

# The Application of Rock Sample NMR Logging Technique for Reservoir Evaluation in SN Area

Chunshang Qiao<sup>1</sup>, Zhigang Yin<sup>2</sup>, Xianrong Wang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shenzhen Engineering Technology Branch, Energy Technology and Services Co., CNOOC, Shenzhen Guangdong

<sup>2</sup>Tuha Branch Company, CNPC Logging Company Limited, Turpan Xinjiang

<sup>3</sup>East China Petroleum Engineering Co., Ltd., Sinopec, Nanjing Jiangsu

Email: Qiaochsh@cnooc.com.cn

Received: Jul. 24<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jan. 24<sup>th</sup>, 2019; published: Apr. 15<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Due to the combined effects of sedimentary environment, sedimentary facies belt, diagenesis and tectonic action, the reservoirs of the Third Segment of Funing Formation in SN Area have the characteristics of medium-low porosity, low permeability and low resistivity. It is characterized by high irreducible water and low movable fluid on the  $\tau_2$  relaxation spectrum. Based on the experimental data, the relationship between the irreducible water saturation and the permeability is established. Combined with the morphological characteristics of the  $\tau_2$  relaxation spectrum, the reservoir classification standard based on the nuclear magnetic resonance  $\tau_2$  spectrum is established. The complex reservoirs in this area are divided into five categories. On this basis, the "three-spectrum"  $\tau_2$  relaxation spectrum morphology analysis method and  $S_o/S_{mw}$  - oil-porosity intersection chart board are used to identify the fluid properties, which provides a new reference for reservoir classification evaluation and fluid property discrimination in SN and the surrounding areas.

## Keywords

Rock Sample Nuclear Magnetic Resonance,  $\tau_2$  Spectrum, Reservoir Classification, Fluid Property Discrimination

---

# 岩样核磁共振测井技术在SN地区储层评价中的应用

乔纯上<sup>1</sup>, 尹志刚<sup>2</sup>, 王先荣<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中海油能源发展股份有限公司工程技术深圳分公司, 广东 深圳

<sup>2</sup>中国石油集团测井有限公司吐哈分公司, 新疆 吐鲁番

<sup>3</sup>中石化华东石油工程有限公司, 江苏 南京

作者简介: 乔纯上(1984-), 男, 工程师, 现主要从事油气田勘探开发工作。

Email: Qiaochsh@cnooc.com.cn

收稿日期: 2018年7月24日; 录用日期: 2019年1月24日; 发布日期: 2019年4月15日

## 摘要

受沉积环境、沉积相带、成岩作用及构造作用的综合影响, SN地区阜宁组三段储层具有中低孔、低渗和低电阻率的特征, 在核磁共振测井的横向弛豫时间( $\tau_2$ )谱上表现为高束缚水、低可动流体的特点。通过试验数据建立束缚水饱和度与渗透率的关系, 结合 $\tau_2$ 谱形态特征, 建立基于核磁共振 $\tau_2$ 谱的储层分类标准, 将该区复杂储层划分为5类。在该基础上, 通过“一样三谱” $\tau_2$ 谱形态分析法和(含油饱和度/可动流体饱和度) - 含油孔隙度( $(S_o/S_{mw}) - \phi_o$ )交会图版法识别流体性质, 为SN及周边地区储层分类评价和流体性质判别提供了新的参考和依据。

## 关键词

岩样核磁共振,  $\tau_2$ 谱, 储层分类, 流体性质判别

Copyright © 2019 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 核磁共振测井技术在油田储层评价方面发展迅速, 随着较低磁场强度、更轻巧的便携式岩样核磁共振分析仪的出现, 该技术的应用范围不断扩大, 实现了储层物性分析从室内到钻井现场的迁移, 分析对象从岩心到岩屑和井壁取心的拓展, 评价内容从物性评价向孔隙结构评价和流体性质评价的延伸[1]。该技术提供了孔隙度、渗透率、可动流体饱和度、束缚流体饱和度、油水饱和度等重要参数, 对于划分和评价储层、描述储层流体性质具有重要意义, 尤其为低渗储层中油水层的识别、低阻油层的识别提供了新的重要技术手段。

