

# 二氧化碳驱油藏产出气回注的可行性及其对驱油效果的影响

李向良

(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

**摘要:** 针对二氧化碳驱过程中产生的大量富含二氧化碳的伴生气回收利用的问题, 开展了产出气直接压缩回注对驱油效果影响的研究, 并分析其影响机制。以胜利油区正理庄油田高89块二氧化碳驱为例, 采用经典的长细管法, 测定该油田地层原油与二氧化碳的最小混相压力, 在此基础上, 利用长岩心物理模拟手段, 测试了纯二氧化碳混相驱的驱油效率和矿场不同阶段产出气的驱油效率。结果表明: 当产出气中二氧化碳含量为72.59%时, 其驱油效率可达76.9%, 基本达到纯二氧化碳混相驱的效果。同时, 根据对不同阶段产出气的组分分析结果, 探讨其组分特点对驱油效率的内在影响机制, 研究认为, 二氧化碳驱油藏产出气无需提纯而直接回注是可行的, 为二氧化碳驱中后期大量产出气的处理提供了新的、可行的解决方法。

**关键词:** 二氧化碳驱 产出气 最小混相压力 长细管实验 长岩心驱替实验 驱油效率

中图分类号: TE357.42

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2016)03-0072-05

## Feasibility of produced gas reinjection during CO<sub>2</sub> flooding and its influence on displacement efficiency

Li Xiangliang

(Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC,  
Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

**Abstract:** Impact of compression and reinjection of the produced gas on displacement efficiency was studied and its mechanism was analyzed to solve the problem of how to recycle and make use of the large amount of CO<sub>2</sub>-rich associated gases during CO<sub>2</sub> flooding. Based on CO<sub>2</sub> flooding pilot test in Gao89 Block of Zhenglizhuang oilfield of Shengli oil province, the minimum miscibility pressure (MMP) between formation oil and CO<sub>2</sub> was measured by long slim tube test method. The displacement efficiency of CO<sub>2</sub> miscible flooding was determined by long core displacement experiment using pure CO<sub>2</sub> and produced gases at various stages. The results show that when the CO<sub>2</sub> content is 72.59%, the displacement efficiency is up to 76.9%, similar to that of pure CO<sub>2</sub> miscible flooding. Moreover, the components of produced gas at different stages were analyzed, and the influence mechanism of gas composition on the displacement efficiency was investigated. The results suggest that the produced gas during CO<sub>2</sub> flooding can be directly reinjected without purification. It provides a new and feasible solution to treat produced gas in the middle and late period of CO<sub>2</sub> flooding.

**Key words:** CO<sub>2</sub> flooding; produced gas; minimum miscibility pressure; long slim tube test; long core displacement experiment; oil displacement efficiency

二氧化碳驱油技术在国外已得到广泛应用, 并获得了良好的经济效益<sup>[1-2]</sup>, 目前在美国已成为实施

方案数和增油量最多的提高采收率技术。在中国, 由于气源的限制, 二氧化碳驱技术在矿场应用较

收稿日期: 2016-01-05。

作者简介: 李向良(1964—), 男, 山东禹城人, 高级工程师, 硕士, 从事提高原油采收率技术研究。联系电话: (0546)8715113, E-mail: lx-liang1964@163.com。

基金项目: 国家科技支撑项目“CO<sub>2</sub>驱油藏工程及注采工艺关键技术研究”(2012BAC24B03)。

少,随着江苏、吉林和胜利等油田一些中小规模二氧化碳气藏的相继发现,再加上二氧化碳捕集纯化技术的提高,二氧化碳资源问题得到一定程度的解决,因此,近年来二氧化碳驱油技术在中国也开始进行现场应用<sup>[3-4]</sup>。

二氧化碳驱油是一种大幅度提高中低渗透油藏采收率的有效技术,但在二氧化碳驱中后期,随着混相带的采出,会产生大量的富含二氧化碳的伴生气,同时由于陆相砂岩油藏的非均质性较强,即使在注气早期,也会产生较严重的气窜。例如,大庆油区的某二氧化碳矿场试验区,部分生产井由于气窜严重,十几天后就大量见气<sup>[5]</sup>;胜利油区高89块二氧化碳先导试验区投产几年来,一些生产井的气窜情况也越来越显著<sup>[6-7]</sup>。

