

伊朗雅达油田沥青层置换机制与压力波动分析

路保平, 侯绪田, 邢树宾

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘要:伊朗雅达油田 Kazhdumi 沥青层孔隙压力求取值波动大,随钻井液密度的增加沥青溢出量不减少反而增加。为了解释这一反常现象,提出封闭地质空间内流体与井筒通过置换性双向流动形成的泛井筒空间的概念,建立地层沥青与井筒钻井液置换性双向流动的机制模型;采用室内沥青置换模拟试验,验证钻井液置换沥青速度和钻井液与沥青的密度差呈线性增加关系。结果表明,密闭地质流体空间中的置换性双向流动是导致沥青层孔隙压力波动的根本原因。

关键词:沥青层; 置换; 双向流动; 泛井筒空间; 地层孔隙压力波动

中图分类号:TE 254 **文献标志码:**A

引用格式:路保平,侯绪田,邢树宾. 伊朗雅达油田沥青层置换机制与压力波动分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(6):88-93.

LU Baoping, HOU Xutian, XING Shubin. Asphalt displacement mechanism and pore pressure fluctuation in Yadavaran Oilfield, Iran[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(6): 88-93.

Asphalt displacement mechanism and pore pressure fluctuation in Yadavaran Oilfield, Iran

LU Baoping, HOU Xutian, XING Shubin

(Research Institute of Petroleum Engineering, SINOPEC, Beijing 100101, China)

Abstract: It has observed that the pore pressure of the Kazhdumi asphalt formation fluctuates greatly in Yadavaran Oilfield of Iran, and asphalt spillage increases instead of decreasing when the density of drilling fluid goes up. To explain this abnormal phenomenon, a concept of extensive wellbore formed by displacement bidirectional flow between the fluids in the enclosed geological space and wellbore was presented. A mechanism model of bidirectional displacement flow between asphalt in formation and drilling fluid in wellbore was figured out. Laboratory simulation experiments show that, as the density difference between drilling fluid and asphalt increases, the asphalt displacement rate increases proportionally. The results indicate that bidirectional displacement flow in enclosed geological fluid space is the essential cause of the pore pressure fluctuation in the asphalt formation.

Keywords: asphalt formation; displacement; bidirectional flow; extensive wellbore space; formation pressure fluctuation

伊朗雅达油田在一期钻井过程中钻遇 Kazhdumi 地层时,有多口井遇到了不同程度的沥青侵入。沥青侵入的显著特点是:起下钻溢流检查时无异常,但下钻到底洗井时有大量沥青返出^[1-3];压井时大幅度提高钻井液密度并不能有效降低溢出量,而且个别井还会增加溢流量;关井求取的地层孔隙压力在

井与井之间变化大,且同一口井多次求取地层孔隙压力时也不相同。这种孔隙压力的不确定性给施工带来了极为不利的影响,导致施工周期延长、钻井液材料消耗增大,甚至工程报废。弄清沥青质油藏的压力波动原因,为后期钻井方案设计提供指导十分必要。笔者建立地层沥青与井筒钻井液置换性双向

流动的机制模型,采用室内沥青置换模拟试验,对伊朗雅达油田沥青层置换机制与压力波动进行研究。

1 地层孔隙压力求取情况

一个地质区域某一地层的孔隙压力具有一定的稳定性,无论是使用 DST 测试还是常规溢流关井求压,都应该有一个基本一致的孔隙压力数据,但这一常识在 Kazhdumi 地层却被颠覆。

(1)不同井间溢流关井求取的孔隙压力变化大。F-13、APP-2、F-21、S-3 井在钻遇 Kazhdumi 沥青层时遇到了不同程度的沥青溢出情况,现场利用关井求压法分别计算了 Kazhdumi 的地层孔隙压力,但各井孔隙压力都不相同,且差异较大,见图 1。

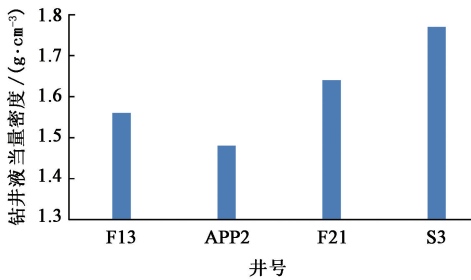


图 1 不同井 Kazhdumi 地层关井求压结果
Fig.1 Different well Kazhdumi formation pressure obtain through well shutdown pressure data

