

文章编号: 1000-0747(2014)03-0330-06 DOI: 10.11698/PED.2014.03.08

利用 CT 技术研究砾岩驱油机理

邓世冠^{1,2,3}, 吕伟峰^{1,2}, 刘庆杰^{1,2}, 冷振鹏^{1,2}, 李彤^{1,2}, 刘红现⁴,
顾鸿君⁴, 许长福⁴, 张旭辉³, 鲁晓兵³

(1. 提高石油采收率国家重点实验室; 2. 中国石油勘探开发研究院; 3. 中国科学院力学研究所;
4. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院)

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB707302); 中国石油天然气集团公司
科研项目(2011A-1003); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA063403)

摘要: 以新疆油田天然砾岩岩心为研究对象, 应用 CT 扫描技术分析砾岩孔隙度分布特征; 通过对砾岩水驱及聚合物驱过程的在线 CT 扫描监测, 得到驱替过程中岩心含油饱和度沿程分布信息和 CT 重构切面图像, 根据驱替过程新表征参数“含油饱和度频率分布”分析砾岩驱油机理。研究表明: 砾岩具有强非均质性, 在水驱过程中形成“优势通道”, 引起无效水循环, 降低水驱采收率, 且水驱过程中首先动用高含油饱和度区域的油; 聚合物驱时高一中饱和度区间的油都能够动用, 而低饱和度区间的油仍然难以动用; 后续水驱时仍然主要动用高饱和度区间的油。针对砾岩油藏, 前期水驱应该尽量达到最高含水率, 以加强聚合物的段塞效果; 同时应减少聚合物的注入量, 利用后续水驱推动聚合物段塞达到驱油的目的。图 13 表 2 参 14

关键词: 砾岩; CT 扫描; 水驱; 聚合物驱; 含油饱和度; 沿程分布; 频率分布

中图分类号: TE343 文献标识码: A

Research on displacement mechanism in conglomerate using CT scanning method

Deng Shiguan^{1,2,3}, Lü Weifeng^{1,2}, Liu Qingjie^{1,2}, Leng Zhenpeng^{1,2}, Li Tong^{1,2}, Liu Hongxian⁴, Gu Hongjun⁴,
Xu Changfu⁴, Zhang Xuhui³, Lu Xiaobing³

(1. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100190, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China)

Abstract: Taking the conglomerate from Xinjiang Oilfield as study object, the porosity distribution characteristics of the conglomerate were analyzed with CT scanning; through the online monitoring of the water and polymer flooding process in a conglomerate core using an CT scanning system, the saturation profile along the core and the CT reconstructed images of core section during the displacing process were obtained; oil displacement mechanism was analyzed according to a new characterization parameter, “oil saturation frequency distribution”. The results show that the conglomerate has strong heterogeneity, resulting in “preferential channels”, and in turn ineffective water circulation and low water flooding oil recovery, moreover, the oil in high oil saturation area is produced first. In polymer flooding, the oil in high and medium oil saturation areas can be produced but the oil in low oil saturation areas still cannot be produced. Oil produced in the subsequent water flooding is still mainly from the high oil saturation areas. For conglomerate reservoirs, previous water flooding should reach as high water cut as possible so as to strengthen the slug effect of the polymer. Meanwhile the injection volume of polymer should be reduced, and a subsequent water flooding should be used to push the polymer slug to produce oil.

Key words: conglomerate; CT scanning; water flooding; polymer flooding; oil saturation; profile along the core; frequency distribution

0 引言

砾岩具有非均质性极强、孔隙结构复杂等特点, 水驱后往往存在大量剩余油, 主要表现为含水率高、产油少, 采用聚合物驱能有效提高采收率^[1-2]。但由于缺乏先进的技术手段, 水驱产量低及聚合物驱提高采

收率的机理尚不明确。以往研究中多采用岩心驱替实验, 采集驱替岩心两端的数据, 并计算宏观参数来描述驱油过程, 难以完整、深入地揭示真实的岩心驱油机理。

CT 扫描技术可弥补传统方法的缺点。它通过对岩石物性进行定量和图像分析, 直观表征岩石孔隙结构;

