

引用格式:彭金龙,李全双.抗高温低密度弹塑性水泥浆体系研究与应用[J].油气藏评价与开发,2020,10(3):104-108.

PENG J L, LI Q S. Research and application of high temperature low-density elastoplasticity cement slurry[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 104-108.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.03.016

# 抗高温低密度弹塑性水泥浆体系研究与应用

彭金龙,李全双

(中国石化华东工程技术分公司,江苏扬州 225000)

**摘要:**塔河油田奥陶系井底温度高,缝洞发育,极易发生漏失,固井环空间隙小,常规的低密度水泥浆体系不能保证水泥环的密封完整性,不能满足勘探开发的要求。针对以上难点,优选了改性粉煤灰增强水泥石早期强度,复配高抗挤微珠提高水泥浆综合性能,优选高温弹塑性材料降低水泥石弹性模量,结合配套的固井外加剂,评价低密度弹塑性水泥浆体系。该水泥浆体系密度适用范围 $1.25 \sim 1.50 \text{ g/cm}^3$ , API失水 $< 50 \text{ mL}$ ,流变性好,直角稠化,且水泥浆沉降稳定性好,并具有良好的力学性能,弹性模量可低至 $7 \text{ GPa}$ ,抗压强度 $> 14 \text{ MPa}$ ,增强了水泥环在交变应力作用下的密封完整性。该体系在塔河油田中探1井和TP193井成功运用,整体固井质量良好,说明该体系可满足奥陶系易漏地层小间隙尾管的固井技术要求,应用前景良好。

**关键词:**塔河油田;固井;高温;低密度;弹塑性;水泥浆

中图分类号:TE256

文献标识码:A

## Research and application of high temperature low-density elastoplasticity cement slurry

PENG Jinlong, LI Quanshuang

(Sinopec East China Engineering Technology Company, Yangzhou, Jiangsu 225000, China)

**Abstract:** In Ordovician of Tahe Oilfield, the bottom hole temperature is high, the seam hole is developed, the leakage easily occurs, and the annular clearance of cementing is small. Therefore, the conventional low density cement slurry system cannot guarantee the sealing integrity of cement sheath and meet the requirements of exploration and development. Aiming at the above difficulties, the modified fly ash is optimized to enhance the early strength of cement, the high anti-extrusion microsphere is compounded to improve the comprehensive performance of cement slurry, the high temperature elastoplastic material is optimized to reduce the elastic modulus of cement, and the low density elastoplastic cement slurry system is evaluated combined with the matching cementing additives. The density is applicable in the range of  $1.25 \sim 1.50 \text{ g/cm}^3$ , API water loss is less than  $50 \text{ mL}$ , the rheological properties is good, the right-angle is thickening, the cement slurry settlement stability is good, and the system has good mechanical properties. Meanwhile, the elastic modulus can be as low as  $7 \text{ GPa}$  and the compressive strength is greater than  $14 \text{ MPa}$ . All these things enhance the sealing integrity of cement sheath under the action of alternating stress. The applications of this system in well-Zhongtan-1 and well-TP193 of Tahe Oilfield are successful and the cementing quality are well, which indicate that the system can meet the cementing technical requirements of small clearance liner in the leaky formation of Ordovician and has a good application prospect.

**Key words:** cementing, high temperature, low density, elastoplastic, cement slurry

## 1 塔河油田奥陶系固井难点

塔河油田位于新疆塔里木盆地沙雅隆起,奥陶

系碳酸盐岩缝洞型储层埋藏垂深一般在 $6\ 000 \text{ m}$ 以上,随着勘探开发的深入,需要在上层套管 $193.7 \text{ mm}$ 内悬挂 $139.7 \text{ mm}$ 尾管封固奥陶系易漏地层,为下一步快速钻进提供有利条件<sup>[1]</sup>。奥陶系井温梯度

收稿日期:2019-04-04。

第一作者简介:彭金龙(1988—),男,本科,固井工程师,固井工艺。通讯地址:江苏省扬州市邗江区史可法路85号,邮政编码:225000。  
E-mail:upclong@163.com