(2)同井不同时段孔隙压力求取数据差异大。同一口井在 Kazhdumi 层钻进时,在不同时段关井求取的孔隙压力数值也存在很大的差异性,S-3 井的 4 次孔隙压力数据见图 2,同时关井求取的地层压力值随钻井液密度的增加而增加。APP-2 井、F-21 井和 F-13 井同样存在类似情况。

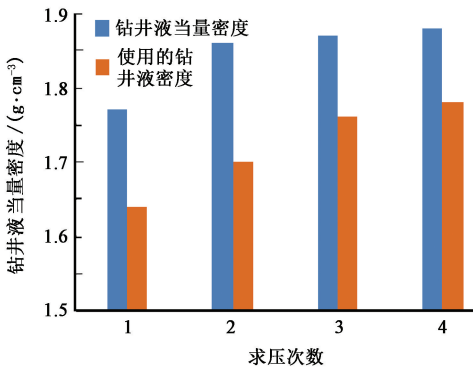


图 2 S-3 井不同时段关井求压结果
Fig.2 Well S-3 formation pressure obtain through well shutdown pressure data in different periods

2 地层孔隙压力波动内在原因分析

造成 Kazhdumi 地层孔隙压力如此复杂的波动

原因不明,地层的非均质性可以解释井间地层压力的变化,然而同一口井不同时段求取地层压力有较大的差异是难以理解的。

依据常规的井控理论,关井求压中地层孔隙压力的变化是由于关井过程中气体滑脱上升形成了井筒圈闭压力^[4]造成的。井筒圈闭压力形成的过程:关井时随着气体滑脱上移井底压力上升,钻井液滤液渗入地层形成泥饼将地层孔隙压力与井筒压力隔离,气体的继续上移使井底压力大于地层孔隙压力。由于井筒圈闭压力与气体的滑脱位置及气体侵入量等因素有关,因此可能表现出每口井求取的压力不同甚至是同一口井同一地层不同时段求取的孔隙压力也不相同,这是一种假象,因为地层孔隙压力并没有变化。有圈闭压力现象时,按常规的井控技术恰当地释放掉圈闭压力后,就可准确地求取孔隙压力值,该值会比较稳定而不会大幅变化^[5-8]。如果地层孔隙结构特征不利于钻井液内的固相在地层接触面上形成泥饼,当气体滑脱上升井底压力大于孔隙压力时钻井液会推动孔隙中的流体流动,表现为井漏,也就形成不了井筒圈闭压力。

井筒圈闭压力形成的必要条件是井筒为封闭空间且井底有气体向上运移。

Kazhdumi 属于孔隙型碳酸盐岩地层,钻至该地层如果出现钻速剧增现象时一般都伴随严重的沥青溢出。钻速突然加快,地层岩性不变,预示沥青层孔隙非常发育^[9],由于沥青溢出量和钻井液减少量几乎相同从而使总体积不变,表明在井筒和地层间发生了双向流动,以至高钻速井段的井壁上没有形成有效泥饼,也就在井筒内产生不了井筒圈闭压力。可见,井筒内形成的圈闭压力没有释放导致关井求取的地层孔隙压力变化,不足以解释 Kazhdumi 地层孔隙压力的波动。

根据钻进时出口密度变低并有沥青侵入但钻井液总量不变,及起下钻时无溢流但下钻到底循环时有大量沥青返出这一现象,可以假设井筒内的钻井液与地层内的沥青发生了置换性双向流动。正是这种置换现象导致了孔隙压力求取的复杂性:封闭空间中较低密度的地层流体与井筒内较高密度的钻井液发生置换性双向流动,使井筒与封闭地层流体空间连通形成一个泛井筒空间,关井时,置换进入井筒中的沥青含有的气体滑脱上升,使封闭的泛井筒空间内的压力上升,形成了泛井筒空间圈闭压力^[10-11]。由于泛井筒空间内在井筒和地层流体空间存在置换性双向流动,这种泛井筒空间圈闭压力

