文章编号:1000-4092(2020)01-080-06

冀东浅层稠油油藏CO_2/N_2复合气体吞吐提高采收率的可行性*

郝宏达[1],侯吉瑞[2],黄捍东[1],赵凤兰[3],刘怀珠[4]

(1. 中国石油大学(北京)地球物理学院,北京 102249;2. 中国石油大学(北京)非常规科学技术研究院,北京 102249;3. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249;4. 中国石油冀东油田分公司钻采工艺研究院,河北 唐山 063000)

摘要:冀东浅层稠油油藏开展CO_2吞吐取得了较好的增油效果,但长期注CO_2导致的井筒腐蚀等生产问题日益凸显;N_2是优良的增能介质,且来源广、性能稳定,将二者结合形成复合气体,是冀东油田CO_2吞吐后的储备技术之一。为对比不同注气介质的增油效果,分别设计了5种摩尔比例的CO_2/N_2复合气体(1:0(纯CO_2)、4:1、7:3、1:1和0:1(纯N_2)),并开展了相应的注气膨胀实验和注气吞吐物理模拟实验。注气膨胀实验结果表明,CO_2与稠油的作用能力要明显好于N_2;复合气体与原油的作用能力介于纯CO_2与纯N_2之间,且随着复合气中CO_2比例的增加,其溶解降黏和溶解膨胀的效应越明显;当注气量超过20 mol%、摩尔比例超过7:3时,复合气体对稠油的降黏率可达40%以上。注气吞吐实验结果表明,体积比2:1(摩尔比4:1)的复合气体经过4轮吞吐后可提高采收率17.03%,接近纯CO_2的增油效果;该比例的复合气体可实现CO_2溶解降黏和N_2增能的协同效应,有效提高稠油油藏采收率。图7表2参27

关键词:CO_2;N_2;复合气体;稠油;PVT实验

中图分类号:TE357.45 **文献标识码**:A **DOI**:10.19346/j.cnki.1000-4092.2020.01.015

0 前言

冀东油田G区块属于常规稠油油藏,常规开采含水上升快,采收率低。自2010年起,G区块开展了水平井注CO_2吞吐矿场试验,并取得了良好的控水增油效果[1-3]。但随着吞吐轮次的增加,一方面,吞吐增油量逐渐减少,换油率不断下降,吨油成本不断上升[4-8];另一方面,CO_2气体对井筒以及地面管线的腐蚀越来越严重,制约了CO_2气体的进一步推广应用。为了寻求CO_2吞吐后的储备技术,提出了将CO_2与N_2相结合,利用CO_2/N_2复合气体开展单井吞吐,提高浅层稠油油藏的采收率。国内外大量的研究结果表明,CO_2气体注入地层后能够显著降低原油黏度,降低地层油的渗流阻力,同时依靠溶解气驱、膨胀原油等作用改善稠油油藏的开发效果[9-16]。与CO_2相比,N_2气体虽然降黏、膨胀原油的能力较弱,但其在增能、助排和重力驱动等方面具有突出的优势[17-19];且N_2气体来源广、性质稳定,将其与CO_2复合可缓解纯CO_2气体对井筒及地面管线的伤害。近年来,国外已有学者提出CO_2/N_2复合气体提高采收率技术,但大部分应用于煤层气开采[20-22]。国内学者虽然开展了大量的注气提高采收率相关研究,但大多集中于CO_2、N_2、CH_4等单一注气介质提高采收率的效果对比[23-26],而关于CO_2/N_2复合气体提高原油采收率的相关文献则鲜有报道。

本文以冀东油田G区块浅层稠油油藏为研究

* **收稿日期**:2019-03-21;**修回日期**:2019-08-16。

基金项目:国家重大专项"低渗-致密油藏高效提高采收率新技术"(项目编号2017ZX05009-004)。

作者简介:郝宏达(1990–),男,中国石油大学(北京)油气田开发工程专业博士(2018),中国石油大学(北京)地质资源与地质工程流动站在站博士后,通讯地址:102249 北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)新综合楼A321,E-mail:haohongda90@126.com。

