

文章编号:1009-9603(2019)04-0093-06

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.04.014

## 烟道气稳定重力驱油藏筛选评价方法及应用

施小荣<sup>1</sup>,蒋雪峰<sup>1</sup>,陈凤<sup>1</sup>,吕世瑶<sup>1</sup>,何乃祥<sup>2</sup>,刘灵灵<sup>3</sup>

(1. 中国石油新疆油田分公司 勘探开发研究院,新疆 克拉玛依 834000; 2. 克拉玛依职业技术学院,新疆 克拉玛依 834000; 3. 中国石化胜利油田分公司 技术检测中心,山东 东营 257000)

**摘要:**利用烟道气进行稳定重力驱在国外油田开发试验中取得较好的应用效果。新疆油田在稠油热采过程中产生了大量烟道气,在气源附近存在大量高倾角、厚层块状油藏,如果这些油藏可以进行烟道气稳定重力驱,不但可以大幅度提高原油采收率,还将减少温室气体排放,保护生态环境。为此,通过详细分析国外气体辅助稳定重力驱现场实例,总结了气体辅助稳定重力驱技术的应用条件,在此基础上,结合新疆油田的资源现状,以具有可操作性为原则,按必要性和重要性分级确定烟道气稳定重力驱油藏筛选评价指标及标准,建立油藏筛选评价方法,并通过11个油藏实例验证该方法的可靠性。利用所建方法,对照油藏筛选标准,从气源和井况条件及地质条件方面论证新疆油田红153油藏开展烟道气稳定重力驱的可行性,最终计算烟道气稳定重力驱油藏筛选指数为9.39,说明该区块实施烟道气稳定重力驱在技术上是可行的。新疆油田分公司于2017年12月在红153油藏顶部开展了注气试验,注气井临井产油量由9.5 t/d提高至20.3 t/d,效果明显,证实了油藏筛选方法的准确性。

**关键词:**烟道气;稳定重力驱;油藏筛选评价方法;新疆油田;红153油藏

中图分类号:TE357.4

文献标识码:A

## Reservoir selection evaluation and application of flue gas-assisted gravity drainage technique

SHI Xiaorong<sup>1</sup>,JIANG Xuefeng<sup>1</sup>,CHEN Feng<sup>1</sup>,LÜ Shiyao<sup>1</sup>,HE Naixiang<sup>2</sup>,LIU Lingling<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 2. Karamay Vocational & Technical College, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 3. Technology Inspection Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstracts:** The use of flue gas-assisted gravity drainage technique (FGAGD) has achieved good application results in the foreign oilfields. A large amount of flue gas were produced in the process of heavy oil thermal recovery in Xinjiang Oilfield, and a large number of high-inclined and thick-layered oil reservoirs were distributed near the flue gas source. If these reservoirs can be developed with FGAGD, oil recovery will be enhanced obviously, and greenhouse gas emissions will be reduced to protect the ecological environment. To this end, through a detailed analysis of the successful production cases with GAGD in foreign countries, the application conditions of GAGD technique were summarized. On this basis, comprehensively considering the current resources situation in Xinjiang Oilfield and the availability of the evaluation method, the evaluation indexes and standard of reservoir selection for FGAGD were put forward and classified by the necessity and significance. The method of reservoir selection and evaluation for FGAGD was proposed. The reliability of the technique was then verified by applications to eleven oilfields. The method was applied to discuss the feasibility of FGAGD in the area around Hong153 in Xinjiang Oilfield from several aspects including the flue gas resource, well conditions, geological conditions according to the reservoir screening criteria. The final reservoir selection index with FGAGD was 9.39, which showed the feasibility of FGAGD in the area around well Hong153. The flue gas injection test was carried out at the top of the reservoir Hong153 in December 2017. A remarkable oil increase was observed in the surrounding well from 9.5 t/d to 20.3 t/d, which

收稿日期:2019-03-05。

作者简介:施小荣(1980—),男,江苏常州人,工程师,硕士,从事油气田开发研究。联系电话:13689979017, E-mail: shixiaor@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“浅层稠油火驱工业化有效开发示范”(2016ZX05055-002-002)和“稠油火驱提高采收率技术研究与应用”(2016ZX05012-003),中国石油科技重大专项“新疆油田浅层稠油稳产提效技术研究与应用”(2017E-0408)。

verified the correctness of the method.

