

泡沫在多孔介质中生成与破灭速度的影响因素分析

李向良¹, 杜庆军², 夏志增³, 任晓云³, 刘岭岭³

1. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 东营 257015
2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580
3. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580

摘要 通过多孔介质中泡沫驱油的渗流数学模型, 编制泡沫驱数值模拟软件。该软件可以反映泡沫渗流时涉及的生成、破灭及运移机制。以埕东油田西区泡沫驱油先导实验区为原型, 分析数值模拟模型各网格泡沫生成速度、自然破灭速度和遇油破灭速度分布与影响因素的统计规律。结果表明, 泡沫生成速度随平均渗透率、含气饱和度、气相中泡沫摩尔分数的增大而增大, 随含油饱和度的增大而减小; 泡沫自然破灭速度随平均渗透率、含气饱和度、含油饱和度和气相中泡沫摩尔分数的增大而增大; 泡沫遇油破灭速度随含油饱和度、气相中泡沫摩尔分数的增大而增大。

关键词 泡沫驱; 渗流; 生成速度; 破灭速度; 数学模型

中图分类号 TE341

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.08.011

Analysis of influential factors on foam generation and coalescence rate in porous media

LI Xiangliang¹, DU Qingjun², XIA Zhizeng³, REN Xiaoyun³, LIU Lingling³

1. Research Institute of Geological Sciences, Shengli Oilfield, Sinopec, Dongying 257015, China
2. College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China
3. Institute of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract A numerical simulator describing foam generation, coalescence and migration during the process of foam flooding in porous media was developed based on the established mathematical model. Taking the pilot test area of foam flooding in west block of Chengdong Oilfield as an example, this paper analyzes the rate distribution and influential factors of foam generation, natural coalescence and oil-contacting coalescence in each grid by using the numerical simulator. The results show that foam generation rate increased with average permeability, gas saturation and foam mole fraction in gas phase, while it decreased with increasing oil saturation. Natural coalescence rate increased with average permeability, gas saturation, oil saturation and foam mole fraction in gas phase. Oil-contacting coalescence rate increased with oil saturation and foam mole fraction in gas phase.

Keywords foam flooding; seepage; generation rate; coalescence rate; mathematical model

泡沫驱是一种具有发展潜力的提高采收率方法。泡沫在多孔介质中的稳定性是影响最终驱油效果的关键^[1-3]。在泡沫生成/破灭及稳定性方面已经开展了大量工作^[4-8]。人们普遍认为, 在多孔介质中, 液膜滞后、缩颈分离及薄膜分断

是泡沫产生的3种主要机制, 而泡沫的破灭受液膜排液、膜破裂和气体扩散3种机制控制。基于前人相关研究成果^[1-8], 编制了泡沫驱数值模拟软件。在泡沫驱数值模拟的基础上, 对油藏模型中泡沫生成速度、自然破灭速度、遇油破灭速度进

收稿日期: 2014-10-15; 修回日期: 2015-02-06

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05011); 国家自然科学基金项目(11102236)

作者简介: 李向良, 高级工程师, 研究方向为化学驱提高采收率技术, 电子邮箱: lixiangliang.slyt@sinopec.com

引用格式: 李向良, 杜庆军, 夏志增, 等. 泡沫在多孔介质中生成与破灭速度的影响因素分析[J]. 科技导报, 2015, 33(8): 68-72.

行了统计,讨论了各参数的内在关系。

1 泡沫驱渗流数学模型

基于泡沫物质的量守恒原理建立了多孔介质中泡沫渗流数学模型^[9],考虑3相5组分体系(相:油、气、水;组分:油、水、N₂、泡沫、表面活性剂),其中N₂组分和泡沫组分存在于气相。在控制体内:泡沫组分物质的量的变化=流入量-流出量+气泡的净生成量+源汇项。

对于泡沫组分,有

$$\frac{\partial(\phi S_g c_g x_{gf})}{\partial t} + \nabla \cdot (u_g c_g x_{gf}) = (r_g - r_c - r_{co}) + q_f \quad (1)$$

