

# 轻质油藏高压注空气技术应用前景分析

蒲万芬<sup>1</sup>,袁成东<sup>1</sup>,金发扬<sup>1</sup>,贾虎<sup>1</sup>,赵若锟<sup>2</sup>

1. 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
2. 中国石油西南油气田公司采气工程研究院,四川广汉 618300

**摘要** 轻质油藏高压注空气提高采收率技术已经被证实是一种行之有效的提高采收率技术,该技术的发展为油田提高采收率开辟了新的道路。本文总结国内外轻质油藏高压注空气技术矿场试验及室内研究技术的发展历程,阐述了目前国内外轻质油藏高压注空气驱油机制的研究现状,明确了注空气实施过程中油藏筛选及评价、工程设计、现场实施三大环节之间的相互关系,并对各个阶段需要实施的主要内容和考虑的关键因素予以详细说明。根据目前国内外提高采收率技术现状,分析了轻质油藏高压注空气技术的特点和优势,指出了对于水驱后油藏或正在进行水驱的油藏、低渗及超低渗注水开发困难的油藏、高温高盐油藏等,轻质油藏高压注空气具有巨大的经济潜力和广阔的应用前景。

**关键词** 轻质油藏;高压注空气;提高采收率

**中图分类号** TE357.7

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.17.013

## High Pressure Air Injection Technique for Light Oil Reservoir: Its Development History and Application Prospect

PU Wanfen<sup>1</sup>, YUAN Chengdong<sup>1</sup>, JIN Fayang<sup>1</sup>, JIA Hu<sup>1</sup>, ZHAO Ruokun<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2. Gas Production Engineering Research Institute, Southwest Oil-Gas Field Company, PetroChina, Guanghan 618300, Sichuan Province, China

**Abstract** In recent years, High Pressure Air Injection (HPAI) has been proven as an effective method for enhanced oil recovery from light oil reservoirs. This technique has received considerable attention as a relatively new technique for IOR, and has led to increasing interests from companies for exploring the feasibility of the HPAI project in their reservoir holdings. The development history of HPAI for light oil reservoirs is introduced in terms of the laboratory research and field implementation based on published literatures. The mechanism of HPAI is also presented. In the meantime, the project phases, including candidate reservoirs screening and evaluating, project design, and project implementation, as well as the road-map and key factors for each phase are discussed in detail. An analysis on the characteristics and advantages of HPAI process are also conducted. Along with the current status of existing techniques for EOR, an insight into the large economic potential and the enormous application prospect for HPAI to depleted, water flooded light oil reservoirs, low and ultra-low permeability reservoirs, and high pressure high temperature reservoirs are also provided.

**Keywords** light oil reservoir; HPAI; enhanced oil recovery

### 0 引言

轻质油藏高压注空气(HPAI)是一种新兴的提高采收率技术,与传统的重质油藏就地燃烧(火驱技术)有很大不同,

火驱技术需要人工点火,主要通过燃烧产生热量降低稠油黏度,进而通过蒸汽和烟道气驱动<sup>[1]</sup>。轻质油藏 HPAI 不需要人工点火,主要是将压缩空气注入到轻质油藏,注入空气中的

收稿日期:2013-01-07;修回日期:2013-02-05

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05049)

作者简介:蒲万芬,教授,研究方向为提高采收率,电子信箱:pwanfen@163.com

氧气和地层部分原油发生低温氧化反应(LTO),产生热量,并生成烟道气,驱替原油向生产井流动以提高原油采收率。在原油和烟道气之间可能是非混相、混相、或部分混相。近些年来,HPAI 已经被证明是极具价值的提高采收率技术,尤其是对于使用其他采收率技术不经济的低渗透油藏和水驱后高含水油藏<sup>[1]</sup>。

## 1 HPAI 技术发展

### 1.1 矿场试验

1963年,轻质油藏 HPAI 在内布拉斯加州的 Sloss Field 进行第一次扩大规模现场测试,美国阿莫科公司将压缩空气注入到深 1900m、厚 3.35m、原油重度 38.8°API 的水驱油藏,采用正向燃烧与注水结合的技术进行三次采油。此次试验增加原油产量 11095.05t,相当于水驱后剩余原油的 43%。1967年,规模继续扩大,增加原油产量 69614.83t,但是由于当时原油价格 3 美元/桶,因此被认为是不经济的<sup>[1]</sup>。

HPAI 的第二次应用是 1971 年在美国密西西比的 West Heidelberg 油田,此次应用 HPAI 作为二次采油技术用于压力保持,即使当时原油价格低于 4 美元/桶,但项目仍然是成功的。Kumar 在此项目的数值模拟研究中表明尽管项目最初设计用于压力保持,但有超过 50%的原油是通过热效应采出的<sup>[1]</sup>。

1979年,轻质油藏 HPAI 在美国 Williston 盆地南、北达科他州进行的商业规模实施是其发展的里程碑。最初在 Williston 盆地进行的 4 个注空气项目有 3 个是在 Buffalo Red River Unit (BBRU) 进行,另一个在 Medicine Pole Hills Unit (MPHU),项目最初被科赫勘探公司启动,现由美国大陆资源公司经营。

Buffalo 油田碳酸盐岩油藏埋深 2590m,压力 28.9MPa,原油重度 32°API,温度 101℃,渗透率  $1 \times 10^{-3} \sim 20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。1977年,完成注空气测试可行性研究和实验室研究。1978年 11 月在 BRRU 形成 9.06 km<sup>2</sup> 的试验区,产量非常可观,1981年 5 月扩大到 31km<sup>2</sup>。1983年和 1987年在临近的两个单元 South BRRU 和 West BRRU 分别形成 84 km<sup>2</sup> 和 18.9km<sup>2</sup> 的区块。截止到 2009年 12月 31日,3 个单元共有 59 口生产井和 20 口注入井,所有区块原油产量均显著增加。目前产量 206.4t/d,空气注入量为 863760m<sup>3</sup>/d,累计注入空气 74.198×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,增加原油产量约 249×10<sup>4</sup>t,空气利用率为 2984.52m<sup>3</sup>/t。据估计 3 个单元在注空气过程中分别已经燃烧了 12%、9%、7%的油层体积,约占注空气区块总面积的 10%。此工程的成功实施及其开发年限足以证实轻质油藏 HPAI 在经济和技术上都是成功的<sup>[1]</sup>。

