



## 海上K油田层内生气调驱技术研究与应用

左清泉, 赵军, 郑继龙, 刘浩洋, 陈平, 胡雪, 吴彬彬

引用本文:

左清泉, 赵军, 郑继龙, 等. 海上K油田层内生气调驱技术研究与应用[J]. *应用科技*, 2021, 48(5): 99–104.

ZUO Qingquan, ZHAO Jun, ZHENG Jilong, et al. Research and application of the technology of gas and displacement control in the formation of offshore K Oilfield[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(5): 99–104.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.202101014>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 要地水下反蛙人防御技术

Anti-frogman defence system of strategic point underwater

*应用科技*. 2020, 47(1): 94–98 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201908002>

### 高含水期非均质油藏周期注水室内实验研究

Experimental study on the cyclic water flooding of heterogeneous reservoir in a high water cut stage

*应用科技*. 2019, 46(6): 92–95 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201611016>

### 超临界CO<sub>2</sub>技术在能源领域的若干应用

Some applications of supercritical CO<sub>2</sub> technology in energy field

*应用科技*. 2019, 46(6): 85–91 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201904021>

### 气水交替复合驱在高含水油田应用——以QK17-2油田为例

The WAG-surfactant flooding applied in the high-water-cut oil field: taking QK17-2 oilfield as an example

*应用科技*. 2017, 44(4): 75–77,81 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201607016>

### 高温高压起泡剂性能评价装置研制及起泡剂体系筛选评价

Performance evaluation device of high temperature and high pressure foaming agent and foaming agent system screening evaluation

*应用科技*. 2016, 43(4): 27–30 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201511015>

### BZ25-1油田沙二段储层氮气、水交替注入室内实验研究

Indoor experimental research on N<sub>2</sub>-alternating-water injection of BZ25-1 oilfield

*应用科技*. 2015(2): 58–60,74 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1009-671X.201406011>



微信公众平台



期刊网址

DOI: 10.11991/ykj.202101014

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.u.20210825.1914.023.html>

## 海上 K 油田层内生气调驱技术研究与应用

左清泉<sup>1,2</sup>, 赵军<sup>1,2</sup>, 郑继龙<sup>1,2</sup>, 刘浩洋<sup>1,2</sup>, 陈平<sup>1,2</sup>, 胡雪<sup>1,2</sup>, 吴彬彬<sup>1,2</sup>

1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452

2. 海洋石油高效开发国家重点实验室, 天津 300452

**摘要:**针对海上 K 油田注入压力高、储层纵向吸水不均、高渗储层窜流明显以及常规调剖调驱体系难注入等问题,开展层内自生气调驱技术研究。针对目标油藏条件,对层内生气调驱体系配方以及体系静态性能和驱油能力进行实验研究,实验结果表明:室内所筛选层内生气调驱体系配方为 8% 自生气体系+0.5% 起泡剂,该体系驱油效率在水驱基础上提高 19.1%,具有良好的注入性和调驱性能。通过渤海 K 油田的现场试验,该技术可大幅降低油井含水率,其中典型见效井含水最高下降 13%,最大日增油 23.6 m<sup>3</sup>,5 个月累积增油 4 300 m<sup>3</sup> 余方。

**关键词:**层内生气;自生气调剖;自生泡沫;泡沫综合值;生气效率;驱油效率;驱油性能;起泡性能

中图分类号:TE357

文献标志码:A

文章编号:1009-671X(2021)05-0099-06

## Research and application of the technology of gas and displacement control in the formation of offshore K Oilfield

ZUO Qingquan<sup>1,2</sup>, ZHAO Jun<sup>1,2</sup>, ZHENG Jilong<sup>1,2</sup>, LIU Haoyang<sup>1,2</sup>,  
CHEN Ping<sup>1,2</sup>, HU Xue<sup>1,2</sup>, WU Binbin<sup>1,2</sup>

