文章编号:1673-5005(2018)01-0113-06

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2018.01.014

缝洞型油藏泡沫辅助气驱提高采收率 技术可行性

刘中春^{1,2}, 汪 勇^{3,4}, 侯吉瑞^{3,4}, 罗 旻^{3,4}, 郑泽宇^{3,4}, 屈 鸣^{3,4}, 朱道义^{3,4}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油化工集团公司海相油气藏开发

重点实验室,北京100083;3.中国石油大学提高采收率研究院,北京102249;

4. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室,北京 102249)

摘要:根据缝洞型油藏特征,建立二维和三维可视化缝洞介质物理模型,研究水驱、气驱、泡沫驱在缝洞介质中的剩余油形成及驱替机制,对比分析泡沫驱在缝洞型介质适应性。利用三维高温高压缝洞模型评价泡沫驱实施效果。 结果表明:泡沫辅助气驱能够显著改善缝洞型油藏气驱效果,在实验条件下,水驱后 N₂泡沫驱能够将气驱采收率提高 7%,裂缝中泡沫的增黏作用和可变流动阻力效应使得其能够进一步扩大气驱波及体积,有效启动绕流油与封闭 孔洞剩余油;泡沫辅助气驱作为碳酸盐岩缝洞型油藏三次采油技术是可行的。

关键字:缝洞型油藏;泡沫驱;波及效率;裂缝;剩余油

中图分类号:TE 347.46 文献标志码:A

引用格式:刘中春,汪勇,侯吉瑞,等.缝洞型油藏泡沫辅助气驱提高采收率技术可行性[J].中国石油大学学报(自然 科学版),2018,42(1):113-118.

LIU Zhongchun, WANG Yong, HOU Jirui, et al. Feasibility study on foam-assisted gas flooding EOR technology in karstic oil reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2018,42(1):113-118.

Feasibility study on foam-assisted gas flooding EOR technology in karstic oil reservoir

LIU Zhongchun^{1,2}, WANG Yong^{3,4}, HOU Jirui^{3,4}, LUO Ming^{3,4}, ZHENG Zeyu^{3,4}, QU Ming^{3,4}, ZHU Daoyi^{3,4}

(1. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. SINOPEC Key Laboratory of Marine Oil and Gas Reservoir Development, Beijing 100083, China;

3. Enhanced Oil Recovery Institute in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

4. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: According to the characteristics of the karstic oil reservoir, the two-and three-dimensional visual physical model of karstic media were constructed to study the displacement mechanisms and the characteristics of remaining oil under water, gas and foam flooding, respectively. Then, the suitability of foam in fractured-cavity media was analyzed. Also the experimental implementation effect of foam-assisted gas flooding was evaluated through a high-pressure and high-temperature 3D model. The results show that the foam-assisted gas flooding can remarkably improve the gas flooding of karstic oil reservoir. It is also found that the N₂ foam flooding can increase the recovery of gas flooding by 7%. The viscosity increasing effect and the adjustable flow resistance would be the main mechanism for expanding swept efficiency, which are beneficial to displace the by-pass oil and the remaining oil trapped in the closed fractures. Foam assisted gas flooding as an EOR technology in karstic carbonate reservoir is preliminary feasible.

Keywords: karstic oil reservoir; foam flooding; sweep efficiency; fracture; remaining oil

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05014-004)

作者简介:刘中春(1965-),女,研究员,博士,研究方向为提高采收率技术。E-mail: liuzc. syky@ sinopec. com。

塔河油田奧陶系油藏是中国已经发现的储量最 大的碳酸盐岩缝洞型油藏^[1],因缝洞储集空间尺度 差异大、离散分布,且高角度裂缝发育^[2],其开采机 制与砂岩油藏不同^[3]。水驱、气驱过程中重力分异 起主要作用,复杂的缝洞网络中水、气更容易产生气 窜。目前氮气驱技术在塔河油田缝洞型油藏应用取 得了较好增油效果^[45]。泡沫驱技术在砂岩油藏中 的应用表明其能够有效控制气体流度、扩大波及体 积和延缓窜逸^[67]。为分析泡沫在缝洞型介质中的 作用,笔者依据缝洞型油藏典型的缝洞结构特征,建 立可视化缝洞组合物理模型和三维高温高压缝洞物 理模型,分析泡沫在缝洞型介质中的流动特征和驱 油机制,通过三维高温高压驱替实验评价泡沫驱油 效果,确定泡沫辅助气驱技术在碳酸盐岩缝洞型油 藏应用的可行性。

