



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402054

引用格式: 马瑞, 王庆魁, 季岭, 等. 深层低渗稠油油藏降黏剂驱剩余油分布规律及智能识别应用[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1412-1418.

Ma Rui, Wang Qingkui, Ji Ling, et al. Residual oil distribution pattern of viscosity-reducing flooding in heavy oil reservoirs with deep low permeability and application of intelligent identification[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1412-1418.

深层低渗稠油油藏降黏剂驱剩余油分布规律及智能识别应用

马瑞¹, 王庆魁¹, 季岭¹, 王飞¹, 李春雷¹, 孙建¹, 周松², 李想²

(1. 中国石油大港油田第三采油厂, 沧州 061000; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

摘要 针对大港油田官 128 区块低渗透稠油油藏高含水低采出程度的问题,通过室内实验研究降黏剂驱的微观渗流规律和剩余油特征,借助 AI 智能识别定量分析平面波及特征和剩余油分布规律。实验结果表明:降黏剂乳化原油后,乳状液聚并可封堵水驱窜流通道,油滴的优势运移通道增加,提高波及系数,降低含油饱和度。AI 图像识别出孔喉滴状油、壁面膜状油、死角残余油和未波及片状油等剩余油分布类型,并分析其形成机理,提出加注表面活性剂和加密井网,调剖封堵高渗通道的措施。加入降黏剂体系能降低启动压力梯度,提高稠油流动性。水驱转化学驱后,提高了孔隙、喉道中剩余油和死角残余油的洗油效果,采收率提高 15.28%。研究成果为低渗透稠油油藏水驱开发后期注降黏剂高效增油机理研究和现场应用提供重要理论借鉴。

关键词 稠油; 降黏剂; 渗流特征; 剩余油; 图像识别

中图分类号 TE357; 文献标志码 A

Residual Oil Distribution Pattern of Viscosity-reducing Flooding in Heavy Oil Reservoirs with Deep Low Permeability and Application of Intelligent Identification

MA Rui¹, WANG Qing-kui¹, JI Ling¹, WANG Fei¹, LI Chun-lei¹, SUN Jian¹,
ZHOU Song², LI Xiang²

(1. Third Oil Recovery Factory, PetroChina Dagang Oilfield Company, Cangzhou 061000, China;
2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

[Abstract] Aiming at the problem of high water content and low degree of recovery of low permeability heavy oil reservoir in Guan128 block of Dagang Oilfield, the microscopic seepage law and residual oil characteristics of viscosity reducers flooding were studied through indoor experiments, and the planar wave and characteristics and residual oil distribution law were quantitatively analysed with the help of AI intelligent recognition. The experimental results show that after the viscosity reducer emulsification of crude oil, the emulsion aggregates and can block the water-driven flux channels, the advantageous transport channels of oil droplets increase, improve the wave and reach coefficient, and reduce the oil saturation. AI image identified pore throat droplets of oil, the wall membrane oil, the residual oil in the dead corner and the residual oil without wave and flake oil and other types of residual oil distribution, and the formation mechanism was analyzed, and measures of surfactants injection and encryption of the network of wells were put forward, and the blocking of high seepage channels was adjusted. Adding viscosity-reducing agent system can reduce the starting pressure gradient and improve the fluidity of heavy oil. After the conversion of water drive to chemical drive, the oil washing effect of residual oil in the pores and throat and residual oil in the dead space is improved, and the recovery rate is increased by 15.28%. The research results provide important theoretical reference for the research on the mechanism of efficient oil enhancement and field application of viscosity-reducing agent injection in the late stage of water-drive development of low-permeability heavy oil reservoirs.

[Keywords] heavy oil; viscosity reducer; seepage characteristics; residual oil; image recognition

收稿日期: 2024-03-22; 修订日期: 2024-11-22

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U20B6003)

第一作者: 马瑞(1985—),男,汉族,安徽涡阳人,硕士,高级工程师。研究方向:油气田开发。E-mail:dg_marui@petrochina.com.cn。

稠油资源相较于常规原油,具有黏度高,比重大,流动性差的特点。常规一次采油仅能采出地质储量的3%~10%,采出程度十分有限^[1]。采用水驱时,由于油水流量比高,水在驱替稠油过程中并不是均匀的活塞驱替,容易出现指进和舌进现象,最后快速突破,生产井含水率快速上升,波及效率低^[2-3]。因此,稠油高效开发的关键问题在于如何有效降低原油黏度,通常采用热力降黏和化学降黏。热力降黏是利用稠油黏度对温度的敏感性升温降黏;化学降黏则是用化学剂降低稠油黏度,提高稠油流动性,从而提高驱油效率。热力降黏大多采用蒸汽驱和蒸汽吞吐,但往往面临蒸汽超覆和井间汽窜的问题,热利用效率低^[4-8]。化学降黏广泛应用于稠油油藏开发,通过向地层中注入油溶性或者水溶性降黏剂,地层水和稠油混合生成乳状液,降低黏度,从而增大稠油的流动性。

