

文章编号 : 0253-2697 (2005) 01-0083-04

# 稠油油藏蒸汽吞吐后转注 CO<sub>2</sub> 吞吐开采研究

沈德煌<sup>1</sup> 张义堂<sup>1</sup> 张 霞<sup>1</sup> 吴淑红<sup>1</sup> 李春涛<sup>2</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 新疆油田分公司勘探开发科学研究院 新疆克拉玛依 834000)

**摘要:** 利用物理模拟技术,对蒸汽吞吐后期的稠油油藏转注 CO<sub>2</sub> 吞吐技术以改善其开采效果的机理进行了研究,结果表明,蒸汽吞吐后期油藏转注 CO<sub>2</sub> 吞吐开采:增加了弹性驱能量;CO<sub>2</sub> 溶解于稠油中,使原油粘度降低;乳化液破乳,高轮次吞吐使原油物性变差,粘度大幅度增高;而 CO<sub>2</sub> 溶解于稠油和水降低了油水界面张力,使原油粘度大幅度下降;油水相对渗透率曲线特征得到改善,残余油饱和度降低。实验研究及现场试验结果表明,稠油油藏蒸汽吞吐后期转注 CO<sub>2</sub> 吞吐开采在技术和经济上都是可行的。该技术改善了稠油油藏蒸汽吞吐后期的开发效果。

**关键词:** 稠油油藏;物理模拟;蒸汽吞吐;二氧化碳吞吐技术;油藏开采机理;现场试验

**中图分类号:** TE345 **文献标识码:** A

## Study on cyclic carbon dioxide injection after steam soak in heavy oil reservoir

SHEN De-huang<sup>1</sup> ZHANG Yi-tang<sup>1</sup> ZHANG Xia<sup>1</sup> WU Shu-hong<sup>1</sup> LI Chun-tao<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Xinjiang Oilfield

Company, Keramay 834000, China)

**Abstract:** The cyclic carbon dioxide injection technology to improve heavy oil production after steam soak was studied by physical simulation. The mechanisms of cyclic carbon dioxide injection were investigated. The results show that injection of carbon dioxide into heavy oil reservoir in the late steam soak period can increase expansion energy and decrease oil viscosity and also demulsify the emulsion formed in the steam soak process. In general, carbon dioxide dissolved in the heavy oil can reduce oil-water surface tension and result in breakdown of the emulsion. Also, the injected carbon dioxide can change oil-water relative permeability and lower the remaining oil saturation. The field pilot test shows that cyclic carbon dioxide injection after steam soak is successful in technology and has the economic benefits. Both physical simulation and pilot test show that cyclic carbon dioxide injection technology after multi-cycle steam soak is economically feasible to improve the development results for heavy oil reservoir.

**Key words:** heavy oil reservoir; physical modeling; steam soak; cyclic carbon dioxide injection technology; oil recovery mechanism; field test

我国稠油油藏类型较多、埋藏较深。目前,深层稠油区块采出程度和动用程度低,整体开发效益差;水敏性油藏注汽、注水易造成粘土膨胀,油井出砂;热采稠油区块进入了高轮次吞吐阶段,地下存水多,吞吐效果逐轮变差。而转换稠油油藏开发方式目前尚处于试验阶段,因此,须加快寻找新的稠油开发方式。

利用注 CO<sub>2</sub> 来提高原油采收率(EOR)是发展较快的一项工艺技术<sup>[1]</sup>。经过科研人员的多年研究和现场应用,已有许多成功的先例,其中开采轻质油藏的应用占多数,也在少数重质油藏的成功应用。在我国的大庆、江苏等油田都进行过 CO<sub>2</sub> 驱的现场试验<sup>[2-4]</sup>,并取得了一定效果。在国外,注 CO<sub>2</sub> 主要用于三次采

油,开发水驱中、后期高含水油藏、非均质油藏以及不适合热采的重质油藏<sup>[5-7]</sup>。从文献资料看,对于轻质油藏,注 CO<sub>2</sub> (混相驱)的采收率比注水方法提高了 30%~40%;对于重质油藏,CO<sub>2</sub> 非混相驱一次开采采收率可达原始地质储量的 20%以上。

