

火山岩束缚水饱和度核磁共振测量方法

周宇¹, 郭和坤², 魏国齐², 李海波²

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

摘要 束缚水饱和度是油气储层计算储量、分析产出流体类型的关键参数。火山岩储层具有岩性多样、孔隙结构复杂、非均质性强等特点, 必须通过对全直径岩心进行分析, 才能获得比较准确的束缚水饱和度。常规方法分析全直径岩心束缚水饱和度, 存在测试周期长、样本难以获取以及可能产生黏性指进等问题。采用核磁共振技术结合离心实验技术, 用小岩心测量得到的可动流体 T_2 截止值标定全直径岩心 T_2 谱, 进而得到全直径岩心束缚水饱和度的实验新方法, 解决了常规方法测试存在的问题。对比核磁共振方法与驱替实验所得全直径岩心束缚水饱和度, 结果表明, 对均质性较好、不含裂缝或微裂缝的火山岩岩心, 核磁共振方法与驱替实验测量得到的结果吻合较好; 对含有裂缝或微裂缝的火山岩岩心, 核磁共振方法由于避免了指进现象, 测得的束缚水饱和度不受裂缝、微裂缝的影响。

关键词 束缚水饱和度; 火山岩; T_2 截止值; 核磁共振; 离心实验

中图分类号 TE135

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.05.002

Irreducible Water Saturation Measurement of Volcanic Rocks Using Nuclear Magnetic Resonance

ZHOU Yu¹, GUO Hekun², WEI Guoqi², LI Haibo²

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploitation and Development, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract Irreducible water saturation is one of the fundamental parameters for characterizing reservoir formations, and the key factor for determining reserve calculation and fluid type identification. CT analysis on 125 whole cores shows that volcanic rocks have the complex porous structure and possess strong heterogeneity. As a result, accurate S_{wi} can be only measured on whole cores. A new testing method for whole cores is proposed by combining Nuclear Magnetic Resonance (NMR) with centrifugal tests. Using T_2 spectrum of whole core demarcated by a T_2 cutoff, this new method measures irreducible water saturation. The T_2 cutoff is measured on 25mm or 38mm diameter core samples which drilled from the whole core. Experiments on 52 volcanic rocks show that although the measured T_2 cutoff values vary greatly among different volcanic rock types, but there is little difference between the values in the same group of volcanic rocks sub-classified by lithology. And NMR method can provide reliable measurements when it is applied to S_w measurement of volcanic rocks if the T_2 cutoff is measured on cores from the same group sub-classified by lithology. The new method overcomes the problems involving size and shape restricts, long test cycles, and viscous fingering defects of conventional methods. Comparing with conventional method, the results of the new method well coincide with the experimental results on homogeneous rocks, and are more accurate with fractured samples.

Keywords irreducible water saturation; volcanic rock; T_2 cutoff; NMR; centrifugal tests

0 引言

近年来, 国内外均发现了大批具有一定储量和产量, 以

火山岩为主要储层的油气田^[1]。在中国松辽盆地北部^[2]和新疆三南—滴水泉地区^[3]均发现了集物性较好的大段火山岩储

收稿日期: 2010-12-03; 修回日期: 2011-01-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973计划)项目(2007CB209500); 国家自然科学基金项目(10672187)

作者简介: 周宇, 博士研究生, 研究方向为油气层物理实验、油气田开发与计算机应用技术, 电子信箱: zhouyu@live.com; 郭和坤(通信作者), 高级工程师, 研究方向为油气层物理实验、油气田开发技术, 电子信箱: nmrgkh@petrochina.com

层,具有良好的勘探开发前景。为了进行储层油气评价、储量计算和产能预测,需要对束缚水饱和度这一关键参数进行研究^[4]。密闭取心^[5]新鲜岩样分析方法能够精确测得束缚水饱和度,但是密闭取心成本高、取心井数量少,所以通常用干岩心来模拟束缚水的形成,并将岩心驱替或离心实验所测得的最低含水饱和度定义为束缚水饱和度^[6]。

