

文章编号: 0253-2697(2006)03-0080-04

超临界二氧化碳混相驱油机理实验研究

李孟涛 单文文 刘先贵 尚根华

(中国科学院渗流流体力学所 河北廊坊 065007)

摘要:根据大庆榆树林油田原油组分变化、 CO_2 与原油界面张力关系及 CO_2 超临界性质,对 CO_2 混相驱地层情况进行了模拟研究,建立了 CO_2 混相驱驱替模型和方程。研究结果表明,超临界状态的 CO_2 可以降低所波及油水的界面张力;混相时混相带原油含碳组分中 C_{20} 以下的含量达到了最高值;水气交替注入时,水对混相有不利的影响。

关键词:超临界二氧化碳;混相驱;微观机理;原油组分;界面张力;数学模型

中图分类号: TE357.142

文献标识码: A

Laboratory study on miscible oil displacement mechanism of supercritical carbon dioxide

Li Mengtao Shan Wenwen Liu Xiangui Shang Genhua

(Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China)

Abstract: On the basis of component change of carbon in oil, interfacial tension between oil and carbon dioxide and the quality of supercritical carbon dioxide of Yushulin oil fields in Daqing area, the formation change of carbon dioxide miscible oil displacement was simulated. The model of carbon dioxide miscible flooding in these oil fields was established, and the equation of carbon dioxide miscible flooding was found. Some new and important mechanisms on the craft mode of carbon dioxide miscible flooding and the water-gas alternating injection were determined. The supercritical carbon dioxide could lower the tension of the interface of involved oil and water, and the content of carbon dioxide in carbon component of oil could reach the highest value in the miscible region. The effect of water on the carbon dioxide miscible flooding is unfavorable for the alternating injection of water and carbon dioxide.

Key words: supercritical carbon dioxide; miscible flooding; microcosmic mechanism; oil component; interfacial tension; mathematical model

CO_2 在油田驱替中的应用越来越多,已在江苏、中原、大庆、胜利等油田开始现场试验^[1-4], CO_2 的主要优点是易于达到超临界状态。 CO_2 在温度高于临界温度 31.26°C 和压力高于临界压力 7.2 MPa 状态下,处于超临界状态时,其性质会发生变化,其密度近于液体,粘度近于气体,扩散系数为液体的 100 倍,因而具有较大的溶解能力。超临界时溶质溶解度增加有利于提高总的传质速率,而油层的结构有利于增加内扩散与外扩散,使 CO_2 与原油增加接触机会而易于混相,所以 CO_2 混相驱可以满足一些油田对注入溶剂的苛刻要求。

1 界面张力变化驱油机理

实验以大庆榆树林油田为样本,该油田是低渗透油田,渗透率为 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最小混相压力为 20 MPa 。采

用美国生产的 TX-500 系列界面张力仪,利用旋滴法对油水两相界面张力进行了测量。应用加拿大引进的高温、高压界面张力装置以悬滴法进行了 CO_2 与原油界面张力的测定,实验在恒温下进行。实验方法为:将样釜和悬滴室用石油醚洗 3 次,抽真空;样品釜 A 中进油样,B 中进 CO_2 (纯度为 99.5%)。当系统升温至 90°C 时恒温一段时间,再将样釜 B 中的 CO_2 压入悬滴室至所需压力(气态或液态),然后压一滴原油于悬滴室探针处,油滴保持最大状态时记录图像,并记录当时的压力读数。实验结果见表 1。

实验结果表明,随着压力的升高, CO_2 与原油界面张力逐渐降低,在地层中有利于超临界的 CO_2 驱动原油并溶入原油与水,增加多接触混相机会,从而快速形成混相带。混相带可阻滞 CO_2 的指进。由于界面张力不为零,也说明了混相是多接触混相。

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(G1999022510)“大幅度提高石油采收率基础研究”资助。

