

CT技术在改性淀粉凝胶体系运移特征研究中的应用

冷光耀^{1,2,3}, 赵凤兰^{1,2,3}, 侯吉瑞^{1,2,3}, 徐宏明^{1,2,3}, 张春蕾^{1,2,3}, 王嘉晨^{1,2,3}, 宋文秀^{1,2,3}

(1.中国石油大学(北京)提高采收率研究院,北京 102249; 2.中国石油三次采油重点实验室,北京 102249; 3.石油工程教育部重点实验室,北京 102249)

摘要:目前,常规调剖实验只能获得岩心前后端的参数指标,而对油水及调剖体系等流体在模型中的运动过程无法直观地呈现。为此,利用计算机断层扫描技术,在保证环氧树脂浇铸模型无损的条件下,对模型驱替过程跟踪扫描,重建了驱替过程中不同时间的水驱前缘位置及改性淀粉凝胶体系的运移特征图像。实验结果表明,计算机断层扫描技术可有效用于研究和呈现改性淀粉凝胶体系的运移特征,对于渗透率级差为30的正韵律岩心模型,可得到一次水驱低渗透层被启动的位置并可直观看到,调剖体系在高渗透层中以整体段塞形式运移,成胶后,可有效封堵高渗透窜流通道,实现了定位调堵,明显扩大后续水的波及体积,使水驱采收率提高了15.08%。

关键词:含水饱和度 计算机断层扫描技术 改性淀粉凝胶体系 定位调堵 岩心模型

中图分类号:TE357.43

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)02-0078-005

Application of CT technology in migration characteristics research of modified-starch gel system

Leng Guangyao^{1,2,3}, Zhao Fenglan^{1,2,3}, Hou Jirui^{1,2,3}, Xu Hongming^{1,2,3},

Zhang Chunlei^{1,2,3}, Wang Jiachen^{1,2,3}, Song Wenxiu^{1,2,3}

(1. Research Institute of Enhanced Oil Recovery, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China;

2. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, CNPC, Beijing City, 102249, China; 3. MOE Key

Laboratory of Petroleum Engineering, Beijing City, 102249, China)

Abstract: Nowadays, parameter at both ends of the core may be gotten through conventional profile control experiments. However, the flow process of fluid such as oil, water or profile control system could not be visually presented in those experiments. In this paper, CT technology was applied to observe the dynamical flooding processes in core model casted by epoxy resin without damage, and then the front location of the water flooding and migration characteristics of modified starch gel in different times were re-established. Experimental results show that the CT technology can be effectively used in migration characteristics research and presentation for the profile control system. When it is applied to a positive rhythm core model with a permeability contrast of 30, the starting location of the low permeability layer in the first water drive could be given and seen. In the meantime, the profile control system can flow forward with the whole slug state in the high permeability layer, which can effectively shut off the flow channel in the high permeability layer after the gel is formed. Positioning profile control and water plugging may be realized and swept volume of the subsequent water may be expanded obviously. Oil recovery efficiency by water flooding is increased by 15.08%. This paper provides a new experimental method and research idea about the deep water plugging and profile control in heterogeneous reservoirs.

Key words: water saturation; CT technology; modified-starch gel system; positioning profile control and water plugging; core model

收稿日期:2015-01-13。

作者简介:冷光耀(1989—),男,吉林松原人,助理工程师,硕士,从事提高采收率与采油化学方面的研究。联系电话:13795052826, E-mail: andylgy@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“油田开采后期提高采收率技术”(2011ZX05009-004),国家示范工程“大庆长垣特高含水油田提高采收率示范工程”(2011ZX05052)。

计算机断层扫描(简称CT)是一项涉及学科领域广、综合性强的高新技术,已经形成了一个相对独立的技术领域。CT技术被中外广泛用于研究多孔介质中的渗流特点^[1-4]已有20多年,在中外已经形成了一套较为完整的实验体系^[5-6]。在三次采油提高采收率方面,CT技术的应用对于研究渗流机理和规律起到了重要作用。这种成像技术的优点在于能够快速、无损、定量地表征岩心样品的密度、孔隙度和饱和度变化,具有极好的三维分辨率,且对样品类型及实验的限制条件很少^[7-9]。当然,相比之下,利用CT技术测量岩心的基本物理参数比常规测量方法复杂,并且费用高。目前,尚未见到CT技术用于调剖体系^[10-16]运移特征研究方面的相关文献报道。为此,笔者应用CT技术,通过对水驱油、注入改性淀粉凝胶体系和后续水驱过程的动态跟踪扫描,定量、可视地分析油、水饱和度的变化及分布范围、凝胶体系运移特征和影响驱替效果的因素,以深化对改性淀粉凝胶体系调堵机理的认识及体系优选。

