

# 磁场强度及磁场梯度 对岩心核磁共振 $T_2$ 谱测量结果的影响

刘洋, 张官, 覃莹瑶, 张家成, 李森  
长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100

**摘要:**核磁共振测井仪器一般在共振频率为 2 MHz 的均匀场或共振频率小于 1 MHz 的梯度场中测量储层流体的核磁信号, 而实验室核磁共振岩心分析仪的共振频率除了常用的 2 MHz 外, 对于页岩等致密储层常会用到 12 MHz 或 21 MHz 的设备进行实验测量。为确定磁场强度和磁场梯度对核磁共振测量结果的影响程度, 系统研究了饱和水状态下的砂砾岩、页岩核磁共振岩心实验对磁场强度和磁场梯度的敏感性, 分析了不同岩样的  $T_2$  谱形态、位置、核磁孔隙度、 $T_2$  几何均值与磁场强度、磁场梯度的关系。实验结果显示, 均匀场下, 砂砾岩样品对磁场强度的变化非常敏感, 而页岩样品对磁场强度变化的敏感性相对较弱; 外部梯度场的存在会使砂砾岩和页岩的短弛豫信息缺失, 导致核磁信号无法被完全测量。研究表明, 利用核磁共振岩心实验刻度核磁共振测井解释参数时, 若实验室核磁共振岩心分析仪与核磁共振测井仪的磁场强度或磁场梯度存在较大差异, 需对实验测量结果进行校正。

**关键词:**核磁共振; 磁场强度; 磁场梯度;  $T_2$  谱; 砂砾岩; 页岩

中图分类号: TE135

文献标识码: A

## Effects of magnetic field intensity and gradient on measurement results of core nuclear magnetic resonance $T_2$ spectrum

LIU Yang, ZHANG Gong, QIN Yingyao, ZHANG Jiacheng, LI Sen

Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China

**Abstract:** Nuclear magnetic resonance (NMR) logging instruments generally measure the NMR signal of reservoir fluid in a uniform field with a resonance frequency of 2 MHz or a gradient field with a resonance frequency of less than 1 MHz. For laboratory NMR core analyzers, in addition to the commonly used 2 MHz, the resonance frequency of 12 MHz or 21 MHz is often used for experimental measurement of tight reservoirs such as shale. In order to determine the effects of magnetic field intensity and gradient on the NMR measurement results, the sensitivity of the magnetic field intensity and gradient of the core experiments of glutenite and shale cores under water-saturated state was systematically studied, and the relationship between the  $T_2$  spectrum shape, position, nuclear magnetic porosity,  $T_2$  geometric mean and the magnetic field intensity and gradient of different rock samples was analyzed. The experimental results show that under the uniform field, glutenite samples are very sensitive to the change of magnetic field intensity, while shale samples are less sensitive. The existence of external gradient field will make the short relaxation information of glutenite and shale missing, resulting in that the NMR signal cannot be measured completely. When the NMR core experiment is used to calibrate the interpretation parameters of NMR logging, the experimental measurement results must be corrected if there is a large difference in the magnetic field intensity or gradient between the laboratory NMR core analyzer and the NMR logging instrument.

**Key words:** nuclear magnetic resonance; magnetic field intensity; magnetic field gradient;  $T_2$  spectrum; glutenite; shale

核磁共振测井以外加磁场与氢核的相互作用为基础, 可实现储层孔隙流体特征的直接测量, 能

提供孔径分布、渗透率以及有效孔隙度、自由流体孔隙度、束缚流体孔隙度等信息<sup>[1]</sup>。相比于常规测

井,核磁共振测井具有独特优势<sup>[2]</sup>。影响核磁共振弛豫过程的因素主要包括孔隙流体性质、孔径大小分布、磁化系数差异、顺磁物质、流体性质等<sup>[3]</sup>。除此之外,在油气藏勘探开发过程中,井眼环境复杂<sup>[3]</sup>,且共振频率过高时,核磁信号衰减过快难以充分采集储层弛豫信息,导致核磁共振测井仪器的磁体设计受到约束。一般在共振频率为 2 MHz 的均匀场<sup>[4]</sup>或共振频率小于 1 MHz 的梯度场<sup>[5]</sup>中激发储层流体的核磁信号<sup>[6]</sup>,而实验室核磁共振岩心分析仪的共振频率除了常用的 2 MHz 外,对于页岩等致密储层常采用共振频率为 12 MHz 或 21 MHz 的设备进行实验测量<sup>[7-8]</sup>,不同测量场景中的磁场强度或磁场梯度存在较大差异。