国内近些年也开始了轻质油藏注空气室内研究,尽管单纯注空气成功的矿场实验在国内未见报道,但国内的百色油田、延长油矿、中原油田等先后对空气泡沫驱进行了现场试验,效果良好<sup>[5-7]</sup>。空气泡沫驱现场实验为轻质油藏 HPAI 的发展提供了良好基础。

### 1.2 室内研究方法及设备

轻质油藏 HPAI 技术能否有效提高采收率关键在于空气是否能很好地与原油发生氧化反应。然而轻质原油的燃料沉积特性决定了高温氧化反应(HTO)通常不能够持续,在轻质油藏中主要发生 LTO。因此,室内实验研究重点主要围绕 LTO 开展。LTO 实验研究涉及的实验设备主要可以分为三大类:恒温可控反应器,绝热可控反应器和高压升温氧化反应器(HPRTO)。

不同类型的恒温可控反应器在 LTO 研究中已经被广泛地报道<sup>[8-10]</sup>,其中典型代表是最初由 Greaves 等<sup>[11]</sup>报道的小型台架反应器(SBR),在后人的研究中应用更广泛,反应器主体是高压管(直径  $D=2.54\text{cm}$ ,长度  $L=25\text{cm}$ ),最大操作压力 34MPa(后发展到 50MPa),样品容量 100mL,在一定油藏温度和压力条件下获得静态条件下的氧化速率和气态反应产物组成。恒温可控反应器主要在缺少绝热设备时用于研究反应动力学及分析氧化后气体组分含量,包括 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和 CO 等。在不同温度下测量多组数据,建立压力随时间减小的函数关系曲线,用曲线拟合技术即可确定反应动力学参数。反应速率用 O<sub>2</sub> 消耗速度表示,通过压力减少速度来计算(假设压力减小主要是由反应过程中氧分压减少引起的)。在低反应速度条件下,SBR 能够精确地研究反应动力学。

绝热可控反应器主要包括两种,绝热可控热量计和燃烧管(CT)。具有代表性的绝热可控热量计是绝热加速量热仪(ARC),ARC 是近些年来发展起来用于研究反应动力学(0~70MPa,0~500℃)的工具。最初在 1991 年由 Yannimaras 引进到注空气反应动力学研究中<sup>[12]</sup>。ARC 包括一个内径为 2.54cm 的 9mL 球形样品储存器,反应物可以在精确的温度和热量补偿条件下反应,探测精度为 0.02℃/min。ARC 可以在封闭条件下测试,也可以在流动条件下测试,可以实现两种操作模式:加热—等待—搜索(Heat-Wait-Search)和恒温老化(Isoage)。Greaves 等<sup>[11]</sup>使用的 Phi-Tec II 和 ARC 相似,由英国赫尔公司设计,探测精度为 0.02℃/min,反应器容积 100mL。Clara 等<sup>[10]</sup>使用的绝热反应器有所不同,和 ARC 相比,其优点是使用固结压实的岩心进行实验,在线分析产气组成,进行动力学计算,结果更准确。灵敏度是 0.015℃/min,监测水平要略微比商业化的 ARC 和 Phi-Tec II 高。

上述 3 种绝热可控反应器主要用于确定原油的低温氧化反应动力学参数,建立低温氧化动力学模型;研究原油在油藏条件下能否发生自燃;测试氧化反应的放热量及热量产生速率;研究在低温和高温范围内氧化反应进行的程度和连续性等。

CT 最早由 Moore 等<sup>[13]</sup>设计用于就地燃烧试验,岩心夹持器是直径 10cm,长 1.83m 的薄壁(1mm)600 型铬镍铁合金管。CT 用 12 个 1000W 的加热器包裹,形成长度为 15cm 的 12 个加热层,以达到接近绝热的条件。每个加热层都有一对相对应的热偶,分别用于探测燃烧前缘的温度和管壁处温度,两

个温度之间一定的差值可以激活加热器进行加热,使中心和管壁的温差在 5~10℃ 范围内。后续研究中设计的 CT<sup>[11,10,14,15]</sup>均按照此原理达到绝热条件。CT 实验更接近现场测试,主要用于提供:(1) 油藏燃烧反应的温度范围和稳定性;(2) 空气和原油需要量,为前期经济评价和压缩机设计提供参考;(3) 测量产生气体和液体组成,用于油田监测生产;(4) 确定原油品质,原油乳化情况;(5) 确定 SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 等的产生量,判断产出水的 pH 值,为腐蚀提供指导<sup>[16]</sup>。测试提供的数据,如 CO<sub>2</sub> 含量、温度、产生气体速度等,可以用于历史拟合和数值模拟测试,通过动态实验拟合校正静态氧化确定的反应动力学模型。

Moore 等<sup>[17]</sup>使用 HPRTO 在恒温或设定升温速率条件下进行高压注空气实验。HPRTO 主要用于在一定空气流量下研究总体氧化反应行为和反应动力学,提供实际反应数据,用来数值模拟。目前报道中主要用于研究孔隙水、注入流量和原油类型对氧化反应的影响,蒸馏对热前缘形成和传播的影响,蒸馏对蒸汽相氧化反应动力学的影响,以及描述高压注空气轻质油蒸汽相氧化反应过程。

除以上提到的 3 种类型仪器,注空气过程中还经常使用细管。Shokoya 等<sup>[18]</sup>用细管研究 HPAI 过程中的混相驱机制和对采收率的贡献。细管外径 6.3mm,内径 4.318mm,长 18.29m,用 160~200 目渥太华砂充填。在细管下游接高压可视毛细玻璃管,可以更逼真地观察和记录细管中流出流体的状态。中国石油大学(华东)则采用细长管恒温注空气模拟注空气动态驱油实验。细管长(18m),耐高温(可达 300℃),耐高压(40MPa)<sup>[19]</sup>。

