

长庆超低渗砂岩储层可动流体实验

杨平¹, 郭和坤², 姜鹏¹, 张硕³

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
3. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

摘要 评价超低渗砂岩储层渗流能力及开发潜力时, 可动流体及其赋存特征是重要参考因素之一。利用核磁共振测试实验及离心实验, 对长庆油田的6块超低渗砂岩储层岩样进行离心标定, 定量分析了不同尺寸喉道控制的可流动孔隙空间大小, 结果表明, 对于长庆超低渗储层砂岩, 以往低渗储层砂岩离心法所用的经验值 1.38MPa 已不再适用, 最佳离心力应为 2.07MPa; 有效喉道半径下限为 0.07 μm , T_2 截止值为 12.47ms。将实验结果与长庆油田的另外3块特低渗砂岩、6块致密砂岩岩样的实验结果进行对比, 结果表明, 长庆超低渗砂岩岩样大喉道控制的可动流体百分数小于长庆特低渗砂岩岩样, 而大于长庆致密砂岩岩样。

关键词 超低渗砂岩; 可动流体; 核磁共振; 离心实验

中图分类号 TE345

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)16-0048-04

Experimental Study of the Movable Fluid of Super-low Permeability Sandstone Reservoirs in Changqing

YANG Ping¹, GUO Hekun², JIANG Peng¹, ZHANG Shuo³

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Branch of Research Institute of Petroleum Exploitation, China National Petroleum Corporation, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract For the evaluation of the seepage capacity and the development potential of super-low permeability sandstone reservoirs, the percentage of the movable fluid and its distribution are key factors to be considered. To obtain the percentage of the movable fluid, one has to determine T_2 cutoff value $T_{2\text{cutoff}}$ accurately. With Nuclear Magnetic Resonance (NMR) technology, centrifuged laboratory experiments were carried out for the centrifugal calibration with 6 samples from super-low permeability sandstone reservoirs of Changqing, together with quantitative calculations of the movable pore space controlled by various throats with different sizes in these samples. The experiment results of these 6 samples are compared with those of 3 ultra-low permeability ones and 6 tight ones also from Changqing. The following conclusions are drawn. For the sandstones of super-low permeability reservoirs in Changqing, the empirical value of 1.38MPa for centrifuging sandstones of low permeability reservoirs is no longer applicable. The optimal centrifugal force is 2.07MPa, which is used to estimate the lower limit of the effective throat radius, which is 0.07 μm . The $T_{2\text{cutoff}}$ of super-low permeability sandstones in Changqing is suggested to be 12.47ms. The percentage of the movable fluid controlled by large throats in super-low permeability sandstone samples from Changqing is less than that in ultra-low permeability ones from Changqing and more than that in tight ones also from Changqing.

Keywords super-low permeability sandstone; movable fluid; nuclear magnetic resonance; centrifugal force

收稿日期: 2010-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(10672187)

作者简介: 杨平, 硕士研究生, 研究方向为低渗透油气藏开发, 电子信箱: yangping19860212@163.com; 郭和坤(通信作者), 高级工程师, 研究方向为核磁共振技术在油气田开发中的应用, 电子信箱: nmrgkh@sina.com

0 引言

中国低渗透油气藏已探明储量占已探明油气藏总储量 50% 以上, 并且在今后相当长一段时期内, 超低渗储层 (渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 将是中国石油工业增储上产的重要资源基础^[1-2]。2001 年, 王为民等^[3]对大量的低、特低渗储层 (渗透率为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 开发潜力进行了评价研究, 提出不同于中、高渗透油田的低渗透油田开发潜力评价方法, 即除考虑储层厚度、连续性、分布稳定性、孔隙度、渗透率等评价标准以外, 还应考虑可动流体因素, 但他仅分析了可动流体百分数与孔隙度、渗透率的关系。2007 年, 杨正明等^[4]针对特低渗透油藏, 分析了可动流体百分数与渗透率、驱油效率的关系, 提出可动流体百分数是一个比孔隙度和渗透率更能表征储层渗透率的参数。对于超低渗储层, 可动流体的研究相对较少。2007 年, 杨秋莲等^[5]建立了“四元分类标准”, 将可动流体百分数作为 4 个超低渗储层分类评价参数之一, 但其研究仅涉及可动流体百分数的大小。对于特低、超低渗储层, 前人研究未涉及可动流体 T_2 截止值的求取, 也未定量给出不同尺寸喉道控制的可流动孔隙空间大小。

