

·油气采收率·

鄂尔多斯盆地浅层特低渗透油藏氮气驱实验研究

郑黎明¹,王成俊²,吴飞鹏¹,高瑞民²

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580; 2.陕西延长石油(集团)有限责任公司 研究院,陕西 西安 710075)

摘要:浅层特低渗透油藏衰竭式开发效果较差,注水开发过程中存在注不进的问题,氮气驱技术为提高特低渗透油藏采收率提供了一种有效手段。结合矿场实际,通过对特低渗透岩心氮气驱开发效果的研究,分析了注入参数对水驱后氮气驱开发效果的影响,对比了单纯氮气驱和氮气与水交替注入时水驱驱替压力的变化,优化了特低渗透岩心氮气驱与水驱段塞比例。人造和天然岩心驱替实验结果表明,水驱后氮气驱可提高浅层特低渗透油藏采收率3%~10%,二次水驱时驱替压力增加,含水率较低时进行氮气驱效果较好;水驱后氮气驱采出程度与气体注入量变化存在阶梯性上升趋势,改变了以往采收率与气驱注入量单调性上升的认识,对于不同油田的注入要求可以选择气体注入量局域性最优值;相对于单纯氮气驱,氮气与水交替注入采收率有所增加,注入压力可明显提高,气水交替注入6轮次时压力最大增加约1.5 MPa,气水段塞优化最佳比例为2:1。

关键词:浅层特低渗透油藏 氮气驱 氮气与水交替注入 采收率 注入压力

中图分类号:TE357.7

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2014)04-0062-05

鄂尔多斯盆地浅层特低渗透油藏主力油层主要沉积相类型为三角洲平原亚相和三角洲前缘亚相,由于其天然能量弱,地层压力低,衰竭式开发效果较差,因此采取注水开发以补充地层能量;然而由于其渗透率特低,且发育微裂缝,出现部分水井注入压力相对过高、注不进的问题,部分水井虽然能注入,但易导致部分连通油井很快水淹,储层采收率较低^[1-2]。

氮气驱技术由于气相分子较小、流度较大可以注入渗透率更低的储层,为提高特低渗透储层采收率提供了一种有效手段,相对于空气驱,由于氮气驱不存在产出气中含氧带来的安全隐患,且氮气更易与原油发生溶解与混相,因此氮气驱可以更有利于进入水驱或其他驱替技术无法进入的微细孔喉,或者通过解吸方式将孔喉内吸附气置换^[3-5]。

目前室内研究较多的为低渗透储层岩心直接气驱,而现场进行气驱时,油藏多已经历了衰竭式开发或注水开发,油井含水率较高,且关于对气驱在特低渗透油藏的应用研究较少,因此,研究水驱后氮气驱技术对于特低渗透油藏开发具有一定的指导作用。为此,笔者根据矿场实际,研究了特低渗透岩心在水驱一段时间后氮气驱的开采效果,分析了注入参数对水驱后氮气驱开发效果的影响,对

比了氮气与水交替注入(简称气水交替注入)与单纯氮气驱的开发效果,优化了特低渗透岩心氮气注入量和气水段塞比例等。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验仪器包括:由HLB-1040型恒流泵、手摇泵、岩心夹持器(直径为25 mm)、氮气瓶(气体压力为20 MPa)、减压阀、中间容器、回压阀和量筒等组成的浅层特低渗透油藏氮气驱实验装置(图1),分度值为0.01 g的sartorius电子天平,DY-IV型洗油仪等。

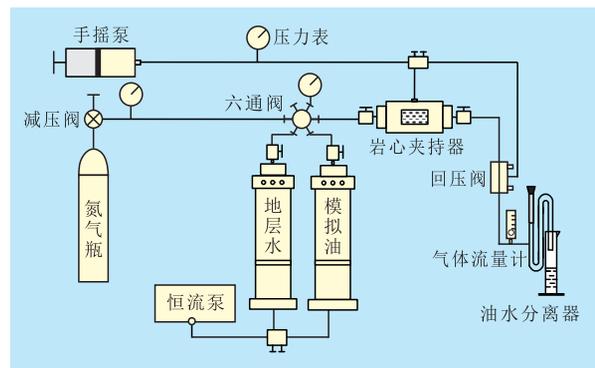


图1 浅层特低渗透油藏氮气驱实验装置示意

收稿日期:2014-05-04。

作者简介:郑黎明,男,在读博士研究生,从事复杂油气藏物理、化学强化开采与提高采收率方面的研究。联系电话:13475845480,E-mail:zheng_liming_happy@126.com。