式中,φ为孔隙度;c_g为气相物质的量浓度,mol/m³;S_g为含气饱和度;x_{gf}为气相中泡沫组分摩尔分数;t为时间,s;u_g为气相流速,m/s;r_g、r_c、r_{co}分别为泡沫生成速度、自然破灭速度和遇油破灭速度,mol/(m³·s);q_f为单位体积、单位时间内注入的泡沫量,mol/(m³·s)。

1.1 泡沫生成速度模型

原油存在条件下,泡沫生成破灭速度与含油饱和度有关。定义S_o^{*}为泡沫稳定存在的最大临界含油饱和度,若S_o>S_o^{*},泡沫不存在;而当S_o≤S_o^{*}时,在N₂与表面活性剂溶液的接触作用下,产生泡沫体系,其生成速度是气、液饱和度及表面活性剂质量分数的函数,即

$$r_g = \begin{cases} k_g [\phi S_g (1 - x_{gf}) c_g]^a [\phi S_w x_{ws} c_w]^b & S_o \leq S_o^* \\ 0 & S_o > S_o^* \end{cases} \quad (2)$$

式中,k_g为泡沫生成速度常数,m³/(mol·s);x_{ws}为水相中表面活性剂摩尔分数;c_w为水相物质的量浓度,mol/m³;a、b为实验确定的大于0的常数,本研究中均取1.0;S_o为含油饱和度;S_o^{*}为临界含油饱和度。

1.2 泡沫自然破灭速度模型

泡沫自然破灭速度可描述为

$$r_c = \begin{cases} k_c \left(\frac{P_c}{P_c^* - P_c} \right)^2 [\phi S_g x_{gf} c_g]^d [\phi S_w x_{ws} c_w]^b & S_o \leq S_o^* \\ 0 & S_o > S_o^* \end{cases} \quad (3)$$

式中,k_c为泡沫自然破灭速度常数,m³/(mol·s);P_c为毛细管力,Pa;P_c^{*}为临界毛细管力,Pa;d为实验确定的大于0的常数,本研究中取1.0。

泡沫的自然破灭速度与气相中泡沫摩尔分数、毛细管力等因素有关。泡沫摩尔分数越高,自然破灭速度越大;泡沫体系毛细管力决定于表面活性剂类型和液相饱和度,表面活性剂稳定性越差,液相饱和度越低,毛细管力越大,泡沫自然破灭速度则越快。若液相饱和度降低到对应于临界毛细管的含水饱和度值,则泡沫的自然破灭速度趋于无限大。其中,临界毛细管力为表面活性剂质量分数的函数,即

$$P_c^* = P_{c,max}^* \tanh \left(\frac{w_s}{w_s^*} \right) \quad (4)$$

式中,P_{c,max}^{*}为P_c^{*}的极大临界值,Pa;w_s为表面活性剂的质量分数,%;w_s⁰为无油条件下强化泡沫参考表面活性剂的质量分数,%。w_s和P_c^{*}越小,泡沫自然破灭速度越快。

1.3 泡沫遇油破灭速度模型

室内实验结果^[10]显示,油相的存在会明显降低泡沫的稳定性,泡沫在气相中的摩尔分数随含油饱和度的增大而显著降低。引入“泡沫遇油破灭速度”表征,即

$$r_{co} = \begin{cases} k_{co} \left(\frac{S_o}{S_o^* - S_o} \right)^2 [\phi S_o c_o]^a [\phi S_w x_{ws} c_w]^b & S_o \leq S_o^* \\ 0 & S_o > S_o^* \end{cases} \quad (5)$$

