

Liu T Y, Xiao L Z, Fu R S, et al. Applications and Characterization of NMR Relation Derived from Sphere-Capillary Model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4): 663 ~ 671

球管孔隙模型的核磁共振(NMR)弛豫特征及应用

刘堂晏^{1,2} 肖立志³ 傅容珊¹ 王忠东⁴

1 中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026

2 同济大学海洋和地球科学学院,上海 200092

3 石油大学资源和信息学院,北京 102249

4 辽河油田测井公司,盘锦 124000

摘要 将岩石孔隙归结为由毛细管和球形孔组成的孔隙系统,提出孔隙球管孔隙模型. 岩石孔隙按大小分组后,每一组孔隙的氢核弛豫时间可以用球管孔隙模型计算. 将此弛豫时间作为反演 T_2 分布的时间控制点,反演岩石的核磁共振弛豫信号. 研究表明, T_2 分布与特定的孔隙结构相联系. 使用不同结构的球管孔隙模型,可以使反演 T_2 分布最大限度地拟合弛豫信号,此时的球管模型以最近似的方式模拟了岩石的孔隙结构. 使用球管模型对实验室核磁共振资料进行了处理,对比压汞分析得到毛管力分布数据,结果证明球管孔隙模型描述了岩石孔隙的弛豫特征,而且,岩石特定孔隙结构的弛豫特征与孔隙流体有关.

关键词 核磁共振 孔隙结构 压汞分析 球管模型 弛豫 岩石物理

文章编号 0001-5733(2004)04-0663-09 中图分类号 P631 收稿日期 2003-06-03,2004-02-04收修定稿

APPLICATIONS AND CHARACTERIZATION OF NMR RELATION DERIVED FROM SPHERE-CAPILLARY MODEL

LIU Tang-Yan^{1,2} XIAO Li-Zhi³ FU Rong-Shan¹ WANG Zhong-Dong⁴

1 School of Earth and Space Sciences University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2 School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

3 School of Resource and Information Technology, University of Petroleum, Beijing 102249, China

4 Logging Company of Liaohe Oil Field, Panjin 124000, China

Abstract All pores in rock can be regarded as a system consisting of spherical pore and capillary pores. This paper presents a model of sphere-capillary. All pores are divided into different groups by their radii, and the relaxation time of each group can be calculated with the sphere-capillary model. The transversal relaxation time (T_2), spaced on the sphere-capillary model, can be utilized to conduct the inversion of NMR relaxation signal. Our research suggests that the T_2 distribution from the inversion is related with the special pore structure defined by the sphere-capillary model. Using different sphere-capillary models to derive different relaxation times, we conduct the inversion of relaxation signal with the relaxation time. When a T_2 distribution fits the relaxation signal in the least squares, the pore structure defined by the sphere-capillary model characterizes the pore system in rock best. Data from lab NMR measurements are analyzed with the sphere-capillary model, and the results are compared with the pressure data from mercury injection. The result shows that the sphere-

基金项目 国家自然科学基金(40274033)和油气藏地质及国家重点实验室开放基金(PLN0401)联合资助.

作者简介 刘堂晏,男,1962年生. 2003年于中国科学技术大学获固体地球物理学博士学位,研究领域为岩石物理学及核磁共振物理.

E-mail: tyliu9812@vip.sina.com

capillary model describes properly the relaxation characteristic related with pore structure. Furthermore, the relaxation characteristic may be associated the with pore fluids.

Key words NMR, Pore structure, Mercury injection, Sphere-capillary model, Relaxation, Petro-Geophysics.

1 引言

核磁共振的理论研究证明,岩石孔隙的弛豫特征与岩石孔隙结构有关,即弛豫信号反演后的横向弛豫时间 T_2 分布与岩石的孔隙结构有关^[1,2]. 对于野外的核磁共振测量,其测量信号还受到介质参数和形态的影响^[3],这些因素增加了反演结果的多解性,进行反演首先必须给定弛豫时间的布点方式. 目前使用的布点方式主要有 2 的幂次方,对数均匀布点,线性均匀布点等^[4,5]. 这些布点方式均假设孔隙是球形的,但这与实际情况差异较大. 而且,对具有不同孔隙结构的岩石,现有的反演方法均采用固定的布点方式^[6,7],这种解谱方法不利于识别岩石的孔隙结构. 在核磁共振进入石油工业的早期,主要使用 2 的幂次方布点. 最近,王为民等^[5,8]提出了对数均匀布点,线性均匀布点等几种方式.

由于弛豫时间分布不合理,应用 2 的指数幂次方布点解谱弛豫信号,解谱得到的 T_2 分布很难用于识别岩石的孔隙结构. 对数均匀布点和线性均匀布点可以在给定的弛豫时间分布范围内,按需要确定布点数,这一特点使对数均匀布点和线性均匀布点的解谱结果对岩石孔隙结构的识别能力有了明显的提高. 但以上两种布点方式均没有考虑岩石孔隙结构本身的特点,所以,使用这两个布点方式解谱,其解谱结果(T_2 分布)对岩石孔隙的分辨能力仍然有限. Yakov 等^[9,10]使用核磁共振实验评价岩芯孔隙结构,但在反演弛豫信号时,没有考虑弛豫时间布点的计算问题. 本文把岩石孔隙归结为球形孔和毛管孔,提出球管孔隙模型,计算反演弛豫信号的时间控制点.

