

文章编号: 1001-6112(2009)01-0097-04

# 岩样核磁共振分析方法 及其在油田勘探中的应用

肖秋生<sup>1</sup>, 朱巨义<sup>2</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司 江苏油田分公司 勘探处, 江苏 扬州 225009;  
2. 中国石油化工股份有限公司 江苏油田分公司 地质测井处, 江苏 扬州 225003)

**摘要:** 岩样核磁共振分析是利用氢原子核在外加磁场的作用下形成核磁共振现象的这一特性, 重复测量同一样品在不同处理阶段的核磁共振信号以及该样品的横向弛豫时间( $T_2$ )截止值, 从而求取储层的孔隙度、渗透率、可动流体饱和度等地质参数的一项新的录井技术。其测量结果仅与样品的孔隙结构、孔隙流体性质及其赋存状态有关, 与岩石骨架的矿物成分无关, 据此可以很好地判断油田勘探工作中面临的低孔、低渗、低阻、特殊岩性储层的孔隙结构和流体性质。该项技术的应用, 实现了储层物性分析从室内到钻井现场的迁移, 分析对象从岩心拓展到岩屑, 具有用量少、速度快、成本低、获取参数多、准确性高等优点。将其分析结果与其它测、录井资料相结合, 可以更及时有效地对储集层进行评价。

**关键词:** 核磁共振; 氢原子核; 孔隙度; 渗透率; 可动流体饱和度; 油气藏

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

## ANALYSIS METHOD OF ROCK NMR AND ITS APPLICATION IN OILFIELD EXPLORATION

Xiao Qiusheng<sup>1</sup>, Zhu Juyi<sup>2</sup>

(1. *Department of Exploration, Jiangsu Oilfield Branch, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;*  
2. *Department of Geology & Logging, Jiangsu Oilfield Branch, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225003, China*)

**Abstract:** Analysis of rock NMR(Nuclear Magnetic Resonance)is a new well logging technique developed in recent years, which is based on hydrogen atomic nucleus forming phenomena NMR under an additional magnetic field. Through repeatedly measuring signal of NMR and cutoff value of  $T_2$  at different processing phase, many geological parameters such as porosity, permeability, movable fluid saturation of reservoirs can be acquired. The measurement result is only related to pore structure, interstitial fluid properties and storage state, independent of mineral composition of rock frame, which is useful for the judgement of pore structure and fluid property in low porosity and low permeability, low resistivity and unusual lithology reservoir when facing difficulties in oilfield exploration. This technique realizes migration of reservoir property analysis from indoor conditions to drilling site and extension of analyzed objects from core samples to cuttings. And it has many advantages such as less sample consumption, fast analysis, lower cost, obtaining more parameters and high accuracy. The analysis result can evaluate reservoir property more effective in time combining with other data of detection logging.

**Key words:** nuclear magnetic resonance; hydrogen atomic nucleus; porosity; permeability; saturation of movable fluid; hydrocarbon reservoir

随着油田勘探开发工作的不断深入,许多老油田的勘探开发目标逐渐向小断块、小砂体、薄互层、低阻、火成岩等复杂油气藏转移,这类油气藏的录井评价工作逐渐成为录井分析家们评价研究的新

重点。随着地化、热解色谱、定量荧光等录井新技术的运用,录井行业在油气藏评价方面取得了较大的进步,对提高油气水层的解释符合率起到了一定作用,但面对低孔、低渗、低阻等复杂储集层时,这些

收稿日期: 2008-03-03; 修订日期: 2008-12-01。

作者简介: 肖秋生(1963—),男,高级工程师,主要从事油气勘探研究与管理工。E-mail: xiaoqs@joeco.com.cn。

基金项目: 中国石化科技攻关项目(JP05001)。

录井方法都在一定程度上显示其局限性。近几年的实践表明,岩样核磁共振录井技术作为一项新兴的录井分析技术,在复杂油气藏的评价过程中具有经济、适用、便捷、评价准确等特点,显示出了一定的优势<sup>[1,2]</sup>。