1 缝洞型油藏储集空间特征

塔河油田为奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏,经多 期次构造运动、岩溶作用及后期深埋垮塌等改造作 用,储集空间非均质性极强。

(1)储集空间类型多样。主要包括大型溶洞、 溶蚀孔洞及不同尺度的裂缝。其中溶洞作为主要的 储集空间,直径大到几十米,小到毫米量级。通常把 直径大于 50 mm 的洞统称为溶洞。溶洞离散分布 且充填现象普遍,充填物通常有 3 种类型^[8],搬运型 沉积物、垮塌型堆积物以及化学型胶结物,充填程度 又分为全充填、半充填和未充填3种。溶孔主要指 直径为2~50 mm 的孔洞;裂缝开度一般小于2 mm,可分为大、中、小3个级别^[9]。基质无储渗能 力,大型溶洞间依靠断裂、裂缝沟通。

(2)多种流动共存。缝洞储集空间的离散性、多 尺度特征与溶洞充填特征决定了油藏中既存在多孔 介质渗流,又有大尺度空间中的洞穴流、管道流,油藏 内部是一个复杂的多种流动共存的耦合流动^[10]。

缝洞型油藏复杂的储集空间特征使得砂岩油藏 渗流物理模拟实验方法不适用,为了评价泡沫辅助 气驱技术的可行性,依据缝洞型油藏储集空间特征, 建立系列缝洞组合物理模拟实验方法。

2 泡沫辅助气驱缝洞组合物理模拟实 验方法

2.1 缝洞组合二维、三维物理模型

(1)二维可视化物理模型。为了分析不同缝洞 结构中泡沫体系驱油特征,根据塔河油田成像测井解 释的典型缝洞组合模式,制作了二维可视缝洞网络模 型(图1),包括缝洞网络与裂缝网络模型,模型中裂 缝开度为0.5~2.0 mm,溶洞直径为14~25 mm。模 型内部自成封闭体,且具有统一的压力系统和初始油 水界面。模型由人造胶结岩心制成,基质为碳酸钙粉 末与有机胶混合高压压制而成,为弱亲油性。



图1 二维缝洞组合模式及可视化缝洞网络模型

Fig. 1 2D visual fracture and cavity model and fracture network model

(2)三维物理模型。依据塔河油田 S48 单元地 质建模研究结果,选取井组 S48-TK467-TK411-T401-TK426 作为模型设计的油藏原型(图2)。将 选取井组的地质模型细分为6层,并等比例缩放到 圆形岩心中,依据相似准则,设计制作了多井缝洞单 元宏观三维可视化物理模型和耐压物理模型(图 3),其中可视化模型采用有机玻璃制成,有利于观 察泡沫的波及路径;耐压模型可承受10 MPa 压力, 采用人造岩心压制而成,基质不具备渗透能力。可 用于评价高压下泡沫的驱油效果。三维模型以满足 雷诺相似准则为前提,通过调整模型及实验参数,使 物理模拟尽量接近满足压力与重力之比相似^[11],能 更符合实际模拟缝洞中流体的流动,尤其是针对溶 洞离散展布下泡沫驱油过程的模拟。

2.2 物理模拟实验流程

(1)物理模拟实验装置。实验装置共由4部分 组成,分别为缝洞型介质物理模型系统、恒速恒压注 入系统、产出流体标定系统和数据采集以及实验控 制系统。

缝洞型介质物理模型系统包括模型支撑、背光 系统及实验模型。支撑及背光系统采用不锈钢钢条 焊接而成,并用固定钢夹对实验模型进行固定。背 光系统采用 LED 面光源,以保证实验录像效果。实 流现象。 验物理模型采用环氧树脂封固,防止模型壁面的窜



图 2 三维物理模型设计依据 Fig. 2 3D physical model design basis



图 3 三维缝洞模型结构示意图及耐压物理模型 Fig. 3 3D fracture and cavity structure schematic diagram and pressure resistance physical model

恒速恒压注入系统包括活塞式中间容器、恒压 恒速计量泵以及底水恒压注入装置等。恒压底水装 置恒压为1~20 kPa;工作温度为45℃。恒压恒速 计量泵工作压力0~30 MPa,工作温度为室温;流速 范围为0.001~10.0 mL/min。

