

稠油油藏尿素泡沫辅助蒸汽驱三维物理模拟实验

李文会¹, 刘鹏程^{1*}, 沈德煌², 钱宏图¹

(1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2.中国石油勘探开发研究院 提高采收率国家重点实验室,北京 100083)

摘要:稠油油藏蒸汽驱过程中,经常出现蒸汽超覆和窜流等现象,导致蒸汽波及系数小,原油采收率低。为此,利用三维驱替实验系统,分别进行纯蒸汽驱、蒸汽驱转尿素辅助蒸汽驱和蒸汽驱转尿素泡沫辅助蒸汽驱3组实验。结果表明:纯蒸汽驱驱替效果不理想,而蒸汽驱转尿素辅助蒸汽驱和蒸汽驱转尿素泡沫辅助蒸汽驱的驱替效果要好于纯蒸汽驱。蒸汽驱转尿素辅助蒸汽驱和蒸汽驱转尿素泡沫辅助蒸汽驱实验在转驱点后,瞬时油汽比分别提高0.24和0.27,采出程度分别提高9.56%和16.29%,进出口压差最大提高0.18和0.33 MPa,瞬时含水率分别降低15.77%和36.80%;从三维温度场变化可知,尿素辅助蒸汽驱可扩大蒸汽波及区域,但效果不明显,而尿素泡沫辅助蒸汽驱可以有效抑制蒸汽超覆和窜流,提高蒸汽波及系数和原油动用程度。综合对比指标可知,尿素泡沫辅助蒸汽驱的驱替效果最好。

关键词:蒸汽驱 驱油机理 物理模拟 尿素 泡沫 稠油油藏

中图分类号:TE357.41

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)04-0118-05

Three-dimension physical simulation experiment of urea-foam assisted steam flooding in heavy oil reservoir

Li Wenhui¹, Liu Pengcheng¹, Shen Dehuang², Qian Hongtu¹

(1.School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China; 2.State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

Abstract: In the processes of steam flooding in heavy oil reservoirs, the steam overlay and channeling often occur, which leads to small sweep efficiency of steam and low recovery efficiency of oil. Aiming at these problems, three experiments were conducted with a three-dimension displacement system, which included steam flooding, steam flooding converting to urea assisted steam flooding and steam flooding converting to urea-foam assisted steam flooding. The results show that the effect of the conventional steam flooding is not satisfactory; however, that of steam flooding converting to urea assisted or to urea-foam assisted steam flooding is better. After the conversion points of these two experiments, the instantaneous oil steam ratio was increased by 0.24 and 0.27 respectively; the recovery efficiency was improved by 9.56% and 16.29% respectively; the pressure difference between inlet and outlet increased by 0.18 and 0.33 MPa respectively and the instantaneous water cut decreased by 15.77% and 36.80% respectively. Variation of three-dimension temperature fields shows that the urea assisted steam flooding can expand the steam swept area but the effect is not obvious, and the urea-foam assisted steam flooding can control the steam overlay and channeling effectively and improve the sweep efficiency of the steam and produced degree of the oil. Comprehensive comparison of the above indexes indicates that the effect of urea-foam assisted steam flooding is the best.

Key words: steam flooding; oil displacement mechanism; physical simulation; urea; foam; heavy oil reservoirs

收稿日期:2015-05-11。

作者简介:李文会(1991—),男,内蒙古呼和浩特人,在读硕士研究生,从事稠油油藏开发物理模拟实验研究。联系电话:13718773235, E-mail:liwenhuicugb@163.com。

*通讯作者:刘鹏程(1969—),男,山东成武人,副教授。联系电话:13522168398, E-mail:lpc@cugb.edu.cn。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金“稠油与超稠油油藏流变特性与井网布置方式研究”(2652013094), 国家科技重大专项“稠油/超稠油开发关键技术”(2011ZX05012)。