式中,k_{co}为泡沫遇油破灭速度常数,m³/(mol·s);c_o为油相物质的量浓度,mol/m³;e为实验确定的大于0的常数,本研究中取为1.0。

对上述泡沫渗流的数学模型和与之对应的辅助方程及定解条件等进行数值离散,求解所得的差分方程组即可。数学模型的求解采用了自适应隐式方法求解,综合使用了全隐式方法和隐式压力显式饱和度方法(IMPES)。如在井点网格和基本变量(如压力、饱和度、温度等)变化比较大的网格采用全隐式处理,而在变化较小的网格采用IMPES方法处理。在此基础上,使用Fortran语言编制了泡沫驱数值模拟软件,软件能够反映泡沫渗流时涉及的生成、破灭及运移机制,此外,也能够根据实际生产条件对泡沫渗流进行模拟计算。

2 泡沫驱参数确定及基础模型建立

2.1 泡沫驱参数确定

拟合泡沫驱实验即可确定泡沫驱渗流数学模型中与生成、破灭速度相关的参数。实验用泡沫剂为DP-4,实验油样为模拟油,由埕东原油与过滤煤油按9:1配置而成。实验环境为60 cm的长岩心饱和油模型,岩心直径25 mm,渗透率约1500×10⁻³ μm²,孔隙体积约为55 cm³,初始含油饱和度为0.60。实验过程中首先进行3.0倍孔隙体积(PV)的水驱后采用氮气泡沫驱油,泡沫体系气液体积比1:1,泡沫剂溶液质量分数0.5%,记录岩心两端的压差变化,直至压力稳定。

基于泡沫驱数值模拟软件,通过调整泡沫生成、破灭速度特征参数,对长管模型水驱后泡沫驱实验的压力变化进行了拟合,其中,泡沫生成速度常数、自然破灭速度常数及遇油破灭速度常数的拟合值分别为6.5×10⁴、1.15×10⁶和5.0×10⁵ m³/(mol·s),束缚水饱和度为0.31,临界含油饱和度为0.45,无油条件下强化泡沫参考表面活性剂的质量分数为0.10%,结果如图1所示。可以看出,计算结果较好拟合了泡沫驱实验效果。图2为模拟计算得到的注入0.2 PV泡沫体系后岩心中各相饱和度分布,图中无因次位置是指岩心中不同部位距注入端的距离与岩心长度的比值。可以看出,注入泡沫体系后,由于泡沫的高黏度特点,在注入端形成稳定的泡沫体系,驱替到的部位含油饱和度下降,且在驱替前缘形成了“油墙”,含油饱和度达到0.53左右,在出口端含油饱和度为水驱

后剩余油饱和度的0.35左右。

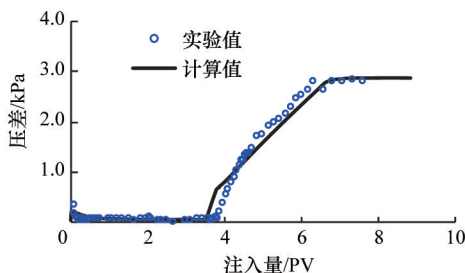


图1 泡沫驱压差拟合曲线

Fig. 1 Pressure difference matching curve of foam flooding

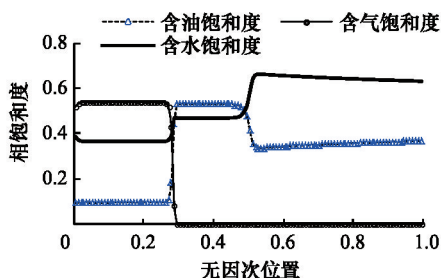


图2 泡沫驱油相饱和度分布(注入0.2 PV)

Fig. 2 Oil saturation distribution of foam flooding (0.2 PV)

2.2 基础模型建立

以埕东油田西区泡沫复合驱油先导实验区为原型,建立反映该区整体地质特征的三维油藏模型。实验区含油面积0.9 km²,有效厚度6.5 m,空气渗透率2304×10⁻³ μm²,初始含油饱和度0.62,地质储量119×10⁴ t。实验区内部构造简单,地层发育平缓,地层倾角小于1°。油层分布稳定,无边底水影响。油层非均质性严重,砂层表现出明显的正韵律,其渗透率变异系数为0.73,地层油黏度74 mPa·s,地层水矿化度6227 mg/L。实验区原始地层压力11.27 MPa,压力系数1.0,属正常压力系统。原始地层温度60℃,地温梯度3.7℃/100 m,地温正异常。地层条件符合泡沫驱适用油藏条件。