产出流体标定系统主要由生产井和出液收集装 置组成,负责标定产出液的体积。

数据采集及实验控制数据采集和实验控制包括 计算机、数据采集器、压差传感器、温度传感器、烘 箱、实验台以及录像设备组成,用来控制实验运行, 定时测量和温度控制、实验录像等工作。录像部分 由 Logitech Pro C910 高清摄像头负责,视频拍摄分 辨率1920×1080;工作温度为45℃。

(2)物理模拟实验方法与流程。三维可视化物 理模拟实验的实验用水和油分别采用亚甲基蓝和苏 丹 III 试剂作染色处理,实验流程如图 4 所示,着重 图像采集及数据分析。耐压物理模拟实验的流体采 用塔河油田原油和地层水,采用 1 注 4 采方式,实验 温度为60 ℃,实验回压为6 MPa,实验流程如图5 所示,侧重于驱油效果定量化数据计量。实验用模拟油黏度为23.9 mPa・s(25 ℃),泡沫由 N₂、起泡剂和稳泡剂混合流入泡沫发生器产生。





3 井组气驱机制及气窜特征

塔河油田注气驱矿场实践证明气驱在该类油藏 能够增加地层能量、增大波及体积、启动洞顶阁楼油 等[12],能够有效启动水驱剩余油。

与注入水不同,N₂进入溶洞后首先上浮至溶洞 顶部形成气顶,启动水驱后阁楼油,当气顶下推至缝 洞连接处时(形成溶洞下部绕流油),N₂沿裂缝溢 出,进入其他溶洞(图6、7)。由于各个溶洞的连通 程度不尽相同,因此气窜前N₂沿裂缝进入各个连通 溶洞的速度不同。气窜后,驱替压力下降,N₂主要 沿着气窜通道流动,产油速度大幅下降,气体波及体 积增速变缓。



图 6 缝洞网络模型注 N₂ 驱替实验结果 Fig. 6 Experimental results of N₂ flooding in 2D fracture and cavity network model

由于气油密度差异大,重力分异作用使得 N₂ 能够优先波及油藏高部位,尤其是在大尺度通道(如溶洞、大裂缝)中,然后稳定向下驱替注入水与底水 波及不到的阁楼油(图7)。气驱剩余油类型及其成 因(表1)可以初步分为封闭孔洞剩余油、绕流油、洞 底封闭油、油膜。其中,"洞底封闭油"与水驱中阁 楼油相对应。



图 7 三维缝洞模型注 N₂ 驱替实验结果

Fig. 7 Experimental results of N₂ flooding in 3D fracture and cavity model

表1 气驱剩余油类型及成因

Table 1	Types	and	causes	റ	residual	oil	in	N.	flooding
Table 1	Types	anu	causes	01	residual	on	ш	$1N_2$	noouing

剩余油类型	溶洞中位置	成因				
封闭孔洞剩余油	整个溶洞	缝洞连通性差(地质因素)				
泡序针闭冲	溶洞底部	溶洞形状				
	溶洞中、下部	溶洞打开部位较高				
	整个溶洞	缝洞连通性差(流体因素)				
绕流油	溶洞中、上部	溶洞中气油分异				
	溶洞出口位置	气体锥进				
油膜	溶洞壁	润湿性、吸附等				

气驱过程中,由于油气黏度差异大和气体的可 压缩性,气体的流动阻力更小,使其能够进人水驱未 波及的溶洞,进一步扩大波及体积。同时,气体易沿 优势通道发生窜流,不利于扩大波及体积(图7)。 由于缝洞型油藏介质尺度较大,相比前者气体的窜 进对气驱效果影响较大,一旦气窜通道形成之后,注 入气会优先沿通道流动形成绕流油,降低气体波及 效率。

4 泡沫辅助气驱可行性

缝洞型油藏大部分储量分布于溶洞储集空间 中,注入介质能否有效波及溶洞,是此类油藏提高采 收率的关键。裂缝是沟通溶洞的连通通道,裂缝的 连通性与注入介质在不同尺度裂缝中的流动能力决 定了错综复杂的溶洞是否能够被有效波及。增产措 施能够改善裂缝的产状,进而改变连通性,但其措施 影响范围有限且可控性低。因此,迫切需要探索通 过控制注入介质的性质,有效降低气体黏度^[13],达 到提高采收率的目的。泡沫驱在砂岩油藏应用较广 泛,能够有效抑制气体黏性指进、重力超覆。对于缝 洞型介质而言,缝洞尺度差异更大(裂缝小于毫米 级)^[14],其流动形态与多孔介质有所不同。