蒸汽驱是中国稠油油藏开发的主要技术之一,但是由于原油和蒸汽驱之间的粘度与密度差异性而导致的粘性指进、重力超覆及蒸汽窜流等现象制约了蒸汽驱的开发效果,从而造成油层平面及纵向波及系数低、油气比低、采收率低和含水率高等问题^[1]。蒸汽泡沫驱协同其他化学剂注入地层能在一定程度上提高蒸汽波及系数和洗油效率,改善蒸汽驱开发效果^[2]。Lau在蒸汽泡沫驱中加入 Na_2CO_3 溶液,能起到碱驱效果^[3];Li等在蒸汽泡沫驱原有的泡沫剂中加入单宁酸,使泡沫剂的稳定性、抗高温能力以及封堵能力都有所增加^[4];Tiamiyu等通过4组室内对比实验,研究了破乳剂作为蒸汽泡沫驱添加剂的适应性,实验结果表明,破乳剂协同蒸汽泡沫驱对提高原油采收率具有较大潜力^[5]。

前人实验研究所用的 Na_2CO_3 、单宁酸和破乳剂等化学剂较昂贵,且驱替机理单一,而尿素容易制备,在150℃的高温下与水反应分解为 CO_2 和 NH_3 ,可充当泡沫剂的气源, NH_3 溶于水呈碱性,易形成碱驱,是改善蒸汽驱开发效果的一项可行性技术。该项技术曾在中国的河南油田^[6-9]进行现场试验,取得了较好的开发效果,但是前人对于尿素泡沫辅助蒸汽驱机理的研究较少。钱宏图等曾在室内进行尿素泡沫辅助蒸汽驱和热水驱的一维岩心驱替实验,研究了尿素和泡沫在蒸汽驱过程中的作用机理,但一维模型并不能直观反映泡沫提高蒸汽波及系数以及碱驱与蒸汽泡沫驱协同作用的过程,因此,得出的结论不适用于实际油藏^[10]。为此,笔者利用三维驱替实验系统,开展稠油油藏尿素泡沫辅助蒸汽驱的三维物理模拟实验,模拟对比纯蒸汽驱、蒸汽驱转尿素辅助蒸汽驱、蒸汽驱转尿素泡沫辅助蒸汽驱的开发指标,分析尿素和泡沫剂等添加剂的驱油机理,明确蒸汽在平面及纵向的波及状况,实验结果表明,尿素泡沫辅助蒸汽驱有望成为改善稠油油藏蒸汽驱效果的一项可行性技术。

1 实验器材及方法

1.1 实验装置

实验装置(图1)主要包括:①模型本体。其长度和宽度均为30 cm,高度为20 cm,最高耐温为300℃,最高耐压为20 MPa,进出口均有测压点;模型内部分为上、中、下共3层,各层之间的连通性可以通过中间隔板控制,每层均匀分布有 8×8 个热电偶测温点,可以较好地反映模型内部温度场的变化;模型内壁经过特殊的磨砂处理,可以防止蒸汽

沿内壁发生汽窜。②数据采集装置。主要包括压力监测装置和温度采集装置。压力监测装置用来监测进口端和出口端压力,实时反映模型压力的变化;温度采集装置通过各层热电偶测温点准确反映模型内的温度变化,在显示器上的显示效果分为平面、立体和分层显示等,还可以生成视频连续记录实验过程中模型内的温度变化。③蒸汽发生器。用于提供高温蒸汽,最高耐温为300℃,最高耐压为20 MPa,最大蒸汽排量为9 kg/h。④高压泵。用于将流体泵入模型中,并提供驱替压力,最大承压为51 MPa。⑤中间容器。主要用于盛装原油、泡沫剂溶液和尿素溶液等,最高耐温为120℃,最高耐压为32 MPa。⑥恒温箱。其加热温度为5~300℃,用于加热盘管。⑦量液瓶。用于计量油和水的产量。

