文章编号-1673-5005(2012)03-0121-05

# 注气体积和轻质油藏空气驱机制的关系探讨

任韶然1,杨昌华1,2、侯胜明1,3、刘印华4,林伟民2

(1. 中国石油大学 石油工程学院,山东 青岛 266580;2. 中石化中原油田 采油工程技术研究院,河南 濮阳 457001; 3. 海南省工业和信息化厅,海南海口 570204;4. 中石油煤层气有限责任公司,北京 100028)

摘要:通过细长管、填砂管氧化和驱替等一系列室内试验以及绝热条件下注空气过程的数值模拟研究注空气体积及 不同注气阶段和轻质油藏注空气驱油机制的关系。根据试验和数值模拟分析结果,与其他气驱过程比较,给出典型 轻质油藏空气驱替试验可能取得的原油采收率与注气体积关系理论曲线。结果表明,轻质油藏在不同注气体积条 件下具有不同的驱油机制:注气体积小于0.5V。(V。为孔隙体积)即气体突破之前,烟道气驱为主要的驱油机制,驱油 过程为一非混相气驱过程;注气体积大于0.5%。即气体突破之后,烟道气和高温反应带共同作用的驱替作用表现为 其主要机制:当反应带逐步推进至接近产出端时,反应带的热效应有可能成为重要的驱油机制。 关键词:轻质油藏;注空气;驱油机制;热前缘;氧气消耗 中图分类号:TE 357.7 文献标志码·A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.020

## Relationship between air volume and oil-recovery mechanism for light oil air injection process

REN Shao-ran<sup>1</sup>, YANG Chang-hua<sup>1,2</sup>, HOU Sheng-ming<sup>1,3</sup>, LIU Yin-hua<sup>4</sup>, LIN Wei-min<sup>2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Oil Production Engineering Technology Institute, Zhongyuan Oilfield Branch Company, SINOPEC, Puyang 457001, China;

3. Industry and Information Technology Department of Hainan Province, Haikou 570204, China;

4. PetroChina Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100028, China)

Abstract: The relationship between volume of air injected and oil-recovery mechanism for a light oil air injection process (LOA1) was studied through a series of laboratory experiments and numerical simulation including slim-tube tests, sand-pack displacement tests and numerical simulation of an adiabatic reaction process of LOAI. Based on the experimental and numerical simulation results and in comparison with other gas injection processes, a theoretical curve was given, which could be used for predicting the oil-recovery factor as a function of volume of air injected for oil displacement experiment under typical light-oil reservoir conditions. The results show that LOAI process may have different mechanisms during different injection stages related to the volumes of air injected. Up to  $0.5V_n$  (porous volume) of air is injected (before gas breakthrough), the prevail oil recovery mechanism is flue gas driving, which is an immiscible gas flooding process. When the injected volume of air is over  $0.5V_o$  (affter gas breakthrough), the combination of flue gas driving and the thermal effect induced by the oxidation may become an important oil recovery mechanism. Finally, thermal effect may become the dominate oil recovery mechanism when the thermal front approaches oil producers.

Key words: light oil reservoir; air injection; oil recovery mechanisms; thermal front; oxygen consumption

#### 问题的提出 1

到高温高压轻质油藏中,注入的氧气和部分原油发 生低温氧化反应生成少量 CO2,同时和空气中的氮 

收稿日期:2011-10-10

基金项目:中国石化公司先导性科技项目(P06041)

