

·油气采收率·

乳液表面活性剂驱数值模拟方法研究与应用

曹伟东

(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要:乳液表面活性剂驱是化学驱提高采收率的新方法,在一定的油水比条件下,该类型的表面活性剂能够与油水作用形成高粘度油包水型乳液,扩大波及体积,其驱油机理与传统的聚合物、表面活性剂不同,无法通过现有的数值模拟方法及软件反映。为准确反映乳液表面活性剂的驱油特征,在室内实验结果分析的基础上,明确了乳液表面活性剂驱乳化增粘的主要机理,建立了表征乳液流动特征的数学模型,并实现了相应的数值模拟方法。通过室内实验模型的拟合和矿场模型的应用,验证了数学模型与数值模拟方法的正确性,研究了乳液表面活性剂驱提高采收率效果与乳液粒径、渗透率、非均质性等因素的关系,对比了乳液表面活性剂与常规表面活性剂的驱油效果。结果表明,乳液的粒径中值与孔喉的匹配关系对乳液的稳定性与粘度有较大影响,相比常规表面活性剂,乳液表面活性剂由于较好的流度控制作用能够进一步提高原油采收率。

关键词:乳液表面活性剂 数值模拟 低渗透油藏 数学模型 化学驱

中图分类号:TE319

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)02-0058-05

Research and application of numerical simulation method for emulsion surfactant flooding

Cao Weidong

(Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company,
SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Emulsion surfactant flooding is a new chemical flooding method for enhanced oil recovery. Under a certain oil-water ratio condition, this type of surfactant can interact with oil and water and form water-in-oil emulsions with high viscosity, and thus the swept volume may be enlarged. The oil displacement mechanism of the emulsion surfactant is different from the traditional polymer and surfactant, and it could not be reflected by the existing numerical simulation methods and softwares. In order to accurately reflect the oil displacement characteristics of the emulsion surfactant, based on analysis of the laboratory results, the main mechanism of emulsification and viscosity increase was manifested, and the mathematical model for characterizing emulsion flow was built and the corresponding numerical simulation method was realized. The accuracy of the mathematic model and numerical simulation method was verified by the fitting result of laboratory model and the application of field model. Relationship between the enhanced oil recovery effect of emulsion surfactant flooding and the factors of emulsion particle size, permeability and heterogeneity was researched, and the effect of emulsion surfactant flooding and conventional surfactant flooding was compared. The results show that the matching relationship between median grain size of emulsion and pore throat has a great influence on the stability and viscosity of the emulsion. Compared with the conventional surfactant, the emulsion surfactant could further improve oil recovery due to better mobility control.

Key words: emulsion surfactant; numerical simulation; low permeability oil reservoir; mathematical model; chemical flooding

从中国油藏的地质和技术应用条件来看,表面活性剂是最适合、应用范围最广的化学驱油剂之

一,提高采收率的效果也较好^[1-5]。但是通过注入大分子的聚合物提高采收率的方法不适用于低渗透

收稿日期:2016-12-07。

作者简介:曹伟东(1983—),男,河北故城人,高级工程师,博士,从事油藏数值模拟研究。联系电话:(0546)8715382, E-mail: caoweidong085.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“高温高盐油田化学驱提高采收率技术”(2016ZX05011003)。

油藏,其原因为聚合物在低渗透油藏的多孔介质中封堵性较强,在矿场实施时存在注入困难等问题。室内实验表明,将水和表面活性剂同时注入,使原油形成油包水乳液,既可以降低注入难度,又可以在油藏深部形成较好的流度控制与调驱性能,是低渗透油藏采用化学驱提高采收率的方法^[6-10]。