磁场强度对核磁共振测量结果的影响,前人已进行了部分研究。谢然红等<sup>[9]</sup>发现稠油的  $T_1/T_2$  比值随核磁共振测量仪器共振频率的增大而增大;KAUSIK 等<sup>[10]</sup>通过实验发现,400 MHz 下的高场核磁共振  $T_2-T_1$  二维谱,能够利用纵向弛豫时间  $T_1$  对频率的依赖性,对沥青和黏土束缚水信号进行分离,而在低频下二者区分不明显;TROMP 等<sup>[11]</sup>发现纵向弛豫时间的对数平均值在低共振频率下近似稳定,而在较高频率下随拉莫尔频率的增加而增加。前人的实验研究提出了不同的影响机理。KORB<sup>[12]</sup>提出有限表面二维扩散模型,并认为不同磁场强度下体相流体的平动扩散相关时间( $\tau_m$ )和固体表面流体分子的表面扩散时间( $\tau_s$ )二者比值存在较大差异;CUI 等<sup>[13]</sup>认为磁场强度的增加,加快了孔隙内部岩石骨架表面流体分子的弛豫速率。为得到不同磁场强度下弛豫时间的转化关系,覃莹瑶等<sup>[14]</sup>通过实验研究定量刻画了页岩样品各弛豫组分在不同磁场强度下  $T_2-T_1$  二维谱谱峰位置的变化规律。但外部磁场梯度对核磁共振测量结果的影响尚无结论。为了系统研究磁场强度和磁场梯度对核磁共振岩心分析实验结果的影响,本文选取具有代表性的砂砾岩、页岩样品,在 1 MHz 梯度场、1 MHz 均匀场、2 MHz 均匀场和 21 MHz 均匀场 4 种不同磁场强度、磁场梯度组合下进行核磁共振实验,分析不同磁场强度和梯度下 2 种岩心核磁共振  $T_2$  谱形态、位置、核磁视孔隙度、 $T_2$  几何均值等主要实验结果的差异,对砂砾岩、页岩核磁共振测量结果在不同磁场强度和磁场梯度下的响应规律进行总结。

## 1 核磁共振基本原理

图1描述了岩石孔隙流体的横向弛豫机制,横

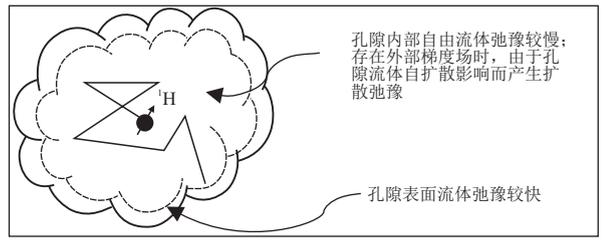


图 1 岩石孔隙流体的横向弛豫机制

Fig.1 Transverse relaxation mechanism of pore fluid

向弛豫时间  $T_2$  是由 3 种弛豫过程组成,用公式表示如下:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2D}} \quad (1)$$

式中: $T_{2B}$  为体弛豫时间,ms; $T_{2S}$  为表面弛豫时间,ms; $T_{2D}$  为扩散弛豫时间,ms。

体弛豫  $T_{2B}$  是指多孔介质孔隙内流体的固有弛豫机制,其弛豫快慢只与流体的物理属性有关,而在岩石骨架和流体接触的特定区域内,流体分子的运动速度要快于自由状态,即  $1/T_{2S} \gg 1/T_{2B}$ ,此时体弛豫速率可以忽略不计<sup>[15]</sup>。

表面弛豫  $T_{2S}$  是与多孔介质孔隙大小相关的弛豫机制,用公式表示为:

$$\frac{1}{T_{2S}} = \rho \frac{S}{V} \quad (2)$$

式中: $\rho$  为岩石表面弛豫率<sup>[16]</sup>, $\mu\text{m/s}$ ;  $S$  为岩石孔隙总表面积, $\text{cm}^2$ ;  $V$  为孔隙体积, $\text{cm}^3$ 。下列公式描述了氢原子核—电子相互作用对表面弛豫速率的影响<sup>[17]</sup>:

$$\frac{1}{T_{2s}} = \frac{4}{9} \gamma_I^2 \gamma_s^2 h^2 S(S+1) [J_L^0(0) + \frac{1}{4} J_L^0(\omega_I - \omega_s) + \frac{3}{4} J_L^1(\omega_I) + \frac{3}{2} J_L^1(\omega_s) + \frac{3}{2} J_L^2(\omega_I + \omega_s)] \quad (3)$$

式中: $\gamma_I$ 、 $\gamma_s$  分别表示氢原子核和电子的旋磁比, $\text{rad}/(\text{s} \cdot \text{T})$ ;  $h$  为普朗克常量; $S$  为电子自旋; $\omega_I$ 、 $\omega_s$  分别表示氢原子核与电子的共振频率,MHz; $J_L^{0,1,2}(\omega)$  为谱密度函数<sup>[18]</sup>。式(3)表明横向表面弛豫速率与共振频率存在依赖性。

在梯度磁场下,采用较长的回波间隔、利用 CPMG 序列进行横向弛豫时间测量时,孔隙流体会表现出显著的扩散弛豫特性<sup>[19]</sup>,加快了弛豫过程,称之为扩散弛豫,用公式表示为:

$$\frac{1}{T_{2D}} = \frac{D(\gamma GT_E)^2}{12} \quad (4)$$

式中: $D$  为流体扩散系数, $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\gamma$  为旋磁比; $T_E$  为

