

烟道气泡沫封堵参数优化及微观机理研究

王健¹,覃达¹,余恒¹,徐鹏¹,胡雨涵²

(1.西南石油大学油气藏及地质开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;

2.中国石油西南油气田分公司,四川 成都 610051)

摘要:针对新疆红山嘴油田火驱试验区烟道气气窜和火驱前缘突进、常规封堵技术不适应火驱高温要求等问题,利用泡沫岩心流动装置和可视化微观驱替模型,开展了烟道气泡沫封堵岩心流动实验及烟道气泡沫微观机理研究。实验研究表明:气液比是影响泡沫封堵能力的重要因素,当泡沫体系与气体混注且气液比为1:1时,泡沫封堵能力最强,采用烟道气泡沫调驱采收率提高了12.6%。微观机理研究表明:新的泡沫堵塞大孔道,增加了流体的渗流阻力,是泡沫能够进行封堵的主要原因;泡沫在多孔介质中的运移是气相和液相的单独运移,且泡沫的捕集和流动状态随外界条件变化而不断转换。该研究可为新疆红山嘴油田火驱试验区控制气窜提供参考依据,有助于进一步完善泡沫体系控制气窜理论。

关键词:烟道气泡沫;控制气窜;微观机理;火驱

中图分类号:TE357.4

文献标识码:A

Optimization of parameters and microscopic mechanism study of flue gas foam

Wang Jian¹, Qin Da¹, Yu Heng¹, Xu Peng¹ and Hu Yuhang²

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.Southwest Oil and Gasfield Company, CNPC, Chengdu, Sichuan 610051, China)

Abstract: In order to solve the problems such as the breakthrough of flue gas, frontal advance of combustion drive and conventional plugging technology do not meet the requirement of fire drive in the fire drive test area of Hongshanzui oilfield in Xinjiang. We used the device for testing the foam flow in core and the visual microscopic displacement model to study the flow experiment and the microscopic mechanism of flue gas foam. The experimental investigation showed: the gas-liquid ratio was an important factor that affects the capacity of foam blocking; the foam blockage ability was the strongest when the foam system was mixed with gas and the gas-liquid with ratio 1:1; the oil recovery factor increased by 12.6% after the flue gas foam injection. The microscopic mechanism research showed: the main reason why foam had the ability of blockage was the new foam blocked the big pore and increased the flow resistance of the fluid. The migration of foam in porous media was a kind of separate migration of gas phase and liquid phase; the trap and flow state of the foam were constantly transformed with the change of external conditions. The study can provide reference for the control of gas channeling in the fire flooding test area of Hongshanzui oilfield in Xinjiang and is helpful to improve the theory of bubble control.

Key words: flue gas foam, control gas channeling, microscopic mechanism, combustion

火驱开发技术是稠油油藏蒸汽吞吐后大幅度提高采收率的技术之一,具有适用范围广、驱油效率高、成本低的优势,先后在美国、加拿大、罗马尼亚等国进行过矿场试验^[1-3]。

红山嘴油田红浅1井区位于准噶尔盆地西北缘

东段,距离克拉玛依区西南约20 km处,含油面积1.24 km²,地质储量 $144.3 \times 10^4 \text{ t}^{[1-3]}$ 。新疆油田红浅1井区2009年进行火驱开发先导试验,目前试验区13口注气井全部成功点火^[4-6]。随着开发进程的不断加快,火驱开发过程中的各种矛盾日益凸显,主要表现

