

# 沈625区块高凝油减氧空气驱实验研究与应用

王伟伟

(中国石油辽河油田分公司,国家能源稠(重)油开采研发中心,辽宁 盘锦 124010)

**摘要:**针对目前辽河油田沈625区块潜山油藏在注水开发方式下,回采效果差及采收率低等问题,开展了不同浓度减氧空气驱的室内实验研究。不同 $O_2$ 浓度ARC实验结果表明,随 $O_2$ 浓度降低,原油累积热量时间变长且氧化反应剧烈程度有所下降,但监测到的反应温度不变,放热温度为 $165^\circ\text{C}$ ,氧化反应加剧时温度为 $195^\circ\text{C}$ 。说明沈625块油藏温度低于 $165^\circ\text{C}$ 时放热量很少,不能产生有效热效应,适合采用减氧空气驱。不同 $O_2$ 浓度静态氧化与动态驱替实验表明,随 $O_2$ 浓度增加,原油的氧化程度有所增加,但产出的尾气中剩余 $O_2$ 含量较高;驱油效率贡献率有所增加,但驱油效率变化很小,说明 $O_2$ 浓度对低温氧化影响较小。结合室内实验结果及氧含量的安全标准,采用氧含量为5%的减氧空气驱替原油,可以有效提高产油量,控制综合含水,既可以降低安全风险,又能够提高油藏采收率。

**关键词:**沈625区块 高凝油 减氧空气驱  $O_2$ 浓度 低温氧化 驱油效率

**中图分类号:**TE341 **文献标志码:**A

## Experimental research of oxygen – reducing air flooding for high pour – point oil in Shen 625 block and its application

WANG Weiwei

(PetroChina Liaohe Oilfield Company, National Energy Heavy Oil R&D Center, Panjin 124010, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of poor effect of bad production and low oil recovery rate of buried hill reservoir in Shen 625 block of Liaohe Oilfield under water injection development mode, laboratory experiments were carried out on oxygen – reducing air flooding with different concentration. The results of ARC experiments with different  $O_2$  concentration show that with the decrease of  $O_2$  concentration, the cumulative heat time of crude oil increases and the degree of oxidation reaction decreases, but the monitored reaction temperature remains unchanged, the exothermic temperature is  $165^\circ\text{C}$ , and the temperature is  $195^\circ\text{C}$  when the oxidation reaction intensifies. The results indicate that the heat release of Shen 625 reservoir is very little when the temperature is lower than  $165^\circ\text{C}$ , which can not produce effective thermal effect, so it is suitable to use oxygen – reducing air flooding. Static oxidation and dynamic displacement experiments with different  $O_2$  concentration show that the oxidation degree of crude oil increases with the increase of  $O_2$  concentration, but the residual  $O_2$  content in the tail gas is higher; the contribution rate of oil displacement efficiency increases, but the change of oil displacement efficiency is small, indicating that  $O_2$  concentration has little effect on low temperature oxidation. Combining with laboratory test results and safety standards of oxygen content, using oxygen – reducing air with oxygen content of 5% to displace crude oil can effectively increase oil production and control comprehensive water cut, which can not only reduce safety risk, but also improve reservoir recovery.

**Key words:** Shen 625 block; high pour point oil; deoxygenated air flooding;  $O_2$  concentration; low temperature oxidation; oil displacement efficiency

收稿日期:2019-05-14;改回日期:2019-06-11。

作者简介:王伟伟(1982—),女,工程师,现从事油田稠油开发室内实验研究工作。E-mail:wwsun10@sina.com。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“辽河油田千万吨稳产关键技术研究与应用”子课题“稀油高凝油大幅度提高采收率关键技术研究与应用”(2017E-1603)。

辽河油田沈 625 区块为裂缝型块状潜山油藏,埋深为 3 150 ~ 3 720 m,原始地层温度 102 ~ 123 ℃,原始地层压力 32.2 ~ 37.8 MPa,原油平均密度 0.85 g/cm<sup>3</sup>,黏度 64.28 mPa · s,凝固点 45.33 ℃,含蜡量 41.51%,胶质沥青含量 10.55%,具有高含蜡、高凝固点等特点,属高凝油。自 2000 年投入开发以来,2012 年年产油量达到高峰 20 × 10<sup>4</sup> t,目前下降到了 7 × 10<sup>4</sup> t,综合含水 78.2%,高含水矛盾突出,采收率仅为 17.6%,达不到标定采收率。注空气开发作为注水开发的接替方式,已成为一种行之有效的提高采收率新途径<sup>[1-6]</sup>。注空气开发就是将空气注入油层,空气中的 O<sub>2</sub> 与原油接触发生低温氧化反应,生成 CO<sub>2</sub> 和 CO 气体,并释放出大量热,间接形成由 N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 组成的烟道气来驱替原油<sup>[7-9]</sup>。但由于高压注空气过程中 O<sub>2</sub> 含量高,存在安全风险,因此提出了减氧空气驱技术。减氧空气驱中的氧含量是确保现场安全的决定性参数,目前对减氧空气驱的研究也主要集中在氧含量的界限方面<sup>[10-13]</sup>,缺乏全面系统的对比分析。通过开展室内实验,分别从氧化放热、尾气变化和驱替特征三个方面探索了不同