根据胜利油区高89块二氧化碳先导试验区现场监测资料表明,生产井见效后随着原油产量的增加,产出气中二氧化碳含量迅速增大。目前先导试验区的所有中心井和外围一线井均不同程度地产生了气窜,产出气中平均二氧化碳含量已达80%以上。由于产出气中有大量二氧化碳,不能点燃,无法汇入伴生气集输系统。如果分离提纯产出气中的二氧化碳进行重复利用,需要增加设备,加大资金投入;如果直接排放到大气中,会造成二氧化碳这种温室气体重新进入大气,并浪费部分天然气。为此,笔者对二氧化碳驱油藏产出气回注的可行性进行研究,并探讨其对二氧化碳驱油效果的影响。

## 1 实验条件及实验方法

### 1.1 实验条件

**实验用油** 由于地层原油中的溶解气会影响二氧化碳驱的驱油效果,因此实验用油必须真实模拟地层原油的组成,实验用油量很大,无法利用井底高压取样,需要在室内复配模拟地层原油。为此在高89块选取有代表性的高89-4井取得井口脱气原油和套管天然气样品,所有实验用油均为利用现场取得的油气样品按油藏条件复配的模拟地层原油样品。

由于高89块目前地层压力为24 MPa左右,远高于地层原油的原始饱和压力(11.6 MPa),因此,复配地层原油应以在地层温度(126 ℃)下其饱和压力达到11.6 MPa为合格标准。利用法国VINCI公司生产的Fluid Eval500型高温高压PVT物性分析仪测得复配地层原油在126 ℃下的饱和压力为11.4 MPa,非常接近原始饱和压力,说明复配的地层原油是合

格的。

**实验用气** 实验用纯二氧化碳是市场购置,其纯度为99.90%;实验用产出气分别取自高89-1井、高89-9井、高89-10井和高89-24井不同阶段的产出气。利用安捷伦6890N气相色谱仪分析了气样的组成(表1)。

表1 不同阶段产出气及纯二氧化碳组分分析结果

样品来源	CO <sub>2</sub> 含量	C <sub>2</sub> 及以上轻烃含量	N <sub>2</sub> 及甲烷含量
纯天然气	0	19.14	80.86
油井产出气	21.66	17.51	60.83
油井产出气	41.07	15.21	43.72
油井产出气	65.08	10.30	24.62
油井产出气	72.59	8.55	18.86
油井产出气	82.93	5.41	11.66
纯二氧化碳	99.90	0	0.10

**实验用水** 实验用水是根据高89块目前地层水分析资料配制的模拟水,其总矿化度为57 728.9 mg/L,钙镁离子含量为3 400.1 mg/L,水型为氯化钙型,pH值为6.50。

**实验用岩心** 岩心样品取自高89块的取心井高89-8井,经钻取、切割、洗油、孔渗测试等前期处理,选取12块岩心拼接成直径为2.50 cm、长度为95.90 cm的长岩心。其总孔隙体积为81.04 cm<sup>3</sup>,孔隙度为17.22%,气测渗透率为9.11×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,水测渗透率为7.0×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。

### 1.2 实验方法

**最小混相压力测定方法** 为探讨二氧化碳驱油藏产出气直接回注的可行性,需要评价不同阶段产出气的驱油效果,并与纯二氧化碳混相驱的驱油效果进行对比,为此所有驱油实验的实验压力必须统一且要高于二氧化碳与高89块地层原油的最小混相压力。

长细管法测定二氧化碳与地层原油的最小混相压力是中外公认的经典方法,也是最普遍使用的方法<sup>[8-9]</sup>。实验采用法国VINCI公司生产的ST700型长细管混相仪。其中长细管长度为16 m,内径为6.35 mm,孔隙度为32.25%,渗透率为10.0 μm<sup>2</sup>。

实验步骤为:①对长细管模型进行清洗、吹干、抽真空,测定气相渗透率;②饱和甲苯,测定孔隙体积和孔隙度;③升温至地层温度126 ℃,同时控制回压至设定的实验压力,待温度和压力稳定后,开始饱和模拟地层原油,直至采出液中检测不到甲苯为止;④按一定速度注入二氧化碳,开始驱油,定时记录注入量、压力、压差、产油量、产气量等数据,当注