收稿日期:2018-01-22。

第一作者简介:王健(1966—),男,博士,化学驱、调剖堵水等方面的教学与研究。

基金项目:国家科技重大专项“CO₂驱油与埋存开发调控技术研究”(2016ZX05016-001)。

在纵向上注气井吸气不均,动用程度差异大,平面上火线推进速度不一致,受非均质性影响,高渗层前缘突破井比例逐渐增加,导致部分火驱井组间形成气窜通道,大部分油井无法受效,影响火驱整体开发效果^[7-16]。目前针对性措施只能采取关闭生产井,从而导致纵向油层动用程度低,很大部分原油无法采出,降低火驱开发效果。针对上述问题,采用“调与堵”相结合的思路,利用烟道气高温泡沫流度控制技术,开展了火驱调剖封窜技术的研究,对烟道气泡沫注入参数进行优化,并通过可视化模型研究了泡沫在多孔介质中的生成及运移机理。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

红浅1井区地层水,总矿化度:10 902.1 mg/L,由新疆油田提供;红浅1井区原油,黏度 16 500 mPa·s (20 ℃),由新疆油田提供;泡沫体系(WFD):AOS浓度 0.5%+ABS浓度 0.2%+HEC浓度 0.05%,由西南石油大学国家重点实验室提供;烟道气:含有 88% N₂和 12% CO₂,委托中国石油西南油气公司专业配气站配制;整套岩心流动装置,由海安石油科研仪器有限公司提供;可视化玻璃刻蚀模型,实验室自主设计与制作。

1.2 实验方法

1.2.1 泡沫岩心流动实验

1) 将某一浓度的起泡剂和烟道气按不同的气液比注入岩心,记录岩心两端的压差变化及工作压差并计算烟道气泡沫流度控制阻力因子,通过阻力因子筛选出最佳气液比。

2) 按气液比 1:1 分别采用气液同注和交替注入的方式注入烟道气和起泡液,当岩心两端的压差稳定后,记录此时岩心两端的工作压差,计算阻力因子,筛选出最佳注入方式。

3) 通过填砂管驱油实验,按气液比 1:1 同时注入烟道气和起泡液,泡沫驱后进行后续水驱,记录水驱的稳定压差并计算提高采收率值。

1.2.2 烟道气泡沫微观驱油实验

1) 利用自主设计的可视化刻蚀模型,饱和地层

水后注入烟道气和起泡液,通过摄像装置观察并记录泡沫的形成过程,对形成机理进行分析。

2) 将可视化模型饱和和原油后注入烟道气和起泡液进行驱油实验,观察并记录泡沫在多孔介质的运移情况,分析运移机理。

2 结果与讨论

2.1 泡沫岩心流动实验

1) 烟道气泡沫驱气液比优选:分别测量泡沫驱和水驱稳定时岩心两端压差,并通过计算其比值来求出阻力因子,从而筛选出最佳气液比。实验采用单管填砂模型,岩心基本参数见表 1。注入速度 0.5 mL/min,实验共进行了 0.5:1、1:1、2:1、3:1、4:1、5:1 六组气液比值的物理模拟实验。泡沫体系:WFD,回压设置为 6.0 MPa。为了使结果具有可比性,采用同一岩心,不饱和油,实验结果见图 1。

表 1 岩心基本参数
Table 1 Core basic parameters

组号	长度/ cm	直径/ cm	孔隙体积/ cm ³	孔隙度, %	原始水测渗透率/ 10 ⁻³ μm ²
TH-01	50	2.0	50.77	32.34	1 235

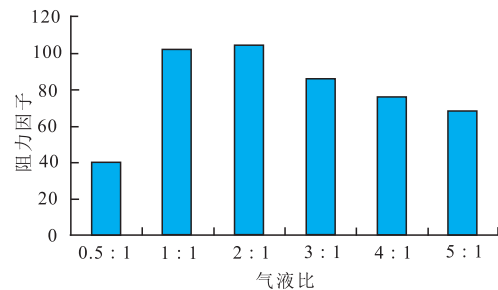


图 1 气液比与阻力因子的关系

Fig. 1 Relation between gas-liquid ratio and resistance factors

实验结果表明:过低或过高的气液比都会影响泡沫的质量,气液比较低时,起泡速度慢且泡沫量少,阻力因子小;气液比较高时,产生的泡沫质量差,主要表现为泡沫体积大、分布稀疏、易破灭,稳定性差,阻力因子下降。实验发现,气液比介于 1:1~2:1 时泡沫质量最佳,在这个范围内形成的泡沫细密、稳定、表观黏度高,阻力因子最高可达到 104.6。考虑到地层中原油的影响,泡沫遇油容易破裂导致气窜,因此要求泡沫具有一定的封堵能力且气液比不宜过