## 2 轻质油藏 HPAI 研究现状

过去的近 30 年,轻质油藏注空气提高采收率已经被证实是一种行之有效的技术<sup>[6]</sup>。1963 年开始了最早的轻质油藏 HPAI 工程,1979 年进行大规模商业应用,1993 年有关注空气项目现场应用和室内研究的报道开始增加<sup>[1]</sup>,直到 1994 年,美国 Williston 盆地南、北达科他州 4 个工程的商业化实施在塔尔 ISC 公开讨论会上被公布,HPAI 才作为一种提高采收率过程被普遍接受<sup>[20]</sup>。

### 2.1 轻质油藏 HPAI 机制研究

轻质油藏 HPAI 过程中的每个阶段都需要考虑很多因素,图 1 中列出了不同工程阶段需要实施的主要内容和考虑的关键因素。

多种驱油机制的综合作用使得轻质油藏 HPAI 技术能够有效提高原油采收率。从目前国内外室内研究和现场应用状况来看,空气驱的主要机制可以归纳如下:

(1) 烟道气驱。注入油藏中的空气和原油发生 LTO,消耗空气中的氧气,就地生成烟道气,对原油产生较好的驱替效果。

(2) 油藏增压作用。注空气能够维持或提高油藏能量,防止油藏能量过快衰竭,加快原油生产。

(3) 气体溶解及原油膨胀。就地生成的烟道气中部分组

分(主要为 CO<sub>2</sub>)在油藏条件下溶解到原油中,可以显著降低原油黏度,使原油体积膨胀,增加原油流动动力。

(4) 烟道气与原油混相及近混相驱替。尽管有许多学者已经通过实验证明了在正常油藏条件下烟道气不可能与原油发生混相作用,但是在适当的条件下,就地生成的烟道气产生的近混相驱替将会大大提高原油采收率<sup>[18]</sup>。

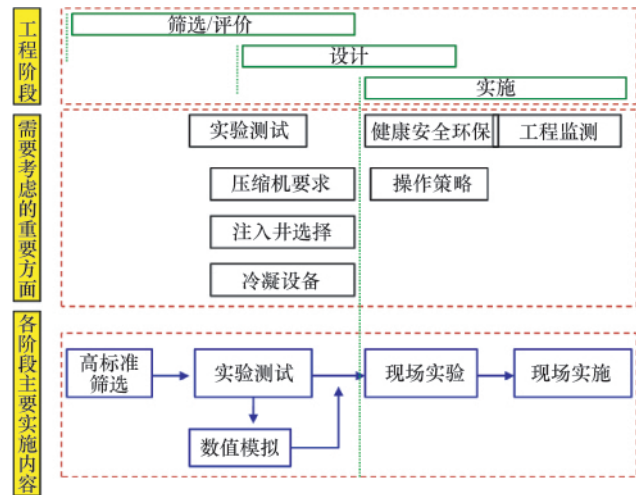


图 1 各阶段的关键因素及实施的主要内容

Fig. 1 Road-map and key factors for each phase considerations

(5) 烟道气抽提。烟道气将原油中的轻质组分抽提出来,随后产生类似液化天然气(LNG)驱替的作用。

(6) 热效应(热前缘)。有关热效应对采收率的贡献一直存在争议,很多研究者将 HPAI 看作间接的烟道气驱,然而,高含水轻质油藏的剩余油一般不能通过烟道气驱替出。尽管早期生产主要是由于油藏增压和烟道气驱,但 1 孔隙体积(PV)空气注入后,燃烧前缘成为起主要作用的机制<sup>[2]</sup>。Moore 等认为反应层的温度升高在某些情况下对采收率起到重要作用。在燃烧前缘周围,一部分原油被蒸发,没有被作为燃料消耗的蒸发相通过烟道气和蒸汽携带到下游油藏的低温部分,冷凝形成油带。同时,此过程中的热量传递会降低原油黏度,增加流动性。蒸馏过程和原油是否处于剩余油状态关系很小<sup>[21]</sup>,因此,对于高含水油藏提高采收率非常重要,而且,燃烧前缘自校正的独特效应可以提高油藏波及效率,实现双驱作用(DDP)<sup>[12]</sup>。实验室和现场数据也都表明热前缘对采收率有重大影响。在目前 HPAI 工程仍保持成功的 BRRU 进行取心,分析发现残油饱和度为 4.9%,这是非混相烟道气驱不能够达到的,而且盐岩的存在也表明油藏岩石经历过高温<sup>[3]</sup>。Kumar 对美国密西西比 West Heidelberg 油田的数值模拟表明,尽管最初 HPAI 作为二次采油技术用于压力保持,但有超过 50%的原油通过热效应采出<sup>[3]</sup>。

(7) 蒸馏作用。蒸馏作用和热效应是相伴而生的。目前国内大部分油田已处于开发中后期,部分油田已进入中高含水

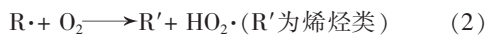
期,鉴于蒸馏作用在高含水油藏中的特殊作用,有必要进行详细阐述。蒸馏不仅作为提高采收率的一种机制,更重要的是影响轻质油藏 HPAI 反应动力学。日本学者 Kikuchi 等<sup>[22]</sup>对日本国内一个水驱后油藏进行可行性研究表明,对于高含水油藏,蒸馏过程是一个非常重要的提高采收率机制。通过这种机制,在氧化前缘形成油带。Barzin 等讨论了蒸汽相和蒸馏过程对 HPAI 反应动力学的影响,并指出蒸气相的氧化加成反应可能为自动点火提供能量,原油蒸发和燃料氧化同时发生,蒸发前缘和氧化前缘同时传播,一部分蒸气相燃料参与了氧化或者燃烧反应<sup>[23-25]</sup>。对于蒸气相燃烧动力学,从限制反应速率角度来讲,碳氢化合物组成将是非常重要的限制因素。研究和多相组成相态模型将有助于确定蒸气相组成和初始原油组成、含水饱和度、空气流量、压力和温度之间的关系。

各种驱替机制的综合作用将会使得原油采收率大幅度提高。然而,从目前研究现状来看,一些驱油机制仍然存在着争议,而且每种驱替机制对采收率的贡献大小也尚未明确。因此,为了进一步明确轻质油藏 HPAI 提高采收率机制,需要在研究中对各驱油机制进行量化分析。

