

川南龙马溪组页岩核磁渗透率新模型研究

周尚文^{1,2,3}, 薛华庆^{1,2,3}, 郭伟^{1,2,3}, 李晓波^{1,2,3}

(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007; 2. 中国石油非常规油气重点实验室, 河北廊坊 065007;
3. 国家能源页岩气研发(实验)中心, 河北廊坊 065007)

摘要:为了更加快速有效地进行页岩渗透率的测试,以四川盆地南部下志留统龙马溪组页岩为研究对象,进行页岩低场核磁共振和高速离心实验。以脉冲渗透率为标准,对比分析目前常用的4种岩石核磁渗透率模型的相对误差,这4种模型中只有扩展后的SDR模型相对误差较小,其他3种模型误差很大,不适用于页岩核磁渗透率的计算。为了进一步减小页岩核磁渗透率的计算误差,在SDR模型的基础上建立一种新的页岩核磁渗透率的单参数模型。结果表明,新模型相关系数可达到0.967,与脉冲渗透率的相对误差平均为18.31%,证明新模型能更准确地计算页岩的核磁渗透率,为页岩渗透率的测试提供了一种新的快速、无损、有效的实验方法。

关键词:页岩气;核磁共振;核磁渗透率;Coates模型;SDR模型

中图分类号:TE 311 **文献标志码:**A

引用格式:周尚文,薛华庆,郭伟,等.川南龙马溪组页岩核磁渗透率新模型研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):56-61.

ZHOU Shangwen, XUE Huaqing, GUO Wei, et al. A new nuclear magnetic resonance permeability model of shale of Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1): 56-61.

A new nuclear magnetic resonance permeability model of shale of Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin

ZHOU Shangwen^{1,2,3}, XUE Huaqing^{1,2,3}, GUO Wei^{1,2,3}, LI Xiaobo^{1,2,3}

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, China;
2. Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas, CNPC, Langfang 065007, China;
3. National Energy Shale Gas R&D (Experiment) Center, Langfang 065007, China)

Abstract: In order to measure the shale permeability more effectively and quickly, 22 shale samples from Lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin were collected and used in the low field nuclear magnetic resonance (NMR) and high-speed centrifugal experiments. The results show that the relative error of the four rocks NMR permeability model currently used are very large, and is small only in the extended SDR model. Therefore the four conventional NMR models are not suitable for the NMR permeability calculation of shale. In order to reduce the calculation error, a single parameter model of shale NMR permeability is set up based on the SDR model. The correlation coefficient of this new model reaches 0.967, and the average relative error of pulse decay permeability is about 18.31%. It is concluded that the new model can calculate the permeability of gas shale more accurately, which provides a fast, nondestructive and effective experimental methodology for shale permeability test.

Keywords: shale gas; nuclear magnetic resonance (NMR); nuclear magnetic resonance (NMR) permeability; Coates model; SDR model

页岩气主要以游离态和吸附态赋存于页岩储层中。近年来,随着非常规油气勘探开发的深入,页岩由于储集丰富的油气而突破了仅将其作为烃源岩和盖层的传统认识^[1-3]。基于致密油气开发技术和设备的进步,美国在页岩油气资源开发上已经取得了成功,而随着重庆涪陵地区页岩气开发取得重大突破,中国也开始进入页岩气的商业开发阶段。与常规砂岩储层相比,页岩气储层岩性极为致密,主要发育纳米级孔隙,孔隙度一般小于6%,渗透率一般小于 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[4-5]。渗透率是页岩气储层评价、产能计算及开发方案编制所需的关键参数之一,准确获取该参数对于页岩气的勘探开发至关重要^[6-7]。岩石渗透率测试常用的方法有稳态法(气泡法)、非稳态法(压力降落法、脉冲衰减法)、核磁共振等。气泡法和压力降落法较适用于渗透率大于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩样测试,不适用于页岩渗透率的测试。目前主要采用脉冲衰减法测试页岩的渗透率,但是该方法需要制备圆柱型样品并且测试时间较长,导致其测试难度依然较大^[7]。与基于介质渗流的稳态法和非稳态法相比,核磁共振方法可以对岩石渗透率进行快速无损的检测^[8-12]。国内外学者建立了多种岩石核磁渗透率计算模型^[13-21],目前主要采用的是 Coates 模型^[14-15,21]、SDR 模型^[16-17]及其相应的扩展模型^[21-22],但是这些模型主要适用于砂岩和碳酸盐岩的核磁渗透率计算,对于其是否适用