学者们对从降黏剂和表面活性剂的降黏机理开展研究,从乳状液的形态和油水界面分子膜的角度分析乳化能力和油水界面活性。表面活性剂具有良好的界面活性和乳化能力,而稠油原位乳化后形成的乳状液在多孔介质中的渗流规律更为关键。水溶性降黏剂作用机理以乳化降黏为主,通过表面活性物质使地层水或者注入水与原油混合,原油成为分散相分散到水中,形成水包油乳状液,稠油连续性降低,因此黏度降低,流动阻力减小。油溶性降黏剂一般为有机溶剂,与地层原油有着相似的化学性质,但分子量较小,黏度低。根据相似相溶原理,对稠油进行稀释降黏^[9-11]。矿场实践中,降黏剂在稠油井筒和管道输送等方面的实施和应用都取得了显著成效。中外学者在降黏剂和表面活性剂等的研制和表征等开展了大量研究,对于高含水稠油油藏,通过物理模型验证和数学模型建立,都能说明降黏剂驱在稠油油藏冷采提高采收率的潜力和优势^[12-15],但储层中剩余油分布较分散,影响流场发育的因素复杂。目前针对稠油降黏剂驱替过程中油水两相在多孔介质中微观渗流规律及剩余油动用和分布特征缺乏系统分析和研究。尤其通过AI智能识别方法读取计算平面波及特征,建立驱替过程平面波及与注入量的关系。现借助二维可视化平板模型,研究常规水驱和降黏剂驱平面波及和剩余油分布特征。采用长岩心启动压力梯度实验和驱替实验研究稠油启动压力梯度、水驱+降黏剂驱的驱替特征,并评价其稠油+降黏剂流动界限和驱油效果,进一步阐述稠油降黏剂驱驱油机理及剩余油赋存规律,为稠油油藏注降黏剂原位乳化高效开发提供基础理论依据和参考。

1 实验条件与方法

1.1 实验条件

实验所用仪器包括二维可视化平板物理模型驱替装置和长岩心驱替装置。其中二维可视化平板物理模型驱替装置主要由均质可视化平板模型、高清高倍数微距摄像头、平流泵、产出液采出系统等组成,长岩心驱替装置主要由ISCO恒速恒压泵、岩心夹持器、压力传感器、产出液采集系统。

实验所用二维可视化平板模型由30目玻璃微珠均质充填,尺寸为60 cm(长)×60 cm(宽)×5 cm(高),渗透率为150 mD。

实验所用油样为大港油田G区块原油,地面原油密度为0.941 g/cm³,黏度为5 004 mPa·s(40℃)。实验所用水样为大港油田G区块地层水,矿化度为24 g/L。

实验所用岩心为大港油田G区块钻取的天然岩心,渗透率为150 mD。

1.2 实验方法

1.2.1 可视化平板物理模型驱替实验

分别进行水驱和水驱+化学驱波及效率评价,分析水驱和化学驱替后剩余油赋存规律,实验装置如图1所示。主要操作流程如下:①根据油藏的物性参数制作两组相应的可视化平板模型,模型固结后进行密封性测试;②对两组可视化平板进行饱和水和饱和油,计量饱和水和油的体积,并将模型置于烘箱内设置温度为75℃,即油藏温度下老化24 h,并获取原油初始微观分布形态图像;③以0.2 mL/min的速度连续向实验系统中注水直至出口端含水率为85%,即参考油田目前含水率,高清

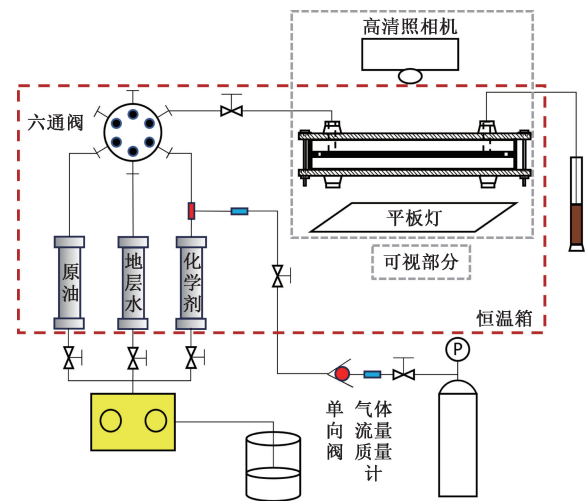


图1 可视化平板物理模拟实验装置

Fig. 1 Visualized flat-panel physics simulation experiment device

摄像头对驱替过程平板图像进行拍摄和记录;④向其中一组模型再次以 0.2 mL/min 的速度连续向实验系统中注降黏剂,降黏剂质量分数为 2% ,直至出口端含水率为 98% ,高清摄像头对驱替过程平板图像进行拍摄和记录。