1. CNOOC Energy Tech-Drilling & Production Co., Ltd., Tianjin 300452, China

2. State Key Laboratory of Offshore Oil Efficiency Development, Tianjin 300452, China

**Abstract:** In order to solve the problems of high injection pressure, uneven vertical water absorption of reservoir, obvious channeling of high permeability water flow and difficult injection of conventional profile control in offshore K oilfield, this paper studies the technology of self-generation and drive control in the formation of the oilfield. Based on the target reservoir condition, the formula of profile control and flooding system as well as the static performance and oil displacement capacity of the system are experimentally studied, and the formulation of formation profile control and displacement system in the indoor selected intra-layer is determined: 8% self-generation system + 0.5% foaming agent. The experimental results showed that the system has good injecting and profile control performance, and the oil displacement efficiency is 19.1% higher than that of water flooding. The technology has been successfully applied in K oilfield in Bohai Sea. The maximum water cut of typical effective wells has been greatly reduced by 13%, and the maximum daily oil production has increased by 23.6 m<sup>3</sup>. At present, the validity period of the technology has been up to 5 months and the cumulative oil production has increased by 3 000 m<sup>3</sup>.

**Keywords:** in-situ gas generation; self-ignition profile control; self-foam; foam comprehensive value; product-gas efficiency; displacement efficiency; displacement performance; blister performance

海上 K 油田位于渤海南部海域,油田主力层沙河街组沙三段处于深水湖泊与三角洲交互环境中,形成了一套辫状三角洲相为主的沉积体系。沙三中段物源来自西南的垦东凸起,沙三上段物源来自北侧临近的莱北低凸起。沙河街组沙三段

孔隙度和渗透率有较好的正相关性,平均孔隙度 21.9%,渗透率 0.02~913.8 mD,平均 100 mD,具有中低孔渗的特征,地层温度 100~120 °C,地层原油黏度 1.53~2.69 mPa·s。

目前油田层间非均质性较强,吸水剖面显示层间吸水差异大,注水压力一直较高,同时注采对应关系明显,存在明显优势水流通道<sup>[1]</sup>。鉴于目标油藏物性相对较差、注入压力高、纵向吸水

收稿日期:2021-01-29 网络出版日期:2021-08-26

作者简介:左清泉,女,工程师。

赵军,男,工程师。

通信作者:赵军, E-mail: zhaojun5@cnooc.com.cn.

不均、平面注入突进明显以及常规调剖调驱体系难注入的问题,结合海上油田平台空间有限,开展层内自生气调驱技术研究。国内川中磨 144 井由于水淹较严重,已基本停产,注入层内自生气体系 29 m<sup>3</sup>后,共排出井底积液 84 m<sup>3</sup>,气井恢复生产,产气量为 5.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>[2]。壳牌公司在国外加利福尼亚的 3 口井和 Wyoming 的 5 口井开展了自生气现场解堵施工,均达到了热解堵、降压增注的效果[3],但目前该项技术还未在海上油田得到应用,因此,为了改善海上 K 油田注水开发效果,针对层内生气技术国内外均开展了室内实验研究,为海上油田提高采收率技术提供技术方法和思路。

## 1 层能自生气机理研究

层内自生气技术是指向储层中注入自生气体药剂溶液,使其在油藏条件下发生化学反应、释放出自生气体[4]。反应时间、反应速率与反应效率与自生气体系药剂的使用比例、酸碱性及反应温度均有关[5-6],生成的自生气优先占据多孔介质中的油孔道,形成氮气、油、水三相乳状液,起到降低原油黏度作用[7-8];层内生气体系中的铵根与亚硝酸根发生氧化还原反应生成 N<sub>2</sub>,或者亚硝酸与尿素、氨基甲酸按发生化学反应生成 N<sub>2</sub>与 CO<sub>2</sub>的复合气,反应的同时,释放出大量的热量,

