

文章编号: 0253-2697(2009)01-0096-04

低渗透储层应力敏感性定量解释研究

王厉强¹ 刘慧卿¹ 甄思广² 刘小波³ 李景梅⁴ 宋勇⁴

(1. 中国石油大学石油天然气工程学院 北京 102249; 2. 中国石化胜利油田东胜公司 山东东营 257062;
3. 中国石化胜利油田东辛采油厂 山东东营 257026; 4. 中国石化胜利油田地质科学研究院 山东东营 257062)

摘要: 对致密及发育微裂缝、裂缝的低渗透岩心应力敏感性进行了实验;采用不等径迂曲毛管束模型,通过弹性力学原理对粗、细毛管变形量的计算,研究了单毛管和多孔介质应力敏感性定量表征关系,并通过有效毛管半径分数探讨了低渗透储层应力敏感性的作用机制。研究表明,低渗透储层的应力敏感性主要表现为渗透率的应力敏感性,低、中高渗透率储层在应力敏感性上的差异与微观孔隙结构、固液界面作用力和启动压力梯度效应等密切相关,且这种差异性集中体现为有效毛管半径分数的不同。考虑有效毛管半径分数的多孔介质应力敏感性量化模型可以从应力敏感性微观作用机制角度解释低渗透储层与中高渗透率储层在应力敏感性上的差异。

关键词: 低渗透储层;裂缝;应力敏感性;量化模型;毛管束模型;有效毛管半径
中图分类号: TE125.3 **文献标识码:** A

Quantitative research on stress sensitivity of low-permeability reservoir

WANG Liqiang¹ LIU Huiqing¹ ZHEN Siguang² LIU Xiaobo³ LI Jingmei⁴ SONG Yong⁴

(1. Faculty of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Dongsheng Company, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257062, China;
3. Dongxin Oil Production Plant, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257062, China;
4. Research Institute of Geological Science, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257062, China)

Abstract: The stress sensitivity of micro-fractured, fractured and dense cores from low-permeability reservoir was experimentally analyzed. The non-equivalent diameter and circuitous capillary module was used to express the stress sensitivity of single capillary and porous media by calculating elastic deformation amounts of big capillary and small one. The function mechanism on stress sensitivity of low-permeability reservoir was discussed by using the effective percentage of capillary diameter. The research results show that the stress sensitivity for permeability is more important than that for porosity in the low-permeability reservoir. The difference of stress sensitivity between low-permeability reservoir and medium-high permeability reservoir depends on some distinct factors such as microscopic pore structure, solid-fluid interfacial force and start-up pressure gradient, which can reflect the effective percentage of capillary diameter. The quantitative module of stress-sensitivity considering the effective percentage of capillary diameter can explain the difference of stress sensitivity between low-permeability and medium-high permeability reservoirs based on the microscopic mechanism.

Key words: low-permeability reservoir; fracture; stress sensitivity; quantitative module; capillary module; effective capillary diameter

在低渗透储层应力敏感性研究方面,学者通过大量的实验,研究了储层物性参数随应力的变化关系。但由于实验中所用岩心物性的差异及所采用研究手段的不同,导致研究结果的不同^[1-11]。有必要依据实验现象的总结,建立低渗透储层应力敏感性的定量解释模型,从而统一对低渗透储层应力敏感性的认识。

1 低渗透储层应力敏感性实验

实验样品取自胜利油田某低渗透储层,渗透率为 $(0.02\sim 0.59)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。为更好地观察储层物性参数随有效压力的变化规律,用复原率 R 代替常规分析中常用的损失率,即

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目(2007BAB17B05)资助。

作者简介: 王厉强,男,1974年8月生,2007年获成都理工大学油气田开发专业博士学位,现为中国石油大学(北京)博士后,主要从事油气田开发方面的研究工作。E-mail: qiangli_2004@126.com

$$R = y'/y_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: y' 为某一有效压力下的渗透率或孔隙度值; y_0 为初始有效压力下的渗透率或孔隙度值。

