

不同含水期轻质油藏空气泡沫驱试验

东晓虎¹, 刘慧卿¹, 庞占喜¹, 易勇刚², 郑家朋³

(1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油新疆油田公司工程技术研究院, 新疆克拉玛依 834000; 3. 中国石油冀东油田公司钻采工艺研究院, 河北唐山 063000)

摘要:采用室内物理模拟的方法进行轻质水驱油藏转空气泡沫驱试验,研究油藏含水饱和度对空气与不同性质轻质原油的氧化反应速率及原油耗氧程度的影响。在此基础上,进行长细管耗氧检测试验及水驱后的双管提高采收率试验。结果表明:耗氧量与原油黏度没有绝对的关系,存在一个含水饱和度拐点,当油藏含水饱和度低于此饱和度时,氧化反应速率较大,空气中的氧气基本可以完全消耗;空气泡沫注入油藏之后,氧气被大量消耗,气体突破时的氧气体积分数接近于零,待高温氧化带到达出口端,氧气体积分数突然升高,耗氧效果变差;空气泡沫的注入可以有效封堵高渗管启动低渗管,提高采收率约 10.9%。

关键词:油藏; 空气泡沫; 低温氧化; 耗氧; 封堵效应

中图分类号:TE 357.7 **文献标志码:**A

Experiments on air foam flooding in light-oil reservoirs at different water cut stage

DONG Xiao-hu¹, LIU Hui-qing¹, PANG Zhan-xi¹, YI Yong-gang², ZHENG Jia-peng³

(1. Key Laboratory of Petroleum Engineering of Ministry of Education in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Engineering and Technology Research Institute, Xinjiang Oilfield Company, CNPC, Karamay 834000, China;
3. Drilling & Production Research Institute, Jidong Oilfield Company, CNPC, Tangshan 063000, China)

Abstract: The experiments of air foam flooding in water flooding light-oil reservoirs were carried out by the method of physical simulation. The influence of water saturation on oxidation rate and oxygen consumption rate were discussed through the static experiments. In order to verify the oxygen consumption capacity of oil, the slim tube displacement experiment and EOR experiment of air foam flooding in double tubes were performed. The results show that there is no obvious correlation between oil viscosity and oxygen consumption. There is a water saturation breakpoint. When the water saturation is low, the oxidation rate will be large. After air foam is injected into the reservoir, the oxygen in air can be fully consumed. The volume fraction of oxygen is near zero when the gas breakthrough occurs. Once the oxidation region reaches the outlet, the volume fraction of oxygen increases suddenly, and the effect of oxygen consumption gets badly. The injection of air foam could effectively plug the high-permeability tube and restart the low one. The final recovery is enhanced by 10.9%.

Key words: reservoir; air foam; low temperature oxidation; oxygen consumption; plugging effect

随着水驱开发进入中后期,油田综合含水率上升,井底压力大幅下降,产量递减加快,挖潜难度逐渐增大,如何有效提高油藏的最终采收率面临巨大挑战^[1-2]。对于多数进入中高含水期的水驱油藏而言,仍有大部分剩余油滞留在地下,提高原油采收率潜力巨大。空气泡沫在注入油藏后,发挥空气的低温氧化特性,释放热量,生成甲烷、烟道气等,综合了

烟道气驱与热效应的双重作用^[3-5],烟道气中约有 15% 的 CO₂ 及少量 CO,其溶解能力强,能够改善油水流动度比;添加泡沫后可发挥泡沫的贾敏效应^[5-6],对注入空气实施封窜,有效增加空气的波及体积,从而延迟空气在地层中的滞留时间,充分发挥原油的低温氧化特性,使注入空气的氧含量降到安全极限范围之内。通过油藏不同含水饱和度下空气与不同

性质轻质原油的低温氧化静态反应釜试验,笔者对油藏含水饱和度对氧化反应速率及原油耗氧程度的影响进行研究,并在此基础上开展长细管耗氧检测试验及水驱后的双管提高采收率试验,分析轻质油藏注空气泡沫驱开发机制。

