

文章编号:1009-9603(2020)01-0050-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.01.007

CO₂启动盲端孔隙残余油的微观特征

陈兴隆,韩海水,李 实,俞宏伟

(提高石油采收率国家重点实验室 中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:低渗透油藏中存在大量的盲端孔隙,其中赋存的原油通常难以被水驱启动,成为水驱残余油的一种表现形式。建立玻璃刻蚀微观盲端孔隙模型,饱和油后开展室内实验模拟水驱、CO₂非混相驱和CO₂混相驱等开发过程,利用微观可视系统观测盲端孔隙中残余油在各种驱替方式下的启动特征。实验结果显示,水驱仅可以进入盲端孔隙较浅的区域,难以启动残余油;CO₂非混相驱可深入盲端孔隙,部分残余油被启动,并沿内壁流出,进入主通道;CO₂混相驱则可以驱替盲端孔隙深部的残余油,且随着CO₂注入孔隙体积倍数的增大,基本可以将盲端孔隙中的原油驱替干净。分析认为,水驱仅依靠压力变化及流体弹性启动极少量的盲端孔隙残余油,而超临界CO₂则可以不停地与残余油发生组分交换,通过流体间的传质作用进入盲端孔隙,从而启动大量残余油。因此,超临界CO₂不仅对常规驱替介质波及的可流动孔隙具有较高的驱油效率,还可以启动盲端孔隙中的残余油,降低残余油饱和度,提高采收率。

关键词:CO₂驱;盲端孔隙;残余油;微观驱替;提高采收率

中图分类号:TE312

文献标识码:A

Microscopic characteristics of residual oil in dead-end pores initiated by CO₂

CHEN Xinglong, HAN Haishui, LI Shi, YU Hongwei

(State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

Abstract: There are plenty of dead-end pores in low permeability reservoirs, in which crude oil is hardly initiated by water flooding. As a result, oil in dead-end pores is a kind of residual oil after water flooding. The microscopic dead-end model is made by glass etching. Laboratory experiments are conducted to simulate the reservoir development, including water flooding, CO₂ immiscible flooding and CO₂ miscible flooding under the condition of saturated oil. With the help of microscopic and visual system, the initiating characteristics of the residual oil in dead-end pores by different displacement methods are observed. Experimental results show that water could only enter the shallow area of the dead-end pores, and residual oil is hard to be initiated. Moreover, supercritical CO₂ could penetrate into the dead-end pores, and parts of residual oil is initiated and driven out along the glass wall, and enters into major channel after CO₂ immiscible flooding. Furthermore, the supercritical CO₂ could displace the residual oil in deep pores at the dead end, and all of the residual oil could be displaced with the increase of the CO₂ pore volume after CO₂ miscible flooding. The analysis indicates that extremely limited residual oil in dead-end pores can be displaced with the help of pressure change and fluid compressibility by water flooding. However, the supercritical CO₂ will exchange some components of the residual oil continuously, and enters into the dead-end pores through fluid mass transfer, and then a large amount of residual oil is displaced. Therefore, the supercritical CO₂ not only has a high oil displacement efficiency in the live pores swept by conventional displacement fluid, but also could displace

收稿日期:2019-07-18。

作者简介:陈兴隆(1974—),男,山东济宁人,高级工程师,博士,从事油气渗流理论及油层物理实验研究工作。E-mail:chxlhdpu@petrochina.com.cn。

基金项目:国家重点研发计划项目“CO₂驱油技术及地质封存安全监测”(2018YFB0605501),中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“特/超低渗透油藏水驱后CO₂驱油与埋存机理及应用研究”(2014E-3601)和“碎屑岩油藏开发中后期提高采收率关键技术研究与应用”(2018E-1805)。

the residual oil in the dead-end pores. In other words, supercritical CO₂ could reduce the residual oil saturation and enhance oil recovery.