模型纵向划分6个模拟层,各层平均渗透率以正韵律分布。模型构造三维图及井位分布如图3所示,包括生产井14口,注水井5口,其中4口井实施泡沫驱。

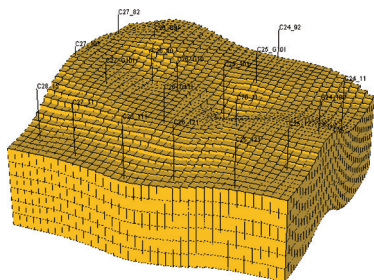


图3 地质模型三维图

Fig. 3 Schematic diagram of geological model

在历史拟合基础上,对注采参数进行优化,并以相同的生产动态分别进行了水驱和泡沫驱开发效果预测。泡沫驱优化注入参数为:注入0.3 PV的泡沫体系,泡沫剂溶液质量分数1.0%,气液体积比1:1,以混合方式注入。泡沫生成、破灭速度相关参数根据实验拟合结果确定。

图4为水驱和泡沫驱含水率预测结果。可以看出,含水率达到98%时,泡沫驱最终采收率为53.36%。泡沫驱能够有效降低含水率,改善了开发效果,相对水驱提高采收率9.36%。

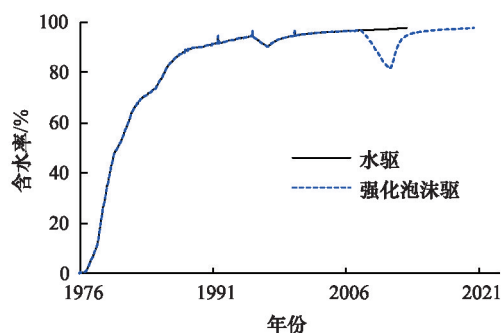


图4 水驱与泡沫驱含水率对比

Fig. 4 Comparison of water cut between water flooding and foam flooding

3 泡沫生成和破灭速度分布影响因素分析

通过泡沫驱渗流数学模型,对泡沫驱过程泡沫生成速度、自然破灭速度及遇油破灭速度在油藏中的分布进行计算和显示。对所建立的基础模型沿C25_G10和C27_G10两口注入井方向进行剖分,绘制泡沫生成速度、自然破灭速度和遇油破灭速度在油藏中的分布,如图5所示。由图5可以看出,在泡沫驱过程中,生成速度和破灭速度都呈现出注入井附近速度快,驱替前缘速度慢的特点;并且在多孔介质中遇油破灭速度大于自然破灭速度,油组分是泡沫稳定分布的主要影响因素。

在泡沫驱数值模拟基础上,统计了模型各网格中泡沫的生成速度分布、自然破灭速度分布以及遇油破灭速度分布,并讨论了渗透率、含油饱和度、含气饱和度及气相中泡沫摩尔分数等对生成、破灭速度的影响。

3.1 渗透率的影响

模型中各层平均渗透率分别为179×10⁻³、434×10⁻³、760×10⁻³、1267×10⁻³、2324×10⁻³、7136×10⁻³ μm²,分别统计了注泡沫结束时各层泡沫驱有效范围内泡沫平均生成速度和自然破灭速度,结果如图5所示。由图5可以看出,随着平均渗透率的增大,泡沫平均生成速度和自然破灭速度均增大,反映了泡沫在高渗层封堵能力大的作用机制。当泡沫稳定存在时,其净生成速度为0,此时泡沫生成速度与泡沫自然破灭速度之差即为其遇油破灭速度,如图6所示。