于页岩核磁渗透率的计算研究较少^[18-22]。笔者以四川盆地南部下志留统龙马溪组页岩气储层为研究对象,利用低场核磁共振技术对页岩渗透率进行实验研究。以脉冲衰减法测试的页岩渗透率为标准,分析目前常用的4种核磁渗透率模型与脉冲渗透率的误差,并提出新的页岩核磁渗透率测试模型。

1 实验材料与方法

选取了四川盆地南部龙马溪组的一口页岩气井的22块岩样,其物性资料如表1所示,孔隙度分布为2.67%~7.11%,平均为4.99%;渗透率分布为 $(0.0000615 \sim 0.573) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。主要的实验步骤如下:

(1) 钻取直径2.5 cm的柱塞岩样,烘干,称干重,测量长度和直径。

(2) 测试岩样的氦孔隙度,采用脉冲衰减法测试岩样的渗透率。

(3) 岩样抽真空后,加压饱和模拟地层水,饱和和水后称重并进行核磁共振 T_2 谱测试。主要测试参数为:回波间隔时间100 μs ,等待时间3 000 ms,回波个数1 024,扫描次数32,增益50。

(4) 为了测试样品的可动流体饱和度,分别采用1.38、2.06、2.76 MPa离心力进行高速离心实验,每次离心后称重并进行核磁共振 T_2 谱测试,测量参数与步骤(3)中的参数相同。

表1 岩样物性

Table 1 Petrophysical property of shale samples

序号	样品编号	深度 H/m	氦孔隙度 $\varphi_{\text{He}}/\%$	核磁孔隙度 $\varphi_{\text{NMR}}/\%$	脉冲渗透率 $k_{\text{MD}}/10^{-3} \mu\text{m}^2$	束缚水饱和度 $S_{\text{wi}}/\%$	可动流体饱和度 $S_{\text{wm}}/\%$
1	S1-01	2321.26	5.11	5.35	0.0000615	91.13	8.87
2	S1-02	2323.69	6.60	6.74	0.0009019	85.88	14.12
3	S1-03	2325.84	6.52	6.90	0.0004208	88.17	11.83
4	S1-04	2328.09	4.14	4.84	0.0018908	81.46	18.54
5	S1-05	2329.05	5.41	5.16	0.0027810	79.44	20.56
6	S1-06	2330.96	4.59	4.84	0.0064949	78.95	21.05
7	S1-07	2333.00	5.07	5.31	0.0344322	69.14	30.86
8	S1-08	2335.60	4.37	4.64	0.0088510	69.65	30.35
9	S1-09	2337.30	4.13	3.42	0.0089710	66.57	33.43
10	S1-10	2339.83	3.46	3.17	0.0003251	84.72	15.28
11	S1-11	2341.76	5.59	5.63	0.5727000	55.40	44.60
12	S1-12	2344.37	4.46	4.16	0.4663000	57.37	42.63
13	S1-13	2379.21	4.31	4.22	0.0003753	88.50	11.51
14	S1-14	2381.18	5.80	6.17	0.0003300	85.63	14.37
15	S1-15	2383.26	5.22	4.65	0.0000935	91.91	8.10
16	S1-16	2385.30	6.67	6.18	0.0001632	85.63	14.37
17	S1-17	2387.49	6.90	6.24	0.0003030	89.69	10.32
18	S1-18	2389.37	7.61	6.69	0.0837469	78.60	21.40
19	S1-19	2394.53	5.63	5.36	0.0087371	80.38	19.62
20	S1-20	2398.02	3.03	3.20	0.0014190	72.68	27.32
21	S1-21	2399.96	2.67	3.02	0.0863000	63.29	36.71
22	S1-22	2405.27	3.75	3.91	0.0016910	87.94	12.06

页岩核磁 T_2 谱测试过程中,有机质也会产生一定的核磁共振信号,但由于页岩有机质含量较低,其核磁信号一般可以忽略。此外,页岩中也含有一定量的黄铁矿等顺磁性物质,顺磁性物质的存在会加快水相流体的弛豫过程,进而减小页岩的核磁信号量。页岩中这类铁磁性物质含量很低,其对核磁信号总量的影响一般也可以忽略。