回波间隔<sup>[20]</sup>, ms;  $G$  为磁场梯度<sup>[21]</sup>, Gs/cm。表明横向弛豫时间与磁场梯度有关。

综上所述,核磁共振实验设备的共振频率和外加梯度磁场的存在,对孔隙流体弛豫过程均存在影响。为厘清不同磁场强度和磁场梯度下不同岩性样品核磁共振  $T_2$  谱测量结果的差异,设计了如下实验方案。

## 2 实验方案

实验所用样品中的砂砾岩岩心、页岩岩心分别取自塔里木油田、新疆油田,岩心基础参数如表 1 所示。

为了研究磁场强度、磁场梯度对砂砾岩、页岩核磁共振测量结果的影响,选用 3 台共振频率不同的核磁共振岩心分析仪,共振频率分别为 1 MHz (磁场强度 0.025 T)、2 MHz (磁场强度 0.05 T)、21 MHz (磁场强度 0.5 T)。其中 1 MHz 仪器为产自美国 NUMAR 公司的 CoreSpec-1000 型岩心核

磁共振分析仪,2 MHz 和 21 MHz 仪器均产自苏州纽迈分析仪器股份有限公司。通过在共振频率为 1 MHz 的核磁共振岩心分析仪中增加两片磁体,适当调节片状磁体的距离,使得磁场中心共振频率不变,并形成 16.5 Gs/cm 的恒定梯度磁场(图 2)。

图 2a 为均匀磁场示意图,共振频率约 1 MHz,磁场梯度为 0;图 2b 是通过增加片状磁体产生的梯度磁场,中心共振频率约为 1 MHz,磁场梯度值  $G$  为 16.5 Gs/cm。

将样品进行清洗、烘干后,进行抽空加压饱和处理<sup>[22]</sup>,得到饱水样品。采用 CPMG 序列对饱水状态下的 4 块样品进行核磁共振实验,具体测量参数如表 2 所示。

为了避免采集参数对核磁共振实验结果造成影响,4 种磁场强度、梯度组合(1 MHz 梯度场、1 MHz 均匀场、2 MHz 均匀场、21 MHz 均匀场)下的等待时间、回波间隔、回波个数等采集参数均设置一致。为确保测量结果具有较为一致的信噪比,

表 1 核磁共振实验岩心基础参数

Table 1 Basic parameters of NMR experimental core

岩心编号	岩性	长度/cm	直径/cm	取样深度/m	气测孔隙度/%
1 号	砂砾岩	3.108 0	2.474 0	4 067.32	7.96
2 号	砂砾岩	3.727 3	2.531 7	4 071.44	9.22
3 号	页岩	2.301 3	2.489 0	3 034.20	5.76
4 号	页岩	2.417 0	2.489 5	3 578.50	4.63

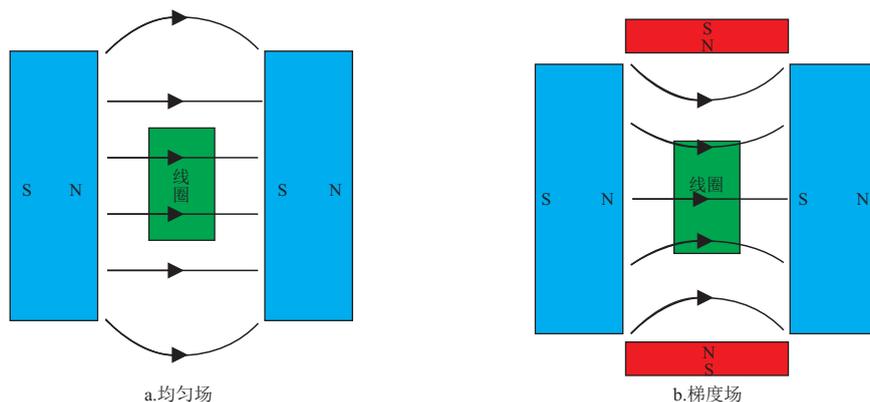


图 2 1 MHz 核磁共振岩心分析仪磁场示意

Fig.2 Magnetic field diagram of 1 MHz NMR core analyzer

表 2 核磁共振实验采集参数

Table 2 Parameters acquired by NMR experiment

磁场环境	等待时间( $T_w$ )/ms	回波间隔( $T_E$ )/ms	回波个数(NECH)	扫描次数(SCAN)
1 MHz 梯度场	6 000	0.2	1 600	2 048
1 MHz 均匀场	6 000	0.2	1 600	256
2 MHz 均匀场	6 000	0.2	1 600	256
21 MHz 均匀场	6 000	0.2	1 600	32

