

油水双相饱和孔隙模型核磁特性理论研究

翁爱华 李舟波 王雪秋 陆敬安 莫修文

吉林大学地球探测与信息技术学院, 长春 130026

摘 要 利用特征函数展开方法, 给出了基于扩散效应的核磁共振 Bloch 控制方程的弛豫模式解表达式, 在此基础上分别给出了水饱和与油水双相饱和孔隙模型的核磁共振特性模拟结果. 结果表明, 孔隙流体的核磁弛豫与孔隙大小、孔隙表面弛豫率、孔隙流体的扩散能力以及含油饱和度等有密切的关系. 对于水饱和孔隙, 弛豫时间主要由孔隙大小控制. 当孔隙较大时, 即使均匀大小孔隙, 孔隙流体的弛豫也会表现为多指数弛豫. 而且最小模式弛豫时间与孔隙大小为非线性关系. 对于油水双相饱和孔隙, 在孔隙较小时, 含油饱和度对弛豫的影响主要表现在弛豫时间随含油饱和度的增加而线性减小; 但在孔隙较大时, 含油饱和度的增加对弛豫影响表现在两个方面, 其一, 孔隙水弛豫由多个弛豫模式控制逐渐转变为由最小弛豫模式控制; 其二, 孔隙水弛豫时间与含油饱和度表现为非线性关系. 对由实际岩芯抽象出的孔隙模型, 采用本文获得的理论公式, 在油水双相饱和时进行了正反演模拟. 计算结果与已有的实验结果较为一致.

关键词 测井 核磁共振 正演模拟 油水双相饱和和孔隙模型

文章编号 0001-5733(2003)04-0553-08 中图分类号 P631 收稿日期 2001-10-16, 2003-03-20 收修定稿

A THEORETICAL STUDY ON NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE OF PORE SPACE SATURATED WITH OIL AND WATER

WENG AIHUA LI ZHOUBO WANG XUEQIU LU JINGAN MO XIUWEN

School of Geophysics and Information Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract We study the basic characteristics of the model spin-spin relaxation. By the series expansion method, the Bloch equations controlled by diffusion effect are solved for double-phase pore space of slab and sphere saturated with oil and water. The result shows that the Nuclear Magnetic Resonance (NMR) relaxation is controlled by multi relaxation modes and associated with pore size, surface relaxation ability, diffusion coefficient of pore fluid and oil saturation. Numerical results indicate that for water saturated pore space, relaxation is mainly related to pore size. For small water saturated pore, the relaxation is dominated by the smallest relaxation mode and the corresponding relaxation time is proportional to pore size. But for large pore space, multi-mode relaxation composes the pore water relaxation process, even when the pore size is uniform. And under this situation, it is no longer a linear function between relaxation time and pore size. For wateroil double-phase saturated pore space, when pore size is small and as oil saturation increases, the water relaxation time decreases linearly. However, when pore size is relative large, the multi relaxation mode turns to be single mode with the increasing of oil saturation. And at the same time, the variation of relaxation time with oil saturation is non-linearity. Using the formulae in the paper, the responses for the pore space model obtained from real rock core have been calculated. There is a fine agreement between the theoretical and experimental results.

基金项目 国家自然科学基金项目(49874028).

作者简介 翁爱华, 男, 1969 年生, 2001 年于吉林大学获地球探测与信息技术专业博士学位, 讲师. 从事电磁法勘探与地面核磁共振勘探理论与方法研究. E-mail: wengaihua@email.jlu.edu.cn

Key words Logging, Nuclear Magnetic Resonance, Modeling, Oil-water double-phase saturation.

1 引言

常规核磁共振解释模型基于水饱和岩石孔隙流体弛豫规律,因此用核磁共振测井进行储层评价时,对于水饱和储层效果较好。但当岩石孔隙油水双相饱和时,若仍然采用水饱和解释模型,则由于解释模型基础错误,评价的储层参数,尤其是渗透率会与实际情况相差很大。同时,水饱和孔隙模型只是油水双相饱和模型的一个特例。因此对于油水双相饱和孔隙流体弛豫特征进行研究很有必要。已有的相关实验室测量分析^[1,2]指出,随含水饱和度 S_w 降低,水的弛豫时间减小,但减小速率与孔隙大小、形状有关。对这种变化规律,目前在理论上也只作简化的分析与解释^[3,4]。因此,若能从理论上对油水双相饱和孔隙模型流体弛豫特征进行全面的认识与分析,不仅有利于统一已有的实验结果,还能帮助人们正确认识这种更为普遍的孔隙流体模型的弛豫特点。

由于核磁测井的核磁响应只是来自孔隙流体中的氢核,因此通常将测井中质子的核磁共振简称为水或油的核磁共振。处于岩石孔隙中的水分子在射频磁场作用下产生核磁共振,在断开该外磁场后,水分子的磁化强度按一定弛豫规律趋于平衡值。影响这一过程的因素主要是水分子本身弛豫时间、水分子的扩散运动造成的扩散弛豫以及水分子与孔隙表面相互作用造成的能量传递。目前有两种模型描述这些规律。一种是双组分模型^[5],该模型认为孔隙中水可分为处于孔隙中间的呈自由状态的体积水与处于孔隙表面附近的呈束缚状态的束缚水,磁化强度的弛豫都遵从 Bloch 方程,通过适当的边界条件可将这两种水的磁化强度在假定的接触面上联系起来