能够溶解地层中的有机物沉淀[9-10];生成的气体能够增加地层能量[11],在一定的压差下,气体对油层当中的堵塞物具有一定的冲刷作用,可有效疏通二次污染造成的地层堵塞[12]。因此,自生气体系还具有调剖、热解堵、地层增能和降压增注的作用。

## 2 层内生气体系优选

目前,海上 K 油田井组存在注入压力高、非均质性强、纵向吸水不均、常规体系难以注入的问题,而常规的酸化解堵措施有效期短,急需研发一种实现近井解堵、地下生气生泡封堵主力吸水层、启动中低渗透层、调整吸水剖面的体系,该体系还具有防腐蚀、微热量、易注入的特点[13],可以在地层中发生化学反应,生成或释放出多相物质,达到增能保压、改善驱替前缘流度比。自生气体系与泡沫体系结合的调驱体系选择性地发挥各组分的调、驱或加和增效作用,以达到扩大波及体积、提高洗油效率的效果,实现油田稳油控水的目的。

### 2.1 实验条件

油藏温度:110℃;实验用油:海上 K 油田 B17 井现场脱水原油;实验用水:海上 K 油田 B17 井现场注入水,矿化度 13 279.1 mg/L,属于碳酸氢钠水型,地层水水质分析情况如表 1 所示。

表1 B17 井水质分析表

离子组成	Na <sup>+</sup> 、K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	TDS
质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	4545.8	453.1	28.5	0	237.8	6.6	8007.2	13279.1

### 2.2 实验仪器及药剂

实验仪器:Brookfield 粘度计, DV2T 型,博力飞仪器有限公司;恒温水浴, TW20 型,优莱博技术有限公司;电子天平, BSA423S 型,赛多利斯公司;磁力搅拌器, Variomag 型,美国 Variomag 公司等。

实验药剂:生气剂、生气剂和释气剂,西安石油大科技有限公司提供;阴离子型发泡剂 20201,东营市双乔化工有限公司;阴离子型发泡剂 20202,上海舰邦实业有限公司;阳离子型发泡剂 20203,东营市百扬石油科技有限责任公司;非离子型发泡剂 20204,东营市胜都石油技术有限公司;阳离子型发泡剂 20205,上海银聪新材料科技有限公司。

### 2.3 实验方法

1) 自生气体系配置:将生气剂 A、生气剂

B 和释气剂 C 按照不同摩尔分数和不同质量分数配置成自生气体系后,倒入 200 mL 量筒中测定生气量,装置流程(自制)见图 1 所示。



图1 自生气体系配置流程

2) 泡沫综合值测定:

a) Waring blender 搅拌法:配置 0.5% 的发泡剂溶液 200 mL,使用 Waring blender 剪切机(见图 2)

在一档条件下剪切 30 s 后, 迅速倒入 100 mL 量筒中, 观察泡沫高度及发泡剂析出一半时的高度。



图2 Waring blender 剪切机

b) 泡沫扫描仪法: 配置 0.1%~1.5% 不同浓度的发泡剂溶液 200 mL, 设置泡沫扫描仪相关参数, 使用泡沫扫描仪 (见图 3) 测定起泡高度及析液变化情况。