同时可得到驱油过程中岩心内部流体饱和度的分布信息,对驱替过程进行可视化研究,进而深入解释驱油机理^[3-5]。CT扫描技术在国外已成为岩心分析的常规测试技术^[6-8],该技术在国内外石油工业中也得到了应用^[9-11]。

本研究以新疆油田天然砾岩岩心为实验对象,利用CT技术研究砾岩岩心的双重孔隙介质结构特征及驱油机理;提出了基于CT扫描的驱油特征表征参数,利用此参数比较不同驱替方式(水驱、聚合物驱)的驱替特征,进而提出针对砾岩油藏的合理注采方法。

1 岩心CT扫描实验

1.1 实验装置

本实验采用中国石油勘探开发研究院石油采收率研究所研制的CT扫描岩心驱替系统。其中扫描系统采用美国GE公司的LIGHTSPEED 8层螺旋CT扫描仪,扫描电压120 kV,电流为130 mA,最小扫描层厚1.25 mm,分辨尺度0.18 mm。2组QUIZIX 5200泵作为注入系统,1组ISCO泵作为围压控制系统。自主研发的特殊岩心夹持器保证X射线能顺利穿过并减小射线硬化。该驱替系统可以对岩心驱替过程进行在线CT扫描,同时采集驱替过程中的进出口流量、压力。最后利用自主研发的CT扫描岩石图像分析软件(CCTAS 1.0)处理数据。

1.2 实验岩心及流体

实验岩心取自新疆油田天然砾岩,基本物性见表1。2块样品均具有很强的非均质性,为典型的双重孔隙介质岩心。

表1 岩心样品的基本物性参数

编号	长度/cm	直径/cm	孔隙体积/mL	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
LY-1	5.12	3.78	16.0	27.8	1 419
LY-2	7.78	3.74	17.1	20.1	379

1.3 实验过程

实验条件为室温(22 °C),围压5 MPa,无回压。具体过程如下:岩心烘干后置于夹持器中扫描,然后将岩心抽真空并饱和地层水,进行饱和水岩心扫描,计算岩心的孔隙度并统计其分布^[12],同时重建三维孔隙度分布;将岩心用模拟油造束缚水完毕后,用添加了5%碘代己烷(CT值增强剂)的脱气原油替换岩心中的模拟油;然后进行水驱油实验,LY-1、LY-2的注水速度均为0.05 mL/min,水驱至含水率分别为98%和90%左右,定时间间隔对每块实验岩心样品进行CT扫描(单次扫描需17 s),以获取油水饱和度的分布信息^[13-14];换用聚合物溶液驱替,LY-1和LY-2均驱替