Key words: CO₂ flooding; dead-end pores; residual oil; microscopic displacement; enhanced oil recovery

盲端孔隙在各类型油藏中广泛分布,以低渗透储层更为发育。盲端孔隙的入口端与流动通道相连,但深处孔隙内径逐渐变小。在常规开发方式下,驱替介质(如注入水)仅在入口端经过而无法到达深处,致使盲端孔隙中的原油无法启动,从而成为残余油。盲端孔隙残余油是油藏水驱后的一种典型残余油^[1-4],对其进行有效启动和开发是进一步提高油藏采收率的重要研究内容。以王德民等为代表的学者基于微观可视驱油实验,提出聚合物驱不仅可以改善流度比和提高宏观波及效率,还可以提高微观驱油效率^[5-6],认为聚合物溶液的弹性性质可在一定程度提高油湿盲端类残余油的驱油效率,但不能提高水湿盲端残余油的驱油效率。随后聚合物微观驱油机理得到了众多学者的广泛关注,并从理论和实验方面均进行了深入研究,如刘中春等认为聚合物溶液的黏弹性越大,驱替盲端油的能力越强,但由于刚性水膜的存在,对水驱后的盲端残余油作用并不明显^[7-10]。中外大量的实验和报道显示,水驱高含水后期转CO₂驱可进一步提高采收率^[11-12],其主要机理是超临界CO₂可以萃取原油烃组分^[13-14],同时溶解促使原油体积膨胀^[15-17],进而驱替出水驱残余油。笔者对玻璃进行激光刻蚀,形成可实现高温高压条件下的不同尺寸微观盲端孔隙模型,应用高速摄像机观察记录水和超临界CO₂的微观驱替过程,进而总结启动盲端孔隙残余油的微观特征,并进行原因分析。

1 基于微观盲端孔隙模型的微观可视驱油实验

1.1 模型设计和制作

以薄玻璃板作为基板,利用激光刻蚀技术制作直线型微观盲端孔隙模型,设计3种不同尺度的盲端孔隙,用以模拟注入水和CO₂的驱替效果。微观盲端孔隙模型各部分尺寸如图1所示。其中,盲端孔隙的深度分别为8.199,5.282和2.857 mm;盲端孔隙入口处的直径分别为1.646,1.527和1.708 mm;从盲端孔隙的入口至末端内径逐渐变小,模型的主流通道直径为1.025 mm。

1.2 实验装置

采用中国石油勘探开发研究院自主研发的高

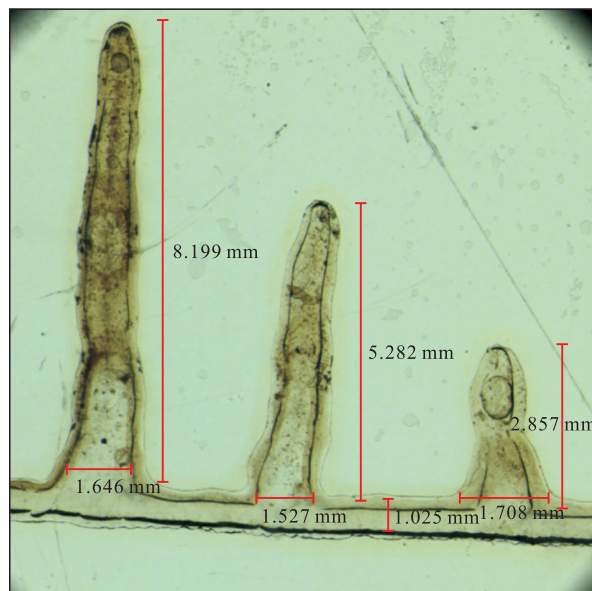


图1 不同尺度直线型微观盲端孔隙模型

Fig.1 Linear dead-end pore model with different scales

温高压微观可视驱油实验装置,主要由压力控制装置、微观模型高压可视釜、图像采集分析装置及辅助装置等4个部分组成(图2)。压力控制主要包括对围压、注入压力和出口回压的控制,围压和注入压力均由Quizix5000型高压精密驱替泵控制,其最大特点是可以满足微观驱替实验的微量体积控制,精度达0.000 1 mL/min,出口回压由Coretest高精度回压阀控制,精度为6.895 kPa。微观模型高压可视釜的最高工作温度为150 ℃,由电加热控温,最大工作压力为30 MPa,由驱替泵和回压阀控压。图像采集分析装置包括蔡司V8体视显微镜, minifast v1高速摄像机及计算机显示和存储设备,摄像机拍摄频