**Key words:** flue gas; assisted gravity drainage; reservoir selection evaluation method; Xinjiang Oilfield; Hong153 reservoir

新疆油田稠油资源丰富,但稠油油藏在热采过程中产生了大量的烟道气,如果不处理产生的烟道气,将严重影响当地的生态环境。根据新疆油田的资源现状,在这些烟道气源附近,存在大量的高倾角、厚层块状油藏,这类油藏采用常规水驱开发方式,面临低产、低效、难动用等困境,迫切需要找到大幅度提高油田采收率的新途径,实现开发方式的更新换代。如果稠油热采产生的烟道气可以用于附近的低渗透油藏开发,不但可以大幅度提高原油采收率,还可以降低温室气体排放,保护生态环境。因此,研究新疆油田烟道气驱油的可行性具有重要的经济意义和社会意义。

由于烟道气的成分以氮气为主,含有部分二氧化碳和其他气体,其驱油机理主要与氮气的驱油机理相似,同时也兼有二氧化碳驱油的部分机理,包括增溶作用、降黏作用、重力分异作用、混相抽提效应、增强岩石渗透作用以及强化蒸馏作用等<sup>[1-3]</sup>。美国从20世纪60年代开始到90年代初的近30 a内,陆续在10余个油藏中开展了烟道气驱的矿场试验<sup>[4-6]</sup>,这些油藏涵盖高倾角油藏、“阁楼”油藏、稠油-超稠油油藏、低渗透油藏、轻质高含水油藏和水敏性油藏等类型,主要采用的注入方式包括稳定重力驱、烟道气推动易混相气体(烃气、二氧化碳等)段塞驱、水+烟道气交替注入、蒸汽转连续(或段塞)烟道气驱、注水转烟道气吞吐等,直接连续注烟道气的方式很少采用。从实施效果来看,高倾角油藏或者“阁楼”油藏进行稳定重力驱是烟道气驱应用最多且最易成功的驱油方式,如伊莱茵油田、伊比利亚油田、东哈克伯里油田、西哈克伯里油田、豪金斯油田和ELK油田等都取得了较好的烟道气稳定重力驱油效果。浅层油藏进行烟道气驱(吞吐)也具有明显优势。另外,稠油油藏实施烟道气辅助蒸汽驱技术、烟道气-蒸汽混注吞吐技术等也取得了较好的现场效果,中国辽河油田锦州采油厂在欢17区块、锦45断块和锦7断块等均取得不同程度的应用效果。但对于其他类型油藏,现场应用效果不佳。

根据中外烟道气驱现场试验的经验和教训,将烟道气稳定重力驱(FGAGD)作为主要的开发方式进行目标油藏筛选。首先,基于国外气体辅助稳定重力驱(GAGD)油藏实例分析,确定油藏筛选评价指标,并建立油藏筛选评价方法,通过已实施的现场实例验证所建方法的可靠性;然后,利用提出的

评价指标和方法,对新疆油田红153井区油藏烟道气稳定重力驱的可行性进行论证,评价结果表明该区块具备技术实施潜力。新疆油田分公司于2017年12月在该区块开展了烟道气稳定重力驱矿场试验,取得了较好的应用效果。

## 1 油藏筛选评价方法

### 1.1 国外气体辅助稳定重力驱现场实施经验

气体辅助稳定重力驱技术主要是利用油气重力分异性质,在油藏顶部注气,形成人工气顶,向下驱替原油流入生产井(图1)。GAGD技术相比传统高角度重力驱,优点在于顶部垂直井稳定注气,底部水平井稳定采油。