火山岩储层通常不同程度的发育有裂缝、微裂缝以及气孔溶洞,具有岩性多样、非均质性强等特征,因此必须通过对全直径岩心进行分析,才能够获得比较准确的束缚水饱和度,然而常规方法分析全直径岩心束缚水饱和度有很大局限性^[7]。驱替实验测量岩心束缚水饱和度效率低,且只能够对规则岩心进行测量。对于亲水地层,驱替实验过程中会产生指进现象^[8-9],从而导致即使启动压力低于驱替压力,也无法将一些小孔隙中的水驱出,进而使得测量得到的束缚水饱和度偏高,对于含有裂缝的非均质性强的地层,这种现象尤其明显。离心实验测量速度快,且离心力会均匀的作用在每个孔隙上,不受裂缝的影响,测得的束缚水饱和度通常略低于驱替实验,但是由于全直径岩心的尺寸太大,离心实验不能够直接应用于全直径岩心的束缚水饱和度测量。因此有必要找到一种能够准确分析该类岩心束缚水饱和度的新方法。

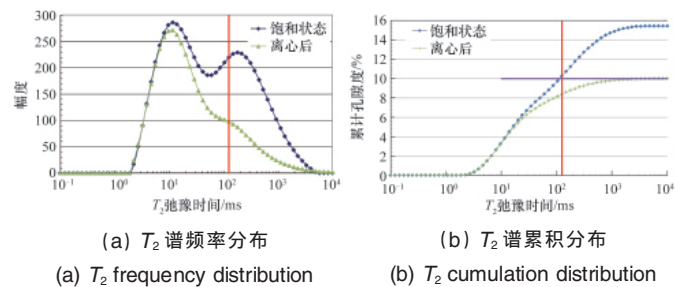
本文结合核磁共振和小岩心的离心实验,提出了火山岩全直径岩心束缚水饱和度测量新方法,并成功应用于松辽盆地和新疆 187 块全直径火山岩岩心的束缚水饱和度测量。

1 核磁共振测量束缚水饱和度原理

核磁共振技术最大的优势之一是不仅能够准确分析任意形状、尺寸的岩石样品,还能够检测到岩石内的裂缝和孔洞。除此之外,核磁共振还具有测量速度快、反映岩石流体信息丰富等优势^[10-11]。用核磁共振测量岩心的束缚水饱和度原理:束缚水受固体表面作用力强,弛豫时间短;可动水受固体表面作用力弱,弛豫时间长^[12]。通过测量弛豫时间,根据束缚水和可动水之间弛豫时间的明显差异,用离心实验标定的可动流体 T_2 截止值^[13]对可动水和束缚水进行区分,从而得到岩心的束缚水饱和度。

图 1 中的两条曲线反映了一块流纹岩饱和水状态下和 2.7MPa 离心后的 T_2 谱的频率分布和累积分布,该岩心的直径为 2.5mm。当岩心处于饱和状态时,核磁共振信号总强度反映了岩心的总含水量。在离心之后,大孔道内的水被离出,岩心内只剩下滞留于孔道壁上的薄膜滞水和残留于微小孔道内的毛管滞水^[14],此时长弛豫时间的核磁信号量大幅下降,对应的核磁共振信号总强度反映了岩心内束缚水的含量。大量实验表明,2.7MPa 的离心力能够比较准确地得到火山岩的束缚水^[15]。结合离心实验的结果,可在饱和水状态岩心的 T_2 弛豫时间上找出一,该点左边各点幅度和近似等于离心后 T_2 谱总幅度和,则该点即为 T_2 截止值^[16],如图 1 中红线所示。

大量实验结果统计表明,砂岩的 T_2 截止值通常为 33ms,碳酸盐的 T_2 截止值通常为 100ms^[17]。但是,由于火山岩结构复



(a) T_2 谱频率分布 (b) T_2 谱累积分布
(a) T_2 frequency distribution (b) T_2 cumulation distribution

图 1 饱和水状态和离心后的火山岩岩心 T_2 谱对比
Fig. 1 T_2 distribution and T_2 cutoff of a volcanic rock

杂、非均质性强,目前尚无针对火山岩的通用 T_2 截止值。通常需要针对每个研究区块进行测量以得到可靠的 T_2 截止值。

2 火山岩非均质性特征

为求准火山岩储层的束缚水饱和度,首先需要对火山岩的非均质性特征进行分析。图 2 为两块典型火山岩全直径岩心三维 CT 图像,从图中可清晰地看到火山岩岩心有明显的气孔溶洞或裂缝、微裂缝发育。表 1 给出了 125 块火山岩全直径岩心气孔溶洞和裂缝、微裂缝发育特征的实验统计结果,这些全直径岩心的直径均为 120mm。