1 低温氧化反应釜试验

采用静态试验装置研究油藏温度压力条件下含水饱和度对低温氧化反应的影响,试验装置如图 1 所示。油砂以粒径为 0.12 ~ 0.13 mm 的石英砂配置,地层水取自冀东油田高浅北区块,属 NaHCO₃ 型,总矿化度平均为 1555 mg/L,含盐量 421 mg/L,所用油样的物性参数见表 1。试验过程中,分别配置含水饱和度为 25%、50%、75%、90% 和 95% 的油砂,老化后装入反应釜,并保证反应釜的气密性良好,之后注入空气至一定压力,并升温至油藏温度,

检测系统压力随反应时间变化情况,直至反应釜内压力稳定为止。根据获取的压力降数据以及反应后测得的各气体含量数据判断原油的耗氧效果。试验结果如图 2 所示。

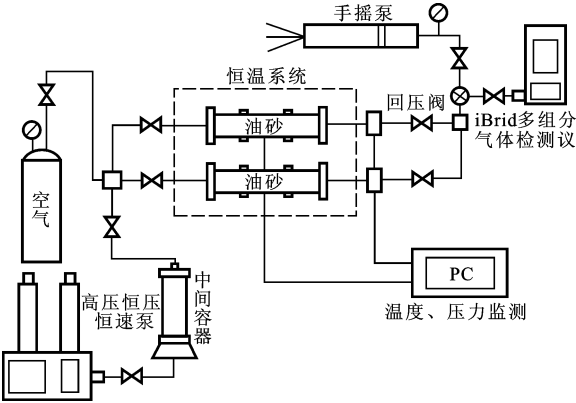


图 1 静态试验装置
Fig.1 Static experimental apparatus

表 1 试验用原油物性参数
Table 1 Physical properties of oil samples

油样	地面原油密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	油藏温度 $\theta/^\circ\text{C}$	油藏温度下原油 黏度 $\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	凝固点 $\theta_n/^\circ\text{C}$	饱和烃 含量/%	芳香烃 含量/%	胶质 含量/%	沥青质 含量/%	含硫量/%
G104-5P121	0.9106	65	73.80	-2 ~ -7	53.16	27.41	18.07	1.36	—
G64-38	0.8650	120	1.53	32.4	66.88	17.60	11.83	3.69	0.0565 ~ 0.19
G76-34	0.8308	102	0.41	31	77.06	13.47	7.73	1.76	0.08