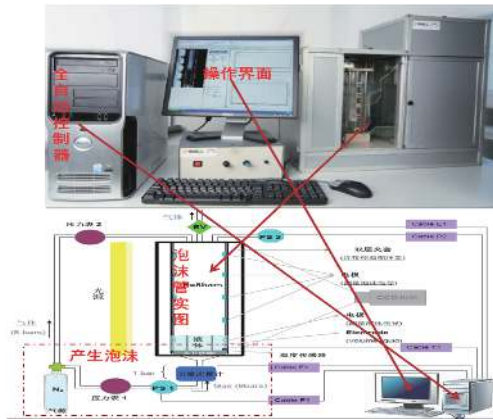


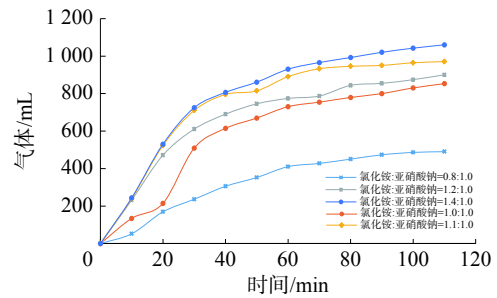
图3 泡沫扫描仪法测定泡沫性能流程

### 2.4 结果与讨论

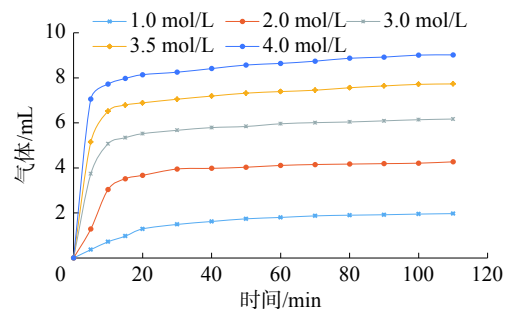
#### 1) 自生气体系配方研究

室内通过对自生气体系的摩尔分数、质量分数以及酸质量分数对生气量的影响进行研究, 结果见图 4。通过实验结果确定自生气的体系配方: 生气剂 A(5%~15%)+ 生气剂 B(5%~15%)+ 释

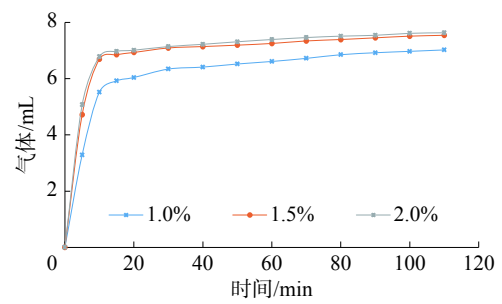
气剂 C (1%~5%)。考虑到油藏情况、现场的施工工艺流程、生气速度控制及深部运移封堵等因素, 确定最终自生气体系质量分数为 5%。



(a) 摩尔分数配方对生气量的影响



(b) 体系浓度对生气量的影响



(c) 酸质量分数对生气量的影响

图4 自生气体系影响因素研究曲线

#### 2) 发泡剂优选

实验选取了 5 种发泡剂, 通过泡沫扫描仪和 Waring blender 搅拌评价法对泡沫高度和析液半衰期进行评价, 计算泡沫综合值, 结果见表 2。同时结合泡沫形态及界面张力等特性进行综合优选, 20204 发泡剂的性能优于其他 4 种发泡剂, 将 20204 发泡剂作为本次实验的发泡剂开展进一步的评价。

表2 发泡剂泡沫性能评价

编号	界面张力/ $\text{mN}^{-1}$	泡沫扫描仪评价方法			Waring blender 搅拌评价方法		
		起泡体积/mL	析液半衰期/s	泡沫综合值/( $\text{mL}\cdot\text{s}$ )	起泡体积/mL	析液半衰期/s	泡沫综合值/( $\text{mL}\cdot\text{s}$ )
20201	$4.5\times 10^{-1}$	146.1	87	12 710.7	320	262	83 840
20202	$9.8\times 10^{-1}$	142.3	81	11 526.3	240	33	7 920
20203	$8.5\times 10^{-2}$	135.7	87	11 805.9	260	111	28 860
20204	$1.9\times 10^{-2}$	168.5	105	17 692.5	410	442	181 220
20205	$4.6\times 10^{-2}$	159.6	99	15 800.4	380	408	155 040