4 种磁场强度、磁场梯度组合下的扫描次数分别设置为 2 048, 256, 256, 32。

### 3 实验结果分析

图 3 为 4 块饱水样品在 1 MHz 梯度场、1 MHz 均匀场、2 MHz 均匀场、21 MHz 均匀场 4 种磁场强度、磁场梯度组合下的  $T_2$  谱曲线。从实验结果可直观看出,磁场强度和磁场梯度变化对核磁共振岩心分析实验测量结果存在较大影响,并且砂砾岩、页岩的  $T_2$  谱测量结果对磁场强度变化的敏感性存在显著差异。磁场强度的变化和磁场梯度的存在,主要对样品  $T_2$  谱分布形态、位置以及  $T_2$  谱曲线与时间轴的包络面积(即核磁视孔隙度)等造成影响。

#### 3.1 磁场强度、梯度对 $T_2$ 谱形态的影响

样品在不同磁场强度、梯度下的饱水样  $T_2$  分布谱形态存在较大差异(图 3),表 3 为 4 块样品在 1 MHz 梯度场、1 MHz 均匀场、2 MHz 均匀场、21 MHz 均匀场 4 种磁场强度、磁场梯度组合下的  $T_2$  谱形态描述。

对于 1, 2 号砂砾岩样品,均匀场下,1 MHz 下饱水样  $T_2$  谱为多峰,2 MHz 下饱水样  $T_2$  谱大致呈双峰分布,21 MHz 下饱水样  $T_2$  谱呈左右峰占比大致相当的“梯形”分布。随着共振频率的增大,  $T_2$  谱形态变化明显,谱峰幅度有所降低,且  $T_2$  小于 1 ms 的组分占比增大。增加外部梯度场之后,  $T_2$  谱分布形态明显变窄。

表 3 核磁共振实验样品在不同磁场强度、梯度下的  $T_2$  谱形态

Table 3  $T_2$  spectrum shape of NMR experimental samples in different magnetic field intensities and gradients

样品编号	1 MHz 梯度场	1 MHz 均匀场	2 MHz 均匀场	21 MHz 均匀场
1	双峰	双峰	双峰	梯形
2	双峰	三峰	双峰	梯形
3	双峰(左、右峰占比相当)			
4	双峰(以左峰为主,右峰占比较小)			

对于 3, 4 号页岩样品,其饱水样  $T_2$  谱均为谱峰较为独立、左右峰区分明显的双峰分布,说明页岩孔隙结构复杂,孔隙非均质性较强。在 4 种不同的磁场强度和磁场梯度中,页岩样品  $T_2$  谱左峰幅度变化较小,右峰幅度随共振频率的增大有所降低,但总体来看其  $T_2$  谱分布形态在不同磁场强度、磁场梯度下大致相同,均呈现双峰特征。

#### 3.2 磁场强度、梯度对 $T_2$ 谱位置的影响

由于砂砾岩样品饱水样  $T_2$  谱谱峰不易区分,定义其平分  $T_2$  谱分布曲线包络面积的横向弛豫时间为半弛豫时间描述其  $T_2$  谱总体位置,对比饱水砂砾岩在不同磁场强度、磁场梯度下的  $T_2$  谱位置变化特征。表 4 记录了砂砾岩样品在不同磁场强度、磁场梯度下的  $T_2$  谱半弛豫时间及曲线起始时间和终止时间。

对于砂砾岩样品,在均匀场下,随着共振频率

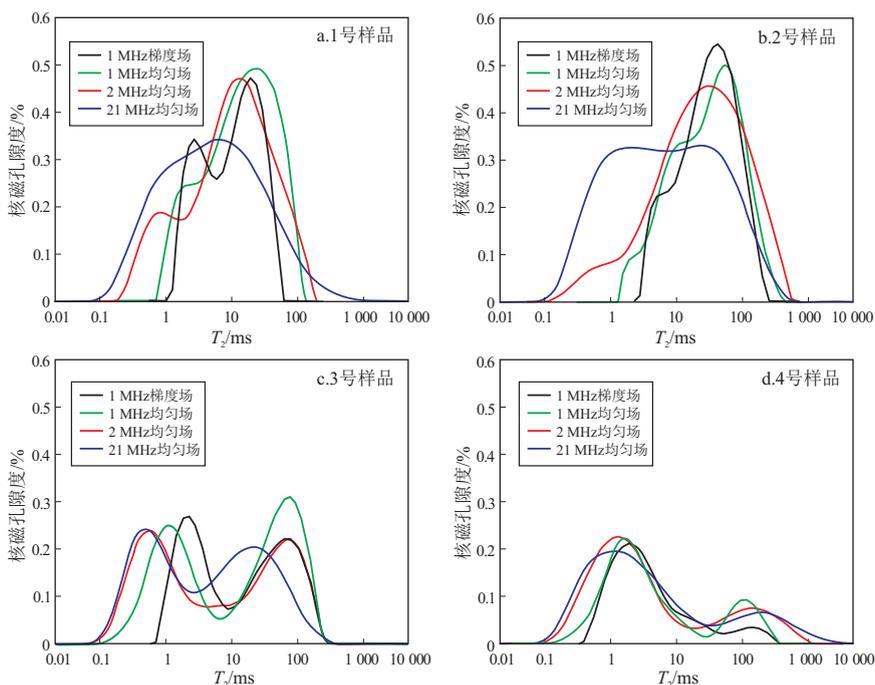


图 3 核磁共振实验中 4 块饱水样品在不同磁场强度、梯度下的  $T_2$  谱测量结果

Fig.3  $T_2$  spectrum results of four water-saturated samples in different magnetic field intensities and gradients in NMR experiment