1 CT技术基本原理

CT技术是以X射线管产生的X射线束从多个方向沿着物体某一选定断层面进行照射,测定通过的X射线量,数字化后经过计算得出该层面各单位体积的吸收系数,进而得到与X射线吸收系数直接关联的CT值。

通过岩心样品中的岩石骨架、空气、水和油的CT值计算岩心各截面的孔隙度及含水饱和度。两相流体的CT值相差越大,测得的孔隙度及含水饱和度越精确。通过CT二维切片、三维图像观察分析水驱油驱替过程^[17-18]。

由于砂岩由砂岩骨架和孔隙系统(内充气体或流体)组成,所以砂岩的CT值由砂岩骨架的CT值和孔隙系统的CT值组成,可简单表示为

$$CT_n = (1 - \phi)CT_s + \phi(S_g CT_g + S_l CT_l) \quad (1)$$

式中: CT_n 为岩心的CT值; ϕ 为孔隙度; CT_s 为岩心骨架的CT值; S_g 为孔隙系统中所含气体的饱和度; CT_g 为孔隙系统中所含气体的CT值; S_l 为孔隙系统中所含流体的饱和度; CT_l 为孔隙系统中所含流体的CT值。

利用CT技术,对干岩心和饱和油后的岩心分别扫描,由式(1)可得

$$CT_{n,a} = (1 - \phi)CT_s + \phi CT_a \quad (2)$$

$$CT_{n,o} = (1 - \phi)CT_s + \phi CT_o \quad (3)$$

式中: $CT_{n,a}$ 为干岩心的CT值; CT_a 为空气的CT值,其值为-1 000; $CT_{n,o}$ 为饱和油后岩心的CT值; CT_o 为油的CT值。

将式(2)与式(3)相减,整理后得到孔隙度的计算式为

$$\phi = \frac{CT_{n,o} - CT_{n,a}}{CT_o - CT_a} \quad (4)$$

利用CT技术,对驱替过程中不同时刻的岩心进行扫描,由式(1)得到

$$CT_{n,w} = (1 - \phi)CT_s + \phi(S_o CT_o + S_w CT_w) \quad (5)$$

式中: $CT_{n,w}$ 为水驱过程中岩心的CT值; S_o 为含油饱和度; S_w 为含水饱和度; CT_w 为水的CT值。

因 $S_w + S_o = 1$,将式(5)变形可得含水饱和度计算式为

$$S_w = \frac{CT_{n,w} - CT_{n,o}}{\phi(CT_w - CT_o)} \quad (6)$$

2 实验器材与方法

2.1 实验器材

实验所用扫描仪器是采用Hilight稀土陶瓷探测器并由扫描架、支架、控制台和电源分配装置等构成的ProSpeed CT/e单层螺旋CT。扫描实验所需电压和电流分别为120 kV和50 mA,单层扫描时间为2 s,产生512×512网格矩阵,岩心一次扫描60个切片,扫描厚度和层距均为5 mm,保证了扫描的连续性。

实验用水为加入8%溴化钠增强剂的模拟水,其CT值为569。实验用油为盘古梁油区原油与煤油配制的模拟油,25℃时的粘度为9 mPa·s,其CT值为-196。实验用调剖剂为自制的改性淀粉凝胶,其由改性淀粉、不饱和单体和成胶控制剂构成,其CT值为12.5;实验用调剖体系由改性淀粉凝胶和淀粉溶液构成,称为改性淀粉凝胶体系。淀粉溶液中加入8%溴化钠,其CT值为600。实验采用环氧树脂浇铸的层内非均质正韵律岩心模型,其规格为4.5 cm×4.5 cm×30 cm,上、下层渗透率级差为30,渗透率分别为 100×10^{-3} 和 $3\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.2 实验方法