2 球管孔隙模型

岩石孔隙按大小分组,在每一个孔隙分组的内部再把孔隙区分成球形孔和毛管孔两个部分,并用各个区间独立的比例系数确定球形孔半径和毛管孔半径之间的数值关系. 各个孔隙分组的球半径和毛管半径比例系数数值可以有不同的组合方式,这个

组合方式决定了岩石的孔隙结构.

在水润湿岩石中,盐水依附在岩石孔隙的表面,岩石的表面弛豫很显著,相对于表面弛豫而言,盐水的体弛豫可以忽略^[11]. 根据岩石表面弛豫时间和岩石比表面之间的关系,在球管孔隙模型中,可以在岩石的每一个孔隙分区中确定孔隙的弛豫时间,这就是球管模型的解谱布点方式. 根据球管模型确定的弛豫时间布点方式解谱,可以得到与特定孔隙结构相联系的 T_2 分布,这个 T_2 分布精细地刻画了岩石孔隙结构. 结合压汞分析或电镜扫描图像^[12,13],首先确定岩石孔隙分区内部球孔隙半径和毛管孔隙半径的比例系数,再对弛豫信号解谱,得到反映孔喉结构的 T_2 分布;反过来,也可以在比例系数不同的组合情况下,得到多个布点方式下的 T_2 分布图形,根据压汞数据和电镜扫描图像确定最优的 T_2 分布图形.

块状孔隙和喉道孔隙对弛豫过程的影响不同,在确定岩石孔喉半径和弛豫时间的转换方式时,应该考虑这个差异^[14]. 经过弛豫时间和孔喉半径的转换, T_2 谱分布可以看成是一系列不同孔喉半径的相对数值分布. 在实验室条件下,经过压汞刻度以后,弛豫时间和孔喉半径的转换公式是^[15]

$$R_{ei} = \frac{7.35 \times 10^{-6}}{2.95} T_{2i}, \quad (1)$$

其中, R_{ei} 是第 i 分组孔隙的平均半径(单位 cm), T_{2i} 为第 i 分组孔隙的横向弛豫时间(单位 ms).

T_{2i} 可以在给定的弛豫时间范围内由对数平均法确定,然后确定分组孔隙的平均半径. 也可以根据压汞分析资料,直接确定分组孔隙内的平均半径. 如果解谱的布点数为 N ,则岩石孔喉半径按大小可以划分为 n 组. 设 R_{ei} 数值的变化与 i ($i=1, 2, \dots, N$ (全文同))数值增大的方向一致. N 一般为偶数, $i = \frac{N}{2}$ 时, R_{ei} 称为中值半径. 设每组孔隙由球孔隙和毛管孔隙组成(图 1),球孔隙和毛管孔隙的半径比值为 C_{di} ,

$$R_{ci} = C_{di} R_{si}, \quad (2)$$

其中, R_{ci} , R_{si} 分别为第 i 分组的毛管孔隙和球孔隙的半径; C_{di} 是矩阵 C_d 中的第 i 元素, C_d 的定义为

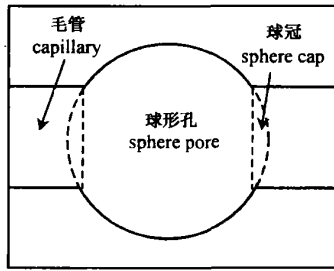


图 1 球管孔隙结构模型

Fig. 1 Sphere-capillary model

$$C_d = (C_{d1} C_{d2} \dots C_{dN})^T,$$

C_d 描述了球管孔隙模型中球孔隙和毛管孔隙的配比关系。

球孔隙和毛管孔隙的相交部分是球冠,球冠的表面积 S_h (单位 cm^2) 和体积 V_h (单位 cm^3) 分别为

$$\begin{cases} S_h = (R_c^2 + h^2) \\ V_h = h(h^2 + 3R_c^2) \\ h = R_s - \sqrt{R_s^2 - R_c^2} \end{cases}, \quad (3)$$

h 为球冠的高度. 毛管的表面积(S_c)和体积(V_c)分别为

$$\begin{cases} S_c = 2 R_c \left[1 - 2 \sqrt{R_s^2 - R_c^2} \right] + 2 R_c^2 \\ V_c = R_c^2 \left[1 - 2 \sqrt{R_s^2 - R_c^2} \right] \end{cases}, \quad (4)$$

在去掉球冠的表面积和体积后,球孔隙的表面积(S_s)和体积(V_s)为

$$\begin{cases} S_s = 4 R_s^2 - 2 (R_c^2 + h^2) \\ V_s = \frac{4}{3} R_s^3 - 2 h(h^2 + 3R_c^2) \end{cases}, \quad (5)$$