高,以减少气窜。根据上述原则及实验结果,确定后续泡沫驱实验中采用的气液比为1:1。

2) 注入方式优选:烟道气泡沫调驱的注入方式有两种:一是烟道气和泡沫液交替注入,二是烟道气和起泡液同时注入。实验采用一维单管填砂模型,气液比选择1:1,注入速度为1 mL/min,回压设置为6.0 MPa。考察气液交替注入和气液混注两种注入方式对泡沫封堵能力的影响。岩心的基本参数见表2,实验结果见表3。

表2 岩心基本参数
Table 2 Core basic parameters

组号	长度/ cm	直径/ cm	孔隙体积/ cm ³	孔隙度, %	原始水测渗透率/ 10 ⁻³ μm ²
TH-02	50	2.0	48.6	30.95	1 135
TH-03	50	2.0	52.5	33.47	1 314
TH-04	50	2.0	54.2	34.52	1 577
TH-05	50	2.0	51.5	32.78	1 278

表3 注入方式筛选实验结果
Table 3 Experimental results of screen of injection method

注入方式	基础压差/MPa	工作压差/MPa	阻力因子
气液混注	0.06	5.880	98.0
气液 1PV液1PV气	0.06	4.872	81.2
交替 2PV液2PV气	0.06	4.608	76.8
注入 3PV液3PV气	0.06	4.590	76.5

实验表明,气液混注时的阻力因子大于气液交替注入,即封堵能力更强一些;交替式注入时泡沫体系不稳定,易造成气窜,难以形成较大的封堵压差,封堵能力较低。

3) 烟道气泡沫驱油效率实验:将填砂管模型抽真空饱和水后接入流程,注入速度为1 mL/min,饱和油,水驱后将起泡剂溶液与烟道气混合注入,气液比为1:1,压力稳定后,记录压差,计量驱出油量,计算原油采出程度。岩心基本参数见表4,实验结果见表5。

表4 岩心基本参数
Table 4 Core basic parameters

组号	长度/ cm	直径/ cm	孔隙体积/ cm ³	孔隙度, %	原始水测 渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	含油饱 和度, %	水驱采 收率, %
TH-06	50.0	2.0	55.67	35.46	1 561	71.3	62.5

实验结果表明:水驱后采用烟道气泡沫调驱采收率提高12.6%,说明水驱后注入泡沫液能改善注入介质的波及效率,形成有效封堵。由于泡沫的选择性封堵作用,原高渗透带的主要水流通道被优先封堵,渗流阻力增大,后续液流转向,平面上流向非主流线方向,纵向上流向中低渗透层,从而扩大扫油面积,提高驱油效率。

2.2 烟道气泡沫微观机理研究

2.2.1 烟道气泡沫在多孔介质中的生成

通过观察可视化微观模型中泡沫的形成过程,发现烟道气泡沫在多孔介质中的形成机理与常规泡沫相似,烟道气泡沫的形成方式是:液膜滞后、缩颈分离、液膜分段。

1) 液膜滞后

液膜滞后现象主要发生在模型的入口端,是气体在较低的流速下进入被液体饱和的孔隙,使孔隙空间内与气体接触的液面被前缘挤成较薄液膜的泡沫生成方式。液膜滞后现象发生的前提是气体流速小于生成液膜的临界速度,当流速较大时气体会沿大孔道迅速通过发生气窜。当液相中不含表面活性剂时,生成的液膜会迅速破裂,只有当液相中含有足够的表面活性剂时液膜才能稳定存在。