## 2. 基本原理

岩样核磁共振分析测量的是具有核自旋特性的氢原子核( $^1\text{H}$ )与磁场之间的相互作用, 而岩石骨架的

主要核素组成为非磁性核(一般不含氢原子),对核信号无贡献,因此岩样核磁共振实际检测的对象为岩样孔隙流体的氢原子核。水中的氢原子核被激发后吸收能量,产生核磁共振现象,当固体表面性质和流体性质相同或相似时,横向弛豫时间( $\tau_2$ )的差异主要反映岩样内孔隙大小的差异。孔隙越大,氢核越多,核磁共振信号衰减越慢,对应的  $\tau_2$  也越长,谱峰幅度越高[2]。不同孔隙中的流体具有不同的弛豫时间,弛豫时间谱在油层物理上的含义为岩石中不同大小的孔隙占总孔隙的比例。从弛豫时间谱中可以得到孔隙度、渗透率、可动流体百分数及孔径分布等丰富的油层物理信息[3]。

### 3. 基于核磁共振的储层分类

#### 3.1. 核磁共振孔渗特征

随着近年来 SN 地区砂岩油藏不断被发现拓展,阜宁组三段(以下简称“阜三段”)取得了丰富的物性分析资料。根据 14 口井岩样核磁共振物性分析统计,孔隙度与渗透率呈正相关关系,孔隙度分布范围主要集中在 12%~22%,渗透率主要集中在 0.1~10.0 mD,属于中低孔、低渗储层(图 1)。

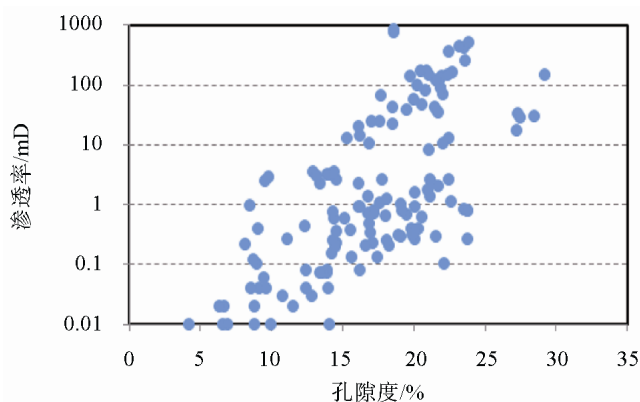


Figure 1. The diagram of distribution of porosity and permeability of NMR in SN Area  
图 1. SN 地区核磁共振渗透率-孔隙度交会图

#### 3.2. 基于核磁共振 $\tau_2$ 谱的储层分类

在试验数据的基础上,建立了束缚水饱和度与渗透率的关系(图 2)。以研究区储层划分标准为依据,结合核磁共振  $\tau_2$  谱形态与分布特征,将研究区的储层划分为 5 类,实现了基于核磁共振  $\tau_2$  谱的储层分类标准(表 1)。

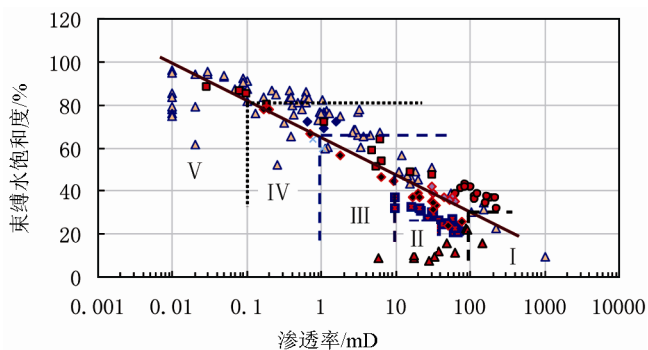


Figure 2. The intersection diagram of irreducible water saturation-permeability in the studied area  
图 2. 研究区束缚水饱和度 - 渗透率交会图