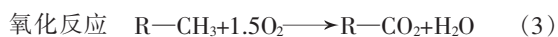
## 2.2 LTO 反应途径及动力学研究

LTO 反应历程和反应动力学作为轻质油藏 HPAI 技术的研究重点已经被大量的研究。最具有代表性的反应历程是以 Moore 等<sup>[2]</sup>为代表的两步反应:(1) 氧气的加成反应(<150℃),主要在碳氢化合物分子链上产生自由基和含氧官能团(如羟基,醛基和羧基);(2) 碳键剥离反应(150~300℃),加成反应形成的化合物通过脱羧过程分解成二氧化碳和长链烃类。在碳键剥离反应模式下,燃烧起主要作用,而在加成反应条件下,氧化形成的化合物将会彼此之间聚合,这是不期望发生的。Moore 等根据实验推断加成反应为蒸汽相燃烧提供引发能量。两种反应均被认为是在 300℃以下进行,且会发生竞争。

Sarma 等<sup>[20]</sup>进一步指出在初始阶段发生的加成反应是一个缓慢,有选择性的吸热过程,形成自由基 R·,R·通过式(1)、(2)两种途径更容易和 O<sub>2</sub> 发生反应。一旦 RO<sub>2</sub>·形成,多种放热反应将随之发生,如夺氢反应,分解成酮类,醛类和醇类等,在这个过程中可以进一步产生高反应活性的自由基。



Ren 等<sup>[11,27]</sup>给出了 LTO 总体反应历程(图 2),并将其总结为如下两步反应模式:



其中,R-CH<sub>3</sub> 为可氧化的原油组分;R-CO<sub>2</sub> 为氧化产物。Ren 使用 CT 实验数据验证了该模型,并将该模型用于数值模拟。将原油划分为 3 部分拟组分,烃类气体 C<sub>1-3</sub>,挥发性油 C<sub>4-6</sub>,和活性油 C<sub>7+</sub>,仅 C<sub>7+</sub>被认为参与此反应,并假设阿伦纽斯反应动力学方程(5)中的 m 和 n 值均为 1,通过商业软件计算反应

焓。同时讨论了 m=0,n=1;n=0,m=1;m=0,n=0 的适应性,但在模型的应用中 Ren 等并没有考虑 CO(图 2<sup>[11,27]</sup>)。

$$\frac{dc(O_2)}{dt} = k_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) (p_{O_2})^m [c(Oil)]^n \quad (5)$$

其中, $\frac{dc(O_2)}{dt}$  为氧气消耗速率;k<sub>0</sub> 为指前因子;E 为阿伦纽斯活化能;R 为通用气体常数;T 为热力学温度;p<sub>O<sub>2</sub></sub> 为氧分压;c(Oil) 为反应原油的浓度;m 和 n 为反应级数。

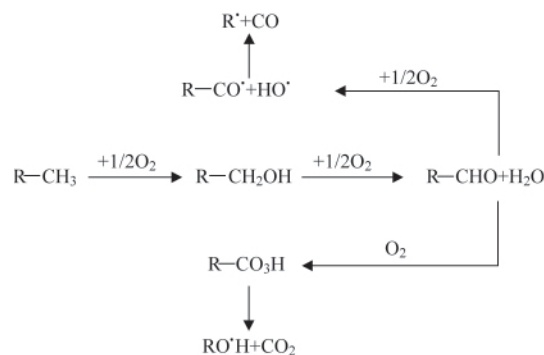
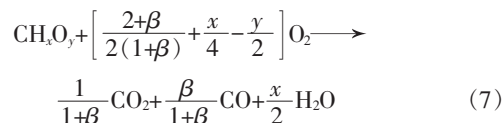


图 2 简化的 LTO 反应历程  
Fig. 2 Scheme of simplified LTO reaction

Clara 等<sup>[10]</sup>根据重质油高温完全燃烧反应建立了 LTO 反应模型:



其中,CH<sub>x</sub> 为燃料,被氧化原油的一部分;CH<sub>x</sub>O<sub>y</sub> 为极性化合物(醛类,羧酸类,酮类和醇类的混合物)。x,y,β 取决于原油性质和反应温度。根据阿伦纽斯法则可以将反应历程的动力学方程写成如下形式:

$$\left(\frac{dc(O_2)}{dt}\right)_1 = k_1^0 \cdot \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) \cdot [c(CH_x)]^{m_1} (p_{O_2})^{n_1} \quad (8)$$

$$\left(\frac{dc(O_2)}{dt}\right)_2 = k_2^0 \cdot \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right) \cdot [c(CH_x O_y)]^{m_2} (p_{O_2})^{n_2} \quad (9)$$

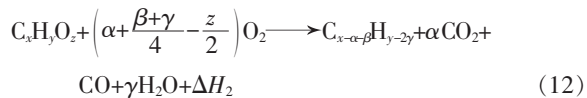
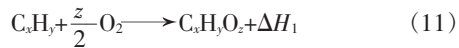
氧气的总消耗速率取决于 k<sub>1</sub><sup>0</sup>,k<sub>2</sub><sup>0</sup>,E<sub>1</sub>,E<sub>2</sub>,m<sub>1</sub>,m<sub>2</sub>,n<sub>1</sub>,n<sub>2</sub>,利用恒温氧化实验确定。通过测定 CO<sub>2</sub> 和 CO 产量,结合确定的化学计量数可确定 (dc(O<sub>2</sub>)/dt)<sub>2</sub>,进而计算 (dc(O<sub>2</sub>)/dt)<sub>1</sub>。在每个温度条件下,方程(8)可以写成方程(10),方程(9)可以写成与方程(10)同样的形式

$$\ln\left(\frac{dc(O_2)}{dt}\right)_1 = x_1 - \frac{1}{RT} \cdot x_2 + x_3 \ln p_{O_2} \quad (10)$$

其中,x<sub>1</sub>=lnk<sub>1</sub><sup>0</sup>+m<sub>1</sub>ln[C(CH<sub>x</sub>)],x<sub>2</sub>=E<sub>1</sub>,x<sub>3</sub>=n<sub>1</sub>。假设原油过量,因此只需要确定 E<sub>1</sub>,E<sub>2</sub>,n<sub>1</sub>,n<sub>2</sub>。写出 3 个不同温度的方程,用克莱姆法则即可确定各参数。Clara 等<sup>[10]</sup>认为,模型第 1 步反应式(6)中的极性化合物全部参与第 2 步式(7)反应,但事实上,轻质原