背景，开展CO_2/N_2复合气体提高采收率的可行性实验研究。首先，用PVT高压物性分析仪开展注气膨胀实验，分析不同CO_2与N_2比例的复合气体与原油接触后对地层油饱和压力、体积系数、黏度等高压物性的影响；其次，利用室内长岩心开展复合气体吞吐物理模拟实验，对比不同CO_2与N_2比例的复合气体注入后的增压能力和增油效果。结合PVT测试结果和物理模拟的实验结果，系统分析CO_2/N_2复合气体提高稠油油藏采收率的相关作用机理。

1　实验部分

1.1　材料与仪器

实验用油为冀东G区块地层油样；实验用水为G区块模拟地层水，矿化度1572 mg/L，其中含Na^++K^+ 473 mg/L、Mg^{2+} 15 mg/L、Ca^{2+} 22 mg/L；实验用气包括CO_2、N_2，纯度为99.9%。

PVT高压物性分析仪，法国ST公司；7890B型色谱仪，美国安捷伦公司；VISCOlab-PVT型黏度计，美国CVI公司；物理模拟实验装置包括HW-Ⅱ型自控恒温箱、HAS-100型恒压恒速泵（两台）、活塞中间容器（4个）、300×45×45 mm^3岩心夹持器（一套）、回压控制阀、压差变送器及数据采集系统。实验用岩心尺寸为300 mm×45 mm×45 mm，平均孔隙度17.20%，平均渗透率494.2×10^{-3} μm^2，实验用岩心的基础物性参数如表1所示。

表1　实验用岩心的基础物性参数

岩心编号	视体积/mL	孔隙体积/mL	水测渗透率/（10^{-3} μm^2）	孔隙度/%	原始含油饱和度/%
S1	593	106	515	17.88	64.5
S2	605	110	452	18.18	69.2
S3	574	96	573	16.72	53.4
S4	587	102	454	17.38	62.1
S5	599	95	477	15.86	51.9

1.2　地层油高压物性测试及注气膨胀实验

根据中国石油天然气行业标准SY/T 5542—2009《油气藏流体物性分析方法》[27]对G区块地层油进行高压物性测试。将一定量的地层油样品转到PVT测试筒中，升温至地层温度65℃，加压至地层压力18.23 MPa，充分搅拌使其成为稳定的单相状态；在地层条件下测定其饱和压力、体积系数等相关参数；利用VISCOlab-PVT黏度计测定其在地层温度、7.34 s^{-1}条件下的黏度随压力变化情况，同时利用色谱仪对原油的组分组成进行分析。

注气膨胀实验步骤如下：① 根据复合气体中CO_2和N_2的摩尔比例和摩尔分数以及原油的平均相对分子质量，计算所需CO_2、N_2和油样的体积；② 将地层油和复合气体注入PVT筒中充分搅拌均匀后，在地层条件下测定饱和压力、黏度、体积系数等参数；③ 改变CO_2/N_2复合气体与地层油的比例，重复上述步骤，测定不同气体注入量条件下的物性参数；④ 改变复合气体中CO_2和N_2的摩尔比例分别为1∶0（纯CO_2）、4∶1、7∶3、1∶1、0∶1（纯N_2），再次重复上述测试过程，测定不同CO_2/N_2摩尔占比对地层油高压物性的影响。