0.7 PV后转水驱至含水98%以上,同样用CT扫描系统获取油水饱和度的分布信息,并比较不同注水、注聚合物方式对采出程度的影响。

2 双重孔隙介质孔隙结构分析

岩心LY-1和LY-2每个切片的CT值均呈双峰分布(见图1,以LY-1的2个切片为例),对应的岩心切片CT值分布重构图也表现出强非均质性(见图2)。

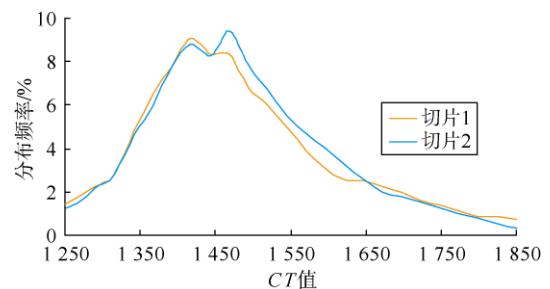


图1 岩心LY-1的2个切片CT值分布

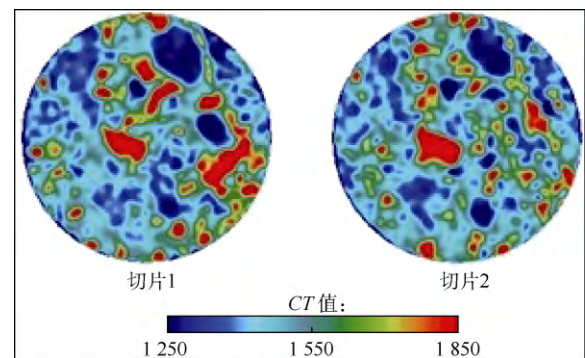


图2 岩心LY-1的2个切片CT值分布重构图

经计算可得岩心LY-1和LY-2的孔隙度频率分布(见图3)。可以看到2个岩心的孔隙度频率分布均呈双峰分布。用CCTAS软件对孔隙度数据进行三维重构,得到2块岩心的三维孔隙度分布示意图(见图4),由图可见很强的非均质性特征。

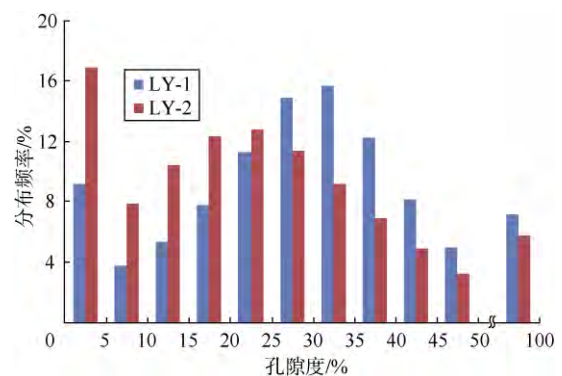


图3 岩心LY-1、LY-2孔隙度频率分布图

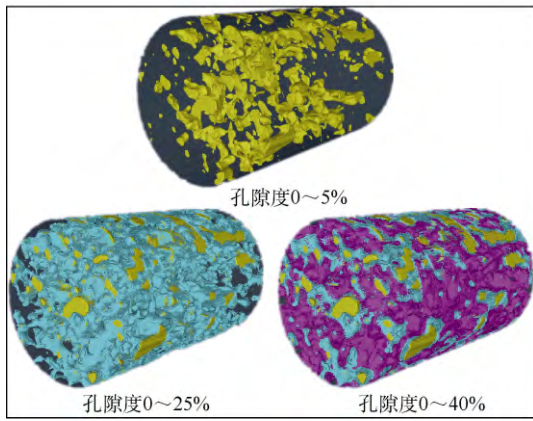


图4 岩心 LY-1 重构三维孔隙度示意图

砾岩主要由碎屑颗粒和填隙物构成，碎屑颗粒和填隙物在密度、孔隙结构上有很大差别，碎屑颗粒致密而填隙物疏松，加上碎屑颗粒和填隙物的胶结程度不同，构成了砾岩多模态、强非均质性的双重孔隙结构，使砾岩的 CT 值分布、孔隙度分布呈双峰特性。

3 岩心驱替实验及驱油机理

岩心 LY-2 的前期水驱、聚合物驱过程与 LY-1 类似，本研究以岩心 LY-1 为例加以说明。

3.1 驱替过程表征参数（含油饱和度频率分布）

利用 CT 扫描岩石图像分析软件（CCTAS1.0）可以得到驱替过程中某时刻的岩心含油饱和度频率分布图（见图 5）。该曲线能够清楚描述驱替过程中岩心内部含油饱和度分布情况，从而反映出驱替过程中岩心内部原油的动用情况。

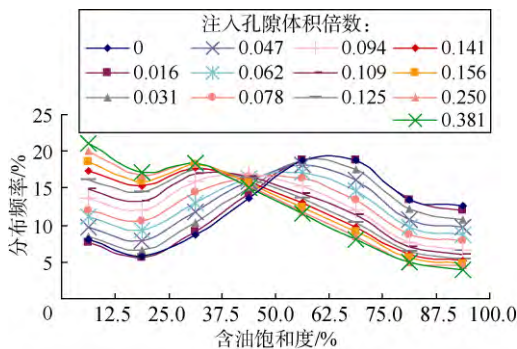


图5 含油饱和度频率分布曲线

3.2 水驱过程

岩心 LY-1 水驱过程含油饱和度减少量（初始含油饱和度减去驱替过程中某时刻含油饱和度）沿程分布见图 6。水驱过程水相突破很快，注水约 0.125 PV（40 min）时突破。水相突破后含油饱和度减少量沿程分布呈现整体上升的趋势。由 LY-1 水驱过程的岩心重构切