除具有井筒圈闭压力同样的特征外,还具有如下特性:原封闭的地层流体空间中的流体压力与井筒压力趋于一致;关井时置换进入井筒流体中的气体会不停地进入井筒滑脱上移,其圈闭压力影响不像常规井筒圈闭压力那样可以消除,难以求取到几乎一致的孔隙压力,气体滑脱位置与侵入量的不确定性导致了求取压力的多样性。

造成这种泛井筒空间特性的主要原因或实质是在井筒与封闭地质体内含有气体的流体发生了置换型双向流动,因此探索并验证这种置换型双向流动的机制就显得十分重要。

3 沥青层置换机制模型及试验

为探索置换型双向流动的原因,以流体力学为依据建立置换流动模型,并开展相关试验研究,用试验数据和现场数据对模型进行验证。

3.1 沥青层置换模型

由于地层连通性好,当钻头钻遇封闭沥青体时,则沥青层的孔隙压力在揭开后等于井筒压力。施工现象表明在井筒内钻井液与地层沥青间发生了等量交换,即双向流动。两者之间没有压差,却有密度差,密度差是导致双向流动的动力。

如图 3 所示,设钻开沥青层的厚度为 h ,钻井液密度为 ρ_m ,沥青密度为 ρ_a , $\rho_m > \rho_a$ 。A 点为钻头刚钻遇沥青层时沥青层顶部在井壁上的一点,此处井筒压力 p_{AH} 与沥青层压力 p_{AL} 相同,即 $p_{AH} = p_{AL}$,在 A 点压力平衡。

当钻进到 B 点,井筒压力为

$$p_{BH} = p_{AH} + \rho_m gh. \quad (1)$$

沥青层压力为

$$p_{BL} = p_{AL} + \rho_a gh. \quad (2)$$

$p_{AH} = p_{AL}$, $\rho_m > \rho_a$, 故

$$p_{BH} - p_{BL} = (\rho_m - \rho_a) gh. \quad (3)$$

式中, p_{BH} 为 B 点处井筒压力; p_{BL} 为 B 点处沥青层压力。

B 点井筒压力大于沥青层压力,尽管该压差很小,但足以推动 B 点处的钻井液进入沥青层,考虑液体的不可压缩性,沥青层压力会上升,当 A 点的沥青压力高于井筒钻井液压力时,即 $p_{AH} > p_{AL}$, 沥青将进入井筒。随着下部钻井液不断进入沥青层,沥青会连续从上部进入井筒,如图 4 所示。沥青和钻井液密度差越大,井筒底部与沥青层的压力差越大,沥青和钻井液的重力置换越严重,沥青层揭开的厚度越大,压差越大,置换就越严重。

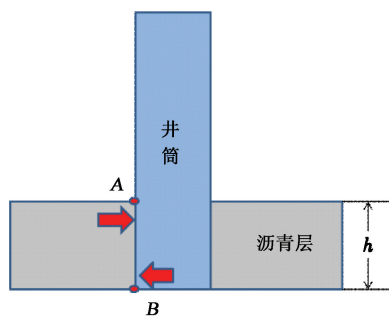


图 3 重力置换示意图

Fig. 3 Sketch map of gravity displacement

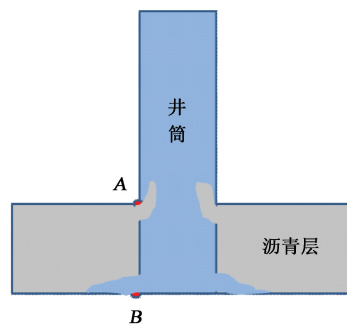


图 4 重力置换引起沥青置换示意图

Fig. 4 Sketch map of asphalt displacement caused by gravity

3.2 沥青置换室内试验

为深入了解沥青侵入机制、验证置换模型,采用试验手段模拟钻遇沥青层时井筒和沥青层的状况,观察记录钻井液密度、缝宽、缝高对沥青置换量的影响^[12]。图 5 为试验的主体装置示意图。左侧筒柱里装有稠油模拟沥青地层,右侧筒柱模拟井筒,井筒中有钻柱,两筒中间的平板模拟地层裂缝或孔隙。平板的四角分别装有压力传感器。