1.2.2 长岩心启动压力梯度和驱替实验

稠油启动压力梯度实验基本原理:稠油体系由不流动状态转变为流动状态的临界点对应的压力梯度,称为启动压力梯度。实验参考《稠油油藏高温相对渗透率及驱油效率测定方法》(SY/T 6315—2006),主要实验过程为:岩心中的稠油体系和稠油+化学剂体系从初始的不流动状态到流动状态,即不稳定渗流状态下,然后再回到最终稳定的不流动状态,利用平衡法测出启动压力梯度。

图2为长岩心启动压力和驱替实验装置。水驱+降黏剂驱主要实验步骤包括:①取天然岩心洗净烘干抽真空,饱和和配制的地层水,并计量饱和水的体积;②饱和油用原油以 0.1 mL/min 的注入速度饱和,并计量饱和油的体积,将岩心放置于 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中恒温老化 24 h ;③采用 0.2 mL/min 的注入速度

水驱,记录驱替过程的压力变化、采出油和采出水的体积,驱替至含水率达到 98% ,停止水驱;④采用 2% 降黏剂溶液继续驱替,注入速度与之前一致,驱替至含水率达到 98% 结束实验,记录驱替过程的压力变化、采出油和采出水的体积。

2 结果与分析

2.1 降黏剂驱渗流特征及剩余油分布分析

水驱过程中可视化平板剩余油分布如图3所示,其中浅黄色区域表示水驱过程波及区域,深色区域表示水驱未波及区域。由于水与稠油之间存在流度差,驱替过程中出现了明显的指进现象^[16-18],随着水的持续注入,驱替前缘向前推进,波及范围扩大。非均匀推进的油水剖面使得主流通道逐渐形成,大部分水沿着主流通道开始窜流,当窜流通道到采出端后,波及延伸范围受限,油层存有大量的剩余油。

图4展示了水驱转降黏剂驱后,随着注入量的增加降黏剂驱替前缘向前推进的过程,可以看出,平面波及的程度。水驱完成后,开始注入降黏剂,

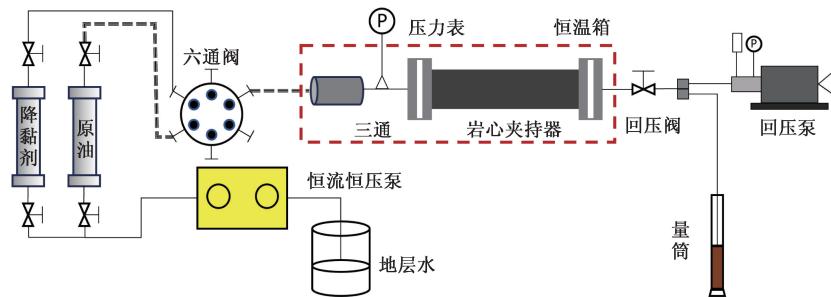


图2 长岩心启动压力和驱替实验装置

Fig. 2 Experimental device for start-up pressure and displacement in long cores

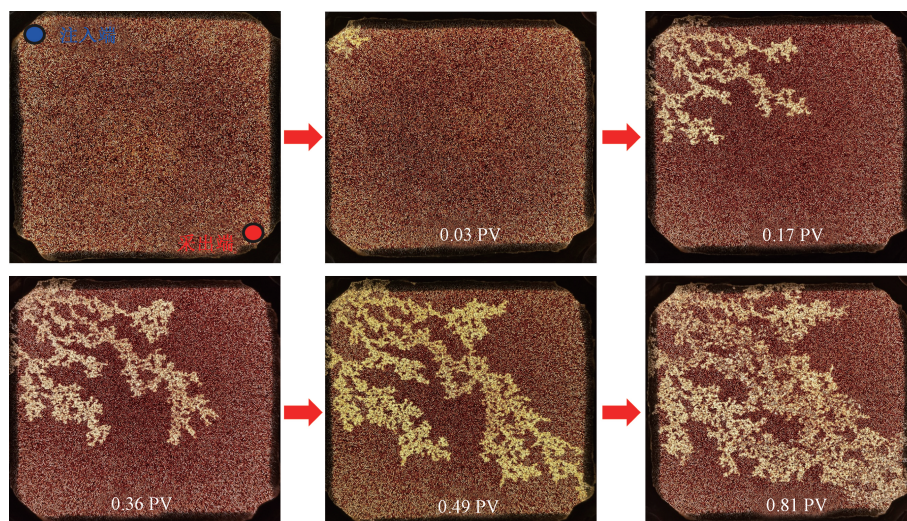


图3 可视化平板水驱剩余油分布图

Fig. 3 Visualization of the residual oil distribution of the flat plate water flooding

