



基于高压汞灯荧光显微观测的剩余油定量分析方法

李忠诚 鲍志东 王洪学 张栋

Quantitative Analysis Method of Remaining Oil Based on Fluorescence Microscopic Observation of High-Pressure Mercury Lamp

LI Zhongcheng, BAO Zhidong, WANG Hongxue, ZHANG Dong

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023114>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

胡状集油田特高含水油藏剩余油水驱技术

Water Flooding Technology for the Residual Oil in the Ultra-High Water Cut Oil Reservoirs of the Huzhuangji Oilfield

石油钻探技术. 2018, 46(5): 95–101 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018081>

基于驱替定量表征的高含水油田注水井分层配注量确定方法

A Method to Determine the Layered Injection Allocation Rates for Water Injection Wells in High Water Cut Oilfield Based on Displacement Quantitative Characterization

石油钻探技术. 2018, 46(2): 87–91 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018027>

特高含水期油田“四点五类”剩余油分类方法

“Four Points and Five Types” Remaining Oil Classification in Oilfields with Ultra-High Water Cut

石油钻探技术. 2017, 45(2): 76–80 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702012>

纳米二氧化硅改性聚合物的油藏适用性评价与微观驱油效果研究

Research on Reservoir Applicability Evaluation and Micro Oil Flooding Effect of a Nano-Silica Modified Polymer

石油钻探技术. 2021, 49(1): 107–112 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021016>

塔里木油田库车山前高压盐水层油基钻井液技术

Oil-Based Drilling Fluid Technology for High Pressure Brine Layer in Kuqa Piedmont of the Tarim Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 29–33 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020007>

考虑产液量变化的水驱油藏产量递减规律研究

The Production Decline Laws of Water Drive Reservoirs Considering Variable Liquid Production

石油钻探技术. 2019, 47(1): 96–100 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018155>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2023114

引用格式: 李忠诚, 鲍志东, 王洪学, 等. 基于高压汞灯荧光显微观测的剩余油定量分析方法 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(3): 112-117.

LI Zhongcheng, BAO Zhidong, WANG Hongxue, et al. Quantitative analysis method of remaining oil based on fluorescence microscopic observation of high-pressure mercury lamp [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 112-117.

基于高压汞灯荧光显微观测的剩余油定量分析方法

李忠诚^{1,2}, 鲍志东², 王洪学¹, 张 栋³

(1. 中国石油吉林油田分公司勘探开发研究院, 吉林松原 138000; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江大庆 163318)

摘 要: 为明确不同驱油阶段微观剩余油的分布状态, 指导老油田在注水开发后期的剩余油挖潜, 选取典型区块不同渗透率级别的岩心进行了驱油试验, 采用液氮冷冻技术制作岩心薄片并利用高压汞灯荧光显微镜, 分析了饱和油阶段、水驱至模型初见水阶段和水驱结束后阶段的微观剩余油赋存状态。经过图像处理, 细分了剩余油赋存状态, 并计算了不同状态剩余油的赋存比例。研究表明, 中渗透率岩心水驱主要动用了自由态剩余油, 水驱后残存的自由态剩余油较多, 可作为继续挖潜对象; 低渗透率岩心水驱过程中自由态微观剩余油含量进一步减少, 水驱后束缚态的膜状剩余油及半束缚态的喉道状剩余油可作为接替开发对象。高压汞灯荧光显微观测法为剩余油分析提供了一种新的量化方法, 可以为老油田的剩余油挖潜提供借鉴。

关键词: 高压汞灯荧光; 微观剩余油; 量化分析; 赋存规律; 水驱

中图分类号: TE319

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)03-0112-06

Quantitative Analysis Method of Remaining Oil Based on Fluorescence Microscopic Observation of High-Pressure Mercury Lamp

LI Zhongcheng^{1,2}, BAO Zhidong², WANG Hongxue¹, ZHANG Dong³

(1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin, 138000, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing, 102249, China; 3. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163318, China)

