

文章编号: 1000-0747(2020)02-0334-07 DOI: 10.11698/PED.2020.02.11

注空气全温度域原油氧化反应特征及开发方式

廖广志¹, 王红庄², 王正茂¹, 唐君实², 王伯军², 潘竞军³,
杨怀军⁴, 刘卫东², 宋蔷⁵, 蒲万芬⁶

(1. 中国石油勘探与生产分公司, 北京 100120; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石油新疆油田公司, 新疆克拉玛依 834005; 4. 中国石油大港油田公司, 天津 300280; 5. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084; 6. 西南石油大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

摘要: 通过模拟实验揭示了从 30 ℃ 到 600 ℃ 的注空气全温度域原油氧化反应特征, 将原油注空气氧化反应划分为溶解膨胀、低温氧化、中温氧化和高温氧化 4 个温度区间, 总结了不同温度区间的氧化反应机理。根据原油氧化特征结合矿场试验成果, 提出稀油油藏注空气开发技术划分为减氧空气驱和空气驱, 稠油油藏注空气火驱技术划分为中温火驱和高温火驱。稀油油藏温度低于 120 ℃, 应选择减氧空气驱, 高于 120 ℃, 可直接采用空气驱开发; 普通稠油油藏燃烧前缘温度低于 400 ℃ 可选择注空气中温火驱开发, 普通稠油油藏和胶质、沥青质含量较高的特/超稠油油藏, 燃烧前缘温度高于 450 ℃ 可选择注空气高温火驱开发。中国石油天然气股份有限公司近 10 年的攻关和开发试验证实, 空气与其他气体驱油介质相比在技术、经济和气源等方面具有明显优势, 不仅适用于低/特低渗透稀油油藏、中高渗透稀油油藏, 也适用于稠油油藏, 是一种很有潜力的新型驱油介质。图 6 表 1 参 31

关键词: 注空气; 全温度域; 原油氧化; 反应特征; 焦炭沉积; 油藏类型; 开发方式

中图分类号: TE357 文献标识码: A

Oil oxidation in the whole temperature regions during oil reservoir air injection and development methods

LIAO Guangzhi¹, WANG Hongzhuang², WANG Zhengmao¹, TANG Junshi², WANG Bojun²,
PAN Jingjun³, YANG Huaijun⁴, LIU Weidong², SONG Qiang⁵, PU Wanfen⁶

(1. PetroChina Exploration & Production Company, Beijing 100120, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 3. PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834005, China; 4. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China; 5. Ministry of Education Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 6. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The oil oxidation characteristics of the whole temperature regions from 30 ℃ to 600 ℃ during oil reservoir air injection were revealed by experiments. The whole oil oxidation temperature regions were divided into four different parts: dissolving and inflation region, low temperature oxidation region, medium temperature oxidation region and high temperature oxidation region. The reaction mechanisms of different regions were explained. Based on the oil oxidation characteristics and filed tests results, light oil reservoirs air injection development methods were divided into two types: oxygen-reducing air flooding and air flooding; heavy oil reservoirs air injection in-situ combustion development methods were divided into two types: medium temperature in-situ combustion and high temperature in-situ combustion. When the reservoir temperature is lower than 120 ℃, oxygen-reducing air flooding should be used for light oil reservoir development. When the reservoir temperature is higher than 120 ℃, air flooding method should be used for light oil reservoir development. For a normal heavy oil reservoir, when the combustion front temperature is lower than 400 ℃, the development method is medium temperature in-situ combustion. For a heavy oil reservoir with high oil resin and asphaltene contents, when the combustion front temperature is higher than 450 ℃, the development method at this condition is high temperature in-situ combustion. Ten years field tests of air injection carried out by PetroChina proved that air has advantages in technical, economical and gas source aspects compared with other gas agents for oilfield gas injection development. Air injection development can be used in low/super-low permeability light oil reservoirs, medium and high permeability light oil reservoirs and heavy oil reservoirs. Air is a very promising gas flooding agent.

Key words: air injection; full temperature regions; oil oxidation; reaction characteristics; coke formation; reservoir types; development methods

引用: 廖广志, 王红庄, 王正茂, 等. 注空气全温度域原油氧化反应特征及开发方式[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 334-340.

LIAO Guangzhi, WANG Hongzhuang, WANG Zhengmao, et al. Oil oxidation in the whole temperature regions during oil reservoir air injection and development methods[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 334-340.