入量约为1.3倍孔隙体积时,结束实验;⑤用甲苯清洗流程,并收集采出液,利用分光光度计分析剩余油量,以验证是否清洗干净;⑥改变压力,重复步骤③—步骤⑤。一般测试5—6个压力的驱油效率,根据SY/T 6573—2003<sup>[10]</sup>确定最小混相压力。

**驱油效率评价方法** 由于二氧化碳与地层原油的混相为多次接触动态混相,其最终驱油效率与实验用岩心的长度密切相关,为准确评价二氧化碳驱的驱油效率,中外均采用长岩心物理模拟流程来评价二氧化碳驱的效果<sup>[11-12]</sup>。本次研究使用了自主研发的长岩心物理模拟流程,具体实验步骤包括:①对长岩心模型进行吹干、抽真空,测试气相渗透率;②再次抽真空岩心,饱和模拟盐水,测试孔隙体积、孔隙度和水相渗透率;③将系统温度升至地层温度126℃,同时回压控制在29 MPa(略高于最小混相压力);④先后用脱气原油和模拟地层原油驱替岩心中的水,直到产出气油比与模拟地层原油一致且不再出水为止,测试束缚水饱和度和原始含油饱和度;⑤连续注入设定气体进行驱油,直至不产油为止,定时记录注入量、驱替压差等,定时计量采出的油气水量,根据产出油量和原始饱和油量计算得到驱油效率。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 最小混相压力的确定

依据高89块的油藏条件和经验公式预测的最小混相压力估算值,选择了23.9、26.0、27.9、30.0和31.9 MPa共5个压力实验点,进行长细管驱油实验。

实验结果(图1)表明,在二氧化碳注入量为1.2倍孔隙体积的条件下,驱油效率与实验压力关系曲线在28.94 MPa处出现拐点,当实验压力小于28.94 MPa时,驱油效率较低,且随实验压力的增加而迅速

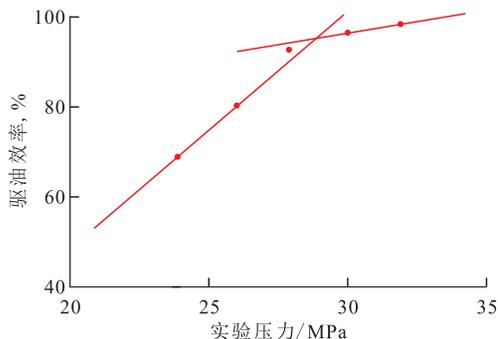


图1 注入量为1.2倍孔隙体积时驱油效率与实验压力的关系

Fig.1 Relationship between oil displacement efficiency and experiment pressure after 1.2 PV was injected

增大,为非混相或近混相驱替过程;而当实验压力大于28.94 MPa后,驱油效率达到95%以上,继续增大实验压力,驱油效率增幅有限,此时驱油机理转变为混相驱替。根据细管实验结果和混相判断标准,可以确定二氧化碳与高89块模拟地层原油的最小混相压力为28.94 MPa。

### 2.2 产出气直接回注对驱油效率的影响

为探索二氧化碳驱油藏产出气直接回注的可行性,利用长岩心物理模拟流程分别测试了纯天然气(实施二氧化碳驱前的产出气)、纯二氧化碳和不同阶段产出气的驱油效率。实验温度为地层温度126℃,实验压力为29 MPa,以便比较产出气的驱油效率与二氧化碳混相驱的驱油效率。

利用表1所列的7种气体进行了7组长岩心驱油实验。实验结果(图2)显示,在建立原始含油饱和度过程中,7组实验含油饱和度的对比性很好,最终含油饱和度基本一致。因此,可以认为是在同一条件下进行的实验,实验结果具有较好的可比性。

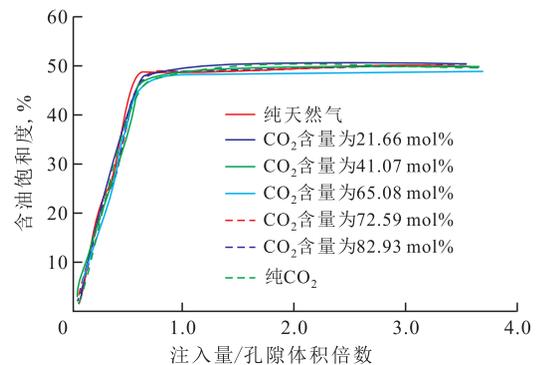


图2 7组驱油实验所建立的含油饱和度

Fig.2 Oil saturation of seven groups of oil displacement experiment

分析图3可知,纯二氧化碳驱的最终驱油效率最高,达到78.0%,由于实验压力高于二氧化碳与地层原油的最小混相压力,因此其驱油效率代表了混相驱的效果,而纯天然气驱的最终驱油效率最低,