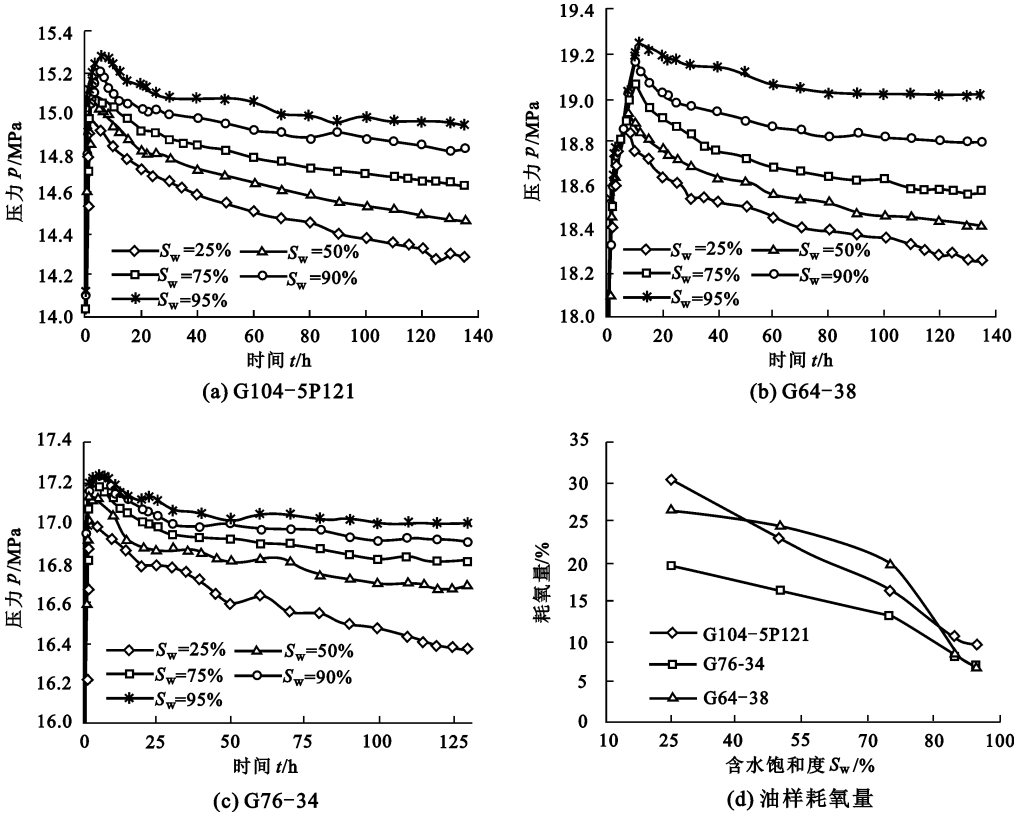


图 2 不同含水条件下的静态试验结果
Fig.2 Static experimental results under different water cut

静态试验结果显示,原油耗氧量与黏度无绝对的关系。黏度较大的 G104-5P121 油样在低含水饱和度(低于 30%)条件下耗氧最好,主要是由于该油样的芳香烃含量高,反应活性大。但由于该油藏温度较低(65 ℃),因此随着含水饱和度的上升,水对氧化过程的加速作用越来越小,而降温作用越来越明显,耗氧效果急剧变差。芳香烃含量中等、油藏温度也较高的 G64-38 油样的耗氧和压力变化随着含水饱和度的变化较为平缓,但是当含水饱和度高于 75%之后,由于其中的油样已不足以维持低温氧化反应,耗氧效果变差。芳香烃含量最小、黏度也最小的 G76-34 油样耗氧效果最差。同时反应釜压降的大部分都集中在反应前期,这是原油中活性较高的芳香烃在前期被消耗的缘故。反应速率(单位体积原油单位时间内的耗氧量, $10^{-5} \text{ mol}/(\text{h} \cdot \text{mL})$)计算结果见表 2。随着含水饱和度的增加,反应速率呈上升趋势,主要是由于含水饱和度较高时,计算反应速率时的基数小,填砂管内部原油中的饱和烃和芳香烃被消耗掉,反应难以持续(反应后期的压力变化变缓),从而导致高含水时得到的反应速率较大。

表 2 不同油样的反应速率

油样	Results of reaction rate of three oil samples $10^{-5} \text{ mol}/(\text{h} \cdot \text{mL})$				
	$S_w/\%$				
	25	50	75	90	95
G104-5P121	0.941 6	1.064 5	1.388 9	2.381 1	4.563 7
G76-34	0.596 6	0.745 8	1.235 8	1.917 6	3.409 1
G64-38	0.618 4	0.905 5	1.722 6	2.098 1	2.871 0

2 长细管耗氧监测试验

根据静态试验结果,G64-38 油样在不同含水饱和度和下的耗氧效果较好,并且在中低含水条件下的耗氧量变化不大,因此优选该油样进行动态耗氧监测试验,测取其在动态驱替过程中的氧气消耗情况。根据低温氧化的反应机制,注入空气泡沫后,会消耗空气中的氧气,生成 CO_2 和 CO ,此外由于反应放热导致原油蒸发,还会产生少量的 CH_4 ,因此试验过程中主要测取 O_2 、 CO_2 、 CO 和 CH_4 的含量变化。试验所用长细管规格为 $\Phi 6 \text{ mm} \times 15 \text{ m}$,压力为 20 MPa、温度为 120 ℃条件下,设置空气与发泡剂溶液的注入速度分别为 0.5 和 0.25 mL/min(气液比 2:1)。试验用泡沫液为地层水配置的质量分数为 0.5% 的阴离子型表面活性剂溶液,该泡沫液具有发泡体积大、半衰期长、耐高温等特点。

长细管试验结果如图 3 所示。注入约 $0.23 V_p$ (V_p 为孔隙体积)空气泡沫后出口端见气,气体突破时间较早,且此时测得的气体中氧气含量较小,体积分数接近于零,这是处于最前缘的烟道气带到达出口端所致。随着空气的继续注入, O_2 体积分数缓慢升高;注入约 $0.50 V_p$ 空气泡沫后,热效应带到达出口端,此时 CO 、 CO_2 和 CH_4 的体积分数都达到最高;直至注入约 $0.87 V_p$ 空气泡沫时,高温氧化带到达出口端, O_2 体积分数突升,效果变差;可见从驱替开始一直到注入 $0.87 V_p$ 空气泡沫是该过程的主要反应阶段。