如图2所示,大段塞烟道气首先进入饱和了泡沫液的孔道a,前缘在驱替压力的作用下继续向前推进,分别从三个不同的方向进入孔道b、c、d。由于此处表面活性剂在液相中的含量较高,形成的液膜较稳定。液膜滞后现象在复杂的孔隙介质中频繁发生,

表5 泡沫驱油实验结果
Table 5 Results of foam flooding experiment

水驱油阶段					泡沫驱阶段					后续水驱阶段		
流速/ (mL·min ⁻¹)	出油体积/ mL	水驱油 采收率, %	残余油 饱和度, %	稳定压力/ MPa	气液比	出油体积/ mL	稳定压力/ MPa	阻力因子	后续水驱 稳定压力/ MPa	提高 采收率, %	总采 收率	残余阻 力因子
1.0	24.8	62.5	37.5	0.14	1:1	5.0	3.38	24.1	0.73	12.6	75.1	5.21

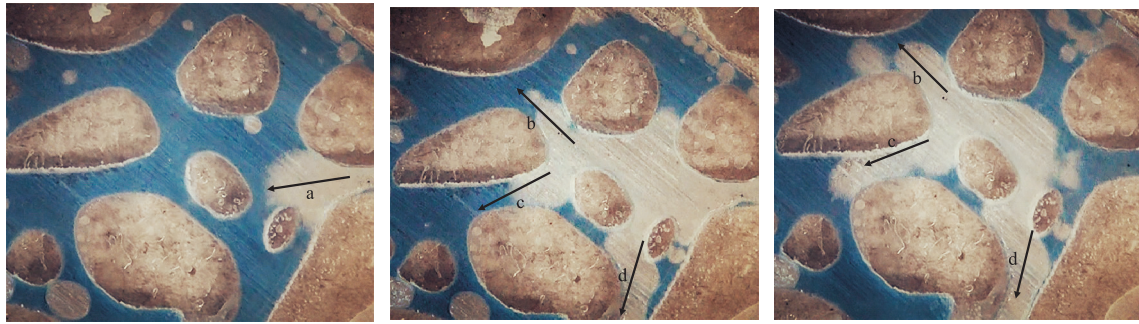


图2 液膜滞后实验

Fig. 2 Liquid membrane hysteresis experiment

气泡会生成大量的液膜但是没有分裂出新的气泡,而是表现为原有泡沫体积的扩大,在一定程度上能够堵塞气体流动通道、控制气窜。

2) 缩颈分离

缩颈分离是指气泡高速穿过狭窄孔道时生成泡沫的一种方式。当气泡从狭窄孔道进入大孔道时,气泡的体积变大而毛管压力减小,当毛管压力降低到产生缩颈分离的临界值时,气泡会被截断从而生成新的气泡。

图3为实验过程中发生的缩颈分离现象。从实验现象可以看出,当气泡穿越狭窄孔道进入大孔道时,狭窄孔道中的液体将气泡截成连段,生成两个新的气泡。在实验中发现,在此处会多次发生缩颈分离现象,不断生成新的可以流动的分散气泡,分散气泡可能在大孔道处聚集从而堵塞气流通,且分散气泡通过多孔介质的阻力比连续气泡大得多,从而有利于控制气窜。

3) 液膜分段

液膜分段是指泡沫在多孔介质运移过程中发生变形以及再生的过程,它形成的前提是多孔介质中存在可流动的气泡,可在同一点多次发生。能否发

生液膜分段主要受气泡和孔隙大小的影响。当气泡直径小于孔隙直径时,气泡进入其中的一个渗流阻力较小的孔道继续流动,不会发生液膜分段现象。当气泡直径大于孔隙直径时,液膜在通过孔隙时会被分割,生成两个或多个分散气泡继续流动。液膜分段产生的气泡与缩颈分离相似,分散气泡能流入或者通过聚集堵塞大孔道。