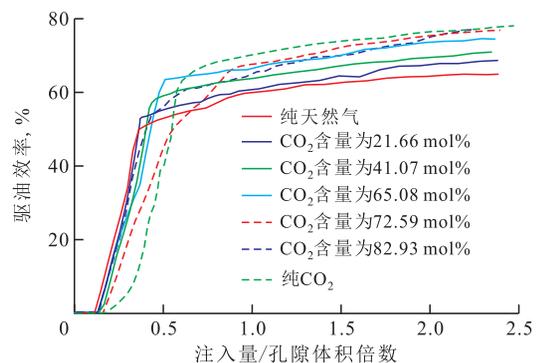


图3 不同阶段产出气的驱油效率

Fig.3 Oil displacement efficiency of produced gas at various stages

为65.5%，远低于混相驱的驱油效果，说明纯天然气驱在此实验压力下为非混相驱，主要原因是天然气的主要组分为甲烷，中外学者均认为甲烷相对二氧化碳是难以与地层原油混相的，其与地层原油的最小混相压力要高于二氧化碳与地层原油的最小混相压力<sup>[9-11]</sup>，所以纯天然气驱的驱油效果较低。

对于现场所取的不同阶段产出气的驱油效率介于纯二氧化碳混相驱和纯天然气驱之间，且与二氧化碳含量成正相关性，即二氧化碳含量越高，其驱油效率就越高，且当产出气中二氧化碳含量达到72.59%时，最终驱油效率达到了76.9%（图3），与纯二氧化碳混相驱的驱油效率仅相差1.1%，而且随着二氧化碳含量的进一步增加，驱油效率增幅已非常有限，说明当油井产出气中二氧化碳的含量约为73%时，其驱油效率基本达到了混相驱的效果。

由图4可见，随着注入气中二氧化碳含量的增加，累积产气量增幅明显变缓，且总产气量也大幅减少，当二氧化碳含量为72.59%时，其累积产气量曲线与纯二氧化碳混相驱非常接近，进一步说明该种情况下已基本实现了混相驱。

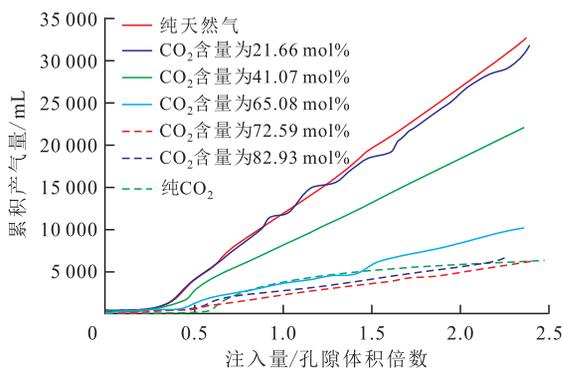


图4 不同二氧化碳含量时的累积产气量变化  
Fig.4 Variation of cumulative gas production at various CO<sub>2</sub> contents

从上述实验结果可以看出，当二氧化碳驱油藏产出气中二氧化碳含量达到73%左右时，无需再进行昂贵的捕集提纯，可处理其中的水分后直接压缩回注，且对矿场的驱油效果不会产生明显影响。由矿场监测结果可知，生产井一旦检测到有大量二氧化碳产出，二氧化碳含量便迅速增加，3个月左右即可达到73%以上（图5），且低于该值的时间间隔很短，且总产气量不大，此时可将产出气输入纯二氧化碳气源混注。

### 2.3 产出气对驱油效果的影响机制

分析不同阶段产出气的驱油实验结果可知，即使二氧化碳含量仅为73%左右，也基本能达到混相驱的效果。为解释其中的内在影响机制，对产出气

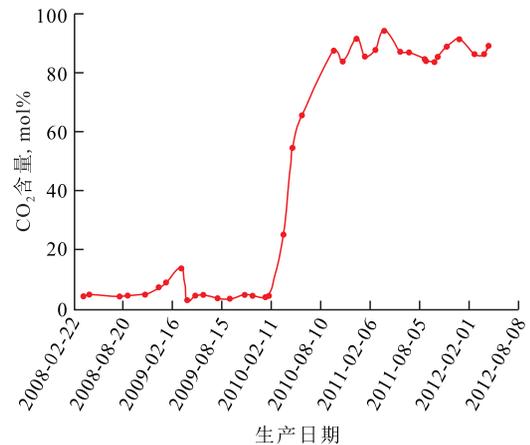


图5 高89-9井产出气二氧化碳含量检测结果  
Fig.5 Test results of CO<sub>2</sub> content of the produced gas from Well Gao89-9