表 4 核磁共振实验砂砾岩样品在不同磁场强度、梯度下的  $T_2$  谱位置

Table 4  $T_2$  spectrum positions of NMR experimental glutenite samples in different magnetic field intensities and gradients

岩心 编号	1 MHz 梯度场			1 MHz 均匀场			2 MHz 均匀场			21 MHz 均匀场		
	半弛豫 时间	起始 时间	终止 时间	半弛豫 时间	起始 时间	终止 时间	半弛豫 时间	起始 时间	终止 时间	半弛豫 时间	起始 时间	终止 时间
1	10.50	0.80	80.31	13.90	0.52	193.07	10.16	0.11	299.36	4.12	0.06	2 154.44
2	29.40	1.93	372.76	33.42	1.00	719.69	24.19	0.06	896.15	5.78	0.05	1 115.88

表 5 核磁共振实验页岩样品在不同磁场强度、梯度下的  $T_2$  谱谱峰位置

Table 5  $T_2$  peak positions of NMR experimental shale samples in different magnetic field intensities and gradients

岩心 编号	1 MHz 梯度场		1 MHz 均匀场		2 MHz 均匀场		21 MHz 均匀场	
	左峰	右峰	左峰	右峰	左峰	右峰	左峰	右峰
3	1.93	80.3	0.80	100	0.42	100	0.33	26.8
4	1.55	193.1	1.25	155.1	1.0	193.1	0.80	299.4

的增大,其饱水样  $T_2$  谱总体位置向短弛豫时间方向移动,  $T_2$  谱起始时间减小,终止时间增大,展布范围变宽。增加外部梯度场之后,  $T_2$  谱总体位置仍向短弛豫方向移动,但起始时间增大,终止时间减小,展布范围明显变窄。

表 5 记录了页岩样品在不同磁场强度、梯度下  $T_2$  谱左峰、右峰所对应的横向弛豫时间位置。对于页岩样品,均匀场下,随着共振频率的增大,  $T_2$  谱谱峰位置向短弛豫方向移动,不同共振频率下的  $T_2$  谱起始时间大致相同。增加外部梯度场后,  $T_2$  谱谱峰位置向长弛豫方向移动,且起始时间明显增大,  $T_2$  谱展布范围变窄。外部梯度场的存在加快了弛豫信号的衰减速率,在仪器发射与接收射频脉冲的间隔内短弛豫信号已衰减完毕,导致无法实现对前端短弛豫信号的有效记录,横向弛豫的起始时间增大。

### 3.3 磁场强度、梯度对核磁视孔隙度的影响

孔隙度是储层评价的重要参数之一,根据回波数据经过标准样品刻度之后,得到 4 块样品在不同磁场强度、磁场梯度下的核磁视孔隙度<sup>[23]</sup>测量结果。图 4 所示为样品气测孔隙度与 1 MHz 均匀场下测量得到的核磁视孔隙度对比,2 种方法测量得到的孔隙度误差在 0.5% 以内,二者基本一致。

以磁场强度、磁场梯度组合为横坐标、核磁视孔隙度为纵坐标,将不同样品的核磁视孔隙度绘制到坐标系当中(图 5)。在 1 MHz 梯度场、1 MHz 均匀场、2 MHz 均匀场和 21 MHz 均匀场下,1 号样品的核磁视孔隙度分别为 6.18%、8.32%、7.26%、7.22%; 2 号样品的核磁视孔隙度分别为 6.58%、9.26%、8.78%、7.70%; 3 号样品的核磁视孔隙度分

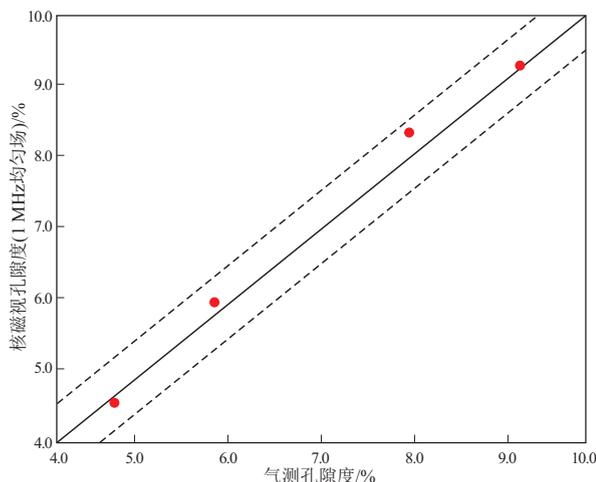


图 4 核磁共振实验样品的气测孔隙度与核磁视孔隙度对比  
Fig.4 Comparison of gas porosity and nuclear magnetic apparent porosity of NMR experimental samples