1.3　CO_2/N_2复合气体吞吐物理模拟实验

CO_2/N_2复合气体吞吐物理模拟实验流程图如图1所示。长岩心吞吐实验中，复合气体CO_2与N_2的摩尔比例分别为1∶0（纯CO_2）、4∶1、7∶3、1∶1、0∶1（纯N_2）。根据CO_2和N_2的摩尔质量以及其在地层条件下的密度参数，计算可得复合气体中CO_2与N_2的体积比对应为1∶0（纯CO_2）、2∶1、1∶1、1∶2、0∶1（纯N_2）。吞吐实验的具体操作过程如下：① 将岩心放置于岩心夹持器中，抽真空，饱和地层水，测定孔隙体积，并在65℃条件下测定岩心渗透率；② 利用回压控制阀设定岩心出口端的压力为5 MPa，向岩心中饱和油至束缚水饱和度，计算原始含油饱和度；③ 以岩心的入口端作为注气端面和采出端面，设定注入速度0.3 mL/min（地下流速）向岩心中注入气体，直至注入量达到0.05 PV（地下条件）；④ 闷井12 h后，岩心入口端连接回压阀，并设置压力为5 MPa，开井生产直至岩心压力再次降至5 MPa为止，实验过程中记录产油量和压力数据；⑤ 重复步骤③

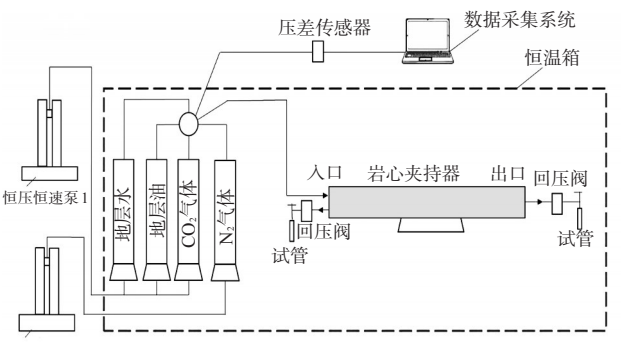


图1　CO_2/N_2复合气体吞吐实验装置流程图

和步骤④，开展共计4轮吞吐实验，累计注气量0.20 PV（地下条件），实验结束后计算复合气体吞吐的采收率。⑥ 改变复合气体中CO_2和N_2的比例，重复步骤①至步骤⑤，对比不同比例CO_2/N_2复合气体的增压能力和增油效果。

对于纯CO_2和纯N_2气体（CO_2/N_2比例分别为1∶0和0∶1），由于注入的是单一介质，此时一台恒速恒压泵即可满足注气要求。对于2∶1、1∶1和1∶2比例的复合气体，在注气过程中则需要两台注气设备，例如，注入2∶1比例复合气体时，CO_2的注气速度需设置为0.2 mL/min，N_2的注气速度需设置为0.1 mL/min。

2 结果与讨论

2.1 G区块地层油高压物性

G区块地层油高压物性测试结果表明，地层油的饱和压力为11.20 MPa，气油比20.00 m^3/m^3，体积系数1.058，密度0.8932 g/cm^3，单脱死油密度0.9643 g/cm^3。表2给出了G区块地层油的组分组成。CO_2、N_2和C_1组分占比为22.11 mol%，中间烃类C_2～C_7占比8.59mol%，C_{8+}组分占比69.30mol%。地层油黏度测试结果如图2所示。在地层温度和压力（65℃、18.23MPa）条件下，地层油黏度为58.21 mPa·s，地面脱气原油黏度为333.56 mPa·s，为典型的稠油油藏。

表2 G区块地层油组分组成

组分	含量/mol%	组分	含量/mol%	组分	含量/mol%	组分	含量/mol%
N_2	1.800	C_8	0.240	C_{18}	2.360	C_{28}	1.940
C_1	20.310	C_9	0.830	C_{19}	2.080	C_{29}	1.860
C_2	6.523	C_{10}	0.450	C_{20}	1.770	C_{30}	1.620
C_3	1.152	C_{11}	0.880	C_{21}	1.670	C_{31}	1.150
iC_4	0.384	C_{12}	1.420	C_{22}	1.530	C_{32}	0.900
nC_4	0.256	C_{13}	1.970	C_{23}	1.420	C_{33}	0.720
iC_5	0.026	C_{14}	2.350	C_{24}	1.310	C_{34}	0.610
nC_5	0.033	C_{15}	2.170	C_{25}	1.380	C_{35}	0.560
C_6	0.066	C_{16}	2.330	C_{26}	1.520	C_{36+}	27.930
C_7	0.150	C_{17}	2.550	C_{27}	1.780	Total	100