面（见图 7）可知：含油饱和度减少量沿程分布曲线出现整体上升是由于岩心非均质性极强，水驱突破后即形成了极强的“优势通道”，引起无效水循环；突破之后水驱仅驱出该“优势通道”的剩余油，而岩心其余区域的原油动用程度极低甚至并未被动用。

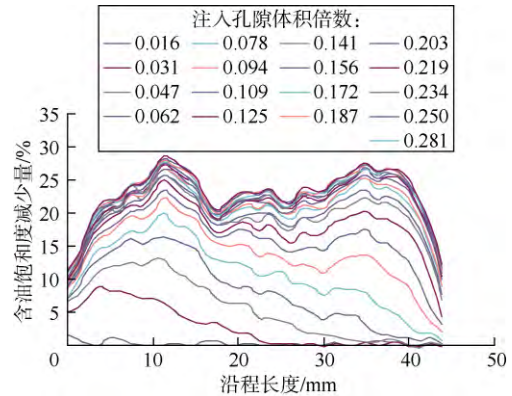


图6 岩心 LY-1 水驱过程含油饱和度减少量沿程分布曲线

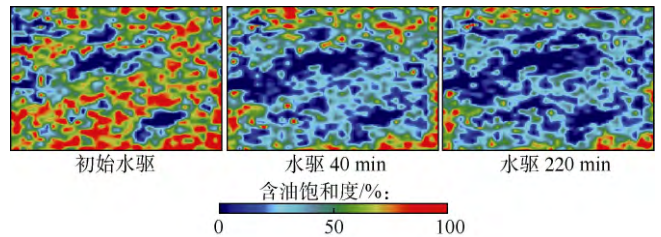


图7 岩心 LY-1 水驱过程岩心重构切面

LY-1 水驱过程含油饱和度的频率分布变化见图 5、图 8。水驱时，50%~100%区间的含油饱和度所占频率下降很快（见图 8），表明水驱时该区间的油首先被动用。0~25%区间的含油饱和度所占频率上升很快，一方面是因为该含油饱和度区间的油在水驱时难以动用，另一方面是因为岩心其他区域的水驱剩余油饱和度位于该区间。

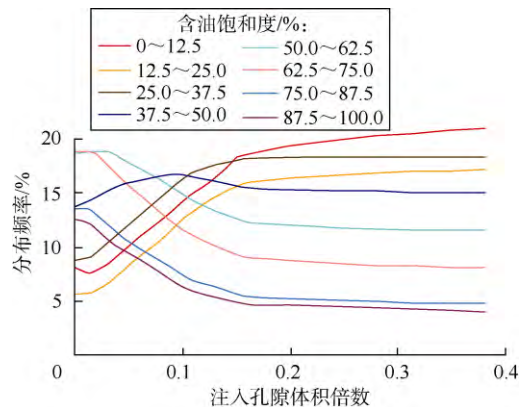


图8 LY-1 水驱过程含油饱和度频率分布曲线

3.3 聚合物驱过程

油相加入碘代己烷后,由于水相和聚合物的CT值差别很小,故计算含油饱和度时可将其忽略。观察岩心LY-1聚合物驱过程含油饱和度减少量沿程分布曲线(见图9):初期,含油饱和度减少量沿程分布曲线整体上升的趋势中断;后期曲线继续呈整体上升的趋势。结合聚合物驱过程岩心LY-1的重构切面,观察到聚合物起到了堵塞“优势通道”的作用,令前期水驱中基本未动用的油得到了动用(见图10中黄圈处)。同时,岩心中部仍然有大量孤岛状的剩余油(见图10中红圈处)未被动用。