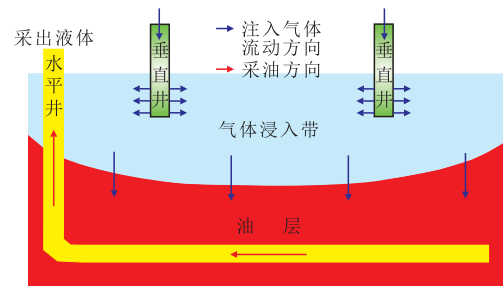


图1 GAGD概念模型(据RAO等<sup>[7]</sup>修改)

Fig.1 Schematic of GAGD(revised according to RAO et al<sup>[7]</sup>)

美国开展了大量的GAGD现场试验,所注入气体介质包括空气、氮气、烃类气体和二氧化碳气等,这些应用实例的参数如表1所示<sup>[8]</sup>。表1中的矿场实例应用效果表明,GAGD技术的应用效果优于现场常用的气驱开采技术,如连续注气(CGI)技术、水气交替驱(WAG)技术及二者混合驱技术,并且GAGD技术所需驱替气量最小,驱替体积几乎为100%,矿场采收率可达到64.1%~95.5%。

从这些实例可以总结出GAGD技术的5个重要应用条件包括:①实例中包含碎屑岩油藏和碳酸盐岩油藏,说明碎屑岩油藏和碳酸盐岩油藏均适合,且构造起伏越大,应用效果越好。②实例油藏地层原油黏度为0.43~370 mPa·s,说明适合凝析、轻质、中质甚至部分重质油藏<sup>[9]</sup>,但要求地层原油黏度小于370 mPa·s。③采油方式上,实例证明二次采油和三次采油均可,但前者应用效果更明显,提高采收率幅度更大。④如果采油速度控制适当,对油藏非均质性(甚至油藏内部存在高角度裂缝)不敏感,甚至还会对开发效果产生积极影响<sup>[10]</sup>,这一点特别

表1 美国实施GAGD开发油藏特征参数  
Table1 A brief list of characteristic parameters of GAGD reservoirs in the United States

油藏名称	地理位置	油藏倾角(°)	孔隙度(%)	渗透率(mD)	有效厚度(m)	油藏温度(°C)	注入气体	混相状态	油藏埋深(m)	地面原油密度(g/cm <sup>3</sup> )	地层原油黏度(mPa·s)	注气开始剩余油饱和度(%)	注气结束剩余油饱和度(%)	平均单井日增油量(t/d)	最终采收率(%)	结论
West Hackberry	路易斯安那	20~35	23.9~27.6	300~1 000	9.3	90.6~96.1	空气	非混相	3 444.5	0.82	0.9	52.4	10	21.4~57.1	90	成功
Hawks Dexter	得克萨斯州	8	27	3 400	70.1	75.6	N <sub>2</sub>	非混相	2 683	0.81	3.7	38.5	17.4	142.86	82.6	成功
Weeks Island	路易斯安那	26	26	1 200	56.7	107.2	CO <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub>	非混相	3 102	0.83	0.45	32	12	22.86	88	成功
Bay t. Elaine	路易斯安那	36	32.9	1 480	10.7	73.3	CO <sub>2</sub>	非混相	2 300	0.79	0.667	20	19	1.00		失败
Weir	明戈西弗吉尼亚州	15~19	14~16	0.8	75.3	81.2	烟道气	非混相	2 831	0.87	26	35~40	4.5	0.3		失败

适合中国陆相油藏强非均质性的特点。⑤渗透率为10~6 000 mD的油藏均有成功案例。因此该技术对油藏的渗透率没有过高要求,能够适用于特低渗透油藏。

### 1.2 筛选评价指标及标准

烟道气稳定重力驱技术原理与其他气体辅助稳定重力驱原理相似,由于其烟道气的主要成分是氮气和二氧化碳,所以FGAGD的技术原理基本等同于氮气、二氧化碳或空气辅助稳定重力驱的技术原理。因此,可借鉴上述GAGD技术的应用条件,结合新疆油田的实际来确定烟道气稳定重力驱的油藏筛选评价指标。