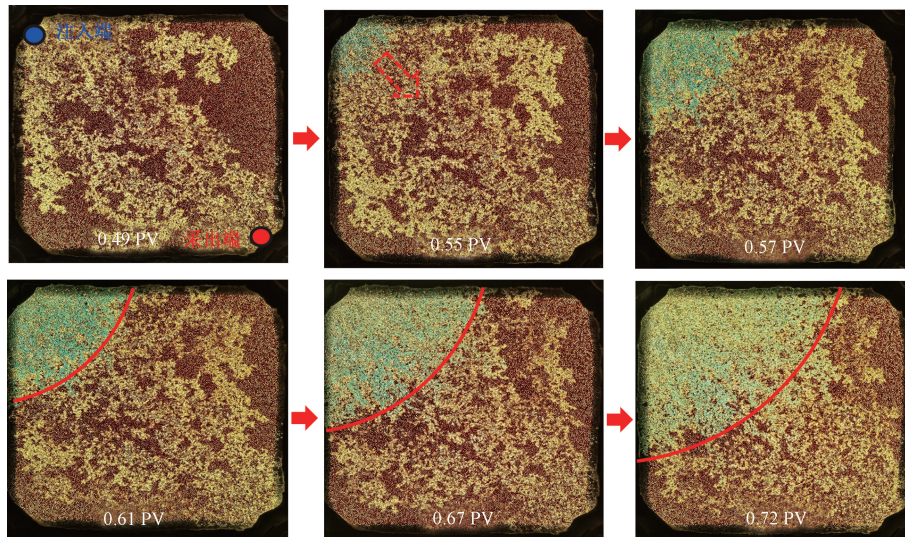


图4 可视化平板水驱转降黏剂驱后阶段剩余油分布图

Fig. 4 Visualization of the residual oil distribution in the post-drive stage of flat plate water flooding to viscosity reducer flooding

之前未波及的深棕色区域在降黏剂的驱动力下,水向主流通道的两侧含油区运移。从注入端注入的降黏剂则缓慢向前推进,深棕色的未波及区域布满浅蓝色降黏剂,浅蓝色降黏剂使油层波及面积显著增大且能有效地启动并驱替残余油,提高驱油效率。这是由于降黏剂分子的极性基团会进入稠油内,削弱重质组分之间强烈的相互作用,引起各向异性,形成流动性强水包油乳状液,达到低浓度下高效降黏目的^[19-20]。与此同时,一些降黏剂分子被吸附到孔喉壁或约束到小孔及盲端,使得残余油被启动起来降低了残油饱和度。

采用图像识别方法定量描述剩余油的具体分布情况、各区域的波及效率和含油饱和度。图像预处理过程包括:误差控制、灰度化和二值化。图5为可视化平板图像二值化处理前后,基于OpenCV的图像亮度趋同技术,通过目标识别器对含油区域进行识别分类,目标识别器采用SoftMax模型。同时在目标检测任务中,边框回归器能够定位目标边框。在输入的微观剩余油图像中通过选框推荐来寻找最有可能包含目标的一部分区域,采用卷积神经网络直接选择候选框并进行推荐。采用Mask R-CNN图像识别模型对特征进行抽取,图6为Mask R-CNN算法的示意图,随后迭代处理,计算波及系数和含油饱和度等参数。

图7为水驱和水驱+化学驱注入体积与平面波及系数关系,当注入量从0.09 PV增加至0.36 PV,波及系数由4.14%增大至19.62%。受指进现象影响,当注入量达到0.81 PV后,平面波及系数达到24.66%,水窜流通道形成后波及系数趋于稳定。水驱转降黏剂驱后,降黏剂具有乳化原油的作用,

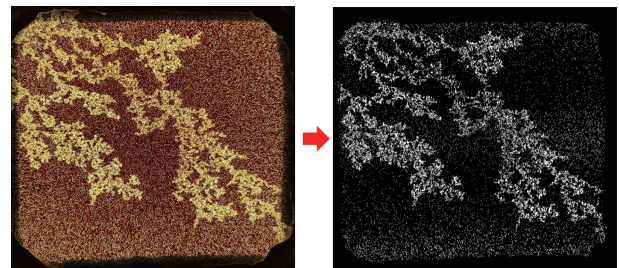
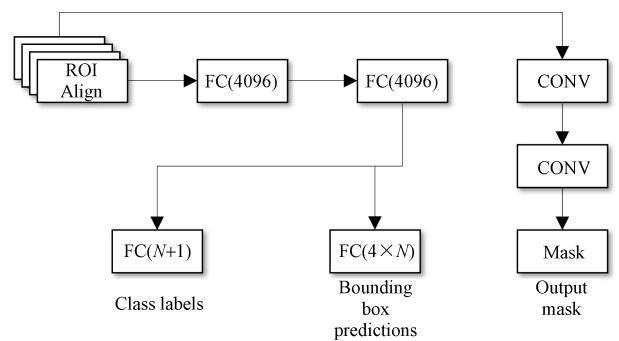