目前,乳液表面活性剂作为一种新型的驱油剂在胜利油区开展了先导试验应用,在其驱油机理研究方面取得新的认识^[11],但现有商业和自研软件均无法模拟其驱油过程,只能采用聚合物或者传统表面活性剂的方式近似处理^[12]。从目前的化学驱数值模拟方法来看,聚合物驱数学模型只能部分描述乳液表面活性剂的增粘性能,无法反映其破乳和成乳过程对驱油的影响;聚合物性能只与药剂浓度相关,但乳液性能除与药剂浓度相关外,还受到油水饱和度比的影响,造成数值模拟预测结果与实际值有较大偏差,尤其对于含水饱和度差异较明显的油藏,单井误差可能更大。为此,笔者在实验研究的基础上,借助数值模拟方法建立了乳液表面活性剂的相态与物化参数计算模型,形成相应的数值模拟软件,深入认识乳液表面活性剂的驱油机理,为低渗透油藏化学驱开发方式优化与调整提供了重要技术手段。

1 乳液表面活性剂驱数学模型

乳液表面活性剂驱数学模型的基本假设与经典的化学驱模型一致^[13-14],且乳液表面活性剂作为水相中的一种组分,被处理成没有分子质量分布的单剂,其在水中的运移状况通过体积浓度来表征。

1.1 乳液表面活性剂组分质量守恒方程

根据质量守恒原理,组分浓度方程即为组分的质量守恒方程,表示在单位时间内,流入单元的组分质量减去流出单元的组分质量、组分分子扩散量,所得结果即为单元内组分质量的变化。

考虑多孔介质中,油水两相流系统的乳液表面活性剂物质守恒方程为

$$Q_c = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \tilde{C}_c \rho_c) + \nabla \left[\sum_{i=1}^{n_n} \rho_c (C_{ci} \mathbf{u}_i - D_{ci} \nabla C_{ci}) \right] \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{u}_i = -\frac{KK_{r_i}}{\mu_i}(\nabla p_i - \gamma_i \nabla h) \quad (2)$$

1.2 乳液表面活性剂物化性能表征模型

1.2.1 乳化增粘模型

根据室内实验研究,乳液表面活性剂驱的主要

驱油机理是通过形成油包水乳液来增加驱替相的粘度,从而提高波及系数。乳化增粘性主要受乳液表面活性剂的质量分数和油水比(即含水饱和度)2个因素的影响。分析认为,乳液表面活性剂质量分数达到某个阈值以上,能够在合理的油水比条件下形成较稳定的乳液,并且乳液的粘度满足应用要求;相同浓度条件下,乳化过程受油水比的影响更大(表1)。

表1 乳液表面活性剂乳化增粘性与含水饱和度关系
Table1 Relationship between emulsification and viscosity increase of emulsion surfactant and water saturation

实验温度/°C	乳液粘度/(mPa·s)	含水饱和度和,%	剪切速率/s ⁻¹	乳化增粘率,%
110	69.5	50	60	334
110	68.5	55	60	328
110	26.5	60	60	66
110	21.0	70	60	31
110	19.0	80	60	19
110	16.0	0	60	0

结合室内实验的研究成果,可以认识到:①含水饱和度为50%时,乳液表面活性剂形成的乳液粘度最高;②含水饱和度为80%时,乳液粘度逐渐下降,但是仍然能保持比原油更高的粘度。

该实验结果在开展数值模拟应用时需要进行拓展,根据实验研究得到的认识:①含水饱和度为90%时,乳液还有一定增粘性,粘度大于水的粘度,可认为就是水的粘度;②含水饱和度从50%开始下降时,乳液粘度也随之下下降,实验结果数据较少,其原因为矿场中油藏区块一般处于高含水、特高含水期,含水饱和度为50%以下的很少;③含水饱和度逐渐下降到束缚水时,可以认为乳液粘度与原油粘度相同。

乳化增粘模型可以直接根据实验曲线插值,得到不同的含水饱和度和乳液表面活性剂质量分数下的粘度为

$$m = f(S_w, C_{sw}) \quad (3)$$

1.2.2 乳化调剖模型

乳液表面活性剂在多孔介质中的封堵调剖作用较明显,其影响因素与传统的聚合物、凝胶不一样。乳液颗粒粒径与岩心孔喉的匹配关系是影响乳液调剖能力的关键因素,当乳液的粒径大于岩心孔喉半径时,调剖的效果较好,因为乳液颗粒可以通过变形进入半径较大的岩心孔喉,封堵强度要高于依靠多个乳液颗粒聚集对岩心孔喉的封堵(表2)。