## 1 岩样核磁共振分析的基本原理

1945 年斯坦福大学的 Bloch 教授和哈佛大学的 Purcell 教授领导的 2 个研究小组相继发现了核磁共振(NMR)现象,从此开创了一门新的科学——核磁共振波谱学。经过了 50 多年的探索和发展,核磁共振已广泛应用于化学、石油、地质、食品和医学等工业领域<sup>[1~3]</sup>。

与氢核的磁性参数相比,油田在钻井过程中获取的岩心、岩屑或井壁取心样品孔隙中常见的其它几种主要元素的磁性相对灵敏度可以忽略不计(表 1),而岩石的固体部分一般不含氢原子,所以岩样核磁共振检测的对象是岩样孔隙流体的氢原子核( $^1\text{H}$ )<sup>[1]</sup>。

所谓核磁共振,就是指在特定的条件下,氢原子核在外加磁场的作用下发生强烈的相互作用,即共振现象。利用此特性,可以检测到流体的核磁共振信号强弱及  $T_2$  弛豫时间的长短。流体的核磁共振信号强弱及  $T_2$  弛豫时间的长短包含着丰富的油层物理信息。具体体现在:单位样品中核磁共振信号的强弱对应于样品孔隙中流体的总量,也就是样品的总孔隙度;而  $T_2$  弛豫时间的长短主要取决于岩石表面对孔隙流体作用力的强弱,小孔隙内的流体受岩石表面的作用力强,常呈束缚状态, $T_2$  弛豫时间短;大孔隙内的流体受岩石表面的作用力弱,呈可动状态, $T_2$  弛豫时间长。因此可以通过求取  $T_2$  截止值来分别求取可动流体和非可动流体的孔隙度。此外,将岩样浸泡在浓度为 0.5% 的  $\text{MnCl}_2$  水溶液中一定时间后, $\text{Mn}^{2+}$  充分扩散到岩样内的水相中,消除了水相的核磁信号,此时测量得到

表 1 孔隙流体中常见原子核的磁性参数

Table 1 Magnetic parameters of common atomic nucleus in pore fluid

核素	丰度, %	自旋量子数	核磁矩/ $\mu_N$	相对灵敏度
$^1\text{H}$	99.990	1/2	2.792 68	1.00
$^{13}\text{C}$	1.010	1/2	0.702 20	$1.59 \times 10^{-2}$
$^{23}\text{Na}$	100.000	3/2	2.216 10	$9.25 \times 10^{-3}$
$^{35}\text{Cl}$	75.400	3/2	0.820 91	$4.70 \times 10^{-3}$
$^{43}\text{Ca}$	0.145	7/2	1.315 30	$6.40 \times 10^{-3}$

的仅是油相的核磁信号,比较两次测量结果就可以定量计算含油饱和度和含水饱和度。最后利用测得的岩样孔隙度和束缚水饱和度参数,借助于经验公式可定量求取岩样的渗透率<sup>[1,4]</sup>。

需要指出的是,在进行岩样核磁共振分析时,样品在从井底到地面再被送到核磁分析的过程中,孔隙流体可能会有少部分被挥发掉,原油组分越轻,挥发量就越多。因此求取的含油饱和度为实际饱和度的下限值,而求取的含水饱和度为实际饱和度的上限值。

## 2 岩样核磁共振分析的方法

### 2.1 岩心样品的取样与分析

#### 2.1.1 取样要求

对于需要分析的岩心样品(含井壁取心样品,下同),为了减少样品中流体的挥发量,要求岩心出筒后 2 h 内对岩心的新鲜部位进行取样,岩样体积在  $(1\sim 3)\text{ cm} \times (1\sim 3)\text{ cm} \times (1\sim 3)\text{ cm}$ (总体积大于  $20\text{ cm}^3$ ),所取岩心样品不能被二次污染。岩心样品挑选好后,立即密封保存在低于  $25\text{ }^\circ\text{C}$  的容器中。