试验原理:模拟地层的容器设定为一个封闭空间,有多少钻井液进入地层就有多少地层稠油进入井筒。在此情况下,模拟正常钻进过程中地层与井筒置换的情况:钻井液从钻杆上部注入又环空返出,观察环空中钻井液与地层稠油的置换现象。模拟关井情况下环空钻井液与地层稠油置换的情况:将钻井液充满钻井井筒与环空之后关泵,使井筒形成密闭空间。在此情况下观察环空钻井液与地层稠油的置换现象。

试验步骤:①打开试验装置左侧油泵将油管充满油后关闭油泵及泄油阀,使油管内容积保持不变,模拟封闭地层条件;②打开试验装置右侧水泵将水管充满钻井液后关闭泄水阀 3,分别以保持水泵打开和关闭两种模式模拟正常钻进中钻井液循环过程和关井、停泵时,只考虑稠油与钻井液密度差导致的

重力置换现象。

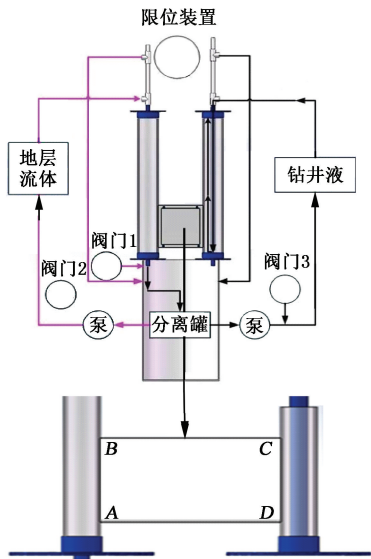


图 5 试验装置示意图

Fig.5 Sketch map of experimental facility

试验参数:整体试验装置高 1.5 m,试验井筒直径为 120 mm,试验钻柱直径为 40 mm,工作压力低于 0.1 MPa。模拟裂缝面长和高均为 350 mm,模拟裂缝采用 2.5 mm 的宽度。模拟沥青黏度为 224 mPa·s,沥青密度为 0.84 g/cm³,模拟钻井液密度为 1.0~1.5 g/cm³。

试验结果见图 6~8。

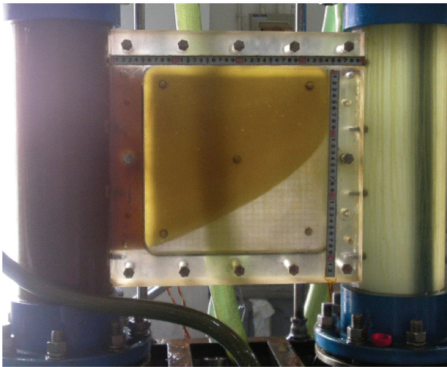


图 6 稠油和氯化钙水溶液界面

Fig.6 Interface between oil and calcium chloride solution

图 6 验证了上述置换机制模型,即钻井液从其与沥青接触面的下方流入沥青层,同时沥青从接触面的上方流出;图 7 试验数据和拟合关系显示,钻井液的密度越大置换发生速度越大,也就是钻井液与沥青的密度差越大置换量越大;图 8 试验数据不仅显示了钻井液与沥青接触面在垂向上存在压差,在水平面上也存在压差,表明流动的复杂多样性。

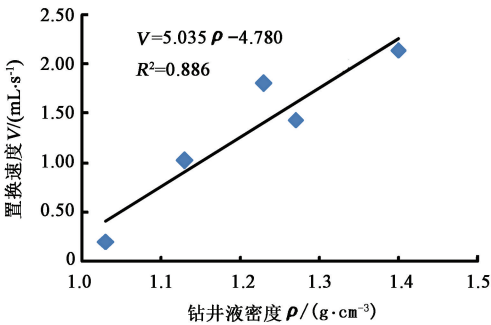


图 7 沥青置换速度随模拟钻井液密度变化

Fig.7 Variation of asphalt displacement rate with experimental drilling fluid density