表2 乳液粒径与孔喉尺寸对调剖性能的影响实验结果
Table2 Experimental results of the influence of emulsion particle size and pore throat size on profile control performance

乳液粒径/ μm	岩心平均孔喉半径/ μm	封堵前渗透率/ μm^2	封堵后渗透率/ μm^2	残余阻力系数	孔隙度, %	压力梯度/ $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
2.711	5~7	540	6.97	77.55	22.0	1.243
3.673	5~7	635	7.33	86.47	24.0	1.605
7.323	5~7	641	3.29	194.0	23.9	2.768

从表2可以看出,大粒径乳液的残余阻力系数最高,说明其降低岩心渗透率的能力最强,其压力梯度最大;其他2组实验所用的乳液粒径相差不大,实验结果相近。由此说明当乳液的粒径大于岩心孔喉半径时,调剖效果较好。

同时,室内实验也考虑了乳液的质量分数对残余阻力系数的影响,与常规化学剂认识不同的是乳液的质量分数对残余阻力系数的影响较小(表3)。

表3 乳液质量分数对调剖性能的影响实验结果
Table3 Experimental results of the influence of emulsion concentration on profile control performance

岩心	封堵前渗透率/ μm^2	封堵后渗透率/ μm^2	残余阻力系数	乳液质量分数, %	压力梯度/ $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
1	625	7.18	87.0	75	1.637
2	707	7.60	93.02	50	1.440
3	635	7.33	86.6	100	1.605

综上所述,考虑乳液表面活性剂的封堵调剖性,从数学模型上主要考虑乳液表面活性剂相关性质对残余阻力系数的影响函数关系,而主要的影响因素即乳液表面活性剂与孔喉的匹配关系,即乳液表面活性剂的粒径中值与岩石的渗透率,其关系式为

$$R_k = f(\varphi_e, K) = a_1(\varphi_e)K^2 + a_2(\varphi_e)K + a_3(\varphi_e) \quad (4)$$

1.2.3 吸附模型

室内实验研究认为,乳液表面活性剂在岩心中的吸附是引起乳化及破乳效果的重要因素。因此,在数学模型中考虑了乳液表面活性剂吸附对乳液质量分数的影响。鉴于目前关于乳液表面活性剂的吸附实验数据较少,因此,该数学模型中所描述的乳液表面活性剂吸附是采用国际上通用的Langmuir公式

$$\hat{C}_{\text{abs}} = \frac{a_e C_{e1}}{1 + b_e C_{e1}} \quad (5)$$

其中

$$a_e = a_{e1} + a_{e2} C_{se} \quad (6)$$

在矿场应用中,室内实验只能提供乳液表面活性剂吸附量与质量分数、矿化度的关系曲线,无法

提供 a_{e1} , a_{e2} 和 b_e 这3个参数。因此,在乳液表面活性剂吸附模型中,也可以考虑通过实验曲线数据插值的方法确定其吸附量。其数学模型表达式为

$$\hat{C}_{\text{abs}} = f(C_{e1}, C_{se}) \quad (7)$$

2 数值模拟方法测试与应用

数学模型是采用基于上游排序思想的隐式求解方法来求解的^[15-16],并通过应用胜利油田分公司勘探开发研究院的SLCHEM化学驱数值模拟软件来进行功能模块的实现。

2.1 室内实验结果拟合

2.1.1 实验模型及步骤

进行室内实验模拟时所用的实验模型为3层非均质模型,尺寸为30 cm×4.5 cm×4.5 cm,渗透率在纵向上按1:2:4的级差分布,3层孔隙体积相近。实验温度为60℃,实验所用模拟油密度为0.92 g/mL,粘度为35 mPa·s,实验所用乳液表面活性剂质量浓度为3 000 mg/L。