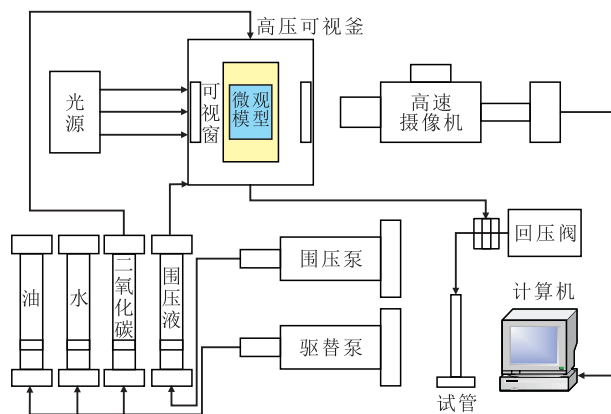


图2 高温高压微观可视驱油实验装置

Fig.2 Visual experimental apparatus of microscopic oil displacement

率达2 000帧/s,计算机存储能力为1 TB。辅助装置主要包括高压容器、压力传感器和产出流体收集计量等。

1.3 实验原理、材料及方案

水与原油接触存在明显的界面,不存在组分交换,难以驱替出盲端孔隙中的原油。高压条件下CO₂可与原油发生组分交换,可以不同程度地将盲端孔隙中的原油驱替出来。

实验原油为某油田脱气原油,常温常压条件下黏度为12 mPa·s。实验所用CO₂为北京兆格气体科技有限公司生产,纯度为99.996%,经细管实验测定,温度为50℃时原油与CO₂的混相压力为13.3 MPa。

设计水驱、CO₂非混相驱和CO₂混相驱3组实验。实验温度均为50℃,CO₂非混相驱和CO₂混相驱的驱替压力分别为10.0和15.0 MPa,水驱作为对比实验,驱替压力为10.0 MPa。

1.4 实验步骤

微观驱替实验的步骤为:①实验前准备。将微观盲端孔隙模型安装在高压可视釜中,加入围压液并升温至50℃;由围压驱替泵控制围压,使其高于模型内部压力(2 MPa);调节显微镜聚集位置,调节光源使高速摄像机可采集到清晰的孔道图像。②模型抽真空。将微观盲端孔隙模型及实验流程管线抽真空2 h后,关闭注入和出口阀门。③饱和油。将回压控制调节至设计压力(10.0或15.0 MPa),驱替泵控制以不高于0.02 mL/min的速度进行饱和油,直至模型及孔隙均充满原油。④水驱油。确保充有水的中间容器内的温度和压力分别稳定在50℃和10 MPa,以0.02 mL/min的速度进行水驱,驱替过程注意及时采集图像,当模型孔隙及孔道中的剩余油不再发生变化时,停止驱替;调节观察位置及显微镜放大倍数,记录实验现象,便于后期对比分析。⑤CO₂非混相驱。非混相驱替前,需确保CO₂中间容器内的温度和压力分别稳定在50℃和10 MPa,避免气体状态的CO₂高速突破;驱替泵控制以0.01 mL/min的速度进行驱替,高速摄像机频率调至1 000帧/s。⑥CO₂混相驱。确保CO₂中间容器内的温度和压力分别稳定在50℃和15 MPa,以0.02 mL/min的速度驱替,高速摄像机频率与水驱过程一致,为1 000帧/s。

2 实验结果及分析

通过高速摄像机拍下数万张照片,记录水驱、

CO₂非混相驱和CO₂混相驱3组实验的驱替过程。每组实验中精选出9个不同有效采油时间的代表性照片,以描述3种驱替方式启动盲端孔隙残余油的微观特征。

2.1 水驱过程

水驱过程主要驱替出主流道和盲端入口处的少量原油,不能大幅度启动盲端孔隙中的残余油,采收率较低(图3)。该过程可分为3个阶段:主流道排空阶段、弹性换油阶段和无效注入水阶段,其有效采油时间很短,约531.8 s后进入无效注入水阶段。

主流道排空阶段 向微观盲端孔隙模型中缓慢注水,入口压力逐渐升高至11.2 MPa,同时出口回压为10 MPa且保持不变。当出、入口压差足以克服流动阻力后,主流道的原油开始流出,注入水逐渐占据原油的空间。由于油水两相流体性质的差异,当主流道原油逐渐被驱出时,流动阻力逐渐减小,入口压力也逐渐减小;在主流道完全被注入水充满时,入口压力降低为10.4 MPa。该阶段的注入水和原油变化特征如图3a—3c所示。

弹性换油阶段 主流道中的原油排驱干净后,盲端入口处压力变化较为频繁,原油和注入水不断压缩和膨胀,部分原油膨胀后进入主流道,不断被注入水驱出,同时一部分注入水进入盲端孔隙,弹性换油阶段注入水和原油的变化特征如图3d—3h所示。

无效注入水阶段 注入水和原油的压缩性有限,且难以互溶,很快形成均一稳定的油水界面。同时盲端孔隙内外压力也趋于稳定,注入水无法再置换出盲端孔隙中的原油,仅在主流道中进行无效通过,至此,水驱油过程结束。该阶段注入水和原油的变化特征如图3h—3i所示。