Abstract: In order to clarify the distribution of microscopic remaining oil in different oil displacement stages and guide the exploration of remaining oil potential in the late stage of water injection development in mature oilfields, cores with different permeability levels from typical blocks were selected for oil displacement experiments. Liquid nitrogen refrigeration technology was used to prepare core slices, and high-pressure mercury lamp fluorescence microscopy was used to analyze the microscopic remaining oil occurrence status during the saturated oil stage, the initial water breakthrough stage, and the post water flooding stage. Through image processing, the occurrence state of remaining oil were further categorized, and the proportions of remaining oil in different states were calculated. The results show that water flooding in medium-permeability core mainly utilizes free-state residual oil, and there is more free residual oil remaining after water flooding, which can be used as a potential target for further exploration. The free-state microscopic residual oil in low-permeability cores was further reduced during the water flooding process, and then the membrane-shaped residual oil in bound state and the throat-shaped residual oil in semi-bound state after water flooding can be used as alternative development resource. The microscopic observation method by high-pressure mercury lamp fluorescence provides a new quantitative approach for the remaining oil analysis and a good reference for the exploration of remaining oil potential in mature oilfields.

Key words: fluorescence of high-pressure mercury lamp; microscopic remaining oil; quantitative analysis; occurrence rule; water flooding

收稿日期: 2023-09-30; 改回日期: 2023-12-22。

作者简介: 李忠诚(1980—), 男, 吉林松原人, 2004年毕业于石油大学(北京)计算机科学与技术专业, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要从事油气田开发技术方面的研究工作。E-mail: lizhongcheng_1980@126.com。

基金项目: 中国石油勘探与生产公司前瞻性课题“低/超低渗透油田有效开发关键技术研究”子课题“低渗透油藏精细水驱优化调控技术研究”(编号: 2021DJ1303)资助。

随着油田注水开发的进行,老油田目前大多面临注采关系固定、水驱波及效率低等问题^[1-3]。为了提高剩余油动用程度,综合调整老油田后期开发,亟需明确储层中剩余油分布规律,从微观角度确定剩余油赋存状态,以便进一步调整挖潜^[4-6]。

目前,剩余油微观定量分析方法主要有 CT 扫描法、核磁共振法和荧光薄片观察法等^[7-10]。其中,CT 扫描法可以分析剩余油三维分布状态,分析精度可达纳米级,已在塔里木油田、胜利油田等地得到应用,但由于成本较高,暂未得到大面积推广使用^[11-12]。荧光薄片观察法虽无法 3D 成像,但制备流程简单、成本低,已成为剩余油的主要研究手段。不过,由于是 2D 成像,存在因岩心薄片上下层遮挡导致的精度不高、图像显示不清晰等问题^[5]。

为提高剩余油识别精度,笔者采用液氮冷冻技术制作岩心薄片,用高压汞灯荧光显微镜观测划分油、水、岩石,以提高剩余油定量分析的准确度。

1 高压汞灯荧光显微镜观测试验

1.1 试验原理

根据不同组分在荧光图像中的强度和颜色差异,可以在荧光图像中区分油、水、岩石及其他组分^[13-15]。普通荧光显微镜大多采用蓝光激发,由绿色滤镜接收图像信息,油水及矿物边界区分不明显。高压汞灯作为光源,采用紫外光激发,全波段滤镜接收图像信息,不同组分差异明显,油、水及岩石界面清晰,如图 1 所示。紫外光激发下所获图像中不同原油组分呈现不同颜色^[16-17]:芳烃的发光颜色有蓝、蓝白、淡蓝白;油质沥青的发光颜色有黄、黄白、浅黄白、绿黄、浅绿黄、黄绿、浅黄绿、绿、浅绿、蓝绿、浅蓝绿、绿蓝、浅绿蓝;胶质沥青的发光颜色以橙为主,还有褐橙、浅褐橙、浅橙、黄橙、浅黄橙;沥青质沥青的发光颜色以褐为主,还有褐、浅褐、橙褐、浅橙褐、黄褐、浅黄褐;碳质沥青不发光(全

黑)。同时,地层水由于溶解少量芳烃,呈淡蓝色。

1.2 微观剩余油富集状态分类

由于地层非均质性、岩石表面润湿性和毛细管液阻效应等作用,驱替后地层中还存在大量以多种赋存状态存在的微观剩余油^[18],根据其流动性不同可大致分为 3 类^[19-21]:1)束缚态剩余油主要分布在岩石表面,流动性很差;2)半束缚态剩余油比束缚态稍弱,离岩石表面稍远;3)自由态剩余油大多离岩石表面较远,以自由的形式存在于孔隙中。