浓度的减氧空气对沈 625 区块原油的氧化作用及驱油效率的影响,可以为安全有效地开发油田及提高采收率提供重要的参考。

1 室内实验条件与方法

室内实验分别采用加速绝热量热仪、静态氧化罐和高压细长管等设备及模型,从氧化放热、尾气变化和驱替特征三个方面进行不同浓度的减氧空气对地层原油的影响效果实验研究。实验所用原油为沈 625 区块的高凝油,原油密度 0.86 g/cm<sup>3</sup>,地面脱气原油黏度 60.32 mPa · s,凝固点 46.27 ℃,含蜡量 42.63%。

1.1 加速绝热量热实验

利用 APTAC264 加速绝热量热仪开展不同浓度减氧空气的氧化放热实验,ARC 参数设定如表 1 所示,仪器通过加热—等待—探测三个步骤,自动跟踪放热过程,若探测到放热升温,仪器停止加热模式,记录样品放热反应过程中的温度变化;若样品放热升温速率低于设备检测灵敏度,仪器自动进入加热—等待—探测模式,如此循环至实验结束。

表 1 ARC 参数设定

氧气浓度/%	实验压力/MPa	样品重量/g	起始温度/℃	终止温度/℃	升温速率/(℃ · min <sup>-1</sup> )	温度增量/℃	检测灵敏度/(℃ · min <sup>-1</sup> )
0(氮气)	2.05	9.835	50	400	2	5	0.05
10	2.01	9.679	50	400	2	5	0.05
15	1.99	9.698	50	400	2	5	0.05
21(空气)	2.02	9.802	50	400	2	5	0.05

1.2 氧化罐实验

利用静态氧化罐装置研究不同浓度减氧空气与原油低温氧化后的尾气组分变化,用于评价 O<sub>2</sub> 浓度对沈 625 区块原油造成低温氧化的程度。O<sub>2</sub> 浓度分别为 0.5%、10%、15% 和 21%,由于沈 625 区块油藏目前地层压力为 14.3 MPa,地层温度为 116℃,为了较好地模拟地层条件,将实验温度设定为 110℃,实验压力设定为 10 MPa,反应时间设定为 134 h。

1.3 细长管驱替实验

利用直径 8 mm,长 30 m 不锈钢管自制高压细长管模型进行驱替实验,用于分析不同浓度减氧空气对驱油效率的影响。实验温度设定为 110℃,压力为 10 MPa, O<sub>2</sub> 浓度分别为 0、5%、10%、15%、21%。实验步骤:在自制细长管模型中填入石英砂,先饱和水再饱和油,将模型放入恒温箱、设置实验出

口压力,启动恒温箱将温度升至设定温度,打开外供气源保持一定的注入速率连续注入,记录压力、驱替出油样体积直至实验结束。

2 室内实验研究结果

2.1 氧化放热特征分析

对不同浓度减氧空气的 ARC 数据进行分析,获得了 2 MPa 压力下不同浓度减氧空气与原油氧化反应实验温度随时间变化的曲线(见图 1)。

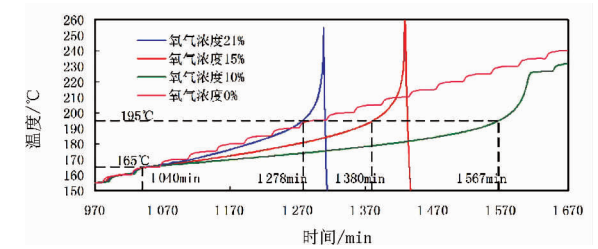


图 1 不同浓度减氧空气与原油氧化反应温度变化曲线

在空气(氧气浓度 21%)条件下,实验中温度低于 165 ℃、时间小于 1 040 min 时,未监测到温度累积,此时的氧化反应放热量很少,主要表现为加氧反应。随着温度升高,165 ℃时监测到原油开始放热,温度随时间不断升高,升至 195 ℃时表现出氧化反应加剧、温度迅速升高,说明原油的氧化反应逐渐从放热较少的加氧反应向放热较多的裂键反应转变<sup>[14]</sup>。由此可知,对于沈 625 原油,实验温度低于 165 ℃时,原油主要发生加氧反应,裂键反应为辅;实验温度在 195 ℃以上时,原油主要发生裂键反应,以加氧反应为辅;实验温度在 165 ~ 195 ℃之间时,原油反应为加氧反应向裂键反应转变,加氧反应和裂键反应并存。