4.1 泡沫在缝洞中的流动特征及驱油机制

泡沫驱过程中,泡沫首先进入大的流动通道,此 时,流体大致可以分为稳定泡沫带、泡沫-油混合带和 纯油带。由于泡沫的遇油不稳定性,泡沫驱替前缘的 泡沫接触原油后极易破裂,释放出的氮气不易溶于 油,在重力分异作用下进入到构造高部位并不断聚 集,形成次生气顶,顶替出'阁楼油';随着泡沫的不断 注入,原油在泡沫和气体的共同作用下被不断驱出, 大通道内含油饱和度降低,泡沫稳定性增强并在流动 通道内堆积,这种堆积作用增加了后续泡沫向大通道 内运移的阻力,并对气体产生封堵作用,控制了气体 的流度,使气体界面能够均匀下降,有效抑制了气窜 的发生(图8)。二维裂缝网络模型氮气泡沫驱实验 结果也表明,泡沫这种增黏作用与可变阻力效应能够 延缓气体的突破,波及到模型中所有裂缝,包括盲端 缝,大幅增加了气体的波及体积(图9)。

在碳酸盐岩缝洞型油藏中,溶洞波及区域洗油 效率较高,但在裂缝发育区,残余油主要以油膜的形 式存在。泡沫驱过程中,泡沫体系中的表活剂可以 降低油膜的黏附功,使油膜更容易参与流动。同时, 驱替过程中,泡沫挤压岩壁,使附着在岩壁上的油膜 变薄、分离,继而被乳化、携带。因此,泡沫能在一定 程度上提高微观洗油效率。可视化物理模拟实验结 果显示,泡沫驱后,模型壁面相比气驱更为干净,同 时采出液中也发现了原油的乳化现象,证明了泡沫 驱具有提高微观洗油效率的作用。由于缝洞型油藏 中较低的比表面积,可以认为这部分作用对总采收 率的贡献相对较小。



based on fracture and cavity network model



图 9 裂缝网络模型不同开发方式的剩余油分布

Fig. 9 Distribution diagram of residual oil in different ways of development in fracture network model



- 图 10 三维缝洞模型注 N₂ 泡沫驱替实验结果
- Fig. 10 Experimental results of N₂ foam flooding in 3D fracture and cavity model

4.2 缝洞型油藏泡沫驱油效果及可行性

高温高压下,对比缝洞介质中氮气驱与泡沫驱 下注入压力的变化(图11)。气驱过程中,压力基本 保持平稳,直到气窜为止,注入压力大幅降低。而在 泡沫驱过程中,相同注入量下,注泡沫压力高于注气 压力。同时,随泡沫注入量的增加,泡沫注入压力在 整体上呈上升趋势。分析是因为泡沫体系黏度大, 在缝洞网络中具有一定的封堵的作用,增加了对后 续流体的流动阻力,从而使注入压力梯度逐渐升高。 此外,注气驱过程中,当注入约0.45V_P(V_P为孔隙体 积)氮气时发生了气窜;而泡沫驱过程中,泡沫窜发 生在注入量为0.6V_P,也侧面说明泡沫驱的开采效 果更好。



实验还表明,N₂泡沫驱具有较高的产油速度及 驱油效率,底水驱后,泡沫能够辅助提高 N₂ 驱采收 率近7%。对于缝洞型储集体,泡沫辅助气驱提高 采收率是可行的。



5 结 论

(1) 增黏作用与可变阻力效应是泡沫在缝洞型 介质中的主要流动机制,泡沫能够增大注入气的波 及体积。

(2)泡沫辅助气驱能够有效延缓气窜,有效启 动水驱后绕流油和封闭孔洞剩余油,改善水驱效果。

(3)泡沫辅助气驱能够显著提高缝洞型油藏采 收率,作为碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率技术是 可行的。

参考文献:

- [1] 窦之林. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术
 [M].北京:石油工业出版社,2012:64-72.
- [2] 张希明.新疆塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气 藏特征[J].石油勘探与开发,2001,28(5):17-22.
 ZHANG Ximing. The characteristics of lower Ordovician fissure-vug carbonate oil and gas pools in Tahe Oilfield, Xinjiang [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001,28(5):17-22.
- [3] 李阳.塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法 [J].石油学报.2013,34(1):115-121.