在对裂缝发育的东北 18 井的岩心渗透率加载和卸载时,对应于同一有效压力岩心渗透率的复原率差异很大^[4]。当有效压力逐渐减小到初始值时,裂缝不发育的义 3-7-7 井岩心渗透率为初始值的 83.3%,而东北 18 井岩心渗透率仅为初始值的 36.4%。6-3 号

和 7-1 号样品发育微裂缝,在加载及卸载状态下渗透率的变化规律类似于东北 18 井,且卸载时渗透率复原曲线呈走平趋势。除了初始有效压力外,复原率都在 45% 以下,6-3 号样品复原率甚至低于 20%;完全卸载时,渗透率复原率分别为 40% 和 60% [图 1(a)]。原因在于加载时随着有效压力的增大,微裂缝或裂缝大量闭合,且这种变形是不可逆的。因此,这种裂缝性低渗透储层渗透率敏感性很强。

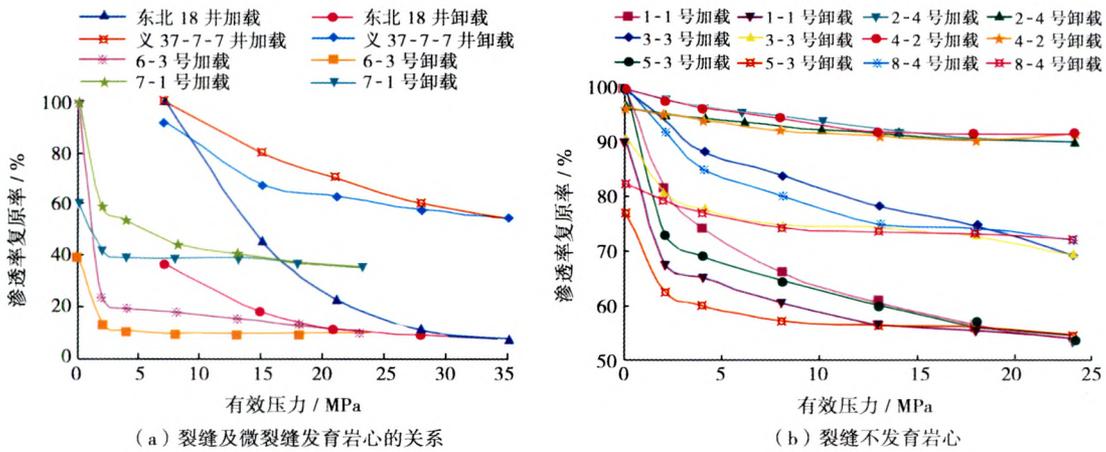


图 1 岩心渗透率复原率与有效压力的关系
Fig. 1 Relationship between recovery rate of core permeability and effective pressure

由图 1(b) 中所示的 6 块不发育天然裂缝或微裂缝岩心样品加载和卸载时渗透率复原率与有效压力的关系可以看出,虽然 6 块岩心渗透率的复原程度差别较大,但对应于同一有效压力(除初始压力外)下的岩心渗透率损失程度差异均小于 15%。当有效压力恢复为初始压力时,对于渗透率恢复程度最差的样品,其恢复程度都在初始值的 75% 以上。因此这种非裂缝性的低渗透储层虽然具有变形性,但对有效压力的敏感性低于裂缝性低渗透储层,高于中、高渗透岩心。

可以看出,样品孔隙度复原率都在 80% 以上,均值约为 90%。相对于有效压力对渗透率的影响,孔隙度的应力敏感性很小。

2 用于定量解释的新毛管束模型

目前,孔隙结构模型主要有 3 大类^[12]。对于本问题采用毛管束模型即可进行较为合理的解释,而不必采用较为复杂的网络模型。毛细管束模型有多种结构形式,平行毛管束模型在计算孔隙度与渗透率的关系方面有较大的优势。但由于低渗透储层孔隙空间及孔道蜿蜒曲折,该种模型并不适用。不等径迂曲毛管束模型克服了原有毛管束模型中流体渗流路径只能是直路径的缺陷,更适合于对孔隙结构复杂、渗流通路迂回曲折的低渗透储层的研究(图 3)。