将筛选评价指标按重要性分为必要指标和重要指标2级。必要指标是烟道气稳定重力驱油藏必须满足的条件,有一条不满足,该油藏就不具备实施FGAGD技术的条件,如断裂封闭性<sup>[11-12]</sup>和井况<sup>[13]</sup>等。重要指标主要代表烟道气稳定重力驱油藏筛选的重要条件,会较大程度地影响烟道气驱的开发效果,当然,如果某一条件不具备,但其他条件较好时,也可能取得较好的开发效果,即这些条件虽重要但可替代。必要指标包括油藏封闭性、经济可行性、井况及注采系统。具体参数为:盖层泥岩厚度大于20 m,控藏断裂封闭性较好;与气源距离小于50 km,石油地质储量规模大于1 000×10<sup>4</sup> t;井网较为完善,井况良好<sup>[6]</sup>。重要指标包括油藏埋深、含油饱和度、地面原油密度、油藏跨度与倾角及地层原油黏度。具体参数为:油层埋深大于1 372 m(Hawkins油田现场经验<sup>[8]</sup>),含油饱和度大于40%<sup>[6]</sup>,地面原油密度小于0.91 g/cm<sup>3</sup>(Hawkins油田现场经验<sup>[8]</sup>),当地层倾角大于20°,无其他要求(美国路易斯安那州West Hackberry油藏现场经验<sup>[8]</sup>),

当地层倾角小于20°,油藏跨度应大于69 m(美国得克萨斯州Hawks Dexter油藏现场经验<sup>[8]</sup>),地层原油黏度应小于370 mPa·s(Hawkins油田现场经验<sup>[8]</sup>)。

### 1.3 筛选评价方法

在评价某一特定油藏开展烟道气稳定重力驱的可行性时,若仅具备以上指标中的部分指标,其他指标不能满足要求,就难以给出最终的可行性论证结论。为解决这一困难,将待评价油藏进行客观的综合定量评价,需要将表1中的条件做量化处理。提出烟道气稳定重力驱油藏筛选指数,其计算公式为:

$$YQZS = \frac{100(H_m - 20)(Z - 1)(G - 1)[(S_o - 0.4) + (H - 1.372) + T]}{(L - 50)(\mu_o - 370)} \quad (1)$$

参数T的具体计算方法为:若地层倾角大于20°,则 $T = (\alpha - 20) / 100$ ;若地层倾角小于20°,则 $T = (H_o - 69) / 100$ 。

将待评价油藏的基础参数代入(1)式,计算YQZS值。若YQZS > 0,说明该油藏具备实施烟道气稳定重力驱的技术条件,并且YQZS值越大,烟道气稳定重力驱的开发效果越好;若YQZS ≤ 0,则说明该油藏在技术上不适合开展烟道气稳定重力驱。方法适用条件为: $H_m > 20$  m, $Z > 1$ (至少有一套完整注采系统), $G > 1 \times 10^7$  t, $L < 50$  km。

YQZS评价方法的建立采取各参数重要程度不同则权重方法不同的原则,必要参数设定边界值,不满足必要边界值时则整个YQZS评价参数分子或分母会表现为负数,在具体量化方面,盖层泥岩厚度、井网完善程度、油藏规模、油藏剩余油饱和

度、油层埋深和油藏倾角为正相关参数,气源距离和地层原油黏度为负相关参数;在方法构建上,正相关参数作为分子,负相关参数作为分母,由于各个参数数量级不同,故取值时以统一到线性的个位为原则。