基金项目:中国石化华东石油工程有限公司项目“顺北区块深井尾管固井技术研究与应用”(ECPE20181006)。

(1.97~2.05)℃/100 m,井底静止温度 150~170℃,缝洞发育易发生漏失、溢流等复杂情况。其固井难点主要体现在:①地层承压能力低<sup>[2]</sup>,易发生漏失,导致返高不足影响封固质量;②井深温度高,对水泥浆性能要求高,特别是水泥石强度需满足后期开发要求;③小尾管环空间隙小,理论环空间距 12.7 mm,水泥环厚度薄,水泥环的密封完整性无法得到保证。针对以上难点,固井水泥浆应满足:抗高温低密度水泥浆降低漏失风险,水泥石具有一定的韧性,保证水泥环的密封完整性。

## 2 低密度弹塑性水泥浆体系研究

### 2.1 水泥浆体系设计

针对深井低压易漏层固井漏失风险大,薄水泥环易密封失效问题,开展抗高温低密度弹塑性水泥浆体系研究,一方面是优选低密度材料,密度满足 1.25~1.50 g/cm<sup>3</sup>,低密度水泥石早期强度大于 15 MPa/48 h;另一方面是优选弹性材料,改善力学性能,水泥石弹性模量可小于 7 GPa,要求实现水泥环长效密封。

1) 粉煤灰活性处理,增强水泥石早期强度。粉煤灰<sup>[3-4]</sup>为潜活性火山灰材料,其化学组成以 SiO<sub>2</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为主,通过对粗料粉煤灰进行粉碎、球磨、分级筛选等物理活性处理后<sup>[5]</sup>,粉煤灰圆球度明显提高,且粒径分布变窄, $D_{90} < 5 \mu\text{m}$ 。在活性处理过程中,粉煤灰颗粒玻璃体表面致密的保护层受到破坏,内部高活性的 SiO<sub>2</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>溶出,断键增多,从而活性提高。与此同时,优选的强碱类化学激活剂对 Si-O-Si、Si-O-Al 网络具有较强的等破坏解聚作用,可有效改善粉煤灰参与水泥水化的程度,提高水泥石早期强度。室内评价了粉煤灰活性处理对水泥石强度的影响,结果见表 1。

表 1 粉煤灰活性处理对水泥石强度影响  
Table 1 Effect of fly ash active treatment on cement strength

序号	水泥浆配方	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	温度/ ℃	24 h 抗压强度/ MPa
1	基础配方+30% 常规粉煤灰	1.70	95	16.8
2	基础配方+30% 活性粉煤灰	1.70	95	24.6

注:基础配方,AG+10%微硅+4%膨胀剂+2%稳定剂+20%降失水剂+2%激活剂+1.0%缓凝剂+195%水

由表 1 可知,粉煤灰活性处理<sup>[6]</sup>,配合强碱激活剂可有效增强水泥石早期强度。同等条件下,活性粉煤灰水泥石 24 h 强度可常规粉煤灰水泥石提高 46.4%。

2) 国产高抗挤玻璃微珠,进一步提高水泥浆综合性能<sup>[7-8]</sup>。常规漂珠作为减轻材料时,由于其耐压强度低,适用压力低于 60 MPa;而 3M 高抗挤玻璃微珠虽然耐压强度高,但价格昂贵。因此,室内优选了国产高抗挤玻璃微珠 Y12000,其真实密度可低至 0.58~0.6 g/cm<sup>3</sup>, $D_{90} \leq 90 \mu\text{m}$ 。室内评价了其耐压性能见表 2。

表 2 Y12000 耐压性能评价  
Table 2 Pressure resistance performance evaluation for glass beads of type-Y12000

漂珠含量/ %	养护前密度/(g·cm <sup>-3</sup> )		
	0 MPa	80 MPa	100 MPa
30	1.37	1.38	1.39
45	1.24	1.25	1.26
60	1.17	1.19	1.20

注:基础配方:G级水泥+X%漂珠+微硅+降失水剂+稳定剂+缓凝剂+水

由表 2 可知,在 80~100 MPa 范围内,随着高抗挤玻璃微珠加量增加,压力越大,养护后水泥浆密度增加越多,但养护前后水泥浆密度差 $\leq 0.03 \text{ g/cm}^3$ ,因此,可满足 100 MPa 以内的固井要求。由于 Y12000 较低的加量即可显著减低水泥浆密度,降低了水泥浆需水量,同时得益于其良好的圆球度,可改善水泥浆流变性,并与粉煤灰形成颗粒级配,提高水泥浆浆体稳定性<sup>[9]</sup>,改善水泥浆综合性能。