CO<sub>2</sub> 驱用于原油开采在国内外虽然有许多成功的先例,但是利用 CO<sub>2</sub> 开采稠油油藏的尝试还不多,尤其是对于蒸汽吞吐后期的油藏。为了确定蒸汽吞吐后期油藏转注 CO<sub>2</sub> 吞吐采油技术的适应条件和经济可行性,有必要弄清 CO<sub>2</sub> 吞吐增产机理,以确定该技术的应用前景,为开发深层稠油油藏探索出一条新途径。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重点科技攻关项目(020107-4-1)“改善稠油蒸汽吞吐效果开采技术”部分成果。

作者简介:沈德煌,男,1965年9月生,1989年毕业于西南石油学院采油专业,现为中国石油勘探开发研究院热采研究室主任,高级工程师,博士研究生,主要从事稠油热力采油技术研究工作。E-mail: dshen@petrochina.com.cn

## 1 蒸汽吞吐后注 CO<sub>2</sub> 吞吐机理

### 1.1 降低原油的粘度

采用稠油高温高压相态平衡设备,对辽河高升油田高 33168 井组脱气原油(表 1),在 60~150 及 1.0~5.0 MPa 条件下测定了 CO<sub>2</sub> 在原油中的溶解度和含气原油粘度(表 2)。

表 1 高升油田高 33168 井组脱气原油的粘度和密度  
Table 1 Degas oil viscosity and density of Gao 33168 Well in Gaosheng Oilfield

序号	温度/	粘度/(mPa·s)	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
2	60	1734	0.9333
3	70	876.9	0.9253
4	80	522.7	0.9192
5	90	321.1	0.9119
6	100	204.8	0.9048
7	120	90.4	0.8911
8	150	37.2	0.8697
9	200	12.6	0.8349

表 2 不同温度压力条件下含气原油粘度测试结果  
Table 2 Tested viscosity of CO<sub>2</sub>-dissolved oil at different temperature and pressure

压力/ MPa	粘度/(mPa·s)			
	60	90	120	150
0	1734	321.1	90.4	37.2
1	1497	294.1	85.3	35.9
2	1277	255.7	77.5	33.8
3	1118	311.2	70.1	31.3
4	994.9	201.5	67.7	28.9
5	854.1	185.8	59.8	26.1

由表 2 可见,CO<sub>2</sub> 在高升油田地面脱气原油中的溶解度随温度的升高而减小,随压力的升高而增大;在研究的压力、温度范围内,其值为 4.53~20.32 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。饱和 CO<sub>2</sub> 的原油粘度随温度的升高而减小,且在较低温度范围内原油粘度的降低更为显著。含气原油的粘度随压力的增加而降低,这是因为溶解 CO<sub>2</sub> 后的原油使原系统中液-液分子间的作用力变为液-气分子间的作用力,显然前者远大于后者;压力增加,CO<sub>2</sub> 在原油中的溶解度增大。所以使溶解 CO<sub>2</sub> 的原油粘度降低。它表明在开采稠油的过程中,适当地加入 CO<sub>2</sub> 能有效地改善原油在地下的某些物理特性,降低原油在油层中的渗流阻力,获得与加热降粘同样的效果。

### 1.2 注 CO<sub>2</sub> 使原油膨胀

稠油注 CO<sub>2</sub> 的膨胀机理是注 CO<sub>2</sub> 吞吐的主要依据之一,其膨胀系数反映了原油注气后的膨胀能力。对于一个油藏,进行注 CO<sub>2</sub> 吞吐的最佳条件是泡点压力上升少,膨胀系数大,粘度降低幅度大。