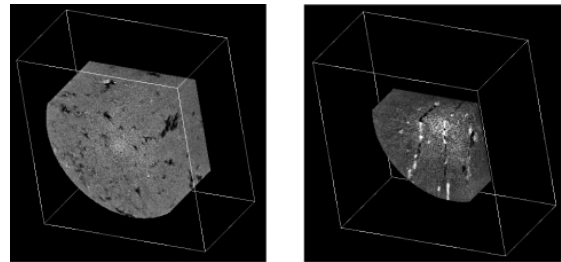


图 2 火山岩岩心局部三维 CT 图像

Fig. 2 Two 3D CT images of volcanic whole cores

表 1 全直径火山岩岩心气孔溶洞和裂缝、微裂缝发育特征按岩性分类统计结果

Table 1 Statistics results of holes and fractures of volcanic whole cores

岩性	岩心总数	气孔溶洞发育 岩心数			裂缝微裂缝发育 岩心数		
		较多	少量	很少或无	明显	不明显	未见
流纹岩	50	7	4	39	3	10	37
凝灰岩	36	4	1	31	4	4	28
火山角砾岩	39	5	2	32	2	5	32

根据以上实验结果可以得出,火山岩储层有不同程度的裂缝、微裂缝及气孔溶洞发育,具有岩性多样、孔隙空间结构复杂、非均质性强等特点。小岩心由于受到尺寸限制,不能很好地反映火山岩复杂的孔隙结构特征,因此束缚水饱和度的测量应针对全直径岩心进行。

3 火山岩可动流体 T_2 截止值分布规律

应用核磁共振技术测量火山岩全直径岩心的束缚水饱和度和, 需要首先对火山岩岩心的可动流体 T_2 截止值进行统计, 分析 T_2 截止值的分布规律。表 2 给出了 52 块岩心可动流体 T_2 截止值按岩性分类的统计结果。从表 2 中可以看出, 不仅不同岩性火山岩的 T_2 截止值相差很大, 同一岩性的不同岩心之间的 T_2 截止值相差也很大。因此, 不能简单地取平均值作为计算这类储层束缚水饱和度的 T_2 截止值, 有必要对这类储层岩石的 T_2 截止值分布特征做进一步分析。

表 3 按细分岩性定名, 进一步对火山岩岩心的 T_2 截止值分布规律进行统计。由表 3 可知, 细分岩性定名相同或相近的岩心, 由于矿物组分相近, T_2 截止值差别较小, 规律性较好。将细分岩性定名相同或相近岩心 T_2 截止值平均值作为相应储层束缚水饱和度解释的标准 T_2 截止值, 能够确保应用核磁共振方法进行火山岩束缚水饱和度分析的准确性。

表 2 火山岩岩心实测 T_2 截止值按岩性分类的统计结果

Table 2 Statistics results of measured T_2 cutoff roughly classified by lithology

岩性	岩心数	实测 T_2 截止值分布范围(平均值)/ms
流纹岩	21	8.03~179.46(87.91)
凝灰岩	16	11.57~103.72(52.02)
火山角砾岩	15	3.22~86.4(36.28)

表 3 部分火山岩岩心实测可动流体 T_2 截止值按细分岩性定名分类的统计结果

Table 3 Statistics results of measured T_2 cutoff sub-classified by lithology

细分岩性	岩心数	实测可动流体 T_2 截止值分布范围(平均值)/ms
灰色流纹岩	3	41.60~71.97(54.50)
灰白色流纹岩	3	103.72~179.46(135.90)
绿灰色流纹岩	3	49.94~86.40(69.43)
灰色球粒流纹岩	3	124.52~124.52(124.52)
灰白色球粒流纹岩	2	34.65~86.40(60.53)
流纹质晶屑凝灰岩	4	71.97~103.72(83.51)
流纹质熔结角砾岩	4	11.57~41.60(22.78)
晶屑熔结角砾岩	3	71.97~86.40(81.59)
安山质凝灰角砾岩	2	3.22~3.87(3.54)
深紫色安山岩	2	24.04~28.86(26.45)

4 火山岩束缚水饱和度核磁共振测量方法

准确的测量 T_2 截止值是计算火山岩束缚水饱和度的关键。图 3 给出了一个全直径火山岩岩心的三维 CT 图和 T_2 谱, 从 CT 图中可以清晰地看到全直径岩心内有较大的气孔溶洞发育, 在对应的 T_2 谱图中 1000ms 左右可以看到明显的谱峰,

谱峰反映了全直径岩心内气孔溶洞的孔隙体积。图 3(b) 还给出了在该全直径岩心上钻取的一块小岩心饱和水状态下的 T_2 谱, 从图中可看出, 小岩心 T_2 谱上无表征气孔溶洞的右峰显示, 说明小岩心内不含气孔溶洞, 因此小岩心束缚水饱和度分析结果不能反映全直径岩心, 更不能准确反映实际储层。