作者简介:任韶然(1960-),男(汉族),山东烟台人,教授,博士生导师,主要从事注空气提高采收率、CO,地质埋存、水合物抑制和开采研究。

机制目前还没有统一认识。Fassihi 等<sup>[3]</sup>从现场经 验和工艺设计方面总结轻质油藏注空气的驱油机制 按重要性依次为燃烧原油产生高的驱替效率、油藏 迅速再加压、烟道气抽提原油、原油膨胀及非混相气 驱。另外,还描述了以下3个可能的机制:自发点燃 和完全的氧气消耗、维持油藏压力(高于泡点压 力)、产生的烟道气和原油近混相<sup>[3]</sup>: Ren 等<sup>[45]</sup>于 1999年提出了油藏注空气低温氧化工艺原理,将轻 质油藏注空气近似为低温氧化反应产生烟道气驱的 过程:Clara 等<sup>6</sup> 也认为轻质油藏注空气有类似于常 规气驱的作用,其驱油机制按重要性依次为烟道气 驱扫、油田再加压、原油膨胀、降黏、抽提原油轻质组 分及热效应:蒋有伟等<sup>[7]</sup>认为,低渗透轻质油藏注 空气首先起到有效补充或维持油层压力的作用,整 个过程中氮气驱对总采收率的贡献为 69%, 温度升 高和二氧化碳的贡献分别为 26.7% 和 4.3%。目前 研究人员已经普遍认识到轻质油藏注空气和注烟道 气在驱油机制上有着很大区别,前者可为热采过程, 后者近似为等温气驱过程<sup>[89]</sup>。

对于注气体积(注气过程的不同阶段)和空气 驱油机制的关系,目前也存在很多不同认识。Fassihi 等:91利用数值模拟方法,在一维轻质油(35°API) 油藏模型中比较了注空气和注烟道气条件下原油产 量的响应关系,结果发现:在注入气达到2倍烃类孔 隙体积(V<sub>H</sub>)之前,注空气和注烟道气的产油量响应 是相同的;超过2V<sub>H</sub>后,燃烧前缘驱替原油突破,使 产油量迅速增加,然后随着气油比增大,产油量降 低。在集油带突破之前,集油带前的原油实际上受 到同样的气驱作用,因而产油速率是一样的。注空 气形成的"火驱"集油带,其尺度和含油饱和度都比 烟道气的大,所以当其突破时,产油量迅速增加。 De Zwart 等<sup>10]</sup>在三维轻质油(36°API)油藏模型中 进行了注空气数值模拟研究,并比较了等温模拟和 燃烧模拟的结果,发现二者在前两年产油量响应相 似,两年后燃烧工艺方案的产油量开始超过等温方 案,因为模拟预测的燃烧前缘在两年后将到达生产 井。Gutierrez 和 Montes 等,<sup>11-12]</sup>通过试验,进行了轻 质油的注烟道气和燃烧管试验研究,并将其结果进 行了对比,发现在注入1V。(V。为孔隙体积)的空气 之后,烟道气驱的细长管和岩心试验的增油量都很 小,而燃烧管在燃烧前缘的热效应下开始产出大量 "额外"的原油。这可能是因为油藏注空气的热效 应对采收率的贡献取决于燃烧和反应部分占油藏总 体积的比值,这一比值在注入1V。空气之前较小,氧 化反应的热效应需要大量注空气后才能体现出来。 上述研究表明,在轻质油藏注空气过程中,产油量和 采收率与注入的空气体积有很大关系。

为揭示轻质油油藏不同注气体积下的驱油机 制,笔者在模拟轻质油藏条件下,进行一系列的细长 管注空气、填砂管注空气试验及绝热条件下注空气 过程的数值模拟研究,分析不同条件下的原油采收 率和注入空气体积的关系,为试验结果分析和现场 注空气工艺设计提供参考。

## 2 试验装置和方法

室内试验采用的原油均取自胜利油田某注空气候选区块,地层原油的黏度为1.6 mPa・s,原油重度为32.9°API,油藏压力为25 MPa,油藏温度为109℃。

细长管及填砂管试验的主要目的是在典型候选 油藏条件下,对比不同注气体积下的驱油效率,分析 空气和氧化反应产生的烟道气与原油的混相状态及 其对驱油效率的影响。静态和动态氧化试验结果表 明<sup>[4,13-4]</sup>,注空气过程中产生的烟道气中二氧化碳 含量最多为14%,可以认为烟道气的最小混相压力 和纯氮气接近<sup>[2]</sup>,而空气最小混相压力也可认为和 氮气接近,所以在油藏条件下注空气和烟道气驱过 程中的混相作用接近。