对辽河油田高 33168 块地面脱气原油(其分子量

为 428 g/mol),利用高温高压多功能相平衡仪,在 60 条件下,研究了二氧化碳与原油不同摩尔比下的膨胀规律,实验结果见图 1。由油藏流体的相对体积(第  $i$  级压力下体积  $V_i$  与泡点压力下体积  $V_s$  之比)与压力关系曲线(图 1)可以看出:在泡点压力以上,流体的压缩性较小;当压力低于泡点压力时,油藏流体的相对体积变化较大。对于稠油,当压力低于其泡点压力时,溶解在原油中的气体以微气泡的形式存在而不易脱出,即形成泡沫油,泡沫油的粘度远低于原油粘度,这对稠油有效实现 CO<sub>2</sub> 吞吐开采是非常有利的。高压注入 CO<sub>2</sub> 后进行焖井,使 CO<sub>2</sub> 溶于原油中,然后进行吞吐开采,既增加了原油在油层中的流动性,又增加了回采时的弹性驱动能量。

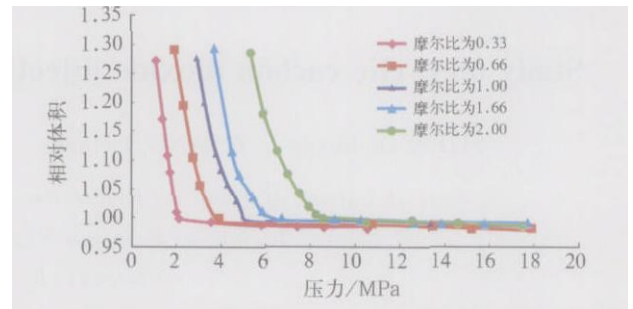


图 1 二氧化碳与稠油不同摩尔比下的相对体积与压力的关系  
Fig. 1 Relative curves of relative volume with pressure for different CO<sub>2</sub> to bitumen mole ratio

### 1.3 蒸汽吞吐后注 CO<sub>2</sub> 有破乳作用

由于长期的蒸汽吞吐,使蒸汽吞吐后期井的井底周围的原油含水率升高,并严重乳化,原油粘度大幅度升高。注入 CO<sub>2</sub> 后,其降粘效果更为显著(见表 3)。另外,水中溶解 CO<sub>2</sub> 可使界面张力从 28.4 mN/m(原油与蒸馏水)降到 14.5 mN/m(原油与溶解 CO<sub>2</sub> 的水)。

表 3 脱水和含水原油在溶解 CO<sub>2</sub> 后的粘度  
Table 3 Viscosity of oil containing water and dewatered with dissolved CO<sub>2</sub> at 60

脱水原油			含水率为 43.5%原油		
压力/ MPa	粘度/ (mPa·s)	降粘率/ %	压力/ MPa	粘度/ (mPa·s)	降粘率/ %
0	1734	-	0	3299	-
1	1497	13.67	1	1215	63.17
3	1118	35.52	3	708.7	78.52
5	854.1	50.74	5	435.2	86.81

### 1.4 改善油水相对渗透率曲线特征

CO<sub>2</sub> 不仅易溶于油,也易溶于水。为此,研究了水中溶解 CO<sub>2</sub> 后对相对渗透率的影响。实验共进行了 2 次,一次是在油层温度下测油-水相对渗透率;另一次是在相同温度下水中测饱和 CO<sub>2</sub> 时的油-水相对渗透率,结果见表 4 和图 2。

表 4 高 33168 井组原油及岩心驱替实验结果

Table 4 Displacement experiment results of oil and core from Gao 33168 Well

驱替方式	束缚水饱和度 $S_{wi}$	残余油饱和度 $S_{or}$	驱油效率 $E_D/\%$	残余油水相对渗透率 $K_{rwo}$
水驱	0.256	0.432	41.9	0.0667
饱和 CO <sub>2</sub> 的水驱	0.250	0.303	59.6	0.0836