来。为了求解该模型,除了必须知道岩石孔隙的具体几何特征,还要假定束缚水层的厚度、岩石表面水分子的表面弛豫时间常数,但这些参数实际是不容易确定的。另一种描述模型是单组分表面弛豫模型^[6]。这种模型认为控制孔隙水分子磁化强度弛豫过程的因素主要有两个,一个是水分子本身的体积弛豫特性,另一个是水分子扩散运动,将岩石表面弛豫作用借助水分子的扩散效应以边界条件形式表现出来。该模型相对简单,成为本文理论研究与分析的基本模型。

对于任意孔隙模型,直接由上述模型的控制方程导出理论上的解析表达式是不可能的。但是,由于这些控制方程经过适当的变化后,可表示为扩散方程,从而可采用“随机走”(Random walker)的思想进行数值模拟与计算^[7-10]。数值模拟的优点是能够对任意复杂的孔隙模型进行计算,但计算量很大。对于较为简单的孔隙模型,如板状孔隙模型,管状孔隙模型与球形孔隙模型,可给出弛豫规律较为简单的理论表达式。具体的求解方法有级数展开方法^[11,12], Laplace 变换方法^[13],特征函数法^[6]等。级数展开方法主要适合于某些近似条件下扩散方程求解,而由 Laplace 变换方法求解上述模型要利用留数定理,计算比较繁杂。本文采用特征函数展开方法,针对较为简单的板状和球形孔隙模型,导出它们在油水双相饱和时孔隙流体的弛豫特征,并基于理论表达式给出相应的数值结果。

2 基本方程

2.1 模型描述

设岩石孔隙由大小均匀,形状规则,孤立没有耦合的简单孔隙,如板状孔隙、管状孔隙、球形孔隙等

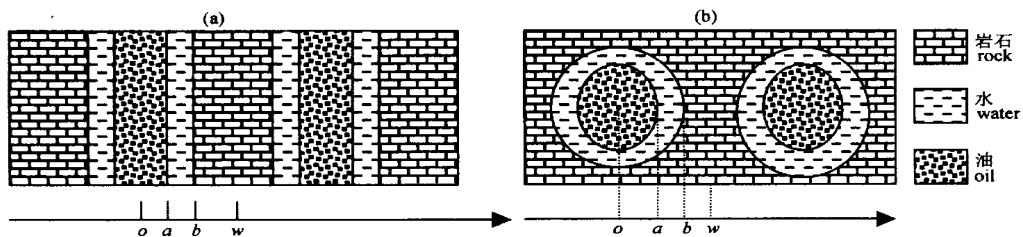


图1 油水双相饱和板状和球形孔隙模型
(a) 板状模型; (b) 球形模型。

Fig. 1 Geometry of pore space saturated with oil and water

组成.同时,假设每个孔隙体积为 V ,孔隙流体总初始磁化强度为 M_0 ,孔隙含油饱和度为 S_o ,油含氢指数 $HI=1$.对于油水双相饱和孔隙模型,还假设:(1)孔隙表面是水润湿的;(2)孔隙中油水是不相溶的,因此油的磁化强度按体积规律弛豫.

图1是基于上述假设的板状和球形岩石孔隙流体饱和模型.在图1a中, o 为油层中心位置,设为坐标原点, a 为板状孔隙中油层的半厚度, b 为板状孔隙的半厚度, $b-a$ 为水层半厚度.在图1b中, o 为球形孔隙的中心, a 为球形孔隙油滴的半径, b 是球形孔隙半径.在周期性孔隙岩石中,令 w 为模型的半宽度周期.对于板状孔隙模型有 $S_o = a/b$,孔隙度 $\phi = b/w$;对于球形孔隙模型有 $S_o = a^3/b^3$, $\phi = \frac{4}{3} b^3/w^3$.含水饱和度 $S_w = 1 - S_o$.

上述模型中流体总磁化强度 $M(t)$ 可表示为油、水各自磁化强度之和

$$M(t) = M_o(t) + M_w(t), \quad (1)$$

式中 $M_o(t)$ 是油的磁化强度, $M_w(t)$ 为孔隙水的磁化强度,它们分别为遵守 Bloch 方程以及磁化强度均匀这一初始条件,油与水的单位体积磁化强度 $m_o(r, t)$ 、 $m_w(r, t)$ 的体积分为

$$D \cdot m(r, t) - \left(\frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2D}} \right) m(r, t) = \frac{\partial m(r, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

$$m(r, 0) = \frac{M_0}{V}, \quad (3)$$

式中 r 为空间矢量, D 表示油与水扩散系数, D_o 与 D_w , T_{2B} 和 T_{2D} 是油与水的体积弛豫时间和扩散弛豫时间, V 是模型孔隙体积.