图5 可视化平板图像二值化处理前后

Fig. 5 Visualized flat image before and after binarization process



ROI Align 为提取感兴趣区域特征;FC 为全连接层;Class labels 为类别标签;Bounding box predictions 为边界框预测;CONV 为卷积层;Mask 为掩码;Output mask 为输出掩码;N 为目标数量

图6 Mask R-CNN 算法的示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Mask R-CNN algorithm

乳状液聚集后可封堵窜流通道,油滴的优势运移通道增加,驱替前缘向前平行推进,波及面积变大。注入降黏剂 0.22 PV,平面波及系数增加 8.03%。可视化平板中大部分波及区域透光性的增加表明本区剩余油饱和度降低,降黏剂对波及区残余油有较好的启动和驱替效果。由图8可以看出,水驱转降黏剂驱后相比于继续水驱含油饱

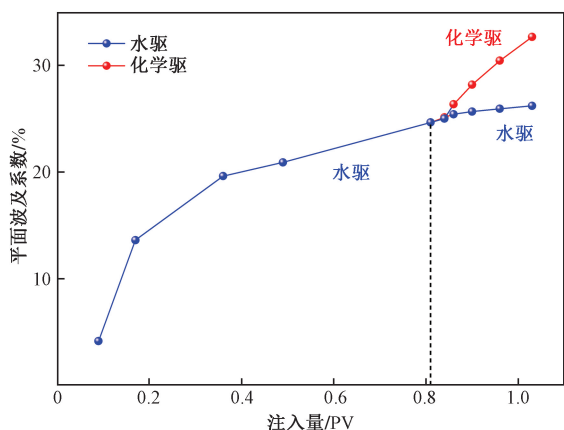


图7 注入体积与平面波及系数关系
Fig. 7 Relationship between injected volume and planar wave and coefficients

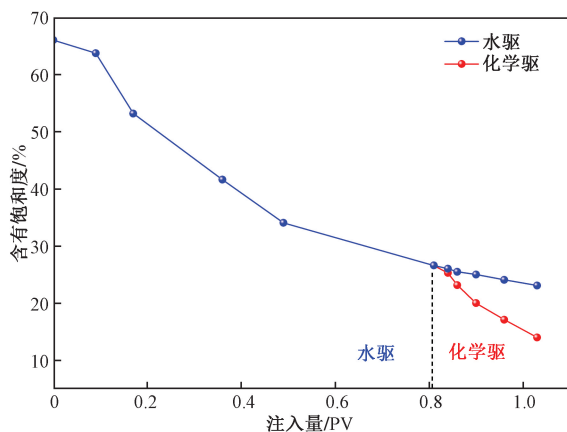


图8 注入体积与含油饱和度关系
Fig. 8 Relationship between injection volume and oil saturation

和度降低 9.09%，表明水驱转降黏剂驱后降黏剂能将附着在壁面和孔喉的残余油洗出，从而减低残余油饱和度。

研究驱替后剩余油类型，可以有效地针对不同种类剩余油进行相应的提高采收率措施，实现油田开发经济效益最大化。降黏剂作用下，部分油滴在孔隙中被剥离，因贾敏效应和毛细力滞留在运移通道的孔喉处，呈油滴状或柱状如图 9(a) 所示，而沉积在多孔介质通道壁面上的重质组分则会以油膜的形式黏附在表面如图 9(b) 所示。由于驱替相和被驱替相流度比大，指进现象明显，形成窜流通道后，两侧还存在大量未波及片状油和死角残余油。死角残余油处于孔隙的隅角，盲端等孔隙连通性不好的位置，驱替相难以进入。对于孔喉滴状油和壁面膜状油可以采取注入表面活性剂，降低油水界面张力和改变润湿性，从而提高驱油效率。而死角残余油和未波及片状油，现场可以采取加密井网，调

剖封堵高渗层，进一步提高采收率。

2.2 启动压力梯度变化

中外学者普遍认为在多孔介质中，稠油在渗流中表现出非牛顿流体的特性，存在启动压力梯度。图 10 为稠油体系在温度为 40 ~ 100 °C 下流速和压差的关系，体系温度越高，对应压差与流速的变化越小。图 11 为启动压力梯度随温度变化，可以看出对于单一的稠油体系，随温度升高，启动压力梯度降低，当温度升高至约 100 °C 时，启动压力梯度消失。加入降黏剂后，原油黏度显著降低，流动能力增强，启动压力梯度明显降低，温度 80 °C 时，启动压力梯度消失。在油藏温度 70 °C 下，化学剂的加入可以显著降低启动压力梯度，改善流动性。