这个球管孔隙结构的比表面为

$$\frac{S}{V} = \frac{S_c + S_s}{V_c + V_s}, \quad (6)$$

设球孔隙半径(R_s)和分组孔隙平均半径(R_c)的关系为

$$R_{si} = \frac{C_{si}}{(1 + C_{di})} R_{ci}, \quad (7)$$

C_d 中所有元素的变化范围在 $[0, 1]$ 区间中, $C_{di} = 0$ 和 $C_{di} = 1$ 代表纯球孔隙模型和纯毛管模型. C_{si} 表征分组孔隙平均半径与球孔隙半径之间的关系,研究表明, C_{si} 的数值较为固定,约为 3. 在每一个单组孔隙中,可能有几个完全相同的球管孔隙结构(图 1),忽略盐水的体积弛豫,单个孔隙结构的弛豫时间可表达为^[1,2]

$$\frac{1}{T_{2i}} = \rho \left(\frac{S}{V} \right)_i, \quad (8)$$

其中, ρ 为横向表面弛豫率,单位: cm/ms .

3 饱含水球管孔隙模型的 NMR 弛豫特征

3.1 球管孔隙模型的弛豫时间分布

方程(8)表明,球管孔隙结构模型的 T_2 布点值是 ρ 和 C_{di} 的函数,在 $[0.1, 10000]$ 区间作对数均匀布点,

$$\lg(T_{2i}) = \frac{5(i-1)}{(N-1)} - 1. \quad (9)$$

在每一个分组区间中, C_{di} 的搜索区间为 $[0, 1]$, ρ 的搜索区间为 $[10^{-7}, 30 \times 10^{-7}]$ ^[2,16],使方程(8)与方程(9)中的 T_2 方差和达到最小,可以证明,当 $\rho = 2.5 \times 10^{-6}$, $C_{di} = 0$ 时,方程(9)中的 T_2 布点与方程(8)最接近. 换句话说, T_2 对数均匀布点实际上反映了球管孔隙模型在 $\rho = 2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}/\text{ms}$, $C_{di} = 0$ 条件下的 T_2 布点(图 2). 在图 2 中,这两条曲线重合. 其他参数不变的条件下,当 C_{di} 从 0 增加到 1.0,相当于孔隙形式从球形孔变化到毛管孔,模型的弛豫时间略有减少(图 2),这也是合理的. 因为根据方程(8),在孔隙体积相等的情况下,球形孔隙的弛豫时间最长. 例如,在 $\rho = 2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}/\text{ms}$, $C_{di} = 0$ 条件下,球管孔隙模型的弛豫时间分布是 $[0.1, 10000]$ ms;其他条件不变,当 $C_{di} = 0.5$,模型的弛豫时间分布变为 $[0.05, 5100]$ ms.

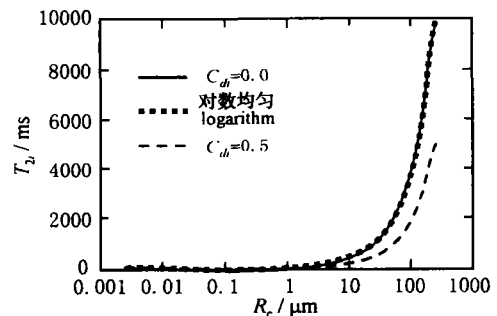


图 2 弛豫分布时间的对比

Fig. 2 Relaxation Time spaced on different methods

取 $C_{di} = 0$, $\rho = 0.5 \times 10^{-6} \text{ cm}/\text{ms}$, T_2 分布区间变成 $[0.4, 50000]$ ms,这与通常使用的 T_2 反演布点区间 $[0.1, 10000]$ ms 已经有了很大的差别. 前面已经证明,在 $[0.1, 10000]$ ms 的区间上作对数均匀布点的假设条件是 $\rho = 2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}/\text{ms}$, $C_{di} = 0$,所以,如果岩石的实际表面弛豫率与 $2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}/\text{ms}$ 有较

大的差别,则岩石的实际弛豫时间分布区间也会与 [0.1,10000]ms 有较大的差别,此时应该调整反演解谱的弛豫时间分布区间.

3.2 矩阵 C_d 与孔隙结构的关系

岩石孔隙分组越多, C_d 的变化方式越复杂,球管孔隙模型对岩石孔隙结构的描述也越精细. 在最简单的情况下,可以使 C_d 中的元素按一定的路径变化(图 3). 图中 a, b, c, o 点的坐标分别为 $(0, 0), (0, 0.5), (0, 1.0), (0.5, 0.5)$, 其余点类推. 对 C_d 矩阵作两元划分,直线 abc 代表第一个元素的起点,直线 def 代表第 N 个元素到达终点. 每一组孔隙划分中, C_{di} 可以有 3 个取值, C_{di} 分别从 a, b, c 这三个点开始,然后 C_{di} 沿图中直线(或折线)向右运动. 随着 i 的增加, C_{di} 以分离方式取直线(或折线)的 y 坐标. a, b, c 这三个点向右运动共有 11 种方式,例如,当 C_d 的元素从低端到高端沿直线 ad 变化时,以 $N=32$ 为例,其元素数值为

$$C_{di} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, 32. \quad (10)$$

如果沿 aod 路径变化, C_d 的元素取值为

$$C_{di} = \begin{cases} \frac{1}{(32 - i)} & 1 & i & 15 \\ 0.5 & 16 & i & 17 \\ \frac{-1}{(32 - i)} (i - 1) + 1 & 18 & i & 32 \end{cases}, \quad (11)$$

其他路线的变化,按上面的方程类推.