细长管试验中采用的细长管内径为8 mm,长度 为5 m,内部充填石英砂,整个细长管放置在恒温箱 中。试验过程中先饱和地层水,在常温常压下测量 渗透率,再饱和原油样品。试验过程中以 1.45 m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup> · h)的速率(通量)注空气,在整个过程中记录 产油和产水量,待气体突破后每隔一定时间采样测 量产出气中氧气和二氧化碳含量。

填砂管试验装置及操作过程已经在文献[13]、 [14]中作了详细描述,填砂管内径为 25 mm,内部 长度为 700 mm。试验过程中为实现填砂管模型与 实际油藏的相似性,采用真实油藏破碎岩心及不同 粒径的石英砂进行混合配比,并且加入少量高岭土。 在填砂过程中依次向填砂管中加入少量混合砂粒进 行夯击压实,经多次填制最终选出两组与目标油藏 渗透率相近的填砂管模型。两组试验填砂管的孔隙 度分别为 30.9%和 33.2%,渗透率分别为 17×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>和 39×10<sup>-3</sup>μm<sup>2</sup>,初始含油饱和度分别为 59.4% 和 63.2%。其试验操作过程与常规气驱过程相同, 只是在气体突破后每隔一定时间采样测量产出气中 氧气和二氧化碳含量。试验条件及主要结果如表 1 所示。

表 1 试验条件和主要结果 Table 1 Experimental conditions and results

编号	注入气体	注入速率 v/ (m <sup>3</sup> · m <sup>-2</sup> · h <sup>-1</sup> )	温度 θ/℃	压力 p/MPa	原始含油饱和度 S <sub>o</sub> /%	总采收率 R/%	备注
试验1	空气	1. 45	109	25	85.2	48	细长管
试验2	空气	2.96	109	25	59.4	58	填砂管
试验3	空气	2.9 <del>6</del>	109	25	63.2	59	填砂管
数值模拟	空气	2.96	109 ~ 300	25	59.4	76	绝热填砂管

## 3 试验结果分析

#### 3.1 细长管注空气试验

图1为细长管试验中原油采收率和产出气中 O<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>含量随注气体积变化关系。由图1可以 看出,气体突破发生在0.38V<sub>p</sub>时,其采收率为 40%,此时O<sub>2</sub>含量为2.8%,CO<sub>2</sub>含量为0.7%。随 着注入量的增加,采收率进一步提高,直到注气体积 为0.5V<sub>p</sub>时采收率达到45%,以后基本不再增加。 突破后O<sub>2</sub>含量逐渐升高至16%,然后随注空气量 增加缓慢降低,最终稳定在13%左右。CO<sub>2</sub>含量一 直在缓慢上升,最终维持在4%左右。从整个驱替 过程可以清楚地看出,在试验条件下,由于低温氧化 作用,在较长的氧化驱替管内能有效消耗氧气,并产 生类似于烟道气驱的典型非混相气驱过程。





in experiment 1

#### 3.2 填砂管注空气试验

两组填砂管试验的原油采收率随注气体积变化 较为接近(图 2)。其中试验 2 气体突破发生在 0.36V,处,对应的原油采收率为 50%,产出气中 0, 含量为 14%。当注气量达到 0.5V,时,采收率达到 56%,以后增加量较小。随注气量的增大,产出气中 0,含量持续上升至接近原始的 21%,整个过程产气 中 C0,含量维持在 0.5% 左右。说明在油藏温度 下,原油的氧化速率较慢,氧气在较短的填砂管内很 难达到有效消耗。