本文以长庆超低渗储层砂岩岩样为对象, 利用核磁共振技术对其进行可动流体定量研究, 并与长庆特低渗、致密砂岩储层进行对比。

1 核磁共振可动流体测试原理

当含油 (或水) 样品处于均匀静磁场中时, 流体中所含的氢核 ^1H 就会被磁场极化, 宏观上表现出一个磁化矢量。此时如果对样品施加一定频率 (拉莫频率) 的射频场就会产生核磁共振。撤掉射频场后, 可接收到一个幅度随时间以指数函数衰减的信号, 可用纵向弛豫时间 T_1 和横向弛豫时间 T_2 描述该信号的衰减程度。在岩石核磁共振测量中多采用 T_2 测量法^[3]。在岩石孔隙中, 流体的弛豫时间 T_2 为

$$(1/T_2)_{\text{total}} = (1/T_2)_s + (1/T_2)_B + (1/T_2)_D \quad (1)$$

其中, $(1/T_2)_s$ 为岩石颗粒表面的弛豫贡献, $(1/T_2)_B$ 为流体本身的弛豫贡献, $(1/T_2)_D$ 为分子扩散的弛豫贡献。在石油工业核磁共振研究和应用中, 体弛豫 $(1/T_2)_B$ 和扩散弛豫 $(1/T_2)_D$ 通常可以忽略, 流体的 T_2 弛豫时间主要取决于岩石的表面弛豫。岩石表面弛豫与岩石比表面 (孔隙表面积 S 与孔隙体积 V

之比) 有关, 岩石比表面越大, 弛豫越强, T_2 弛豫时间越小。岩石表面弛豫为

$$\left(\frac{1}{T_2}\right)_s = \rho_2 \left(\frac{S}{V}\right)_{\text{pore}} \quad (2)$$

其中, ρ_2 为弛豫率, $\mu\text{m}/\text{ms}$; $S/V = F_s/r$, F_s 为孔隙形状因子, 其大小与孔隙模型有关; r 为孔隙半径, μm 。式 (2) 可简化为

$$(T_2)_s = \frac{r}{\rho_2 F_s} \quad (3)$$

对于一块岩样, 弛豫率 ρ_2 、孔隙形状因子 F_s 可近似看作常数, 因此由式 (3) 可知, T_2 谱能够反映岩石孔隙半径的分布情况, 较大孔隙对应的 T_2 弛豫时间较长, 较小孔隙对应的 T_2 弛豫时间较短。孔隙半径减小, 渗流阻力增大, 当孔隙半径减小到一定程度时, 孔隙中的流体受到较大渗流阻力, 难以流动。在 T_2 谱上, 该孔隙半径对应的 T_2 弛豫时间界限称为可动流体 T_2 截止值, 该值将赋存在岩石孔隙中的流体分为可动流体和束缚流体, 可动流体百分数即为可动流体占总赋存流体的比值, 反映了岩石孔隙中可动流体的含量^[6]。

2 核磁共振可动流体测试步骤

2.1 实验仪器与材料

使用 PC-1 与 PC-18 型专用岩样离心机以及中国科学院渗流流体力学研究所自行开发研制的中国首台低磁场核磁共振岩心分析仪, 对长庆的 15 块岩样进行可动流体 T_2 截止值标定及可动流体百分数测试。

2.2 实验步骤

1) 钻取直径 2.5cm 的柱塞岩样, 并将其洗油, 烘干, 称干重, 测量长度和直径; 测量岩样的气测渗透率; 将岩样抽真空 12h 以上, 加压 12MPa 饱和模拟地层水, 称重, 计算孔隙度。15 块实验岩样物性资料如表 1 所示。

2) 将岩样置于低磁场核磁共振岩心分析仪的探头中, 进行核磁共振 T_2 测试, 并反演计算出 T_2 弛豫时间谱。主要测试参数为: 回波时间 300 μs , 等待时间 3000ms, 回波个数 1024, 扫描次数 64, 增益 50。