2.2 CO₂非混相驱过程

相比于水驱,CO₂非混相驱可采出部分盲端深部孔隙残余油,一定程度上提高了采收率,其微观驱替特征也明显不同。CO₂非混相驱过程可分为2个阶段:组分交换采油阶段和无效注入气阶段(图4)。其有效采油时间约为700.1 s,随后进入无效注入气阶段。

组分交换采油阶段 与水驱过程不同,CO₂非混相驱不存在纯粹的主流道排空阶段。在高温高压条件下,CO₂与原油中的轻质组分具有组分交换能力。当注入的CO₂到达盲端入口处时立即与盲端中残余油发生组分交换,即有部分CO₂进入盲端孔隙,同时部分原油交换至主流道,被后续注入的CO₂携带采出。随着CO₂的连续注入,组分交换采油过

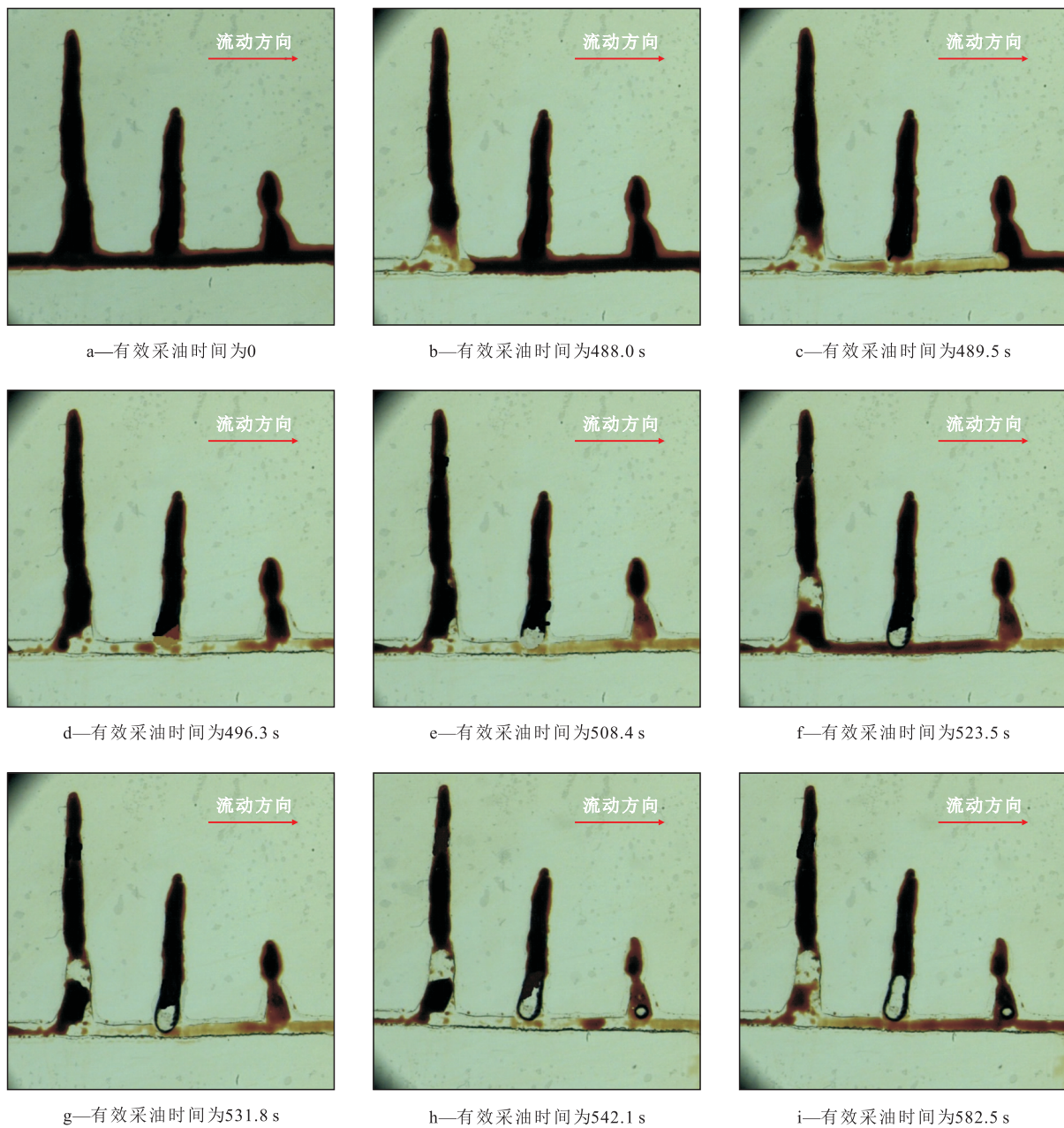


图3 水驱盲端孔隙中残余油过程

Fig.3 Process of residual oil displacement in dead-end pores by water flooding

程持续进行,其入口压力只有微小上升(最大约为10.3 MPa)。该阶段驱替过程如图4a—4f所示。

无效注入气阶段 由于非混相驱CO₂与原油组分交换能力较弱,采油阶段时间较短,很快进入无效注入气阶段。如图4g—4i所示,随着CO₂的不断注入,盲端孔隙中残余油形态趋于稳定,不再有原油被采出,CO₂进入3种盲端孔隙的深度大致相同。这是因为CO₂非混相驱油时,气油界面并未完全消失,组分交换能力有限,赋存于盲端孔隙更深处原油无法与CO₂接触。

CO₂非混相驱后主流道内壁和盲端孔隙内壁均

附着一层油膜。这是因为随着组分交换的进行,原油中轻质组分逐渐被采出,剩余的重质组分具有较大的黏滞力,气油两相存在较大的流度差异。

2.3 CO₂混相驱过程

相比于水驱和CO₂非混相驱,CO₂混相驱可启动并采出盲端孔隙中绝大部分残余油,大幅度提高采收率。其驱替过程如图5所示,整个驱替过程循序渐进,持续进行组分交换采油,无明显阶段划分,有效采油时间可达约3 980.6 s。

