用建立的泡沫油数学模型拟合稠油溶解气驱实验结果。在拟合过程中, 给定压降速度, 拟合溶解气驱累积产油量(图11)。通过拟合结果可以看出, 数值模拟得到的产油量与物理模拟实验结果拟合效果较好, 这说明通过考虑3个动力学反应描述3种气体组分转化的数学模型能够较好地反映稠油溶解气驱的渗流特征。

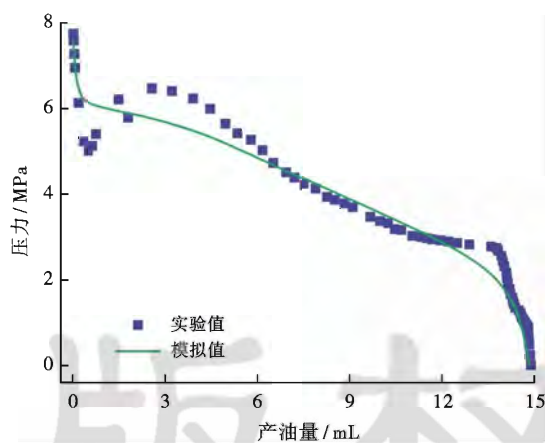


图11 稠油溶解气驱实验和模拟结果

Fig. 11 Experimental and simulated results of solution gas drive

## 4 结论

(1) 微观可视化实验表明, 气体从原油中析出主要以分散相形式存在于原油中, 气泡会聚并形成连续气相, 连续气相也会通过砂砾的剪切形成分散气泡。随着压力的降低, 气泡的聚并速度逐渐大于剪切速度, 最终导致了油、气两相渗流的形成。

(2) 填砂管驱油实验表明, 泡沫油会增大流体的

弹性能量, 有利于维持溶解气驱地层压力和提供生产压差, 从而改善稠油溶解气驱开发效果。

(3) 在室内实验的基础上, 通过3种气体组分(溶解气、分散气和连续气)的转化来描述稠油溶解气驱渗流过程, 模拟值和实验值拟合效果较好。

### 参考文献

- [1] 曹嫣, 于田田, 林吉生, 等. 热复合化学方法改善极强敏感性稠油油藏开发效果机理[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 128-132.  
Cao Yanbin, Yu Tiantian, Lin Jisheng, et al. A study on a thermal compound chemical method for improving development efficiency of heavy-oil reservoirs with strong sensitivity[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 128-132.
- [2] 张忠义, 周游, 沈德煌, 等. 直井-水平井组合蒸汽氮气泡沫驱物模实验[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 90-95.  
Zhang Zhongyi, Zhou You, Shen Dehuang, et al. Physical modeling experiments on steam nitrogen foam flooding for a vertical and horizontal well combination[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 90-95.
- [3] 纪佑军, 程林松, 刘其成, 等. 超稠油油藏蒸汽与非凝析气驱油数字化实验[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 602-606.  
Ji Youjun, Cheng Linsong, Liu Qicheng, et al. Digital experiment on steam and in-condensable gas push for extra heavy oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 602-606.
- [4] 何江川, 廖广志, 王正茂, 等. 油田开发战略与接替技术[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 519-524.  
He Jiangchuan, Liao Guangzhi, Wang Zhengmao, et al. Oilfield development strategy and replacement techniques[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 519-524.
- [5] 裴海华, 张贵才, 葛际江, 等. 稠油碱驱机理的物理模拟和数值模拟[J]. 石油学报, 2012, 32(2): 285-289.  
Pei Haihua, Zhang Guicai, Ge Jijiang, et al. Physical experiments and numerical simulations on displacement mechanism of alkaline flooding for heavy oils[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 32(2): 285-289.
- [6] Huang W S, Marcum B E, Chase M R, et al. Cold production of heavy oil from horizontal wells in the frog lake field[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1998, 1(6): 551-555.
- [7] Wang R, Qin J, Chen Z, et al. Performance of drainage experiments with Orinoco belt heavy oil in a long laboratory core in simulated reservoir conditions[R]. SPE 104377, 2008.
- [8] Sheng J J, Maini B B, Hayes R E, et al. Critical review of foamy oil flow[J]. Transport in Porous Media, 1999, 35(2): 157-187.
- [9] Bill W S, Marcum B E, Yu C L. Cold Production of heavy oil from horizontal wells in the frog lake field[R]. SPE 37545, 1997.
- [10] Yrigoyen A, Carvajal G. Performance of a foamy oil reservoir in pseudo under saturated state with associated aquifer[R]. SPE 69508, 2001.