CT扫描实验主要分为5步:①按照图1连接好实验流程,将干岩心模型固定在CT扫描装置中,进行扫描,得到60个扫描断面的CT值分布;②将模型抽真空,饱和模拟油,进行CT扫描,得到CT值分布;③以0.5 mL/min的速度进行一次水驱,直到出口端

含水率达98%时停止水驱,驱替过程中对模型跟踪扫描,利用图像分析软件重建不同时间下的CT扫描相应切片图像,得到油、水饱和度二维分布图,通过式(6)计算出各切片的平均油、水饱和度;④以0.5 mL/min的速度注入0.2倍孔隙体积的改性淀粉凝胶,再注入0.2倍孔隙体积的淀粉溶液,候凝,注入过程对模型跟踪进行CT扫描,利用图像分析软件重建二维剖面图像,得到凝胶在模型中的分布状态;⑤以0.5 mL/min的速度进行后续水驱,直到出口端含水率达98%时停止驱替,驱替过程中对模型进行扫描,经过图像分析和式(6)分别得到高渗透层断面CT值分布和低渗透层含水饱和度分布。

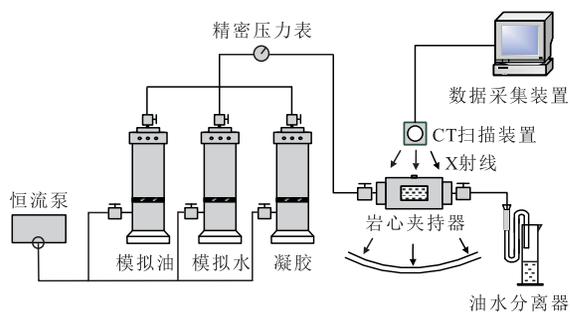


图1 CT扫描驱替实验流程

Fig.1 CT scanning and displacement experiment process

3 实验结果分析

3.1 一次水驱含水饱和度分布特征

从图2可清晰直观地看到一次水驱过程中水驱前缘的推进状态。对于高渗透层,注入水较均匀地推进,水驱开始后,高渗透层水相波及到的区域含水饱和度迅速增加,水驱105 min时出口端未见水,水驱220 min时,高渗透层各断面平均含水饱和度为68%,说明一次水驱结束时,高渗透层中仍有32%的残余油,有待进一步挖潜。对于低渗透层,水驱

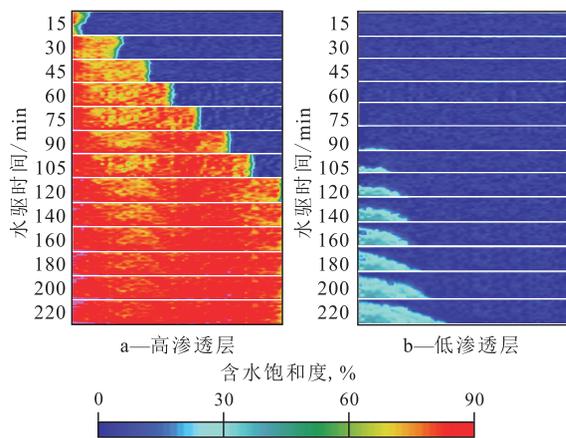


图2 一次水驱含水饱和度分布

Fig.2 Water saturation distribution of the first water flooding

75 min时,注入水开始波及低渗透层,水驱220 min时,低渗透层最高含水饱和度出现在第1个断面,为43%,并且注入水波及到模型的第27个断面。

3.2 改性淀粉凝胶体系的运移与分布特征

由注改性淀粉凝胶和淀粉溶液过程中高渗透层的扫描结果(图3)可见:初始注入的改性淀粉凝胶主段塞运移过程中能够保持很好的完整性;而在注入淀粉溶液顶替段塞的过程中,主段塞和顶替段塞能够以整体段塞形式继续向前运移,且高渗透层被改性淀粉凝胶体系完全充填。这是由于:一方面,淀粉溶液顶替段塞与主段塞的粘度和流变规律相近,改性淀粉凝胶体系与呈现亲水特性的窜流通道壁面较好地胶结;另一方面,因为改性淀粉凝胶体系的粘度来自天然高分子,且分子链的长度相对较短,刚性较强,因而抗剪切能力强,在多孔介质中运移时,溶液表观粘度不会大幅度降低,能够保持在一个较稳定的值,使得改性淀粉凝胶体系能够保持段塞的整体性和在多孔介质中连续运移。