除此之外,油与水的磁化强度还必须满足合适的边界条件.由于假设油水互不相溶,因此在油水接触面上,油、水分子之间没有磁矩交换,故对于油,其磁化强度满足如下的反射边界条件

$$D_o n \cdot m_o(r) \Big|_{r \cdot s_1 = 0}; \quad (4)$$

对于水,磁化强度除在油水界面上满足反射条件外,在孔隙表面上,由于水分子在与孔隙表面碰撞时可能发生能量损失,还必须满足部分吸收条件,即

$$\left. \begin{aligned} D_w n \cdot m_w(r) \Big|_{r \cdot s_1 = 0} \\ D_w n \cdot m_w(r) + {}_w m_w(r) \Big|_{r \cdot s = 0} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

其中 s_1 为油水界面, s 是孔隙表面, ${}_w$ 是孔隙表面对水分子的表面弛豫能力, n 为孔隙表面单位外法向矢量.

2.2 基本方程的特征函数展开

由 Bloch 控制方程(2)~(4)很容易得到油是按照体积与扩散规律弛豫^[14].对于孔隙水,从式(2)、(3)与(5)可见,其磁化强度弛豫过程除受体积弛豫与扩散弛豫影响外,还与表面弛豫能力有关.当孔隙含油时,还受含油性的影响.因此弛豫过程较为复杂.为得到孔隙水磁化强度的弛豫规律,按照特征函数展开方法,在忽略体积弛豫效应和扩散弛豫效应后,将描述孔隙水磁化强度弛豫的 Bloch 方程的通解表示为如下一般形式的级数和

$$m_w(r, t) = \sum_{n=0} A_n F_n(r) e^{-\frac{t}{T_n}}, \quad (6)$$

式中 A_n 为待定常数, T_n 为第 n 个模式的弛豫时间常数,相应的 $1/T_n$ 为空间正交特征函数, $F_n(r)$ 满足如下特征值问题的非负特征值

$$D_w n \cdot F_n(r) + \frac{1}{T_n} F_n(r) = 0. \quad (7)$$

式(7)是将式(6)代入 Bloch 方程(2)中,并基于线性微分方程叠加原理忽略体积弛豫和扩散弛豫后得到的.将(6)式代入边界条件(5)式, $F_n(r)$ 满足边界条件

$$\left. \begin{aligned} D_w n \cdot F_n(r) + {}_w F_n(r) \Big|_{r \cdot s = 0} \\ D_w n \cdot F_n(r) \Big|_{r \cdot s_1 = 0} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

式(7)和式(8)是模型求解的基本方程.由它们可求出空间正交特征函数 $F_n(r)$.再利用 $F_n(r)$ 的正交性,用(6)式对孔隙水体积 V_w 积分,并根据初始条件(3)式可求出待定参数 A_n ,从而孔隙水总磁化强度表达式为

$$M_w(t) = (1 - S_o) M_0 \sum_{n=0} I_n e^{-\frac{t}{T_n}}, \quad (9)$$

其中 I_n 称为第 n 个弛豫模式的相对强度,并有

$$I_n = \frac{1}{V_w} \frac{\int_{V_w} F_n(r) dV}{\int_{V_w} F_n^2(r) dV}. \quad (10)$$

称 I_0 为最小模式相对强度,对应的 T_0 为最小模式弛豫时间.

3 油水双相饱和孔隙模型中孔隙水弛豫理论表达式

对板状和球形孔隙模型,在孔隙水自由扩散条件下,式(7)和(8)关于 r 退化为关于单变量 x 或 r 的二阶常微分方程.略去推导过程,下面列出这两种孔隙模型中水磁化强度的弛豫特征表达式.

3.1 板状孔隙模型正演公式

空间特征函数 $F_n(x)$ 为

$$F_n(x) = \cos\left(\frac{n x}{b}\right) + C_n \sin\left(\frac{n x}{b}\right), \quad (11)$$

其中 $C_n = \tan(S_o_n)$, 而 n 满足如下的超越方程

$$\tan n = \frac{D_w n \tan(S_o_n) + w b}{D_w n - \tan(S_o_n) w b}, \quad (12)$$

基于 n 与 $F_n(x)$, 有第 n 个模式的弛豫时间常数 T_n 与相应的相对强度 I_n 为

$$T_n = \frac{b^2}{D_w n^2}, \quad (13)$$

$$I_n = \frac{1}{1 - S_o_n} \frac{4 S_U^2}{n S_D}, \quad (14)$$

其中 S_U 与 S_D 分别为

$$S_U = \sin n - C_n \cos n - \sin(S_o_n) + C_n \cos(S_o_n), \quad (15)$$

$$S_D = 2 \left(1 + C_n^2\right) \left(1 - S_o_n\right) + \left(1 - C_n^2\right) \times \left[\sin(2n) - \sin(2S_o_n)\right] - 2 C_n \left[\cos(2n) - \cos(2S_o_n)\right]. \quad (16)$$

3.2 球形孔隙模型正演公式

球形孔隙的空间正交特征函数 $F_n(r)$ 是

$$F_n(r) = \frac{C_n}{r} \cos\left(n \frac{r}{b}\right) + \frac{1}{r} \sin\left(n \frac{r}{b}\right), \quad (17)$$