#### 1.4 评价方法可靠性验证

利用表1中油藏对该方法进行评价,具体计算结果和单井日增油量数据见表2。表2中YQZS值与单井日增油量之间呈正相关关系,烟道气稳定重力气驱油藏筛选指数越大,单井日增油量越高,油藏开发效果越好;相反,稳定重力气驱油藏筛选指数越小,单井日增油量越低,油藏开发效果越差。如烟道气稳定重力驱现场试验不成功的Weir和Bay t. Elaine油藏,YQZS值小于0,为-3.43和-1.45,生产井几乎没有增产迹象。这些实例说明,采用所建烟道气重力气驱油藏筛选评价方法,能够较好地评价油藏是否具备实施烟道气稳定重力驱的可行性。

表2 烟道气稳定重力驱油藏筛选指数与开发效果对比结果

Table2 Comparison between selection index and development results of different oil reservoirs with FGAGD

油藏名称	地理位置	单井日增油量(t/d)	YQZS	结论
West Hackberry	美国路易斯安那	26	3.52	成功
Hawks Dexter	美国得克萨斯州	12.6	2.21	成功
Weeks Island	美国路易斯安那	22.9	5.06	成功
Bay t.Elaine	美国路易斯安那	1	-1.45	失败
Weir	美国明戈西弗吉尼亚州	0.3	-3.43	失败
Wizard Lake	加拿大阿尔伯达	16.8	5.42	成功
Hawkins	美国得克萨斯州东部	22	1.27	成功
Woofcampeef	美国得克萨斯州	35.3	3.04	成功
Intisar D Reef	利比亚	425	11.37	成功
Handil Main	印尼	56.1	3.34	成功
Paluxy Formation	美国得克萨斯州东部	9.7	0.23	成功

## 2 红153油藏烟道气重力驱可行性评价及效果

从2012年开始,在准噶尔盆地西北缘地区发现了大量厚层、低孔低渗透油藏,其中,红153井区二叠系夏子街组油藏(简称红153油藏)是这类油藏的典型代表。笔者以该油藏为例,分析厚层低渗透油藏是否具备烟道气稳定重力驱的可行性。

### 2.1 可行性评价

**必要指标** 新疆油田正在推广稠油油藏的火驱采油技术,预计2018年因采用火驱产生的烟道气日产量将达 $210 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。火驱过程中所产生的烟

道气主要成分为76%左右的氮气、15%左右的二氧化碳气和5%左右烃类气体。因此,气源条件充足、气体组分适宜。红153油藏地处火驱气源地东南部,直线距离仅为20 km,符合气源距离小于50 km的要求。近距离的烟道气源条件,将大大降低烟道气驱的采油成本。红153油藏于2016年投入开发,注采井网完善,井况好,耐腐蚀性强,符合烟道气驱的工程条件。

**重要指标** 红153油藏顶界构造形态为一东南倾的鼻状构造,中、东部构造平缓,西部红157井附近构造变陡,断块内部小断裂发育(图2),地层倾角为 $3^\circ \sim 7^\circ$ 。尽管地层倾角不大,但油藏纵向跨度大,平均跨度为373 m,为特低渗透巨厚块状油藏,且油藏内部发育大量裂缝,具有较好的纵向连通性,有利于实现稳定重力驱。

红153油藏为典型的“剥蚀残凹”所形成的断层-地层油藏,剖面上呈残余的、不连续的“楔型”展布(图3)。红153油藏断裂属挤压闭合断裂,封闭性好,盖层泥岩厚度为75 m,油藏原始地层压力系数超过1.2,良好的封闭条件有利于次生气顶的形成,较适合开展烟道气稳定重力驱。

红153油藏物性较差,平均孔隙度为6.1%,成像测井显示为高导缝特征,张开缝发育良好<sup>[14]</sup>。常规水驱无法实现经济有效开发,油藏平均埋深为3 000 m,剩余油饱和度为51%,平均地面原油密度为 $0.833 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,地层原油黏度为 $6.12 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。油藏的规模和基础性质均符合烟道气驱条件。采用FGAGD技术可提高这类低渗透油藏采收率。该油藏属于开发初期,探明石油地质储量为 $2 300 \times 10^4 \text{ t}$ ,截至2017年6月,累积产油量为 $27.05 \times 10^4 \text{ t}$ ,采出程度仅为1.2%,有较大开发潜力。