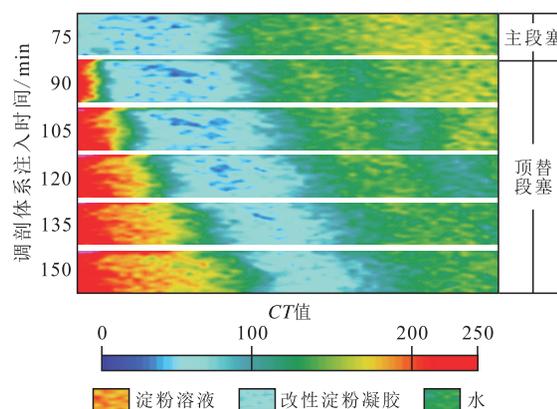


图3 注改性淀粉凝胶和淀粉溶液过程中高渗透层的扫描结果

Fig.3 Scanning result of injecting modified-starch gel system and pure starch solution in high permeability layer

3.3 后续水驱阶段油水分布特点

由后续水驱阶段高渗透层断面CT值分布(图4)可以看出:在后续水驱过程中,沿模型长度方向切片的CT值呈下降趋势,并在第23个切片到第42个切片之间出现了下降漏斗,说明改性淀粉凝胶成胶性能优良,能够与孔隙壁面很好地胶结,在孔隙中的位置未发生变化,对于窜流通道的封堵效果好,高强度的封堵迫使后续的液流发生转向,进而启动低渗透层;在岩心第42个切片到第60个切片之间,随着水驱时间的增加,切片的CT值逐渐增加,这是因为注入8%溴化钠水绕过改性淀粉凝胶启动低渗透层后又进入接近出口端处的高渗透层,使含水饱和度增加所致。

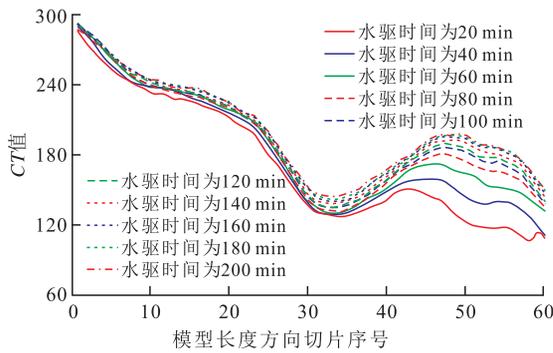


图4 后续水驱高渗透层CT值分布

Fig.4 CT distribution of the second water flooding in high permeability layer

由后续水驱阶段低渗透层的含水饱和度分布(图5)可见,随着水驱时间的增加,低渗透层含水饱和度逐渐增加,但是水驱前缘线推进速度变慢,岩心出口端含水率达到98%时,注入水波及到低渗透层的第50个断面,此时低渗透层第1个断面含水饱和度为56%。这是因为改性淀粉凝胶很好地封堵了高渗透层,液流方向已经发生明显改变,最大限度地启动了低渗透层,使原来吸水指数低或水驱未波及到的区域受到水驱作用,从而扩大了水驱波及体积系数,提高了注入水的有效利用率,但是注入水启动低渗透层后绕过改性淀粉凝胶重新进入高渗透层,形成新的水流通路,后续液流沿着渗流阻力小的方向运移,所以导致模型出口端低渗透层中仍然含有大量的剩余油。

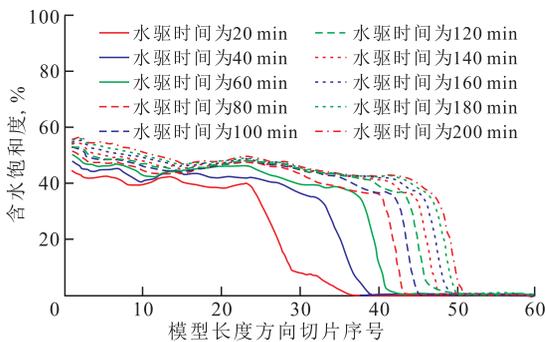


图5 后续水驱低渗透层含水饱和度分布

Fig.5 Water saturation distribution of the second water flooding in low permeability layer