按照形成机理和最终状态,将 3 类剩余油细分为喉道状、角隅状、孔表面薄膜状、簇状、粒内状、粒间吸附状、淡雾状、孔隙中心沉淀状、颗粒吸附状和狭缝状等 10 类。其中,孔表面薄膜状、颗粒吸附状和狭缝状属于束缚态,大多吸附在岩石表面;角隅状、喉道状和孔隙中心沉淀状属于半束缚态,通常存在于孔隙角落或细长的喉道内;簇状、粒内状、粒间吸附状和淡雾状属于自由态剩余油,形态较分散,流动能力较强。

1.3 试验条件与步骤

1.3.1 试验条件

为确定岩心不同水驱阶段的剩余油赋存规律,选取 8 块不同区块岩心制备岩心薄片,并进行驱油试验。利用偏光显微镜定量分析剩余油分布,试验温度为 25 ℃,试验用水取自油田现场污水,试验用岩心物性参数见表 1。

表 1 试验用岩心物性参数
Table 1 Physical parameters of experimental cores

岩心 编号	渗透率/ mD	孔隙度, %	原始含油 饱和度, %	驱油效率, %	
				水驱至初见水	水驱结束后
1	505.6	25.2	66.3	39.0	63.4
2	226.6	23.4	69.9	35.3	57.6
3	12.4	16.6	54.6	36.7	56.7
4	4.6	17.0	53.9	35.7	51.8
5	16.4	17.0	53.1	38.2	54.4
6	11.9	22.0	51.9	35.7	52.4
7	4.5	15.6	48.3	36.0	50.0
8	4.6	18.4	57.7	35.6	51.1

1.3.2 试验步骤

采用液氮冷冻技术制作岩心薄片,厚度小于 0.05 mm,以避免上下层颗粒的互相遮挡,如图 2 所示。切割岩心及磨片过程中均采用液氮喷嘴降温,

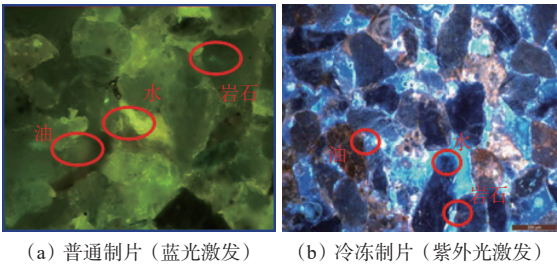


图 1 油水与岩石分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of oil, water, and rock

避免产生热量导致岩心中流体蒸发,保证分析结果的精确性。

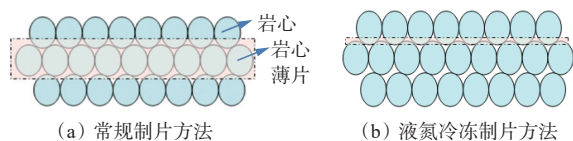


图2 制片方法对比示意

Fig.2 Comparison of core slice preparing methods

采用液氮对驱油试验结束后的岩心进行低温保存,完全冷冻后取出,分别在岩心的注入端、中间端、采出端截取2 cm岩心切片,采用手持式含油砂岩磨片装置磨片,低温冷冻条件下进行制片,并采用液氮喷嘴对切割和研磨装置降温。为保证清晰观察孔隙和岩石,岩心切割时需尽可能经过缝、洞、孔发育处。切片后的岩心需使用 α -氰基丙烯酸酯类胶水胶结,在室内自然风干,待胶水完全干燥后进行磨片,若磨片过程中出现颗粒掉落,则需重新胶结再磨平,直至无脱粒为止。采用岩心荧光图像采集系统收集图像信息,该系统主要由岩心薄片、汞灯、荧光显微镜和配套软件组成(见图3)。

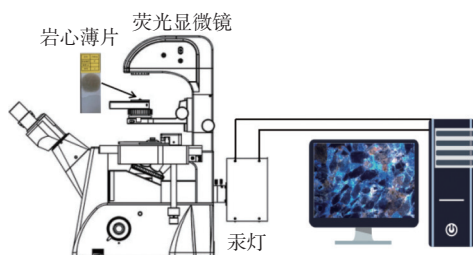


图3 岩心荧光图像采集系统

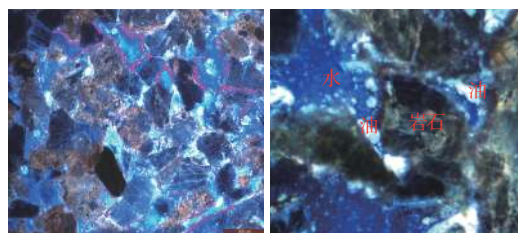
Fig.3 Core fluorescence image acquisition system