0 引言

2016 年全球利用提高采收率技术 (EOR) 产油 1.17×10^8 t, 其中稠油热采 $6\,583 \times 10^4$ t, 占 56.2%; 气驱 $3\,671 \times 10^4$ t, 占 31.4%; 化学驱 $1\,453 \times 10^4$ t, 占 12.4%。美国 EOR 产油量以稠油热采和气驱为主, 占 98.7%。美国气驱产油量 2006 年超过热采并逐年增加, 2016 年达到 $2\,346 \times 10^4$ t, 占全球气驱产油量的 64.0%。国外 90.0% 以上气驱产油量主要依靠二氧化碳驱, 其他气体驱油介质 (如氮气、天然气、烟道气、空气等) 矿场应用较少。

目前, 国内新增探明储量主要来自低渗透、特低渗透和致密油储集层, 注水开发存在“注不进、采不出”等突出问题。这类储量将是今后相当一个时期内增储上产的主要资源。纳米尺度的气体分子更容易注入储集层补充能量完成驱油过程, 同时与水相比, 气体具有更大的可压缩性, 降压膨胀可获得更大的弹性能量。国内能够用于提高采收率的天然气、二氧化碳地下资源有限, 且受气藏和油藏相对位置的影响, 难以远距离大规模工业化推广, 工业回收二氧化碳存在一些技术与经济问题; 氮气成本较高。而空气可就地取材, 不受地域、空间和气候限制, 组分稳定, 气源丰富。对沙漠、戈壁等水资源极度匮乏地区的油藏与水敏性较强的储集层, 空气是最受关注的气体驱油介质。据统计, 吨油所需购置成本空气为零, 减氧空气为 400~600 元, 二氧化碳、天然气、氮气吨油购置成本分别大于 1 200, 4 000, 2 000 元, 可见相对于其他气体驱油介质, 空气具有明显的经济优势。

在稀油油藏注空气技术方面, 国外自 20 世纪 60 年代以来进行了大量的机理研究^[1-4], 现场试验也取得了较好的效果, 形成了较为完善的配套技术。20 世纪 70 年代, 国内先后在胜利、大庆、百色等油田开展了注空气提高采收率技术与试验, 限于注空气开发研究的基础薄弱, 手段单一, 主要以研究耗氧速率为重点。现场试验虽取得了一定的效果, 但规模小, 且对注空气驱油机理认识不清, 安全风险大, 大多数试验以空气泡沫调剖调驱为主, 可以说不是真正意义上的注空气开发试验。

近年来, 中国石油天然气股份有限公司 (以下简称中国石油) 在大庆、长庆、大港等油田开展注空气室内机理研究及现场实践, 结合具体油藏条件, 形成

了注空气 (包括减氧空气) 提高采收率特色技术。矿场试验结果表明, 只要把氧气含量控制在一定范围, 爆炸隐患就可得到有效控制; 通过优化注采工艺、使用防腐材料和添加缓蚀剂等措施, 采油管柱腐蚀也可以得到有效防范。

在稠油油藏注空气火驱技术方面, 国内先后在玉门石油沟 (1958 年)、新疆黑油山 (1958 年)、辽河科尔沁 (1996 年)、胜利郑王庄 (2003 年) 等油田开展了室内研究和矿场试验^[5-8]。2005 年中国石油在辽河油田杜 66 区块开展火驱先导试验, 2018 年 105 个井组的火驱年产量达到 24×10^4 t。2009 年中国石油新疆油田红浅 1 区高温火驱先导试验实现了高温点火, 该油藏前期经历了蒸汽吞吐和蒸汽驱, 阶段采出程度 29.0%, 在火驱前处于废弃状态。试验的主要目的是探索稠油油藏注蒸汽开发后期的接替开发方式, 截至 2018 年底火驱阶段采出程度 34.6%。试验的成功证实了注空气高温火驱技术可以成为稠油老区油藏注蒸汽后的战略接替技术^[9]。

在火驱基础研究方面, 近年来主要集中在高温火驱的储集层区带特征、原油高温氧化动力学、焦炭沉积过程和氧化特性、高温火驱井网模式研究等方面^[10-19], 而不同油藏注空气开发方式与原油不同温度区间氧化特性之间的关系缺少系统研究。

本文采用注空气开发矿场试验区块的稀油、稠油样品, 开展热重-差示扫描量热联合实验, 分析从 30 ℃ 到 600 ℃ 的全温度域原油氧化反应特征并揭示反应机理。在此基础上结合矿场试验结果划分原油氧化温度区间, 提出不同油藏条件下的注空气开发方式。

1 注空气全温度域原油氧化反应特征

空气注入油藏后会与原油发生复杂的氧化放热反应, 其反应机理和热效应随着温度发生变化。在油藏注空气开发过程中, 不同的开发方式对应着不同的反应温度范围, 开发机理受该温度区间内的原油氧化机理控制。为了阐述不同温度区间空气与原油的反应机理和其对油藏开发方式的影响, 选择注空气开发试验典型区块的稀油、稠油样品进行原油氧化热分析实验。

1.1 原油氧化实验

本文采用 Mettler Toledo 公司生产的 TGA/DSC 1 同步热分析仪研究不同黏度原油高温氧化过程, 可以同时测量原油样品的转化速率 (微商热重法, DTG)

和单位质量原油样品的放热速率(差示扫描量热法, DSC)。实验过程中保护气为氮气, 注入流量 79 mL/min; 反应气为氧气, 注入流量 21 mL/min。两种气体在反应室内混合均匀后横掠过坩埚表面, 经过扩散作用到达物料层, 物料表面的氧浓度为 21%, 反应压力为常压。