注：C_{36+}密度为0.9580 g/cm^3，相对分子质量为672.7。

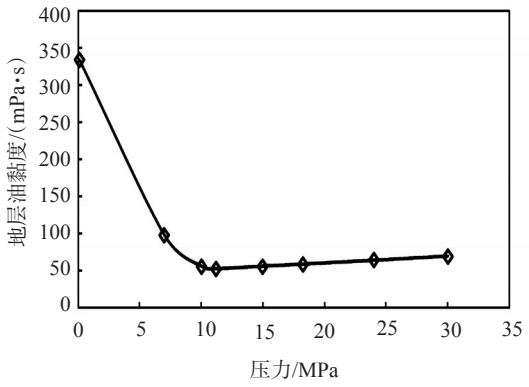
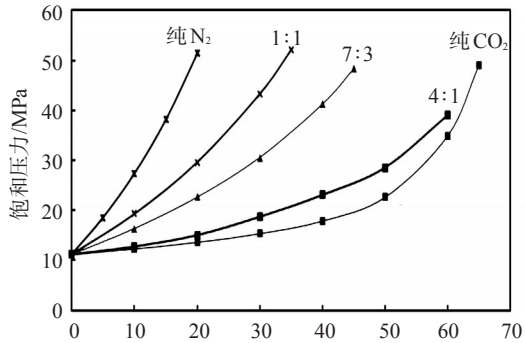


图2 G区块地层油黏度与压力关系曲线

2.2 复合气体对原油高压物性的影响

图3给出了不同比例CO_2/N_2复合气体注入后地层油饱和压力的变化情况。随着气体注入量的增加，地层油饱和压力逐渐增大。对比纯CO_2与纯N_2，饱和压力对于N_2气体更为敏感，当注气量增加至20 mol%时，注入N_2可使饱和压力增至51.39 MPa，而注入CO_2仅使饱和压力增至13.6 MPa。复合气体对饱和压力的影响介于纯N_2与纯CO_2之间，同样以注气量20mol%为例，CO_2与N_2的摩尔比4∶1、7∶3和1∶1的复合气体使得地层油饱和压力分别升至15.04、19.62和22.63 MPa。

饱和压力曲线的变化同时可以反映出不同注气介质在地层油中的溶解规律。当压力达到30 MPa时，57 mol%的CO_2气体可溶于57 mol%的地层油中，而仅有12 mol%的N_2可溶于88 mol%的地层油中，即CO_2气体在稠油中的溶解能力要明显优于N_2的。复合气体在地层油中的溶解能力介于纯CO_2和纯N_2之间，且随着复合气体中CO_2比例的增加，复合气体在稠油中的溶解能力增强。在压力为30



图中比值为CO_2与N_2的摩尔比

图3 不同比例CO_2/N_2复合气体注入后地层油饱和压力的变化规律

MPa的条件下，CO_2与N_2的摩尔比1∶1、7∶3和4∶1的复合气体的饱和溶解度分别为18、29和52 mol%。

不同比例CO_2/N_2复合气体对地层油体积系数的变化情况如图4所示。与N_2相比，CO_2气体具有相对较好的膨胀原油能力。当注气量为20 mol%时，CO_2-地层油体系的体积系数为1.095，N_2-地层油体系的体积系数为1.075；复合气体-地层油体系的体积系数介于CO_2-地层油体系与N_2-地层油体系之间，且随着复合气体中CO_2比例的增加，复合气体膨胀原油的能力增强。但总体来讲，复合气体中CO_2/N_2的比例对原油体积系数的影响相对较小，即相同注气量条件下，不同注气介质对稠油的膨胀能力相差不大。相对地，气体注入量对于G区块稠油体积系数的影响较大，即随着注气量的增加，地层油体积系数迅速增大，气体膨胀原油的效应更为明显。