#### 2.1.2 第一次核磁共振测量

样品在未进行任何处理之前测量,测得初始状态油+水的总核磁共振信号。

#### 2.1.3 第二次核磁共振测量

用抽真空的方法抽出样品内的空气,使岩屑样品的孔隙空间内充满液体(油或水)。测得的信号为样品孔隙中油+水的总核磁共振信号。与原始状态测得的信号相比,差值反映的是样品中油气的逃逸程度。

#### 2.1.4 第三次核磁共振测量

用  $\text{MnCl}_2$  水溶液浸泡岩样,锰离子扩散进入岩样内的水相中后,消除了水相的核磁共振信号,此时只测得油相的核磁共振信号,油+水的总核磁共振信号减去油相的核磁共振信号即为水相的核磁共振信号。

#### 2.1.5 $T_2$ 截止值的求取

$T_2$  截止值是进行储层参数计算的关键参数,在利用  $T_2$  谱计算储层有效孔隙度、束缚水孔隙度和可动流体孔隙度时,准确的  $T_2$  截止值是正确计算这些参数的前提。一般情况下,砂泥岩地层的  $T_2$  截止值的经验值为 33 ms,碳酸盐岩地层为 98 ms。但由于样品所处沉积环境的不同,地层矿物含量的差异,不同地区具有不同的  $T_2$  截止值<sup>[5~7]</sup>。实际工作中,通常是对一个地区选取有代表性的一定数目的岩样进行室内分析,求得每块岩样的可动流体  $T_2$  分布截止值,然后取其平均值作为该地区的可动流体  $T_2$  截止值标准。测量方法是:首先对饱和流体的岩心进行核磁  $T_2$  弛豫时间谱测试,然后将岩样置于离心机中,按一定要求进行高速离心,对渗透率大于  $10 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$  的高、中渗样品离心力控制在 689.5 kPa;对渗透率小于  $10 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$  的低渗样品离心力控制在 1 034 kPa。离心完成后对岩样进行核磁共振  $T_2$  测试。通过比较离心前后  $T_2$  谱的变化即可确定出所分析岩样的可动流体  $T_2$  截止值。

确定  $T_2$  截止值的另一种方法是经验法<sup>[4]</sup>,当所测样品  $T_2$  谱出现双峰或多峰时,一般认为  $T_2$

截止值大约在  $T_2$  谱第一个峰和第二个峰交会的谷点附近,将左峰(小于  $T_2$  截止值)称为不可动峰,右峰(大于  $T_2$  截止值)称为可动峰,可动峰与不可动峰的下包面积之比即为可动与不可动流体体积之比<sup>[8,9]</sup>(图 1)。

### 2.1.6 参数计算

利用 3 次核磁共振测量分别得到的油+水的核磁共振  $T_2$  谱和油相的核磁共振  $T_2$  谱,可定量计算所测岩样的孔隙度、渗透率、含油饱和度、含水饱和度、可动水饱和度和束缚水饱和度、可动油饱和度和残余油饱和度等参数。通过上述各项参数,不仅能够对储层的好差作出分类评价,而且能够识别油水层。求取孔隙度和渗透率的计算公式如下:

$$\Phi_{nmr} = \sum_i \frac{m_i}{M} \cdot \frac{S}{s} \cdot \frac{G}{g} \cdot \frac{V}{v} \times 100$$

$$K_{nmr} = \left( \frac{\Phi_{nmr}}{C_1} \right)^4 \left( \frac{BVM}{BVI} \right)^2$$

式中: $\Phi_{nmr}$ 为样品核磁孔隙度,% ;  $K_{nmr}$ 为核磁渗透率, $10^{-3} \mu m^2$ ;  $M$ 为标准样品  $T_2$  谱的总幅度;  $m_i$ 为样品第  $i$  个  $T_2$  分量的核磁共振  $T_2$  谱幅度;  $V$ 为