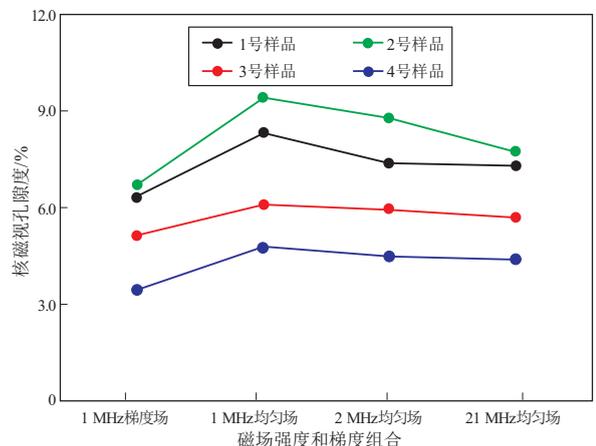


图 5 核磁共振实验样品在不同磁场强度、梯度下的核磁视孔隙度对比  
Fig.5 Nuclear magnetic apparent porosity comparison of NMR experimental samples in different magnetic field intensities and gradients

别为 4.92%, 5.94%, 5.81%, 5.52%; 4 号样品的核磁视孔隙度分别为 3.52%, 4.52%, 4.25%, 4.14%。均匀场下, 随着共振频率的增加, 砂砾岩样品的核磁视孔隙度测量结果有所减小; 页岩样品的核磁视孔隙度偏差在 0.5% 以内, 共振频率的变化对页岩核磁视孔隙度无明显影响。增加外部梯度场之后, 孔隙流体弛豫信号的衰减速率加快, 砂砾岩和页岩样品的核磁视孔隙度均明显降低。

磁场强度增大时, 由于岩石骨架与孔隙流体磁化系数的差异, 使得孔隙内部产生了与磁场强度成正比的内部梯度场, 加快了弛豫速率, 部分短弛豫信号无法被充分采集而导致核磁孔隙度测量结果降低。且由于页岩孔隙为微孔、纳米级孔隙, 内部梯度场导致的扩散弛豫微弱; 而砂砾岩的孔隙尺寸大, 内部梯度场导致的扩散弛豫更为显著, 导致磁场强度增大时砂砾岩的核磁视孔隙度测量结果较页岩变化更为显著。

存在外部梯度磁场时, 孔隙内部流体受自扩散效应的影响, 产生扩散弛豫, 孔隙流体的弛豫速率加快, 从而使得短弛豫信号在仪器发射与接收射频脉冲的时间间隔内已衰减完毕, 导致无法实现对前短弛豫信号的有效采集, 核磁视孔隙度降低。

### 3.4 磁场强度、梯度对 $T_2$ 几何均值的影响

作为定量描述  $T_2$  谱中心位置的参数之一<sup>[24]</sup>,  $T_2$  几何均值 ( $T_{2LM}$ ) 经常用来表示  $T_2$  分布的整体特征, 核磁共振实验得到了不同磁场强度、磁场梯度下的  $T_2$  几何均值测量结果, 并以磁场强度、磁场梯度组合为横坐标,  $T_2$  几何均值为纵坐标, 绘制了样品  $T_2$  几何均值 ( $T_{2LM}$ ) 的变化情况 (图 6)。

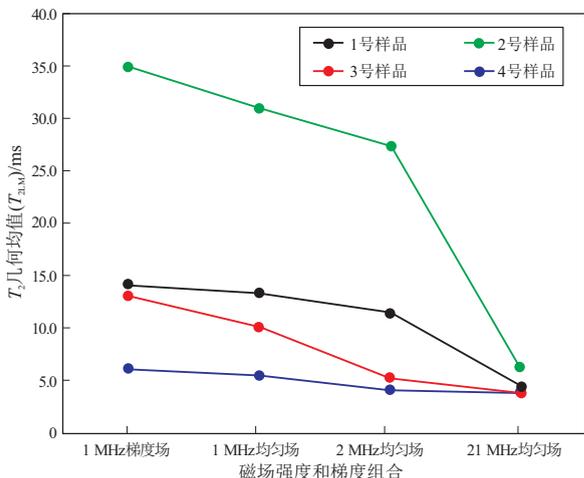


图6 核磁共振实验样品在不同磁场强度、磁场梯度下的  $T_2$  几何均值对比

Fig.6  $T_2$  geometric mean comparison of NMR experimental samples in different magnetic field intensities and gradients