在 i 增大的方向, T_{2i} 在布点区间上应该是递增序列. 在 C_{di} 的多数变化形式中,球管孔隙模型的 T_2 布点值满足这一要求,但当 C_{di} 以 a 为起点开始变化时,由于 C_{di} 从 0 开始变化,可能会使 T_2 布点值在某些区间不满足递增序列的要求(图 4). 在前面几个孔隙分组区间中, T_{21} 的数值可能大于 T_{22} .

在方程(8)中,把 T_{2i} 看成 C_{di} 的连续函数,当 C_{di} 从 a 点开始变化时,为了保证 T_{2i} 分布是增序列,可以确定 C_{di} 的最低取值约为 0.001. 同理,第二组孔隙分组中,为保证 T_2 为增元素, C_{di} 最低取值为 0.053. 也就是说,只要第一孔隙分组的 C_{d1} 取值大于 0.001,就可以保证方程(8)中的 T_{2i} 在整个布点区间上都是增序列.

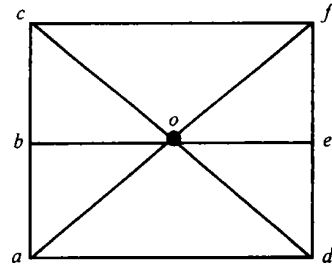


图 3 矩阵 C_d 变化的简单路径

Fig. 3 Elements in the matrix C_d change in the simplest way

由于矩阵 C_d 中每个元素分别规定了分组孔隙中球孔半径和毛管半径的比值关系,所以在球管孔隙模型中,矩阵 C_d 中元素的变化方式和特定的孔隙结构相联系(表 1).

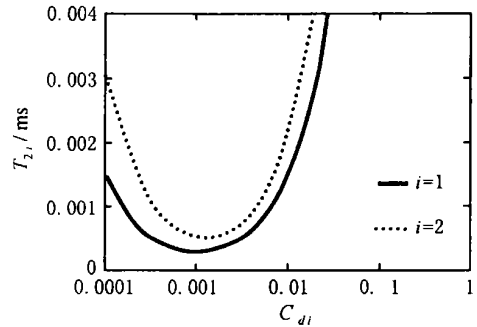


图 4 C_d 在 acf 路径上弛豫时间的分布

Fig. 4 The relaxation time distribution while C_d changes following the route acf

表 1 C_d 中元素的变化和孔隙结构的关系

Table 1 Change of elements in matrix C_d and relationship of pore structures

C_d 元素变化	T_2 分布区间	孔隙结构
boe	0.05 ~ 5105	毛管半径和球孔半径同步变化.
acf	0.001 ~ 5410	毛管半径的增大速率大于球孔半径的增大速率.
aod	0.001 ~ 9966	在小于中值半径时,毛管半径的增大速率快于球孔半径的增大速率;在大于中值半径以后,毛管半径的增大速率小于球孔半径的增大速率.
cof	0.0075 ~ 5410	在小于中值半径时,毛管半径的增大速率小于球孔半径的增大速率;在大于中值半径以后,毛管半径的增大速率大于球孔半径的增大速率.
cod	0.075 ~ 9966	毛管半径的增大速率小于球孔半径的增大速率.
ad	0.1 ~ 10000	纯球孔模型.

3.3 饱含水岩石的弛豫模拟

3.3.1 解谱布点方式对解谱图形的影响

解谱运算的布点,实际上是选定解谱图形的弛豫时间控制点.

对 L9 等 10 块岩芯作了饱含水 and 油驱水条件下的核磁共振弛豫测量,岩芯的基本数据见表 2. 图 5

给出了弛豫信号和解谱图的对应关系,由于弛豫信号的多解问题,同一弛豫信号,使用不同的解谱方法,可得到不同的谱形分布,本次研究使用稳健迭代修正技术 SIRT(Solid Iteration Redress Technique)反演弛豫信号^[3,17]. 另外,弛豫信号的信噪比也对解谱图形有很大的影响.

表 2 饱含水岩样基本数据

Table 2 Parameters of water-bearing cores

样品	V_c/cm^3	W_d/g	W_w/g	W/g	$w/(%)$	V_w/cm^3	NMR/(%)	$K/(10^{-3}\mu m^2)$
L9	19.192	38.101	42.693	23.501	23.925	4.592	21.314	436.314
L10	19.166	37.709	42.271	23.105	23.802	4.562	22.161	516.549
L17	19.109	37.085	41.936	22.828	25.387	4.851	23.781	357.306
O44 - 4	18.225	43.527	45.254	27.029	9.473	1.727	10.13	0.36
O44 - 1	19.52	43.759	46.709	27.189	15.113	2.950	14.3	52.3
O44 - 2	19.977	45.119	48.037	28.059	14.605	2.918	13.63	18.497
H8 - 11	19.581	43.947	47.087	27.505	16.033	3.140	13.77	2.518
H602 - 6	35.277	69.700	78.678	43.401	25.451	8.978	24.2	45.163
H602 - 7	34.574	67.682	76.705	42.131	26.099	9.024	23.24	43.048
H202 - 13	27.328	59.132	63.907	36.579	17.473	4.775	17.18	49.073

注: V_c : 体积; W_d : 干重; W_w : 湿重; W : 岩样水中重量; w : 孔隙度称重法; V_w : 含水体积; NMR: 孔隙度核磁法; K : 渗透率.