在高温高压条件下的超临界CO₂注入后,微观盲端孔隙模型中未观测到CO₂与原油的明显界面,

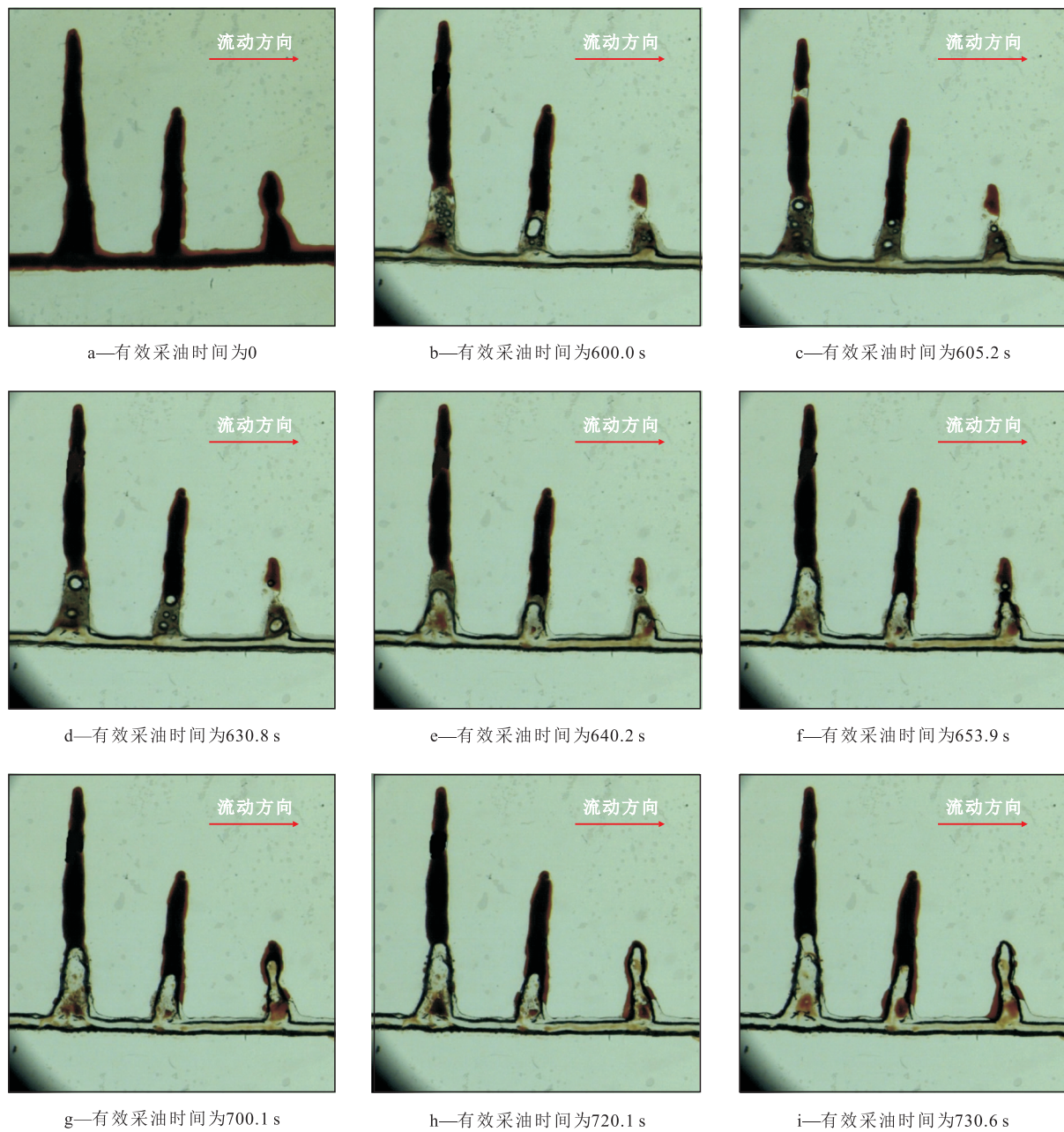


图4 CO₂非混相驱盲端孔隙中残余油过程

Fig.4 Process of residual oil displacement in dead-end pores by CO₂ immiscible flooding

二者已形成单相,CO₂混相驱的微观特征仅依据孔隙中的颜色变化来体现。随着CO₂的注入,微观盲端孔隙模型孔隙中的颜色均逐渐变淡,但盲端深部孔隙中的颜色变化明显滞后于盲端入口处的颜色变化。CO₂混相驱较非混相驱的压力更高,CO₂与原油组分交换能力更强,传质作用更加剧烈,界面张力降低为0。

3 气驱开发油藏启示

盲端孔隙在油藏中广泛存在,盲端孔隙残余油

是油藏开发剩余油的一种重要赋存形式。实验证实CO₂非混相驱可以采出盲端孔隙中的部分残余油,CO₂混相驱可以采出盲端孔隙中的绝大部分残余油,这是常规水驱不能达到的开发效果,同时也是水驱后CO₂驱进一步提高采收率的原因之一。由于油藏中大量盲端孔隙的存在,即使CO₂混相驱也不能达到理想的活塞驱替效果,启动和开发盲端孔隙中的残余油,需要注入大孔隙体积倍数的CO₂,且进行长时间的混相驱。即使CO₂气突破、气液比升高,CO₂混相驱仍能进一步提高采收率。低渗透微裂缝型油藏存在较多的盲端孔隙,水驱后盲端残余