选取大庆油田海塔盆地稀油和辽河高升油田稠油样品制备模拟油砂。两种原油 50 °C 脱气条件下黏度分别为 23 mPa·s 和 1 878 mPa·s。按照行业标准(SY/T 6316—1997 稠油油藏流体物性分析方法: 原油黏度测定)^[20]规定的处理步骤对样品进行脱水、除杂。处理后的脱水油样含水率小于 0.5%。试样为 45 mg SiO₂ 颗粒与 5 mg 纯油的均匀混合物。设定升温范围为 30~600 °C, 升温速率 10 °C/min, 测量油砂样品质量变化与放热情况。

1.2 实验结果分析

根据测量结果绘制原油样品的转化速率曲线(DTG 曲线)与单位质量原油样品的放热速率曲线(DSC 曲线)。根据曲线变化规律, 注空气开发全温度域原油氧化反应可划分为溶解膨胀、低温氧化、中温氧化和高温氧化 4 个区间, 各区具有不同的原油氧化反应特征(见图 1)。

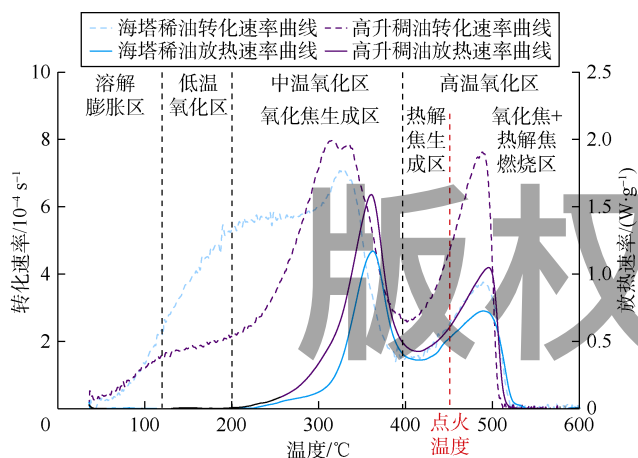


图 1 空气原油氧化反应全温度域分区示意图

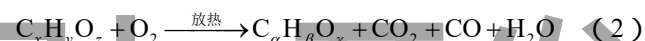
1.2.1 溶解膨胀区

该区温度上限约为 120 °C^[13]。在该温度区间, 空气注入油藏后主要以溶解膨胀物理作用为主。DSC 曲线无法观察到原油样品反应的放热速率, 说明该区原油与氧气反应不明显。DTG 曲线显示在该区原油样品存在较低转化速率, 转化速率的微小变化主要由轻烃挥发导致。

1.2.2 低温氧化区

该区温度下限约为 120 °C, 上限约为 200 °C。该

区原油氧化热效应较弱, 在 DSC 曲线上没有观察到明显的放热。DTG 曲线显示原油样品的转化速率仍由轻烃组分挥发导致。该区主要为原油低温氧化反应, 虽然采用 DSC 曲线无法观察到低温氧化的放热速率, 但是在绝热反应条件下, 反应热的积聚效应仍可以使油藏温度升高^[21], 其主要原因是加氧反应生成的醇、醛、酮、酸等含氧化合物进一步发生氧化反应生成过氧化物, 过氧化物发生脱羧反应产生 CO₂ 和 CO, 并释放一定量的热^[1]。该区反应方程式可以简化表示为:



1.2.3 中温氧化区

该区温度下限约为 200 °C, 上限约为 400 °C。该区原油与氧气发生中温氧化反应, DTG 曲线和 DSC 曲线变化表明, 原油样品的转化速率和单位质量原油样品的放热速率都有明显变化, 在该区原油与氧气反应生成轻烃、CO₂、CO 和 H₂O 等, 同时释放大量的热。中温氧化反应为缩聚反应和断键反应, 除生成轻质油、CO₂、CO 和 H₂O 外, 还生成一定量的固体焦炭(含氧条件下生成的焦炭称为氧化焦)。因地层原油(反应燃料)的质量远大于高温氧化反应生成焦炭的质量, 故中温氧化反应释放出的热量也比较大, 能够在地层内形成不同于高温火驱的热前缘。

在中温氧化阶段, 稠油分子进一步发生氧化, 生成含氧官能团并释放热量^[22]。经氧化后稠油分子中的一部分裂解生成低碳数小分子化合物, 最后转化为轻质油^[23]; 另一部分通过含氧官能团之间的交联、聚合作用, 生成更大分子, 最终转化为氧化焦^[24], 反应过程同时生成碳氧化物和水。综合上述研究, 其反应过程如图 2 所示。

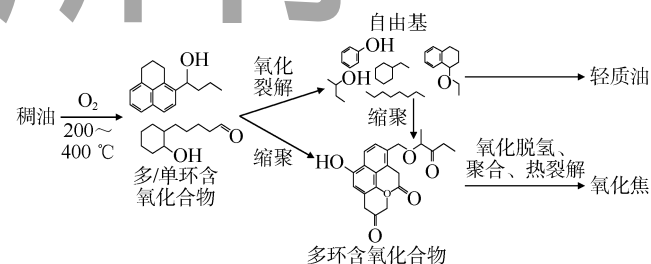


图 2 氧化焦生成途径示意图

1.2.4 高温氧化区

该区温度下限为 400 °C, 高于该温度, DTG 曲线和 DSC 曲线出现第 2 个转化速率高峰和单位质量原油样品放热速率高峰, 对应的反应为固体焦炭的氧化反应。反应温度高于 400 °C 后, 原油发生热裂解反应生