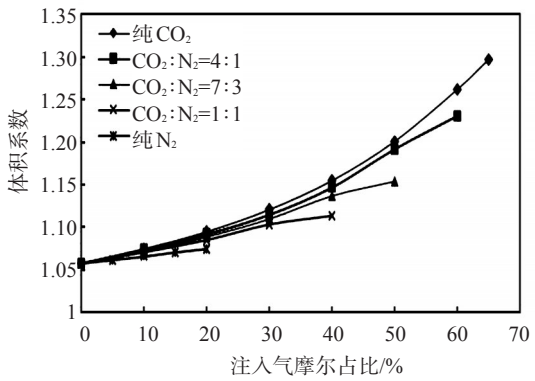


图4　不同比例CO_2/N_2复合气体注入后地层油体积系数的变化规律

图5给出了不同比例CO_2/N_2复合气体注入后地层油黏度的变化情况。与体积系数的变化规律不同，注入气体对于地层油黏度的影响较大，即对于G区块稠油，溶解降黏效应是注气提高采收率的主要机理；且随着注气量的增加，气体的降黏作用明显。与N_2相比，CO_2气体具有显著的降黏能力。当注气量达到20 mol%时，注入CO_2可使地层油黏度由52.13 mPa·s降至27.02 mPa·s，降黏率达到了48.17%；而N_2仅可使地层油黏度降至45.49 mPa·s，降黏率为12.74%。受CO_2气体和N_2气体降黏能力的巨大差异，复合气体中CO_2比例越高，其降黏效果越好；当注气量超过20 mol%、CO_2/N_2比例超过7∶3时，复合气体对地层油的降黏率可达40%以上。

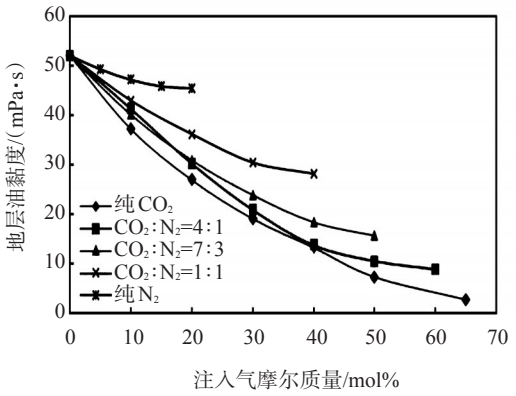


图5　不同比例CO_2/N_2复合气体注入后地层油黏度的变化规律

2.3　复合气体吞吐的增油效果及增能效果

为了对比不同比例CO_2/N_2复合气体吞吐的增油效果，进一步明确复合气体提高采收率的作用机制，开展了相关的室内物理模拟实验。图6为不同比例CO_2/N_2复合气体增油的效果对比。复合气体中CO_2比例越高，其增油效果越好。经过4轮吞吐后，纯CO_2、2∶1(体积比)复合气、1∶1复合气、1∶2复合气和纯N_2分别提高采收率19.06%、17.31%、13.27%、9.09%和8.09%。纯CO_2吞吐的增油效果最好，2∶1比例复合气吞吐的增油效果接近于CO_2，1∶1比例复合气增油效果居中，而1∶2比例复合气和纯N_2的增油效果最差。