2 核磁渗透率常用模型对比

2.1 4种常用模型

国内外学者已经做了大量的利用低场核磁共振技术计算岩心渗透率的研究,但是这些研究主要是以渗透率较高的砂岩和碳酸盐岩为研究对象,并建立了相应的模型,目前应用在核磁共振岩心分析及测井领域的模型主要有 Coates 模型、SDR 模型及扩展模型。

Coates 模型(模型 1)为

$$k_{\text{NMR}} = \left(\frac{\varphi_{\text{NMR}}}{10} \right)^4 \left(\frac{S_{\text{wm}}}{S_{\text{wi}}} \right)^2 \quad (1)$$

Coates 模型的扩展模型(模型 2)为

$$k_{\text{NMR}} = \left(\frac{\varphi_{\text{NMR}}}{C_1} \right)^{m_1} \left(\frac{S_{\text{wm}}}{S_{\text{wi}}} \right)^{n_1} \quad (2)$$

SDR 模型(模型 3)为

$$k_{\text{NMR}} = C_2 \varphi_{\text{NMR}}^4 T_{2g}^2 \quad (3)$$

SDR 模型的扩展模型(模型 4)为

$$k_{\text{NMR}} = C_3 \varphi_{\text{NMR}}^{m_2} T_{2g}^{n_2} \quad (4)$$

$$T_{2g} = \left(\prod_{i=1}^n T_{2i}^{A_i} \right)^{1/n} \quad (5)$$

式中, k_{NMR} 为核磁渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; φ_{NMR} 为核磁孔隙度; S_{wm} 为可动流体饱和度; S_{wi} 为束缚水饱和度; T_{2g} 为 T_2 几何平均值, ms; C_1 、 C_2 、 C_3 、 m_1 、 m_2 、 n_1 、 n_2 均为模型常数。

2.2 可动流体饱和度确定

Coates 模型以可动流体/不可动流体为基础,可动流体饱和度的测定方法对渗透率的计算结果影响很大。为了保证模型 1、2 计算结果的准确性,本文中采用高速离心的方法来确定页岩样品的可动流体饱和度和束缚水饱和度,实验结果如图 1 所示。

根据 22 块岩样不同离心力离心后的核磁 T_2 谱,可以得到页岩在不同状态的含水饱和度,统计结果如表 2 所示。从表中可以看出,当离心力从 2.06 MPa 增加到 2.76 MPa 时,样品的含水饱和度变化量小于 5%,达到了实验精度要求,认为采用 2.76 MPa 离心力离心后可以较好地建立页岩的束缚水状态。

根据束缚水状态和饱和水状态的核磁 T_2 谱即可计算出可动流体饱和度和束缚水饱和度(表 1),从而应用到 Coates 模型的核磁渗透率计算中。

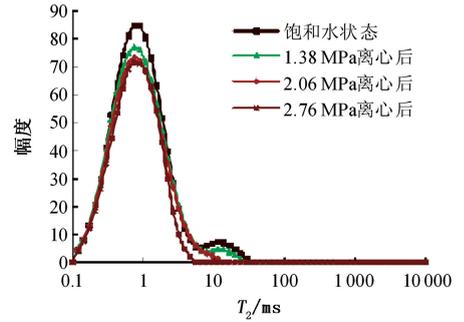


图 1 15 号样品不同离心力离心后核磁 T_2 谱

Fig. 1 NMR T_2 spectrum of S1-15 after centrifugation at different state

表 2 岩心含水饱和度变化量统计

Table 2 Statistics of water saturation change of shale samples

离心力变化量/MPa	含水饱和度变化量/%	平均变化量/%
1.38 ~ 2.06	-4.21 ~ -25.62	-13.63
2.06 ~ 2.76	-1.13 ~ -10.25	-4.15

2.3 实验结果对比

对于模型 1,根据页岩岩样核磁孔隙度及所确定的可动流体饱和度和束缚水饱和度,计算得到的核磁渗透率与脉冲渗透率的对比如图 2(a)所示,两者间的平均相对误差达到 294.68%,部分样品的核磁渗透率与脉冲渗透率不在一个数量级,所以不能采用模型 1 计算页岩的核磁渗透率。

在模型 1 的基础上,把定常数改为变常数后得到模型 2。以脉冲渗透率为基准进行模型 2 的多元回归分析,拟合的结果为 $C_1 = 5.688$, $m_1 = 1.857$, $n_1 = 3.897$,根据模型 2 计算得到的核磁渗透率与脉冲渗透率的对比如图 2(b)所示,两者相关性达到 0.837,相对误差为 63.07%,说明改进后的模型 2 相比模型 1 能更准确地计算页岩的核磁渗透率,但其误差依然较大,并不适合页岩核磁渗透率的精确计算。