3) 优选抗高温弹性材料,降低水泥石弹性模量。优选抗高温弹韧性<sup>[10-11]</sup>材料 SRBS,其为“软核硬壳”的核壳结构,粒径 10~100 μm。该核壳结构外层为无机活性纳米材料,具有良好亲水特性、巨大的比表面积和较高的水化活性;内核为抗高温有机弹性材料,通过化学键与外壳材料紧密吸附。得益于其核壳结构,不但有利于弹性材料再水泥浆中均匀分散,有利于提高浆体稳定性,而且可提高有机材料本身与水泥的胶结效果,从而改善水泥石力学性能。室内评价了不同 SRBS 加量下对水泥石力学性能的影响见表 3。

由表 3 可知,弹性材料可显著降低水泥石弹性模量,但一定程度上降低水泥石抗压强度。综合考虑水泥石力学性能,优选 SRBS 加量为 4%~6%,既保

表3 弹性材料加量的影响  
Table 3 Effect of elastic material addition

SRBS加量/%	48 h抗压强度/MPa	48 h弹性模量/GPa
0	24.1	12.2
2	22.1	10.8
4	19.8	7.9
6	18.2	6.1
8	12.8	5.3

注:配方:G级水泥+X%SRBS+5%降失水剂+0.25%缓凝剂+1.5%分散剂+44%水灰比

证水泥石抗压强度 > 18 MPa,亦保证水泥石弹性模量 < 8 GPa,提高水泥环长效密封性能<sup>[12]</sup>。

## 2.2 低密度弹韧性水泥浆性能评价

在粉煤灰活性处理、高抗挤玻璃微珠复配、抗高温弹韧性材料优选的基础上,优选配套降失水剂、缓凝剂、早强剂等配套外加剂,形成了低密度弹韧性水泥浆体系,基础配方:G级+(10%~100%)FMH+(16%~40%)Y12000+(6%~8%)膨胀剂+(5%~6%)SRBS+(17%~22%)降失水剂+1.5%早强剂+X%缓凝剂+1%稳定剂+X%纯水+0.1%纤维。

1) 常规性能评价。室内对低密度弹韧性水泥浆<sup>[13]</sup>常规性能进行了评价见表4、图1。

表4和图1可以看出,密度为1.50~1.25 g/cm<sup>3</sup>的高温低密度弹韧性水泥浆体系综合性能良好,API失水 < 50 mL,流变性好,直角稠化,且水泥浆沉降稳定

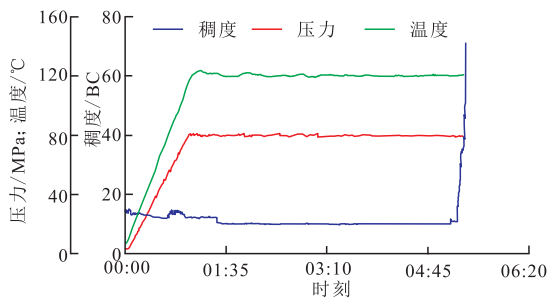


图1 配方3稠化曲线

Fig. 1 Thickening curve of formula 3

表4 低密度弹韧性水泥浆综合性能

Table 4 Comprehensive performance of low density elastic tenacity cement

配方	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	六速流变	API失水/mL	稠化时间/min	沉降稳定性(g·cm <sup>-3</sup> )	流动度/cm
1	1.50	250/146/92/60/6/4	40(110 °C)	201	1.50-1.50-1.51	22
2	1.35	223/174/99/60/8/5	38(120 °C)	305	1.35-1.36-1.37	20
3	1.25	186/110/81/46/5/3	44(120 °C)	328	1.25-1.26-1.28	18

注:配方1:G级+100%FMH+16%Y12000+6%膨胀剂+5%SRBS+17%降失水剂+1.5%早强剂+1.6%缓凝剂+1%稳定剂+164%纯水+0.1%纤维;配方2:G级+15%FMH+25%Y12000+8%膨胀剂+6%SRBS+18%降失水剂+1.5%缓凝剂+1.2%早强剂+2%稳定剂+103%纯水+0.1%纤维;配方3:G级+40%Y12000+8%膨胀剂+10%FMH+30%微硅+6%SRBS+22%降失水剂+1%缓凝剂+4%早强剂+169%纯水+0.1%纤维