配制 0.1%~1.5% 不同质量分数的 20204 发泡剂溶液,使用泡沫扫描仪测定泡沫体积,对 20204 发泡剂不同质量分数的泡沫性能进行评价,结果如图 5。图中数据表明:泡沫体积随着发泡剂质量分数增大而增大,性能逐渐增强,但质量分数超过 0.5% 时,增长幅度变缓,考虑经济成本及地层吸附等因素,推荐最佳发泡剂质量分数为 0.5%。

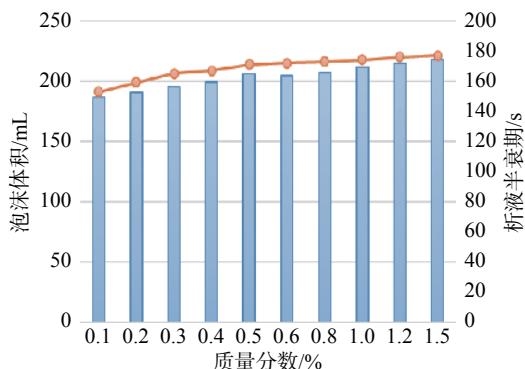


图5 发泡剂质量分数优选

通过室内实验研究筛选最终形成调驱体系配方: 1) 自生气的体系配方: 生气剂 A(5%~15%)+生气剂 B(5%~15%)+释气剂 C(1%~5%); 2) 发泡剂质量分数为 0.5%。调驱体系配方具有生气时间、生气量、生气速率可控的特点。

### 3 层内生气体系性能评价

自生气体系的生气速率、生气量和起泡剂的泡沫性能等可能受到矿化度、原油等因素的影响,因此接下来针对优选的层内生气体系考察其矿化度、原油含量对其性能的影响,同时考察其室内驱油性能的效果,为现场提供理论依据。

#### 3.1 实验条件、实验仪器及药剂

实验条件同 2.1 节所示。

实验仪器: 恒温箱, FV-IV 型, 南通飞宇公司; 岩心驱替实验装置, 海安石油仪器有限公司等。

实验药剂: 自生气的体系配方: 生气剂 A(5%~15%)+生气剂 B(5%~15%)+释气剂 C(1%~5%)。

#### 3.2 实验方法

1) 发泡剂耐盐性能评价: 用 0~30 000 mg/L 不同质量分数的氯化钠盐水配制 0.5% 的发泡剂溶液,使用 Waring blender 搅拌法观察泡沫高度及发泡剂析出一半时的高度,计算泡沫综合值。

2) 发泡剂耐油性性能评价: 配制不同原油含量(0~25%)的 0.5% 含油发泡剂溶液,使用 Waring blender 搅拌法观察泡沫高度及发泡剂析出一半时的高度,计算泡沫综合值。

3) 起泡性能评价: 使用海上 K 油田注入水,在油藏温度 63℃ 条件下,将发泡剂、自生气体体系按照段塞组合方式注入,采用自主研发的可视化填砂管(图 5)模拟地层条件下,评价调驱体系的综合性能。

4) 调驱体系驱油性能评价: 采用尺寸为  $\varphi 3.8 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ , 渗透率为 1 022 mD 的填砂模型装置,开展不同驱替方式的驱油效果对比实验。

### 3.3 结果与讨论

基于以上所研究的体系配方,在目标油藏条件下开展调驱体系性能评价实验,具体如下:

#### 1) 层内生气体系耐盐性能评价

用不同质量分数(0~30 000 mg/L)的氯化钠盐水配制 0.5% 的 20204 发泡剂溶液对 20204 发泡剂的耐盐性能进行评价,结果见图 6。图中数据表明:随着矿化度增加,泡沫性能逐渐降低。当矿化度低于 20 000 mg/L 时,泡沫性能变化不大;当矿化度高于 20 000 mg/L 时,泡沫性能下降比较明显。实验研究结果认为 20204 发泡剂在矿化度低于 20 000 mg/L 的模拟盐水中,具有较强耐盐能力。