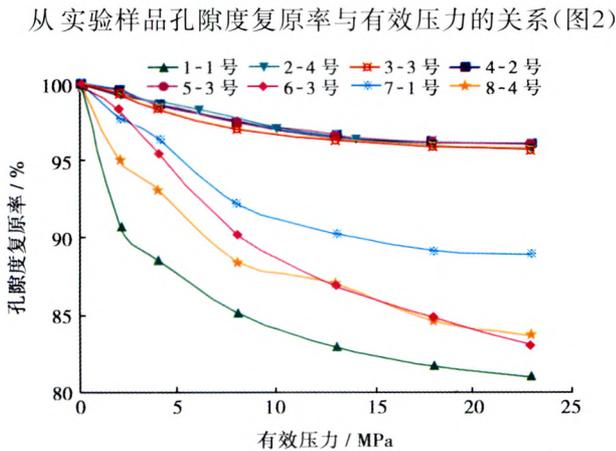


图 2 岩心孔隙度复原率与有效压力的关系
Fig. 2 Relationship between recovery rate of core porosity and effective pressure

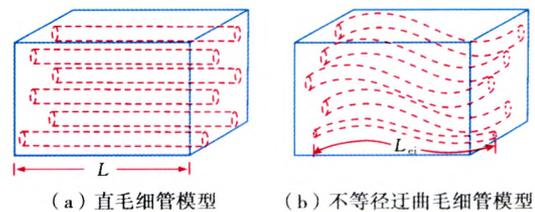


图 3 毛细管模型
Fig. 3 Models of capillary

3 低渗透储层应力敏感性的量化表征

3.1 单毛细管应力敏感性

当作用在岩心上的有效压力发生变化时,相当于作用在毛细管上的压力发生了变化,这必然引起毛细管大小发生相应的变化,从而改变毛细管的孔隙度和渗流能力。取多孔介质中2根毛细管进行分析,其中第1根为细毛细管,代表低渗透毛细管(图4)。毛细管内半径为 r_{a1} ,外半径为 r_{b1} ,内压力为 p_a ,外压力为 p_b 。第2根为粗毛细管,代表中、高渗透毛细管。其内半径为 r_{a2} ,外半径为 r_{b2} ,内压力为 p_a ,外压力为 p_b 。为研究方便,设毛细管为弹性介质,当毛细管内外应力发生变化时,将引起毛细管发生弹性变形。

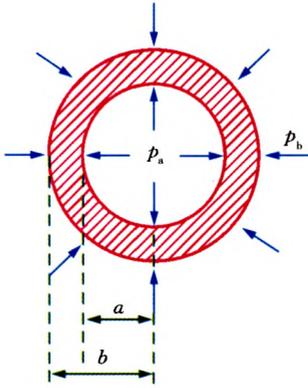


图4 单根毛细管受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of force for single capillary

根据弹性力学厚壁筒理论,毛细管应变与应力变化关系式为^[13]

$$S = \frac{1-\nu}{E} \cdot \frac{r_a^2 p_a - r_b^2 p_b}{r_b^2 - r_a^2} \cdot r - \frac{1+\nu}{E} \cdot \frac{r_a^2 r_b^2 (p_b - p_a)}{r_b^2 - r_a^2} \cdot \frac{1}{r} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量,MPa; ν 为泊松比。

发生应变后,低、中高渗透性毛细管变形后孔隙度的复原率分别为

$$\frac{\phi_1'}{\phi_1} = \left(1 - \frac{S_{a1}}{r_{a1}}\right)^3 / \left(1 - \frac{S_{b1}}{r_{b1}}\right)^3 \quad (3)$$

$$\frac{\phi_2'}{\phi_2} = \left(1 - \frac{S_{a2}}{r_{a2}}\right)^3 / \left(1 - \frac{S_{b2}}{r_{b2}}\right)^3 \quad (4)$$