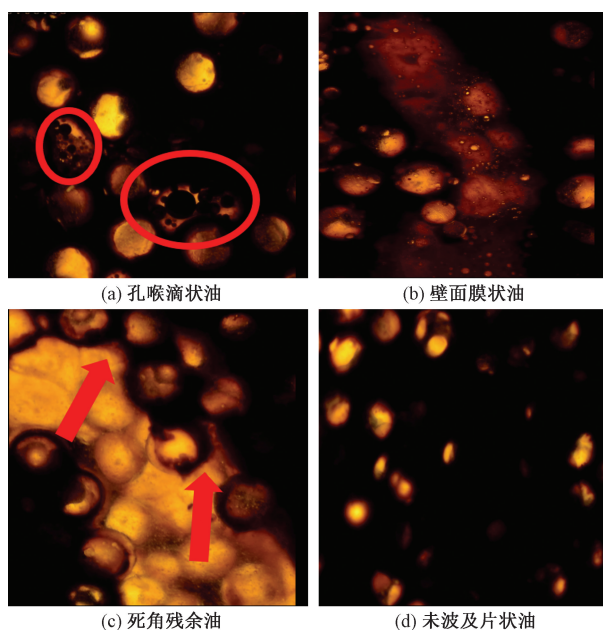


图9 可视化平板驱替后剩余油类型
Fig. 9 Visualization of the type of the residual oil after flat plate displacement

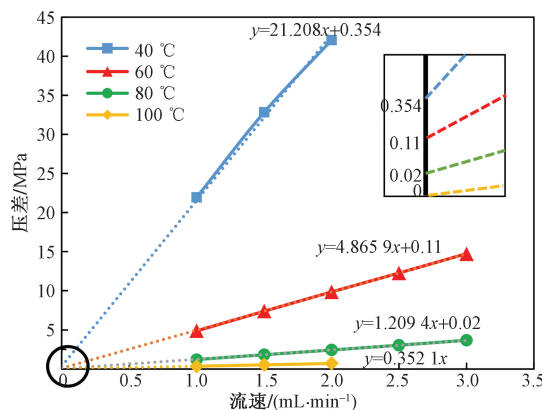


图10 不同温度下稠油体系流速和压差的关系
Fig. 10 Relationship between flow rate and differential pressure in heavy oil system at various temperatures

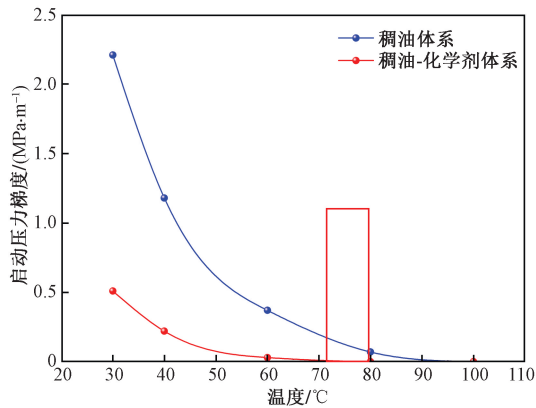


图 11 启动压力梯度随温度变化

Fig. 11 Start-up pressure gradient with temperature

2.3 水驱 + 化学驱油效果评价

岩心驱替实验结果(图 12)表明,水驱前期原油中胶质和沥青质含量高,易形成油包水乳状液增大被驱替相黏度,导致渗流阻力增大,驱替压力升高。形成窜流通道后,驱替压力下降,含水率升高,采收率增长缓慢,最终水驱采收率达到 62.04%。

转化学驱后,前期由于贾敏效应注入压力短暂升高,随着降黏剂与原油相互作用,主要是稠油重质组分在降黏剂的作用下被分解和分散成小分子聚集体,但体系黏度急剧降低,流动能力增强,驱替压力降低,含水率随之降低^[21-23]。注入的化学剂能将原油从岩石表面剥离,并以水包油乳状液形式运移,增加驱替相与被驱替相流度比,减小指进,被束缚在小孔隙、喉道中的剩余油及死角残余油也会被化学剂波及,提高了波及效率和洗油效率,化学驱在水驱的基础上采收率提高 15.28%。

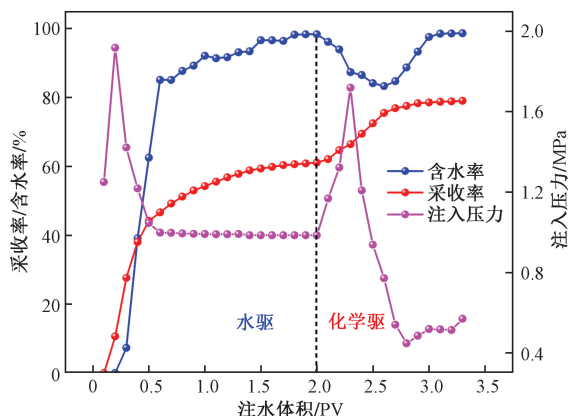


图 12 岩心水驱 + 化学驱采收率、含水率、注入压力与注入量的关系

Fig. 12 Relationship between recovery rate, water content, injection pressure and injection volume for water flooding + chemical flooding in rock core