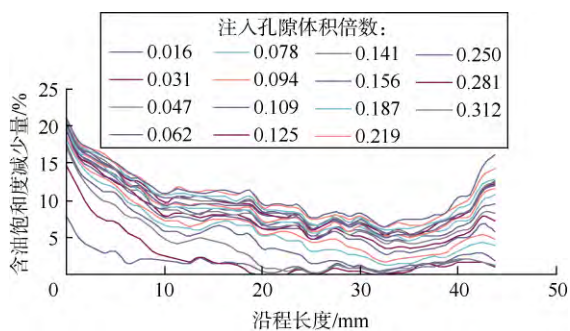


图9 LY-1 聚合物驱过程含油饱和度减少量沿程分布曲线

岩心LY-1 聚合物驱含油饱和度频率分布见图11。与前期水驱相比,曲线中部(37.5%~50.0%区间)的值在下降(见图11a),表明岩心中含油饱和度37.5%~

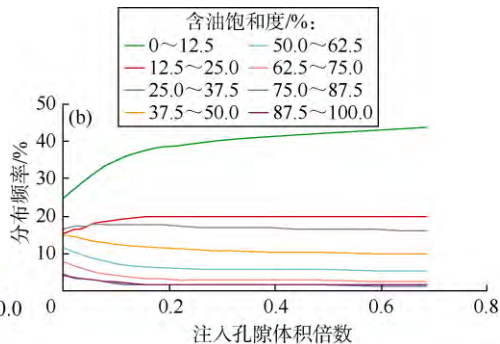
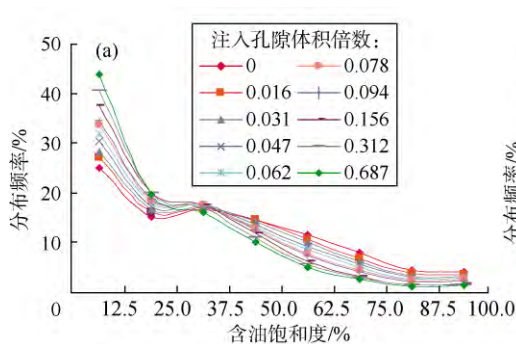


图11 岩心LY-1 聚合物驱过程含油饱和度频率分布曲线

3.4 后续水驱

岩心LY-1在后续水驱阶段基本未出油;而LY-2后续水驱的含油饱和度减少量沿程分布曲线随着注入孔隙体积倍数的增加仍然呈整体上升的趋势(见图12)。推测LY-2后续水驱只是在之前水驱及聚合物驱形成的通路中进行,没有开辟新通路。

由LY-2后续水驱含油饱和度频率分布曲线(见图13)可见:除了90%~100%区间的含油饱和度所占频率随注入孔隙体积倍数增加下降比较明显之外,其余

50.0%区间的油较水驱相比有较大动用。12.5%~37.5%区间的含油饱和度所占频率变化趋势趋于平缓(见图11b),同时考虑岩心其他区域的剩余油饱和度位于该区间造成的该区间饱和度所占频率增加,曲线趋于平缓表明该区间的油在聚合物驱时被动用。0~12.5%区间的含油饱和度所占频率仍保持持续上升趋势,一方面说明该含油饱和度区间的油难以被动用,另一方面说明其他岩心区域的聚合物驱剩余油饱和度位于该区间。