成热解焦和轻烃。热解焦主要来源于相对分子质量大、黏度高、芳环结构复杂的胶质、沥青质组分^[25-26]，其生成过程不需要氧气作用。温度高于 400 ℃后，直链烷基及碳氢键容易受热断键，生成小分子物质，转变为裂解油与裂解气^[27]。裂解生成的自由基处于不稳定状态，容易与稳定性强的多环芳烃结合，转变为芳环数量更多的大分子多环芳烃，再经过脱氢、重整等过程最终转化成热解焦^[28]（见图 3）。

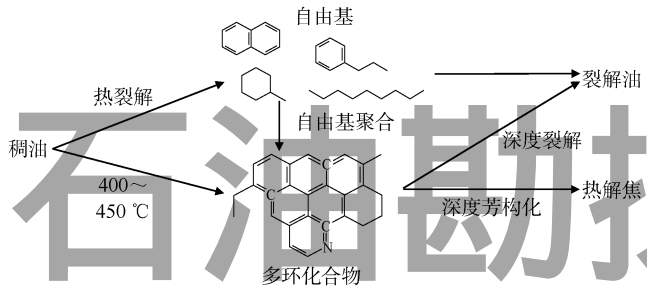
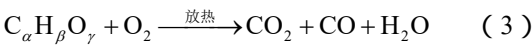


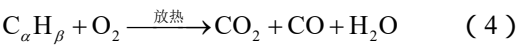
图 3 热解焦生成途径示意图

中温氧化生成的氧化焦、高温氧化生成的热解焦与 O₂ 发生高温氧化反应生成 CO₂、CO、H₂O 并释放大量的热（氧化焦进一步氧化释放热量记为 Q₁，热解焦进一步氧化释放热量记为 Q₂），反应方程式可以表示如下。

氧化焦氧化反应：



热解焦氧化反应：



高温氧化的总放热量 Q_{HT} 可以表示为：

$$Q_{HT} = RQ_1 + (1 - R)Q_2 \quad (5)$$

（5）式中 R 为参与高温氧化反应焦炭中氧化焦所占的质量分数：

$$R = \frac{m_{\text{coke1}}}{m_{\text{coke1}} + m_{\text{coke2}}} \times 100\% \quad (6)$$

高温火驱开发过程中，地层中同时存在氧化焦和热解焦，刘冬等^[29]的研究表明，热解焦中含氢量较高，其氧化活性好于氧化焦，单位质量发热量也高于氧化焦。

2 注空气开发方式

空气是一种来源广、成本低、驱油效率高的新型驱油介质，适用于低/特低渗透油藏、中高渗透油藏和潜山稀油油藏。注空气开发技术具有采收率高、成本低、节能、节水、绿色等特点，具有广阔的应用前景，在低品位油、致密油的有效动用方面也具有独特优势，将成为未来最具发展潜力的战略性开发技术。

在不同的温度区间，空气与原油具有不同的氧化

反应特征。油藏温度（稀油油藏注空气驱油）和燃烧前缘温度（稠油油藏注空气火驱）不同，空气与原油之间的主要作用机理不同，注空气开发的方式也不同。经过多年持续攻关，目前已形成了稀油减氧空气驱、稀油空气驱、稠油注空气中温火驱和稠油注空气高温火驱 4 种注空气主体开发方式和技术。

按照油藏温度的差异，稀油油藏注空气开发形成了减氧空气驱和空气驱 2 种主体技术：①当油藏温度低于 120 ℃时，空气与原油之间的加氧反应放热量极小，在油藏条件下反应放热难以积聚，氧气在地层条件下无法充分消耗，如果生产井氧含量大于 10%，将存在爆炸的风险，该类油藏的主要操作策略是降低注入空气的氧浓度至 10%以下，采用减氧空气驱技术^[13]；②当油藏温度高于 120 ℃时，低温氧化逐渐成为主要反应类型，氧气在油藏内充分消耗，反应放热可以有效积聚，能够提高油藏温度、降低原油黏度、增加原油流动性，当稀油油藏处于该温度区间时，可以采用空气驱技术实现安全开发。由于储集层矿物催化作用、油品氧化特性、油藏压力、注采井距和裂缝等条件不同，在油藏温度为 120 ℃左右时，要根据具体情况进行分析，确定采用减氧空气驱或是空气驱进行开发。