基金项目:国家自然科学基金“低渗油藏低频振动辅助表面活性剂复合驱油机理研究”(51274229)。

实验材料主要包括:氮气,纯度大于99%,工业品;实验岩心包括人造岩心和天然岩心,人造岩心包括孔隙度为10%~12%、气测渗透率为 $29 \times 10^{-3} \sim 30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的I号和II号特低渗透岩心,天然岩心取自延长油田长6储层,基本参数如表1所示;实验用油为煤油与延长油田长6原油按照一定比例配制的模拟油,其在20℃下粘度为4 mPa·s,密度为0.86 g/cm³;实验用水为用NaCl, CaCl₂和MgCl₂按照质量浓度比为0.70:0.12:0.18配制的矿化度为40 000 mg/L的模拟地层水。

表1 天然岩心基本参数

编号	孔隙度,%	水测渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
1	11.93	0.09
2	11.47	0.08
3	14.35	0.46
4	13.79	0.51
5	25.46	22.80
6	24.98	21.52

1.2 实验方法

水驱后氮气驱效果评价 实验步骤主要分为4步:①将人造岩心装入岩心夹持器中,按图1安装氮气驱实验装置;②分别对岩心饱和模拟地层水和原油,测定岩心孔隙度和束缚水饱和度,保持岩心夹持器出口端压力为1 MPa,开始水驱,记录产出油量、水量和岩心入口端压力;③水驱至含水率为99%时停止,改为氮气驱,保持岩心入口端压力为2 MPa,出口端压力为1 MPa,记录产出油量、水量,用气体流量计记录气体在大气压下的流量;④气驱至含水率为99%时停止,进行二次水驱,4 h后停止实验。对比水驱和水驱后氮气驱压力和采收率变化。

水驱后氮气驱注入参数影响规律评价 基本步骤与水驱后氮气驱效果评价实验相同,保持其他参数不变,分别改变注气压力、注气速度、氮气注入量和注气时机等。主要包括:①水驱后氮气驱注气压力为1~2.5 MPa,通过调节回压阀维持岩心两端压差为1 MPa,记录不同注气压力下的水驱后氮气驱采收率;②保持注气压力为步骤①气驱采收率最高时的注气压力,调节回压阀改变岩心出口端压力,记录不同注气速度下的水驱后氮气驱采收率;③在最佳注气压力和注气速度下,改变注气体积,记录不同氮气注入量下的水驱后氮气驱采收率;④在最佳注气参数下,进行水驱后氮气驱注入时机的影响实验,分别选择水驱前缘突破时氮气驱、见水5 min后氮气驱、见水10 min后氮气驱、见水20 min后

氮气驱及水驱至含水率为99%时氮气驱,之后进行二次水驱,至含水率为99%时结束,记录不同注气时机下的水驱后氮气驱采收率;⑤利用1,3和5号天然岩心在最佳注气参数下进行水驱后氮气驱实验,分析水驱后氮气驱在浅层特低渗透油藏天然岩心中的提高采收率效果。

气水交替注入非混相驱效果评价 将人造岩心装入岩心夹持器中,按图1安装氮气驱实验装置,采用水驱后氮气驱最佳注气参数,在饱和油后进行气水交替注入,每轮次注入0.1倍孔隙体积的模拟地层水,根据氮气注入速度,调节注气压力下氮气驱与水驱段塞比例为1:1;先注氮气再注水,循环8轮次;记录产出油量、水量和岩心入口端压力,用气体流量计记录气体在大气压下的流量;对比水驱和水驱后氮气驱的压力和采收率。

气水交替注入参数影响规律评价 其基本步骤与气水交替注入非混相驱效果评价方法相同,区别在于在保持其他参数不变的条件下,分别改变注气段塞和气水段塞比例等。具体步骤包括:①采用人造岩心选择在岩心饱和油后进行气水交替注入,固定水驱段塞为0.07倍孔隙体积,保持气驱流量一定,用气驱时间来表示注气段塞,选择氮气与水的交替注入段塞比例为1:2,1:1,3:2和2:1,记录不同注气段塞下的气水交替注入采收率;②在最佳注气参数和注气段塞的条件下,利用人造岩心研究气水段塞比例对气水交替注入效果的影响,选择气水段塞比例为1:2,2:3,1:1和2:1,保持水驱流量一定,用水驱时间来表示水驱段塞,记录不同气水段塞比例下的气水交替注入采收率;③利用2,4和6号天然岩心在最佳气水交替注入参数下进行气水交替注入实验,分析气水交替注入在浅层特低渗透油藏天然岩心中的提高采收率效果。