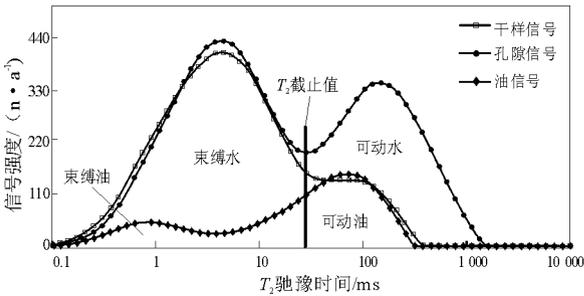


图 1 苏北盆地高邮凹陷花 XX 井岩心样品可动流体和不可动流体及  $T_2$  截止值分布示意

Fig.1 Distribution map showing movable, immovable fluids and  $T_2$  cutoff value of core samples from Well HuaXX in the Gaoyou Sag of the Northern Jiangsu Basin

标准样品总含水量,  $cm^3$ ;  $v$  为样品的体积,  $cm^3$ ;  $S$ 、 $G$  分别为标准样品核磁共振数据采集时的累积次数和接受增益;  $s$ 、 $g$  分别为样品核磁共振数据采集时的累积次数和接受增益;  $BVM$  为可动水饱和度和;  $BVI$  为束缚水饱和度,% ;  $C_1$  为待定系数,无量纲,一般采用地区经验值。

## 2.2 岩屑样品的取样与分析

录井现场岩屑取出洗净后,挑取未经烘干处理的岩屑样品,单颗岩屑粒径需大于 2 mm,样品总重量大于 2 g,样品不能被二次污染。挑选好样品后,即浸入浓度各为 0.5% 的 KCl 和 NaCl 混合溶液中,作好标记。分析步骤除不进行岩心分析的第一次测量项目外,其它均与岩心分析一致。

## 3 应用实例

### 3.1 仪器的选择

本次分析使用的仪器为中科院廊坊渗流力学

研究所依据核磁共振原理研制的 RecCore-2500 型便携式核磁共振岩样分析仪,该仪器具有轻便、快速、灵敏度高等特点。它不仅可以分析岩心、井壁取心样品,也可以检测粒径在 2 mm 以上的岩屑样品,为现场快速检测储层物性和判断孔隙流体性质奠定了基础。

### 3.2 分析结果

本次岩样核磁共振分析的对象是苏北盆地海安凹陷李堡地区 XX 井泰州组的含油岩心和岩屑样品。先后共取 2 482.54~2 491.42 m 井段岩心样品 22 块,2 471~2 541 m 井段岩屑样品 24 包,通过挑样进行核磁共振分析,获得了每块样品的孔隙度、渗透率、可动油饱和度、残余油饱和度、可动水及束缚水饱和度等储层参数(图 2)。最后,利用上述参数对目的层进行了解释,得出岩样核磁共振分析油水层解释成果(表 2)。

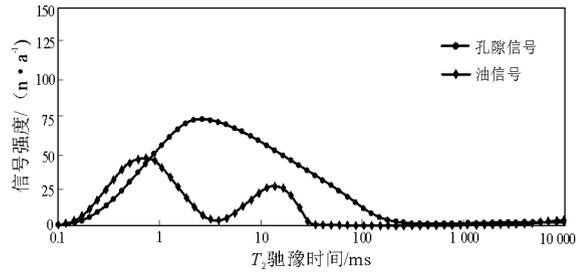


图 2 苏北盆地海安凹陷堡 XX 井 2 512 m 岩屑样品  $T_2$  谱分布

Fig.2 Distribution of  $T_2$  hierarchy, cutting sample at the deep of 2 512 m from Well BaoXX in the Haian Sag of the Northern Jiangsu Basin

表 2 苏北盆地海安凹陷堡 XX 井核磁共振分析结果

标准样品总含水量, $cm^3$	样品体积, $cm^3$	标准样品核磁共振数据采集时的累积次数	接受增益	样品核磁共振数据采集时的累积次数	接受增益	可动水饱和度,%	束缚水饱和度,%	可动油饱和度,%	残余油饱和度,%
3	2 481~2 487	18.6	10.7	29.3	50.1	15.6	14.8	48.6	40.0
4	2 508~2 511	18.3	17.9	34.0	50.5	16.5	136.0	55.6	21.2
		18.0	86.9	45.5	28.7	17.9	42.3	0	48.8