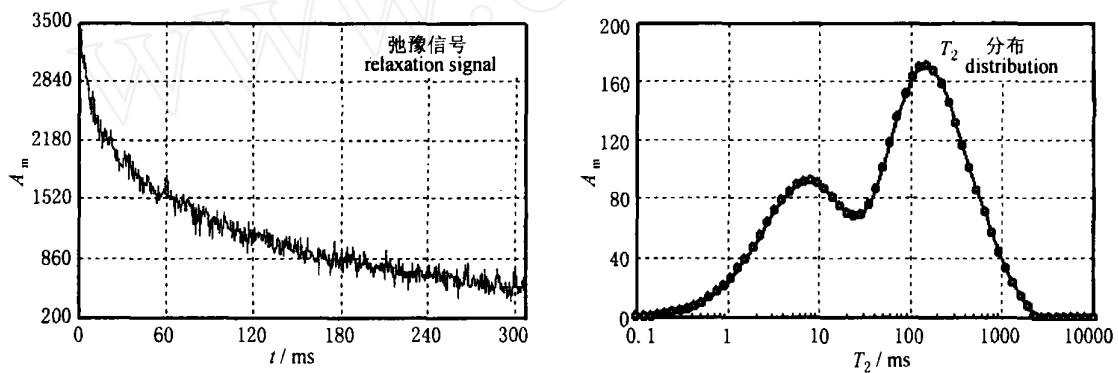


图 5 含水岩石的弛豫信号和解谱

A_m 为相对幅度,无量纲(下同).

Fig. 5 NMR signal and T_2 spectrum distributions in water-bearing rock

为了考察不同布点方式对反演 T_2 分布的影响,首先将弛豫时间作对数均匀布点,并用稳健迭代修正技术^[3,17]反演岩芯的弛豫信号. 然后,再用球管模型划分弛豫时间,使用 SIRT 方法反演弛豫信号, C_{di} 取不同的方向变化(图 3),可以得到弛豫信号在不同矩阵 C_d 下的解谱结果(图 6).

分别取 $C_s = 2$ 和 $C_s = 3$ 等几个数值,在 L9 岩样的核磁共振信号中作反演试算. 计算结果表明, C_{di} 沿 ad 方向变化(即 $C_{di} = 0, i = 1, 2, \dots, N$), 且 $C_s = 3$ 时,球管孔隙模型的解谱结果与对数均匀布点的解谱结果完全重合(图 6). 在相同条件下,在岩样

O44 - 4, L10 等岩样实验数据的解谱中,调整球管模型的参数,使其拟合结果逼近对数均匀布点的解谱结果,同样得出在 $C_{di} = 0, C_s = 3$ 的条件下,球管孔隙模型布点与对数均匀布点具有相同的解谱结果. 解谱的数值实验证明,对数均匀布点方式隐含的假设条件是 $C_{di} = 0, C_s = 3$.

至此,使用球管孔隙模型,揭示了对数均匀布点的全部假设条件:完全的球形孔隙($C_{di} = 0, i = 1, 2, \dots, N$), $C_s = 3, \lambda = 2.5 \times 10^{-6}$ cm/ms. 在未了解岩石的孔喉结构之前,使用这些假设的前提对岩石弛豫信号作反演解谱,其反演结果对岩石孔隙结构

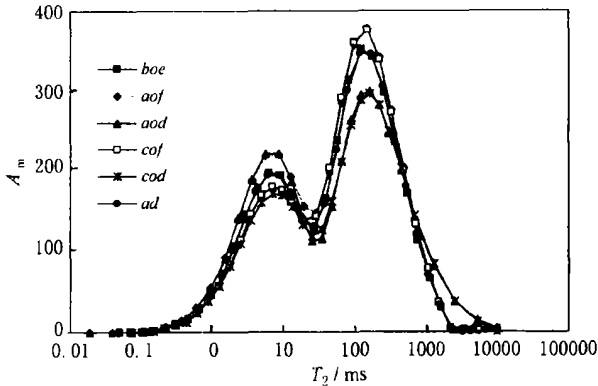


图 6 饱含水岩样在不同布点方式下的解谱结果
 Fig. 6 The inversion distributions when C_{di} change on different route