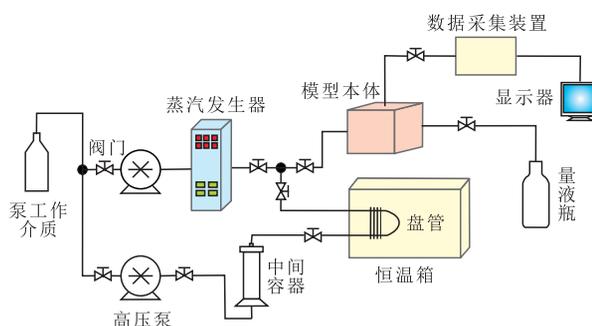


图1 尿素泡沫辅助蒸汽驱三维驱替实验装置

Fig.1 Three-dimensional experimental device of urea-foam assisted steam flooding

1.2 实验材料

实验用砂为纯净的石英砂,其物性参数见表1。实验用油为PL区块稠油,脱气原油粘度在温度为45℃、压力为0.1 MPa和温度为200℃、压力为0.1 MPa条件下分别为14 550和24.4 mPa·s。实验用水为蒸馏水。注入蒸汽温度为250℃,蒸汽干度为0.8。实验用泡沫剂为磺酸盐高温泡沫剂(GF-PJ),是由较长碳链的重烷基苯和 α -烯烃等做原料,通过磺化、中和、水解等过程而制成,其溶液的质量分数为0.5%。实验用尿素纯度为99%,其溶液的质量分数为25%。

表1 三维模型的物性参数

Table1 Physical property parameters of each layer in 3D model

小层	厚度/ cm	粒径/ 目	孔隙 度,%	渗透率/ μm^2	束缚水饱 和度,%
上层	6	80~100	37.1	3.3	9.68
中层	7	120~160	35.8	1.7	12.35
下层	7	50~75	43.3	5.2	5.79

1.3 实验方法

实验分3组进行:①实验1为纯蒸汽驱,实验目的是为了与其他添加剂辅助蒸汽驱的实验结果进

行对比。②实验2为蒸汽驱转尿素辅助蒸汽驱。实验目的是为了研究尿素对于蒸汽驱的辅助作用,当蒸汽驱的瞬时油气比低于0.15时转为尿素辅助蒸汽驱。③实验3为蒸汽驱转尿素泡沫辅助蒸汽驱。实验目的是为了研究尿素与泡沫在蒸汽驱过程中的协同作用,当蒸汽驱的瞬时油气比低于0.15时转为尿素泡沫辅助蒸汽驱。通过对比3组实验的瞬时油气比、瞬时含水率、采出程度、进出口压差和三维温度场等主要指标,研究尿素、尿素与泡沫在蒸汽驱过程中的作用机理。

1.4 实验步骤

三维物理模拟实验采用的是四分之一五点井网。将三维模型的一端作为注入井,其对角线的另一端作为生产井;在进行填砂、测量砂层的孔隙度和渗透率以及饱和实验用油时,保持各层互不连通,注入井和生产井全部射开;在注蒸汽时保持注入井射开下半段,生产井全部射开。

实验步骤为:①连接好实验装置并对三维模型抽真空后,用蒸馏水饱和模型,计算模型各层的孔隙度,并通过恒定的注入速度测量、计算各层的渗透率;②向三维模型中注入实验用油至出口端不再有水产出,计算各层的含油饱和度及束缚水饱和

度。对三维模型的温度和压力进行调试,使其稳定在所模拟的地层温度(45℃)与压力(4 MPa),静置12 h;③向三维模型中注入蒸汽进行蒸汽驱实验,注入速度为150 mL/min;定时记录进、出口的压力及各层温度场的变化,计量产油量、产水量以及注入量;④进行蒸汽驱转尿素辅助蒸汽驱和蒸汽驱转尿素泡沫辅助蒸汽驱实验,当蒸汽驱的瞬时油气比低于0.15时分别进行尿素、尿素泡沫辅助蒸汽驱实验。蒸汽注入速度为150 mL/min,尿素溶液和泡沫剂溶液的注入速度均为30 mL/min;⑤清洗实验装置。分别计算3组实验的采出程度、瞬时含水率以及进、出口压差等主要指标。