3.4 采收率与含水率变化

分析改性淀粉凝胶成胶前后采收率与含水率曲线(图6)发现:在一次水驱过程中,无水采收率达到28.44%,模型出口端见水后含水率陡然上升,一次水驱采收率为41.53%;在注入改性淀粉凝胶主段塞和淀粉溶液顶替段塞过程中,含水率降至51.5%,采收率较一次水驱提高了10.3%;模型后续水驱提高采收率15.08%。结果表明,改性淀粉凝胶体系成胶后,有效地封堵了高渗透层的窜流通道,迫使后

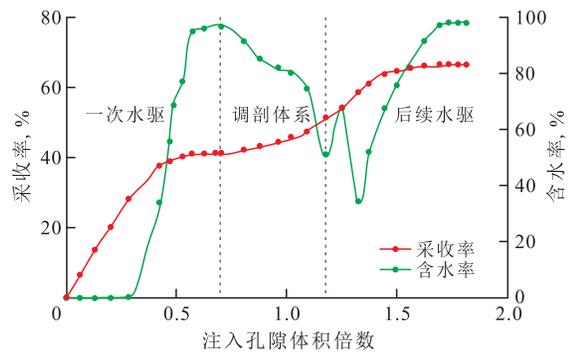


图6 改性淀粉凝胶成胶前后采收率与含水率变化

Fig.6 Oil recovery and water ratio change before and after the modified-starch gel is formed

续注入水发生液流转向,很好地启动了低渗透层。

4 结论

通过CT扫描图像,能够直接观察和解释驱替各阶段的水线推进轨迹和波及范围、油水前缘位置以及油水饱和度等,因此可采用CT技术研究调剖体系在非均质模型中的运移特征,从而为深部定位调堵技术的机理研究和调剖体系优选提供了新的研究思路。

CT扫描图像和岩心驱替实验结果表明,改性淀粉凝胶体系具有良好的运移性能,在多孔介质中运移时,具有整体向前推移的特性。成胶后,可实现定位封堵,能够有效解决非均质模型水窜流问题,后续水驱过程中改善了低渗透层的注入水波及体积,有效提高正韵律模型的采收率。

参考文献:

- [1] 吕伟峰,冷振鹏,张祖波,等.应用CT扫描技术研究低渗透岩心水驱油机理[J].油气地质与采收率,2013,20(2):87-90.
Lü Weifeng, Leng Zhenpeng, Zhang Zubo, et al. Study on water-flooding mechanism in low-permeability cores using CT scan technology[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 87-90.
- [2] 刘义坤,王凤娇,胡超洋,等.薄差储层油水渗流规律研究[J].特种油气藏,2013,20(5):89-92.
Liu Yikun, Wang Fengjiao, Hu Chaoyang, et al. Study on oil/water percolation in thin and poor pay zone[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(5): 89-92.
- [3] 孙业恒.裂缝性低渗透砂岩油藏数值模拟历史拟合方法[J].油气地质与采收率,2010,17(2):87-90.
Sun Yeheng. History matching method of numerical simulation on fractured low permeability sandstone reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(2): 87-90.
- [4] 赵益忠,程远方,刘钰川,等.启动压力梯度对低渗透油藏微观渗流及开发动态的影响[J].油气地质与采收率,2013,20(1):