**Table 1.** The classification of reservoir parameters based on NMR  $\tau_2$  spectrum**表 1.** 基于核磁共振  $\tau_2$  谱的储层参数分类表

储层类别	核磁共振 $\tau_2$ 谱形态特征	孔隙度/%	渗透率/mD	束缚水饱和度/%
I	近右偏单峰, 幅度高	>20	>100	≤30
II	单峰正态或双峰右偏, 幅度较高	15~20	10~100	30~45
III	单峰正态或双峰左偏, 幅度中等	10~20	1~10	45~60
IV	双峰左偏严重或者近左单峰	10~15	0.1~1	60~80
V	峰值左偏, 低幅度	<10	<0.1	>80

I类:  $\tau_2$  谱形态为近右单峰, 幅度高, 主要分布在 20 ms 以上区间; 孔隙度大于 20%, 渗透率大于 100 mD, 束缚水饱和度小于等于 30%。该类油层含油饱和度高, 一般大于 70%。

II类:  $\tau_2$  谱形态为单峰正态分布或双峰右偏, 幅度较高, 双峰以 20 ms 为分界线; 孔隙度在 15%~20% 之间, 渗透率介于 10~100 mD, 束缚水饱和度 30%~45%。该类油层含油饱和度较高(55%以上), 单峰为常规油层, 双峰易形成低电阻率油层。

III类:  $\tau_2$  谱形态为单峰正态分布或双峰左偏, 幅度中等, 双峰以 16 ms 为分界线; 孔隙度在 10%~20% 之间, 渗透率为 1~10 mD, 束缚水饱和度 45%~60%。该类油层含油饱和度在 50%左右, 双峰常表现为低阻油层。

IV类:  $\tau_2$  谱形态为双峰左偏严重或者近左单峰分布; 孔隙度在 10%~15%之间, 渗透率处于 0.1~1 mD 之间, 束缚水饱和度为 60%~80%。该类储层主要表现为特低渗特征, 为差油层。

V类:  $\tau_2$  谱形态为左单峰, 幅度较低; 孔隙度小于 10%, 渗透率小于 0.1 mD, 束缚水饱和度大于 80%, 一般为干层。

## 4. 油水区识别方法

### 4.1. “一样三谱” 定性分析法

岩样核磁共振试验一般采用三次测量法, 分别得到干样信号(初始状态下的核磁共振  $\tau_2$  信号)、孔隙信号(饱和盐水状态下的核磁共振  $\tau_2$  信号)、油信号(MnCl<sub>2</sub> 溶液浸泡状态下的核磁共振  $\tau_2$  信号)。干样信号与油信号之间的谱图差异反映了储层的含水特征, 孔隙信号与干样信号之间的谱图差异体现了气体含量或孔隙的充满度。

1) 油层定性评价方法。核磁共振  $\tau_2$  谱中, 当干样信号和油信号近于重合时, 试油为油层。对于双峰结构的储层, 若左侧干样信号的谱峰高于油样, 而右侧两信号重合时, 表明可动孔隙被油充满, 而束缚孔隙中油水共存, 在正常试油求产时一般为油层或低产油层; 实施压裂后会有部分束缚水产出, 试油表现为油水同层。若油信号谱峰右移, 则反映原油为轻质油。SX79 井核磁共振孔隙度 20.52%, 渗透率 169.96 mD, 可动流体饱和度 41.71%, 含油饱和度 33.88%, 束缚水饱和度 24.41%,  $\tau_2$  谱中表现为弛豫时间较长, 油信号谱峰高, 右半部分发育并与干样信号重合, 试油产油量 19 m<sup>3</sup>/d (图 3(a))。