式中: ϕ_1 和 ϕ_2 分别为低渗透和中高渗透毛细管变形后的孔隙度,%; ϕ_1' 和 ϕ_2' 分别为低渗透和中高渗透毛细管变形前的孔隙度,%; S_{a1} 、 S_{a2} 、 S_{b1} 和 S_{b2} 分别为低、中高渗透性毛细管内半径和外半径的应变,mm。

由不等径迂曲毛管束模型可知,介质变形前后渗

透率和孔隙半径之间的关系与中高渗透储层相同。发生应变后,低、中高渗透性毛细管变形后单根渗透率复原率为

$$\frac{K_1}{K_1'} = \frac{\phi_1 (r_{a1} - S_{a1})^2}{\phi_1' r_{a1}^2} = \left(1 - \frac{S_{a1}}{r_{a1}}\right)^5 \left(1 - \frac{S_{b1}}{r_{b1}}\right)^{-3} \quad (5)$$

$$\frac{K_2}{K_2'} = \frac{\phi_2 (r_{a2} - S_{a2})^2}{\phi_2' r_{a2}^2} = \left(1 - \frac{S_{a2}}{r_{a2}}\right)^5 \left(1 - \frac{S_{b2}}{r_{b2}}\right)^{-3} \quad (6)$$

式中: K_1' 和 K_2' 分别为低渗透和中高渗透毛细管初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_1 和 K_2 分别为低渗透和中高渗透毛细管弹性变形后的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.2 多孔介质应力敏感性

为了更接近实际岩心,考虑到介质中存在大量不等径的毛细管,设横截面积 A 上半径为 r_i 的毛细管个数为 N_i ($i=1,2,\dots,N$)。在低渗透率储层中,当孔隙半径小于某一临界值时,由于启动压力梯度等效应的影响,其中的流体会停止流动。当应力变化时,岩心中的一些毛细管的半径会发生变形而小于临界值,从而使流动性丧失,因此有效流动的毛细管总数为 M ,且 $M < N$ 。而中高渗透岩心中受此种影响较小,可以认为 $M \approx N$ 。

低、中高渗透率岩心变形后的孔隙度和渗透率的复原率为

$$\frac{\phi_{01}'}{\phi_{01}} = \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{S_{a1i}}{r_{a1i}}\right)^3 \left(1 - \frac{S_{b1i}}{r_{b1i}}\right)^{-3} \quad (7)$$

$$\frac{\phi_{02}'}{\phi_{02}} = \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{S_{a2i}}{r_{a2i}}\right)^3 \left(1 - \frac{S_{b2i}}{r_{b2i}}\right)^{-3} \quad (8)$$

$$\frac{K_{01}'}{K_{01}} = \left\{ \sum_{i=1}^N M_i (r_{a1i} - S_{a1i})^3 L t_i \left[\sum_{i=1}^N M_i (r_{b1i} - S_{b1i})^3 L t_i \right]^{-1} \right\} \cdot$$

$$\sum_{i=1}^N M_i (r_{a1i} - S_{a1i})^2 / \left[\sum_{i=1}^N N_i r_{a1i}^3 L t_i (N_i \pi r_{b1i}^3 L t_i)^{-1} \right] \sum_{i=1}^N N_i r_{a1i}^2 \quad (9)$$

$$\frac{K_{02}'}{K_{02}} = \left\{ \sum_{i=1}^N M_i (r_{a2i} - S_{a2i})^3 L t_i \left[\sum_{i=1}^N M_i (r_{b2i} - S_{b2i})^3 L t_i \right]^{-1} \right\} \cdot$$

$$\sum_{i=1}^N M_i (r_{a2i} - S_{a2i})^2 / \left[\sum_{i=1}^N N_i r_{a2i}^3 L t_i (N_i \pi r_{b2i}^3 L t_i)^{-1} \right] \sum_{i=1}^N N_i r_{a2i}^2 \quad (10)$$