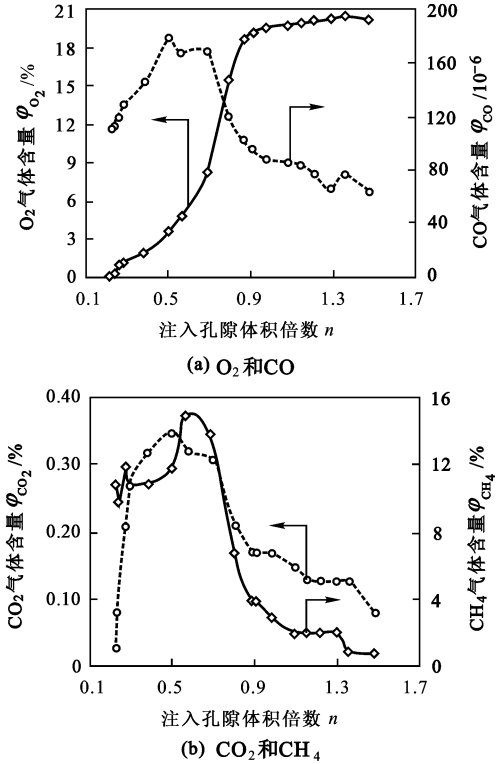


图 3 长细管试验结果

Fig. 3 Results of slim tube experiment

3 提高采收率试验

同样选取 G64-38 油样,采用双管模型(渗透率级差为 3)模拟空气泡沫在非均质地层中的渗流与驱替过程,压力为 20 MPa,温度为 120 ℃,试验过程中水驱阶段的注入速度为 1 mL/min,注空气泡沫段塞时空气与发泡剂溶液的注入速度分别为 1.0 和 0.5 mL/min(气液比 2:1),该过程中主要测取空气泡沫在不同注入段塞阶段的封堵效果。

用不同粒径的石英砂填制模型,设置 20 MPa 回压进行高压饱和,所得物性参数如表 3 所示,最终试验结果见图 4。

表 3 动态驱替试验填砂管物性参数

Table 3 Physical parameters of sand packs in dynamic displacement experiment

填砂管	石英砂 粒径 d/mm	孔隙度 $\varphi/\%$	水测渗 透率 $k/$ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	原始含油 饱和度 $S_{oi}/\%$	束缚水 饱和度 $S_{wr}/\%$
1	0.18~0.45	34.51	4 746	81.3	18.7
2	0.12~0.13	31.28	1 531	83.4	16.6

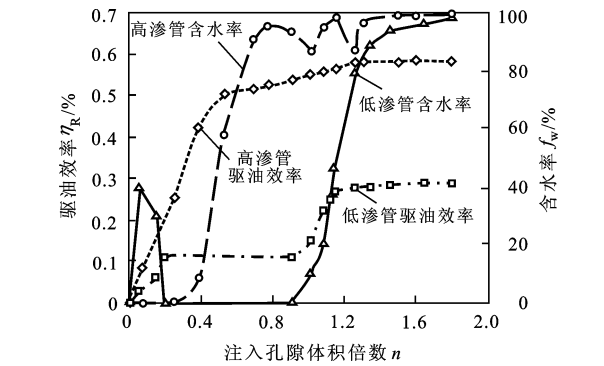


图 4 G64-38 双管空气泡沫驱提高采收率试验结果

Fig. 4 Results of dual-tubes EOR experiment of G64-38 crude oil

驱替的开始阶段压差较大,高、低渗管均有油产出,高渗管的产液速度相对更快,之后由于形成了水窜通道,驱替压差缓慢降低,低渗管基本不产液,此时高渗管的含水率上升也较快。待含水率上升至 98% (约注入 $0.78 V_p$) 之后转入注 $0.10 V_p$ 空气泡沫,此时高渗管中的水窜通道被封堵,两端压差上升,低渗管重新启动,但同时高渗管的含水率也略有降低,导致产油量上升。之后转入水驱过程,含水率升至 98% 后,再次注入 $0.10 V_p$ 的空气泡沫,如此重复注入 3 个空气泡沫段塞。注入 3 个段塞之后低渗管总的驱油效率为 28.2%,提高了约 18.0%,高渗管的驱油效率为 57.8%,提高了约 4.6%,总的驱油效率提高了约 10.9%。注入 3 个空气泡沫段塞后驱替压差均有不同程度的上升,但相比较而言,第二、三个段塞的压差上升幅度都较第一个段塞要小,这是由于在注后两个段塞的过程中,泡沫已封堵不住水窜通道,压差上升有限,注第三个段塞之后再转入水驱,与前两个段塞相比效果更加微弱。