尽管如此, 小岩心标定的可动流体 T_2 截止值却能够应用于全直径岩心, 理由在于: 小岩心中滞留于孔道壁的薄膜滞水和残留于细微管中和毛管滞水在全直径岩心中同样存在; 全直径岩心中所含的气孔溶洞或裂缝、微裂缝在小岩心中尽管不一定存在, 但气孔溶洞或裂缝、微裂缝内的填充物少、填充物疏松或无填充物, 其中的饱和水受孔隙固体表面的作用力小, T_2 弛豫时间明显大于图 3 中红线所示的小岩心标定的 T_2 截止值, 因此将其中的饱和水可以看作是可动水, 不影响将小岩心标定的 T_2 截止值应用于全直径岩心束缚水饱和度分析。

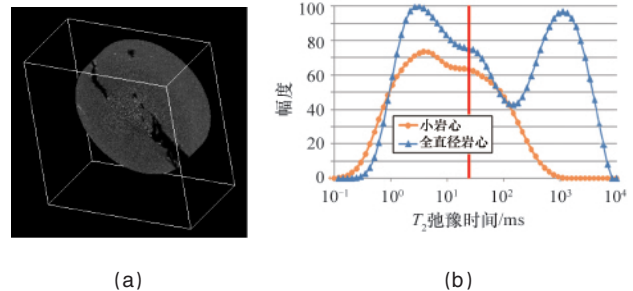


图 3 一个火山岩全直径岩心三维 CT 图(a)和 T_2 谱(b)
Fig. 3 3D CT image (a) and T_2 spectrum (b) of a whole core

经过以上分析, 建立了火山岩岩心束缚水饱和度分析的核磁共振新方法, 实验步骤: ① 用模拟地层水饱和全直径岩心, 测量全直径岩心的 T_2 谱; ② 选取有代表性的全直径岩心钻取小岩心, 通过小岩心的离心试验标定可动流体 T_2 截止值; ③ 将小岩心 T_2 截止值应用于细分岩性定名相同或相近的全直径岩心, 根据面积比值法, 在全直径岩心 T_2 谱上, T_2 弛豫时间小于可动流体 T_2 截止值各点的幅度总和占 T_2 谱所有点幅度总和的百分比即为全直径岩心束缚水饱和度。

为了验证核磁共振方法分析的束缚水饱和度的准确性, 对 6 块全直径岩心进行了驱替实验以便与核磁共振方法得到的束缚水饱和度进行对比。表 4 中列出了对比的统计结果, 其中有 5 块岩心两种方法分析得到的束缚水饱和度吻合较好; 而对于 2 号岩心, 常规驱替实验测得的束缚水饱和度明显偏大。

通过进一步研究发现, 实验结果吻合较好的 5 块岩心均质性较好且不含裂缝或微裂缝; 而图 4 所示的 2 号岩心的 CT 图表明 2 号岩心内含有较明显的微裂缝。分析认为微裂缝在驱替过程中导致了严重的黏性指进现象, 使得驱替实验测量

得到的束缚水饱和度偏高。而全直径岩心内微裂缝的存在, 不会影响小岩心标定 T_2 截止值结果, 从而也不会影响全直径岩心束缚水饱和度核磁共振分析结果。

表 4 核磁共振方法与驱替实验获得的全直径岩心束缚水饱和度结果比较

Table 4 Comparison of S_{wi} measured by NMR with flooding test results

岩心编号	核磁共振方法测得的束缚水饱和度/%	驱替实验测得的束缚水饱和度/%
1	34.02	37.39
2	28.71	50.58
3	45.48	49.48
4	65.22	63.42
5	79.58	81.07
6	96.12	91.61

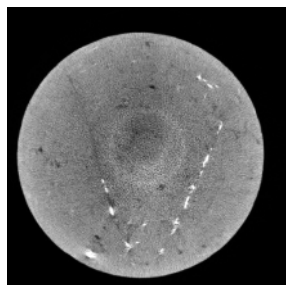


图 4 2号火山岩全直径岩心二维 CT 图像

Fig. 4 2D CT image of core No. 2 with small fractures

5 结论

(1) 125 块火山岩全直径岩心的 CT 图像分析结果表明, 火山岩储层岩石非均质性很强, 且不同程度地有裂缝、微裂缝或气孔溶洞发育, 因此小岩心实验分析结果代表性较差, 必须对全直径岩心进行分析才能够获得比较准确的束缚水饱和度。