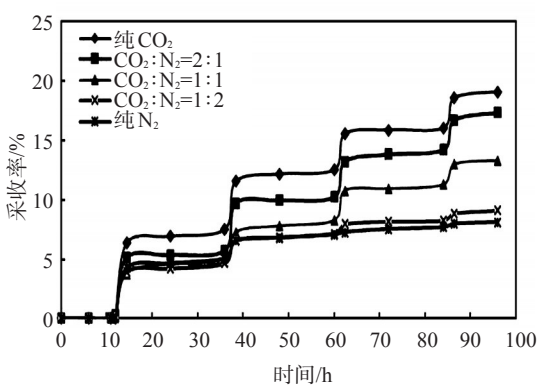


图6　不同比例CO_2/N_2复合气体提高采收率效果对比

图7对比了不同注气介质吞吐实验的压力变化情况。在相同注气量条件下，N_2气体的增压能力最强，其补充地层能量的效果最好；复合气体的增压能力次之，且随着N_2比例的降低，其增压能力越差；CO_2气体的增能效果最差。但另一方面，当CO_2注入岩心后，其压力曲线在闷井过程中先下降后趋于

平稳，这一过程反映了CO_2气体在地层油中的溶解过程，CO_2的溶解能够显著降低地层油的黏度，改善原油的流动能力。在2∶1和1∶1比例复合气体中同样可观察到类似的压降过程，即复合气体对于原油实现了溶解降黏效应。1∶2比例复合气在闷井阶段压力几乎不降，纯N_2实验组的压力不降反升，注入气体在地层油中的溶解能力很弱，仅依靠能量补充的手段很难获得较好的增油效果。

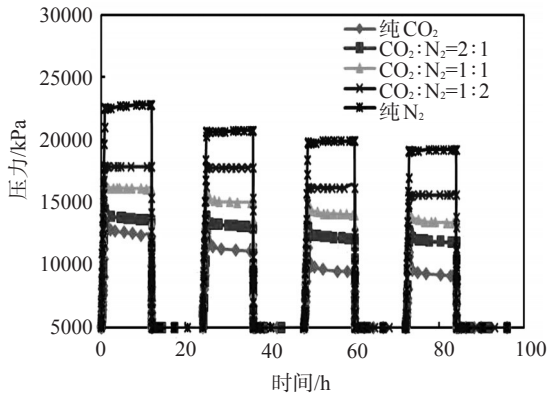


图7 CO_2/N_2复合气体吞吐实验岩心压力变化情况

值得注意的是，2∶1比例（摩尔比4∶1）复合气体的增油效果与纯CO_2气体的增油效果差别不大，虽然该比例复合气体中N_2的存在部分削弱了复合气体的溶解降黏能力，但依靠此部分N_2的增能作用仍可实现其对增油的补偿；当复合气体中N_2体积比超过1/3时，虽然其补充地层能量的能力增强，却无法弥补其对溶解降黏造成的损失，导致复合气体整体的增油效果较差。因此，对于冀东G区块稠油油藏，在实施复合气体吞吐时应对CO_2和N_2的注入比例进行优化，以保证获得较好的开发效果。在本实验条件下，选取体积比2∶1（摩尔比4∶1）的CO_2/N_2复合气体，可实现CO_2溶解降黏和N_2增能的协同效应，有效提高稠油油藏的采收率。

3 结论

冀东油田G区块属于常规稠油油藏，注气膨胀实验结果表明对于此类油藏，应以溶解降黏为主，膨胀原油为辅。CO_2气体溶解降黏、膨胀原油等效应要明显好于N_2气体，可以有效改善稠油的流动能力，提高原油采收率。

CO_2/N_2复合气体与地层油的相互作用机制介于纯CO_2与纯N_2之间，且随着复合气体中CO_2比例的增加，其溶解降黏和溶解膨胀的效应越明显；当注气量超过20 mol%、CO_2/N_2摩尔比例超过7∶3（体积比1∶1）时，复合气体的降黏率可达40%以上。

体积比2∶1（摩尔比4∶1）的CO_2/N_2复合气体经过4轮注气吞吐后可提高原油采收率17.03%，接近纯CO_2气体的增油效果；该比例的复合气体可实现CO_2溶解降黏和N_2增能的协同效应，有效提高稠油油藏的采收率。

参考文献：

[1] 李国永，叶盛军，冯建松，等. 复杂断块油藏水平井二氧化碳吞吐控水增油技术及其应用[J]. 油气地质与采收率，2012，19（4）：62-65.