注:测试温度为 60 。

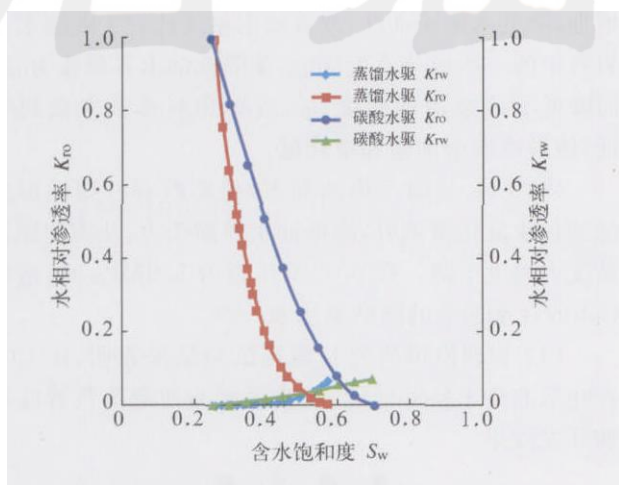


图 2 水驱和碳酸水驱的油水相对渗透率曲线

Fig.2 Oil and water relative permeability curves of water flooding and carbonic acid water flooding

由实验结果可以看出:CO<sub>2</sub>在水中的溶解,对油水相对渗透率曲线特征有很好的影响,较大幅度地降低了最终残余油饱和度。水中溶解 CO<sub>2</sub> 后,水的粘度增大,碳酸水能与岩石中的一些成分发生反应,同时也降低了油水界面张力,从而降低了残余油饱和度。

### 1.5 蒸汽吞吐后期转注 CO<sub>2</sub> 提高开采效果

近年来,使用 CO<sub>2</sub> 已成为提高开采轻油和重油采收率的一种重要方法。但在提高开采效果的机理上又有各自的特点。对于轻油,CO<sub>2</sub> 驱替主要是混相或近混相驱,而重油则主要是非混相驱或近混相驱。无论是轻油还是重油,CO<sub>2</sub> 饱和的原油,其性质都会有变化,即 CO<sub>2</sub> 溶解于原油中,引起原油膨胀、降低原油粘度、改善相对渗透率及形成溶解气驱,从而能提高开发效果。

对于蒸汽吞吐后期的稠油油藏,由于高轮次的蒸汽吞吐,原油发生严重的乳化,粘度大幅度上升。当注入 CO<sub>2</sub> 进行吞吐时,CO<sub>2</sub> 溶解于原油和水中,一方面使发生严重乳化的原油破乳,大幅度降低粘度,改善近井地带原油的流动性;另一方面,溶解在油和水中的 CO<sub>2</sub> 的脱出,能形成泡沫油,进一步降低了油的粘度,并增加了弹性驱能量。同时,相对渗透率的改善也是蒸汽吞吐后期转 CO<sub>2</sub> 吞吐对提高开发效果十分有利。

## 2 现场应用

2001 年首次在辽河油田的高 3624 块、冷 42 块进行了深层稠油 CO<sub>2</sub> 吞吐采油先导试验,取得了一定的试验效果。到 2003 年底,分别在吞吐后期油藏、中深层稠油、特稠及超稠油油藏等不同类型的油藏中共进行了 60 多个井次的 CO<sub>2</sub> 吞吐试验,成功率在 90% 以上。而 CO<sub>2</sub> 吞吐方式改蒸汽善吞吐效果不十分明显的主要原因有以下几方面:油井累积采油已较多,井筒附近油层含油饱和度比较低,物质基础较差;原油粘度较高的井,延长生产天数少;低渗透、低孔隙油层 CO<sub>2</sub> 吞吐采油效果差。

根据现场应用实际资料,选择 CO<sub>2</sub> 吞吐时机的原则为:蒸汽吞吐油气比小于 0.3 的油井;注蒸汽压力高,难以正常注汽的油井;蒸汽吞吐效果差而关停的油井。采用两种注入方式:一种为蒸汽吞吐周期末注入 CO<sub>2</sub>;另一种是注蒸汽前注入 CO<sub>2</sub>。