性好,水泥浆上下密度差≤0.03 g/cm<sup>3</sup>,满足现场应用。

2) 水泥石力学性能评价。考虑粉煤灰活性较差,水泥石强度发展慢且通常强度不高。因此,室内评价了不同温度下水泥石抗压强度,结果见表5。通过超声波强度实验显示,水泥浆静胶凝强度过渡时间短,有利于防止油气水侵。

由表5可知,低密度弹韧性水泥石力学性能良好。水泥石抗压强度发展快,48 h抗压强度大于15 MPa,弹性模量小于7 GPa,有利于改善水泥环密封完整性。超声波强度实验显示,水泥浆静胶凝强度过渡时间短,有利于防止油气水侵。

表5 低密度弹韧性水泥石性能  
Table 5 Performance of cement with elastic and toughness at low density

配方	养护条件	24 h抗压强度/MPa	48 h抗压强度/MPa	48 h弹性模量/GPa
1	90 °C×0.1 MPa	15.2	19.7	6.6
2	100 °C×20.7 MPa	17.9	21.8	6.8
3	90 °C×0.1 MPa	12.5	15.6	6.3

3) 水泥环密封完整性评价。水泥石力学性能优劣直接影响水泥环长效密封性,室内利用自制水泥环密封完整性评价装置评价了低密度弹韧性水泥石(配方3)的密封性能。考察多轮次压力加卸载后水泥环密封完整性,结果见图2。

由图2可知,得益于水泥环良好的变形能力,配方3水泥环经过多轮次压力加卸载后密封性能良好,

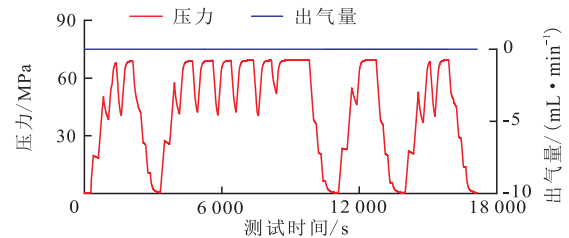


图2 配方3水泥环交变压力下密封性测试

Fig. 2 Airtightness test under alternating pressure for cement sheath of formula 3

表6 TP193井 $\phi$ 139.7 mm尾管固井水泥浆性能  
Table 6 Cement slurry performance of  $\phi$ 139.7 mm drilling liner cementing in well-TP193

类型	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	流变指数	稠度指数/( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ )	API失水/mL	自由液/mL	流动度/cm	稠化时间/min	弹性模量/GPa
水泥浆	1.50	0.76	0.52	38	0	21	307	6.8

可满足套管70 MPa加卸载下的密封完整性。相比于常规水泥石脆硬特性,水泥环易发生密封失效问题,低密度弹塑性水泥石可满足后期作业过程中井筒压力交变载荷下水泥环密封完整性,防止井口带压<sup>[14-15]</sup>。

### 3 现场应用

抗高温低密度弹塑性水泥浆体系在塔河油田中探1井 $\phi$ 244.5 mm技术套管和TP193井 $\phi$ 139.7 mm尾管中进行了应用,效果良好。

以TP193井为例。TP193是位于塔河油田阿克库勒凸起西南斜坡构造的一口开发井,该井一开 $\phi$ 346.1 mm钻头钻至1 206 m, $\phi$ 273.1 mm表层套管下深1 205.53 m;二开 $\phi$ 250.88 mm钻头钻至6 509 m, $\phi$ 193.7 mm技套管下深6 507.71 m;三开采用 $\phi$ 165.1 mm钻头钻至7 148 m, $\phi$ 139.7 mm油层尾管下深7 144.34 m,悬挂器位置6 451~6 454.67 m;三开地层钻遇奥陶系一间房组和鹰山组,钻进过程中发生多次漏失,累积漏失泥浆约550  $\text{m}^3$ ;实测井底静止温度155  $^{\circ}\text{C}$ ,该井6 507~6 741 m平均井径167.9 mm,井径扩大率1.7%;6 741~7 145 m平均井径201.85 mm,井径扩大率22.2%,大肚子井眼严重。该井使用抗高温1.50  $\text{g}/\text{cm}^3$ 低密度弹塑性水泥浆体系,体系性能见表6。现场注冲液4  $\text{m}^3$ ,密度1.02  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;注隔离液6  $\text{m}^3$ ,密度1.40  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;注水泥浆15  $\text{m}^3$ ,密度1.50  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;注压塞液2  $\text{m}^3$ ,密度1.02  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;共替浆37.1  $\text{m}^3$ ,密度1.35  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;替浆到量碰压12~16 MPa。放回水正常,起钻至井口开井候凝48 h。