如图4所示,F是a、b、c三条孔道的交叉处,一气泡在驱替压力的作用下通过c孔道流动至F处。由于气泡的直径大于a、b任何一孔道的直径,气泡无法直接通过,在F处发生变形、液膜分段最终分裂成两个气泡分别从a、b两个孔道中通过。从图4中可以发现,由于气泡在F反复发生液膜分段产生新的气泡,这些分散气泡在b孔道下游的大孔道处聚集,增大了大孔道的渗流阻力,在一定程度上能阻碍气体的流动。

2.2.2 烟道气泡沫在多孔介质中的运移

通过观察烟道气泡沫在可视化微观模型中的运移情况,从气相和液相两个方面进行分析。观察发现气相以被捕集的泡沫和流动泡沫两种形式存在且

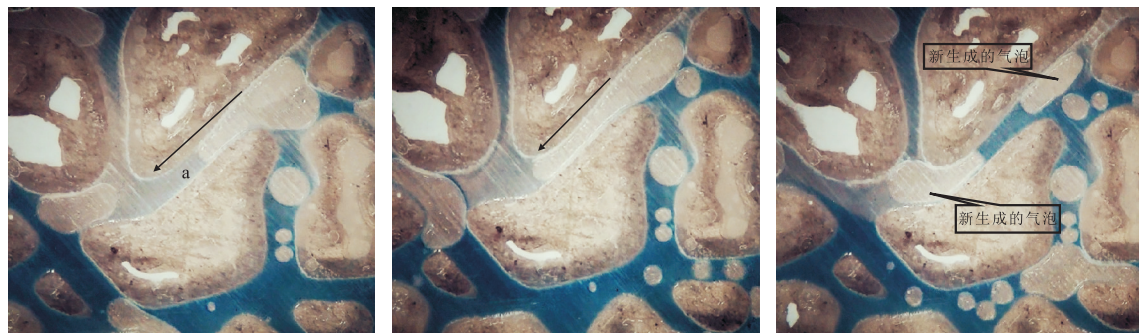


图3 缩颈分离实验

Fig. 3 Necking separation experiment

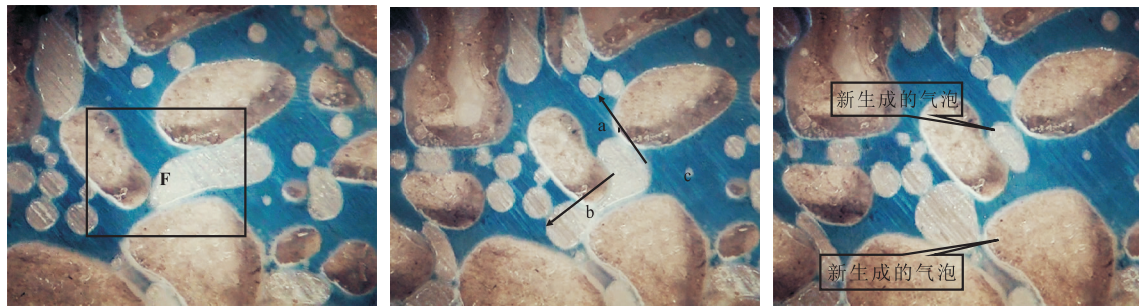


图4 薄膜分段实验

Fig. 4 Film section experiment

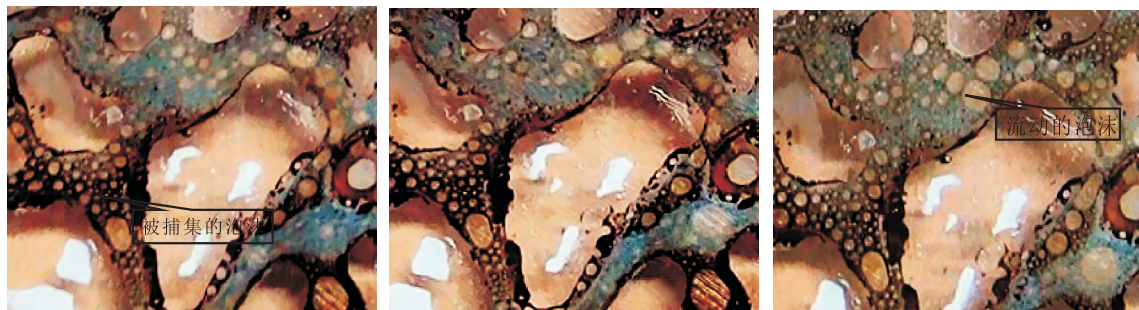


图5 泡沫捕集实验

Fig. 5 Foam collection experiment

多孔介质中存在着气泡链通道,液相主要以体积水和液膜水两种形式存在。

1) 气相在多孔介质中的运移

气相在孔隙介质中的运移一般情况以被捕集的泡沫和流动的泡沫两种形式存在。在微观驱替实验中观察到,大部分的泡沫处于被捕集状态,只有10%~30%的泡沫处于流动状态。被捕集的泡沫聚集在一起堵塞气体流动孔道,阻碍气体通过,在一定程度上能控制气体流量。