[2] 曹亚明，郑家朋，孙蓉. 冀东油田浅层非均质油藏CO_2驱数值模拟与方案设计[J]. 石油坦然去学报（江汉石油学院学报），2014，36（5）：125-127.

[3] 马桂芝，陈仁保，王群一，等. 冀东复杂断块油藏CO_2吞吐典型井剖析[J]. 石油地质与工程，2013，27（5）：107-111.

[4] 盖长城，史英，王淼，等. 冀东油田浅层CO_2吞吐接替潜力[J]. 大庆石油地质与开发，2016，35（5）：132-135.

[5] 史英，盖长城，颜菲，等. 稠油油藏CO_2吞吐合理吞吐轮次[J]. 大庆石油地质与开发，2017，36（1）：129-133.

[6] 陈举民，李进，曹红燕，等. 浅层稠油油藏水平井CO_2吞吐机理及影响因素[J]. 断块油气田，2018，25（4）：515-520.

[7] 张娟，周立发，张晓辉，等. 浅薄层稠油油藏水平井CO_2吞吐效果[J]. 新疆石油地质，2018，39（4）：485-491.

[8] 黄琴，郭平，张俊. 国内外稠油油藏注CO_2吞吐提高采收率的应用现状[J]. 承德石油高等专科学校学报，2008，10（2）：4-6.

[9] AHADI A，TORABI F. Effect of light hydrocarbon solvents on the performance of CO_2-based cyclic solvent injection（CSI）in heavy oil systems[J]. J Petrol Sci Eng，2018，163：526-537.

[10] Haddad A S，Gates I. CO_2-based heavy oil recovery processes for post-CHOPS reservoirs[J]. J CO_2 Utiliz，2017，19：238-246.

[11] IVORY J，CHANG J，COATES R，et al. Investigation of cyclic solvent injection process for heavy oil recovery[J]. J Can Petrol Technol，2010，49（9）：22-33.

[12] SHI L X，LIU P，SHEN D，et al. Improving heavy oil recovery using a top-driving，CO_2-assisted flooding method in deep and pressure-depleted reservoirs[J]. J Petrol Sci Eng，2019，173：922-931.

[13] SHOKRI A R，BABADAGLI T. Feasibility assessment of heavy-oil recovery by CO_2 injection after cold production with sands：Lab-to-field scale modeling considering nonequilibrium foamy oil behavior[J]. Appl Energ，2017，205：615-625.

[14] 欧阳传湘，杜晓霞. 超稠油物性及其与CO_2相互作用机理研究[J]. 钻采工艺，2010，33（4）：90-93.