3) 用 0.138、0.276、0.689、1.38、2.07、2.76MPa 离心力对 15 块岩样分别进行高速离心, 对离心后的岩样进行核磁共振 T_2 测试, 测量参数与步骤 2) 中的参数相同。

表 1 岩样物性资料

Table 1 Statistics of conventional core data from 15 samples

储层类型	样品数	孔隙度/%	平均孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	平均渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
特低渗砂岩	3	13.28~15.11	14.26	1.28~4.52	2.71
超低渗砂岩	6	8.74~11.20	9.89	0.13~0.71	0.34
致密砂岩	6	7.28~11.88	10.05	0.010~0.063	0.041

3 实验结果与讨论

3.1 核磁共振截止值标定

要准确测定可动流体, T_2 截止值的确定至关重要。本研究采用对饱和水岩样高速离心的方法标定 T_2 截止值。为了确定最佳离心力, 使用 0.138、0.276、0.689、1.38、2.07、2.76MPa 离心力对 3 类储层 15 块岩样进行高速离心, 并对离心后的岩样进行了核磁共振 T_2 测试, 反演得到岩样的 T_2 弛豫时间谱。图 1 为渗透率 $0.37 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度 9.21% 的超低渗砂岩岩样不同状态下的横向弛豫时间谱。

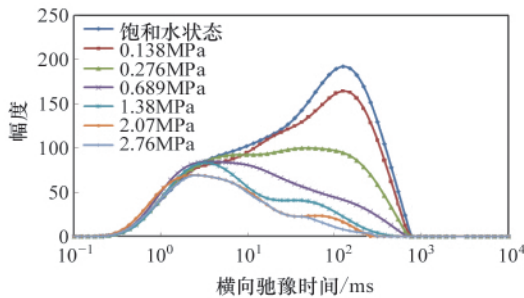


图 1 超低渗岩样不同离心力离心后的横向弛豫时间谱
Fig. 1 T_2 spectrum of a super-low permeability sample under different centrifugal forces

根据 T_2 弛豫时间谱可以得到不同离心力下岩样内剩余含水饱和度的变化。当离心力逐渐增大时, 若岩样内含水饱和度的减少量在 3% 以内, 则可认为增大前的离心力为最佳离心力。以离心力从 1.38MPa 增大至 2.07MPa、从 2.07MPa 增大至 2.76MPa 两变化为例, 3 类储层岩样内含水饱和度的减少量如表 2 所示。可以看出, 长庆超低渗砂岩岩样最佳离心力是 2.07MPa。

利用离心前饱和状态下的 T_2 谱和最佳离心力离心后束缚水状态下的 T_2 谱, 确定 6 块超低渗岩样的 T_2 截止值为 4.64~20.02ms, 平均 12.47ms。若离心力大小选用岩样核磁共振参数测量规范^[7]推荐的 0.689MPa, 则得 6 块岩样 T_2 截止值为 11.57~59.94ms, 平均 36.51ms。若离心力选用李海波^[8]推荐的 1.38MPa, 则得 6 块岩样 T_2 截止值为 6.13~32.05ms, 平均 18.30ms。

3 块特低渗岩样 T_2 截止值为 3.86~20.04ms, 平均 9.50ms (离心力取 2.07MPa); 6 块致密岩样 T_2 截止值为 5.57~11.57ms, 平均 8.81ms (离心力取 2.76MPa)。

3.2 可动流体测试结果分析

根据饱和状态 T_2 弛豫时间谱和测得的可动流体 T_2 截止值, 计算各实验岩样的可动流体百分数。由 15 块岩样饱和状态 T_2 谱 (图 2 为 6 块具有代表性的岩样饱和状态 T_2 谱) 与第

表 2 3 类储层最佳离心力统计

Table 2 Statistics of optimal centrifugal force for three kinds of reservoirs

储层类型	样品数	施加 1.38~2.07MPa 离心力		施加 2.07~2.76MPa 离心力		最佳离心力/MPa
		含水饱和度减少量/%	平均减少量/%	含水饱和度减少量/%	平均减少量/%	
特低渗砂岩	3	3.06~6.86	4.74	2.24~3.59	2.81	1.38~2.07
超低渗砂岩	6	5.27~11.76	7.85	1.1~4.88	2.88	2.07
致密砂岩	6	6.23~15.75	12.45	5.96~11.65	7.86	≥ 2.76