对于模型 3,利用相同的方法进行拟合后得到系数 C_2 为 0.000 045,从而计算得到模型 3 的核磁渗透率与脉冲渗透率的对比如图 2(c)所示,两者的相关性仅为 0.251,误差很大,大部分样品的核磁渗透率与脉冲渗透率都不在一个数量级。

对于扩展后得到的模型 4,进行回归分析后得到, $C_3 = 0.000 049$, $m_2 = 1.065$, $n_2 = 10.625$,计算得

到其核磁渗透率与脉冲渗透率的对比如图2(d)所示,两者相关性达到0.916,相对误差减小到31.36%。说明改进后的模型4比模型3能更准确

地计算页岩的核磁渗透率。综上所述,在4种常用的核磁渗透率计算模型中,只有模型4能较准确地计算页岩的核磁渗透率,但误差依然较大。

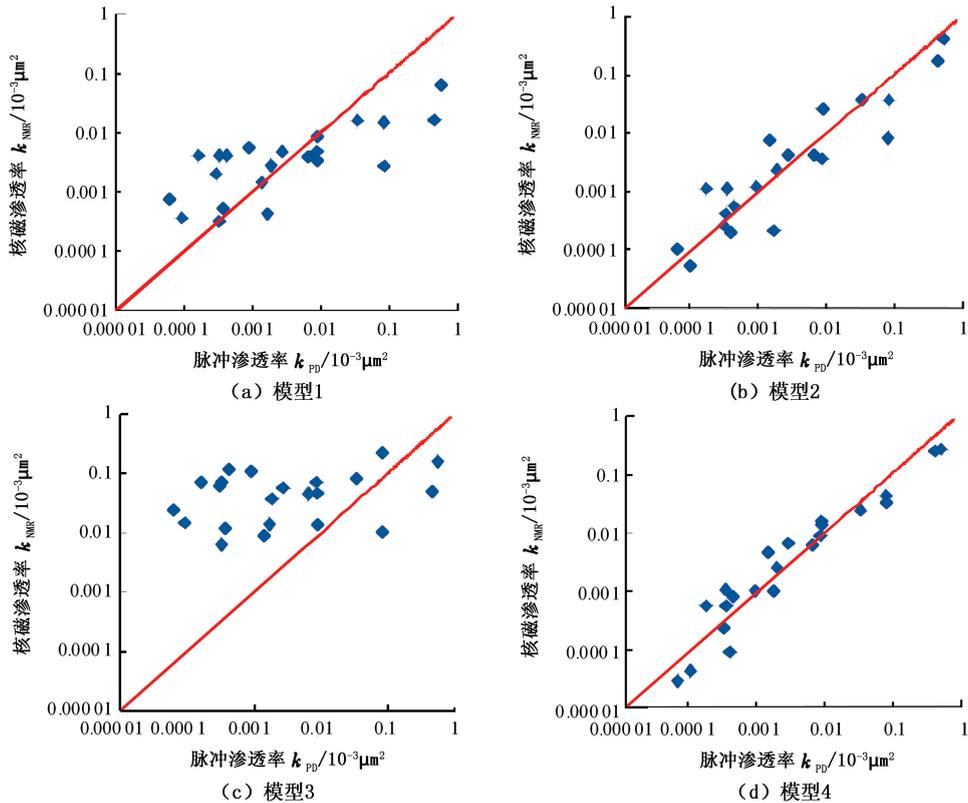


图2 各模型页岩核磁渗透率与脉冲渗透率对比

Fig. 2 Comparison between NMR permeability based on different models and pulse decay permeability