- 67-69, 73.
- Zhao Yizhong, Cheng Yuanfang, Liu Yuchuan, et al. Study on influence of start-up pressure gradient to micro-seepage in low permeability reservoirs and development trends [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(1): 67-69, 73.
- [5] 王家禄, 高建, 刘莉. 应用CT技术研究岩石孔隙变化特征[J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 887-893.
- Wang Jialu, Gao Jian, Liu Li. Porosity characteristics of sandstone by X-ray CT scanning system [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 887-893.
- [6] Bataweel M A, Nasr-El-Din H A, Schechter D S. Fluid flow characterization of chemical EOR flooding: a computerized tomography (CT) scan study [C]. *SPE/DGS 149066*, 2011.
- [7] 高建, 韩冬, 王家禄, 等. 应用CT成像技术研究岩心水驱含油饱和度分布特征[J]. *新疆石油地质*, 2009, 30(2): 269-271.
- Gao Jian, Han Dong, Wang Jialu, et al. Application of CT scanning image technique to study of oil saturation distribution in core displacement test [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(2): 269-271.
- [8] 付静, 王文清, 秦国鲲. X-CT成像研究聚合物驱中流体饱和度[J]. *新疆石油天然气*, 2006, 2(3): 48-50.
- Fu Jing, Wang Wenqing, Qin Guokun. Determining saturation of fluid N polymer flooding by X-CT method [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2006, 2(3): 48-50.
- [9] 曹绪龙, 李玉彬, 孙焕泉, 等. 利用体积CT法研究聚合物驱中流体饱和度分布[J]. *石油学报*, 2003, 24(2): 65-68.
- Cao Xulong, Li Yubin, Sun Huanquan, et al. Determination of fluid saturation in polymer flooding by volume-CT method [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(2): 65-68.
- [10] 王苹, 戴彩丽, 由庆, 等. 抗剪切耐盐无机铝凝胶深部调剖剂研究[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(6): 100-103.
- Wang Ping, Dai Caili, You Qing, et al. Experimental study on shearing and salt tolerant deep profile control agents composed of inorganic aluminum gel [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(6): 100-103.
- [11] 王海静, 薛世峰, 高存法. 水平井变密度射孔调剖方法[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(6): 87-90, 94.
- Wang Haijing, Xue Shifeng, Gao Cunfa. Profile control method for horizontal well using variable-density perforations [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(6): 87-90, 94.
- [12] 张建华. 聚合物凝胶体系在孔隙介质中交联及运移封堵性能研究[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(2): 54-56, 63.
- Zhang Jianhua. Study of crosslinking and transport blocking properties of polymer gel system in porous media [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(2): 54-56, 63.
- [13] 徐宏明, 侯吉瑞, 赵凤兰, 等. 非均质油藏封窜及化学驱复合技术研究[J]. *油田化学*, 2013, 30(1): 80-82, 95.
- Xu Hongming, Hou Jirui, Zhao Fenglan, et al. Sealing channeling and chemical flooding composite technology research on the heterogeneous reservoir [J]. *Oilfield Chemistry*, 2013, 30(1): 80-82, 95.
- [14] 邱茂君, 岳湘安. 丁苯胶乳深部调剖的适应性研究[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(1): 51-53, 66.
- Qiu Maojun, Yue Xiang'an. Study of Styrene Butadiene Latex as profile control agent [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(1): 51-53, 66.
- [15] 冯兵, 赵仁保, 李文魁, 等. 气井凝胶堵水剂配方优化及性能评价[J]. *石油钻探技术*, 2010, 38(2): 67-71.
- Feng Bing, Zhao Renbao, Li Wenkui, et al. Formulation optimization and performance evaluation of water plugging reagent in gas wells [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(2): 67-71.
- [16] 赵仁宝, 岳湘安, 张秋红. 淀粉-丙烯酰胺低质量分数接枝共聚反应及产物的流变特性[J]. *油气地质与采收率*, 2008, 15(3): 82-84.
- Zhao Renbao, Yue Xiang'an, Zhang QiuHong. Graft copolymerization of acrylamide and starch at low concentration and rheological properties of the product [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2008, 15(3): 82-84.
- [17] Kazuki Watanabe, Yoshihiro Tsuchiya, Satoru Takahashi, et al. Reliable steady-state relative permeability measurement for carbonate rocks from a middle eastern offshore reservoir with an in-situ saturation monitoring by X-ray CT scanner [C]. *SPE 161453*, 2012.
- [18] 吕静, 刘玉章, 高建, 等. 应用CT研究水平井置胶成坝深部液流转向机理[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(6): 733-737.
- Lü Jing, Liu Yuzhang, Gao Jian, et al. Mechanism research of in-depth fluid diversion by "gel dam" place with horizontal well using X-ray CT [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(6): 733-737.

编辑 常迎梅