2 实验结果分析

2.1 三维温度场

由3组实验温度场随注入体积的变化(图2)可以看出,实验1的蒸汽超覆和窜流现象严重,蒸汽只加热了三维模型的上层,且在上层沿直线窜流到出口端,中层和下层的温度较低,蒸汽波及系数也较低,剩余油饱和度较高(图2a)。实验2转入尿素辅助蒸汽驱后,加入尿素的蒸汽超覆和窜流现象比实

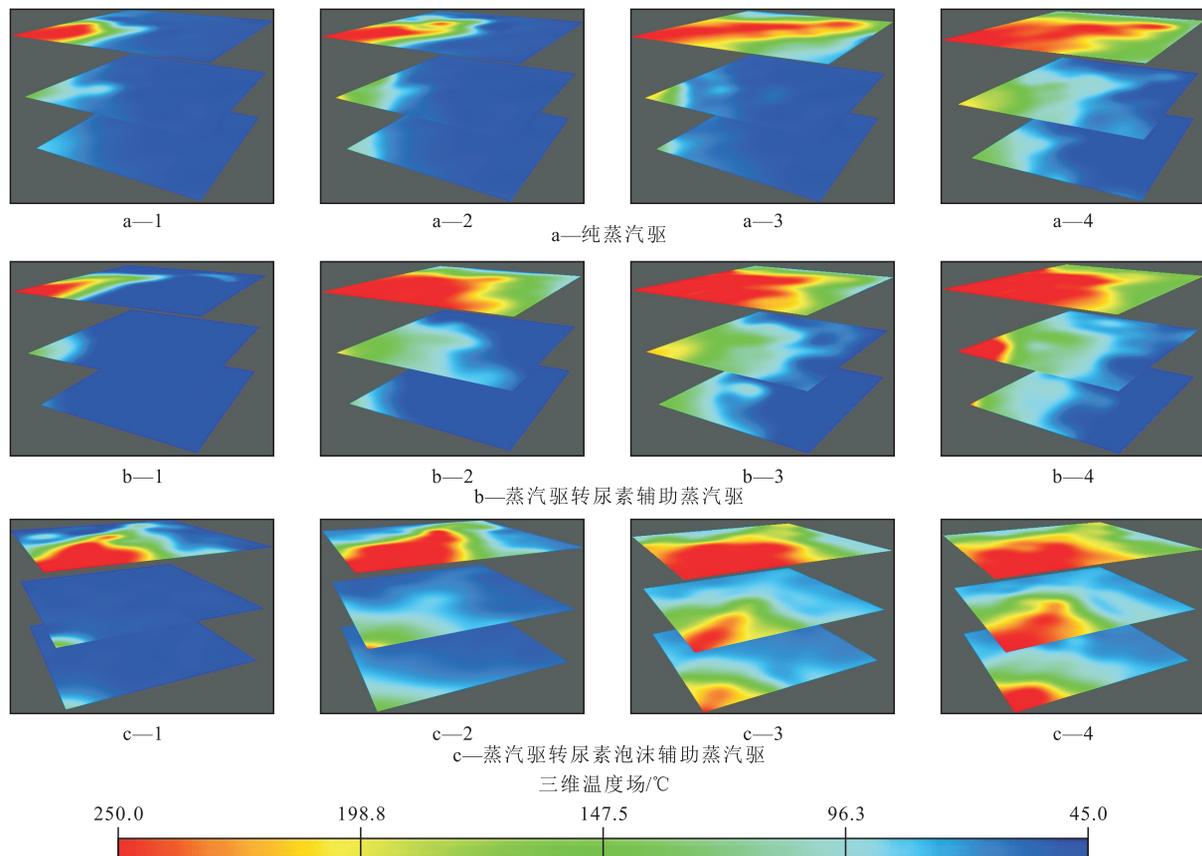


图2 3组实验三维温度场随注入体积的变化

Fig.2 Variation of 3D temperature field with injected pore volume of steam in the three experiments