式中: ϕ_{01} 和 ϕ_{02} 分别为低、高渗透率岩心初始孔隙度,%; ϕ_{01}' 和 ϕ_{02}' 分别为低、高渗透率岩心弹性变形后的孔隙度,%; K_{01} 和 K_{02} 分别为低、高渗透率岩心初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_{01}' 和 K_{02}' 分别为低、高渗透率岩心弹性变形后的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; t 为迂曲度。

由低、高渗透性毛细管内外半径应变关系可知,

式(7)与式(8)相等。因此低渗透岩心与中高渗透岩心相比,在发生弹性变形后,孔隙度的复原率是相同的。进一步推知,在以弹塑性变形为主的真实储层中,低、中高渗透层孔隙度复原率差异并不大,低渗透储层的孔隙度应力敏感性并不比中高渗透层更强。

$$\beta_r = \left(\sum_{i=1}^N M_i r_{a1i} \right) / \left(\sum_{i=1}^N N_i r_{a1i} \right)$$

为有效毛细管半径分数,其物理意义是在有效压力作用下参与有效渗流的毛细管半径之和与总毛细管半径之和的比值。因而式(9)变为

$$\frac{K'_{01}}{K_{01}} = \left(\beta_r - \frac{\bar{S}_{a1}}{\bar{r}_{a1}} \right)^5 / \left(1 - \frac{\bar{S}_{b1}}{\bar{r}_{b1}} \right)^3 \quad (11)$$

式中: \bar{S}_{a1} 和 \bar{S}_{b1} 分别为低渗透岩心发生弹性变形后有效流动毛细管内、外半径的平均应变量, m ; \bar{r}_{a1} 和 \bar{r}_{b1} 分别为低渗透岩心发生弹性变形前毛细管的平均内、外半径, m 。

由于中高渗透岩心有效流动毛细管总数 M 与总毛细管数 N 近似相等,因此 $\beta_r \approx 1$, 式(10)变为

$$\frac{K'_{02}}{K_{02}} = \left(1 - \frac{\bar{S}_{a2}}{\bar{r}_{a2}} \right)^5 / \left(1 - \frac{\bar{S}_{b2}}{\bar{r}_{b2}} \right)^3 \quad (12)$$

式中: \bar{S}_{a2} 和 \bar{S}_{b2} 分别为高渗透岩心发生弹性变形后毛细管内、外半径的平均应变量, m ; \bar{r}_{a2} 和 \bar{r}_{b2} 分别为高渗透岩心发生弹性变形前毛细管的平均内、外半径, m 。

由式(11)可以解释文献[1]—文献[11]产生的矛盾观点。在文献[8]中所取岩心初始渗透率最大值达到 $353 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 文献[11]所取岩心初始渗透率都大于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。从低渗透油气藏分类物性下限可知,上述文献所做实验都是针对常规储层的,因此有效毛管半径分数 $\beta_r \approx 1$, 必然会得到渗透率变化幅度与其初始值无关的结论。而文献[1]—文献[4]所取岩心初始渗透率范围为 $(0.02 \sim 34.3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于低渗透范畴。从渗流理论上讲,流体在低渗透多孔介质中流动时,均不同程度地存在启动压力梯度。由于孔道大小各不相同,其固液界面作用的大小不同,原油边界层的影响大小也不同,所以各种孔道有不同的启动压力梯度。根据流变学理论可知,毛细管半径越细,启动压力梯度越大。对于低渗透储层,当裂缝或微裂缝发生部分或完全闭合后,由于其孔隙系统基本上是由小孔道组成的。在所受应力增大的情况下,渗流孔道变小,启动压力梯度增大,最小的渗流孔道最先丧失渗流功能;随着所受应力不断增大,越来越多的小孔道丧失了渗流功能,有效毛细管半径分数不再趋于或等于1,而是远小于1,因此渗透率表现出很强的应力敏感性。

4 结 论

(1) 低渗透储层具有比中、高渗透储层更强的渗透率应力敏感性,特别是微裂缝、裂缝发育的低渗透储层的应力敏感性很强,而孔隙度的应力敏感性较弱。

(2) 依据不等径迂曲毛管束模型得到的单毛管管及多孔介质变形规律研究表明,低渗透储层孔隙度敏感性较弱,而渗透率敏感性强的原因与岩石变形后参与渗流的有效毛细管半径分数有很大关系。