2 实验结果与分析

2.1 水驱后氮气驱

2.1.1 水驱后氮气驱对驱替压力的影响

I号和II号人造岩心水驱时的最大压力分别为1.045和1.065 MPa,采收率分别为77.86%和77.50%;二次水驱时最大压力分别为1.82和1.653 MPa,采收率分别为81.19%和87.05%。由此可见,2块岩心二次水驱时压力明显增大,采收率提高3.33%~9.55%。这是因为:水驱后氮气驱形成气锁效应,使二次水驱阻力增大;同时促使液流发生转向,水相进入更小的孔喉中,驱替剩余油,从而提高

采收率。

2.1.2 注气参数对水驱后氮气驱效果的影响

注气压力 当注气压力为 1.0, 1.5, 2.0 和 2.5 MPa 时, 其水驱后氮气驱采收率分别为 3.33%, 6.40%, 10.37% 和 10.14%, 表明随着注气压力的增加, 水驱后氮气驱采收率先快速增加后缓慢减小, 水驱后氮气驱最佳注入压力为 2.0 MPa。分析认为, 当注气压力较小时, 气相渗透率相对较低, 气体无法进入更多的孔喉进行驱替; 当注气压力较高时, 气相流速相对加快, 容易形成气窜, 因此气驱采收率下降。

注气速度 随着注气速度的降低, 即出口端压力的增大, 水驱后氮气驱采收率先略微减小, 当出口端压力为 1 MPa 时达到最小, 之后又略有升高(图 2)。因此, 将室内实验水驱后氮气驱最优出口端压力确定为 0, 注气速度为 5 mL/min。分析认为, 由于特低渗透岩心孔喉较小, 当注气速度较大时, 氮气能够更多地进入细小孔喉中进行驱替, 虽然此时易引起气窜; 当注气速度较小时, 气窜程度较低, 但气体进入孔喉的相对阻力增加, 因此气驱采收率减小; 当注气速度进一步降低时, 驱替气体的有效驱替动力减小, 但气窜程度降低, 部分岩心孔喉部位的波及系数提高, 使氮气驱采收率又略有上升。

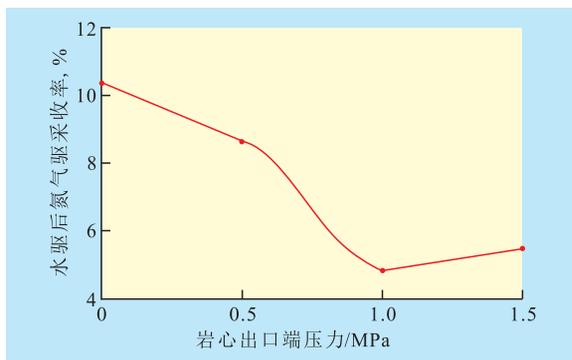


图2 注气速度对水驱后氮气驱效果的影响

氮气注入量 随着氮气注入量的增加, 初期产出主要为水, 随着气体进入未波及区域, 气驱开始发挥作用, 氮气驱采收率逐渐提高, 且呈现阶梯式增加趋势^[6], 在氮气注入量为 20 倍孔隙体积时出现阶段最优值(5.2%), 当氮气注入量为 20~25 倍孔隙体积时, 氮气驱采收率几乎不变; 随着氮气的继续注入, 采收率不断提高, 当氮气注入量为 73 倍孔隙体积时注入结束, 采收率提高了 9.1%, 但相对前一阶段采收率增幅变缓(图 3)。因此, 在现场应用水驱后氮气驱时, 可根据现场成本制定不同的注入方案。关于气驱采收率的阶段性增加, 分析认为, 在

不同注入量的气驱过程中, 分别驱替不同孔喉中的原油; 气体首先进入原油最容易被驱替出的孔喉中, 将原油驱替出来, 而原油在向前推进的过程中又在较小的孔喉中重新聚集或捕集; 当整体上该优势通道中的可动原油被完全驱替后, 气体会进入次优势通道、更次优势通道等, 直至气驱失效。