油 LTO 和重质油高温燃烧不同,只有部分极性化合物参与第 2 步反应。

Niu 等<sup>[28]</sup>和候胜明<sup>[29]</sup>将 Ren<sup>[27]</sup>提出的 LTO 反应历程进行修改(图 3<sup>[28]</sup>),形成改进的 LTO 反应模型 (11)和(12),与 Ren 等<sup>[27]</sup>和 Clara 等<sup>[10]</sup>的模型相比,此模型考虑因素更为全面。



式中,  $\Delta H_1$  和  $\Delta H_2$  为反应焓变。

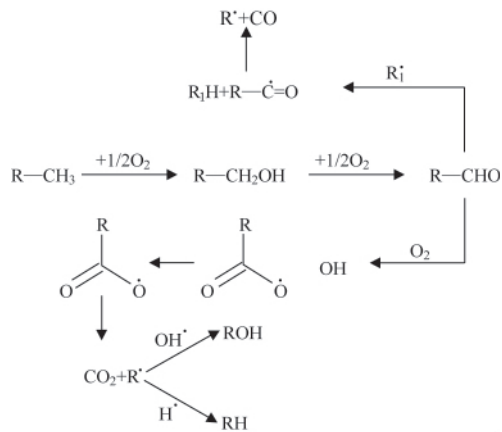


图 3 改进的 LTO 反应历程

Fig. 3 Scheme of modified LTO reaction

综上所述,可以看出有关轻质原油 LTO 反应历程和动力学的研究正在逐步被完善。LTO 的两步反应模型(加成反应和碳键剥离反应)被普遍认同,然而有关两个反应发生的温度范围,大量实验已经证明不同原油温度范围有所不同,但变化不大,一般认为加成反应主要发生在  $<150^\circ\text{C}$  或  $<170^\circ\text{C}$ , 碳键剥离反应主要发生在  $150\sim 300^\circ\text{C}$  或  $170\sim 350^\circ\text{C}$  之间<sup>[27,30]</sup>。事实上,原油组成和反应途径均非常复杂,可能涉及数百种中间产物和反应,这不仅造成了不同原油反应温度区间差异,而且为反应途径和动力学研究带来巨大困难。在采用阿伦纽斯动力学方程研究 LTO 动力学过程中,更多研究中假设 LTO 为零级反应,这种假设的成立需要两个条件:(1) 反应速率和氧分压无关。(2) 原油过量。但原油氧化反应速率是否受总压力或者氧分压影响,研究人员持有不同看法<sup>[27,31]</sup>,仍需要进一步研究。而且,在实际油藏中原油和氧分压都可能影响氧化速率,尤其在油藏中的一些特殊区域。因此,应该针对特定的油藏,在油藏压力、温度、岩石条件下研究 LTO 反应途径及其动力学,建立适合具体油藏的 LTO 氧化反应模型和动力学方程,并且在尽量简化的条件下精确地用于油藏数值模拟。

## 2.3 油藏筛选及评价

在所有注空气工作开展之前需要对候选油藏进行注空气潜力筛选。建立一套合适的油藏筛选标准,并采用适当的手段进行适应性评价显得尤为重要。

### 2.3.1 油藏筛选

油藏筛选是通过分析候选油藏现有参数,初步评价其注空气的潜力。实际上,影响轻质油藏 HPAI 的参数很多,主要包括以下几点:(1) 油藏压力及温度。油藏压力和温度影响着原油与注入空气之间的 LTO,而且,油藏压力在很大程度上决定了空气压缩机的选择和设计。(2) 油层厚度及横向和纵向展布。(3) 结构形态和地层倾角。地层倾角的存在导致重力作用在 HPAI 中更加重要。在油藏顶部注空气,气驱前缘将会更稳定,通过重力作用推动原油流向下方方向的生产井,获得较高的体积波及系数和气驱效率<sup>[1]</sup>。(4) 上覆地层的覆盖能力。(5) 油藏渗透率及非均质性。(6) 油藏岩石骨架成分。实验室和现场证据表明油藏岩石矿物学组成和原油化学组分可以影响燃料沉积数量。岩石中含有的黏土、金属成分,岩石比表面积对燃料沉积速率和氧化有重要影响。(7) 流体饱和度。含油饱和度决定着燃料是否充足,以及注空气是否经济,而地层水的存在一方面可以增加蒸气相中的燃料含量,促进燃料沉积,促进 LTO,另一方面含水饱和度过高会增加热损失。(8) 原油性质。大量研究表明不同原油氧化性质是不同的,原油氧化动力学主要取决于原油组成。有关以上各因素的研究已经很多,西南石油大学空气驱课题组根据室内研究,结合文献中已公布的筛选参数,对报道已实施和具有注空气潜力油藏的总性质进行了详细总结分析,为油藏筛选提供参考<sup>[2]</sup>。

### 2.3.2 适应性评价

适应性评价主要是通过第 1.2 节所提到的实验设备(SBR, ARC/ Phi-Tec II/TGPDSC, CT, HPRTO 及细管等),利用油藏岩石和流体,模拟油藏条件下注空气实验,并结合数值模拟确定候选油藏是否适合 HPAI 工程。实验室测试可提供的数据在室内研究方法部分已进行了详细介绍,在此不再赘述。实验室测试和数值模拟不仅能够提供严谨的方法和精确的数据用于适应性评价,而且可以为工程设计和现场实施提供重要参考数据,也可以进一步用于油藏初步筛选,如空气和原油需要量(CT 测试)可以为压缩机设计提供参考;动态测量产出气体和液体组成(CT 测试),可用于现场监测生产;数值模拟结果可以为现场小区块试注提供注气速度,注入方式等参数;研究温度、压力等对 LTO 的影响以及地层倾角等对最终采收率影响的过程中获取的参数可以为油藏筛选提供参考。