稠油油藏采用不同的点火方法可形成不同温度的燃烧前缘，当前缘温度低于 400 ℃时，主要发生原油中温氧化反应，其燃料主要是地层中的原油，开发方式为中温火驱；当前缘温度高于 450 ℃时，主要发生焦炭高温氧化反应，其燃料为中温氧化生成的氧化焦和 400~450 ℃温度区间热解缩聚反应生成的热解焦，这两种焦在温度大于 450 ℃时快速燃烧并大量放热，形成稳定的燃烧前缘，此时开发方式为高温火驱。不同油藏原油氧化作用机理及开发方式见表 1。

表 1 不同油藏注空气开发空气作用机理及开发方式

油藏类型	稀油油藏温度/℃	稠油火驱前缘温度/℃	主要机理	开发方式
稀油	<120		溶解膨胀	减氧空气驱
	>120		低温氧化、加氧反应为主	空气驱
稠油		200~400	中温氧化、氧化焦生成	中温火驱
		>450	高温氧化、热解焦生成、氧化焦+热解焦氧化	高温火驱

2.1 稀油油藏减氧空气驱

从 2009 年开始，中国石油针对低渗透、水敏及高含水、潜山等类型油藏陆续开展了多项减氧空气驱开发试验^[30]，拓展了减氧空气驱提高采收率技术的应用领域。在此基础上形成相应的油藏工程方法、配套注采工艺和地面工程配套技术，保证了注减氧空气试验

项目的安全高效运行。

适合减氧空气驱的油藏分布广、类型多、单井注气能力差异较大,不同区块注入减氧空气的压力、气量、氧含量等主要指标各不相同。中国石油研发了减氧空气一体化装置,在压力、流量匹配、智能联控及连锁保护等关键技术方面取得了突破,初步形成了注入压力 15~50 MPa、排量 $(3\sim 20)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、含氧浓度 2%~10%的标准化、撬装化、系列化成套装备,为减氧空气驱的工业化应用提供了保障。

长庆靖安油田五里湾一区为解决油藏进入中含水期后含水上升速度加快、综合递减和自然递减增大的开发矛盾,于 2009 年 12 月先后开展减氧空气驱先导试验和扩大试验。2013 年底已建成了 15 注 63 采的规模化工业试验区。试验表明减氧空气驱在补充地层能量、改善水驱、扩大平面波及面积 3 方面均优于水驱,现场试验取得了较好的效果(见图 4)。试验区见效油井 60 口,见效率 95.2%,截至 2019 年底,试验期累计增油 $6.3\times 10^4\text{ t}$,预测最终采收率可提高 10%。

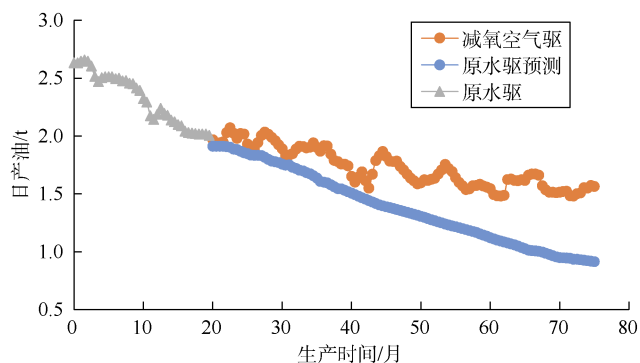


图 4 试验区减氧空气驱及水驱预测平均单井日产油变化曲线

2.2 稀油油藏空气驱

油藏温度较高的稀油油藏,可直接注入空气,利用原油氧化热在地下的积聚,提高油层局部温度,进而实现氧气的有效消耗。空气驱采油综合了气驱、补充地层能量、低温氧化等多种驱油机理。注空气初期主要是保持或提高地层压力和气驱作用,由于氧化生热能够有效累积,后期热效应也是其重要的驱油机理。氮气驱没有热效应,只有一个气驱作用的产油高峰,而空气驱开发在气驱产油高峰之后还存在一个热效应作用的产油高峰^[31]。

空气驱适合温度大于 120 ℃的高、中、低、特低渗透油藏(包括砂岩、砾岩、碳酸盐岩等类型),开发中仅需采用压缩机将空气连续注入油层,地面流程简单。与减氧空气驱相比,空气驱无减氧过程,降低了

地面工程的投资和减氧成本,提高了空气驱的经济效益,但由于氧气浓度较高,存在一定的爆炸风险,在实施过程中需要在压缩机出口、注气井井口、采油井井口等处监测氧气、烃类气体浓度的变化,特别是注气井和气窜的采油井,需要在注入过程中精准调控,降低爆炸风险。另一方面,高压、高温、高氧含量空气的注入,对注气井管柱存在较强的氧腐蚀,需要加强腐蚀的监控和防腐措施。

为了更好地发挥空气驱原油氧化的热效应,美国针对轻质油藏空气驱提高采收率技术做了大量的研究与实践,筛选油藏温度大都在 120 ℃以上,获得了较好的效果。辽河油田在锦 625 区块(油藏温度 123 ℃)开展了空气驱试验,试验结果表明,试验区 7 个井组累计增油 $3.4\times 10^4\text{ t}$,展现了良好的开发效果和应用前景。