式中

$$C_n = \frac{S_o_n^{1/3} n - \tan(S_o_n^{1/3} n)}{1 + S_o_n^{1/3} n \tan(S_o_n^{1/3} n)}. \quad (18)$$

将(17)式代入(10)式有第 n 个模式的相对强度 I_n 为

$$I_n = \frac{12}{(1 - S_o_n)^3} \frac{S_U^2}{n S_D}, \quad (19)$$

$$S_U = (1 + C_n n) \sin n + (C_n - n) \cos n - (1 + C_n S_o_n^{1/3}) \sin(S_o_n^{1/3} n) - (C_n - S_o_n^{1/3}) \cos(S_o_n^{1/3} n), \quad (20)$$

$$S_D = 2 n \left(1 + C_n^2\right) \left(1 - S_o_n^{1/3}\right) + \left(C_n^2 - 1\right) \times \left[\sin(2n) - \sin\left(2 S_o_n^{1/3} n\right)\right] - 2 C_n \left[\cos(2n) - \cos\left(2 S_o_n^{1/3} n\right)\right]. \quad (21)$$

与之对应的弛豫时间常数 T_n 为

$$T_n = \frac{b^2}{D_w n^2}. \quad (22)$$

在式(17) ~ (22)中, 所有 n 都满足如下的超越方程

$$\tan n = \frac{D_w n - C_n \left(D_w - \frac{w b}{n}\right)}{D_w n C_n + \left(D_w - \frac{w b}{n}\right)}. \quad (23)$$

4 数值结果

4.1 水饱和孔隙模型的弛豫特点

水饱和孔隙模型的弛豫是油水双相饱和和孔隙流体弛豫特征在含油饱和度 $S_o = 0$ 的特例. Brownstein 等^[6] 已对这种典型模型的弛豫特征做了讨论. 图 2 给出了采用本文的基本公式, 在含油饱和度 $S_o = 0$ 时针对球形孔隙和板状孔隙两种模型计算得到的弛豫时间 T_n 、相对强度 I_n 随无量纲参数 $w b / D_w$ 的变化情况. 比较 Brownstein 等的结果可见, 两者完全一致.

由图 2 可见, 在 $w b / D_w > 10$ 时, 即使均匀大小的孔隙, 整个孔隙流体的弛豫也不再按照单指数规

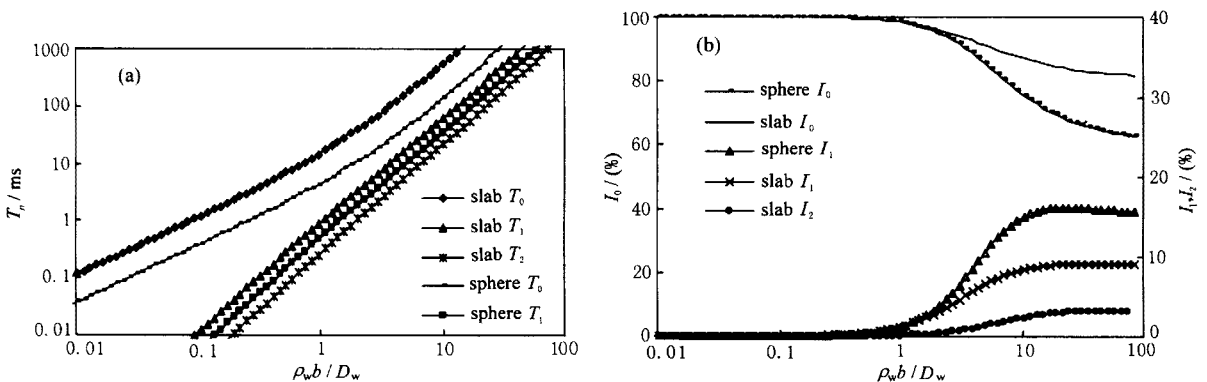


图 2 水饱和孔隙模型 T_n 与 I_n 随 $w b / D_w$ 的变化情况

(a) T_n 变化规律; (b) I_n 变化规律.

Fig. 2 T_n and I_n as function of $w b / D_w$ for water saturated pore spaces

律弛豫,而是由多个弛豫过程控制,表现为多指数规律弛豫。 w_b/D_w 较大一般是 b 较大。这说明,对于大孔隙,观测到的多指数弛豫与孔隙大小分布并不是一一对应的,故弛豫谱并不能完全反映孔隙的真实结构。在含有较大晶洞的碳酸盐岩储层或当岩石孔隙表面含有大量顺磁性物质引起 w_b 变大时会导致这种情况的出现^[15]。而且,此时 T_0 可能甚至比体积弛豫时间还要大,在 T_2 -谱上表现为基线偏离^[16]而被视为噪音。同时,大弛豫模式的影响不能忽略,并可能与束缚水、气和重油等在弛豫谱重叠。因此,即使对水饱和和孔隙模型,在核磁测井解释时也应该审慎。