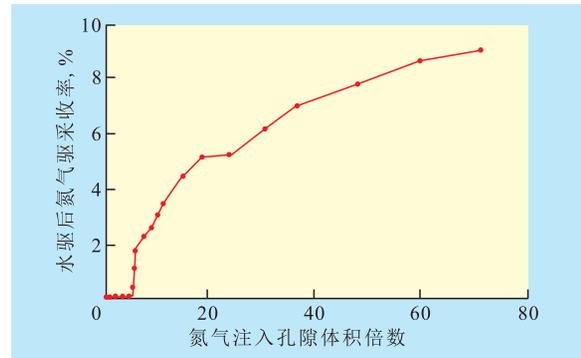


图3 氮气注入量对水驱后氮气驱效果的影响

注气时机 由注气时机对水驱后氮气驱效果的影响(图 4)可以看出: 水驱前缘突破时氮气驱、见水 5 min 后(含水饱和度为 56%)氮气驱、见水 10 min 后(含水饱和度为 67%)氮气驱、见水 20 min 后(含水饱和度为 72%)氮气驱及水驱至含水率为 99% 时(含水饱和度为 87%)氮气驱的总采收率分别为 99.01%, 84.23%, 86.06%, 93.38% 和 97.67%。结果表明: 随着水驱后氮气驱时含水饱和度的增加, 二次水驱后总采收率呈先降低后增加的趋势, 其中水驱前缘突破时氮气驱后总采收率最高; 水驱前缘突破后进行氮气驱, 提高采收率效果明显下降, 因为氮气会经由水相发生窜流的大孔道优先产生气窜; 随着见水时间的延长, 含水饱和度不断增大, 水相在驱替部位占据优势, 后续进行氮气驱时气锁程度逐渐增强, 使得气体可以进入更多孔喉进行驱替, 且后续水驱的综合阻力增大, 水相亦可进入更多孔喉驱替, 因此总采收率逐渐提高。根据水驱规律, 特低渗透轻质原油油藏见水后采出液含水率会急

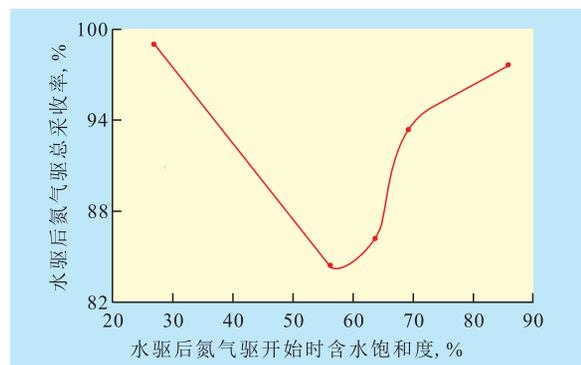


图4 注气时机对水驱后氮气驱效果的影响

剧升高^[7],因此实验过程中水驱前缘突破时采出端含水率较高,综合分析认为,在水驱前缘突破时进行氮气驱效果最佳,与常规低渗透油藏注氮气驱注气时机优化规律相近^[8-9],可以选择在中、低含水期进行水驱后氮气驱矿场试验。

2.1.3 提高采收率效果

由天然岩心水驱后氮气驱模拟结果可知,1,3和5号岩心水驱后氮气驱采收率分别为76.89%,81.36%和81.72%,相对水驱分别提高采收率6.75%,3.07%和9.50%;且随着岩心渗透率的增加,水驱后氮气驱采收率整体呈增加趋势。结果表明,在低一特低渗透天然岩心中进行水驱后氮气驱提高采收率是有效的。

2.2 气水交替注入

对于特低渗透岩心,水驱后氮气驱可以提高采收率,然而单纯氮气驱很容易引起气窜,导致气驱效果下降,因此目前气驱矿场试验常采用气水交替、气与泡沫液混注或交替注入3种方式,由于特低渗透储层泡沫注入阻力过大,因此选用气水交替注入方式^[10-12]。