2.3 稠油油藏注空气中温火驱

对于黏度较低的普通稠油油藏,可采取化学点火方式把油藏加热到 200~400 ℃。在该温度区间,中温氧化反应释放出较多的热量。通过持续注入空气,使 200~400 ℃的反应热前缘在地下推进,形成稠油中温火驱开发。

注空气中温火驱主要采用化学点火方式,形成的燃烧前缘温度较低(一般低于 400 ℃),对地层原油的改质作用较弱,该技术主要适用于地层原油黏度较低的普通稠油油藏。

辽河油田杜 66 区块作为典型的普通稠油油藏,经过多年的蒸汽吞吐开发,已经进入开发后期。2005 年进行了 7 个井组的火驱先导试验,取得了明显的增产效果和良好的经济效益。截至 2018 年底,现场注空气火驱井组已达 112 个,年产油规模 $24\times 10^4\text{ t}$,较常规吞吐增产 $16\times 10^4\text{ t}$,是国内目前最大的直井火驱开发基地,开发效果十分显著。

2.4 稠油油藏注空气高温火驱

注空气高温火驱技术具有较广泛的适应性,既可用于普通稠油油藏,也可用于胶质和沥青质含量较高的特/超稠油油藏;既可以应用于稠油油藏的一次开发,也可以应用于注蒸汽后期稠油油藏进一步提高采收率。现阶段注空气高温火驱一般选用电点火的方式点燃油层,过程中伴随着传热和复杂的物理化学变化,具有原油改质、蒸汽驱、热水驱、烟道气驱等多种驱油机理。

注空气高温火驱通过注气井向油层连续注入空气并点燃油层,在油藏内形成 450 ℃以上稳定扩展的高温燃烧前缘,从而将地层原油从注气井推向生产井。注空气高温火驱在燃烧前缘的前方可以形成高含油饱和

度的油墙，可对油藏的高含水通道、裂缝等进行封堵，进而通过高温燃烧前缘对油层实现纵向上的高效波及。

新疆油田红浅 1 井区先后进行了蒸汽吞吐、蒸汽驱开发。吞吐阶段累计产油 $11.3 \times 10^4 \text{ t}$ ，阶段采出程度 26.5%；蒸汽驱阶段累计产油 $1.0 \times 10^4 \text{ t}$ ，阶段采出程度 2.4%；蒸汽驱结束后废弃停产达 10 年（见图 5）。2009 年中国石油在该油藏开展了注空气高温火驱先导试验，采用 13 注 37 采的线性井网开发。对比试验区 h2118A 井注空气火驱前、后的取心照片（见图 6）发现，注空气火驱前后整个油层段内岩性及剩余油饱和度等均存在明显差异，火驱后实现了油藏纵向全部波及，整个岩心段剩余油饱和度小于 5%。注空气高温火驱全面提高纵向波及范围的能力是其他驱替方式所不具备的。截至 2018 年底，试验区累计产油 $14.7 \times 10^4 \text{ t}$ ，阶段采出程度 34.6%（见图 5），累计空气油比 2 789 m^3/m^3 。试验区节能减排效果十分明显，与蒸汽驱相比节约能量消耗 $16.2 \times 10^4 \text{ t}$ 标煤，累计减排二氧化碳 $12.5 \times 10^4 \text{ t}$ 。注空气高温火驱技术可作为注蒸汽开发稠油老区的战略接替技术。