作者简介:李孟涛,男,1967 年 12 月生,1990 年毕业于大庆石油学院,现为中国科学院研究生院在读博士,主要从事三次采油研究工作。

E-mail:lixiaov78@163.com

表 1 二氧化碳与原油界面张力和密度差测定结果

Table 1 Interfacial tension and density difference between CO₂ and oil

实 验 参 数	实 验 压 力 / MPa								
	5. 4	7. 2	10. 3	13. 7	17. 1	20. 5	23. 9	27. 4	29. 5
密度差 / (g · mL ⁻¹)	0. 72	0. 68	0. 61	0. 51	0. 40	0. 32	0. 26	0. 22	0. 19
界面张力 / (mN · m ⁻¹)	15. 30	13. 36	9. 28	6. 91	4. 78	3. 49	2. 24	1. 73	1. 42

在大庆榆树林油田油层温度和混相压力下测定的界面张力实验结果表明:原油与注入水的界面张力为 30. 68 mN/m,是原油与 CO₂ 界面张力的 10. 5 倍;而在 CO₂ 都饱和的情况下,原油与注入水之间的界面张力为 19. 62 mN/m,油水界面张力降低了约 1/3,这在水、气交替驱中有利于提高驱油效率。注 CO₂ 后原油与水相界面张力的变化是影响驱替效率的一个重要因素,可直接影响采收率。实验发现:CO₂ 注入浓度越大,油水相界面张力越小;界面张力越小,原油越易被驱替。

2 组分变化驱油机理

在一维的人造模型上进行了溶剂驱替物理模拟实验,主要是测试原油与 CO₂ 的可混性以及最小混相压力。实验装置为长约 10 m、内径为 3. 8 mm 的一维人造多孔介质螺旋状不锈钢盘管,紧密地填充 200 目的纯净石英砂,充填层的孔隙度为 39 %,实验恒温 90 ℃。所用 CO₂ 纯度为 99. 9 %,所用原油为大庆榆树林油田地层原油。

取细管实验的流出油作为样品。升压至 5 MPa 时开始驱油,10 min 内不再出油时再继续加压,取样为该压力下流出油的总数,其余的都是独立的单个实验,取样为气体突破前、后 10 min 的流出油,取样后马上进行密封及化验。实验结果见图 1 和图 2。

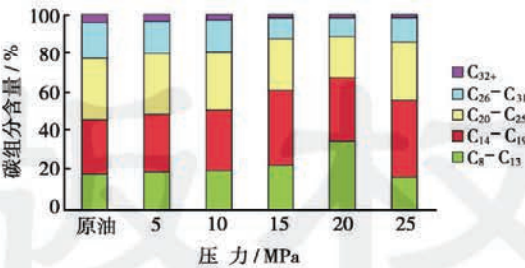


图 1 连续升压驱油实验产油组分

Fig. 1 Carbon Component under continuously ascending pressure

实验结果表明,气体突破前产油的碳组分基本没有变化,升压到 20 MPa 时,产油组分含 C₂₀ 以下的比率达到最高 (67. 5 %),此时原油采收率已经达到 90 %。这表明 CO₂ 萃取时主要是原油中含 C₂₀ 以下组分,压力达到 25 MPa 后产出的油主要是萃取的剩余

油中的较重质成份和大压差下波及到的更多体积而携带出的油,所以产油中含 C₂₀ 以下的组分比率低于 20 MPa 时的比率。20 MPa 混相时已经萃取了接触到的原油中含 C₂₀ 以下成份,所以升压到 25 MPa 后,萃取的原油中含 C₂₀ 以上比例较多。从图 1 和图 2 中产油