2.2.1 气水交替注入对驱替压力的影响

由图5可知:①随着气水交替注入轮次的增加,氮气驱后二次水驱注入端最高压力经历了周期性的起伏,但整体呈先上升后下降的趋势,其中第1周期为第1至第4轮次,第2周期为第4至第7轮次,在每个周期的前3个轮次中,氮气驱后二次水驱注入端最高压力呈上升趋势,至第4个轮次时水驱压力突然下降;②第1至第5轮次和第7至第8轮次的氮气驱后二次水驱注入端最高压力均低于注气压力(2 MPa),仅第6轮次氮气驱后二次水驱注入端最高压力超过注气压力,该轮次氮气驱后二次水驱注入端最高压力相对第1轮次增加最大,约为1.5 MPa。分析认为:①在气水交替注入过程中,气水两相的

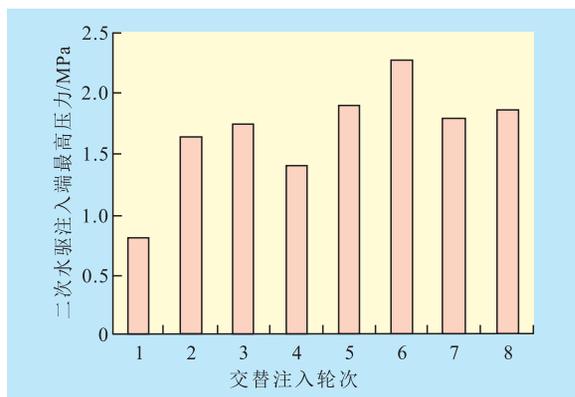


图5 气水交替注入轮次对氮气驱后二次水驱注入端最高压力的影响

共存状态对驱替压力造成影响。当气水交替注入未达到足够轮次和注气量时,气水两相整体呈分散相存在,气锁程度不断增强,水相得以进入更小的孔喉中驱替原油;当气水交替注入达到足够轮次和注气量后,气相呈连续相状态存在,注入氮气与滞留氮气的连续沟通,易形成气窜,后续水驱注入端压力虽突然降低,但亦可使气相由连续相转变为分散相;当继续下一轮次气水交替注入时,氮气驱后水驱注入端压力重新增加。②在8个轮次的气水交替注入过程中,第6个轮次时气水两相的共存状态使得气锁作用达到最强,故该轮次氮气驱后二次水驱注入端最高压力达到最大值。

2.2.2 气水交替注入参数对驱替效果的影响

注气段塞 随着注气段塞的增大,气水交替注入采收率先增加后减小,氮气注入段塞为0.15倍孔隙体积时采收率最高,为88.59%;由于人造岩心本身内部构造原因,以及饱和的模拟油主要进入特低渗透岩心较大孔喉且易被首先驱替,因此气水交替注入采收率与水驱后氮气驱相差幅度较小,此处仅考察注气段塞对交替注入效果的影响规律。分析认为,当注气段塞逐渐增大时,气驱逐渐发挥作用,且对后续水驱影响逐渐增大,因此气水交替注入采收率提高;当气体段塞继续增大时,气体注入能力增加,但也更易导致气窜,因此后期对水驱的影响逐渐减弱,导致气水交替注入采收率又逐渐下降。

气水段塞比例 当气水段塞比例为1:2,2:3,1:1和2:1时,气水交替注入采收率分别为73.41%,75.19%,88.59%,90.57%,说明随着气水段塞比例的增加,即水驱段塞的减小,气水交替注入采收率逐渐提高,当气水段塞比例为2:1时,气水交替注入采收率达到最大。分析认为,当水驱段塞较小时,未能驱出足够多的原油;当水驱段塞增加时,水驱影响逐渐增大,因此气水交替注入采收率增加。实验说明在气水交替注入过程中水驱的重要性,水驱段塞须满足一定量时,气驱和水驱的协同效应才能逐渐增强,从而满足交替注入提高采收率的要求。

2.2.3 提高采收率效果

由天然岩心气水交替注入驱替实验结果可以看出,2,4和6号岩心气水交替注入采收率分别为80.37%,87.73%和83.95%,相对水驱分别提高采收率10.23%,9.78%和11.73%。随着低一特低渗透岩心渗透率的增加,气水交替注入采收率整体呈增加趋势。相对水驱后氮气驱,低一特低渗透岩心中气水交替注入可进一步提高采收率约2%~6%。