候凝48 h后测固井质量,全井优良率85.7%,套管试压20 MPa,稳压30 min,压降0.2 MPa,满足固井设计要求,实现了奥陶系易漏地层小间隙尾管的有效封固。

### 4 结论

1) 粉煤灰经活性处理与分级筛选后,自身活性

增强且圆球度提高,有利于提高水泥石早期强度与水泥浆稳定性;与高抗挤玻璃微珠颗粒级配可显著降低需水量,增强低密度水泥石致密性与抗压强度;抗高温弹性材料可改善水泥石脆性,增强水泥石韧性,三者综合作用显著改善低密度水泥石力学性能。

2) 研发抗高温低密度弹塑性水泥浆体系综合性能优良,其体系能够适用井温150  $^{\circ}\text{C}$ 以上、低密度范围1.25~1.50  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,水泥石抗压强度大于15 MPa/48 h,弹性模量可小于7 GPa,水泥环在70 MPa交变应力作用下的密封完整性良好。

3) 针对低压易漏地层,还需进一步增强水泥浆防漏堵漏效果研究,保证低压易漏层段水泥环有效封固,实现长效密封。

#### 参考文献

- [1] 朱方辉,李明星,贺炳成,等.碳酸盐岩储层压井液漏失影响因素研究[J]. 钻井液与完井液,2019,36(4):522-528.  
ZHU F H, LI M X, HE B C, et al. Factors affecting loss of kill mud used in carbonate rock reservoirs[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(4): 522-528.
- [2] 王瑞飞,段雨安,吕新华,等.深层高压低渗砂岩油藏应力敏感性实验[J]. 地质科技情报,2014,33(1):90-94.  
WANG R F, DUAN Y, LYU X H, et al. Stress sensitivity experiment of sandstone reservoirs in deep section with high pressure and low-permeability[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(1): 90-94.
- [3] 张云华,蒋卓颖,李雨威,等.粉煤灰低密度水泥浆在塔河油田堵漏中的应用[J]. 石油与天然气化工,2018,47(1):79-82.  
ZHANG Y H, JIANG Z Y, LI Y W, et al. Utilization of fly ash low density cement slurry for plugging in Tahe oilfield[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2018, 47(1): 79-82.
- [4] 杨海波,曹成章,冯德杰,等.新型低密度水泥减轻材料SXJ-1的研制及应用[J]. 石油钻探技术,2017,45(4):59-64.  
YANG H B, CAO C Z, FENG D J, et al. The development and application of a new low density cement reducer SXJ-1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4): 59-64.
- [5] 刘璐,李明,郭小阳.一种新型低密度矿渣固井液[J]. 钻井液与完井液,2016,33(6):68-72.  
LIU L, LI M, GUO X Y. A new low density slag cementing slurry[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(6): 68-72.
- [6] 侯力伟.大庆油田低密度低温防窜水泥浆体系[J]. 钻井液与完井液,2016,33(4):79-82.  
HOU L W. Low density low temperature anti-channeling cement slurry used in Daqing Oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(4): 79-82.