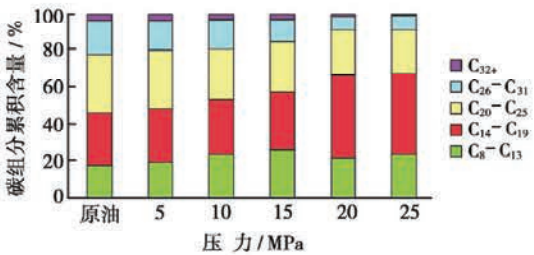


图 2 单个压力下气突破后产油组分变化

Fig. 2 Carbon Component under individual pressure after CO₂ breakthrough

的组分可以看出:同样是 25 MPa 下连续升压含 C₂₀ 以下组分分别为 56. 3 %和 65. 3 %,而原油中含 C₂₀ 以下组分的比率为 46. 3 %。这说明超临界 CO₂ 可以更进一步萃取剩余油中的成份。从实验结果来看,从不混相到混相碳组分显著变化的是含 C₂₀ 以下的组分,图 1 和图 2 都显示超临界 CO₂ 在混相时产油中含 C₂₀ 以下组分有一个峰值。混相段超临界 CO₂ 与原油的界面张力为零,只是密度比原油低,在驱替中形成了混相带。混相段突破后在 CO₂ 携带作用下又不断驱出原油,所以产油中的含 C₂₀ 以下的组分数对原油的最小混相压力的影响很重要。

3 微观模型驱油机理

在透明的微观模型中进行实验,应用微观透明模型可以直观地观察油和水-气交替驱油过程中多相流体的渗流机理及残余油水分布状况^[5-7]。微观透明模型实验技术的特点:①可视性,可直接观察流体驱油的过程,验证驱油机理;②仿真性,可以模拟油藏天然岩心的孔隙结构特征,实现几何形态和驱替过程的仿真。实验时用光刻法将区块岩心铸体薄片上的孔隙网络复制下来,制成模型图版。利用光刻技术制成微观仿真透明孔隙模型,模型尺寸为 50 mm × 50 mm × 2. 4 mm。系统由微量注入泵、压力传感器、体视显微镜、摄像系统、监视器和图像处理系统等组成。实验温度

为 90 ℃,实验条件下原油粘度为 5 mPa · s。

图 3 是在模型出口端观察到的混相和非混相图像,图 3 中网状结构是流体通道。图 4 是混相压力达到 20 MPa 时剩余油混相驱替过程,局部混相可以采出小孔隙和盲管中的剩余原油。由图 4 可见剩余油被混相驱出,提高了原油采收率。

水和 CO₂ 交替注入是大多数油田采用的工艺,是防止 CO₂ 过早突破。实验证明:模拟小段塞在 0.03

孔隙体积倍数(PV)下以均等水、气交替注入,未能观察到局部混相。但是,加入一个大的气体段塞可以轻易见到混相。实验证实:加入一个可以达到混相的 0.1 PV 以上气体段塞后再进行水、气交替驱为最佳选择(见图 5)。与图 4 比较可见,受水的影响,有剩余油留下。水气交替驱油时由于水影响了混相,对提高采收率有一定不利。但是水气交替驱油可以扩大波及面积,水气交替驱油时只要加入大于 0.1 PV 以上的气体