in produced gas versus volumes of air injected in experiments 2 and 3

#### 3.3 数值模拟绝热氧化管试验

由于试验条件限制无法做到模拟真实油藏的绝 热环境,但可以通过数值模拟来拟合和分析等温和 绝热氧化管试验中的热效应。其中轻质原油低温氧 化反应模型采用改进的低温氧化反应模型<sup>[14]</sup>。对 于绝热氧化管试验数值模拟采用一维直角坐标模 拟,模型管长 700 mm,分为 35 个网格,垂直于流向 方向的截面积相当于25 mm 的圆管,与上述的填砂 管试验相同。每个网格块都有相同的初始含油饱和 度。不考虑重力作用和毛管力影响,注入端以恒速 空气注入,出口端以等温试验中的出口回压为参考 定压生产。模拟结果见图 3。由图 3 看出:在注入 0.5V, 空气后原油采收率便基本不再增加,达到 54%:然后采收率几乎以恒定的速率缓慢上升,而当 反应前缘接近产出端时、油产量和采收率迅速增加。 这一现象可以解释为注空气过程中形成稳定的反应 带后,由反应带和烟道气共同作用驱替原油,所以采 收率缓慢上升;当反应带接近产出端时,反应带前缘 直接驱替集油带原油产出,表现为原油采收率迅速 上升。反应带和烟道气的共同驱替作用主要体现在

以下3个方面:①反应带驱替过的区域具有较高的 微观驱油效率,可以超过85%,同时在反应带前缘 会通过蒸发一冷凝作用形成集油带;②集油带可降 低气相渗透率,使气体改变流动方向,从而扩大波及 体积;③烟道气会驱替部分集油带原油,提高总的驱 替效率。





#### 4 试验结果讨论

根据以往试验结果和现场经验分析, Gates 等给 出了典型的混相气驱、非混相气驱、Gates 和 Ramey 式的火烧油层、燃烧前缘驱替过程中原油采收率随 注气体积(或燃烧体积)变化的理论曲线<sup>[15]</sup>(图4)。 完全混相驱中注入剂和被驱替原油的界面张力降为 零,假设注入气体能够波及绝大部分多孔介质, 那么 理想条件下 1V<sub>p</sub> 注气体积几乎能达到 90% 以上的 原油采收率。对于非混相气驱, 流度比差异和界面 张力会影响原油通过孔道, 在 0.5V<sub>p</sub> 的注气体积时 能达到 50% 的采收率, 气体突破之后原油采收率便 不再增加。"火烧油层"和"燃烧前缘驱替"过程能 产生持续稳定的驱替效果, 采收率可超过 80%。

根据试验和数值模拟结果,总结出一维轻质油 藏注空气(绝热) 驱替试验理论曲线(图4)的特征 为:①注气体积小于0.5V<sub>p</sub>即气体突破之前,烟道气 驱为主要驱油机制,为非混相气驱,采收率能达到 50%;②注气体积大于0.5V<sub>p</sub>即气体突破之后,由烟 道气和反应带共同作用驱替原油为主要机制,采收 率缓慢上升;③当反应带接近产出端,反应带热前缘 的蒸发—抽提—冷凝作用等为主要驱油机制,采收 率可迅速上升超过75%。

本研究的目标区块为胜利油田某一进行注空气 (作为二次采油)的低渗透轻质油区块,原始含油饱 和度大于 50%。研究结果表明,在注空气过程中, 原油和就地产生的烟道气在油藏条件下不能达到有



图 4 不同条件下气驱理论曲线 Fig. 4 Theoretical curves of different gas displacement processes

效混相,有可能导致早期气体突破。气体突破时可 能伴随大量的原油产出,所以只要安全控制(产气 中氧气含量很低),持续注入大量的空气在经济上 仍然是可行的,但需要根据生产实际情况,适当调整 注采比例和油井关闭和开启,实现成本最优化。

在注空气技术应用中,实际轻质油藏注空气过 程可能存在以下两种情况:①目标油藏含油饱和度 很大(大于50%)时,在早期空气和烟道气驱阶段, 产生的烟道气可以和原油达到较好的混相效果,以 实现较高的气驱驱替效率;②目标油藏为水驱后期 油藏,剩余油饱和度较低(S\_<30%),有一定的提高 采收率潜力。对于第一种情况,Shokoya 等通过一系 列室内驱替试验证明,虽然在高达46 MPa 压力及 100 ℃左右的温度下,注空气仍不能实现真正的混 相驱替[16],但轻质油与反应生成的烟道气可产生一 定混相效果:既有混合蒸发和冷凝气驱的作用,又有 反应生产的热效应,所以注空气的驱油效果要优于 常规的非混相气驱(氮气和烟道气),即使在油藏压 力不太高的条件下,注空气技术也是可行的。对于 第二种情况,如果气体早期突破,再持续注人大量的 空气,因为剩余油饱和度太低,继续增油的潜力可能 不会太大,在经济上已经不支持再注入更大体积的 空气。但是,通过辅助于其他提高波及效率的工艺, 如采用注空气泡沫调驱,进一步提高采收率仍是可 能的。