4.2 油水双相饱和和孔隙模型的弛豫特点

对于油水双相饱和和孔隙模型,从 n 满足的(12)

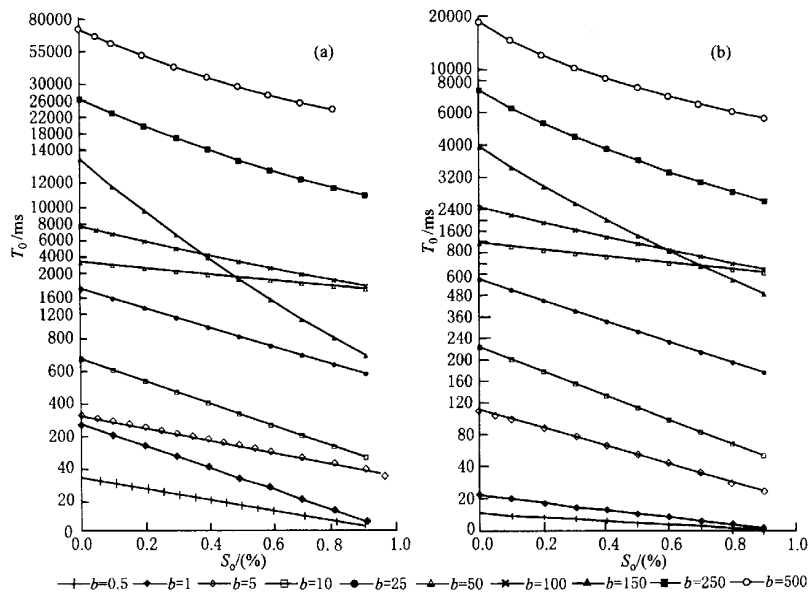


图3 油水双相饱和和孔隙模型 T_0 随 S_0 的变化情况

(b 单位: μm ; $D_w = 2.5 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{s}$; $w_b = 1.5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$)

(a) 板状孔隙模型; (b) 球形孔隙模型。

Fig. 3 T_0 as function of S_0 for slab and sphere pore spaces saturated

with oil-water double-phase fluid

图4(a, b)给出了图3中不同大小孔隙模型的 $T_0(S_0)$ 拟合线性函数的截距 p 与时间变量 ($= b/n w_b$, $n=1$ 为板状, $n=3$ 为球形)的关系。图中虚线为过原点的单位斜率直线。由图可见,在小孔隙时,由于不同模型的 $T_0(S_0)$ 是线性函数,因此截距 p 都等于 $T_0|_{S_0=0}$ 。由于板状孔隙模型的孔隙体积与表面比 V/S 为 b ,球形孔隙模型孔隙体积与表面比 V/S 为 $b/3$,这样有 $T_0|_{S_0=0} =$, 从而

式与(23)式可见其将受含油饱和度的影响,从而基于(13)式与(22)式的孔隙水的弛豫除受孔隙大小直接影响外,也将受到含油饱和度的影响。由于相对最小模式弛豫时间 T_0 其余模式弛豫时间较小,因此下面针对 T_0 讨论。图3给出了不同大小板状孔隙和球形孔隙模型弛豫时间 T_0 随含油饱和度 S_0 变化情况。由于孔隙尺寸差异造成 T_0 相差很大,在绘图时不同孔隙尺寸取不同的绘图比例,导致曲线出现交叉。由图可见,在孔隙较小时, T_0 是含油饱和度 S_0 的线性函数;但在孔隙较大时,如大于 $50\mu\text{m}$,表现出明显的非线性。因此,如果用(拟)线性函数拟合弛豫时间 $T_0(S_0)$ 的变化关系,则对不同大小的孔隙,该(拟)线性函数的斜率 k 和截距 p 将不同。

$T_0|_{S_0=0}$ 与孔隙大小有简单的正比关系。这便是常规核磁测井解释的基础。当孔隙含油时,如果知道含油饱和度,仍可利用该线性关系,获得孔隙尺寸信息。如果不考虑该线性关系而直接将含油时观测到的弛豫时间直接作为孔隙相对尺寸的度量加以利用,显然不太合理。

随孔隙变大,截距 p 以及 $T_0|_{S_0=0}$ 与时间变量呈明显的非线性关系,且随 b 变大迅速上升。这样常规核磁测井解释基础^[17] 不适用于大孔隙模型,且

会出现上述水饱和时同样的问题. 事实上, 如果此时能忽略其余模式弛豫影响, 那么孔隙水的弛豫主要由体积与扩散弛豫控制. 由于体积弛豫与孔隙相对尺寸无关, 因此, 核磁测井只能通过扩散测量, 利用扩散系数与孔隙大小建立联系^[4].

图 4(c, d) 给出了斜率 k 与时间变量 τ 的关系.

据 Coates 等^[4], $k = -b/n_w = -$. 由图可见, 在孔隙较小时该关系确实成立. 但在孔隙较大时, k 的绝对值与 τ 呈非线性关系. 再次说明对不同大小的含油孔隙进行储层评价, 应建立更为合理的解释模型.