## 2.4 轻质油藏 HPAI 工程设计

### 2.4.1 压缩机设计

空气压缩机是注空气过程的核心,压缩机等级的选择主要考虑排气压力和容积流量(排气量)。随着空气注入,  $CO_2$  产生,注入压力会显著增加,此外,原油自燃后,动用流体的堆积将限制气体流动,进一步增加注入压力,最终将导致压缩机排气压力大大增加。如果仅仅根据油藏压力或初始阶段压力选择压缩机,则压缩机排放压力会太低,注入速率将受到限制,甚至可能停止注气,进而会带来很多安全问题,如空气

回流等。如果选择排气压力仅仅低于破裂压力(推荐压力,尤其是对于试验区),那么将会增加成本。因此,操作者还需要综合考虑油藏体积,注气速率和开发年限,根据注入单位空气体积的费用设计压缩机。除压缩机等级选择之外,从安全和注空气动态连续过程来讲,可以设计双重压缩系统使压缩系统存在冗余<sup>[2,33]</sup>。

#### 2.4.2 注入井选择

注空气过程中,注入井的选择也非常重要。油田经营者希望充分利用现有生产设施,力求少钻新井。如果不钻新井,则选择老井作为注入井时需要尽量做到以下3点<sup>[2]</sup>:首先,选择和整个油藏连通最好的井。因为注空气的关键在于油藏注入能力,注入气应该有效波及整个油藏,而具有大量注气能力的井需要非常好的连通性,一般是最好的生产井。其次,首批注入井优先设计在油藏上倾方向,以便后续井的选择不受其影响。最后,初始阶段至少应该有两口井,以便在不关闭压缩机或排放过量空气条件下改变注气速率。如果需要钻新井,尽可能选择在原有直井上开窗侧钻水平井。因为钻新水平井不仅增加费用,而且侧钻裸眼段将穿过一些渗透层,将导致注入空气的一部分注入到非产层<sup>[24]</sup>。老井开窗侧钻可以动用新的储量,加速生产,且注入速率比直井高3~4倍。

#### 2.4.3 冷凝设备

LTO产生的烟道气在驱替原油过程中会抽提原油轻质组分。一旦烟道气突破,这些轻质组分将随着产出气一同产出。MPHU注空气项目已经表明通过安装天然气凝析液(NGL)回收设备,可以获得大量的NGL。其中1991—1993年的NGL产量达到31.8m<sup>3</sup>/d。因此,在设计中需要考虑安装NGL回收设备,以便在生产早期收集NGL<sup>[33]</sup>。

### 2.5 轻质油藏 HPAI 现场实施

#### 2.5.1 安全问题

轻质油藏 HPAI 技术尽管有很多优势,但也存在着严重的安全隐患。注空气过程中的安全问题主要有两大类:(1) 腐蚀问题,由 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、产生的酸性液体等引起的井筒及管道设备腐蚀增加了注空气工艺的风险。(2) 爆炸问题,注空气过程的各个环节(空气压缩机、注气管线、注入井井筒以及生产井井筒)均存在着可燃性混合物爆炸危险。在一定程度上,爆炸和腐蚀严重影响着注空气的应用。因此,需要做好防腐蚀和防爆炸工作。表 1 列出了注空气过程中主要存在的爆炸和腐蚀风险及其预防措施。此外,注空气过程中会有大量产出气,为气体处理带来困难,且过高的产气速率会进一步增加腐蚀,并带来机械问题,如气锁现象,高产气速率影响泵效等。

#### 2.5.2 现场监测

注入井和生产井需进行常规动态监测(主要包括注入井压力、温度、注入量,生产井的压力、温度、采油量、采气量),注空气过程还要求监测产气速率和气体组成,确定反应是否能够有效消耗氧气,工程是否在安全操作模式下进行。产出气速率可以间接说明反应层的状态。产出气的组分含量可以间接地表明油藏中 LTO 的进行程度。Moore 等<sup>[2]</sup>指出通过检测

表 1 HPAI 过程存在的风险及预防措施

Table 1 Existing hazards and precautions for HPAI project

风险部位	主要预防措施
空气压缩机	保证空压机清洁防止积炭,级间冷却,使用耐高温润滑油,确定合适供油量
注气管线	内部涂层,防止生锈;进行气密性和泄露性试验防止管线泄漏
注入井	采用封隔器和回流控制阀等装置减少油气进入注入井;当压缩机停止工作超过一定时间则泵入 N <sub>2</sub> 、水或 2%氯化钠水溶液,防止油气回流
生产井	监测产出气中 O <sub>2</sub> 含量,一旦 O <sub>2</sub> 含量达到 3%~5%,则立即关闭生产井
腐蚀	合适的管材;防腐内外涂层,镀层,氧化处理,钝化处理;注入缓蚀剂

CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 的值,可以判断 H/C,或 O<sub>2</sub> 转化成 CO<sub>2</sub> 的百分比,指示反应层平均温度。如果 LTO 在期望模式下进行,则 H/C 应小于 3,O<sub>2</sub> 转化成 CO<sub>2</sub> 的百分比需要高于 50%。监测含氧量可以确保 O<sub>2</sub> 浓度不在可燃范围内,一般使用 3%的含氧量作为最大安全值。事实上,安全含氧量依赖于气相组成、温度等,会因各种因素和条件的改变而变化,不能够准确确定。因此,在制定含氧量安全标准时,应该把实验室(爆炸试验)最接近现场工况条件的数据根据不同影响因素乘以不同系数,才能更好地确保现场安全。

#### 2.5.3 操作策略

现场中如果监测到产出气的参数或者原油产量不正常,则需要采取相应措施。假设这种不正常的结果不是由于空气注入不足引起的,最好的做法是关闭和此生产井对应的注入井。如果关系到大量注入井,问题就变得更加复杂,一般进行周期关井。周期关井的概念在某种程度上是基于终止注入空气增加原油产量的火驱报告提出的。室内实验表明通过注入惰性气体或水改变氧分压,可以改变氧化反应模式从低温反应向高温反应方向发展。因此,在一定情况下现场可以选择注水,但更一般的做法是周期关井,周期关井可以促进氧化模式在理想模式下进行,也方便对不同注入井的注入能力进行干扰测试。周期关井过程中会引起氧气供应不足,进而导致反应缺氧。在缺氧条件下,氧化反应会夺取加成反应形成的氧化物中的氧,促进氧化物分解,使氧化模式发生改变。通过产出气中 CO<sub>2</sub> 浓度的升高可以判断反应模式发生了改变。如果停止注空气后,CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 没有发生变化,则可以认为氧化层温度低于期望值,在这种情况下,有问题的注入井应该被永久关闭<sup>[2]</sup>。尽管注入井停注是一种可行的操作,但 Moore 等<sup>[2]</sup>认为,通过可利用的注入井改变空气注入能力会更有效。他们认为一个试验区至少应该设计两口注气井,以满足有效地改变总注入能力的要求,而且以高速率通过少量注入井注气优于以低速率采用更多注入井注气,这在注空气领域不是普遍能接