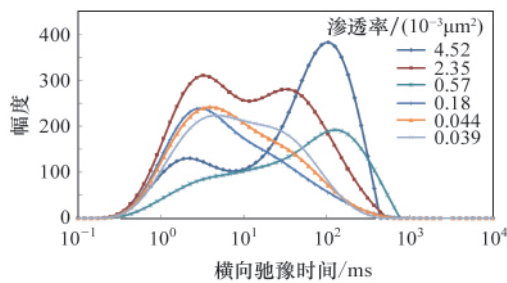


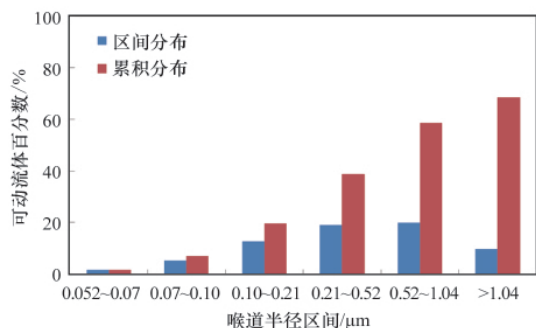
图 2 6 块代表性岩样饱和状态横向弛豫时间谱
Fig. 2 T_2 spectrum of saturation state of 6 representative samples

3.1 节中所求得的 T_2 截止值可得, 6 块超低渗岩样可动流体百分数为 41.03%~68.47%, 平均 56.87%; 3 块特低渗岩样可动流体百分数为 63.82%~65.93%, 平均 64.97%; 6 块致密岩样可动流体百分数为 19.94%~49.01%, 平均 37.87%。表明长庆低

渗砂岩储层可动流体含量普遍较高, 相对文献[4]所得吉林、大庆超低渗储层可动流体含量较高。

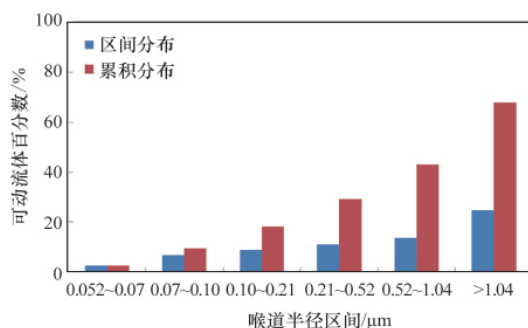
图 3 给出了 3 组岩样中具有代表性岩样不同尺寸喉道控制的可动流体含量。对于气-水系统, 两相界面张力 $\sigma=0.72 \times 10^{-3} \text{N/cm}$, 接触角 $\theta=0$, 由毛管压力公式 $p_c=2\sigma \cos\theta/r$ 得不同离心力下对应的岩样喉道半径 r 值。图中所示喉道半径 0.052、0.07、0.1、0.21、0.52、1.04 μm 分别为 0.138、0.276、0.689、1.38、2.07、2.76MPa 离心力所对应的喉道半径。超低渗岩样的最佳离心力为 2.07MPa, 该储层的可动流体是指 $r>0.07\mu\text{m}$ 的喉道所控制孔隙空间中的流体。

从图 3 可知, 对于超低、特低、致密砂岩岩样, 不同尺寸喉道控制的可流动孔隙体积明显不同。尽管超低渗岩样与特低渗岩样可动流体百分数相近, 约为 70%, 但超低渗岩样大喉道控制的可动流体含量明显少于特低渗岩样; 特低渗岩样 $r>1.04\mu\text{m}$ 的喉道控制的可动流体含量约为 25%, 而超低渗岩样