图 5 给出了图 3 中不同大小板状孔隙和球形孔隙

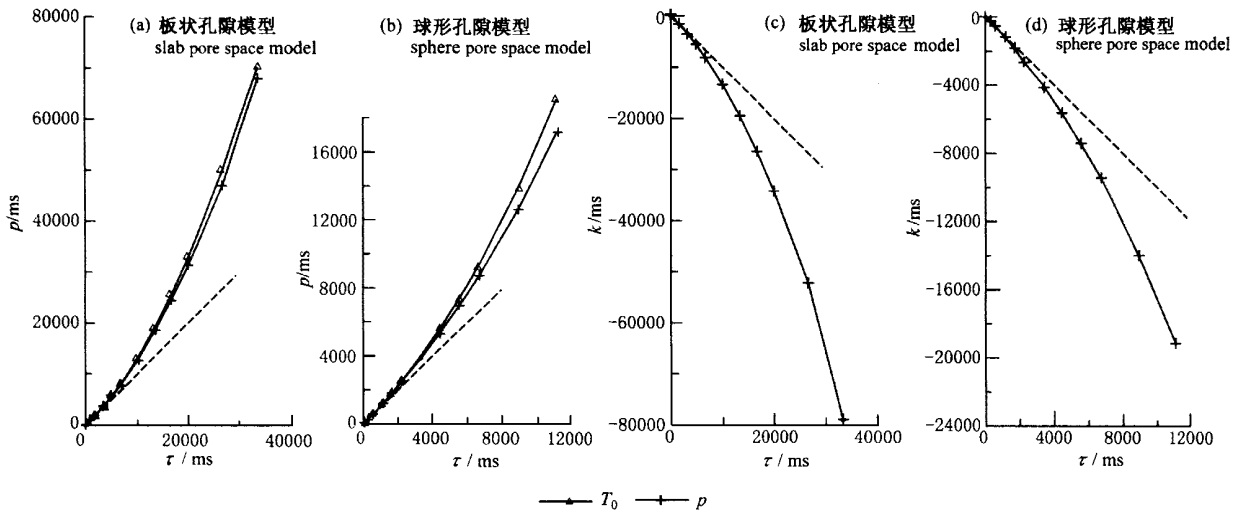


图 4 截距 $p(a, b)$ 与斜率 $k(c, d)$ 随 $(= b/n_w)$ 变化关系

Fig. 4 Variation of intercept $p(a, b)$ and slope $k(c, d)$ with $(= b/n_w)$

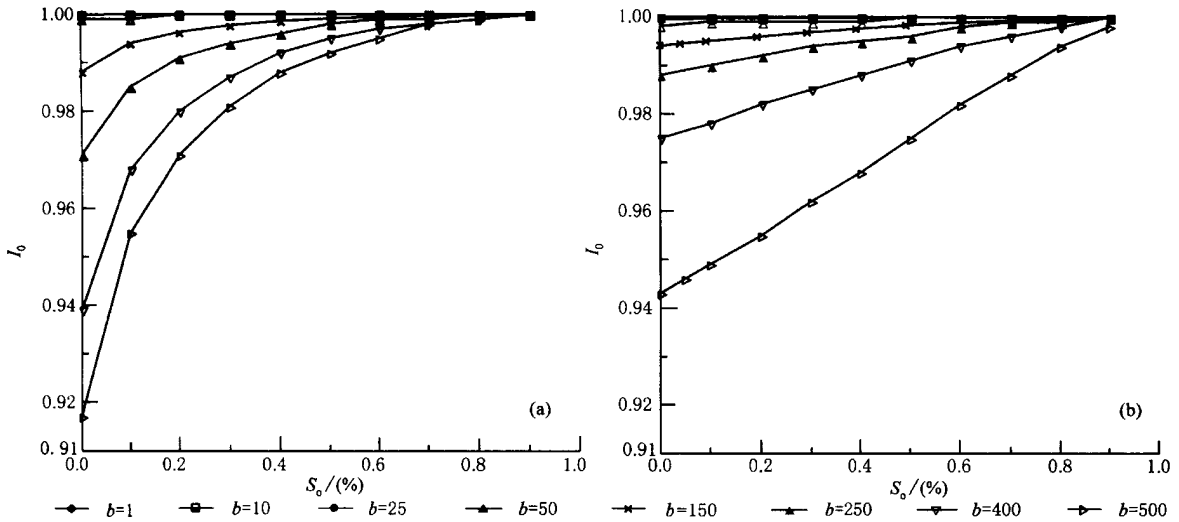


图 5 油水双相饱和和孔隙模型 I_0 随 S_o 的变化情况 (b 单位: μm)

(a) 板状孔隙模型; (b) 球形孔隙模型.

Fig. 5 I_0 as function of S_o for slab (a) and sphere (b) pore spaces saturated with oil-water double-phase fluid (unit of b : μm)

隙模型最小弛豫模式相对强度 I_0 随含油饱和度 S_o 变化情况. 由图可见, 在孔隙较小时, I_0 与 S_o 无关, 恒等于 1, 说明孔隙的弛豫完全由最小模式控制. 随

孔隙变大, 如大于 $50\mu\text{m}$, 孔隙弛豫逐渐由多个弛豫模式控制, 表现为 $I_0 < 1$. 但随 S_o 变大, $I_0 \rightarrow 1$, 孔隙水的弛豫逐渐由多个弛豫模式控制转变为由最小弛

豫模式控制.