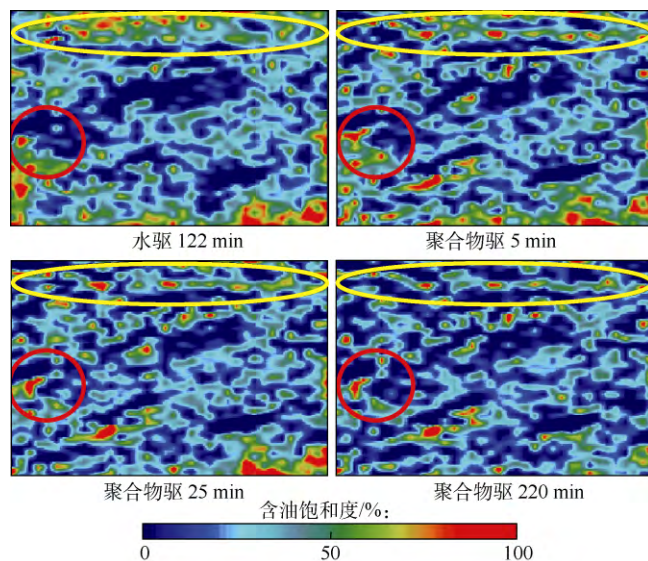


图10 岩心LY-1 聚合物驱过程重构切面

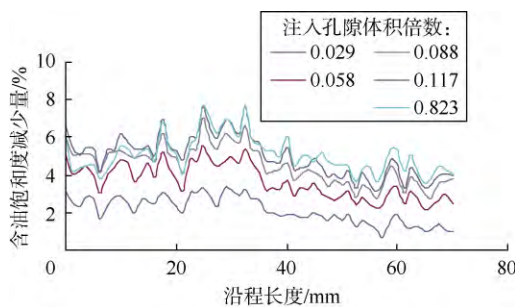


图12 LY-2 后续水驱含油饱和度减少量沿程分布曲线

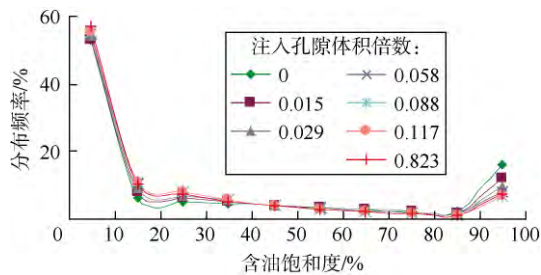


图 13 岩心 LY-2 后续水驱含油饱和度频率分布曲线

区间的含油饱和度所占频率变化很小。表明后续水驱主要动用的还是含油饱和度位于 90%~100% 区间的原油，即比较容易动用的原油，这在一定程度上也验证了之前“后续水驱仍在之前驱替形成的通道中进行，没有开辟新通路”的假设。

4 注入方式对采出程度的影响

岩心 LY-1、LY-2 水驱及聚合物驱采出程度见表 2。

表 2 不同驱替方式岩心采出程度

岩心 编号	采出程度/%			总采出程度/%
	前期水驱	聚合物驱	后续水驱	
LY-1	45.4	19.9	0	66.3
LY-2	35.0	15.6	10.3	60.9

岩心 LY-1 前期水驱至含水 98%。前期水驱和聚合物驱采出程度基本正常，而后续水驱基本未出油，这是由于岩心极强的非均质性导致后续水驱难以推动聚合物驱段塞，从而不产油。基于此，可考虑减小聚合物驱的注入孔隙体积倍数，因为聚合物驱后期的聚合物只是在推动前期的聚合物段塞以驱油，后续水驱也可起到此作用，且更加经济。

岩心 LY-2 前期水驱至含水 90%。其采出情况表现为：前期水驱和聚合物驱采出程度低下，而后续水驱仍有不少原油被采出。结合分析含油饱和度减少量分布曲线、重构切面、含油饱和度频率分布曲线，推测由于前期注水程度低导致采出程度低，同时也导致水驱后“优势通道”中残留了大量剩余油，使得聚合物难以形成有效的段塞，注聚合物阶段开辟的新通路较少、仍主要驱出“优势通道”中的剩余油。而后续水驱驱出的油也主要是“优势通道”和少量新开辟通路中的剩余油。

综上所述，针对强非均质性高渗砾岩油藏，前期水驱应该尽量达到最高含水率，以加强聚合物的段塞效果；同时，可以适当减少聚合物的注入量，后续水驱可以推动注聚合物时形成的聚合物段塞来驱油，使注入方式更高效更经济。