2) 油水同层定性评价方法。核磁共振  $\tau_2$  谱中干样信号与油信号在右侧有一定的差距, 表明大孔隙中部分被可动水充填, 试油时表现为油水同出。SX60 井核磁共振孔隙度 22.81%, 渗透率 56.76 mD, 含油饱和度 12.78%, 束缚水饱和度 40.58%,  $\tau_2$  谱油信号谱峰较低, 油信号右半部分与干样信号存在一定幅度差, 试油为产油量 2.5 m<sup>3</sup>/d, 产水量 8.5 m<sup>3</sup>/d, 为油水同层(图 3(b))。

3) 水层定性评价方法。核磁共振  $\tau_2$  谱中弛豫时间较长, 油信号弛豫时间短且右半部分不发育, 基本

接近基线, 表现为可动流体值较高, 油信号谱峰低, 孔隙中以可动水为主, 一般情况下含油饱和度小于 10.0%。SX65 井核磁共振孔隙度 14.07%, 含油饱和度 10.19%, 可动流体饱和度 39.55%, 束缚水饱和度 52.87%, 含油孔隙度 1.26%, 干样信号幅度远大于油信号, 为水层(图 3(c))。

4) 干层定性评价方法。核磁共振  $\tau_2$  谱后峰不发育, 而干样信号和油信号为左侧单峰结构且幅度差较大, 或油信号为近于平直的基线, 则正常试油时为干层, 但压裂后可能为水层。SX18-1A 井核磁共振孔隙度 16.44%, 渗透率 0.61 mD, 束缚水饱和度 81.53%, 含油饱和度 8.51%, 可动水饱和度 9.96%, 表现为低渗、低可动流体、低含油饱和度、高束缚水的特点;  $\tau_2$  短, 图谱右半部分不发育, 该井试油无产出(图 3(d))。

综上所述, 以岩心资料、试油生产数据等为基础, 结合核磁共振试验, 通过可动流体饱和度、含油饱和度与可动水饱和度、含油孔隙度等参数, 建立了 SN 地区阜三段油水层判别标准(表 2)。