受的观点,但在某种程度上这种观点和周期关井是一致的。

### 3 轻质油藏 HPAI 前景展望

#### 3.1 轻质油藏 HPAI 技术的优势

和传统注气提高采收率方法(CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、烟道气等)相比,注空气不受气源限制,可以就地取材,而且空气气源丰富,成本廉价。Kumar 等<sup>[35]</sup>通过比较 WBRRU 轻质油藏 HPAI 工程和相邻单元的水驱工程,发现 HPAI 在技术上比水驱更成功,采收率更高,生产井见效更快,生产速度更高。室内实验也表明在轻质油藏 HPAI 过程中仅有小部分原油作为燃料消耗掉,绝大部分原油被采出。无论使用压碎的岩心还是细砂混合黏土进行实验,在低速率 LTO 条件下均可以获得 64%~71% 的采收率<sup>[36]</sup>。而且,实验也证明 LTO 在油藏温度为 80~130℃甚至更低的条件下可以将 O<sub>2</sub> 全部消耗掉,产生烟道气(10%~14% 的 CO<sub>2</sub>,其余主要为 N<sub>2</sub>)<sup>[1]</sup>。与重质原油 LTO 不同,重质原油 LTO 主要产物是复杂的氧化物,会导致黏度大大增加,而轻质原油 LTO 最终产物是 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,原油黏度不会显著增加。

#### 3.2 轻质油藏 HPAI 的应用前景

目前国内大部分油藏采用注水开发,并已经逐渐进入开发中后期,含水上升,产量下降,部分油田已经进入中、高含水阶段。随着开发不断进行,注水效果逐渐降低,过度产水导致水处理费用增加,寻找一种经济有效的提高采收方法迫在眉睫。对于水驱后进一步提高采收率,轻质油藏 HPAI 具有广阔的应用前景。近 10 年来,水驱后轻质油藏 HPAI 的研究在国外被大量报道,研究人员用压碎的岩心进行水驱后 CT 实验,表明注空气在高含水轻质油藏中是可行的<sup>[21]</sup>,CT 实验和数值模拟都证明 HPAI 在水驱后可以进一步提高采收率,增加原油产量<sup>[2]</sup>。从 1999 年开始,日本国内某油田一直在进行 HPAI 项目测试,测试表明无论是水驱后高含水还是低含水情况,从温度、压力的反应、气体组成及产油量来看,原油都显示了稳定的氧化性质<sup>[37]</sup>。即使残余油饱和度为 2%~5%,在注入 1 倍孔隙体积空气后,也足以消耗掉所有氧气,而且在非常低的初始含油饱和度条件下氧化反应可以稳定进行<sup>[1]</sup>,在产生的烟道气和水共同驱替作用下,将大大提高垂直波及效率。大量产出的气体可以注入到致密油藏,节省处理大量产水的费用。因此,轻质油藏 HPAI 对于衰竭的水驱后轻质油藏具有巨大的经济潜力。

于普通轻质油藏相比,水驱后高含水的中低温油藏进行 HPAI 需要特别关注两个问题:(1) 由于长时间水驱,油藏温度变得更低,导致自燃潜力降低。针对自燃潜力低的油藏,可以采取加入化学添加剂的方法来增加其自燃潜力,一般通过向近井地带注入化学点火添加剂段塞来提高其发生自燃的潜力。(2) 流度控制技术。长期水驱过后,往往会形成高渗通道,加之高流度比的影响,导致过早发生气窜。同时,高含水油藏,在油带到达生产井之前几乎没有原油产出,因此拖延氧化前线到达生产井的时间是至关重要的。可以从多方面进

行优化来控制流度,防止气窜过早发生,如采用空气泡沫驱,对于严重非均质油藏,可以采用凝胶辅助空气泡沫驱等。

此外,部分低渗、超低渗油藏,注水困难,采收率低,由于空气流动性好,因此注空气能够有效解决注水难的问题。而且,对于许多高温高盐油藏,条件异常苛刻,目前技术条件下,由于化学药剂性能及成本等影响,许多化学驱技术(聚合物驱、表面活性剂驱等)并不能实施,而 HPAI 技术的优势决定了其在低渗、超低渗及高温高盐复杂油藏等领域具有广阔的应用前景。