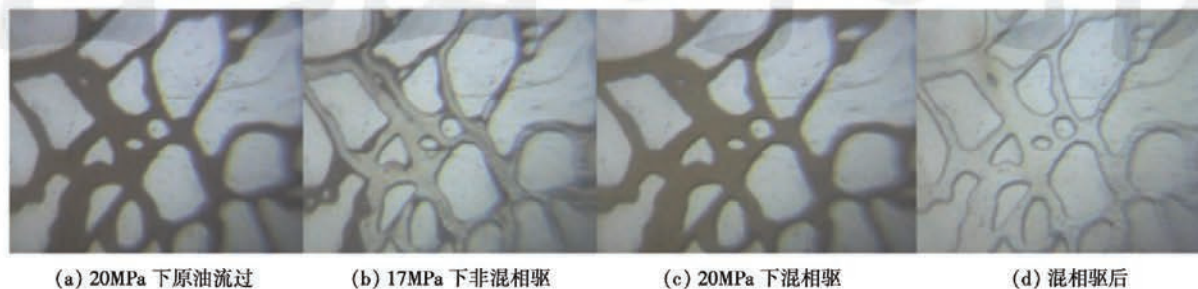


图 3 混相驱与非混相驱流态

Fig. 3 Fluid flow of CO₂ miscible and immiscible flooding

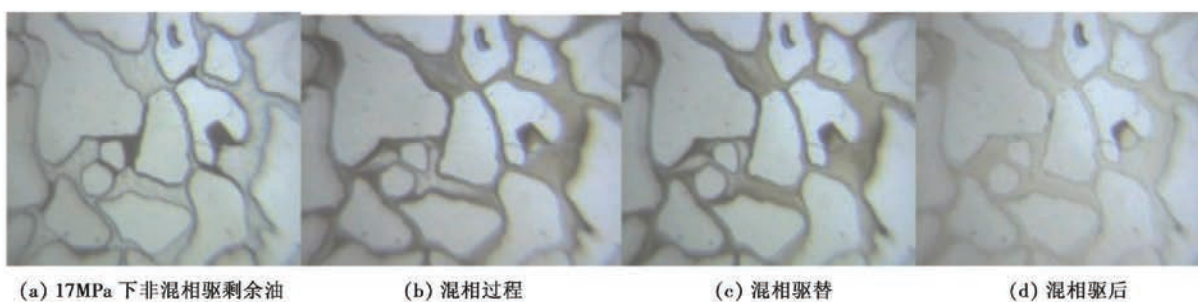


图 4 无水驱替下一次局部混相流态

Fig. 4 Fluid flow of partial CO₂ miscible flooding under no waterflooding

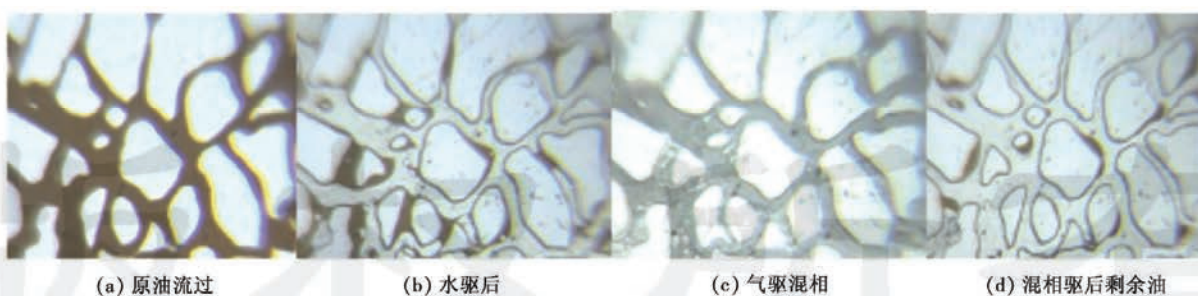


图 5 有大段塞时水、气交替驱替的局部混相流态

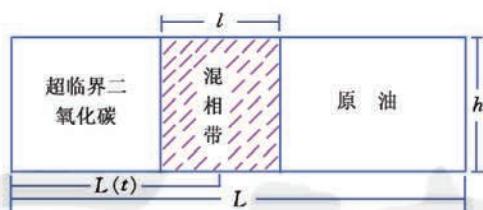
Fig. 5 Fluid flow of partial CO₂ miscible flooding of water and CO₂ alternating injection with big gas section

段塞就可以达到混相,减少一些不利影响。

4 超临界 CO₂ 混相驱油模型的建立^[8]

实验结果表明,在驱替过程中,被驱替的原油和超临界 CO₂ 之间有一个混相过渡区。例如:被测定组分的实验中,混相区长度约占岩心总长的 0.2%。模型中

假设:①均质地层;②平面平行活塞式驱替,混相带长度和浓度不变;③稳态流动,模型注入点($x=0$)定压驱替,因为混相驱后孔隙被超临界气体占据,界面段塞将地层分成原油和超临界气体 2 个区域;④混相区液体按不可压缩流体计算,忽略重力的影响。界面从左向右移动,一开始就有混相区界面,混相驱油模型见图 6。