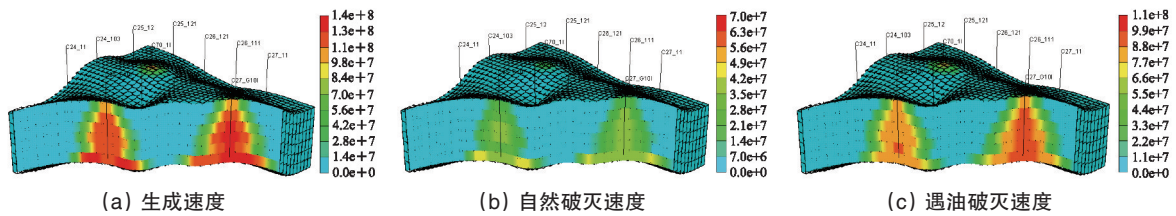


图5 泡沫驱生成/破灭速度分布(单位: mol·m⁻³·s⁻¹)

Fig. 5 Distribution of foam generation rate and coalescence rate in foam flooding (Unit: mol·m⁻³·s⁻¹)

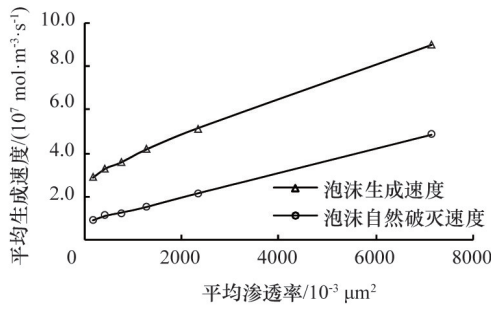


图6 泡沫平均生成速度与渗透率的关系(注泡沫结束时)

Fig. 6 Relationship between average foam generation rate and permeability (end of foam injection)

3.2 含油饱和度的影响

油相是泡沫体系稳定性的主要影响因素。图7统计了泡沫生成速度、自然破灭速度、遇油破灭速度与含油饱和度的关系。可以看出,含油饱和度越大,生成速度、自然破灭速度及遇油破灭速度越小,且呈指数递减趋势,对应的区间主要为含油饱和度0.18~0.4。其中,含油饱和度0.18对应于残余油饱和度,含油饱和度0.4对应于泡沫物质的量守恒模型中的泡沫稳定存在最大临界含油饱和度 S_o^* 。含油饱和度0.20附近遇油破灭速度呈现一段稳定区间,这主要由于低含油饱和度区域主要对应于注入井附近,气相饱和度较高,泡沫总量较多,泡沫遇油破灭速度很大。

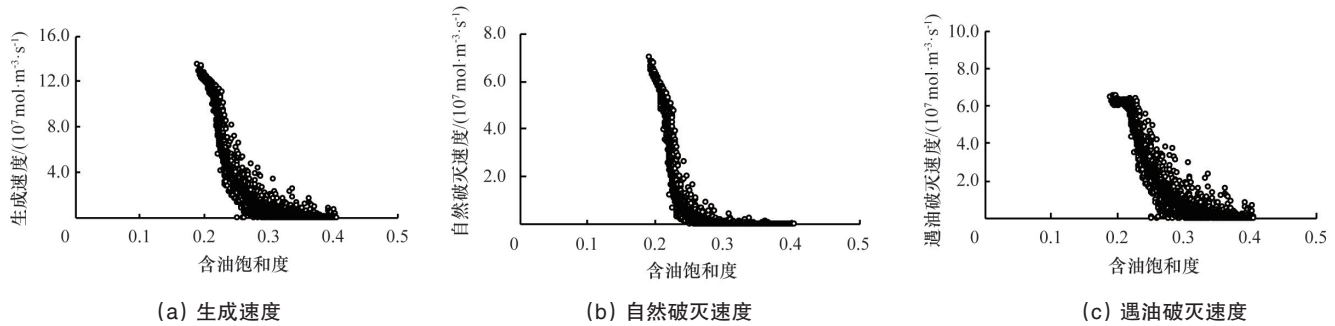


图7 泡沫生成、破灭速度与含油饱和度的关系(注泡沫结束时)