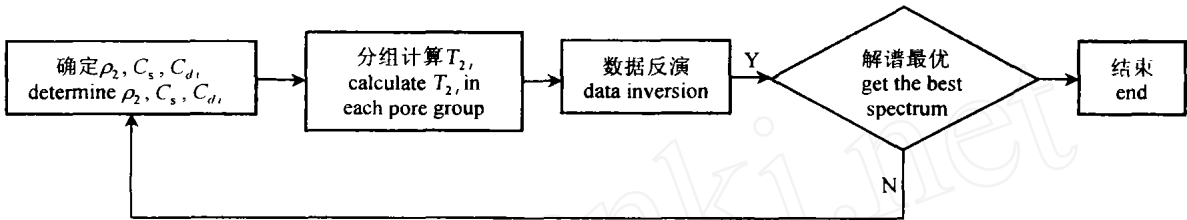


图 7 球管孔隙模型的计算流程图
 Fig. 7 The calculation flow chart of Sphere-Capillary model

在达到最优拟合结果时,一维矩阵

$$C_d = (C_{d1} \ C_{d2} \ \dots \ C_{dn1})^T \quad (12)$$

描述了各分组孔隙内部球孔隙和毛管孔隙的配置关系. 显然,相对于压汞资料中对孔隙的简单分组描述,球管孔隙模型在分组孔隙内部引入球孔隙和毛管孔隙,并用比例系数确定球孔隙和毛管孔隙的大小数值关系. 这样,球管孔隙模型实现了对岩石孔隙结构更精细的描述.

完全实现球管孔隙模型对岩石模拟所需要的运算量非常庞大. 例如,目前在 Pentium4 主频 2.0G, 内存 256M 的单机上,进行 512 个回波,32 个对数均匀布点的 SIRT 联合反演解谱运算一次,耗时 0.08min. 如果在每个分组孔隙中搜索 3 个 C_{di} 值,则完成球管孔隙模型的一次模拟运算将耗时

$$\frac{3^{32} \times 0.08}{60 \times 24} = 1.029 \times 10^{11} \text{ (单位 d)}$$

在目前的算法条件下,这个耗时无法实现. 混合编码遗传算法改进常规的遗传算法^[18],在全局具有较强的寻优能力,有可能成为这个问题的优化算法. 选择 C_d 可能具有的典型取值方式,然后,在为数不多的几种典型 C_d 矩阵中,利用球管孔隙结构模型对真实岩石进行足够精确的模拟是完全可能的(表 1,图 6).

设定 C_d 以相对简单的变化方式,来实现几个

的反映能力有限.

应用球管孔隙模型计算弛豫时间的布点值,再用这些布点值反演弛豫信号,可以改善解谱数据对岩石孔隙结构的分辨能力. 首先,针对本区储层的岩芯样品,用实验方法确定多数储层普遍适用的 ρ_2 ;其次,对多数储层采用 $C_s = 3$;最后,对于每个分组孔隙,设定 C_{di} ,根据确定的 ρ_2 、 C_s 和设定的 C_{di} ,应用方程(8)计算每一组的 T_{2i} 值. 全部分组孔隙的 T_{2i} 布点值确定后,再用这些布点值反演弛豫信号. 如果反演结果没有达到最优,重新调整各分组孔隙之间 C_{di} 值的组合关系,直到反演结果达到最优,运算流程如图 7 所示.

比较典型的布点方式. 用表 1 中的 6 种 C_d 变化序列和方程(8),生成 6 种 T_2 布点方式,对 L9 岩样饱含水的弛豫信号解谱(图 6). 图 6 中 6 条曲线按彼此间的类似程度可以划分为 3 组. 第一组为 C_d 分别沿 aof 方向和 cof 方向变化,解谱曲线类似;沿 boe 方向和 ad 方向变化的解谱曲线类似,为第二组;第三组为沿 aod 方向和 cod 方向变化的解谱曲线类似. C_d 的数值及其变化方式,实际反映了毛管孔隙和球孔隙的配比关系,所以,从图 6 可以得出两点结论:1. 运用球管孔隙模型确定的 T_2 布点方式解谱弛豫信号,其解谱结果可以反映岩石的孔隙结果;2. 解谱结果主要取决于大孔隙中毛管孔隙和球孔隙的配比关系.

3.3.2 解谱图形的选择

取不同的矩阵 C_d ,球管孔隙模型可以产生不同的弛豫时间布点. 根据这些布点,可得到不同的解谱结果(图 6),表明不同的孔隙结构在弛豫特性上是有差异的. 最相似的条件,将 T_2 分布与压汞毛管的孔隙分布进行对比,会有几条 T_2 分布与压汞孔隙半径分布较为接近,这几条 T_2 分布所对应的球管孔隙结构就是实际岩石最接近的孔隙结构. 同时对 c622y4 岩样作了压汞分析和饱含水核磁共振

弛豫测量,用表 1 中的 6 种布点方式分别对该岩样的弛豫信号解谱,并将解谱得到的 T_2 分布与岩样压汞分析的孔喉分布比较,可以看到 C_d 在 aof 和 cof

路径下变化时,对应布点方式的解谱结果与压汞分析数据吻合最好(表 3,图 8). 对比表 1 和表 3 可以看出,岩样 c622y4 最可能的孔隙结构有两种:

表 3 不同布点方式和压汞曲线的拟合关系(岩样 c622y4)