LI Yang. The theory and method for development of carbonate fracture-cavity reservoirs in Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(1):115-121.

[4] 刘学利,郭平,靳佩,等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油
 藏注 CO₂ 可行性研究[J]. 钻采工艺,2011,34(4):41-44.

LIU Xueli, GUO Ping, JIN Pei, et al. Feasibility study of injecting CO_2 into the fractured-vuggy carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2011,34(4):41-44.

[5] 郭秀东,赵海洋,胡国亮,等. 缝洞型油藏超深井注氮
 气提高采收率技术[J].石油钻采工艺,2013,35(6):
 98-101.

GUO Xiudong, ZHAO Haiyang, HU Guoliang, et al. Ultra-deep wells in fractured-vuggy reservoir nitrogen injection EOR technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013,35(6):98-101.

[6] 颜五和,谢尚贤,韩培慧.泡沫与泡沫驱油[J].油田化学,1990,7(4):380-385.
 YAN Wuhe, XIE Shangxian, HAN Peihui. On foam and foam flooding[J]. Oilfield Chemistry, 1990,7(4):380-

385.
[7] 于会宇,万新德,刘琴,等.从泡沫复合驱先导性矿场

试验中取得的认识[J].大庆石油地质与开发,2001, 20(2):108-110.

YU Huiyu, WAN Xinde, LIU Qin, et al. Pilot field test of foam compound flooding [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001,20(2):108-110.

[8] 胡向阳,权莲顺,齐得山,等. 塔河油田缝洞型碳酸盐
 岩油藏溶洞充填特征[J]. 特种油气藏,2014,21(1):
 18-21.

HU Xiangyang, QUAN Lianshun, QI Deshan, et al. Fea-

tures of cavern filling in fractured/vuggy carbonate oil reservoirs, Tahe Oilfield[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014,21(1):18-21.

- [9] 马晓强. 塔河油田奧陶系碳酸盐岩缝洞型储层内部结构研究[D]. 北京:中国石油大学,2013:22-34.
 MA Xiaoqiang. Architecture of carbonate fracture-cave reservoirs in ordovician of Tahe Oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2013:22-34.
- [10] 林加恩,李亮,杨慧珠.流与渗流祸合流动理论研究 初探[J].西安石油大学学报(自然科学版),2007,22
 (2):11-15.

LIN Jiaen, LI Liang, YANG Huizhu. Primary investigation of the coupling of channel flow with seepage [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007,22(2);11-15.

[11] 侯吉瑞,李海波,姜瑜,等.多井缝洞单元水驱见水模 式宏观三维物理模拟[J].石油勘探与开发,2014,41
(6):717-722.

HOU Jirui, LI Haibo, JIANG Yu, et al. Macroscopic three-dimensional physical simulation of water flooding in multi-well fracture-cavity unit [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(6):717-722.

- [12] 惠健,刘学利,汪洋,等. 塔河油田缝洞型油藏注气替 油机制研究[J]. 钻采工艺,2013,36(2):55-57.
 HUI Jian, LIU Xueli, WANG Yang, et al. Mechanism research on gas injection to displace the oil remaining in fractured-vuggy reservoirs of Tahe Oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2013,36(2):55-57.
- [13] 李海波,侯吉瑞,李巍,等. 缝洞型碳酸盐油藏氮气泡 沫驱提高采收率机制可视化研究[J]. 油气地质与采 收率,2014,21(4):93-106.
 LI Haibo, HOU Jirui, LI Wei, et al. Laboratory research on nitrogen foam injection in fracture-vuggy reservoir for enhanced oil recovery[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014,21(4):93-106.
- [14] 王超,张强勇,刘中春,等. 缝洞型油藏裂缝宽度变化 预测模型及其应用[J].中国石油大学学报(自然科 学版),2016,40(1):86-91.
 WANG Chao, ZHANG Qiangyong, LIU Zhongchun, et al. Prediction model for fracture width changes in vugfracture oil reservoirs and its application[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2016,40(1):86-91.

(编辑 刘为清)