5 结论

强非均质性高渗砾岩水驱时会产生“优势通道”，水驱后期不再开辟新的通路，仅驱出“优势通道”的剩余油；聚合物驱后仍会有大量孤岛状的剩余油难以动用；后续水驱不能开辟新的驱替通道，只能继续驱出之前已形成通道中的剩余油。

砾岩水驱时首先动用高饱和度区间的油，中—低饱和度区间的油动用少；聚合物驱时高一中饱和度区间的油都能够动用，而低饱和度区间的油仍然难以动用；后续水驱时仍然主要动用高饱和度区间的油。

针对砾岩油藏，前期水驱应该尽量达到最高含水率，同时应减少聚合物的注入量，利用后续水驱推动聚合物段塞达到驱油的目的。

参考文献：

- [1] 李雄炎, 周金昱, 李洪奇, 等. 复杂岩性及多相流体智能识别方法[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 243-248.
Li Xiongyan, Zhou Jinyu, Li Hongqi, et al. Computational intelligent methods for predicting complex lithologies and multiphase fluids[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 243-248.
- [2] 冯慧洁, 聂小斌, 徐国勇, 等. 砾岩油藏聚合物驱微观机理研究[J]. 油田化学, 2007, 24(3): 232-237.
Feng Huijie, Nie Xiaobin, Xu Guoyong, et al. Microscopic mechanisms of oil displacement by polymer solution for conglomerate[J]. Oilfield Chemistry, 2007, 24(3): 232-237.
- [3] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 利用多尺度 CT 成像表征致密砂岩微观孔隙结构[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 329-333.
Bai Bin, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Multi-scale method of Nano(Micro)-CT study on microscopic pore structure of tight sandstone of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 329-333.
- [4] Lü Weifeng, Leng Zhenpeng, Liu Qingjie, et al. Measurement of oil recovery by GAGD in water-wet and oil-wet conditions[R]. Napa Valley: Society of Core Analysts, 2013.
- [5] 冷振鹏, 吕伟峰, 张祖波, 等. 基于 CT 扫描测定低渗岩心相对渗透率曲线的方法[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 118-121.
Leng Zhenpeng, Lü Weifeng, Zhang Zubo, et al. Methods of measuring relative permeability curves with low permeability core based on CT scanning[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 118-121.
- [6] Wang S Y, Huang Y B, Pereira V, et al. Application of computed tomography to oil recovery from porous media[J]. Applied Optics, 1985, 24(23): 4021-4027.
- [7] Withjack E M, Devier C, Michael G. The role of X-ray computed tomography in core analysis[R]. SPE 83467, 2003.
- [8] Christie P, Turberg P, Labiouse P, et al. An X-ray computed tomography-based index to characterize the quality of cataclastic carbonate rock samples[J]. Engineering Geology, 2011, 117(3/4): 180-188.
- [9] 吕伟峰, 刘庆杰, 张祖波, 等. 三相相对渗透率曲线实验测定[J].

- 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 713-718.
- Lü Weifeng, Liu Qingjie, Zhang Zubo, et al. Measurement of three-phase relative permeabilities[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 713-718.
- [10] Zhang Zubo, Zhang Guanliang, Lü Weifeng, et al. An experimental study of waterflooding from layered sandstone by CT scanning[R]. Napa Valley: Society of Core Analysts, 2013.
- [11] Lü Weifeng, Liu Qingjie, Zhang Zubo, et al. Measurement of three-phase relative permeabilities of various saturating histories and wettability conditions[R]. Aberdeen: Society of Core Analysts, 2012.
- [12] 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, 896.
- 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, 896.
- [13] 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 waterflooding mechanism in low-permeability cores using CT scan technology[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(2): 87-90.
- [14] 冷振鹏, 吕伟峰, 马德胜, 等. 利用CT技术研究重力稳定注气提高采收率机理[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 340-344.
- Leng Zhenpeng, Lü Weifeng, Ma Desheng, et al. Research of enhancing oil recovery mechanism of GAGD using CT scanning method[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 340-344.
- 第一作者简介: 邓世冠(1988-), 男, 福建龙岩人, 现为提高石油采收率国家重点实验室和中国科学院力学研究所联合培养硕士研究生, 主要从事岩土力学研究工作。地址: 北京市海淀区中关村东路80号, 邮政编码: 100190. E-mail: dengshiguan@foxmail.com
- 联系方式: 吕伟峰(1979-), 男, 辽宁大连人, 中国石油勘探开发研究院工程师, 主要从事油层物理与渗流力学研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院石油采收率研究所, 邮政编码: 100083. E-mail: lweifeng@petrochina.com.cn
- 收稿日期: 2013-10-31 修回日期: 2014-02-25
- (编辑 郭海莉 绘图 刘方方)