## 5 结 论

(1)室内试验和油藏模拟得到的驱油机制和过程为:①注气体积小于 0.5V,即气体突破之前,烟道 气驱为主要驱油机制,即为非混相气驱;②注气体积 大于 0.5V,即气体突破之后,由烟道气和高温反应 带共同作用驱替原油为其主要机制,采收率稳定上 升;③当反应带逐步推进并接近产出端,反应带的热效应(如原油其组分的蒸发-冷凝作用)有可能成为 重要的驱油机制。

(2)典型轻质油藏注空气驱替试验注气体积和 原油采收率关系理论曲线体现了原油低温氧化反应 产生热效应的增油效果。

(3)在较高油藏温度下,从完全消耗氧气及提 高采收率的角度考虑可将轻质油藏注空气工艺作为 低温氧化-气驱和高温氧化-热采相结合的过程进 行设计,这样可以在保证安全的前提下充分发挥氧 化反应热效应的驱油作用,最大程度提高采收率。

### 参考文献:

- MOORE R G, MEHTA S A, URSENBACH M G. Air injection for oil recovery [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2002,41(8):16-19.
- [2] TURTA A T, SINGHAL A K. Reservoir engineering aspects of light-oil recovery by air injection [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2001,4(4):336-344.
- [3] FASSIHI M R, YANNIMARAS D V, KUMAR V K, et al. Estimation of recovery factor in light-oil air-injection projects [J]. SPE Reservoir Engineering, 1997,12(3): 173-178.
- [4] REN S R, GREAVES M, RATHBONE R R. Oxidation kinetics of North Sea light crude oil at reservoir temperature [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1999,77(A5):385-394.
- [5] REN S R, GREAVES M, RATHBONE R R. Air injection LTO process: an IOR technique for light oil reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 2002, 7(1):90-98.
- [6] CLARA C, QUENAULT G, NGUYEN T H. Laboratory studies for light oil air injection projects: potential application in Handil field [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2000,3(3):239-248.
- [7] 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 You-wei, ZHANG Yi-tang, LIU Shang-qi, et al. Displacement mechanisms of air injection in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(4):471-476.

- [8] GUTIERREZ D, MOORE R G, MEHTA S A, et al. The challenge of predicting field performance of air injection projects based on laboratory and numerical modeling[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48 (4):23-34.
- [9] FASSIHI M R. Improved phase behavior representation for simulation of thermal recovery of light oils [R]. SPE 24034, 1992.
- [10] DE ZWART A H, van BATENBURG D W, TSOLAKI-DIS A, et al. The modeling challenge of high pressure air injection [R]. SPE 113917, 2008.
- [11] GUTIERREZ 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.
- [12] MONTES A R, GUTIERREZ D, MOORE R G, et al. Is high pressure air injection (HPAI) simply a flue-gas flood [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2010,49(2):56-63.
- [13] HOU S M, REN S R, WANG W, et al. Feasibility study of air injection for IOR in low permeability oil reservoirs of Xinjiang Oilfield China [R]. SPE 131087, 2010.
- [14] 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):169-173.
  HOU Sheng-ming, LIU Yin-hua, YU Hong-min, et al. Kinetics of low temperature oxidation of light-oil in air injection process [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(1): 169-173.
- [15] GATES C F, RAMEY H J. A method for engineering in-situ combustion oil recovery projects [J]. Journal of Petroleum Technology, 1980,32(2):285-294.
- [16] SHOKOYA O S, 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 Energy Resources Technology, 2002,41(10):58-67.

(编辑 韩国良)