3 结论

(1) 可视化平板实验表明降黏剂具有乳化原油的作用,乳状液聚并可封堵窜流通道,油滴的优势运移通道增加,提高波及系数,同时能有效地启动并驱替残余油,提高驱油效率,降低含油饱和度。

(2) 采用 AI 图像识别方法定量描述水驱和化学驱剩余油的具体分布情况。水驱和化学驱后存在孔喉滴状油、壁面膜状油、死角残余油和未波及片状油。孔喉滴状油和壁面膜状油可以采取注入表面活性剂,降低油水界面张力和改变润湿性。死角残余油和未波及片状油,现场可以采取加密井网,调剖封堵高渗层。

(3) 加入化学剂能显著降低原油黏度,从而降低原油启动压力梯度,改善流动性。岩心驱替过程中化学剂会导致驱替压力和含水率会降低,同时化学剂能提高孔隙、喉道中剩余油和死角残余油的洗油效果。

参 考 文 献

- [1] 孙焕泉, 刘慧卿, 王海涛, 等. 中国稠油热采开发技术与发展方向[J]. 石油学报, 2022, 43(11): 1664-1674.
Sun Huanquan, Liu Huiqing, Wang Haitao, et al. Development technology and direction of thermal recovery of heavy oil in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(11): 1664-1674.
- [2] 管错, 李先杰, 张健, 等. 一种适用于水驱开发全过程的新型水驱曲线推导及应用[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(22): 9470-9475.
Guan Cuo, Li Xianjie, Zhang Jian, et al. Derivation and application of a novel waterflooding type curves under different levels of water cut [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(22): 9470-9475.
- [3] 张国辉, 刘新荣, 李福堂, 等. 岩心油水两相渗流启动压力梯度实验研究[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(13): 5372-5380.
Zhang Guohui, Liu Xinrong, Li Futang, et al. Experiment research on starting pressure gradient of oil-water two phase flow in cores [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(13): 5372-5380.
- [4] 郭云飞, 刘慧卿, 刘人杰, 等. 稠油油藏 SAGD 蒸汽腔位置综合评估及产量预测[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(4): 484-490.
Guo Yunfei, Liu Huiqing, Liu Renjie, et al. Comprehensive evaluation on steam chamber location and production prediction of SAGD in heavy oil reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(4): 484-490.
- [5] 蒋琪, 游红娟, 潘竞军, 等. 稠油开采技术现状与发展方向初步探讨[J]. 特种油气藏, 2020, 27(6): 30-39.
Jiang Qi, You Hongjuan, Pan Jingjun, et al. A preliminary discussion on the status quo and development direction of heavy oil exploitation technology [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(6): 30-39.
- [6] 刘刚, 曹涵, 朱爱国, 等. 稠油油藏多相协同蒸汽驱物理模拟实验[J]. 特种油气藏, 2023, 30(3): 131-136.