4.3 实际岩芯计算结果与分析

利用理论公式对实际的岩石孔隙模型进行了数值计算. 岩芯孔隙大小数据来自 Mardon 等^[3]的实验室测量结果. 数值模拟针对编号为 P-40、P-3 和 P-1/2 的岩芯进行, 其孔径统计的算术平均值分别为 $11.6\mu\text{m}$ 、 $0.37\mu\text{m}$ 和 $0.15\mu\text{m}$. 图 6 给出了 Mardon 等在这些岩芯上当孔隙水饱和时观测到的核磁共振弛豫谱与理论模型模拟结果. 理论模拟回波序列的回波间隔为 0.5ms , 水与油的体积弛豫时间都为 1200ms , 且假设岩芯孔隙形状为球形. 为得到理论 T_2 -弛豫谱, 首先利用球形孔隙模型正演公式获得理论自由衰减信号, 然后进行 T_2 -谱分析^[18,19]. 比较实验结果可见, 除 P-1/2 岩芯外, 理论 T_2 -弛豫谱与实验结果符合较好. P-1/2 岩芯的效果不好, 可能由于孔隙孔径计算结果与实际出入较大.

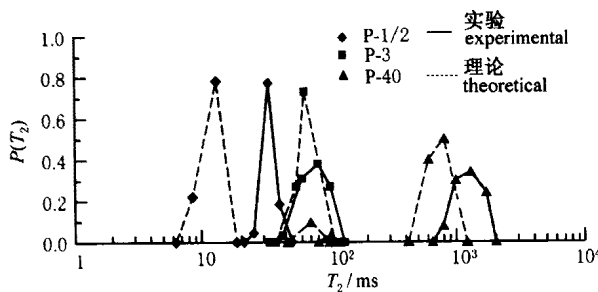


图 6 实际岩芯实验室观测的核磁弛豫谱与水饱和时的理论核磁弛豫谱

T_2 为横向弛豫时间, $P(T_2)$ 为归一化后的弛豫谱相对强度.

Fig. 6 Theoretical and experimental Spin spin relaxation time distribution of different rock cores

为了验证含油饱和度对孔隙水弛豫的影响, 对 Mardon 等^[3]的实验岩芯 P-1/2 在含油饱和度 S_o 分别为 53% 和 44% 时进行了理论计算, 结果见图 7. 岩芯数据与理论模拟方法同上. 由图可见, 整个 T_2

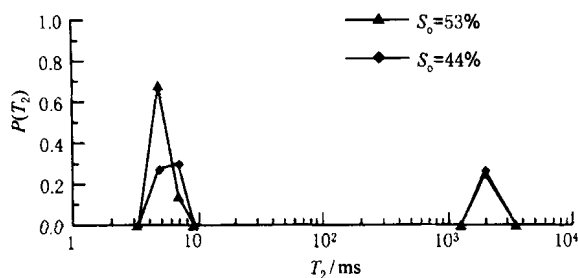


图 7 岩芯 P-1/2 部分含油时理论弛豫谱 (图注同图 6)

Fig. 7 Theoretical spin spin relaxation time distribution of rock core P-1/2 at different oil saturation

- 弛豫谱可分成左边短弛豫组分和右边长弛豫组分两个部分. 右边弛豫组分正好出现在油体积弛豫时间的位置上, 说明油在假设的孔隙模型中确实遵循体积弛豫规律. 左边的短弛豫组分实际是受表面弛豫影响的孔隙水的反映. 而且, $S_o = 53\%$ 时水的平均弛豫时间小于 $S_o = 44\%$ 时的平均弛豫时间. 比较图 6 水饱和时的理论结果可见, 在油水双相饱和时, 由于受油的影响, 水的弛豫时间相对水饱和时要小. 因此, 目前基于弛豫时间与孔隙大小对应关系的核磁测井解释模型需要修正.

5 结 论

针对油水双相饱和孔隙模型, 利用特征函数展开方法, 给出了板状与球形孔隙中孔隙流体核磁弛豫的理论表达式. 通过数值计算, 有以下结论.

5.1 对于水饱和孔隙模型, 在快速扩散条件下, 孔隙水弛豫时间与孔隙大小呈正比关系. 但当快速扩散条件不成立时, 即使孔隙大小均匀, 孔隙水弛豫的过程也受多个弛豫模式控制, 在弛豫谱上将呈多弛豫组分分布, 从而导致弛豫时间谱与孔隙大小的对应关系破坏. 这种情况在孔隙较大时或孔隙表面含有大量顺磁性物质时容易出现.

5.2 对于油水双相饱和孔隙模型, 随含油饱和度的增加, 孔隙水的弛豫时间减小. 在孔隙较小时, 这种变化呈线性变化关系. 但当孔隙较大时, 含油饱和度对弛豫时间的影响是非线性的.