在 1 MHz 梯度场、1 MHz 均匀场、2 MHz 均匀场和 21 MHz 均匀场下, 1 号样品的  $T_2$  几何均值分别为 14.14, 13.29, 11.32, 4.27 ms; 2 号样品的  $T_2$  几何均值分别为 34.89, 30.93, 27.47, 6.23 ms; 3 号样品的  $T_2$  几何均值分别为 13.03, 10.03, 5.18, 3.83 ms; 4 号样品的  $T_2$  几何均值分别为 6.08, 5.37, 4.05, 3.90 ms。页岩样品的  $T_2$  几何均值普遍低于砂砾岩样品的测量结果。在均匀场下, 随着共振频率的增大, 砂砾岩和页岩样品的  $T_2$  几何均值测量结果均减小; 增加外部梯度场后, 砂砾岩和页岩样品的  $T_2$  几何均值增大, 且不同磁场强度、磁场梯度下砂砾岩  $T_2$  几何均值的差异更加明显, 页岩  $T_2$  几何均值测量结果变化幅度较小。

## 4 结论

(1) 在核磁共振岩心分析实验中, 磁场强度、磁场梯度的变化会从分布形态、位置、核磁视孔隙度等方面对样品  $T_2$  谱测量结果产生影响。

(2) 均匀场下, 砂砾岩样品  $T_2$  谱对磁场强度的变化非常敏感, 随着磁场强度的增大, 砂砾岩  $T_2$  谱形态变化明显,  $T_2 < 1$  ms 组分占比增大, 展布范围变宽, 且磁场强度较大时, 砂砾岩  $T_2$  谱右峰幅度有所降低并趋于“梯形”分布, 核磁视孔隙度明显降低。页岩样品对磁场强度的变化敏感性相对较弱, 随着磁场强度的增大,  $T_2$  谱总体形态变化较小, 始终呈谱峰区分明显的双峰特征, 且核磁视孔隙度无明显变化。磁场强度增大时, 砂砾岩和页岩样品的  $T_2$  谱均总体向短弛豫方向移动,  $T_2$  几何均值减小。

(3) 增加外部梯度场后, 砂砾岩  $T_2$  谱左峰幅度升高, 而页岩  $T_2$  谱形态变化不明显; 砂砾岩和页岩样品  $T_2$  谱曲线总体向短弛豫方向移动,  $T_2$  谱起始时间增大, 曲线展布范围变窄, 核磁视孔隙度均明显降低,  $T_2$  几何均值增大。

(4) 利用核磁共振岩心实验刻度核磁共振测井解释参数时, 应尽量采用磁场环境接近的仪器设备进行实验, 若实验室核磁共振岩心分析仪与核磁共振测井仪的磁场强度或磁场梯度存在较大差异时, 需对实验测量结果进行校正, 这也将成为下一步的研究方向。

### 参考文献:

- [1] 王伟, 赵延伟, 毛锐, 等. 页岩油储层核磁有效孔隙度起算时间的确定: 以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 550-557.  
WANG Wei, ZHAO Yanwei, MAO Rui, et al. Determination of the starting time for measurement of NMR effective porosity in shale oil reservoir: a case study of the Permian Lucaogou shale