- [7] 田野,代丹,方国伟,等.提高粉煤灰低密度水泥浆体系低温性能的研究[J].科学技术与工程,2013,13(21):6235-6238.  
TIAN Y, DAI D, FANG G W, et al. Research of how to improve fly ash low density slurry property in low temperature[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(21): 6235-6238.
- [8] 冯茜,李明忠,王成文.高高低密度水泥浆体系及性能研究[J].钻采工艺,2013,36(2):93-96.  
FENG Q, LI M Z, WANG C W. Study on performance of a low density cement slurry system with high compressive strength[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(2): 93-96.
- [9] 庄成宏,王良才.粉煤灰低密度水泥浆在塔河油田简化井身结构井中的应用[J].天然气勘探与开发,2011,34(3):76-79.  
ZHUANG C H, WANG L C. Application of fly ash composite low-density cement slurry to some wells with simplified casing program in Tahe Oilfield[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2011, 34(3): 76-79.
- [10] 谭春勤,刘伟,丁士东,等.SFP弹韧性水泥浆体系在页岩气井中的应用[J].石油钻探技术,2011,39(3):53-56.  
TAN C Q, LIU W, DING S D, et al. Application of SFP elastotoughness slurry in shale gas well[J]. Drilling Petroleum Techniques, 2011, 39(3): 53-56.
- [11] 高元,杨广国,陆沛青,等.一种大温差弹韧性水泥浆[J].钻井液与完井液,2019,36(1):97-101.  
GAO Y, YANG G G, LU PEI Q, et al. Study and application of a large temperature difference cement slurry with good elasticity and toughness[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 36(1): 97-101.
- [12] 齐奉忠,刘硕琼,沈吉云.中国石油固井技术进展及发展建议[J].石油科技论坛,2017,36(1):26-31.  
QI F Z, LIU S Q, SHEN J Y. Suggestions on CNPC cementing technological development[J]. Oil Forum, 2017, 36(1): 26-31.
- [13] 杨广国,陶谦,高元,等.高温高压气井复合型水泥浆体系研究与应用[J].科学技术与工程,2016,16(20):151-155.  
YANG G G, TAO Q, GAO Y, et al. Research and application of high temperature high pressure gas well complex cement slurry[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(20): 151-155.
- [14] KULAKOFSKY D S, PAREDES J L, RIVERA J A. Ultralight weight cementing technology sets world's record for liner cementing with a 5.4 lbm/gal slurry density[C]// paper SPE-98124-MS presented at the IADC/SPE Drilling Conference, 21-23 February 2006, Miami, Florida, USA.
- [15] KJELLEN K O, LAGERBLAD B. Microstructure of tricalcium silicate and Portland cement systems at middle periods of hydration- development of Hadley grains[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(1): 13-20.

(编辑 尹淑容)

(上接第95页)

- channeling treatment in CO<sub>2</sub> flooding reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2014, 4(3): 60-63.
- [9] 刘祖鹏,李兆敏.CO<sub>2</sub>驱油泡沫防气窜技术实验研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(5):117-122.  
LIU Z P, LI Z M. An experimental study on anti-channeling technology with foam in CO<sub>2</sub> flooding[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(5): 117-122.
- [10] 王璐,单永卓,刘花,等.低渗透油田CO<sub>2</sub>驱泡沫封窜技术研究与应用[J].科学技术与工程,2013,13(17):4918-4921.  
WANG L, SHAN Y Z, LIU H, et al. Study and application of CO<sub>2</sub> flooding with foam channeling prevention technology for low permeability oilfield[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(17): 4918-4921.
- [11] LÊ V Q, NGUYỄN Q P, SANDERS A. A novel foam concept with CO<sub>2</sub> dissolved surfactants[C]// paper SPE-113370-MS presented at the SPE Symposium on Improved Oil Recovery, 20-23 April 2008, Tulsa, Oklahoma, USA.
- [12] XING D, WEI B, TRICKETT K, et al. CO<sub>2</sub>-soluble surfactants for improved mobility control[C]// paper SPE-129907-MS presented at the SPE Improved Oil Recovery Symposium, 24-28 April 2010, Tulsa, Oklahoma, USA.
- [13] 张营华.CO<sub>2</sub>泡沫剂的气溶性与封堵性研究[J].科学技术与工程,2017,17(21):233-235.  
ZHANG Y H. Gas solubility and plugging performance of CO<sub>2</sub>-soluble foaming agent[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(21): 233-235.
- [14] 毕卫宇,张攀峰,章杨,等.低渗透油田用CO<sub>2</sub>气溶性泡沫体系研发及性能评价[J].油气地质与采收率,2018,25(6):71-77.  
BI W Y, ZHANG P F, ZHANG Y, et al. Development and performance evaluation on CO<sub>2</sub>-soluble surfactant foam system for low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(6): 71-77.
- [15] 王弘宇.泡沫驱气窜规律及防气窜实验研究[D].东营:中国石油大学(华东),2015.  
WANG H Y. Experimental study on gas channeling of foam flooding and gas channeling prevention[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [16] 武晓辉,肖平,邓军,等.泡沫交替注入参数优化设计[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2010,12(2):89-92.  
WU X H, XIAO P, DENG J, et al. Optimizing design of foam alternating injection parameters[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2010, 12(2): 89-92.
- [17] 李爱芬,陈凯,赵琳,等.泡沫体系注入方式优化及可视化研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2011,26(5):49-52.  
LI A F, CHEN K, ZHAO L, et al. Optimization and visualization of the injection patterns of foam system[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2011, 26(5): 49-52.

(编辑 常燕)