2 不同赋存状态剩余油微观量化方法

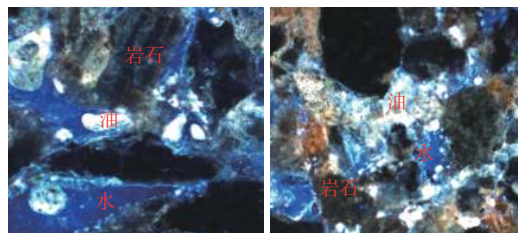
为计算水驱后不同赋存形态剩余油所占比例,使用剩余油识别软件处理荧光显微镜图像。根据水驱波及程度不同,结合目标区块岩心的剩余油分布特点,将剩余油的赋存状态细分为膜状、颗粒吸附状、角隅状、喉道状、簇状和粒间吸附状等6种。

岩样受紫外光激发后,剩余油含量较高的区域在图像中呈紫色,剩余油含量较低的区域在图像中呈蓝色或淡蓝色,岩石在图像中呈深褐色(见图4)。将所得图像导入剩余油识别软件中,根据油、水、岩石的灰度差异进行二值化处理,将油水与岩石骨架分离出来,通过二次二值化处理,实现剩余油含量不同区域的精确分割,最终得到不同类型剩余油所

占比例,并进行微观量化分析^[19]。



(a) 膜状(颗粒吸附状)剩余油 (b) 角隅状剩余油



(c) 喉道状剩余油 (d) 簇状(粒间吸附状)剩余油

图4 不同赋存状态剩余油分布

Fig.4 Distribution of remaining oil in different occurrence states

3 试验结果分析

根据渗透率,将岩心分为中渗透率和低渗透率岩心,岩心1和岩心2为中渗透率岩心,岩心3~8为低渗透率岩心,岩心物性参数见表2。

3.1 中渗透率岩心剩余油量化分析

以岩心1为例,观测中渗透率岩心在饱和油阶段、水驱至初见水阶段和水驱结束后的剩余油分布,并对不同赋存状态剩余油进行定量表征,初始饱和油状态下,岩心薄片呈橙色和紫色,剩余油含量较高;水驱至初见水时,大量自由态剩余油被驱出,岩心薄片呈淡蓝色,剩余油含量降低;水驱结束后,仅余少量束缚态剩余油难以被驱出,不同类型剩余油量化结果见表2。

岩心1在饱和油阶段以自由态微观剩余油居多(见图5),占孔隙体积50.91%,其次是束缚态,占比12.03%,半束缚态剩余油含量较少,占比2.15%。其中,束缚态剩余油中颗粒吸附状剩余油占比最高,为10.9%,自由态剩余油中主要为簇状和粒间吸附状,分别占比22.35%和28.56%。

水驱至初见水阶段,自由态剩余油占比从50.91%下降至19.27%,膜状剩余油占比上升至4.23%,颗粒吸附状剩余油占比不变,角隅状剩余油占比略微上升至2.25%,道状剩余油占比不变,自由水占比上升至26.29%(见图6)。

表 2 不同驱替阶段不同类型微观剩余油的孔隙占比（岩心 1）

Table 2 Pore proportions of different types of microscopic remaining oil at different displacement stages (core #1)

驱油阶段	不同驱油状态下的剩余油饱和度, %										含水饱和度, %	
	束缚态			半束缚态			自由态					
	膜状	颗粒吸附状	狭缝状	角隅状	喉道状	颗粒中心沉淀状	簇状	粒间吸附状	粒内状	淡雾状	束缚态	自由态
饱和油阶段	1.13	10.90	0	0	2.15	0	22.35	28.56	0	0	34.91	0
水驱至初见水	4.23	10.90	0	2.25	2.15	0	6.42	12.85	0	0	34.91	26.29
水驱结束	4.04	10.90	0	2.23	2.15	0	2.21	2.53	0	0	34.91	41.03