图6 CO₂混相驱模型Fig.6 Model of CO₂ miscible flooding

定压混相驱替情况下,驱替流量、压力分布和混相段塞的距离之间的关系式为

$$\frac{\partial p_1}{\partial x^2} = 0, \quad 0 < x \leq L(t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 p_2}{\partial x^2} = 0, \quad L(t) \leq x < L \quad (2)$$

边界条件为: $x=0$ 处, $p=p_0$; $x=L$ 处, $p=p_L$ 。

式中 x 与 $L(t)$ 是段塞到注入井的距离, m; p_1 为超临界气体压力, MPa; p_2 为原油压力, MPa; p_0 为模型注入点即 $x=0$ 处的压力, MPa; p_L 为模型产出点及 $x=L$ 处的压力, MPa。

段塞条件为

$$\frac{K_1}{\mu_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} = \frac{K_2}{\mu_2} \frac{\partial p_2}{\partial x} = -\frac{Q(x)}{A} \quad (3)$$

式中 $p_1 = p_2$; K_1 和 K_2 分别为段塞流体和原油的有效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ_1 和 μ_2 分别为段塞流体和原油的动力粘度, mPa·s; $Q(x)$ 为流量, mL/s; A 为段塞截面积, m^2 。它们可以通过实验测得。

流量计算式为

$$Q(x) = \frac{AK_1}{\mu_1} \frac{p_0 - p_L}{ML + (1-M)L(t)} \quad (4)$$

其中

$$M = (K_1/\mu_1) / (K_2/\mu_2)$$

$L(t)$ 是界面的水平方向位移, 即

$$\frac{dL(t)}{dt} = v = Q(x)/A_s \quad (5)$$

式中 A_s 表示流动的混相段塞有效面积, 其表达式为

$$A_s = A\phi\Delta S_s = A\phi(1 - S_w - S_o) \quad (6)$$

将式(4)和式(6)代入式(5)并积分得混相段塞到 x 处

的时间为

$$t = \frac{\phi\mu(1 - S_w - S_o)L^2}{K_1(p_0 - p_L)} \left[M \left(\frac{x}{L} \right) + \frac{1}{2} (1 - M) \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中 ϕ 为岩石孔隙度, %; ΔS_s 为混相段塞饱和度, %; S_w 为岩石束缚水饱和度, %; S_o 为剩余油饱和度, %; t 为时间, s。

5 结 论

在混相压力下,处于超临界状态的 CO₂ 可以降低所波及油水的界面张力,从而提高采收率。地层条件下 CO₂ 与原油之间的界面张力很低,易于快速形成混相带而阻滞 CO₂ 的指进。达到混相压力时,混相带的流体含碳组分中 C₂₀ 以下含量达到了最高值。原油中 C₂₀ 以下成份越高,越易达到最小混相压力。水、气交替注入时,水对混相有不利的影响。调整注入气体的段塞易于形成混相,从而可以提高原油采收率。

参 考 文 献

- [1] 李向良,李振泉,郭平,等. 二氧化碳后续驱的长岩心物理模拟[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 102-104.
- [2] 李士伦,周守信,杜建芬,等. 国内外注气提高石油采收率技术回顾与展望[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(2): 1-5.
- [3] 蒋明,赫恩杰. 二连低渗透砂岩油藏开发中的几点认识[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 58-64.
- [4] 刘炳官,朱平,雍志强. 江苏油田 CO₂ 混相驱现场试验研究[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 56-60.
- [5] 贾忠伟,杨清彦,兰玉波,等. 水驱油微观物理模拟实验研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 20(1): 46-49.
- [6] 陈晓军,涂富华,林保树,等. 应用微观模拟技术研究复合驱驱油特征[J]. 西北地质, 2000, 33(2): 14-21.
- [7] 郑家桑,吕站鹏. 二氧化碳腐蚀机理及影响因素[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 134-139.
- [8] 孔祥言. 高等流体力学[M]. 安徽合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 300-305.

(收稿日期 2005-08-25 改回日期 2005-10-21 编辑 孟伟铭)