Table 3 Using the sphere-capillary model to fit mercury injection data (Sample c622y4)

参数	<i>boe</i>	<i>aof</i>	<i>aod</i>	<i>cof</i>	<i>cod</i>	<i>ad</i>
T_2 分布	0.05 ~ 5105	0.001 ~ 5410	0.001 ~ 9966	0.075 ~ 5410	0.075 ~ 9966	0.1 ~ 10000
转换系数 (ms \times MPa)	32.0	35.0	37.5	35.0	38.0	47.0
标准方差	4.0×10^{-3}	4.34×10^{-4}	6.27×10^{-3}	4.34×10^{-4}	6.27×10^{-3}	2.64×10^{-3}

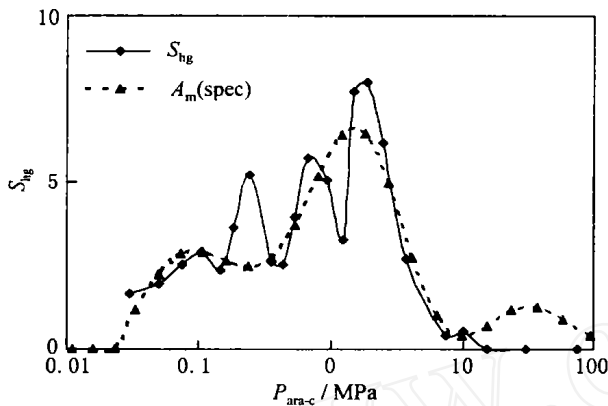


图 8 最佳解谱与压汞分析的对比关系(样品:c622y4)
 S_{hg} 为汞饱和度,谱幅度为相对幅度,无量纲, P_{ara-c} 是弛豫时间转换的毛细管力.

Fig. 8 Comparison of the best spectrum with the mercury injection data (Sample: c622y4)

1. 毛管半径的增大速率快于球孔半径的增大速率,
2. 在分组孔隙平均半径小于中值半径时,毛管半径的增大速率小于球孔半径的增大速率;在分组平均半径大于中值半径以后,毛管半径的增大速率大于球孔半径的增大速率.

4 含油岩样球管孔隙模型的弛豫特征

对于相同的样品,在饱和水岩样的弛豫数据测量完成以后,分别用油驱替水,在两个含油饱和度下测量含油样品的弛豫数据. 见表 4.

在 L9 岩样中,分别用表 1 中的 6 种布点方式,对含油饱和度 (S_o) 分别为 41.38% 和 65.34% 的弛豫信号解谱(图 9),可以看出,当含油饱和度增加时, T_2 分布形态的形状没有大的变化.

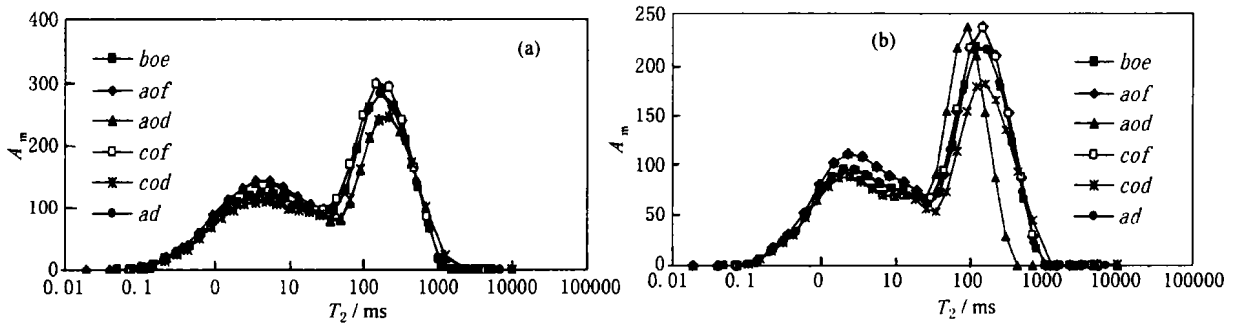


图 9 含油岩石在不同布点方式下的解谱

(a) $S_o = 41.48\%$; (b) $S_o = 65.34\%$.

Fig. 9 T_2 spectrum distributions of oil-bearing rock while T_{2i} spaced on different methods

含油饱和度对 T_2 分布形态的形状没有大的干扰,华北地区某油田对岩芯核磁实验的研究中也有类似的结论^[14]. 可以看到,在 $S_o = 65.34\%$ 的 T_2 分布图中(图 9b),当 C_d 在 aod 方向上变化时, T_2 分布向弛豫时间减少的方向移动,这表明与这个布点方式对应的球管孔隙结构(表 1)对含油性具有一定的

敏感性.