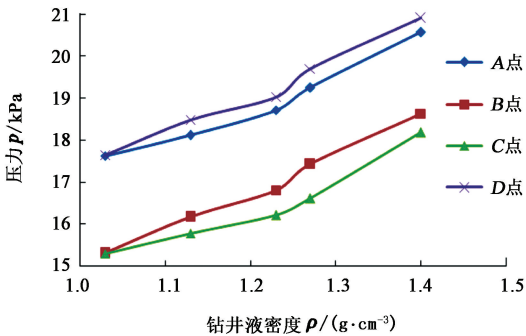


图 8 循环时 4 个测试点压力

Fig.8 Pressure of four test points during circulation

4 现场数据验证

图 9 为 S-3 井沥青置换速度随钻井液密度的变化。钻遇沥青层时随着钻井液密度增大,沥青溢出量增加,从实践上验证了置换量与密度差正线性相关。该井钻沥青层时钻井液密度越来越高的原因就是发现有沥青溢出时,关井求压有立压就加重,由于泛井筒空间的形成不仅使沥青层压力等于加重后的井筒压力,而且置换进入井筒沥青中气体的滑脱上升还会在关井时在泛井筒空间形成圈闭压力,促使现场再次提高钻井液密度,导致了密度越加越高而溢流却不见减少的现象。

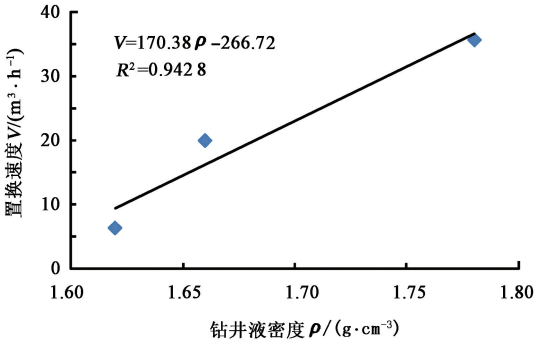


图 9 S-3 井沥青置换速度随钻井液密度的变化

Fig.9 Variation of well S-3 asphalt displacement rate with drilling fluid density

WD-2 井 Kazhdumi 地层 DST 测试过程中深度为 3 695.86 m, 压力计记录压力为 60.03 MPa (图 10), 沥青密度为 1.01 g/cm^3 , 射孔段深度为 3 715 ~ 3 736 m, 以射孔段中点深度 (3 725.5 m) 折算得 Kazhdumi 地层的压力当量密度为 1.65 g/cm^3 。钻开 Kazhdumi 地层采用的钻井液密度为 $1.58 \sim 1.60 \text{ g/cm}^3$ (图 11), 钻井过程中未发生溢流现象, 表明该沥青层的初始地层压力低于 1.60 g/cm^3 。测试得到的地层压力上升的主要原因是 DST 测试射孔后的井筒压力传导给了沥青层, 使其压力上升至井筒压力 (DST 测试时使用钻井液密度为 1.65 g/cm^3), 验证了泛井筒形成后, 地层孔隙压力与井筒压力相等这一结论。二开地层产液 15.6 m^3 后, 地层压力下降到 51.13 MPa, 折算压力当量密度为 1.41 g/cm^3 , 说明该地层为密闭性较好的定容体, 随地层流体排出, 地层孔隙压力快速下降。

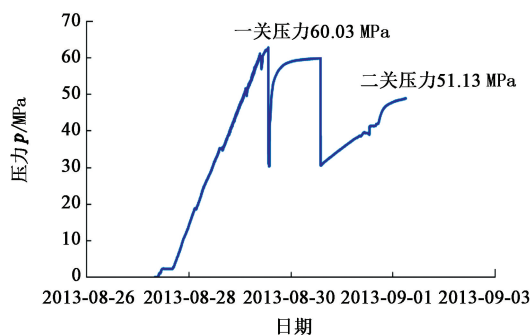


图 10 WD-2 井测试压力

Fig. 10 Well WD-2 testing pressure value

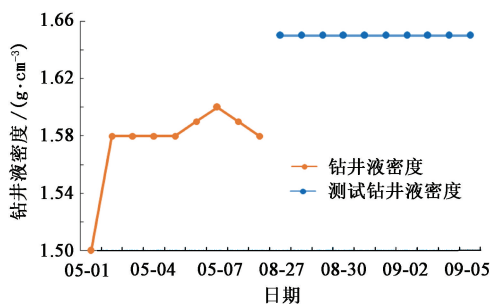


图 11 WD-2 井钻井和测试阶段采用的钻井液密度

Fig. 11 Drilling fluid density adopted by well WD-2 during drilling and testing

5 结 论

(1) 泛井筒空间内存在的置换性双向流动, 导致地层孔隙压力等于井底压力, 钻遇活跃沥青层时不同的钻井液密度形成不同的沥青层压力, 同时沥青置换流动速度与密度差呈线性正相关。