从图5可以看出,流动的泡沫在驱替压力的作用下,以滚动前进的方式通过渗流阻力较小的大孔道,而被捕集的泡沫分布在中等尺寸的孔隙中或黏附在岩石壁面,几乎不参与流动。

如图6所示,在驱替过程中形成大量的气泡,而大部分气泡都被捕集,存在少量的流动气泡以气泡链的形式进入渗流阻力较小的通道,将该通道中的原油携带出去。所以,通道中表面活性剂的含量较高,泡沫能够稳定流动,不容易破灭。在实验过程中,被捕集的泡沫并非是固定不变的,由于捕集处原油含量较高,泡沫不能稳定存在,容易破裂,又因为在毛管力的作用下,流动的泡沫会运移到捕集处,从而变成被捕集的泡沫状态,重新堵塞气体流动通道,

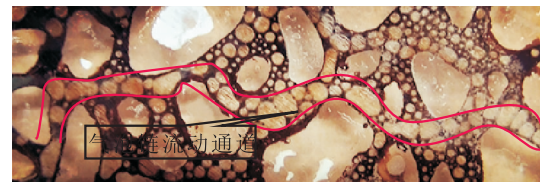


图6 泡沫驱主通道气泡链实验

Fig. 6 Bubble chain experiment of main channel of foam drive

控制气体流量。

2) 液相在多孔介质中的运移

液相一般以两种形式存在于多孔介质中:液膜水和体积水(图7)。液膜水是包裹在气相外围形成气泡液膜的水。除了液膜水,液相在多孔介质中就以体积水的形式存在。在多孔介质流动过程中,为了维持泡沫的稳定,液膜水与体积水之间相互转换。气泡的生成即是体积水转换为液膜水的过程,气泡破灭则是液膜水向体积水转换。受气液比影响,泡沫干度不断发生变化,液膜存在一个临界厚度也叫临界含水饱和度。当孔隙介质中的液膜厚度达到临界厚度时,液膜水压力等于体积水压力,液膜稳定;若继续增大气液比则液膜水压力大于体积水压力,液膜破裂,液膜水变为体积水;反之,若气液比降低则体积水补充液膜水使其稳定^[17]。