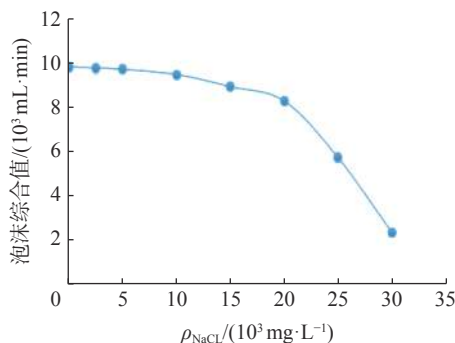


图6 耐盐性评价曲线

#### 2) 层内生气体系耐油性性能评价

配制 0.5% 的含油 20204 发泡剂溶液,对不同原油含量(0~25%)的 20204 发泡剂耐油性性能进行评价,结果见图 7。图中数据表明:随着含油量增加,泡沫性能逐渐降低,但含油量超过 15% 后,泡沫性能下降幅度较为明显。实验结果认为当含油量小于 15% 时,发泡剂具有较好的耐油性。

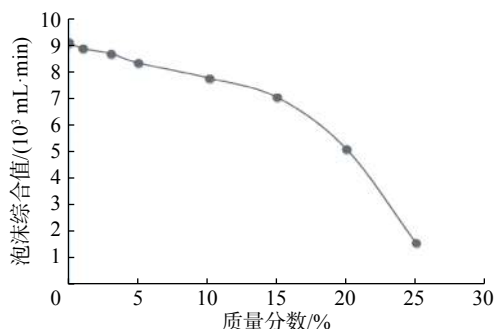


图7 耐油性评价曲线

### 3) 层内生气体系起泡性能评价

使用海上 K 油田注入水, 在油藏温度 110℃ 条件下, 将发泡剂、自生气体系按照段塞组合方式注入, 采用自主研发的可视化填砂管(如图 8)模拟地层条件下, 评价调驱体系的综合性能。

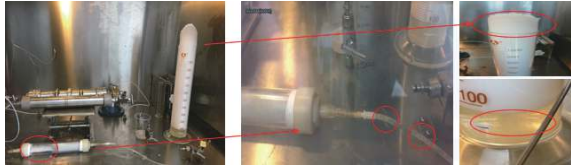


图8 起泡性能评价实物

通过实验装置可以看出填砂管中明显有泡沫产生, 出口端管线有气泡运移; 体系反应明显; 可视化填砂管中药剂体系经过剪切后生泡性能不受影响, 泡沫体系呈现“生泡—破灭—生泡—破灭”的过程, 并且形成的泡沫稳定性良好。

### 4) 层内生气体系驱油性能评价

采用尺寸为  $\phi 3.8 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ , 渗透率为 1 022 mD 的填砂模型装置, 开展不同驱替方式的驱油效果对比实验。共实施 3 组方案, 驱替结果及方式见图 9、表 3 所示。

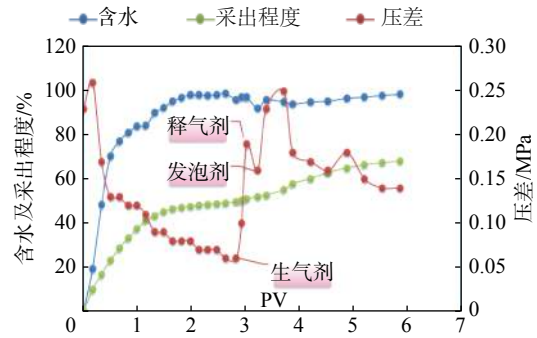


图9 驱油性能评价实验曲线

表3 驱油性能评价实验数据表

驱替方式	水驱采出程度/%	最终采出程度/%	基于水驱采出程度幅度/%
水驱+自生气+水驱	48.7	53.4	4.7
水驱+发泡剂+水驱	49.2	61.6	8.4
水驱+自生气体系+发泡剂+水驱	49.1	68.1	19.1