4 注空气泡沫开发机制

注空气泡沫驱油综合了空气驱(低温氧化)与泡沫驱(封堵)的优点。影响空气泡沫驱开发效果的因素主要有油藏温度、油藏压力、油藏倾角、原油黏度、油藏含水状况、空气注入速度以及泡沫气液比等^[7-10]。黏土(主要是高岭石和伊利石)和金属矿物的存在均有利于氧化反应的进行,对压力下降速度

和氧化反应速率等均有明显的影响^[6,11-12]。

(1)空气在注入油层之后,通过发挥烟道气驱、重力驱、流体膨胀和混相等多种机制的作用提高原油采收率,油藏的温度一般应高于 70 ℃,温度越高越有利于氧气的消耗,从而延长无氧生产时间,有利于提高采收率。

(2)油藏温度、油样组成和油藏含水对注空气泡沫的开发效果均有影响。少量水的存在有利于低温氧化反应的产生,且对亲水油藏而言,这种作用更为明显;对于温度较高的油藏存在一个含水饱和度拐点,当油藏的含水饱和度高于此拐点时,耗氧效果变差。

(3)原油中参与低温氧化反应的主要组分为活性较高的芳香烃。

(4)空气泡沫注入油藏后,从注入井到生产井存在烟道气带、热效应带和氧化前缘带 3 个区域。氧气主要在氧化前缘带被消耗,该区的范围与空气的注入速度、泡沫特性、油藏及原油物性有关。

5 结 论

(1)油样氧化性能与其黏度没有绝对的关系。G104-5P121 黏度较大,但在低含水饱和度条件下更易耗氧;G64-38 油样的耗氧拐点含水饱和度为 75%,油藏含水饱和度高于此饱和度时耗氧较差。

(2)G64-38 油样的耗氧性能较好,空气泡沫在注入油藏之后,其中的氧气基本可以被消耗干净,气体突破时的氧气体积分数接近于零,待高温氧化带到达出口端,氧气体积分数突然升高,耗氧效果变差。

(3)高含水率条件下注入空气泡沫段塞,通过发挥泡沫封堵高渗带的作用,填砂管两端压差增大,低渗管得以启动,波及效率提高,总驱油效率提高了约 10.9%,由于气/水窜通道的形成,后续两个段塞效果较前一个差。

参考文献:

[1] 李阳. 陆相高含水油藏提高水驱采收率实践[J]. 石油学报, 2009,30(3):396-399.
LI Yang. Study on enhancing oil recovery of continental reservoir by water drive technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(3):396-399.

[2] MANRIQUE E, THOMAS C, RAVIKIRAN R, et al. EOR: current status and opportunities[R]. SPE 130113, 2010.

[3] TERAMOTO T, UEMATSU H, TAKABAYASHI K, et al. Air-injection EOR in highly water-saturated light-oil reservoir [R]. SPE 100215, 2006.