实验1稍好,且实验中驱出的原油有乳化现象^[11],其原因是尿素分解出的 NH_3 溶于水形成碱性溶液,该碱性溶液与原油中的酸性物质反应生成的表面活性剂对原油有乳化作用,该表面活性剂的存在能有效增加蒸汽的重力,推迟蒸汽窜流和超覆的时间,可以提高蒸汽在纵向和平面上的波及系数^[12-13](图2b)。实验3转入尿素泡沫辅助蒸汽驱后,尿素分解的气体与泡沫剂在三维模型中形成泡沫,对高渗透层有封堵作用,蒸汽通过高渗透层需要较大的压力梯度,使得蒸汽转而流向低渗透层,蒸汽的超覆也得到有效控制^[14],三维模型上层的汽窜得到改善,蒸汽腔充分扩展,三维模型中层和下层的波及系数增大,原油的动用程度提高(图2c),因此尿素与泡沫共同作用在控制蒸汽超覆和汽窜的效果较好。

2.2 进、出口压差

3组实验进、出口压差随注入体积的变化(图3)可以看出,实验1的进、出口压差持续下降;实验2在转驱点后注入尿素溶液,而尿素在高温下分解为 CO_2 和 NH_3 ,气体在高温下膨胀,进、出口压差从0.17 MPa提高到0.35 MPa,补充了地层能量;实验3在转驱点后同时注入尿素和泡沫溶液,进、出口压差从0.18 MPa提高到0.51 MPa,实验结果表明,尿素与水在高温下产生 CO_2 和 NH_3 ,气体在高温下膨胀,从而提高进、出口压差,补充地层能量^[15],实验3进、出口压差甚至达到0.51 MPa是由于泡沫封堵高渗透层,增大了驱替压差^[14],而压差提高速度较慢则是由于原油的消泡作用。

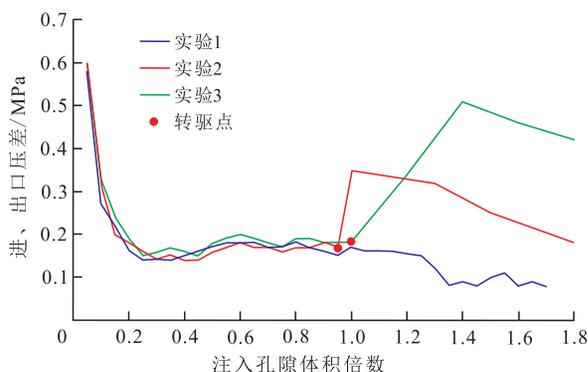


图3 3组实验进、出口压差随注入体积的变化

Fig.3 Variation of pressure difference with injected pore volume of steam in the three experiments

2.3 瞬时油汽比和瞬时含水率

对3组实验的瞬时油汽比和瞬时含水率进行对比(图4,图5)可以看出,实验2和实验3中转驱点对应的蒸汽注入体积分别为0.95和1倍孔隙体积。实验1的瞬时油汽比持续降低,瞬时含水率持续升高;实验2和实验3在转驱点前,随注入体积的增加,油

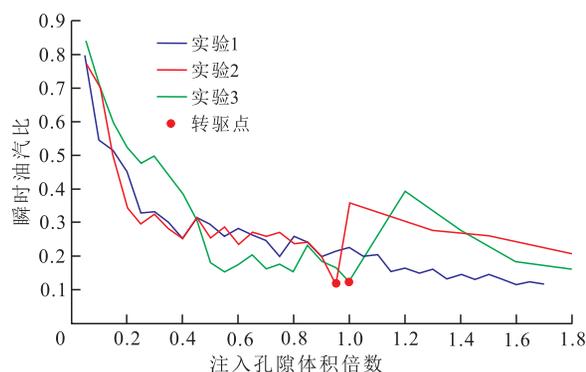


图4 3组实验瞬时油汽比随注入体积的变化

Fig.4 Variation of instantaneous oil-steam ratio with pore volume of steam in the three experiments