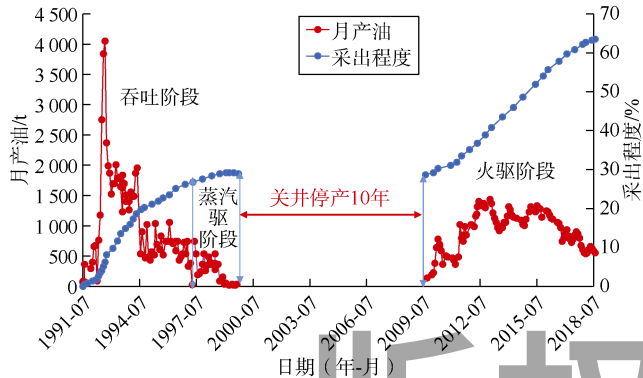


图 5 红浅先导试验区原油产量和采出程度

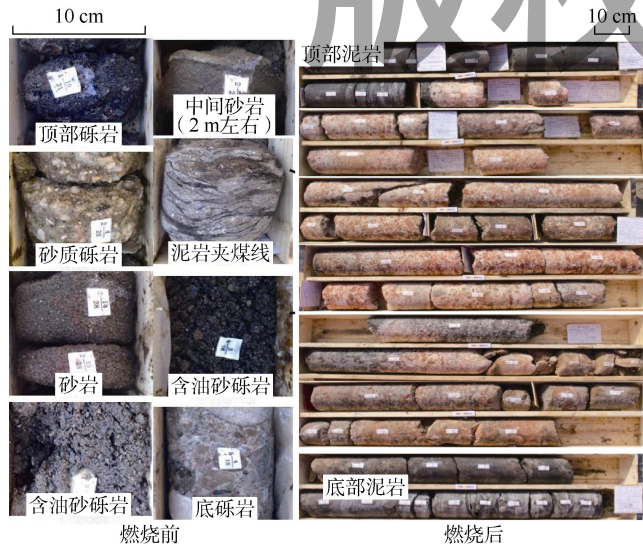


图 6 h2118A 井注空气高温火驱前后岩心照片

3 结论

注空气开发全温度域原油氧化反应具有如下特征：温度低于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，基本不发生原油的氧化反应，无明显的热效应；温度为 $120\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，原油与氧气主要发生低温氧化反应，氧气被消耗，释放一定的热量；温度为 $200\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，主要发生原油的缩聚反应和断键反应，生成 CO_2 、 CO 、 H_2O 以及氧化焦，释放较多的热量；温度高于 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，主要发生原油热裂解成焦反应和固体焦炭的氧化反应，释放大量的热量。

全温度域注空气开发方式为：油藏温度小于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的稀油油藏，可采用减氧空气驱开发；油藏温度大于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的稀油油藏，利用低温氧化作用消耗注入空气中的氧气，可直接进行空气驱开发；普通稠油油藏使用化学点火方式把油藏加热至 $200\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，采用注空气中温火驱开发；普通稠油油藏和胶质沥青质含量较高的特/超稠油油藏可使用电点火方式把油藏加热到 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，采用注空气高温火驱开发。

中国石油近 10 年的攻关和开发试验证实，空气是高效、低成本、绿色的新型驱油介质，减氧空气驱、空气驱、稠油注空气中温火驱和高温火驱等注空气开发技术具有采收率高、成本低、节能、节水、绿色等特点，具有广阔的应用前景。

致谢：本文研究成果得到相关油田、研究院所的大力支持。文中引用了专家研究文献和油田试验成果，在此一并致谢！

符号注释：

m_{coke1} ——氧化焦质量，g； m_{coke2} ——热解焦质量，g； Q_1 ——单位质量氧化焦的氧化放热量，J/g； Q_2 ——单位质量热解焦的氧化放热量，J/g； Q_{HT} ——单位质量焦（氧化焦+热解焦）高温氧化的总放热量，J/g； R ——参与高温氧化反应焦炭中氧化焦所占的质量分数，%； x ——原油和其加氧产物的碳原子数，个； y ——原油和其加氧产物的氢原子数，个； z ——原油和其加氧产物的氧原子数，个； α ——焦炭中的碳原子数，个； β ——焦炭中的氢原子数，个； γ ——焦炭中的氧原子数，个。