[4] REN S R, GREAVES M, RATHBONE R R. Air injec-

- tion LTO process: an IOR technique for light-oil reservoirs [R]. SPE 57005, 2002.
- [5] 王志永. 空气泡沫驱提高采收率技术[D]. 青岛: 中国石油大学石油工程学院, 2009.
- WANG Zhi-yong. Study of improved oil recovery through air foam flooding[D]. Qingdao: School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2009.
- [6] 于洪敏, 任韶然, 左景桀, 等. 注空气泡沫低温氧化工艺提高采收率试验[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(2): 94-98.
- YU Hong-min, REN Shao-ran, ZUO Jing-luan, et al. Experiment of improved oil recovery by air foam injection low temperature oxidation process [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2): 94-98.
- [7] GREAVES M, REN S R, RATHBONE R R. Air injection technique (LTO process) for IOR from light oil reservoirs: oxidation rate and displacement studies [R]. SPE 40062, 1998.
- [8] 刘瑶, 刘易非, 陈艳, 等. 轻油注空气静态低温氧化实验研究[J]. 特种油气藏, 2010, 17(3): 96-99.
- LIU Yao, LIU Yi-fei, CHEN Yan, et al. Experimental study on static low temperature oxidation of light oil with injected air[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2010, 17(3): 96-99.
- [9] 张旭, 刘建仪, 孙良田, 等. 注空气低温氧化提高轻质油气藏采收率研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(4): 78-80.
- ZHANG Xu, LIU Jian-yi, SUN Liang-tian, et al. Research on the mechanisms of enhancing recovery of light-oil reservoir by air-injected low-temperature oxidation technique[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(4): 78-80.
- [10] 王杰祥, 张琪, 李爱山, 等. 注空气驱油室内实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(4): 73-75.
- WANG Jie-xiang, ZHANG Qi, LI Ai-shan, et al. Laboratory experiment on efficiency of air injection displacement[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(4): 73-75.
- [11] FAURE P, LANDAIS P. Evidence for clay minerals catalytic effects during low-temperature air oxidation of n-alkanes[J]. Fuel, 2000, 79(10): 1751-1756.
- [12] FAURE P, SCHLEPP L, ELIE M, et al. Low temperature air oxidation of n-alkanes in the presence of Na-smectite[J]. Fuel, 2003, 82(9): 1751-1762.

(编辑 李志芬)

(上接第 123 页)

- [8] 王晓春, 吴江勇, 黄凤兴, 等. 烷基醇醚羧酸钠体系的表面活性和泡沫性能[J]. 精细石油化工, 2010, 27(2): 49-53.
- WANG Xiao-chun, WU Jiang-yong, HUANG Feng-xing, et al. Foaming and surface properties of fatty alcohol polyoxyethyleneether carboxylate and effects of some additives on its foaming properties[J]. Speciality Petrochemicals, 2010, 27(2): 49-53.
- [9] PABLO Ramirez, LUIS Maria, LUIS Alfonso Trujillo, et al. Equilibrium and surface rheology of two polyoxyethylene surfactant (C_iEO_j) differing in the number of oxyethylene groups [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011, 375: 130-135.
- [10] 张春荣, 李振泉, 罗澜, 等. 氧乙烯数对辛基苯酚聚氧乙烯醚表面扩张粘弹性质的影响[J]. 物理化学学报, 2007, 23(2): 247-252.
- ZHANG Chun-rong, LI Zhen-quan, LUO Lan, et al. Effect of oxyethylene numbers on surface dilational properties of octylphenol polyoxyethylene ethers [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2007, 23(2): 247-252.
- [11] 房秀敏. 烷基酚聚氧乙烯醚硫酸钠的合成与性能[J]. 精细石油化工, 1996(5): 28-30.
- FANG Xiu-min. Synthesis and properties of alkylphenol polyoxyethylene ether sodium sulfates [J]. Speciality Petrochemicals, 1996(5): 28-30.
- [12] BERGER Paul D, CHRISTIE. Non-estrogenic alkylphenol derivatives [R]. SPE 129550, 2010.
- [13] PLATA Maria R, CONTENTOM Ana M, RIOS Angel. Analytical characterization of alcohol-ethoxylate substances by instrumental separation techniques [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2011, 30(7): 1018-1034.
- [14] 莫小刚, 刘尚营. 非离子表面活性剂浊点的研究进展[J]. 化学通报, 2001(8): 483-487.
- MO Xiao-gang, LIU Shang-ying. Development of research in cloud points of nonionic surfactants [J]. Chemistry, 2001(8): 483-487.
- [15] TAECHANGAM Phanphat, SCAMEHORN John F, OSUWAN Somchai, et al. Effect of nonionic surfactant molecular structure on cloud point extraction of phenol from wastewater [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009, 347: 200-209.
- [16] 刘德生, 陈小榆, 周承富. 温度对泡沫稳定性的影响[J]. 钻井液与完井液, 2006, 23(4): 10-12.
- LIU De-sheng, CHEN Xiao-yu, ZHOU Cheng-fu. Effects of temperature on the stability of foam [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006, 23(4): 10-12.

(编辑 李志芬)