3 页岩核磁渗透率新模型

为了进一步减小页岩核磁渗透率测试误差,在模型4的基础上,采用单参数“ T_{2g} ”建立新的核磁渗透率计算模型,如图3所示。从图中可以看出,页岩的渗透率与 T_{2g} 几何平均值呈很好的正相关性,相关系数达到0.967,该新模型可以表示为

$$k_{\text{NMR}} = 8 \times 10^{-8} \exp(8.1734 T_{2g}) \quad (6)$$

与上述几种模型相比,该新模型虽然只有一个参数,但是其相关性更好、误差更小。主要有4个方面的原因:①在上述的4种常用模型中,都包含有孔隙度参数。与砂岩等常规油气储层相比,页岩气储层中主要发育大量纳米级的有机质孔隙,其孔隙结构与渗流规律更为复杂,导致页岩核磁共振测试过程中很难准确测试其孔隙度值,核磁孔隙度的不准确直接导致上述4种常用模型不能适用于页岩核磁渗透率计算。②大量的实验研究证明,致密岩石的孔隙度和渗透率不一定成正比,孔隙度大的岩心由于孔喉连通性的限制,其渗透率不一定大。特别是

对于页岩,其渗透率与孔隙度之间的相关性更差,一定程度上导致了上述4种常用模型不能够准确地计算页岩的核磁渗透率。③页岩可动流体和不可动流体含量的测试不够准确。页岩流体可动性差,离心实验时驱替出来的水量很小,实验过程中样品表面水的擦拭以及与空气的接触都会影响可动流体的测试结果,导致其误差增大。④在核磁共振意义上, T_{2g} 代表页岩核磁 T_2 谱的形态;在油层物理意义上, T_{2g} 代表页岩孔隙中水的分布状态。页岩饱和水的过程就是水渗透进入孔隙的过程,所以页岩孔隙中水的分布状态代表着其渗透性能的好坏,从而使得渗透率与 T_{2g} 之间有很好的相关关系。

由于页岩渗透率基本都在 $(10^{-5} \sim 10^{-6}) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的数量级,当核磁渗透率计算结果与脉冲渗透率在同一数量级并且相对误差小于20%时,笔者认为其计算结果即为可信的。该新模型的相对误差平均为18.31%,说明利用该新模型能更准确地计算页岩的核磁渗透率。

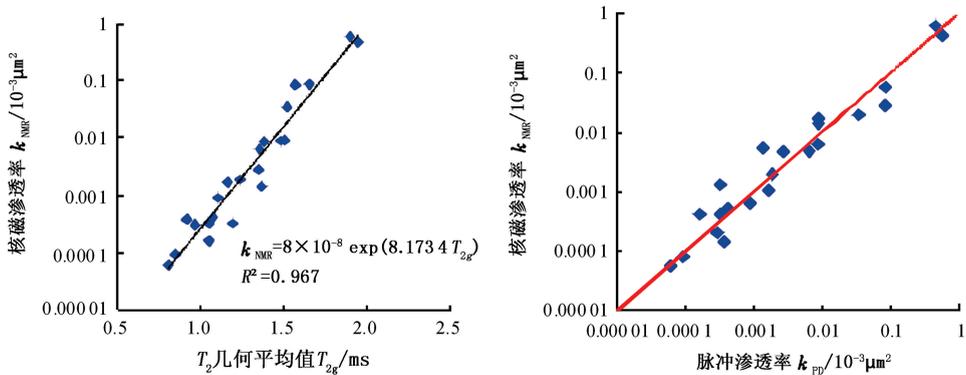


图3 页岩核磁渗透率新模型建立及与脉冲渗透率对比

Fig. 3 New NMR permeability model and its comparison with pulse decay permeability

4 结论

(1)以页岩的脉冲渗透率为标准,对比分析了目前常用的4种岩石核磁渗透率模型的相对误差,这4种模型中只有扩展后的SDR模型相对误差较小,其他3种模型误差太大,不适用于页岩核磁渗透率的计算。

(2)在SDR模型的基础上,建立了页岩核磁渗透率的单参数“ T_{2g} ”模型,该模型相关系数达到0.967,与脉冲渗透率的相对误差平均为18.31%,说明利用该新模型能更准确地计算页岩的核磁渗透率。

(3)利用该模型,结合核磁共振技术可以对页岩渗透率进行准确测试,为页岩渗透率的测试提供了一种新的快速、无损、有效的实验方法,该方法可以应用到核磁共振测井和录井领域中。

参考文献:

- [1] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale gas systems: the Mississippian Barnett shale of north central Texas as one model for thermogenic shale gas assessment [J]. AAGP Bulletin, 2007, 91(4): 475-499.
- [2] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848-861.
- [3] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 775-782.
CHEN Shangbin, ZHU Yanming, WANG Hongyan, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas res-

ervoir in the southern margin of Sichuan Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2011, 32(5): 775-782.