- [11] 穆龙新. 委内瑞拉奥里诺科重油带开发现状与特点[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 338-343.  
Mu Longxin. Development actualities and characteristics of the Orinoco heavy oil belt, Venezuela[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 338-343.
- [12] 穆龙新, 韩国庆, 徐宝军. 委内瑞拉奥里诺科重油带地质与油气资源储量[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 784-789.  
Mu Longxin, Han Guoqing, Xu Baojun. Geology and reserve of the Orinoco heavy oil belt, Venezuela[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 784-789.
- [13] Smith G E. Fluid flow and sand production in heavy-oil reservoirs under solution-gas drive[J]. SPE Production Engineering, 1988, 3(2): 169-180.
- [14] Maini B B, Sarma H K, George A E. Significance of foamy-oil behaviour in primary production of heavy oils[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1993, 32(9): 50-54.
- [15] Sheng J J, Maini B B, Hayes R E, et al. Experimental study of foamy oil stability[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1997, 36(4): 31-37.
- [16] Kumar R, Pooladi-Darvish M, Okazawa T. Effect of depletion rate on gas mobility and solution gas drive in heavy oil[J]. SPE Journal, 2002, 7(2): 213-220.
- [17] 王伯军, 吴永彬, 蒋有伟, 等. 泡沫油 PVDF 性质实验[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 96-100.  
Wang Bojun, Wu Yongbin, Jiang Youwei, et al. Physical simulation experiments on PVT properties of foamy oil[J]. Acta Petroleologica Sinica, 2012, 33(1): 96-100.
- [18] 秦积舜, 李治平, 陈兴隆, 等. Orinoco 地层油的开发特征及组分研究[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 145-149.  
Qin Jishun, Li Zhiping, Chen Xinglong, et al. Development characteristics of Orinoco oil and components analysis[J]. Geoscience, 2007, 21(1): 145-149.
- [19] 杨立民, 秦积舜, 陈兴隆. Orinoco 泡沫油的油气相对渗透率测试方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 68-72.  
Yang Limin, Qin Jishun, Chen Xinglong. Testing method of oil and gas relative permeability of Orinoco foamy oil[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(4): 68-72.
- [20] 陈兴隆, 秦积舜. 泡沫油运动形态的可视化研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(6): 126-130.  
Chen Xinglong, Qin Jishun. Visualization study on foamy oil flow state[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2009, 31(6): 126-130.
- [21] 李维国, 黄炳家, 同登科, 等. 数值计算方法[M]. 东营: 石油大学出版社, 2004: 122-123.  
Li Weiguo, Huang Bingjia, Tong Dengke, et al. Numerical computation method[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2004: 122-123.
- [22] Claridge E L, Pratts M. A proposed model and mechanism for anomalous foamy heavy oil behavior[R]. SPE 29243, 1995.
- [23] Bora R, Maini B, Chakma A. Rheology of foamy oil in porous media; proceedings of Technical Meeting/Petroleum Conference of the South Saskatchewan Section, Regina, October 19-22, 1997 [C]. Regina: Petroleum Society of Canada, 1997.

(收稿日期 2013-09-27 改回日期 2013-12-17 编辑 王培玺)

版权所有