- oil reservoir, Jimusaer Sag [ J ]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3):550-557.
- [ 2 ] 彭石林,胡以良,刘崇汉. 岩石核磁共振实验分析与常规物性测量对比[J]. 测井技术, 1998, 22(S1):6-10.  
PENG Shilin, HU Yiliang, LIU Chonghan. Comparison between core NMR experimental analysis and conventional physical property measurement [ J ]. Well Logging Technology, 1998, 22(S1):6-10.
- [ 3 ] 邓克俊. 核磁共振测井理论及应用[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2010.  
DENG Kejun. Nuclear magnetic resonance logging theory and application [ M ]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2010.
- [ 4 ] ANAND V, ALI M R, AL-ADANI N, et al. New generation NMR tool for robust, continuous  $T_1$  and  $T_2$  measurements [ C ] // Proceedings of SPWLA 2016 56th Annual Logging Symposium. Long Beach: SPWLA, 2015.
- [ 5 ] 王俊明, 邵维志, 韩成, 等. MRIL-Prime 核磁共振测井仪 [ J ]. 石油仪器, 2002, 16(6):18-20.  
WANG Junming, SHAO Weizhi, HAN Cheng, et al. MRIL-Prime nuclear magnetic resonant image logging tool [ J ]. Petroleum Instruments, 2002, 16(6):18-20.
- [ 6 ] 郇子伟, 刘德叶, 黎明华. 三种核磁共振测井仪器的比较 [ J ]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(6):1049-1051.  
TAI Ziwei, LIU Deye, LI Minghua. The comparison for three type of NMR logging tool [ J ]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(6):1049-1051.
- [ 7 ] 孙中良, 李志明, 申宝剑, 等. 核磁共振技术在页岩油气储层评价中的应用 [ J ]. 石油实验地质, 2022, 44(5):930-940.  
SUN Zhongliang, LI Zhiming, SHEN Baojian, et al. NMR technology in reservoir evaluation for shale oil and gas [ J ]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5):930-940.
- [ 8 ] 江响, 许国庆, 石阳, 等. 致密岩心带压渗吸规律实验研究 [ J ]. 石油实验地质, 2021, 43(1):144-153.  
JIANG Yun, XU Guoqing, SHI Yang, et al. Forced imbibition in tight glutenite cores [ J ]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1):144-153.
- [ 9 ] 谢然红, 肖立志, 刘天定. 原油的核磁共振弛豫特性 [ J ]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5):21-24.  
XIE Ranhong, XIAO Lizhi, LIU Tianding. NMR relaxation properties of crude oils [ J ]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(5):21-24.
- [ 10 ] KAUSIK R, FELLAH K, FENG L, et al. High- and low-field NMR relaxometry and diffusometry of the Bakken petroleum system [ J ]. Petrophysics, 2017, 58(4):341-351.
- [ 11 ] TROMP R R, PEL L. NMR  $T_1$  dispersion of crude oils from 10 kHz to 20 MHz [ J ]. Journal of Magnetic Resonance, 2021, 325:106949.
- [ 12 ] KORB J P. Nuclear magnetic relaxation of liquids in porous media [ J ]. New Journal of Physics, 2011, 13(3):035016.
- [ 13 ] CUI Yingzhi, SHIKHOV I, LI Rupeng, et al. A numerical study of field intensity and clay morphology impact on NMR transverse relaxation in glutenites [ J ]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 202:108521.
- [ 14 ] 覃莹瑶, 张宫, 张嘉伟, 等. 磁场强度对  $T_2-T_1$  二维核磁共振实验的影响研究 [ J ]. 地球物理学进展, 2021, 36(5):2082-2089.  
QIN Yingyao, ZHANG Gong, ZHANG Jiawei, et al. Study on the influence of magnetic field intensity on  $T_2-T_1$  two-dimensional nuclear magnetic resonance experiment [ J ]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5):2082-2089.
- [ 15 ] 梁灿, 肖立志, 周灿灿, 等. 岩石润湿性的核磁共振表征方法与初步实验结果 [ J ]. 地球物理学报, 2019, 62(11):4472-4481.  
LIANG Can, XIAO Lizhi, ZHOU Cancan, et al. Nuclear magnetic resonance characterizes rock wettability: preliminary experimental results [ J ]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(11):4472-4481.
- [ 16 ] 余玥, 孙一迪, 高睿, 等. 基于  $T_2$  截止值确定致密岩心表面弛豫率 [ J ]. 石油实验地质, 2022, 44(2):342-349.  
YU Yue, SUN Yidi, GAO Rui, et al. Determination of surface relaxation for tight glutenite cores based on  $T_2$  cut-off value [ J ]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(2):342-349.
- [ 17 ] MCDONALD P J, KORB J P, MITCHELL J, et al. Surface relaxation and chemical exchange in hydrating cement pastes: a two-dimensional NMR relaxation study [ J ]. Physical Review E, 2005, 72(1):011409.
- [ 18 ] CODEFROY S, KORB J P, FLEURY M, et al. Surface nuclear magnetic relaxation and dynamics of water and oil in macroporous media [ J ]. Physical Review E, 2001, 64(2):021605.
- [ 19 ] COATES G, 肖立志, PRAMMER M. 核磁共振测井原理与应用 [ M ]. 孟繁莹, 译. 北京: 石油工业出版社, 2007.  
COATES G, XIAO Lizhi, PRAMMER M. Principles and applications of NMR logging [ M ]. MENG Fanying, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [ 20 ] 张宫, 何宗斌, 曹文倩, 等. 回波间隔对核磁共振观孔隙度的影响及校正方法 [ J ]. 波谱学杂志, 2020, 37(2):172-181.  
ZHANG Gong, HE Zongbin, CAO Wenqian, et al. Effects of echo time on NMR apparent porosity and correction methods [ J ]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2020, 37(2):172-181.
- [ 21 ] 毛克宇. 火成岩核磁共振数值模拟与影响因素分析 [ J ]. 地球物理学进展, 2015, 30(4):1755-1762.  
MAO Keyu. Analysis on influence factors based on NMR simulation in igneous rocks [ J ]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4):1755-1762.
- [ 22 ] 国家能源局. SY/T 6490-2014, 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, 2015.  
National Energy Administration. SY/T 6490-2014, Specification for measurement of rock NMR parameter in laboratory [ S ]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [ 23 ] 刘欢, 徐锦绣, 郑场, 等. 渤海 J 油田储层核磁共振测井孔隙度影响因素分析及校正 [ J ]. 波谱学杂志, 2020, 37(3):370-380.  
LIU Huan, XU Jinxiu, ZHENG Yang, et al. Factors affecting and correction methods for porosity measured by NMR logging in the J oilfield of Bohai Bay [ J ]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2020, 37(3):370-380.
- [ 24 ] 张宫, 冯庆付, 武宏亮, 等. 基于核磁  $T_2$  谱对数均值差异的碳酸盐岩气水识别 [ J ]. 天然气地球科学, 2017, 28(8):1243-1249.  
ZHANG Gong, FENG Qingfu, WU Hongliang, et al. Gas-water identification of carbonate reservoir based on log mean difference of  $T_2$  spectrum [ J ]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(8):1243-1249.