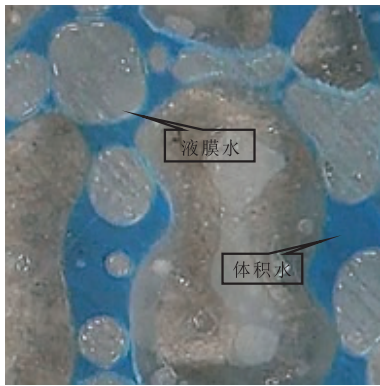


图7 体积水和液膜水实验

Fig. 7 Volumetric water and liquid membrane water experiment

3 结论

1) 烟道气泡沫调驱实验研究表明:①泡沫的封堵能力受诸多因素的影响,气液比是影响泡沫封堵能力的重要因素,气液比为1:1时泡沫封堵能力最强;②起泡剂溶液与气体同时注入的封堵能力比交替式注入方式下的更强;③烟道气泡沫调驱采收率提高了12.6%。

2) 烟道气泡沫微观机理研究表明:①烟道气泡沫的生成方式与常规泡沫相似,主要为:液膜滞后、缩颈分离和液膜分段。液膜滞后现象生成大量液膜,使泡沫体积增大,在一定程度上堵塞气体流动通道;缩颈分离和液膜分段现象类似,均会生成新的分散气泡,分散气泡通过聚集能够堵塞大孔道、增加气体渗流阻力,是泡沫能够控制气窜的主要原因;②泡沫在多孔介质中的运移是气相和液相分开的运移。在多孔介质中气相以被捕集的泡沫和流动的泡沫两种形式存在于多孔介质中,大部分泡沫处于被捕集的状态,只有少量泡沫可以流动。液相以体积水和液膜水两种形式存在于多孔介质中,通过新气泡的

生成和泡沫的破灭,体积水和液膜水可以相互转换。

参考文献

- [1] 杨志亮,高怡,王珍珍,等.红山嘴油田红浅1井区侏罗系稠油油藏剩余油研究[J].中国石油和化工标准与质量,2014,34(8):170-171.
- [2] 贾志伟.红浅1井区火驱油藏耐高温堵剂研究[D].西南石油大学,2014.
- [3] 韩俊伟,贾洪革,史建英,等.高压砾石充填工艺在红浅1井区的应用[J].新疆石油天然气,2011,7(4):64-68.
- [4] 孙国成,钱振斌,缪远晴.新疆油田红浅1井区火驱先导试验地面工艺技术[J].石油工程建设,2012,38(6):4-8.
- [5] 周伟建,施小荣,王贵文,等.红浅1井区砂砾岩稠油储层特征与主控因素[J].特种油气藏,2015,22(4):65-68.
- [6] 张敬华,杨双虎,王庆林.火烧油层采油[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [7] 张方礼.火烧油层技术综述[J].特种油气藏,2011,18(6):1-5.
- [8] 陈华生,张雪峰,计玲,等.红浅火驱试验区窜漏原因分析[J].新疆石油天然气,2012,8(S1):40-44.
- [9] 孟菊.火驱生产井高强度封窜技术研究与应[J].当代化工,2017,46(1):72-73.
- [10] 陈莉娟,蔡罡,余杰,等.稠油火驱开采技术节能减排效果分析[J].油气田环境保护,2010,20(S1):23-24.
- [11] 梁金中,鲁笛,黄小雷,等.稠油火驱二次点火主控因素及点火策略[J].沈阳工业大学学报,2017,39(1):38-42.
- [12] 岳清山,王艳辉.火烧驱油采油方法的应用[M].北京:石油工业出版社,2000.
- [13] 张方礼.火烧油层技术综述[J].特种油气藏,2011,18(6):1-5.
- [14] 江琴,金兆勋.厚层稠油油藏火驱受效状况识别与调控技术[J].新疆石油地质,2014,35(2):204-207.
- [15] 许国民.杜66块火驱开发动态调控技术研究[J].特种油气藏,2014,21(1):81-83.
- [16] 于浩.杜66火驱生产井气窜封堵技术研究[J].石油化工应用,2014,33(4):28-31.
- [17] 张建丽.空气泡沫驱微观驱油机理实验研究[D].北京:中国石油大学,2011.

(编辑 常燕)