在不同浓度减氧空气实验中, $O_2$  浓度为 15%、10% 时监测到放热温度也为 165 ℃,但热量累积时间变长,温度升至 195 ℃时出现反应加剧,但没有空

气条件下剧烈; $O_2$  浓度为 0 时,由于没有氧气参与反应,原油在整个实验过程中未监测到氧化放热。随  $O_2$  浓度降低,原油从 165 ℃升至 195 ℃所用时间更长, $O_2$  浓度 21%、15%、10% 对应反应时间分别为 238、340、527 min。分析认为,低  $O_2$  浓度下参与反应的  $O_2$  量少,氧化反应累积热量需要更长的时间,随着氧化反应进行氧气被消耗,剩余氧气量更少,导致后续氧化反应剧烈程度随之下落。

因此可见,沈 625 块油藏温度为 116 ℃,低于氧化放热温度 165 ℃,氧气与原油反应主要为加氧反应,产生的热量很少,不能产生有效的热效应。因此,对于沈 625 油藏应该采用减氧空气驱,避免氧气无法有效消耗导致安全风险。

## 2.2 静态氧化尾气分析

通过不同浓度减氧空气与原油静态低温氧化实验,计算出不同浓度减氧空气的耗氧指标,见表 2。

表 2 不同浓度减氧空气与原油低温氧化后尾气组分变化情况

氧气浓度/%	尾气组分/%					耗氧评价/%	
	$O_2$	$N_2$	CO	$CO_2$	$H_2$	氧气利用率/%	氧气转化率/%
0	0	99.938	—	—	—	0	0
5	4.953	95.041	—	—	—	0.98	0
10	8.229	91.531	—	0.054	—	19.09	2.78
15	10.042	0.355	0.010	89.143	0.010	36.16	6.42
21	10.514	1.252	0.373	87.511	0.004	54.80	12.70

原油与空气的低温氧化反应物为原油中轻质组分,氧化产物主要是水、含氧烃类化合物(羧酸、醛、酮、醇、氢过氧化物)和少量的碳氧化物气体( $CO$ 、 $CO_2$ )<sup>[15]</sup>。分析尾气组分可知,在相同的实验条件下,当  $O_2$  浓度低于 5% 时,尾气中  $O_2$  含量几乎没变, $O_2$  利用率仅为 0.98%,尾气中没有检测到  $CO$ 、 $CO_2$  气体, $O_2$  转化率为 0;随着  $O_2$  浓度升高, $O_2$  消耗量增多, $O_2$  利用率增大,生成的  $CO$ 、 $CO_2$  气体含量也有所增加, $O_2$  转化率增大,原油被氧化的程度有所增加,但是尾气中还是有相当一部分  $O_2$  没有被消耗掉。分析说明沈 625 区块原油在 110 ℃、10 MPa 条件下低温氧化能力较弱,低温氧化作用不足以消耗掉所有  $O_2$ ,存在安全隐患,从注气安全角度考虑应当采用减氧空气驱。

## 2.3 驱油效率评价分析

通过高压细长管驱替实验可以得出不同浓度减氧空气对原油驱油效率的影响结果(见表 3)。

表 3 不同浓度减氧空气对驱油效率及贡献率的影响

氧气浓度/%	驱油效率/%	贡献率/%
0	47.58	0
5	48.02	0.91
10	48.3	1.49
15	48.52	1.94
21	49.29	3.47

通过对比不同浓度减氧空气的高压细长管驱替实验可以看出,对于沈 625 块原油在相同的实验条件下, $O_2$  浓度对驱油效率影响不大,贡献率随着  $O_2$  浓度的增大有所增大。说明实验过程中低温氧化作用对驱油效率起到了一定的贡献作用,但由于实验条件下低温氧化能力较弱,导致氧化作用造成的影响不明显。

## 3 现场应用

通过室内实验可知,沈 625 块原油在目前地层

条件下低温氧化能力较弱,应当开展减氧空气驱,首要问题是确定减氧空气的氧含量。通过调研发现,油气爆炸的理论最低临界氧含量为12%,但在实践中还需要考虑现场诸多因素对安全氧含量的影响,在综合考虑影响因素、确定安全系数后,建议油井氧含量的安全参考范围为5%~8%<sup>[16]</sup>,结合室内静态氧化实验和驱油效率实验结果,沈625区块注入介质为减氧空气( $O_2$ 含量5%),采用层内高部位注气、低部位注水、中间采油,既能起到气驱作用降低含水,又能有效补充地层能量。截至目前,现场累积实施注气井组12个,累注气 $8\,467\times 10^4\text{ m}^3$ 。22口油井不同程度受效,最高日增油75 t,含水下降6.9%,阶段累增油 $10.7\times 10^4\text{ t}$ 。分析沈625区块年产量和含水上升率变化特征(见图2)可知,减氧空气驱开发,有效提高了区块产量,控制了综合含水。分析认为,主要原因是由于受重力分异作用,使注入气向上移动形成气顶,进而向下驱油,扩大了气体波及范围;其次,气体可以进入细微裂缝,驱扫能力比水驱更强;在油藏压力下,气体融于原油导致原油体积膨胀,也有利于提高驱油效率。对于减氧空气驱而言,低温氧化生热产生烟道气驱的效果较弱。