3 室内和矿场氮气驱结果对比

关于氮气驱和气水交替注入已有大量研究,实验模拟、数值模拟和矿场结果均表明氮气驱和气水交替注入对于低—特低渗透油藏具有一定的提高采收率效果^[13-15]。然而室内模拟(包括实验模拟和数值模拟)和矿场中氮气驱注入参数有所差别:对于氮气注入量,数值模拟数据高于矿场数据,低于实验数据;对于气水交替注入时的气水段塞比例,数值模拟数据一般低于实验和矿场数据;对于气水交替注入轮次,数值模拟和矿场数据低于实验数据。原因主要包括3个方面:①分析对象尺度不同。室内实验为岩心级尺度,而数值模拟和矿场为油藏级尺度,模拟尺寸相差较大,因此实验过程中氮气注入量普遍较高,且特低渗透岩心氮气驱实验对注气量较低时的参数不易采集。②研究复杂程度不同。岩心与实际储层非均质性均较强,微观分布复杂,而数值模拟因考虑因素较为简单,模拟效果较好,选择气水段塞比例和注气量均较低。③成本考虑程度不同。室内实验因为注入量较小,可以不考虑成本因素,数值模拟由于模拟情况较为理想,且模拟过程几乎无成本,因此室内实验模拟和数值模拟数据具有随机性,对矿场成本的考虑相对较少;矿场实施中由于储层规模较大,为了降低施工成本,实际注入量相对降低。

4 结论

水驱后氮气驱可提高浅层特低渗透油藏采收率3%~10%;高含水井依然可以通过氮气驱来驱替细小孔喉中的原油,从而提高油藏动用程度;浅层特低渗透岩心水驱后氮气驱采收率与氮气注入量存在阶梯性上升趋势,根据油田的不同要求可以选择气体注入量的局域性最优值;现场水驱后氮气驱

尽量选择在中、低含水期进行。气水交替注入相对水驱后氮气驱可提高采收率约2%~6%,交替注入过程中驱替压力提高;特低渗透岩心气水交替注入室内最佳注入轮次为6轮次,气水段塞比例为2:1。

参考文献:

- [1] 杨红斌,蒲春生,吴飞鹏,等.空气泡沫调驱技术在浅层特低渗透低温油藏的适应性研究[J].油气地质与采收率,2012,19(6):69-72.
- [2] 洪玲,王香增,王成俊,等.特低渗透油藏新型高效驱油剂的研究与应用——以延长油区杏子川油田王214试验区为例[J].油气地质与采收率,2013,20(3):92-94.
- [3] 娄兆彬,杨朝光,王志鹏,等.中原油田高压低渗油藏注氮气效果及其分析[J].西部探矿工程,2005,105(2):64-65.
- [4] 曾贤辉,彭鹏商,陈德斌,等.中原油田低渗透油藏氮气驱矿场先导试验[J].大庆石油地质与开发,2002,21(3):68-69.
- [5] 曾贤辉,王进安,张清正,等.文188块氮气驱室内试验研究[J].油气地质与采收率,2001,8(1):59-61.
- [6] 刘萍,周瑜,冯佩真,等.卫42块特低渗透油藏氮气驱研究[J].江汉石油学院学报,2001,23(2):58-60.
- [7] 徐庆岩,杨正明,何英,等.特低渗透多层油藏水驱前缘研究[J].油气地质与采收率,2013,20(2):74-76.
- [8] 王国民,高江取,刘孔章,等.复杂断块油藏氮气驱提高采收率技术研究[J].特种油气藏,2004,11(3):46-48,67.
- [9] 吴晓明,韩秀玲,晏志,等.低渗透油田氮气注入方案优化研究[J].科学技术与工程,2011,11(6):3791-3793.
- [10] 许飞,刘华,宋元新,等.低渗透裂缝性油藏水气交注非混相驱提高采收率研究[J].石油化工应用,2009,28(9):33-35,40.
- [11] 董平志.大芦湖油田氮气驱提高厚层低渗透油藏采收率先导试验[J].特种油气藏,2011,18(2):104-106.
- [12] 李士伦,张正卿,冉新权.注气提高石油采收率技术[M].成都:四川科学技术出版社,2001.
- [13] 丁杨海.特低渗透油藏注氮气提高采收率室内实验研究[D].西安:西安石油大学,2011.
- [14] 苏玉亮,吴春新,吴晓东.特低渗透油藏不同开发方式室内实验研究[J].实验力学,2011,26(4):442-445.
- [15] 王进安,岳陆,袁广钧,等.氮气驱室内实验研究[J].石油勘探与开发,2004,31(3):119-121.

编辑 常迎梅

欢迎广大科技人员踊跃投稿