通过自生气、发泡剂、层内生气调驱体系的驱油效率进行对比, 层内生气调驱体系的驱油效率高于单一的自生气体系和泡沫体系, 提高采收率达到 19.1%, 驱替效果最佳。原因可能是层内生气调驱剂使用复配的起泡剂性能较好, 即发泡性能好、耐高温且具有超低界面张力的作用。

## 4 现场应用

为了改善注水井纵向及平面上的非均质性, 抑制突进方向的油井含水率及含水上升速度, 提高水驱效果, 开展海上 K 油田 B17 进行层内自生气调驱作业。

B17 井自 2019 年 11 月开始层内自生气调剖, 12 月 8 日结束。注入过程中, 注入量在 315.7~379.3 m<sup>3</sup>, 注入压力在 11.7~13.9 MPa, 累积注液 2 800.7 m<sup>3</sup>。现场实施注入情况见图 10。现场对 B17 井进行 5 个轮次的交替注入, 调驱体系中的助调剂具有降低表面张力的性能, 起到降压增注的作用, 从而提高药剂注入量; 调驱体系中的自生气体系进入储层后生成泡沫, 对大孔道起到封堵作用, 因此压力上升; 交替注入过程中, 注入压力规律性起伏变化, 总体为上升趋势, 反映调驱体系注入后对地层起到了一定的封堵作用, 有效地增加了渗流阻力。典型见效井含水最高下降

13 个百分点(从 98.2% 下降到 85%), 最大日增油 23.6 m<sup>3</sup>, 截至 2020 年 4 月, 井组累计增油 4 300 m<sup>3</sup>, 目前还在持续增油。

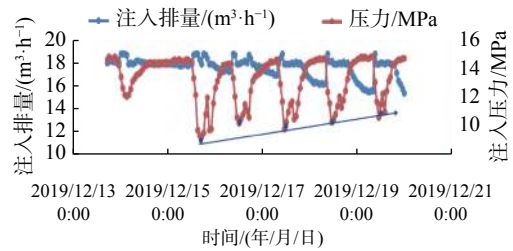


图10 现场实施注入曲线

## 5 结论

1) 通过室内实验研究, 优选出适合海上 K 油田的层内生气调驱体系, 体系配方为 8% 自生气体系+0.5% 起泡剂, 且该体系具有良好的耐盐、耐油性能, 驱油效率在水驱基础上提高 19.1%, 具有良好的注入性和调驱性能。

2) 室内研发的层内生气调驱体系已在 K 油田 B17 井应用, 最大日增油 23.6 m<sup>3</sup>, 井组累计增油超过 4 300 m<sup>3</sup>。

## 参考文献:

[1] 孙建峰, 郭东红, 崔晓东, 等. 甜菜碱类低界面张力泡沫

- 驱油体系性能研究 [J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(3): 92–95.
- [2] 柳建新, 陈维余, 孟科全, 等. 缔合聚合物对泡沫驱油体系流变性的影响 [J]. 石油天然气学报, 2014, 36(11): 188–191.
- [3] 王其伟. 孤岛中二区低张力泡沫驱油体系性能研究 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(5): 88–92.
- [4] 黄春霞, 汤瑞佳, 余华贵, 等. 二元复合低界面张力泡沫驱油体系研究 [J]. 应用化工, 2015, 44(3): 498–501, 505.
- [5] 杜勇. 低张力泡沫驱油体系提高采收率研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(29): 131–135.
- [6] 高伟, 孟庆阳, 杨黎明, 等. 十六烷基三甲基溴化铵和 3 种十二烷基阴离子表面活性剂复配驱油体系的性能 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2010, 16(5): 437–442.
- [7] 王姗姗, 武滨, 康晓东, 等. 不同渗透率级差下化学驱油体系优选 [J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 104–108.
- [8] 孙宁, 宋考平, 宋庆甲. 二元与泡沫交替驱油体系室内物理模拟研究 [J]. 石油化工高等学校学报, 2017, 30(2): 40–43.
- [9] 张蒙, 聂兴成, 黄亚杰, 等. 高矿化度油藏聚合物基微泡沫驱油体系优化 [J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(1): 79–82.
- [10] 张贤松, 王其伟, 隗合莲. 聚合物强化泡沫复合驱油体系试验研究 [J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006, 28(2): 137–138, 160.
- [11] 武文玉. 渤海油田自生泡沫酸化技术研究 [J]. 精细石油化工进展, 2019, 20(3): 18–20, 33.
- [12] 王维波, 陈龙龙, 李超跃, 等. 泡沫驱提高采收率技术研究新进展 [J]. 应用化工, 2020, 49(7): 1848–1853.
- [13] 刘常清, 徐国瑞, 鞠野, 等. 海上高含水油田就地封堵体系优化研究 [J]. 化学工程师, 2019, 33(1): 35–38, 74.