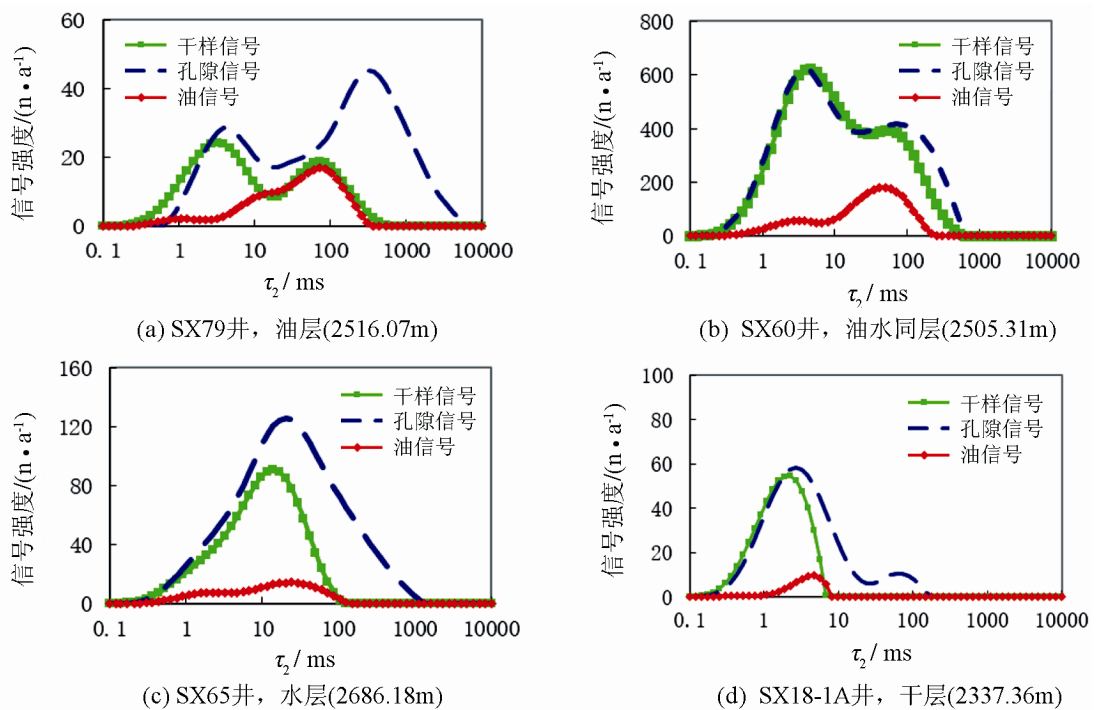


Figure 3. The  $\tau_2$  spectrum of “one sample with three spectra”  
图 3. “一样三谱” 弛豫谱图

Table 2. The criterion of fluid property identification in the 3<sup>rd</sup> Segment of Funing Formation  
表 2. SN 地区阜三段流体性质判别标准

流体性质	孔隙度/%	渗透率/mD	含油饱和度( $S_o$ )/%	束缚水饱和度/%	可动流体饱和度( $S_m$ )/%	含油孔隙度( $\phi_o$ )/%	( $S_o/S_m$ )/1
油层	>13	>5.8	>25	<60	>22.5	>3.6	>1.2
含水油层	>13	>5.8	20~25	35~60	>22.5	>3.6	1~1.2
油水同层	>11	>3.8	15~20	30~60	>22.5	>3.6	0.5~1
含油水层	>10	>5.8	10~20	39~60	>16.5	<3.6	>0.8
水层	>12	>5.8	<10	<60	>16.5	<3.6	<0.8
干层	<10	<1	-	>70	<13	-	-

### 4.2. $(S_o/S_m) - \phi_0$ 交会图版法

含油饱和度反映了储层孔隙中原油的充满程度，而可动流体体现了储层中可动资源的多少，通过上述参数可以判断储层中可动油相与水相之间的相对关系，进而识别油水层。利用  $S_o/S_m$  与  $\phi_0$  建立交会图(图4)。由图4可以看出，以  $\phi_0 = 1.4 \times (S_o/S_m)$  为分界线，可明确区分孔隙中可动流体的充满程度，再由  $S_o/S_m$  和  $\phi_0$  半定量识别油水层；分界线右下侧孔隙中可动流体含量低，为干层或油干层，其中  $S_o/S_m > 1.5$  时为油干层， $S_o/S_m < 1.5$  时为干层；而分界线以上孔隙中可动流体饱和度较高，其中  $\phi_0 < 3.5\%$  时为水层或含水油层， $\phi_0 > 3.5\%$  且  $S_o/S_m > 1.2$  时为油层， $\phi_0 > 3.5\%$  且  $S_o/S_m < 1.2$  时为油水同层。

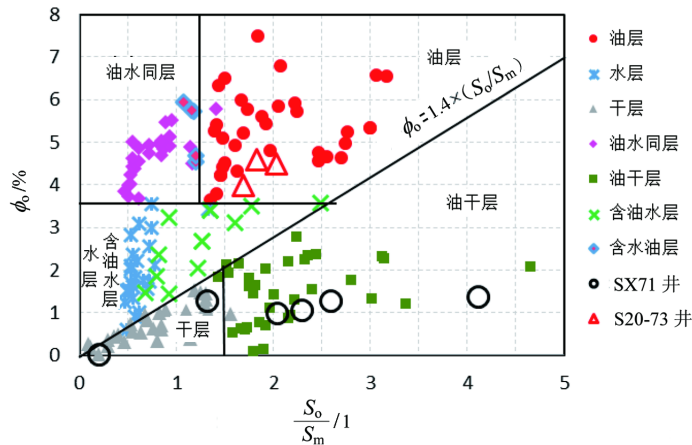


Figure 4. The intersection diagram of  $(S_o/S_m) - \phi_0$  in the 3<sup>rd</sup> segment of funing formation  
图4. SN地区阜三段 $(S_o/S_m) - \phi_0$ 交会图