**油藏筛选指数** 将红153油藏实际参数代入(1)式,计算得到YQZS值为9.39,说明该油藏开展烟道气稳定重力驱在技术上是可行的。

### 2.2 现场应用效果

根据烟道气稳定重力驱油藏可行性论证结果,新疆油田分公司于2017年12月,在红153井区开展了FGAGD技术现场试验。

**现场试验方案** 优选位于油藏高部位的红153井作为注气井,红153井距油藏顶部75 m,距周围生产井的生产层段存在75~150 m的避射高度,且该井与高部位主体张裂缝发育区的连通情况较好。根据国外现场开采试验,同时考虑生产需求和油藏高吸气特性,设计试验区单井注气速度为 $0.6 \times 10^4 \sim 4.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。油藏原始地层压力为36 MPa,试验前

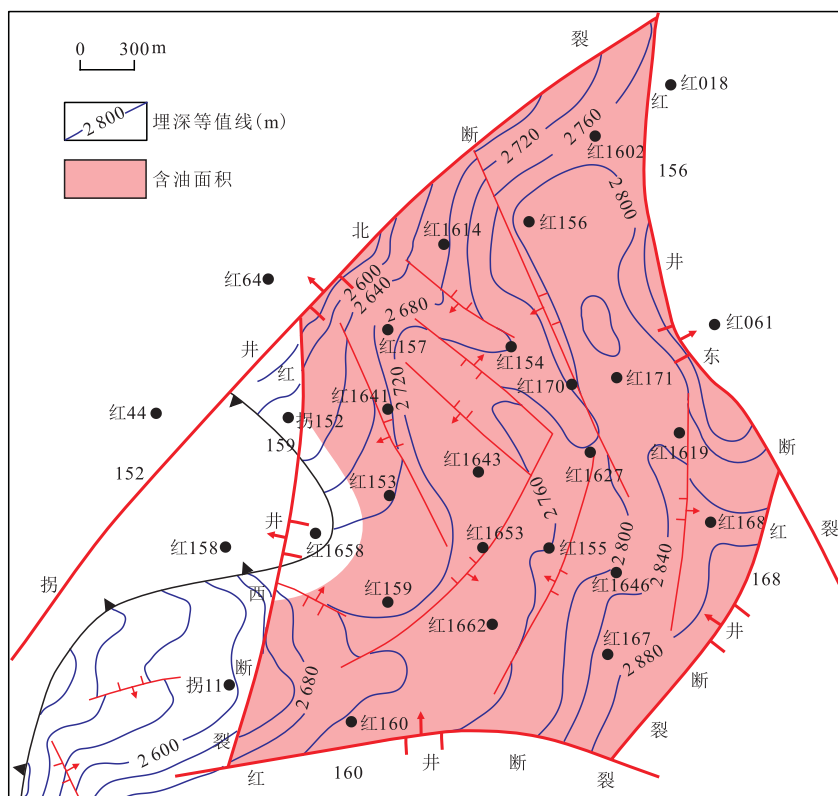


图2 红153油藏二叠系夏子街组顶部构造

Fig.2 Top structural map of P<sub>2x</sub> in Well Hong153 area

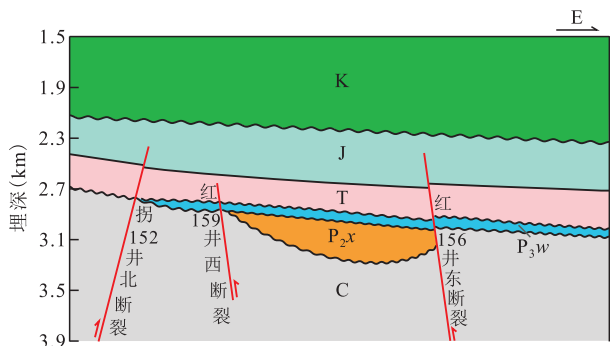


图3 红153油藏地层分布特征示意

Fig.3 Characteristic Diagram of Stratum Distribution in Hong153 Reservoir

地层压力为 27 MPa, 油层的破裂压力为 54.6 MPa。根据经验公式对井底压力进行预测, 按最大注气量为 12 000 Nm<sup>3</sup>/d 计算, 注气压力约为 24.8 MPa, 预计实际注气压力为 24.8~35 MPa, 最大注气压力为 46.1 MPa。