的组分进行了归一化处理，将产出气中的二氧化碳组分别除，只分析其中的烃组分，并计算出C<sub>2</sub>及其以上烃组分在总烃中的相对含量。计算结果（表2）表明：不同阶段产出气的驱油效率与C<sub>2</sub>及其以上烃组分相对含量存在密切的正相关性，随着产出气中二氧化碳含量的增加，其C<sub>2</sub>及其以上轻烃组分相对含量也逐渐增加，虽然产出气中混入了甲烷，会对混相带来不利影响，但C<sub>2</sub>及其以上轻烃组分仍可与地层原油实现一次接触混相，比二氧化碳更容易与地层原油混相<sup>[9,13]</sup>，因此，当C<sub>2</sub>及其以上轻烃组分增加到一定程度后，会抵消因二氧化碳不纯导致的对驱油效果的负面影响，从而达到与纯二氧化碳混相驱同样的效果。

表2 不同阶段模拟产出气的组成及其对驱油效率的影响  
Table2 Composition of simulated produced gas and its relationship with oil displacement efficiency at various stages

注入气CO <sub>2</sub> 含量, mol%	归一化处理后的C <sub>2</sub> +轻烃组分相对含量, mol%	驱油效率, %
纯天然气	19.14	65.0
21.66	22.35	69.0
41.07	25.81	71.1
65.08	29.50	74.8
72.59	31.19	76.9
82.93	33.69	77.1
纯CO <sub>2</sub>	0	78.0

由于二氧化碳对地层原油中的轻烃组分具有强烈的抽提作用<sup>[14]</sup>，当地层中的混相油带或溶解大量二氧化碳的地层原油由生产井采出时，由于压力急剧下降，会有大量的二氧化碳析出，二氧化碳在析出过程中会抽提出大量的轻烃组分，该轻烃组分和析出的二氧化碳就组成了伴生气。压力下降越快，溶解的二氧化碳越多，其析出时抽提的轻烃组

分就越多,此时的产出气更易与地层原油混相,驱油效率也就越高,这也是当产出气中二氧化碳含量为72.59%时,其驱油效果与混相驱效果相当的内在影响机制。

### 3 结论

在二氧化碳驱过程中,不可避免会产生大量的富含二氧化碳的产出气。产出气可以通过回收、干燥、提纯、液化后重新注入地层用于驱油,该方式可以回收一定量的轻烃和天然气,但投资很大,成本也可能非常昂贵。通过对二氧化碳驱油藏不同阶段产出气的组分分析和驱油效果评价,认识到当产出气中二氧化碳含量高于72.59%时,无需提纯,可直接压缩回注,不会对矿场驱油效果产生明显影响,其原因是二氧化碳产出时会同时抽提出一定量的轻烃组分组成伴生气,当二氧化碳含量大于72.59%时,其抽提出的轻烃组分已基本消除了二氧化碳不纯带来的不利影响,因此,二氧化碳驱油藏产出气直接回注用于驱油可能是一种成本低且简单有效的解决办法,而当二氧化碳含量低于72.59%时,可采用与纯二氧化碳气源混注的方式。