完井后对该井进行了试油工作,射开 2 537~2 541 m 井段,折算日产水 88  $m^3$ ;随后射开 2 508~2 511 m 井段,折算日产油 21.8  $m^3$ ,不含水。试油结果验证了核磁共振分析成果的准确性<sup>[11]</sup>。

## 4 结论

岩样核磁共振分析技术的应用,实现了储层物

性分析从室内到钻井现场的迁移,分析对象从岩心拓展到岩屑和井壁取心;具有用量少、速度快、成本低、岩样无损、获取参数多、准确性高、可随钻分析等优点。通过岩样核磁共振分析技术可获取储层的孔隙度、渗透率、饱和度以及储层的孔径大小及分布特征等地质参数。将其分析结果与其它测、录井资料相结合,可以更及时有效地对储集层进行精确评价,为油田的勘探开发提供可靠的第一手资料。

参考文献:

1 肖立志,柴细元,孙保喜等.核磁共振测井资料解释与应用导

论[M].北京:石油工业出版社,2001

2 曾文冲.油气藏储集层测井评价技术[M].北京:石油工业出版社,1991

3 陆大卫,李 宁,匡立春等.石油测井新技术适用性典型图集[M].北京:石油工业出版社,2001

4 王悦田,宋明会,曹信儒.核磁共振录井技术在油田勘探中的应用[J].中国石油勘探,2005,39(4):66~70

5 毛凤鸣,戴 靖.复杂小断块石油勘探开发技术[M].北京:中国石化出版社,2005.194~380

6 丁贵明,张一伟,吕鸣岗等.油气勘探工程[M].北京:石油工业出版社,1997.174~177

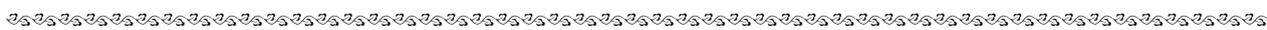
7 段传丽,陈践发,郭建军等.实验室条件下厌氧降解原油及次生气体地球化学特征[J].石油实验地质,2008,30(3):297~302

8 李明诚.油气运移基础理论与油气勘探[J].地球科学——中国地质大学学报,2004,29(4):379~383

9 蔡希源.中国石化油气勘探回顾与展望[J].石油与天然气地质,2006,27(6):715~721

10 刘玉瑞,刘启东,杨小兰.苏北盆地走滑断层特征与油气的聚集关系[J].石油与天然气地质,2004,25(3):279~293

(编辑 李凤丽)



(上接第 96 页)

7 周雷风,王荣福.三元抽提物的地球化学特征[J].石油实验地质,1990,12(4):395~406

8 许 敏,郭绍辉,李术元等.烃源岩的溶剂抽提研究[J].石油大学学报(自然科学版),2001,25(3):49~54

9 Eugenia Bondar, Mihkel koel. Application of supercritical fluid extraction to organic geochemical studies of oil shales [J]. Fuel,1998,77(3):211~213

10 李春兰.超临界流体抽提技术与应用[J].油气地质与采收率,2002,9(4):31~32

11 宋一涛,廖永胜,张守春.半咸—咸水湖相烃源岩中两种赋存状态可溶有机质的测定及其意义[J].科学通报,2005,50(14):1531~1534

12 郭绍辉,李术元,陈志伟等.低熟烃源岩的超强混合溶剂抽提及其地球化学意义[J].石油大学学报(自然科学版),2000,

24(3):50~53

13 Anitescu G, Tavlarides L L. Supercritical extraction of contaminants from soils and sediments[J]. J of Supercritical Fluids, 2006,38:167~180

14 Roop R K, Hess R K, Akgerman A. Supercritical extraction of pollutants from water and soil[J]. ACS Symp Ser,1989,406:468~476

15 Ghonasgi D, Gupta S, Dooley K M, et al. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of organic contaminants from aqueous streams[J]. AIChE J, 1991,37:950~994

16 Alonso E, Cantero F J, Garcia J, et al. Scale-up for a process of supercritical extraction with adsorption of solute onto active carbon: Application to soil remediation[J]. J Supercrit Fluids, 2002,24:123~135

(编辑 徐文明)