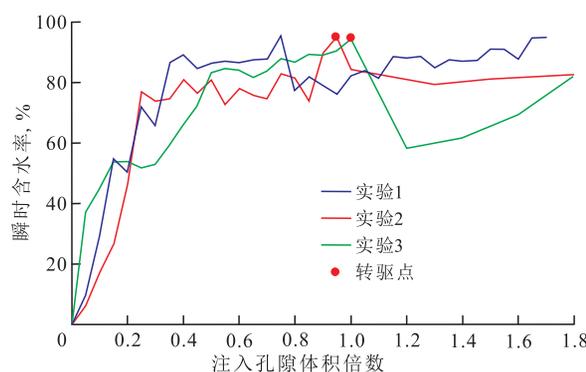


图5 3组实验瞬时含水率随注入体积的变化

Fig.5 Variation of instantaneous water cut with injected pore volume of steam in the three experiments

汽比呈下降趋势,瞬时含水率不断上升,在转驱点后,实验2和实验3的瞬时油汽比大幅度升高,实验2的瞬时油汽比从0.12升至0.36,实验3的瞬时油汽比从0.12升至0.39;而瞬时含水率大幅度下降,实验2的瞬时含水率从95.17%降至79.40%,实验3的瞬时含水率从94.83%降至58.03%。实验结果表明,尿素分解产生的 CO_2 等气体溶于稠油中,使稠油体积膨胀,粘度降低,从而提高原油流量,并且泡沫剂和气体产生的泡沫能够降低蒸汽流量^[16],因此尿素与泡沫共同作用的驱替效果好于尿素单独作用的驱替效果。

2.4 采出程度

3组实验采出程度随注入体积的变化(图6)可以看出,实验3在转驱点后的采出程度随蒸汽注入体积的增加,上升速度加快,采出程度最高达65.41%;实验2在转驱点后采出程度增加幅度不如实验3,最终的采出程度为58.68%;实验1最终的采出程度为49.12%。实验结果表明,尿素辅助蒸汽驱主要提高蒸汽波及区域内的洗油效率,可以提高一定的采出程度;尿素泡沫辅助蒸汽驱实验时,尿素可以扩大蒸汽的波及区域,提高原油采出程度的效果最为明显。

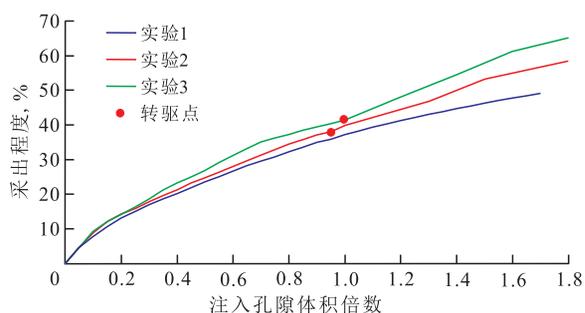


图6 3组实验采收程度随注入体积的变化

Fig.6 Variation of recovery degree with injected pore volume of steam in the three experiments

3 结论

稠油油藏尿素泡沫辅助蒸汽驱的三维物理模拟实验表明,相比纯蒸汽驱及尿素辅助蒸汽驱,尿素泡沫辅助蒸汽驱在尿素、泡沫和蒸汽三者的协同作用下,能够有效提高瞬时油汽比和驱替压差,降低瞬时含水率,抑制蒸汽超覆和窜流,达到提高蒸汽波及系数和洗油效率的作用,最终能够大幅提高原油采收率。考虑到经济因素,尿素成本低,制备工艺简单,尿素泡沫辅助蒸汽驱技术具有较高的应用价值,有望成为改善稠油油藏蒸汽驱效果的可行性技术。

参考文献:

- [1] 王长久,刘慧卿,郑强,等.稠油油藏蒸汽泡沫调驱物理模拟实验——以吉林油田扶北3区块为例[J].油气地质与采收率,2013,20(5):76-78,83.
Wang Changjiu, Liu Huiqing, Zheng Qiang, et al. Physical modeling research of profile control and displacement by steam foam flooding in heavy oil reservoir—case of Fubei3 block in Jilin oil-field [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(5):76-78,83.
- [2] 魏新辉.化学蒸汽驱提高驱油效率机理研究[J].油气地质与采收率,2012,19(3):84-86.
Wei Xinhui. Study on enhancing heavy oil recovery mechanism with chemical steam flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(3):84-86.
- [3] Lau H C. Alkaline steam foam: Concepts and experimental results [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2012, 15(4):445-452.
- [4] Li S, Li Z, Li B. Experimental study and application of tannin foam for profile modification in cyclic steam stimulated well [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 118:88-98.
- [5] Tiamiyu O M, Boukadi F H. Experimental and simulation study on use of surfactant and de-emulsifier blend additives in steam flood as EOR technique in heavy oil reservoir [C]. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama, Bahrain, 2011.
- [6] 任韶然,牛保伦,王冠杰,等.稠油油藏尿素辅助蒸汽驱油数值模拟研究[J].特种油气藏,2012,19(3):111-113.

- Ren Shaoran, Niu Baolun, Wang Guanjie, et al. Numerical simulation on urea-assisted steam flooding for heavy oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(3):111-113.
- [7] 沈德煌,谢建军,王晓春.尿素在稠油油藏注蒸汽开发中的实验研究及应用[J].特种油气藏,2005,12(2):85-87,102.
Shen Dehuang, Xie Jianjun, Wang Xiaochun. Experimental study and application of urea in steam flooding of heavy oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(2):85-87,102.
- [8] 牛保伦,林伟民,邓瑞健,等.稠油油藏尿素辅助蒸汽驱特征研究[J].特种油气藏,2014,21(3):83-86.
Niu Baolun, Lin Weimin, Deng Ruijian, et al. Research on characteristics of urea assisted steam flooding in heavy oil reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(3):83-86.
- [9] Zhang X, Zhang Y, Yue Q, et al. Conformance control of CSS and steam drive process with a carbamide surfactant [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(9):16-18.
- [10] 钱宏图,刘鹏程,沈德煌,等.尿素泡沫辅助蒸汽驱物理模拟实验研究[J].油田化学,2013,30(4):530-533,543.
Qian Hongtu, Liu Pengcheng, Shen Dehuang, et al. Physical simulation experiment study on steam flooding adding urea and foaming agent [J]. Oilfield Chemistry, 2013, 30(4):530-533,543.
- [11] 刘鹏,王业飞,张国萍,等.表面活性剂乳化作用对提高采收率的影响[J].油气地质与采收率,2014,21(1):99-102.
Liu Peng, Wang Yefei, Zhang Guoping, et al. Study of emulsification effect on oil recovery in surfactant flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1):99-102.
- [12] El-Abbas A A, Shedid S A. Experimental investigation of the feasibility of steam/chemical steam flooding processes through horizontal wells [C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, 2001.
- [13] 李爱芬,任晓霞,江凯亮,等.表面活性剂改善稠油油藏水驱开发效果实验研究——以东辛油田深层稠油油藏为例[J].油气地质与采收率,2014,21(2):18-21.
Li Aifen, Ren Xiaoxia, Jiang Kailiang, et al. Experimental study on influencing factors of injecting surfactant to improve water flooding for heavy oil reservoir—case of Dongxin heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2):18-21.
- [14] 曹正权,马辉,姜娜,等.氮气泡沫调剖技术在孤岛油田热采井中的应用[J].油气地质与采收率,2006,13(5):75-77.
Cao Zhengquan, Ma Hui, Jiang Na, et al. Application of nitrogen-foam profile control technology in thermal recovery wells of Gudao Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(5):75-77.
- [15] 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 seam and in-condensable gas push for extra heavy oil reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4):602-606.
- [16] Firouz A Q, Torabi F. Utilization of carbon dioxide and methane in huff-and-puff injection scheme to improve heavy oil recovery [J]. Fuel, 2014, 117:966-973.