## 5. 应用实例及效果分析

S20-73井分别在1967.6、1968.6、1969.2 m采用旋转式井壁取心，核磁共振  $\tau_2$  谱干样信号与油信号几乎完全重合，具有典型的油层特征。根据核磁共振解释结果(表3)在 $(S_o/S_m) - \phi_0$ 交会图版中投点，3点均落在油层区域(图4)。对井段1966.8~1970.5 m射孔试油，产油量2.1 m<sup>3</sup>/d，为纯油层，解释结果与试油结果一致。

Table 3. The results of NMS logging interpretation in Wells S20-73 and SX71  
表3. S20-73井、SX71井核磁共振测井解释成果表

井号	井深/m	样品编号	孔隙度/%	渗透率/mD	束缚水饱和度/%	$S_o$ /%	$S_m$ /%	$\phi_0$ /%	储层分类	核磁共振解释结果
S20-73	1967.6	1	27.3	33.29	56.4	28.2	15.42	4.60	II	油层
	1968.6	2	28.5	30.20	59.7	25.3	15.01	3.98	II	
	1969.2	3	27.5	28.44	58.6	27.7	13.68	4.49	II	
SX71	3004.33	1	8.8	0.02	86.2	2.31	11.46	0.02	V	干层 (油干层)
	3004.4	2	9.13	0.04	80.7	13.5	5.85	1.06	V	
	3004.45	3	9.63	0.04	82.5	11.8	5.78	1.97	V	
	3004.56	4	9.02	0.10	72.1	15.8	12.05	1.27	V	
	3004.65	5	8.58	0.04	78.0	17.7	4.30	1.36	V	
	3004.81	6	9.49	0.06	79.1	15.1	5.83	1.27	V	

SX71 井在 3004.33~3004.81 m 井段共分析 6 个岩样, 核磁共振  $\tau_2$  谱孔隙信号为前锋大后峰小的双峰结构, 干样信号和油信号均为左侧单峰结构且具有较大幅度差, 表现出干层特征。根据核磁共振解释结果(表 3)在  $(S_o/S_m) - \phi_o$  交会图版中投点, 4 点落在油干层区, 2 点落在干层区(图 4), 综合解释为干层(油干层)。对井段 3004.3~3005.5 m 试油, 测试无产能, 压裂后抽汲, 产液量  $8.6 \text{ m}^3/\text{d}$ , 全水。

## 6. 结论

1) 根据束缚水饱和度与渗透率的关系, 结合核磁共振  $\tau_2$  谱形态与分布特征, 将 SN 地区储层划分为 5 类, 实现了基于核磁共振  $\tau_2$  谱的储层分类标准。

2) SN 地区低渗储层  $\tau_2$  谱大多呈双峰结构, 其中孔隙信号左偏居多, 反映了该区以微细孔喉为主的孔隙结构特征。低阻油层以双峰  $\tau_2$  谱为主要特征, 主要为 II、III 类储层。

3) 通过核磁共振  $\tau_2$  谱分布特征的定性判别法和  $(S_o/S_m) - \phi_o$  交会图版法的半定量识别法能快速、精细评价 SN 地区低渗储层的流体性质。

## 参考文献

- [1] 王志战, 许小琼, 周宝洁. 孔隙流体核磁共振弛豫特征及油水层识别方法[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(2): 41-44.
- [2] 刘强国, 朱清祥. 录井方法与原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 270-304.
- [3] 丁绍卿, 郭和坤, 刘卫, 等. 核磁共振岩样分析技术在储层评价中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 22-23.

[编辑] 龚丹

**Hans 汉斯**

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2471-7185, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)