试验效果 采用变流量注气, 实施烟道气驱后, 平均日注气量由 6 000 m<sup>3</sup>/d 逐渐提高到 48 000 m<sup>3</sup>/d, 实验井组套压由 0.6 MPa 逐渐升高到 1.7 MPa, 油压由 0.7 MPa 逐渐升高到 0.9 MPa, 实验井组单井日产量由 9.5 t/d 提高到 20.3 t/d (图 4), 增油效果十分显著。

现场试验效果表明, 利用所建立的烟道气稳定

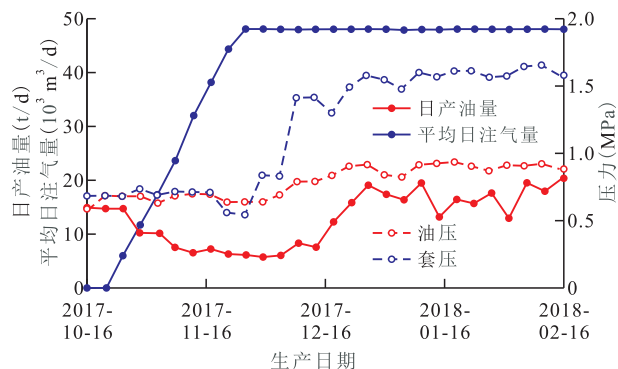


图4 红153井注气量及烟道气驱实验井组压力和产油量变化关系

Fig.4 Relationship between gas injection rate of Well Hong153 and pressure and oil production in experimental well group of flue gas drive

重力驱油藏筛选评价方法, 对红153井区二叠系夏子街组油藏开展的可行性论证结果符合客观实际, 是科学有效的。现场实验证实, 该方法在新疆油田厚层低渗透砂砾岩储层烟道气重力驱油藏筛选中具有很好的应用前景, 可以在后期烟道气驱油藏筛选和评价过程中广泛应用。

### 3 结论

利用烟道气进行稳定重力驱是较为成功的一

种油田开发方式。新疆油田在稠油热采过程中产生了大量烟道气,气源附近存在大量高倾角、厚层块状油藏,这类油藏实施烟道气稳定重力驱对大幅度提高原油采收率和温室气体减排均具有重要意义。

基于国外稳定重力驱的现场试验经验,结合新疆油田的资源现状,按重要性分级提出烟道气稳定重力驱油藏筛选评价指标及标准,建立油藏筛选评价方法,并通过现场实例验证了方法的可靠性。

利用所建方法,对新疆油田红153油藏开展烟道气稳定重力驱进行了可行性论证,结果表明该区块实施烟道气稳定重力驱在技术上是可行的。目前现场已开展顶部注气实验,实验井组见到了显著的增油效果,证实所论证结果是正确的。

### 符号解释

YQZS——烟道气稳定重力驱油藏筛选指数; $H_m$ ——盖层泥岩厚度,m; $Z$ ——完善注采井网单元因子; $f$ ; $G$ ——油藏规模(地质储量), $10^7$  t; $S_o$ ——油藏剩余油饱和度; $f$ ; $H$ ——油层埋深,km; $T$ ——地层倾角可行性参数; $f$ ; $L$ ——气源距离,km; $\mu_o$ ——地层原油黏度,mPa·s; $\alpha$ ——地层倾角,(°); $H_o$ ——油层厚度,m。