参 考 文 献

- [1] 王秀娟,赵永胜,文武,等. 低渗透储层应力敏感性与产能物性下限[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 162-165.
Wang Xiujian, Zhao Yongsheng, Wen Wu, et al. Stress sensitivity and poroperm lower limit of deliverability in the low-permeability reservoir[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(3): 162-165.
- [2] 李闯,乔国安,陈昊. 低渗砂岩储层岩石应力敏感实验与理论研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(4): 91-93.
Li Min, Qiao Guo'an, Chen Hao. Experimental and theoretical study on rock stress-sensitivities in low permeability sandstone [J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(4): 91-93.
- [3] 罗瑞兰,程林松,彭建春,等. 油气储层渗透率应力敏感性与启动压力梯度的关系[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(3): 20-22.
Luo Ruilan, Cheng Linsong, Peng Jianchun, et al. The relationship between stress-sensitivity permeability and starting pressure gradient of reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(3): 20-22.
- [4] 马收,杨其彬,隋文,等. 低渗透裂缝性储层应力敏感性评价[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(5): 88-90.
Ma Shou, Yang Qibin, Sui Wen, et al. Evaluation on stress sensitivity of the low-permeability fractured reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(5): 88-90.
- [5] 阮敏,王连刚. 低渗透油田开发与压敏效应[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 73-76.
Ruan Min, Wang Liangang. Low-permeability oilfield development and pressure-sensitive effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 73-76.
- [6] 蒋海军,鄢捷年,李荣. 裂缝性储层应力敏感性实验研究[J]. 石油钻探技术, 2000, 28(6): 32-33.
Jiang Haijun, Yan Jienian, Li Rong. Experimental study on stress-sensitivity of fracturing formations [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000, 28(6): 32-33.
- [7] Ali H S, Al-Marhoun M A, Abu-Khamsin S A, et al. The effect of overburden pressure on relative permeability[R]. SPE 15730, 1987.
- [8] 张新红,秦积舜. 低渗岩心物性参数与应力关系的试验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2001, 25(4): 56-57.
Zhang Xinhong, Qin Jishun. Relation of ground stress with the properties of low permeability core[J]. Journal of the University of Petroleum, China; Edition of Natural Science, 2001, 25(4): 56-57.

(上接第 99 页)

- [9] 李传亮,孔祥言,徐献芝,等. 多孔介质的双重有效应力[J]. 自然杂志,1999,21(5):288-292.
Li Chuanliang, Kong Xiangyan, Xu Xianzhi, et al. Double effective stresses of porous media [J]. Nature Magazine, 1999, 21 (5): 288-292.
- [10] 李培超,孔祥言,李传亮,等. 地下各种压力之间关系式的修正[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1551-1553.
Li Peichao, Kong Xiangyan, Li Chuanliang, et al. Correction of relationship among various underground pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1551-1553.
- [11] 吴凡,孙黎娟,何江. 孔隙度、渗透率与净覆压的规律研究和应用[J]. 西南石油学院学报,1999,21(4):23-25.
Wu Fan, Sun Lijuan, He Jiang. The research and application of permeability, porosity and net overburden pressure laws[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1999, 21(4): 23-25.
- [12] 于忠良,熊伟,高树生,等. 致密储层应力敏感性及其对油田开发的影响[J]. 石油学报,2007,28(4):95-98.
Yu Zhongliang, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. Stress sensitivity of tight reservoir and its influence on oilfield development [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 95-98.
- [13] 郝明强,刘先贵,胡永乐,等. 微裂缝性特低渗透油藏储层特征研究[J]. 石油学报,2007,28(5):93-98.
Hao Mingqiang, Liu Xiangui, Hu Yongle, et al. Reservoir characteristics of micro-fractured ultra-low permeability reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 93-98.

(收稿日期 2008-01-07 改回日期 2008-03-27 编辑 黄小娟)