(上接第322页)

- [19] Shibaoka M, Saxby J D, Taylor G H. Hydrocarbon generation in Gippsland Basin, Australia: Comparison with Cooper Basin, Australia[J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(7): 1151-1158.
- [20] 周利敏, 张德会, 席斌斌. 岩石中的渗透率、流体流动及热液成矿作用[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 299-310.
- Zhou Limin, Zhang Dehui, Xi Binbin. Rock permeability, fluid flow and hydrothermal ore-forming processes[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 299-310.
- [21] Worden R H, Barclay S A. Internally-sourced quartz cement due to externally-derived CO₂ in sub-arkosic sandstones, North Sea[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69/70: 645-649.
- [22] Vasconcelos C, McKenzie J A, Warthmann R, et al. Calibration of the $\delta^{18}\text{O}$ paleothermometer for dolomite precipitated in microbial cultures and natural environments[J]. Geology, 2005, 33(4): 317-320.
- [23] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical Geology, 1999, 161(1/2/3): 59-88.
- [24] Wallmann K. The geological water cycle and the evolution of marine $\delta^{18}\text{O}$ values[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(15): 2469-2485.
- [25] Spötl C, Burns S J. Formation of ^{18}O -depleted dolomite within a marine evaporitic sequence, Triassic Reichenhall Formation, Austria[J]. Sedimentology, 1991, 38(6): 1041-1057.
- [26] 刘子琦, 李红春, 徐晓梅, 等. 贵州中西部洞穴水系与碳酸钙的稳定同位素意义[J]. 地质论评, 2007, 53(2): 233-241.
- Liu Ziqi, Li Hongchun, Xu Xiaomei, et al. Stable isotopes of water and carbonate samples from caves in central western Guizhou: Implications of paleoclimate and paleoenvironment[J]. Geological Review, 2007, 53(2): 233-241.
- [27] 胡作维, 黄思静, 李志明, 等. 川东北地区三叠系飞仙关组白云化流体温度[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(12): 1817-1829.
- Hu Zuowei, Huang Sijing, Li Zhiming, et al. Temperatures of dolomitizing fluids in the Feixianguan Formation from the Northeastern Sichuan Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 42(12): 1817-1829.
- [28] Allan J R, Wiggins W D. Dolomite reservoirs: Geochemical techniques for evaluating origin and distribution[M]. Tulsa: AAPG, 1993: 19-32.
- [29] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: A critical reappraisal[C]//Braithwaite C J R, Rizzi G, Darke G. The geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs. London: Geological Society of London, 2004: 7-63.
- [30] 周根陶, 郑永飞. 碳酸钙-水体系氧同位素分馏系数的低温实验研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 321-338.
- Zhou Gentao, Zheng Yongfei. Experimental studies of oxygen isotope fractionations between CaCO₃ and H₂O at low temperatures[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(2): 321-338.
- 第一作者简介: 杨平(1981-), 男, 成都地质矿产研究所工程师, 主要从事南海相碳酸盐岩石油地质研究。地址: 四川省成都市一环路北三段2号, 成都地质矿产研究所沉积与能源地质研究室, 邮政编码: 610082. E-mail: yping0@163.com
- 收稿日期: 2013-10-29 修回日期: 2014-03-28
- (编辑 林敏捷 绘图 刘方方)