实验步骤为:①注地层水驱油,所注地层水为1.5~1.8孔隙体积倍数,注入速度为2.94 m/d,直至产出液含水率大于98%;②注入0.3倍孔隙体积倍数的乳液表面活性剂,注入速度为2.94 m/d;③后续水驱,注入速度仍为2.94 m/d,直至产出液含水率大于98%。

利用岩心F-1和F-2分别进行以上的驱替实验,其中岩心F-1的孔隙度为14.84%,原始含油饱和度为56.98%,纵向上3层的渗透率分别为2,4和8 μm^2 ;岩心F-2的孔隙度为20%,原始含油饱和度为71.69%,纵向上3层的渗透率分别为0.5,1和2 μm^2 。

2.1.2 数值模拟模型设置

将数值模拟模型在平面上分为3个不同渗透率的条带,其渗透率分别与岩心F-1、岩心F-2一致,水平和垂直方向上的渗透率相同。孔隙度、初始含油饱和度与室内实验数据一致。在该模型左端设置1口水平井作为注入端,模型右端每个非均质条带上各设置1口生产井作为采出端。按照室内实验设计进行实验,从图1可以看出,计算的结果与实验结果较吻合,验证了数值模拟方法的有效性。

岩心F-2在数值模拟拟合过程中,通过调整相对渗透率拟合初期水驱阶段,调整乳液与油、水形成稳定的乳化作用的质量分数阈值为0.11%,并且将乳化后的粘度相比岩心F-1对应的模型有一定幅度的下降。从图1可以看出,岩心F-1和岩心F-2

的2组实验中所用的乳液表面活性剂对岩心F-1适应性较好,易形成较稳定的乳液,增粘性较好,而岩心F-2乳液表面活性剂与岩心的匹配性相对较差,乳液增粘效果相对较差,因此含水率漏斗下降的幅度比岩心F-1的小。

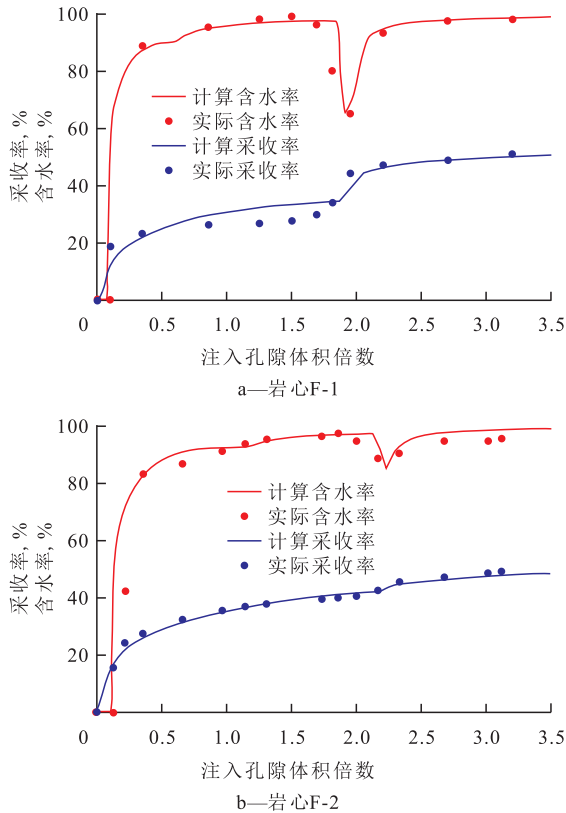


图1 岩心F-1和F-2乳液表面活性剂驱含水率与采收率拟合结果

Fig.1 Fitting results of water-cut and recovery of emulsion surfactant flooding on core F-1 and F-2