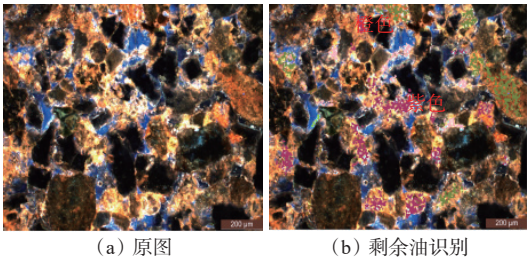


图 5 岩心 1 孔隙内剩余油识别（饱和油阶段）

Fig.5 Identification of remaining oil in the pore space of core #1 (saturated oil)

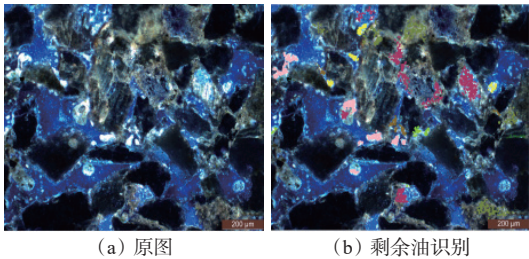


图 7 岩心 1 孔隙内剩余油识别（水驱结束）

Fig.7 Identification of remaining oil in the pore space of core #1 (post water flooding)

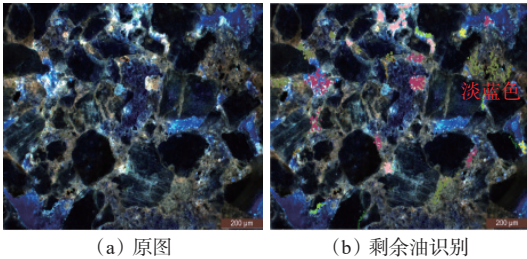


图 6 岩心 1 孔隙内剩余油识别（水驱至初见水）

Fig.6 Identification of remaining oil in the pore space of core #1 (initial water breakthrough stage by water flooding)

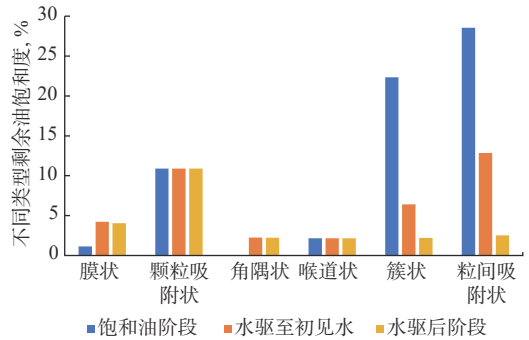


图 8 不同驱替阶段不同类型微观剩余油的孔隙占比

Fig.8 Pore proportions of different types of microscopic remaining oil at different displacement stages

水驱结束后，自由态剩余油最终降至 4.74%。此时，膜状剩余油占 4.04%，颗粒吸附状剩余油占 10.9%，角隅状剩余油占 2.23%，喉道状剩余油占 2.15%，簇状剩余油占 2.21%，粒间吸附状剩余油占 2.53%，束缚水占 34.91%，自由水占 41.03%（见图 7）。岩心 1 冷冻制片剩余油测试结果如图 8 所示。

中渗透率岩心原始含油阶段以自由态微观剩余油居多，其次是束缚态、半束缚态剩余油；水驱主要动用自由态剩余油，簇状剩余油降低至 2.21%，粒间吸附状剩余油降低至 2.53%；水驱很难动用束缚态和半束缚态剩余油；由于簇状剩余油被开发，在孔隙表面膜状剩余油提高至 4.04%；水驱结束后，残存

自由态剩余油可作为接替开发对象。

3.2 低渗透率岩心剩余油量化分析

低渗透岩心剩余油微观量化分析结果见表 3，平均驱油效率仅为 50.9%，相比于中渗透岩心明显降低。在驱油过程中主要以动用自由态剩余油为主。以岩心 7 为例，渗透率为 4.5 mD，簇状剩余油由 14.24% 降低至 1.03%，粒间吸附状剩余油由 16.26% 降低至 0.85%，孔表薄膜状微观剩余油由 2.15% 提高至 5.32%，说明自由态剩余油被驱替较干净，后续应以动用束缚态膜状剩余油及半束缚态喉道状剩余油为主。

表 3 低渗透区块岩心剩余油微观量化结果

Table 3 Microscopic quantification results of remaining oil in the cores of low-permeability blocks