- Liu Gang, Cao Han, Zhu Aiguo, et al. Physical simulation of multiphase synergistic steam drive in thick oil reservoirs[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(3): 131-136.
- [7] 崔晨光, 覃建华, 谭龙, 等. 玛湖砾岩油藏体积压裂开发后气混相驱提高采收率实验[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(2): 528-537.
- Cui Chenguang, Qin Jianhua, Tan Long, et al. Experimental on enhanced oil recovery by hydrocarbon gas miscible flooding after volume fracturing in mahu conglomerate reservoir[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(2): 528-537.
- [8] 杨燕, 李路宽, 朱宽亮, 等. 稠油热采硅酸盐水泥抗高温技术研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(1): 39-49.
- Yang Yan, Li Lukuan, Zhu Kuanliang, et al. Research progress on high temperature portland cement for heavy oil thermal recovery [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(1): 39-49.
- [9] 王晨辉, 徐基鹏, 张厚君, 等. 稠油降黏机理及降黏剂合成方法的研究进展[J]. *化学工业与工程*, 2022, 39(3): 1-17.
- Wang Chenhui, Xu Jipeng, Zhang Houjun, et al. Research progress on viscosity reduction mechanism and synthesis method of viscosity reducing agent for heavy oil[J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2022, 39(3): 1-17.
- [10] 王旭东, 张健, 施雷庭, 等. 稠油活化剂降黏机理及驱油效果研究[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(6): 133-138.
- Wang Xudong, Zhang Jian, Shi Leiting, et al. Study on viscosity reduction mechanism and oil displacement effect of heavy oil activator[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(6): 133-138.
- [11] 费东涛, 郭继香, 孙建芳, 等. 一种两亲聚合物稠油降黏剂的制备及性能评价[J]. *精细化工*, 2022, 39(5): 1072-1080.
- Fei Dongtao, Guo Jixiang, Sun Jianfang, et al. Synthesis and performance evaluation of an amphiphilic polymer viscosity reducer for heavy oil[J]. *Fine Chemicals*, 2022, 39(5): 1072-1080.
- [12] 李宾飞, 王凯, 赵洪涛, 等. 降黏剂作用下油水两相渗流特征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(1): 104-110.
- Li Binfei, Wang Kai, Zhao Hongtao, et al. Flow characteristics of oil-water two-phase seepage under action of viscosity reducer[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2022, 46(1): 104-110.
- [13] 张民, 孙志刚, 于春磊, 等. 普通稠油原位乳化降黏驱微观渗流特征可视化研究[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(3): 152-158.
- Zhang Min, Sun Zhigang, Yu Chunlei, et al. Visualization of microscopic flow characteristics for in-situ emulsification and viscosity reduction development in common heavy oil reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(3): 152-158.
- [14] 张尧, 毛振强, 吕成远, 等. 高青稠油油藏降黏剂驱注入参数数值模拟优化[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(4): 145-150.
- Zhang Yao, Mao Zhenqiang, Lü Chengyuan, et al. Numerical simulation optimization of injection parameters by viscosity reducer flooding in Gaoqing heavy oil reservoir[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2023, 47(4): 145-150.
- [15] 王彦玲, 许宁, 张传保, 等. 稠油降黏剂的降黏机理研究进展[J]. *应用化工*, 2021, 50(11): 3069-3073.
- Wang Yanling, Xu Ning, Zhang Chuanbao, et al. Research progress on viscosity reduction mechanism of heavy oil viscosity reducer[J]. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(11): 3069-3073.
- [16] 孙强, 黄世军, 李权. 多层稠油油藏水驱动用程度评价方法[J]. *断块油气田*, 2020, 27(3): 323-326.
- Sun Qiang, Huang Shijun, Li Quan, et al. Evaluation method of water driving degree of multi-layer heavy oil reservoir[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(3): 323-326.
- [17] 刘艳红, 万文胜, 罗鸿成, 等. 吉7井区稠油油藏油水自乳化作用及水驱特征[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(6): 696-701.
- Liu Yanhong, Wan Wensheng, Luo Hongcheng, et al. Self-emulsification and waterflooding characteristics of heavy oil reservoirs in wellblock Ji-7[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(6): 696-701.
- [18] 高亚军, 耿站立, 谢晓庆, 等. 一种水驱砂岩油藏采收率经验公式改进方法[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(11): 4321-4326.
- Gao Yajun, Geng Zhanli, Xie Xiaoqing, et al. A new formula for calculating recovery factor of water drive sandstone reservoir[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(11): 4321-4326.
- [19] 邵文丽, 张娜. 稠油降黏剂的研究进展[J]. *精细石油化工*, 2020, 37(4): 79-84.
- Shao Wenli, Zhang Na. Viscosity reducing agents of heavy oil [J]. *Speciality Petrochemicals*, 2020, 37(4): 79-84.
- [20] 宋立甲. 特高含水油田储层物性时变规律及水驱—化学驱调整挖潜方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- Song Lijia. Study on the time-varying law of reservoir physical properties in ultra-high water cut oil fields and the method of water-chemical drive adjustment and tapping potential [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [21] 亓树成, 彭小强, 郝红永, 等. 降黏剂及其施工工艺对火驱稠油油藏注采井间快速连通的影响[J]. *大庆石油地质与开发*, 2023, 42(2): 86-90.
- Qi Shucheng, Peng Xiaoqiang, Hao Hongyong, et al. Influence of viscosity reducer and its operation technique on rapid injector-producer connection in *in-situ* combustion heavy oil reservoirs [J]. *Daqing Petroleum Geology and Development*, 2023, 42(2): 86-90.
- [22] 杨庭宝, 钟会影, 夏惠芬, 等. 基于微观渗流特征的水驱后残余油动用机理研究[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(6): 46-52.
- Yang Tingbao, Zhong Huiying, Xia Huifen, et al. Mechanism of residual oil mobilization after water flooding based on microscopic flow characteristics[J]. *Oil and Gas Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(6): 46-52.
- [23] 高文彬, 李宜强, 何书梅, 等. 基于荧光薄片的剩余油赋存形态分类方法[J]. *石油学报*, 2020, 41(11): 1406-1415.
- Gao Wenbin, Li Yiqiang, He Shumei, et al. Classification method of occurrence mode of remaining oil based on fluorescence thin sections[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(11): 1406-1415.