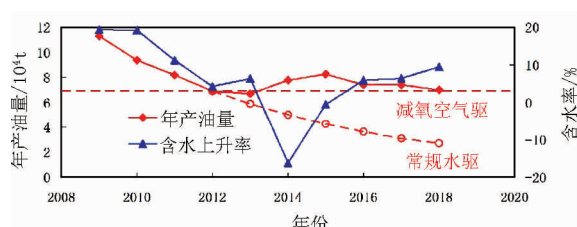


图2 沈625区块潜山年产量和含水上升率曲线

## 4 结论

(1)在2 MPa不同 $O_2$ 浓度ARC实验中,各浓度减氧空气与原油氧化反应的初始放热温度均为165℃,在195℃时表现出反应加剧,说明沈625块油藏温度低于165℃时放热量很少,不能产生有效热效应,适合采用减氧空气驱。 $O_2$ 浓度主要影响氧化反应进程的长短,随 $O_2$ 浓度降低,原油累积热量时间变长且氧化反应剧烈程度有所下降。

(2)在静态氧化实验中,随 $O_2$ 浓度增加,原油的氧化程度有所增加,但尾气中仍含有较多的 $O_2$ ,在注气安全上存在隐患,应采取减氧空气驱。在驱

替实验中,随 $O_2$ 浓度增加,驱油效率贡献率略有增大,驱油效率的变化很小。说明沈625块原油低温氧化能力较弱, $O_2$ 浓度变化对氧化反应影响较小。

(3)结合室内试验结果及氧含量安全标准,确定注入介质为氧含量5%的减氧空气。从现场实施效果来看,减氧空气驱开发能够有效提高区块产量,控制综合含水,既能保证安全生产,又可以达到提高采收率的目的。

## 参考文献:

- [1] 李士伦,张正卿,冉新权,等. 注气提高石油采收率技术[M]. 成都:四川科学技术出版社,2001:45-48.
- [2] 曹学良,郭平,杨学峰,等. 低渗透油藏注气提高采收率前景分析[J]. 天然气工业,2006,26(3):100-102.
- [3] 曹维政,罗琳,张丽平,等. 特低渗透油藏注空气、 $N_2$ 室内实验研究[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(2):113-117.
- [4] 蒋有伟,张义堂,刘尚奇,等. 低渗透油藏注空气开发驱油机理[J]. 石油勘探与开发,2010,37(4):471-476.
- [5] 文玉莲,杜志敏,郭肖,等. 裂缝性油藏注气提高采收率技术进展[J]. 西南石油学院学报,2005,27(6):48-52.
- [6] 李松林,王东辉,陈亚军. 利用高压注气技术开发低渗透轻质油藏[J]. 特种油气藏,2003,10(5):35-38.
- [7] 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.
- [8] MURUGAN P, MANI T, MAHINPEY N, et al. The low temperature oxidation of Fosterton asphaltene and its combustion kinetics [J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92(1):1056-1061.
- [9] 秦佳,周亚玲,王清华,等. 注空气轻质原油低温氧化油气组分变化研究[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(5):111-113.
- [10] 张吉昌,李贻勇,关亮,等. 裂缝性潜山油藏空气驱见效特征分析[J]. 特种油气藏,2017,24(6):90-94.
- [11] 许宁,郭秀文,葛艳阳,等. 减氧空气驱研究、应用及发展[J]. 中外能源,2017,22(12):24-28.
- [12] 者莉,王春刚,者小辉,等. 油田注减氧空气驱油工程氧含量的确定[J]. 云南化工,2018,45(6):129-130.
- [13] 王昊,米华存,周星邑. 白垩系油藏减氧空气驱技术应用[J]. 工艺技术,2018,13:176-177.
- [14] 廖广志,杨怀军,蒋有伟,等. 减氧空气驱适用范围及氧含量界限[J]. 石油勘探与开发,2018,45(1):105-110.
- [15] 杜建芬,郭平,王仲林,等. 轻质油藏高压注空气加速量热分析实验研究[J]. 西南石油大学学报,2007,29(2):17-21.
- [16] 吉亚娟. 注气采油井下石油气燃爆特性的研究[D]. 东营:中国石油大学,2008.

(编辑 韩枫)