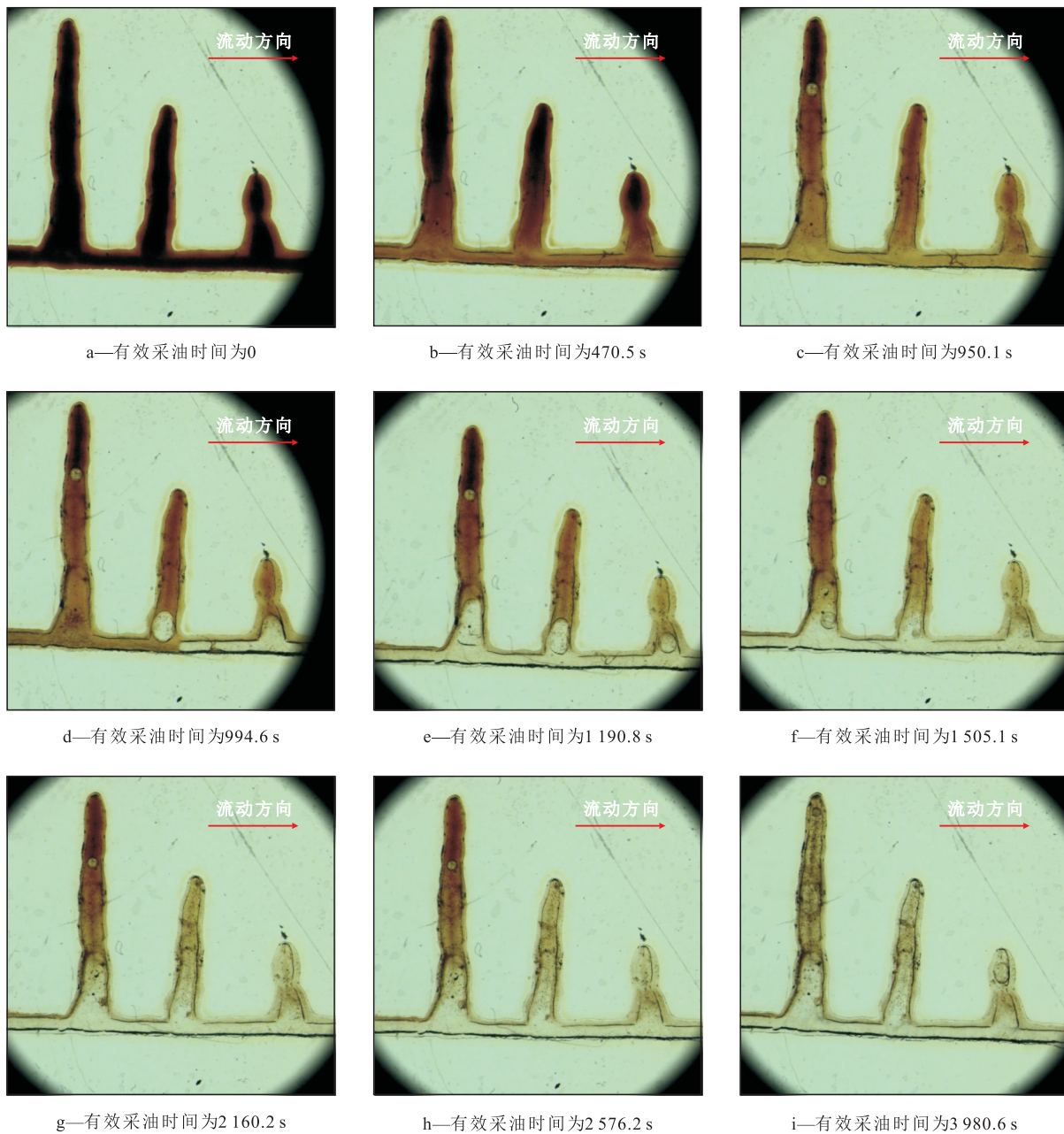


图5 CO₂混相驱盲端孔隙中残余油过程

Fig.5 Process of residual oil displacement in dead-end pores by CO₂ miscible flooding

油的数量不可忽视。聚合物驱对低渗透油藏的适应性较差,CO₂混相驱有望有效启动这部分残余油而取得较好的开发效果,可以作为水驱后提高采收率的接替技术。

4 结论

利用微观盲端孔隙模型进行不同驱替方式的残余油启动实验,结果显示注入水仅可以进入盲端孔隙较浅的区域,难以启动残余油;CO₂非混相驱可启动部分盲端孔隙深部残余油;CO₂混相驱可启动

盲端孔隙中的绝大部分残余油。实验过程中,水驱和CO₂非混相驱具有明显的相界面,有效采油时间较短,分别为531.8和700.1s,随后即进入无效的注入水和CO₂注入阶段。CO₂混相驱传质作用强烈,无明显相界面,有效采油时间较长,可达3980.6s,注入大孔隙体积倍数的CO₂混相驱基本可以将盲端孔隙中的原油驱替干净。

参考文献

[1] 王运海.四川盆地平桥地区五峰—龙马溪组页岩微观孔隙特征研究[J].石油实验地质,2018,40(3):337-344.