2.2 实例应用

胜利油区某区块为中低渗透油藏,平均渗透率小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,初始原油粘度约为 $20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。该区块经过多年的水驱开发,当前的平均剩余油饱和度为 50%。模型网格数为 21 600,平面网格步长为 19 m,开发部署 56 口井,其中生产井和注水井皆为 28 口。矿场实验设计:前 275 d 为水驱开发;276~2 283 d 为化学驱开发;2 283 d 以后为后续水驱开发。其中,化学驱开发方式分别考虑乳液表面活性剂驱、表面活性剂驱、表面活性剂与乳液表面活性剂复合驱3种。乳液表面活性剂输入参数取值主要考虑其增粘性,未考虑界面性,即不降低界面张力。从图2可以看出,注入乳液表面活性剂,由于其乳化作用能增大水相粘度和扩大波及体积,从而降低含水率、提高采收率。对比可以看出,表面活性剂驱由于不能扩大波及体积,因此不能应用于采出程度较高的油藏进一步提高采收率的措施中。

而传统的表面活性剂与乳液表面活性剂复配注入后,一方面乳液的增粘作用改善了水、油流度比,另一方面乳液的扩大波及作用使得低界面张力表面活性剂的洗油区域进一步拓展,相比单一化学剂驱替,复合驱具有一定的协同作用,进一步提高了降水增油的效果。

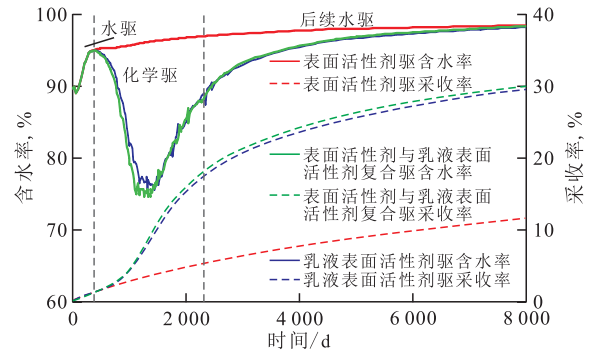


图2 3种不同化学驱开发方案数值模拟的含水率和采收率对比

Fig.2 Comparisons of water-cut and recovery obtained from numerical simulation results for three different chemical flooding projects

3 结论

乳液表面活性剂驱的主要驱油机理是增加驱替相的粘度,其增粘的主要控制因素是表面活性剂的质量分数和含水饱和度。在数值模拟过程中,首次提出了将乳液表面活性剂作为水相中的一种组分,并根据饱和度方程和组分质量分数方程的计算结果进一步计算水相粘度变化的方法,能够有效模拟乳液表面活性剂在多孔介质中的流动规律及驱油机理。室内实验结果与数值模拟结果表明,乳液的粒径中与孔喉的匹配关系对乳液的稳定性与粘度有较大影响;在非均质性相同的条件下,平均渗透率越低,乳液的增粘性能越好;在平均渗透率相同的情况下,非均质性越弱,乳液表面活性剂驱整体驱替效果越好。

符号解释:

Q_c ——源汇项; t ——时间, d; ϕ ——岩石孔隙度; \bar{C}_c ——乳液表面活性剂组分的质量分数, %; ρ_c ——组分的密度, g/cm^3 ; n_p, l ——相数; C_{cl} ——乳液表面活性剂在 l 相中的质量分数, %; u_l ——速度, m/d ; D_{cl} ——Fick 弥散张量(包含分子扩散); K ——地层(绝对)渗透率, μm^2 ; K_{rl} —— l 相的相对渗透率; μ_l —— l 相粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; p_l —— l 相压力, kPa ; γ_l —— l 相相对密度; h ——油藏垂向深度, m ; m ——乳液粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; S_w ——含水饱和度, %; C_{cw} ——乳液表面活性剂在水相中的质量分数, %; R_1 ——残余阻力系

数; a_1, a_2, a_3 ——与乳液粒径中值相关系数, 可通过实验数据回归得到; φ_c ——乳液表面活性剂的粒径中值, μm ; \hat{C}_{abs} ——乳液表面活性剂吸附质量分数, %; a_e, b_e, a_{e1}, a_{e2} ——通过回归得到的系数; C_{se} ——含盐量, mg/L 。

参考文献:

- [1] 韩冬, 沈平平. 表面活性剂驱油原理及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
Han Dong, Shen Pingping. Principle and applications of surfactant flooding[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [2] 岳湘安, 王尤富, 王克亮. 提高石油采收率基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
Yue Xiang'an, Wang Youfu, Wang Keliang. Basis of enhanced oil recovery[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [3] 王家禄, 沈平平, 陈永忠, 等. 三元复合驱提高原油采收率的三维物理模拟研究[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 61-66.
Wang Jialu, Shen Pingping, Chen Yongzhong, et al. 3-D physical modeling of enhanced oil recovery by alkali-surfactant-polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 61-66.
- [4] 张永刚, 陈艳, 邓学峰, 等. 超低渗油藏表面活性剂降压增注及提高采收率[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(1): 126-130.
Zhang Yonggang, Chen Yan, Deng Xuefeng, et al. Pressurized-augmented injection and enhanced oil recovery by the surfactant for the ultra-low-permeability oil reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(1): 126-130.
- [5] 秦国伟, 马玉娟, 袁娜, 等. 表面活性剂吞吐技术在封闭小断块油藏的应用[J]. 特种油气藏, 2016, 23(2): 120-123.
Qin Guowei, Ma Yujuan, Yuan Na, et al. Application of surfactant huff-huff in bounded small-scale fault-block reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(2): 120-123.
- [6] 祝仰文, 孟红丽, 马宝东, 等. 低渗透油藏表面活性剂降压增注效果影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(1): 74-78.
Zhu Yangwen, Meng Hongli, Ma Baodong, et al. Factors effecting decompression and augmented injection by surfactant in low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 74-78.
- [7] Mcauliffe C D. Oil-in-water emulsions and their flow properties in porous media[J]. Journal of Petroleum Technology, 1973, 25(6): 727-733.
- [8] Sherman P. Studies in water-in-oil emulsions the properties of sorbitan-interfacial films of sesquileate[J]. Colloids and Surfaces, 1953, 8(1): 35-39.
- [9] 江延明, 李传宪. W/O 乳状液的流变性研究[J]. 油气储运, 2000, 19(1): 10-12, 19.
Jiang Yanming, Li Chuanxian. Research on rheological properties of W/O emulsion[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2000, 19(1): 10-12, 19.
- [10] 秦积舜, 张星, 耿宏章, 等. 油水乳化转相黏度预测实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(4): 132-135.
Qin Jishun, Zhang Xing, Geng Hongzhang, et al. Viscosity prediction experiment of the oil-water emulsions at reverse phase point[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(4): 132-135.
- [11] 曹绪龙, 马宝东, 张继超. 特高温油藏增粘型乳液驱油体系的研制[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(1): 68-73.
Cao Xulong, Ma Baodong, Zhang Jichao. Development of oil displacement system for extra-high temperature reservoirs using viscosifying emulsion[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 68-73.
- [12] 曹伟东, 戴涛, 于金彪, 等. 非均相复合驱数值模拟方法研究与应用[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 606-611.
Cao Weidong, Dai Tao, Yu Jinbiao, et al. A numerical simulation method of heterogeneous combination flooding[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 606-611.
- [13] Delshad M. UTchem Version 6.1 technical documentation[M]. Austin: Center for Petroleum and Geosystems Engineering, 1997.
- [14] 杨承志. 化学驱提高石油采收率[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
Yang Chengzhi. Enhanced oil recovery by chemical flooding[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [15] 杨耀忠, 鲁统超, 戴涛, 等. 二元复合驱数值模拟隐格式和应用[J]. 山东大学学报: 理学版, 2010, 45(8): 19-26.
Yang Yaozhong, Lu Tongchao, Dai Tao, et al. An implicit scheme for a numerical simulation of binary combination flooding and application[J]. Journal of Shandong University: Natural Science, 2010, 45(8): 19-26.
- [16] 曹伟东, 戴涛, 于金彪, 等. 化学驱数值模拟的 IMPIMC 方法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2015, 45(1): 88-94.
Cao Weidong, Dai Tao, Yu Jinbiao, et al. An IMPIMC method for chemical simulation[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2015, 45(1): 88-94.

编辑 王星