辽河锦 45-25-193 井为其中的一口典型井,油藏埋深为 1044.50 ~ 1125.80 m,油层厚度为 26.4m,含油饱和度为 53%,平均孔隙度为 28.3%,渗透率为 2720 × 10<sup>3</sup> μm<sup>2</sup>,原始油藏温度为 51℃,原油粘度为 110 mPa·s。该井 1998 年 3 月投产,到 2002 年,已生产 6 个周期,累积产油量为 5795t,累积产水量为 8359t,油气比为 0.4。CO<sub>2</sub> 吞吐前产油量为 2t/d,产液量为 4 m<sup>3</sup>/d,蒸汽吞吐已到经济极限。该井 2002 年 4 月在第 6 轮蒸汽吞吐周期末实施了 CO<sub>2</sub> 吞吐采油技术,注入 94 t CO<sub>2</sub>,焖井 7d。CO<sub>2</sub> 吞吐生产初期最高产液量为 32 t/d,产油量为 16t/d,动液面由采取措施前的 -915m 上升到 -876m,日产液为措施前的 2 倍,日产液量、产油量均创该井投产以来的最高记录。至 CO<sub>2</sub> 吞吐采油周期结束,生产 220d,相当于一轮蒸汽吞吐生产,累积产油为 1612t,换油率为 17.2t/t,累积产水为 1127t,提高回采水率 54% (见图 3)。

该井 2003 年 1 月进行第 7 轮蒸汽吞吐,注入蒸汽 2334t,比第 6 轮减少 170t。按锦 45 块蒸汽吞吐周期产量和油气比的递减规律,第 7 周期的周期产量预计为 750t,油气比为 0.363。至 2003 年 10 月,第 7 轮蒸汽吞吐已生产 280d,累积产油量为 2009t,产液量为 3709t,油气比已达 0.851,周期产量和油气比有明显的提高。与第 6 轮蒸汽吞吐比较,已增产原油 1073t,提高油气比 0.481,CO<sub>2</sub> 吞吐采油量和第 7 轮目前的累积产油量已达到 3650t,为前 6 轮蒸汽吞吐产量的 70%,注 CO<sub>2</sub> 改善蒸汽吞吐效果十分明显 (见图 4)。

从 CO<sub>2</sub> 改善蒸汽吞吐效果现场试验结果看,总体

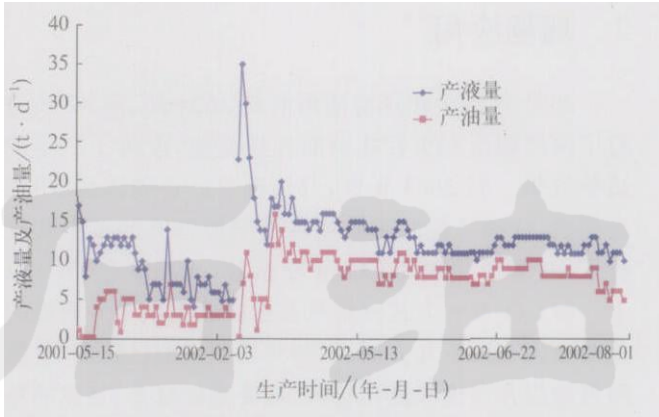


图3 锦45-25-193井蒸汽吞吐与CO<sub>2</sub>吞吐采油生产动态曲线

Fig. 3 Production performance of cyclic steam and CO<sub>2</sub> injection of Jin 45-25-193 Well

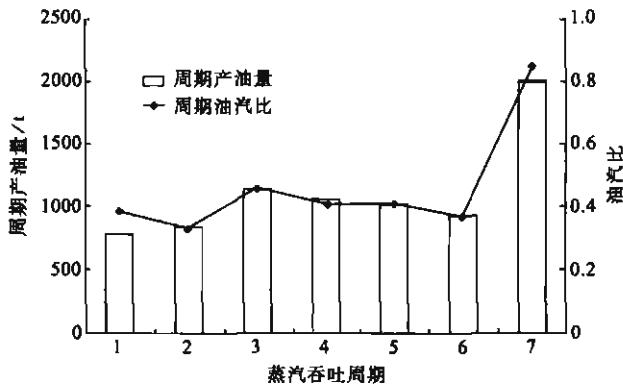


图4 锦45-25-193井CO<sub>2</sub>吞吐改善蒸汽吞吐效果  
Fig. 4 Steam soak production improved by cyclic CO<sub>2</sub> injection in Jin 45-25-193 Well