- WANG Yunhai. Micro-pore characteristics of shale from Wufeng-Longmaxi formations in Pingqiao area, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(3): 337-344.
- [2] 朱光普, 姚军, 张磊, 等. 特高含水期剩余油分布及形成机理[J]. *科学通报*, 2017, 62(22): 2 553-2 563.
- ZHU Guangpu, YAO Jun, ZHANG Lei, et al. Pore-scale investigation of residual oil distributions and formation mechanisms at the extra-high water-cut stage [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(22): 2 553-2 563.
- [3] 李阳, 杨勇. 老油田绿色低碳低成本开发探索与实践[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(2): 1-6.
- LI Yang, YANG Yong. Exploration and practice of green low-cost development in old oilfields [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(2): 1-6.
- [4] 黄迎松. 水驱速度对束缚型和油膜型剩余油动用的影响理论及实验[J]. *大庆石油地质与开发*, 2018, 37(2): 56-61.
- HUANG Yingsong. Theories and experiments of the water-flooding-rate influences on the development of the captured and film type remained oil [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2018, 37(2): 56-61.
- [5] 王德民, 程杰成, 杨清彦. 粘弹性聚合物溶液能够提高岩心的微观驱油效率[J]. *石油学报*, 2000, 21(5): 45-51.
- WANG Demin, CHENG Jiecheng, YANG Qingyan. Viscous-elastic polymer can increase micro-scale displacement efficiency in cores [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(5): 45-51.
- [6] 李晓骁, 任晓娟, 罗向荣. 低渗透致密砂岩储层孔隙结构对渗吸特征的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(4): 115-120, 126.
- LI Xiaoxiao, REN Xiaojuan, LUO Xiangrong. Influence of pore structures on the characteristic of spontaneous imbibition in low-permeability tight sandstone reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(4): 115-120, 126.
- [7] 刘中春, 岳湘安, 侯吉瑞, 等. 聚合物溶液及三元复合体系驱替盲端油的微观机理[J]. *油气地质与采收率*, 2002, 9(6): 58-61.
- LIU Zhongchun, YUE Xiang'an, HOU Jirui, et al. Microscopic oil displacement mechanism of polymer solution and ASP system in dead-end pores [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2002, 9(6): 58-61.
- [8] 刘春泽, 程林松, 夏惠芬. 粘弹性聚合物溶液对残余油膜的作用机理[J]. *西南石油学院学报*, 2006, 28(2): 85-88.
- LIU Chunze, CHENG Linsong, XIA Huifen. Effect of viscoelastic polymer on residual oil [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28(2): 85-88.
- [9] 宋考平, 杨二龙, 王锦梅, 等. 聚合物驱提高驱油效率机理及驱油效果分析[J]. *石油学报*, 2004, 25(3): 71-74.
- SONG Kaoping, YANG Erlong, WANG Jinmei, et al. Mechanism of enhancing oil displacement efficiency by polymer flooding and driving effectiveness analysis [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(3): 71-74.
- [10] 马云飞, 张宗勋, 侯吉瑞. 乳状液对残余油的微流调节启动机制及触发条件[J]. *特种油气藏*, 2018, 25(6): 131-135.
- MA Yunfei, ZHANG Zongxun, HOU Jirui. Microflow adjustment initiation mechanism and triggering condition of emulsion on residual oil [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(6): 131-135.
- [11] 沈平平, 陈兴隆, 秦积舜. CO₂驱替实验压力变化特性[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(2): 211-215.
- SHEN Pingping, CHEN Xinglong, QIN Jishun. Pressure characteristics in CO₂ flooding experiments [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(2): 211-215.
- [12] 秦积舜, 韩海水, 刘晓蕾. 美国CO₂驱油技术应用及启示[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(2): 209-216.
- QIN Jishun, HAN Haishui, LIU Xiaolei. Application and enlightenment of carbon dioxide flooding in the United States of America [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(2): 209-216.
- [13] 秦积舜, 张可, 陈兴隆. 高含水后CO₂驱油机理的探讨[J]. *石油学报*, 2010, 31(5): 797-800.
- QIN Jishun, ZHANG Ke, CHEN Xinglong. Mechanism of the CO₂ flooding as reservoirs containing high water [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(5): 797-800.
- [14] 李孟涛, 单文文, 刘先贵, 等. 超临界二氧化碳混相驱油机理实验研究[J]. *石油学报*, 2006, 27(3): 80-83.
- LI Mengtao, SHAN Wenwen, LIU Xiangui, et al. Laboratory study on miscible oil displacement mechanism of supercritical carbon dioxide [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(3): 80-83.
- [15] 韩海水, 李实, 陈兴隆, 等. CO₂对原油轻组分膨胀效应的主控因素[J]. *石油学报*, 2016, 37(3): 392-398.
- HAN Haishui, LI Shi, CHEN Xinglong, et al. Main control factors of carbon dioxide on swelling effect of crude hydrocarbon components [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(3): 392-398.
- [16] 韩海水, 李实, 姚小琪, 等. 基于摩尔密度的原油-CO₂体系膨胀能力预测方法[J]. *石油学报*, 2018, 39(4): 456-462.
- HAN Haishui, LI Shi, YAO Xiaoqi, et al. Swelling ability prediction method of crude oil-CO₂ system based on molar density [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(4): 456-462.
- [17] 韩海水, 袁士义, 李实, 等. 二氧化碳在链状烷烃中的溶解性能及膨胀效应[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 88-93.
- HAN Haishui, YUAN Shiyi, LI Shi, et al. Dissolving capacity and volume expansion of carbon dioxide in chain *n*-alkanes [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 88-93.

编辑 邹激滢