岩心	驱油状态	不同阶段的剩余油饱和度, %			驱油效率, %
		饱和油阶段	水驱至初见水	水驱结束	
岩心3	束缚态	13.57	16.00	15.89	53.82
	半束缚态	2.52	4.24	4.16	
	自由态	36.20	12.40	4.10	
岩心4	束缚态	14.69	17.87	17.50	52.20
	半束缚态	3.62	5.14	5.11	
	自由态	33.99	10.82	2.39	
岩心5	束缚态	13.82	16.38	16.21	54.04
	半束缚态	2.69	4.22	4.17	
	自由态	36.82	11.60	4.13	
岩心6	束缚态	13.76	16.58	16.43	46.91
	半束缚态	2.78	4.19	4.15	
	自由态	34.58	11.74	3.56	
岩心7	束缚态	15.13	18.24	18.07	49.08
	半束缚态	3.60	5.28	5.12	
	自由态	30.50	6.35	1.88	
岩心8	束缚态	14.81	18.10	17.99	49.56
	半束缚态	3.81	5.55	5.55	
	自由态	32.41	8.74	2.20	

4 结 论

1) 高压汞灯荧光显微镜观测技术实现了不同渗透率岩心的微观剩余油定量分析, 利用图像处理技术, 可进一步将剩余油赋存状态细分为薄膜状、角隅状、喉道状和簇状。

2) 中渗透率岩心原始含油阶段以自由态微观剩余油为主, 其次是束缚态、半束缚态剩余油, 水驱主要动用自由态剩余油, 整体驱油效率较高, 水驱后残存自由态剩余油可作为继续挖潜对象。

3) 低渗透率岩心原始含油阶段自由态微观剩余油较多, 自由态剩余油占比与中渗透岩心相比更低, 水驱主要动用自由态剩余油, 整体驱油效率较低, 水驱后束缚态及半束缚态剩余油可作为继续挖潜对象。

参 考 文 献

References

[1] 姜岩, 李雪松, 付宪弟. 特高含水老油田断层表征及剩余油高效

挖潜[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 246–253.
JIANG Yan, LI Xuesong, FU Xiandi. Fault characterizing and high-efficiency potential tapping of the remained oil for extra-high-water-cut mature oilfields[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 246–253.
[2] 葛丽珍, 王公昌, 张瑞, 等. 渤海 S 油田高含水期强水淹层避射原则研究[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 106–111.
GE Lizhen, WANG Gongchang, ZHANG Rui, et al. Research on the perforation avoidance principle for strong water-flooded layers with high water cut in the S Oilfield of Bohai[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 106–111.
[3] 邸士莹, 程时清, 白文鹏, 等. 裂缝性致密油藏注水吞吐转不稳定水驱开发模拟[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1): 89–96.
DI Shiyong, CHENG Shiqing, BAI Wenpeng, et al. Simulation of transformation from water-injection huff and puff to unstable water-flooding in developing fractured tight reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 89–96.
[4] 闫伟超, 孙建孟. 微观剩余油研究现状分析[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2198–2211.
YAN Weichao, SUN Jianmeng. Analysis of research present situation of microscopic remaining oil[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2198–2211.
[5] 张旭阳, 黄长兵, 王鑫, 等. 基于霍尔效应测量过套管地层电阻率理论及模拟实验研究[J]. 钻采工艺, 2022, 45(3): 89–93.
ZHANG Xuyang, HUANG Changbing, WANG Xin, et al. Theory