#### 参考文献:

- [1] 李向良.温度和注入压力对二氧化碳驱油效果的影响规律实验[J].油气地质与采收率,2015,22(1):84-87,92.  
Li Xiangliang.Experimental study on the effect of temperature and injection pressure on CO<sub>2</sub> flooding[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2015,22(1):84-87,92.
- [2] Godec M L, Kuuskraa V A, Dipietro P.Opportunities for using anthropogenic CO<sub>2</sub> for enhanced oil recovery and CO<sub>2</sub> storage[J].Energy & Fuels,2013,27(8):4 183-4 189.
- [3] 姜风光,胡永乐.二氧化碳驱地下流体相态特征研究[J].特种油气藏,2014,21(6):90-92.  
Jiang Fengguang, Hu Yongle.Study on phase features of subsurface fluids during CO<sub>2</sub> flooding[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2014,21(6):90-92.
- [4] 尚宝兵,廖新维,卢宁,等.CO<sub>2</sub>驱水气交替注采参数优化——以安塞油田王窑区块块6油藏为例[J].油气地质与采收率,2014,21(3):70-72,77.  
Shang Baobing, Liao Xinwei, Lu Ning, et al.Optimization design of injection and production parameters for water-alternating-CO<sub>2</sub> flooding: a case study of Chang6 reservoir of Wangyao block in Ansai oilfield [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(3):70-72,77.
- [5] 董喜贵,韩培慧,杨振宇,等.大庆油田二氧化碳驱油先导性矿场实验[M].北京:石油工业出版社,1998.  
Dong Xigui, Han Peihui, Yang Zhenyu, et al.Pilot tests on oil displacement by CO<sub>2</sub> injection in Daqing oilfield[M].Beijing: Petroleum Industry Press,1998.
- [6] 李春芹.CO<sub>2</sub>混相驱技术在高89-1块特低渗透油藏开发中的应用[J].石油天然气学报,2011,33(6):328-329.  
Li Chunqin.Application of CO<sub>2</sub> miscible flooding technology in the ultra-low permeability reservoir at G89-1 block[J].Journal of Oil and Gas Technology,2011,33(6):328-329.
- [7] 李志鹏.东营凹陷高89地区二氧化碳驱油及封存过程中断层纵向安全性评价体系[J].油气地质与采收率,2015,22(6):41-46.  
Li Zhipeng.Evaluation on vertical safety of fault during carbon dioxide flooding and sequestration in the Gao89 area of Dongying sag[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2015,22(6):41-46.
- [8] 沈平平,黄磊.二氧化碳-原油多相多组分渗流机理研究[J].石油学报,2009,30(2):247-251.  
Shen Pingping, Huang Lei.Flow mechanisms of multi-phase multi-component CO<sub>2</sub>-crude oil system in porous media[J].Acta Petrolei Sinica,2009,30(2):247-251.
- [9] 郭平,杨学锋,冉新权.油藏注气最小混相压力研究[M].北京:石油工业出版社,2005.  
Guo Ping, Yang Xuefeng, Ran Xinquan.Minimum miscibility pressure study of the study on gas injection in reservoirs[M].Beijing: Petroleum Industry Press,2005.
- [10] 刘宁,郑希谭,陈钢,等.SYT 6573—2003最低混相压力细管实验测定法[S].北京:石油工业出版社,2003.  
Liu Ning, Zheng Xitan, Cheng Gang, et al.SYT 6573—2003 Measurement method for minimum miscibility pressure by slim tube test[S].Beijing: Petroleum Industry Press,2003.
- [11] 岳清山,杨承志,沈平平.混相驱提高石油采收率:下册[M].北京:石油工业出版社,1993.  
Yue Qingshan, Yang Chengzhi, Shen Pingping.Miscible flooding to improve oil recovery: Volume II [M].Beijing: Petroleum Industry Press,1993.
- [12] 李向良,李振泉,郭平,等.二氧化碳混相驱的长岩心物理模拟[J].石油勘探与开发,2004,31(5):102-104.  
Li Xiangliang, Li Zhenquan, Guo Ping, et al.Long core physical simulation for CO<sub>2</sub> miscible displacement[J].Petroleum Exploration and Development,2004,31(5):102-104.
- [13] 任双双,杨胜来,杭达震.非纯CO<sub>2</sub>对MMP和驱油效率影响的实验研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(2):249-253.  
Ren Shuangshuang, Yang Shenglai, Hang Dazhen.Laboratory evaluation of effects of impure CO<sub>2</sub> on MMP and displacement efficiency [J].Journal of China University of Mining & Technology,2010,39(2):249-253.
- [14] 李向良,王庆奎,李振泉,等.CO<sub>2</sub>多次抽提作用对地层油析蜡温度影响的实验研究[J].大庆石油地质与开发,2007,26(3):107-110.  
Li Xiangliang, Wang Qingkui, Li Zhenquan, et al.The lab study of carbon dioxide's multiple extraction influence on wax precipitation temperature in formation oil [J].Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing,2007,26(3):107-110.