#### 参考文献 (References)

- [1] Ren S R, Heriot-Watt U, Greaves M, et al. Air injection LTO process: an IOR technique for light-oil reservoirs[J]. SPE Journal, 2002, 7(1): 90-99.
- [2] Moore R G, Mehta S A, Ursenbach M G. A guide to high pressure air injection (HPAI) based oil recovery[C]. SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, April 13-17, 2002.
- [3] Gutiérrez D, Taylor A R, Kumar V K, et al. Recovery factors in high-pressure air injection projects revisited[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2008, 11(6): 1097-1106.
- [4] Kumar V K, Gutiérrez D, Thies B P, et al. 30 Years of successful high-pressure air injection: performance evaluation of Buffalo Field, South Dakota[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, September 19-22, 2010.
- [5] 王杰祥,任韶然,来轩昂,等. 轻质油田注空气提高采收率技术研究[M]//苏义脑,刘扬,刘永建,等. 中国油气钻采新技术高级研讨会论文集. 北京:石油工业出版社,2006: 351-359.  
Wang Jiexiang, Ren Shaoran, Lai Xuan'ang, et al. Study on IOR by air injection in light oil reservoirs[M]//Su Yinao, Liu Yang, Liu Yongjian, et al. Advanced Symposium on New Technologies of Oil & Gas Drilling and Production in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 351-359.
- [6] 任韶然,于洪敏,左景桀,等. 中原油田空气泡沫调驱提高采收率技术[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 413-416.  
Ren Shaoran, Yu Hongmin, Zuo Jinglun, et al. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 413-416.
- [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.  
Wang Jiexiang, Zhang Qi, Li Aishan, et al. Journal of the University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2003, 27(4): 73-75.
- [8] Berger J G. Spontaneous ignition in oil reservoirs[J]. SPE Journal, 1976, 16(2): 73-81.
- [9] Fassih M R, Meyers K O, Basile P F. Low-temperature oxidation of viscous crude oils[J]. SPE Reservoir Engineering, 1990, 5(4): 609-616.
- [10] Clara C, Durandau M, Quenault G, et al. Laboratory studies for light-oil air injection projects: potential application in Handil Field[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2000, 3(3): 239-248.
- [11] Greaves M, Ren S R, Rathbone R R. Air injection technique (LTO process) for IOR from light oil reservoirs: oxidation rate and displacement studies[C]. SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, April 19-22, 1998.
- [12] Yannimaras D V, Tiffin D L. Screening of oils for in-situ combustion at reservoir conditions by Accelerating-Rate Calorimetry[J]. SPE Reservoir Engineering, 1995, 10(1): 36-39.
- [13] Moore R G, Bennion D W, Belgrave J D M, et al. New insights into enriched-air in-situ combustion[J]. Journal of Petroleum Technology,

- 1990, 42(7): 916–923.
- [14] Onishi T, Okatsu K, Teramoto T. History matching with combustion-tube tests for light-oil air-injection project [C]. International Oil & Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China, December 5–7, 2006.
- [15] Dubey N K. Laboratory investigation on light oil air injection[C]. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Lima, Peru, December 1–3, 2010.
- [16] Juan E S, Sanchez A, Del Monte A, et al. Laboratory screening for air injection-based IOR in two waterflooded light oil reservoirs[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2005, 44(1): 31–41.
- [17] Moore R G, Urnsbach M G, Lareshen C J, et al. Ramped temperature oxidation analysis of athabasca oil sands bitumen[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology Special Edition, 1999, 38(13): 1–10.
- [18] Shokoya O S, (Raj)Mehta S A, Moore R G, et al. Evaluation of the miscibility and contribution of flue gas to oil recovery under high pressure air injection [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2002, 41(10): 58–68.
- [19] 王杰祥, 徐国瑞, 付志军, 等. 注空气低温氧化驱油室内实验与油藏筛选标准[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(1): 69–71.  
Wang Jiexiang, Xu Guorui, Fu Zhijun, et al. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(1): 69–71.
- [20] Turta A T, Singhal A K. Reservoir engineering aspects of oil recovery from low permeability reservoirs by air injection[C]. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China, November 2–6, 1998.
- [21] Teramoto T, Uematsu H, Takabayashi K, et al. Air-injection EOR in highly water-saturated light-oil reservoir[C]. SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition, Vienna, Austria, June 12–15, 2006.
- [22] Kikuchi H, Teramoto T, Onishi T. Improved recovery of light oil by air injection[J]. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 2006, 71(3): 294–304.
- [23] Barzin Y, Moore R G, Mehta S A, et al. Effect of interstitial water saturation and air flux on combustion kinetics of high pressure air injection (HPAI) [C]. SPE Western Regional Meeting, Anaheim, California, USA, May 27–29, 2010.
- [24] Barzin Y, Moore R G, Mehta S A, et al. Role of vapor phase in oxidation/combustion kinetics of high-pressure air injection (HPAI) [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, September 19–22, 2010.
- [25] Barzin Y, Moore R G, Mehta S A, et al. Impact of distillation on the combustion kinetics of high pressure air injection (HPAI) [C]. SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, April 24–28, 2010.
- [26] Sarma H K, Yazama 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): 50–60.
- [27] Ren S R, Greaves M, Rathbone R R. Oxidation kinetics of north sea light crude oils at reservoir temperature[J]. Transactions of the IChemE, 1999, 77(5): 385–394.
- [28] Niu B L, Ren S R, Liu Y H, et al. Low-temperature oxidation of oil components in an air injection process for improved oil recovery [J]. Energy Fuels, 2011, 25: 4299–4304.
- [29] 侯胜明, 刘印华, 于洪敏, 等. 注空气过程轻质原油低温氧化动力学 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1): 170–173.  
Hou Shengming, Liu Yinhu, Yu Hongmin, et al. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2011, 35(1): 170–173.
- [30] Li J, Mehta S A, Moore R G, et al. Investigation of the oxidation behaviour of pure hydrocarbon components and crude oils utilizing PDSC thermal technique[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2006, 45(1): 48–53.
- [31] Shahbazi K, Mehta S A, Moore R G, et al. The effect of oxygen partial pressure on oxidation of an oil base liquid [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 59: 195–203.
- [32] Jia H, Yuan CD, Zhang YC, et al. Recent progress of high-pressure air injection (HPAI) process in Light Oil Reservoir: laboratory investigation and field application[C]. SPE Heavy Oil Conference Canada, Calgary, Alberta, Canada, June 12–14, 2012.
- [33] Hughes B L, Sarma H K. Burning reserves for greater recovery? Air injection potential in Australian light oil reservoirs [C]. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Adelaide, Australia, September 11–13, 2006.
- [34] Gutiérrez D, Miller R J, Taylor A R, et al. Buffalo field high-pressure-air-injection projects: technical performance and operational challenges [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2009, 12(4): 542–550.
- [35] Kumar V K, Gutiérrez D, Moore R G, et al. Air injection and waterflood performance comparison of two adjacent units in the buffalo field[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2008, 11(5): 848–857.
- [36] Greaves M, Ren S R, Rathbone R R, et al. Improved residual light oil recovery by air injection (LTO process) [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2000, 39(1): 57–61.
- [37] Onishi T, Okatsu K, Takabayashi K, et al. Applicability study about high pressure air injection into light oil reservoirs[J]. Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology, 2008, 73(6): 479–486.

(责任编辑 刘志远)

## 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿: [www.kjdb.org](http://www.kjdb.org)。