(2) 地层流体空间封闭, 与井筒连通性好, 密度

差导致的置换性双向流动是形成泛井筒空间现象的必要条件。

(3) 当发现有置换性双向流动现象时, 不能把提高钻井液密度作为控制沥青溢出的手段, 而是堵塞流动的通道, 消除泛井筒空间。

参考文献:

- [1] 何青水, 宋明全, 肖超, 等. 非均质超厚活跃沥青层安全钻井技术探讨[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(1): 20-24.
HE Qingshui, SONG Mingquan, XIAO Chao, et al. Discussion on safe drilling technology for heterogeneous ultra-thick and active bitumen zone[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(1): 20-24.
- [2] 郭京华, 夏柏如, 赵增新, 等. F19 井沥青侵及相关井下复杂情况的处理[J]. 特种油气藏, 2012, 19(4): 134-137.
GUO Jinghua, XIA Bairu, ZHAO Zengxin, et al. Treatments for bitumen contamination and associated downhole problems in well F19[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(4): 134-137.
- [3] 江朝, 郭京华, 王子进, 等. YD 油田沥青层安全钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(3): 7-12.
JIANG Zhao, GUO Jinghua, WANG Zijin, et al. Discussion on safe drilling technologies for the asphalt layer in the YD Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(3): 7-12.
- [4] 孙宁, 秦文贵, 张镇. 钻井手册[M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [5] 孔祥伟, 林元华, 邱伊婕. 控压钻井重力置换与溢流气侵判断准则分析[J]. 应用力学学报, 2015, 32(2): 318-322.
KONG Xiangwei, LIN Yuanhua, QIU Yijie. Research of mechanism for the gas invasion and gravity replacement in drilling operations[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(2): 318-322.
- [6] 任立伟, 夏柏如, 毛迪, 等. 沥青层钻井液柱压力关键影响因素及控制技术[J]. 科技导报, 2014, 32(3): 29-33.
REN Liwei, XIA Bairu, MAO Di, et al. Key influencing factors and control technology of drilling fluid pressure in the bitumen zone[J]. Science and Technology Review, 2014, 32(3): 29-33.
- [7] 李兆敏, 王壮壮, 李松岩, 等. 温度对油砂沥青相渗规律影响研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(1): 92-94.
LI Zhaomin, WANG Zhuangzhuang, LI Songyan, et al. Research on influence of temperature on rules of relative permeability of asphalt and oil sands[J]. Special Oil &

- Gas Reservoirs, 2015, 22(1):92-94.
- [8] 杨顺辉,金军斌,牛成成,等. 一种沥青固化剂的研究与应用[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(21):200-204.
YANG Shunhui, JIN Junbin, NIU Chengcheng, et al. The research and application of one bituminization agent [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(21):200-204.
- [9] 金军斌,何青水,唐文泉,等. Y油田超厚沥青层安全钻进分强度控制技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1):63-68.
JIN Junbin, HE Qingshui, TANG Wenquan, et al. Contamination control technique for safe drilling in ultra-thick asphalt layers in Y Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1):63-68.
- [10] 张兴全,周英操,刘伟,等. 欠平衡气侵与重力置换气侵特征及判定方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(1):95-102.
ZHANG Xingquan, ZHOU Yingcao, LIU Wei, et al. A method for characterization and identification of gas kicks caused by underbalanced pressure and gravity displacement [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1):95-102.
- [11] 张兴全,周英操,刘伟,等. 碳酸盐岩地层重力置换气侵特征[J]. 石油学报, 2014, 35(5):958-962.
ZHANG Xingquan, ZHOU Yingcao, LIU Wei, et al. Characters of gravity replacement gas kick in carbonate formation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(5):958-962.
- [12] 杨顺辉. 可视化重力置换室内模拟装置的研制与应用[J]. 石油机械, 2015, 43(3):96-99.
YANG Shunhui. Development and application of lab simulation devices for visualized gravity displacement [J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(3):96-99.
- (编辑 李志芬)