(2) 火山岩岩心可动流体 T_2 截止值标定结果表明, 尽管岩性差别较大的火山岩岩心之间的 T_2 截止值相差很大, 但是细分岩性定名相同或相近岩心的 T_2 截止值基本相同, 因此核磁共振技术能够应用到火山岩岩心的束缚水饱和度分析中。

(3) 应用核磁共振方法, 将小岩心标定的 T_2 截止值应用于全直径岩心 T_2 谱, 能够比较准确地测量到火山岩全直径岩心的束缚水饱和度。通过与驱替实验进行对比, 结果表明, 对于均质性较好岩心, 核磁共振方法与驱替实验得到的束缚水饱和度基本一致; 对于含有裂缝、微裂缝的岩心, 核磁共振方法由于避免了指进现象, 测得的束缚水饱和度不受裂缝、微裂缝的影响。新方法克服了常规分析方法的诸多局限性, 具有快速、准确的优点。

参考文献 (References)

- [1] 张子枢, 吴邦辉. 国内外火山岩油气藏研究现状及勘探技术调研[J]. 天然气勘探与开发, 1994, 16(1): 1-26.
Zhang Zishu, Wu Banghui. *Natural Gas Exploration & Development*, 1994, 16(1): 1-26.
- [2] 王成, 邵红梅, 洪淑新. 徐深 1 井火山岩、砾岩储层特征研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(5): 1-4.
Wang Cheng, Shao Hongmei, Hong Shuxin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2003, 22(5): 1-4.
- [3] 赖世新, 韩晓黎, 曲伟, 等. 准噶尔盆地三南-滴水泉凹陷及其周缘石炭系勘探前景[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(3): 297-299.
Lai Shixin, Han Xiaoli, Qu Wei, et al. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(3): 297-299.
- [4] Dake L P. Fundamentals of reservoir engineering: Developments in petroleum science[M]. Oxford: Elsevier Science, 1998.
- [5] 范卫星. 密闭取心井钻井技术及其问题探讨 [J]. 石油天然气学报, 2007, 29(2): 129-131.
Fan Wenxing. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(2): 129-131.
- [6] Valenti N P, Valenti R M, Koederitz L F. A unified theory on residual oil saturation and irreducible water saturation [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 2002, Sept 29-Oct 2, 77545-MS.
- [7] Tiab D, Donaldson E C. Petrophysics: Theory & Practice of Measuring Reservoir Rock & Fluid Transport Properties [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2004: 65-67.
- [8] 何更生. 油层物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 219-220.
He Gengsheng. *Petrophysics*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 219-220.
- [9] Homsy G M. Viscous fingering in porous media [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1987, 19: 271-311.
- [10] 肖秋生, 朱巨义. 岩样核磁共振分析方法及其在油田勘探中的应用 [J]. 石油实验地质, 2009, 31(1): 97-100.
Xiao Qiusheng, Zhu Juyi. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(1): 97-100.
- [11] Kenyon W E. Nuclear magnetic resonance as a petrophysical measurement[J]. *Nuclear Geophysics*, 1992, 6(2): 153-171.
- [12] Dunn K J, Bergman D J, La Torraca. Nuclear magnetic resonance Petrophysical and Logging Applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 2002: 101-105.
- [13] 冯进, 孙友. 核磁共振测井 T_2 截止值的确定方法 [J]. 中国海上油气, 2008, 20(3): 181-183.
Feng Jin, Sun You. *China Offshore Oil and Gas*, 2008, 20(3): 181-183.
- [14] 黄延章, 于大森. 微观渗流实验力学及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 44-45.
Huang Yanzhang, Yu Dasen. *Micro experimental seepage mechanics and its application*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 44-45.
- [15] 孙军昌, 郭和坤, 刘卫, 等. 低渗火山岩气藏可动流体 T_2 截止值实验研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(4): 109-114.
Sun Junchang, Guo Hekun, Liu Wei, et al. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2010, 32(4): 109-114.
- [16] 周灿灿, 程相志, 赵凌风, 等. 用岩心 NMR 和常规束缚水的测量改进对 $T_{2, \text{cutoff}}$ 的确定[J]. 测井技术, 2001, 25(2): 83-88.
Zhou Cancan, Cheng Xiangzhi, Zhao Lingfeng, et al. *Well Logging Technology*, 2001, 25(2): 83-88.
- [17] Straley C, Rossini D, Vinegar H J, et al. Core analysis by low-field NMR[J]. *The Log Analyst*, 1997, 38(2): 84-94.

(责任编辑 刘志远)