上达到了延长生产周期,提高周期回采水率及提高油井驱动能量的目的,CO<sub>2</sub>改善蒸汽吞吐效果也十分明显。另外,对于蒸汽吞吐已到极限的井,通过CO<sub>2</sub>吞吐处理后,继续蒸汽吞吐,其效果也好于CO<sub>2</sub>吞吐处理前。

(上接第82页)

(4) 微构造高点和砂体上倾尖灭区是油藏开发后期油水重新分异及剩余油重新聚集的重要区域,是开发后期调整挖潜的重要领域之一。

(5) 油层未射孔及井况恶化等工程因素对特定时期特定条件的油田来讲,是影响剩余油形成的重要因素之一。

#### 参 考 文 献

- [1] 张幸福,周嘉玺.陆相复杂断块油田精细油藏描述技术[M].北京:石油工业出版社,2001:1-15.
- [2] 李阳.储层流动单元模式及剩余油分布规律[J].石油学报,2003,

### 3 结 论

(1) CO<sub>2</sub>易溶于原油能产生以下效果:使原油体积增大,从而促使充有原油的孔隙体积也增大,这为油在孔隙介质中流动提供了条件;可降低原油粘度,提高原油流动性;在CO<sub>2</sub>吞吐采油过程中形成溶解气驱,并大幅度地提高弹性驱动能量。

(2) CO<sub>2</sub>易溶于水的作用是:使水的粘度有所增加,降低水的流动性,改善油水粘度比;碳酸水与岩石中的一些成分发生反应,能降低油水界面张力,从而降低了残余油饱和度;改善相对渗透率曲线特征,使最终残余油饱和度降低。

(3) CO<sub>2</sub>易溶于原油和水,使蒸汽吞吐期间形成的油包水乳化液破乳,降低油水界面张力,从而使原油粘度大幅度下降。在60 MPa及压力为5.0 MPa时,溶解CO<sub>2</sub>的含水原油的降粘率达86.8%。

(4) 物理模拟研究及现场试验结果表明,注CO<sub>2</sub>吞吐采油技术经济可行,能改善稠油油藏蒸汽吞吐后期开发效果。

#### 参 考 文 献

- [1] 李士伦,张正卿,冉新权.注气提高采收率技术[M].成都:四川科学技术出版社,2001:1-12.
- [2] 熊钰,孙良田,孙雷,等.基于模糊层次分析法的注CO<sub>2</sub>混相驱油藏综合评价方法[J].石油学报,2002,23(6):60-62.
- [3] 谢尚贤,韩慧慧,钱昱.大庆油田萨南东部过渡带注CO<sub>2</sub>驱油先导性矿场试验研究[J].油气采收率技术,1997,4(3):13-19.
- [4] 刘炳官,朱平,雍志强,等.江苏油田CO<sub>2</sub>混相驱现场试验研究[J].石油学报,2002,23(4):56-60.
- [5] Saner W B,Patton J T. CO<sub>2</sub> recovery of heavy oil: wilmington Field test [J]. JPT,1986,38(6):769-776.
- [6] Bakshi A K,Ogbe D O. Feasibility study of CO<sub>2</sub> simulation in the West Sak Field,Alaska[R]. SPE 24038,1992:151-158.
- [7] Holm L W,Brien O. Carbon dioxide test at the Mead Strawn Field [J].JPT, 1971,23(1-6):431-442.

(收稿日期 2004-03-11 改回日期 2004-05-16 编辑 孟伟铭)

24(3):51-55.

- [3] 吴胜和,王仲林.陆相储层流动单元研究的新思路[J].沉积学报,1999,17(2):252-256.
- [4] 魏纪德,林春明,杜庆龙,等.大庆油田剩余油的影响因素及分布[J].石油与天然气地质,2001,22(1):57-59.
- [5] 石玉梅,刘雯林,姚逢昌,等.用地震法监测水驱薄互层油藏剩余油的可行性研究[J].石油学报,2003,24(5):52-56.
- [6] 徐守余,李红南.储集层孔吼网络场演化规律和剩余油分布[J].石油学报,2003,24(4):48-53.

(收稿日期 2004-03-18 改回日期 2004-05-08 编辑 孟伟铭)