5.3 含油饱和度对油水双相饱和孔隙模型弛豫的影响还表现在, 对于较小孔隙, 孔隙水弛豫由最小弛豫模式控制且不受含油饱和度的影响; 对于较大孔隙中的水, 其弛豫可能受多个弛豫模式控制, 且各弛豫模式相对强度都将受含油饱和度的影响, 表现在随含油饱和度的增加, 最小模式弛豫逐渐控制整个弛豫过程, 其余弛豫模式的作用消失.

5.4 基于传统的弛豫时间与孔隙大小对应关系的核磁测井解释模型需要修正.

5.5 实际模型模拟结果表明, 特征函数展开方法是对油水双相饱和孔隙流体核磁弛豫特征进行分析的一条简单、有效途径.

参考文献

- [1] Flaum C, Guru L, Banerjee S. Saturation estimation from magnetic resonance measurements in carbonates. 41st Annual Logging Symposium Transactions: Society of Petroleum Well Log Analysis,

- Paper: HHH, 2000
- [2] Schmidt E J, Velasco K K, Nur A M. Quantifying solid-fluid interfacial phenomena in porous rocks with proton nuclear magnetic resonance. *Journal of Applied Physics*, 1986, **59**(8): 2788 ~ 2797
- [3] Mardon D, Gardner J S, Coates G R, et al. Experimental study of diffusion and relaxation of oil-water mixture in model porous media. 37th Annual Logging Symposium Transactions: Society of Petroleum Well Log Analysis, Paper: K, 1996
- [4] Coates G R, Marschall D, Mardon D, et al. Applying log measurements of restricted diffusion and T_2 to formation evaluation. 36th Annual Logging Symposium Transactions: Society of Petroleum Well Log Analysis, Paper: P, 1995
- [5] Cohen M H, Mendelson K S. Nuclear magnetic relaxation and the internal geometry of sedimentary rocks. *J. App. Phys.*, 1982, **53**(2): 1127 ~ 1135
- [6] Brownstein J A, Tarr C E. Importance of classical diffusion in NMR studies of water in biological cells. *Physical Review (A)*, 1979, **19**(6): 2446 ~ 2453
- [7] Mendelson K S. Percolation model of nuclear magnetic relaxation in porous media. *Physical Review (B)*, 1990, **41**(1): 562 ~ 567
- [8] Lee S B, Kim L C, Miller C A, et al. Random-walk simulation of diffusion-controlled processes among static traps. *Physical Review (B)*, 1989, **39**(16): 11833 ~ 11839
- [9] Zheng L, Chiew Y C. Computer simulation of diffusion-controlled reactions in dispersions of spherical sinks. *J. Chem. Phys.*, 1989, **90**(1): 322 ~ 327
- [10] Torquato S, Kim I C. Efficient simulation technique to computer effective properties of heterogeneous media. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(18): 1847 ~ 849
- [11] Mitra P P, Sen P N. Effects of microgeometry and surface relaxation on NMR pulsed-field-gradient experiments: Simple pore geometries. *Physical Review (B)*, 1992, **45**(1): 143 ~ 156
- [12] Mitra P P, Sen P N, Schwartz L M. Short-time behavior of diffusion coefficient as a geometrical probe of porous media. *Physical Review (B)*, 1993, **47**(14): 8565 ~ 8574
- [13] Wilkinson D J, Johnson D L, Schwartz L M. Nuclear magnetic relaxation in porous media: The role of the mean life time (τ , D). *Physical Review (B)*, 1991, **44**(10): 4960 ~ 4972
- [14] 翁爱华. 核磁测井数据处理基础理论与实验研究[博士论文]. 长春: 吉林大学地球探测与信息技术学院, 2001
WENG Aihua. Study on data processing theories and experiments of NMR logging[Ph. D. thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin Univ., 2001
- [15] Kenyon W E, Kolleny J A. NMR surface relaxivity of calcite with adsorbed Mn^{2+} : *Journal of Colloid and Interface Science*, 1995, **170**: 502 ~ 514
- [16] 翁爱华, 李舟波, 莫修文等. 泥岩剖面核磁共振测井资料的处理技术. 吉林大学学报(地学版), 2003, 待刊
WENG Aihua, LI Zhoubo, MO Xiuwen, et al. Data processing for low signal-noise ratio nuclear magnetic resonance logging data. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2003, In press
- [17] Kenyon W E. Petrophysical properties of application of NMR logging. *The Log Analysis*, 1997, **38**(2): 21 ~ 43
- [18] Prammer M G. NMR pore size distributions and permeability at the well site. *SPE*, 1994, 28368
- [19] 翁爱华, 李舟波, 王雪秋. 核磁测井数据弛豫谱反演软件研究. 长春科技大学学报, 2001, **31**(4): 395 ~ 397
WENG Aihua, LI Zhoubo, WANG Xueqiu. Study on software design of nuclear magnetic resonance logging data inversion. *Journal of Changchun University of Science and Technology* (in Chinese), 2001, **31**(4): 395 ~ 397