[15] 孙雷，庞辉，孙扬，等. 浅层稠油油藏CO_2吞吐控水增油机理研

究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，36(6)：88-94.
[16] 吴光焕，夏志增，时凤霞，等. CO_2对超稠油物性影响的实验研究[J]. 油田化学，2015，32(2)：67-71.
[17] HUDGINS D，LLAVE F，CHUNG F. Nitrogen miscible displacement of light crude oil：A laboratory study[J]. SPE Reservoir Engineering，1990，5(1)：100-106.
[18] 刘欣，林景禹. 河南翻油田氮气辅助蒸汽吞吐技术[J]. 石油地质与工程，2008，22(6)：84-85.
[19] SADOONI M，ZONNOURI A. The effect of nitrogen injection on production improvement in an Iranian rich gas condensate reservoir[J]. Petrol Sci Technol，2015，33：422-429.
[20] SEOMOON H，LEE M，SUNG W. Analysis of methane recovery through CO_2-N_2 mixed gas injection considering gas diffusion phenomenon in coal seam[J]. Energ Explor Exploit，2016，34(5)：661-675.
[21] LIU J X，YAN Y J，XU J F，et al. Replacement micro-mechanism of CH_4 hydrate by N_2/CO_2 mixture revealed by abinitio studies [J]. Comput Mater Sci，2016，123：106-110.
[22] LI B，XU T F，ZHANG G B，et al. An experimental study on gas production from fracture-filled hydrate by CO_2 and CO_2/N_2 replacement[J]. Energ convers Manage，2018，165：738-747.
[23] 郭平，孙雷，孙良田，等. 不同种类气体注入对原油物性的影响研究[J]. 西南石油大学学报，2000，22(3)：60-64.
[24] 朱学东，周淑娟，陈德春，等. CO_2、N_2、化学剂及其复合对陈373块稠油作用的实验与评价[J]. 陕西科技大学学报，2013，31(2)：70-73.
[25] 秦延才，李微，周淑娟，等. 陈373块薄层稠油油藏N_2和CO_2补充地层能量可行性研究[J]. 科学技术与工程，2013，13(14)：3856-3860.
[26] 刘海涛，孙永涛，林涛，等. N_2、CO_2对渤海含气稠油黏度的影响研究[J]. 中国石油和化工标准与质量，2018，38(12)：148-149.
[27] 中华人民共和国石油和天然气行业标准SY/T 5542—2009. 油气藏流体物性分析方法[S]. 2009.

Feasibilty of Gas-EOR Using CO_2/N_2 Mixture for a Shallow-buried Heavy Oil Reservoir in Jidong Oilfield

HAO Hongda[1]，HOU Jirui[2]，HUANG Handong[1]，ZHAO Fenglan[3]，LIU Huaizhu[4]

(*1. College of Geophysics，China University of Petroleum(Beijing)，Beijing 102249，P R of China；2. Institute for Non-conventional Science and Technology，China University of Petroleum(Beijing)，Beijing 102249，P R of China；3. College of Petroleum Engineering，China University of Petrleum(Beijing)，Beijing 102249，P R of China；4. Drilling & Production Technology Research Institute，Jidong Oilfield Branch Company，CNPC，Tangshan，HEbei 063000，P R of China*)

Abstract: Although a remarkable oil increment has been obtained using CO_2 huff-n-puff process in a shallow-buried heavy oil reservoir of Jidong oilfield，production problems especially wellbore corrosions also occur due to the long-term CO_2 injection. N_2 is a kind of gas with wide sources and stable properties，which can be used for energy supplement. Based on the respective properties of CO_2 and N_2，their mixture is then proposed as an alternative technique for enhanced oil recovery(EOR) after CO_2 huff-*n*-puff process. In order to compare different EOR effect using different injecting gas media，CO_2/N_2 mixtures with five different CO_2/N_2 molar ratios(1∶0(pure CO_2)，4∶1，7∶3，1∶1 and 0∶1(pure N_2)) were designed in this paper，and PVT analysis and gas huff-n-puff experiments were conducted in the laboratory. PVT analysis results revealed that CO_2 had a better interactions with the heavy oil compared with N_2. The interactions of CO_2/N_2 mixture and formation oil were between CO_2-oil interactions and N_2-oil interactions，and the abilities of solubility，oil swelling and viscosity reduction for the mixture increased as the CO_2 concentration increased. When the injection gas excessed 20 mol% and CO_2/N_2 molar ratio was higher than 7∶3，the viscosity reduction rate was higher up to 40%. Gas huff-*n*-puff experimental results showed that about 17.03% of oil recovery could be obtained after 4 cycles of 2∶1(CO_2/N_2 molar ratio is 4∶1) mixture injection，which was nearly the oil recovery obtained by pure CO_2 injection. With such a design of CO_2/N_2 ratio for the mixture，a synergetic effect could be achieved with viscosity reduction dominated by CO_2 solubility coupled with energy supplement by N_2 injection，which could then effectively enhance the heavy oil recovery.

Keywords：*CO_2*；*N_2*；*mixture gas*；*heavy oil*；*PVT analysis*