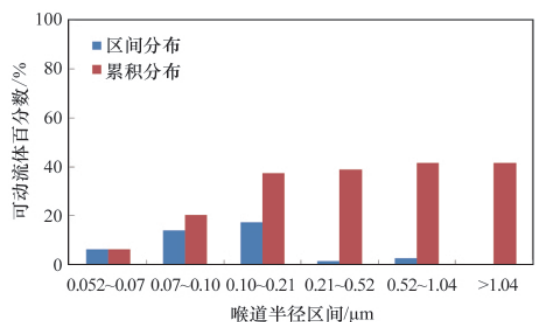
(a) 超低渗岩样 (孔隙度 9.21%, 渗透率 $0.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

(a) Super-low permeability sample (porosity 9.21%, permeability $0.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)



(b) 特低渗岩样 (孔隙度 15.11%, 渗透率 $2.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

(b) Ultra-low permeability sample (porosity 15.11%, permeability $2.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)



(c) 致密岩样 (孔隙度 10.94%, 渗透率 $0.039 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

(c) Tight sample (porosity 10.94%, permeability $0.039 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)

图 3 不同尺寸喉道控制的 movable 流体分布

Fig. 3 Distribution of movable fluid controlled by throat with different sizes

仅约 10%。因此,仅用可动流体百分数不足以判断储层开发的难易程度,还应综合考虑可动流体分布情况。至于致密砂岩岩样,可动流体百分数小,可动流体几乎全被 $r < 0.21 \mu\text{m}$ 的小喉道所控制,其大喉道控制的可动流体很少,大大增加了储层开发的难度。

4 结论

1) 通过核磁共振和离心实验,测得长庆超低渗砂岩储层

最佳离心力为 2.07MPa,进而得到 T_2 截止值为 4.64~20.02ms,平均 12.47ms。建议在进行核磁共振测井确定可动流体时,采用 12.47ms 作为长庆超低渗砂岩储层的 T_2 截止值。

2) 长庆超低渗砂岩岩样可动流体百分数为 41.03%~68.47%,平均 56.87%。长庆超低渗砂岩储层可动流体含量较吉林、大庆超低渗储层高,说明长庆超低渗砂岩储层具有一定的开发潜力。

3) 长庆超低、特低、致密砂岩岩样,其不同尺寸喉道控制的可流动孔隙体积明显不同。虽然超低渗、特低渗岩样可动流体百分数相差不大,平均差约 8%,但超低渗岩样大喉道控制的可动流体明显少于特低渗岩样。因此,仅凭可动流体百分数不足以判断储层开发的难易程度,应综合考虑可动流体分布情况。

参考文献 (References)

- [1] 郝明强, 李树铁, 杨正明, 等. 可动流体相对体积对低渗透油藏开发效果的影响[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(3): 335-337.
Hao Mingqiang, Li Shutie, Yang Zhengming, et al. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(3): 335-337.
- [2] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
Huang Yanzhang. The porous flow mechanism of low-permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [3] 王为民, 郭和坤, 叶朝辉. 利用核磁共振可动流体评价低渗透油田开发潜力[J]. 石油学报, 2001, 22(6): 40-44.
Wang Weimin, Guo Hekun, Ye Chaohui. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6): 40-44.
- [4] 杨正明, 苗盛, 刘先贵. 特低渗透油藏可动流体百分数参数及其应用[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(2): 96-99.
Yang Zhengming, Miao Sheng, Liu Xiangui. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007, 22(2): 96-99.
- [5] 杨秋莲, 李爱琴, 孙燕妮, 等. 超低渗储层分类方法探讨 [J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 51-55.
Yang Qiulian, Li Aiqin, Sun Yanni, et al. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 51-55.
- [6] 李治硕, 杨正明, 刘学伟, 等. 特低渗透砂砾岩储层核磁共振可动流体参数分析[J]. 科技导报, 2010, 28(7): 88-90.
Li Zhishuo, Yang Zhengming, Liu Xuewei, et al. Science & Technology Review, 2010, 28(7): 88-90.
- [7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. SY/T6490—2007 岩样核磁共振参数实验室测量规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
National Development and Reform Commission. SY/T 6490—2007 specification for normalization measurement of core NMR parameter in laboratory[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [8] 李海波. 岩心核磁共振可动流体 T_2 截止值实验研究[D]. 廊坊: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2008.
Li Haibo. Core experimental study of NMR T_2 cutoff value [D]. Langfang: Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.

(责任编辑 刘志远)