### 参考文献

- [1] 邓瑞健,吴应川,陈德斌,等.低渗透油藏注气采油技术[M].北京:石油工业出版社,2003.  
DENG Ruijian, WU Yingchuan, CHEN Debin, et al. Oil Production technology of hydrocarbon gas drive in low-permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [2] 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.  
LI Shilun, ZHANG Zhengqin, RAN Xinquan, et al. Enhancing oil recovery by gas injection [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2001.
- [3] 陈涛平,赵斌,贺如.特低渗透油层CO<sub>2</sub>与N<sub>2</sub>驱替方式[J].大庆石油地质与开发,2018,37(4):127-132.  
CHEN Taoping, ZHAO Bin, HE Ru. CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> flooding methods in ultra-low permeability oil reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(4): 127-132.
- [4] 李振泉.气驱提高采收率技术与矿场试验[M].北京:石油工业出版社,2014.  
LI Zhenquan. Research and field test of enhancing oil recovery by gas drive [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.
- [5] 郭万奎,廖广志,邵振波,等.注气提高采收率技术[M].北京:石油工业出版社,2003.  
GUO Wankui, LIAO Guangzhi, SHAO Zhenbo, et al. Enhancing oil recovery by gas injection [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [6] 沈平平,廖新维.二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术

[M].北京:石油工业出版社,2009.

SHEN Pingping, LIAO Xinwei. CO<sub>2</sub> geological storage and improving oil recovery [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.

- [7] RAO D N, AYIRALA S C, KULKARNI M M, et al. Gas-assisted gravity drainage (GAGD) process for improved oil recovery [P]. United States: US 20060289157A1, 2006-12-28.
- [8] 李金权.烟道气回注油藏可行性研究[D].大庆:东北石油大学,2012.  
LI Jinquan. Study on feasibility of flue gas re-injection in oil reservoir [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.
- [9] 王福顺,牟珍宝,刘鹏程,等.超稠油油藏CO<sub>2</sub>辅助开作用机理实验与数值模拟研究[J].油气地质与采收率,2017,24(6):86-91.  
WANG Fushun, MOU Zhenbao, LIU Pengcheng, et al. Experiment and numerical simulation on mechanism of CO<sub>2</sub> assisted mining in super heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(6): 86-91.
- [10] 马铨峥,杨胜来,韩伟,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层氮气吞吐物理模拟实验研究[J].油气地质与采收率,2018,25(1):112-116.  
MA Quanzheng, YANG Shenglai, HAN Wei, et al. Experimental study on the physical simulation of N<sub>2</sub> huff and puff of the tight oil reservoir in the Lucaogou Formation of Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1): 112-116.
- [11] 赵乐强,贾凡建,曹剑,等.准噶尔盆地西北地区断层内流体活动过程及对断层启闭性的影响[J].石油实验地质,2017,39(4):461-466.  
ZHAO Leqiang, JIA Fanjian, CAO Jian, et al. Fluid activity in faults in the northwestern Junggar Basin and its influence on fault opening and sealing [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 461-466.
- [12] 李志鹏,卜丽侠.二氧化碳驱油及封存过程中的地质安全界限体系[J].特种油气藏,2017,24(2):141-144.  
LI Zhipeng, BU Lixia. Geological safety margins during CO<sub>2</sub> flooding and sealing [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(2): 141-144.
- [13] 周迎梅.烟道气驱油过程中N80钢的腐蚀规律实验研究[J].油气地质与采收率,2018,25(5):122-126.  
ZHOU Yingmei. Experimental study on the corrosion law of N80 steel during the process of flue gas flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(5): 122-126.
- [14] 周阳,秦军,华美瑞,等.特低渗透砂质砾岩储层裂缝识别及预测研究——以准噶尔盆地西北缘红153井区为例[J].中国石油勘探,2018,23(4):114-122.  
ZHOU Yang, QIN Jun, HUA Meirui, et al. Fracture identification and prediction of sandy conglomerate reservoirs with ultra-low permeability: a case study of Well Hong153 on the northwest margin of Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(4): 114-122.

编辑 常迎梅