- [4] 蒲泊伶,董大忠,吴松涛,等. 川南地区下古生界海相页岩微观储集空间类型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 19-25.
PU Boling, DONG Dazhong, WU Songtao, et al. Microscopic space types of Lower Paleozoic marine shale in southern Sichuan Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 19-25.
- [5] 吴伟,刘惟庆,唐玄,等. 川西坳陷富有机质页岩孔隙特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 1-8.
WU Wei, LIU Weiqing, TANG Xuan, et al. Organic rich shale pore characteristics of Western Sichuan Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 1-8.
- [6] 陈卫忠,杨建平,伍国军,等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 236-243.
CHEN Weizhong, YANG Jianping, WU Guojun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 236-243.
- [7] 孙军昌,杨正明,郭和坤,等. 致密储层渗透率测试的稳态与非稳态法对比研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1010-1016.
SUN Junchang, YANG Zhengming, GUO Hekun, et al. Comparative study of tight reservoir permeability using steady-state and unsteady-state methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1010-1016.
- [8] TIMUR A. Pulsed nuclear magnetic resonance studies of porosity, movable fluid, and permeability of sandstones [J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21(6): 775-786.
- [9] JEROSCH H M, THOMANN H. Permeability determina-

- tion from NMR relaxation measurements for fluids in porous media [J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 1995, 13(1):XII.
- [10] MICHAEL J H, HANS T. Permeability determination from NMR relaxation measurements for fluids in porous media [J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 1995, 13(6):XIV.
- [11] 彭石林,叶朝辉,刘买利. 多孔介质渗透率的NMR测定[J]. *波谱学杂志*, 2006, 23(2):271-282.
PENG Shilin, YE Chaohui, LIU Maili. Measurement of permeability of porous rock using NMR T_2 relaxation distribution [J]. *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2006, 23(2):271-282.
- [12] 肖忠祥,肖亮. 基于核磁共振测井和毛管压力的储层渗透率计算方法[J]. *原子能科学技术*, 2008, 42(10):868-871.
XIAO Zhongxiang, XIAO Liang. Method to calculate reservoir permeability using nuclear magnetic resonance logging and capillary pressure data [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, 42(10):868-871.
- [13] KENYON W E, DAY P I, STRALEY C, et al. A three-part study of NMR longitudinal relaxation properties of water-saturated sandstones [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1988, 3(1):622-636.
- [14] COATES G R, DUMANIOR J L. A new approach to improved log derived permeability [J]. *The Log Analyst*, 1974, 15(1):17-31.
- [15] COATES G R, PEVERARO R C A, HARDWICK A, et al. The magnetic resonance imaging log characterized by comparison with petrophysical properties and laboratory core data [R]. SPE 22723, 1991.
- [16] RICHARD S. Coates and SDR permeability: two variations on the same theme [J]. *Petrophysics*, 1998, 43(1):38-46.
- [17] COATES G R, XIAO Lizhi, MANFRED G P. NMR logging principles and applications [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1999.
- [18] 王光海,李高明. 用核磁共振测井确定渗透率的原理和方法分析[J]. *测井技术*, 2001, 25(2):101-104.
WANG Guanghai, LI Gaoming. Method and principle analysis of permeability determining by NMR logging [J]. *Well Logging Technology*, 2001, 25(2):101-104.
- [19] 常文会,赵永刚,华新军. 用核磁共振测井技术评价储层渗透率特性[J]. *测井技术*, 2005, 29(6):528-530.
CHANG Wenhui, ZHAO Yonggang, HUA Xinjun. Reservoir permeability evaluation with NMR technology [J]. *Well Logging Technology*, 2005, 29(6):528-530.
- [20] 周灿灿,程相志,司兆伟,等. 核磁共振自旋回波串确定渗透率方法探讨[J]. *测井技术*, 2002, 26(2):123-126.
ZHOU Cancan, CHENG Xiangzhi, SI Zhaowei, et al. Permeability determination with NMR echo trains [J]. *Well Logging Technology*, 2002, 26(2):123-126.
- [21] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [22] 黄乔松,赵文杰,杨济泉,等. 核磁共振渗透率模型研究与应用[J]. *青岛大学学报(自然科学版)*, 2004, 17(4):37-40.
HUANG Qiaosong, ZHAO Wenjie, YANG Jiquan, et al. Research and application of NMR permeability models [J]. *Journal of Qingdao University (Edition of Natural Science)*, 2004, 17(4):37-40.

(编辑 修荣荣)