Fig. 7 Relationship between foam generation rate, coalescence rate and oil saturation (end of foam injection)

3.3 含气饱和度的影响

统计了泡沫生成速度和自然破灭速度与网格含气饱和度的关系,如图8所示。总体看,含气饱和度在0.35~0.45时,泡沫生成速度分布比较分散,并呈现2个相对集中区域。

根据与网格坐标的对应分析,生成速度较高的数据点主要位于注入井附近,含气饱和度和生成速度都较高,泡沫生成较快;而数值较低的数据点主要分布于泡沫驱替前缘,虽然含气饱和度较高,但由于表面活性剂浓度较低,生成速度较慢。

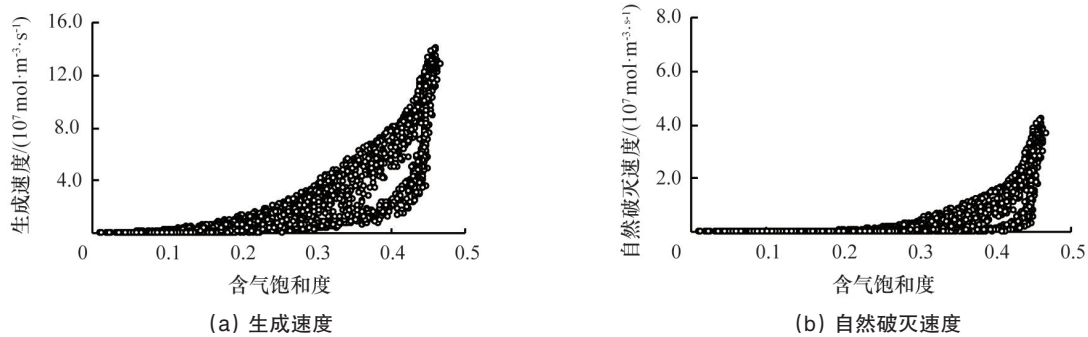


图8 泡沫生成、破灭速度与含气饱和度的关系(注泡沫结束时)

Fig. 8 Relationship between foam generation rate, coalescence rate and gas saturation (end of foam injection)

3.4 气相中泡沫摩尔分数的影响

气相中泡沫摩尔分数是指气相流体中泡沫组分所占摩尔比例,反映泡沫的稳定性能。统计了泡沫驱有效范围内各网格点泡沫生成、破灭速度与气相中泡沫摩尔分数的关系如图9所示。可以看出,泡沫的摩尔分数越大,其生成、自然破灭及遇油破灭速度均增大。泡沫的生成速度、自然破灭速度与气相中泡沫摩尔分数分别成线性关系和幂函数关系。气相中泡沫摩尔分数较低时,遇油破灭速度与之成线性关系;当气相中泡沫摩尔分数较高时,出现变平趋势,结合遇油破灭速度与含油饱和度的关系可知,该部分数据对应于注入井附近的区域。