### 本文引用格式:

左清泉, 赵军, 郑继龙, 等. 海上 K 油田层内生气调驱技术研究与应用 [J]. 应用科技, 2021, 48(5): 99–104.

ZUO Qingquan, ZHAO Jun, ZHENG Jilong, et al. Research and application of the technology of gas and displacement control in the formation of offshore K Oilfield[J]. Applied science and technology, 2021, 48(5): 99–104.

(上接第 85 页)

- [4] PAN Yiwei, YANG Sihan, PENG Hua, et al. Specific emitter identification based on deep residual networks[J]. IEEE access, 2019, 7: 54425–54434.
- [5] 冷鹏飞, 徐朝阳. 一种深度强化学习的雷达辐射源个体识别方法 [J]. 兵工学报, 2018, 39(12): 2420–2426.
- [6] GONG Jialiang, XU Xiaodong, LEI Yingke. Unsupervised specific emitter identification method using radio-frequency fingerprint embedded InfoGAN[J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2020, 15: 2898–2913.
- [7] 谷文堃, 王党卫, 彭尚, 等. 分布式 OFDM-MIMO 雷达包络对齐方法 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 19–24.
- [8] 石荣, 邓科, 阎剑. 两种脉冲信号包络提取方法的联系及性能分析 [J]. 无线电工程, 2021, 51(1): 1–7.
- [9] 孙华泽, 张晓林. 基于瞬时相位新特征的数字调制信号识别 [J]. 应用科技, 2020, 47(6): 30–35, 52.
- [10] 张冬瑜, 崔紫娟, 李映夏, 等. 基于 Transformer 和 BERT 的名词隐喻识别 [J]. 数据分析与知识发现, 2020, 4(4): 100–108.
- [11] 王侃, 曹开臣, 徐畅, 等. 基于改进 Transformer 模型的文本摘要生成方法 [J]. 电讯技术, 2019, 59(10): 1175–1181.
- [12] 郭晓然, 罗平, 王维兰. 基于 Transformer 编码器的中文命名实体识别 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(3): 989–995.
- [13] LIAO Fei, MA Liangli, PEI Jingjing, et al. Combined self-attention mechanism for Chinese named entity recognition in military[J]. Future internet, 2019, 11(8): 180.
- [14] ZHANG Tongxuan, LIN Hongfei, TADESSE M M, et al. Chinese medical relation extraction based on multi-hop self-attention mechanism[J]. International journal of machine learning and cybernetics, 2021, 12(2): 355–363.
- [15] 唐婷. 一种任意波形发生器的波形文件产生方法 [J]. 电子设计工程, 2017, 25(8): 75–77, 82.

### 本文引用格式:

王亮, 肖易寒. Transformer 网络在雷达辐射源识别中的应用 [J]. 应用科技, 2021, 48(5): 81–85, 104.

WANG Liang, XIAO Yihan. Application of Transformer network in radar emitter recognition[J]. Applied science and technology, 2021, 48(5): 81–85, 104.