- and simulation experimental study on formation resistivity measurement through casing based on hall effect[J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(3): 89–93.
- [6] 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.
- [7] 张西龙. 冷冻制片荧光分析法在分析聚驱后剩余油赋存状态中的应用[J]. *石油地质与工程*, 2022, 36(1): 68–71.
- ZHANG Xilong. Application of frozen slice fluorescence analysis in analyzing the occurrence state of remaining oil after polymer flooding[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2022, 36(1): 68–71.
- [8] 孙先达. 纳米 CT 技术在水驱后微观剩余油分布形态及量化分析中的应用[J]. *电子显微学报*, 2015, 34(3): 216–221.
- SUN Xianda. Application of nano-CT technology to the study of distribution patterns and quantitative analysis in microscopic residual oil after water flooding and quantitative analysis[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2015, 34(3): 216–221.
- [9] 祝晓林, 刘宗宾, 葛丽珍, 等. 渤海油田裂缝性潜山油藏储层分类及剩余油分布规律[J]. *断块油气田*, 2022, 29(4): 527–531.
- ZHU Xiaolin, LIU Zongbin, GE Lizhen, et al. Reservoir classification and distribution law of remaining oil in fractured buried hill reservoirs of Bohai Oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 29(4): 527–531.
- [10] 李俊健, 刘洋, 高亚军, 等. 微观孔喉结构非均质性对剩余油分布形态的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 1043–1052.
- LI Junjian, LIU Yang, GAO Yajun, et al. Effects of microscopic pore structure heterogeneity on the distribution and morphology of remaining oil[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 1043–1052.
- [11] 侯健, 邱茂鑫, 陆努, 等. 采用 CT 技术研究岩心剩余油微观赋存状态[J]. *石油学报*, 2014, 35(2): 319–325.
- HOU Jian, QIU Maoxin, LU Nu, et al. Characterization of residual oil microdistribution at pore scale using computerized tomography[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(2): 319–325.
- [12] 林硕, 张燕, 贾彦勇, 等. 荧光图像分析法在河南油田的应用[J]. *西部探矿工程*, 2016, 28(10): 39–41.
- LIN Shuo, ZHANG Yan, JIA Yanyong, et al. Application of fluorescence image analysis method in Henan Oilfield[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2016, 28(10): 39–41.
- [13] 李晨, 胡智勇, 付连明, 等. 岩心显微荧光薄片数字化应用系统及其在准噶尔盆地的应用[J]. *录井工程*, 2017, 28(1): 29–33.
- LI Chen, HU Zhiyong, FU Lianming, et al. Digital application system of core micro-fluorescence thin section and its application in Junggar Basin[J]. *Mud Logging Engineering*, 2017, 28(1): 29–33.
- [14] 宋考平, 李世军, 方伟, 等. 用荧光分析方法研究聚合物驱后微观剩余油变化[J]. *石油学报*, 2005, 26(2): 92–95.
- SONG Kaoping, LI Shijun, FANG Wei, et al. Fluorescence analysis on changeable rules of microscopic remaining oil after polymer flooding[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(2): 92–95.
- [15] 段波龙, 李垚银, 孙志雄, 等. 夏盐 11 井区剩余油分布特征与挖潜对策研究[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(4): 114–119.
- DUAN Bolong, LI Yaoyin, SUN Zhixiong, et al. Study on characteristics of remaining oil distribution and countermeasures for potential tapping in Well Block Xiayan 11[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(4): 114–119.
- [16] 范萌. 龙虎泡油田高含水期提液室内实验研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
- FAN Meng. Study on the enhanced liquid production experiments in high water cut stage of Longhupao oil field[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [17] 彭红利, 周小平, 姚广聚, 等. 大孔道油藏聚驱后微观剩余油分布规律及提高采收率实验室研究[J]. *天然气勘探与开发*, 2005, 28(3): 62–65.
- PENG Hongli, ZHOU Xiaoping, YAO Guangju, et al. Laboratory research on microscopic distribution of residual oil after polymer driving and how to improve recovery factor for reservoirs with big porous channels[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2005, 28(3): 62–65.
- [18] 孙先达. 储层微观剩余油分析技术开发与应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- SUN Xianda. New technique invention and application of characterizing microscopic remnant oil in reservoirs[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [19] 王为民, 郭和坤, 孙佃庆, 等. 用核磁共振成像技术研究聚合物驱油过程[J]. *石油学报*, 1997, 18(4): 54–60.
- WANG Weimin, GUO Hekun, SUN Dianqing, et al. A study on polymer flooding by MRI techniques[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1997, 18(4): 54–60.
- [20] 张西龙. 聚合物驱后微观剩余油类型及其分布特征[J]. *化学工程与装备*, 2022(7): 45–47.
- ZHANG Xilong. Microscopic residual oil types and distribution characteristics after polymer flooding[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2022(7): 45–47.
- [21] 王川, 姜汉桥, 马梦琪, 等. 基于微流控模型的孔隙尺度剩余油流动状态变化规律研究[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(3): 376–391.
- WANG Chuan, JIANG Hanqiao, MA Mengqi, et al. Study of the variation of pore-scale residual oil flow based on a micro-fluidic model[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(3): 376–391.

[编辑 曹耐]