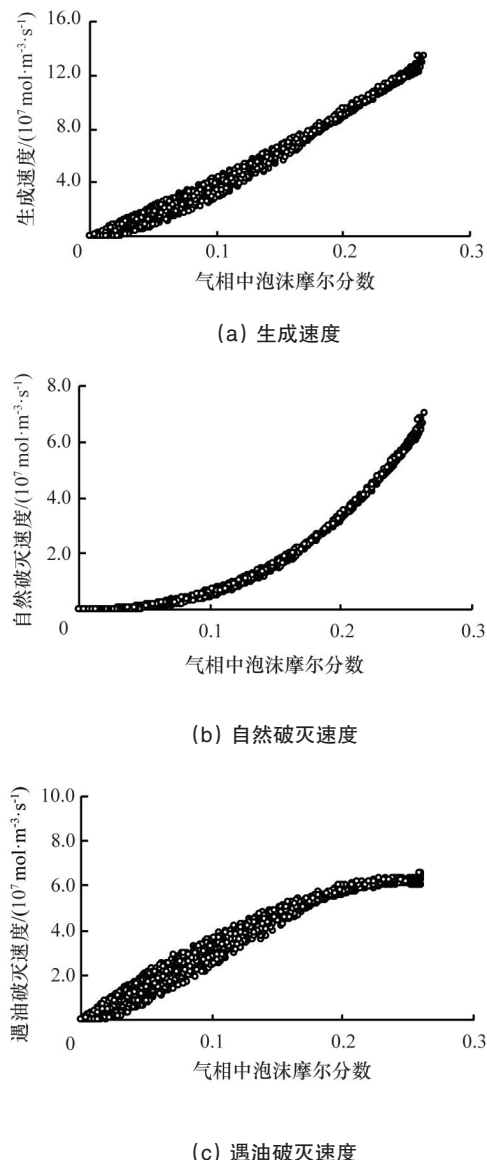


图9 泡沫生成、破灭速度与气相中泡沫摩尔分数的关系
(注泡沫结束时)

Fig. 9 Relationship between foam generation rate, coalescence rate and foam mole fraction in gas phase (end of foam injection)

4 结论

1) 基于多孔介质中泡沫驱油渗流数学模型编写了泡沫驱数值模拟软件,能够描述泡沫渗流时涉及的生成、破灭及运移机制。

2) 研究结果表明,平均渗透率越高,泡沫平均生成速度、泡沫平均自然破灭速度、泡沫平均遇油破灭速度越大;含油饱和度越大,泡沫自然破灭速度越高,稳定泡沫越少;含气饱和度越大,泡沫生成速度越大,泡沫自然破灭速度越高;气相中泡沫摩尔分数增大,泡沫生成速度、破灭速度均增大。

参考文献(References)

- [1] 钱昱, 张思富, 吴军政, 等. 泡沫复合驱泡沫稳定性及影响因素研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(2): 33-35.
Qian Yu, Zhang Sifu, Wu Junzheng, et al. Foam stability and effecting factors of foam combination flooding[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 33-35.
- [2] 李雪松, 王军志, 王曦. 多孔介质中泡沫驱油微观机理研究[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(5): 109-113.
Li Xuesong, Wang Junzhi, Wang Xi. Studies of microcosmic foam driving mechanism in porous medium[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(5): 109-113.
- [3] 张广卿, 刘伟, 李敬, 等. 泡沫封堵能力影响因素实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 44-46.
Zhang Guangqing, Liu Wei, Li Jing, et al. Experimental study on the factors influencing the blocking ability of foam[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 44-46.
- [4] Mast, R F. Microscopic behavior of foam in porous media[C]. Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, San Antonio, Texas, October 8-11, 1972: SPE-3997-MS.
- [5] Owete O S, Brigham W E. Flow behavior of foam: A porous micromodel study[J]. SPE Reservoir Engineering, 1987, 2(3): 315-323.
- [6] Kharabaf H, Yortsos Y C. A pore-network model for foam formation and propagation in porous media[J]. SPE Journal, 1998, 3(1): 42-53.
- [7] Alvarez J M. Foam flow behavior in porous media: Effects of flow regime and porous media heterogeneity[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 1998.
- [8] Shen C, Nguyen Q, Huh C, et al. Does polymer stabilize foam in porous media?[C]. SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, OK, April 22-26, 2006: SPE 99796-MS.
- [9] 杜庆军, 侯健, 李振泉, 等. 聚合物强化泡沫驱数学模型及其应用[J]. 计算物理, 2009, 26(6): 872-878.
Du Qingjun, Hou Jian, Li Zhenquan, et al. A mathematical model of polymer enhanced foam flooding[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(6): 872-878.
- [10] 陆先亮, 陈辉, 栾志安, 等. 氮气泡沫热水驱油机理及实验研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2003, 18(4): 49-52.
Lu Xianliang, Chen Hui, Luan Zhian, et al. Study on the mechanism of nitrogen hot-water flooding[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2003, 18(4): 49-52.

(编辑 田恬)