参考文献：

- [1] BURGER J G. Chemical society of petroleum aspects of in-situ combustion: Heat of combustion and kinetics[J]. Engineers Journal, 1971, 12(5): 410-422.
- [2] FASSIHI M R, YANNIMARAS D V, WESTFALL E E, et al. Economics of light oil air injection projects[R]. SPE 35393, 1994.
- [3] KUMAR V K, FASSIHI M R, YANNIMARAS D V. Case history and appraisal of the medicine pole hills unit air-injection project[R]. SPE 27792, 1995.
- [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.
- JIANG Youwei, ZHANG Yitang, LIU Shangqi, et al. Displacement mechanisms of air injection in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 471-476.
- [5] 岳清山, 王艳辉. 火烧驱油采油方法的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- YUE Qingshan, WANG Yanhui. Applications of production methods in fire flooding[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [6] 张敬华, 贾庆忠. 火驱采油[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- ZHANG Jinghua, JIA Qingzhong. Production of fire flooding[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [7] 关文龙, 马德胜, 梁金中, 等. 火驱储层区带特征实验研究[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 100-109.
- GUAN Wenlong, MA Desheng, LIANG Jinzhong, et al. Experimental research on thermodynamic characteristics of in-situ combustion zones in heavy oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 100-109.
- [8] 王元基, 何江川, 廖广志, 等. 国内火驱技术发展历程与应用前景[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 909-914.
- WANG Yuanji, HE Jiangchuan, LIAO Guangzhi, et al. Overview on the development history of combustion drive and its application prospect in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 909-914.
- [9] 何江川, 廖广志, 王正茂, 等. 油田开发战略与接替技术[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 519-525.
- HE Jiangchuan, LIAO Guangzhi, WANG Zhengmao, et al. Oilfield development strategy and replacement techniques[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 519-525.
- [10] 唐君实, 关文龙, 梁金中, 等. 热重分析仪求取稠油高温氧化动力学参数[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 775-779.
- TANG Junshi, GUAN Wenlong, LIANG Jinzhong, et al. Determination on high-temperature oxidation kinetic parameters of heavy oils with thermo gravimetric analyzer[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 775-779.
- [11] 李秋, 易雷浩, 唐君实, 等. 火驱油墙形成机理及影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 474-481.
- LI Qiu, YI Leihao, TANG Junshi, et al. Mechanisms and influencing factors of the oil bank in fire flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 474-481.
- [12] 关文龙, 张霞林, 席长丰, 等. 稠油老区直井火驱驱替特征与井网模式选择[J]. 石油学报, 2017, 38(8): 935-946, 972.
- GUAN Wenlong, ZHANG Xialin, XI Changfeng, et al. Displacement characteristics and well pattern selection of vertical-well fire flooding in heavy oil reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(8): 935-946, 972.
- [13] 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.
- LIAO Guangzhi, YANG Huaijun, JIANG Youwei, et al. Applicable scope of oxygen-reduced air flooding and the limit of oxygen content[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 105-110.
- [14] 张方礼, 赵庆辉, 闫红星, 等. 指纹分析技术在火驱燃烧状态识别中的应用[J]. 特种油气藏, 2015, 22(6): 84-88, 148-149.
- ZHANG Fangli, ZHAO Qinghui, YAN Hongxing, et al. Application of signature analysis technique in identification of fire flood combustion state[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(6): 84-88, 148-149.
- [15] 田红. 石油焦与油页岩混合燃烧特性及其燃烧动力学[J]. 石油学报(石油加工), 2010, 26(2): 65-70.
- TIAN Hong. Co-combustion characteristics and kinetics of petroleum coke and oil shale[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2010, 26(2): 65-70.
- [16] PU W F, CHEN Y F, LI Y B, et al. Comparison of different kinetic models for heavy oil oxidation characteristic evaluation[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(11): 12665-12676.
- [17] YUAN C D, PU W F, JIN F Y, et al. Characterizing the fuel deposition process of crude oil oxidation in air injection[J]. Energy & Fuels, 2015, 6(3): 7622-7629.
- [18] JIA H, ZHAO J Z, PU W F, et al. Thermal study on light crude oil for application of high-pressure air injection(HPAI) process by TG/DTG and DTA tests[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(3): 1575-1584.
- [19] ZHAO R B, WEI Y G, WANG Z M, et al. Kinetics of low-temperature oxidation of light crude oil[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(4): 2467-2654.
- [20] 中国石油天然气总公司. 稠油油藏流体物性分析方法: 原油粘度测定: SY/T 6316—1997[S]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- China National Petroleum Corporation. Analytical approach of fluid physical property for heavy-oil reservoirs: Crude oil viscosity measurements: SY/T 6316—1997[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [21] SARMA H K, YAZAWA N, MOORE R G, et al. Screening of three light-oil reservoirs for application of air injection process by accelerating rate calorimetric and TG/PDSC tests[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2002, 41(3): 50-61.
- [22] KHANSARI Z, GATES I D, MAHINPEY N. Low-temperature oxidation of Lloydminster heavy oil: Kinetic study and product sequence estimation[J]. Fuel, 2014, 115: 534-538.
- [23] KHANSARI Z, KAPADIA P, MAHINPEY N, et al. Kinetic models for low temperature oxidation subranges based on reaction products[R]. SPE 165527, 2013.
- [24] METZINGER T H, HUTTINGER K J. Investigations on the cross-linking of binder pitch matrix of carbon bodies with molecular oxygen: Part I. Chemistry of reactions between pitch and oxygen[J]. Carbon, 1997, 35(7): 885-892.
- [25] GUO A, ZHANG X, ZHANG H, et al. Aromatization of naphthenic ring structures and relationships between feed composition and coke formation during heavy oil carbonization[J]. Energy & Fuels, 2009, 24(1): 525-532.
- [26] LIU D, SONG Q, TANG J, et al. Interaction between saturates, aromatics and resins during pyrolysis and oxidation of heavy oil[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 154: 543-550.
- [27] MARTINEZ-ESCANDELL M, TORREGROSA P, MARSH H, et al. Pyrolysis of petroleum residues: I. Yields and product analyses[J]. Carbon, 1999, 37(10): 1567-1582.
- [28] FAKHROLESLAM M, SADRAMELI S M. Thermal/catalytic cracking of hydrocarbons for the production of olefins: A state-of-the-art review III: Process modeling and simulation[J]. Fuel, 2019, 252: 553-566.
- [29] LIU D, HOU J, LUAN H, et al. Coke yield prediction model for pyrolysis and oxidation processes of low-asphaltene heavy oil[J]. Energy & Fuels, 2019, 33: 6205-6214.
- [30] 廖广志, 马德胜, 王正茂, 等. 油田开发重大试验实践与认识[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- LIAO Guangzhi, MA Desheng, WANG Zhengmao, et al. Practice and theory of industrial & pilot test in oilfield development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [31] MONTES A R, GUTIÉRREZ D, MOORE R G, et al. Is high pressure air injection (HPAI) simply a flue-gas flood[R]. SPE 133206, 2010.
- 第一作者简介: 廖广志 (1965-), 男, 四川内江人, 博士, 中国石油勘探与生产分公司教授级高级工程师, 主要从事油田开发技术研究和管理工作。地址: 北京市东城区东直门北大街 9 号, 中国石油勘探与生产分公司, 邮政编码: 100007。E-mail: liaoguangzhi@petrochina.com.cn
- 收稿日期: 2019-10-09 修回日期: 2020-02-26

(编辑 唐俊伟)