选择 C_d 在 aod 的方向变化,对饱和水岩石的含油饱和度的弛豫信号解谱,并将 3 条 T_2 分布重合在一张图上(图 10). 可以看出,含油对弛豫谱的影响主要体现为两点,1. 含油使 T_2 分布曲线所围的面积减少;2. 岩石的弛豫时间减少. 其原因是,油比水具

表 4 油驱岩样数据表
Table 4 Sample data of oil injection

样号 编号	第 1 次		第 2 次		油驱类型
	油驱水体积 (cm ³)	S _O (%)	油驱水体积 (cm ³)	S _O (%)	
L9	1.9	41.380	3.0	65.337	轻质油
L10	1.7	37.267	3.0	65.765	变压器油
L17	2.0	41.228	3.7	76.271	轻质油
O44 - 4	0.9	52.129	1.0	57.921	轻质油
O44 - 1	1.3	44.068	1.9	64.407	轻质油
O44 - 2	1.5	51.412	2.0	68.549	变压器油
H8 - 11	1.1	35.037	1.19	37.904	变压器油
H602 - 6	3.5	38.983	5.8	64.600	变压器油
H602 - 7	3.4	37.679	5.55	61.506	变压器油
H202 - 13	1.5	31.414	2.6	54.451	轻质油

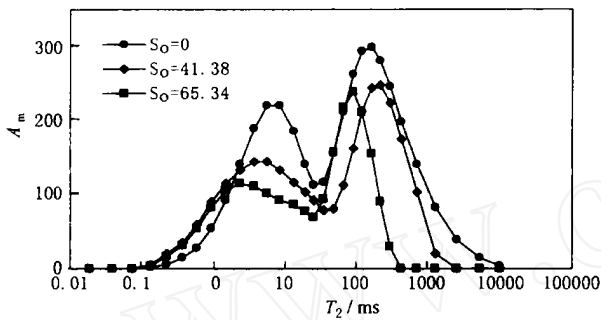


图 10 含油饱和度对解谱的影响

Fig. 10 The effects of oil on the T₂ spectrum distribution

有更长的弛豫时间. 同体积的水被油驱替以后, 在同样的极化时间下, 油样产生的弛豫信号更小一些, 所以, 图 10 表现为谱峰减小, 使含油岩石谱线包围的面积减小; 岩石的弛豫时间减少, 主要是注入油样体积弛豫的影响.

5 球管孔隙模型描述参数的讨论

球管孔隙模型包括 C_s, C_{di}, R_s, R_c, τ₂ 等描述参数, 但这些参数并不是在所有条件下完全独立. 在特定的条件下, 参数之间可以有特定的关系.

5.1 τ₂ 与 C_s 关系

对数均匀布点方式, 实际上是布点间距恒定的方式. 从球管孔隙模型 T₂ 的布点方程来看(方程(8)), C_s 与 τ₂ 在保持近似恒定比值的条件下, 可以实现 T₂ 布点间距的恒定.

$$C_s = 1.21 \times 10^6 \tau_2 \quad (13)$$

在满足方程(13)的条件下, 球管孔隙模型可以实现

对数均匀布点方式.

5.2 R_s 与 R_c 的关系

在对数均匀布点方式下, 其隐含的球管孔隙模型参数是 τ₂ = 2.5 × 10⁻⁶ cm/ms, C_s = 3, C_{di} = 0. 这意味着纯球形孔模型. 但对于纯球形孔隙模型, 如果第 i 分组孔隙的平均孔隙半径是 R_{ci}, 那么, 该分组孔隙半径应为 R_{ci} 的均匀球形孔. 但按方程(7)计算, 当 C_{di} = 0 (i = 1, 2, ...N) 时, 该分组孔隙的球孔隙半径却为 3R_{ci}. 这显然不合理, 其主要原因与孔隙半径和弛豫时间的转换方式有关. 方程(1)中孔隙半径与弛豫时间的转换公式来源于压汞分析和核磁共振实验, 这两种实验方式分别属于宏观和微观观测模式. 即同样一个微孔隙, 对于氢核的弛豫过程可能提供了足够空间, 但对于汞液可能很难进入. 另外, 对数均匀布点方式还有改进的空间.

5.3 C_d 的确定方法

很难确定矩阵 C_d 元素的所有组合方式, 但完全可以在特定条件下确定最有利的矩阵 C_d 元素组合方式. 其方法为:

1) 根据薄片分析和电镜扫描的图像数据, 可以确定每个分组孔隙中球孔隙和毛管孔隙之间近似的配比关系, 这个配比关系可以用矩阵 C_d 的元素表征. 同时, 计算 T₂ 的布点方式. 最后, 用此布点方式, 对弛豫信号解谱, 得到的 T₂ 分布定量给出了 C_d 矩阵所描述的孔隙结构分布.

2) 如果岩芯的孔隙结构完全未知, 可以在最有利的条件下, 设定 C_d 元素的变化方式, 找出其中的最优解. 这个最优解表示了岩芯最可能有的孔隙结构及对应的分布.

不管使用那一种方式确定 C_d 矩阵,球管孔隙模型都实现了对岩石孔隙结构的精细描述,这就是球管孔隙模型的应用前景。

6 结 论

本文将岩石孔隙结构抽象为球管模型,并提出球管孔隙模型和相应的弛豫时间控制点的计算方法,在对试验数据的处理分析中见到了应用效果。实际的岩石孔隙中可能会有裂缝,因此,本文深入的研究方向是考虑球管孔隙结构模型的弛豫特征。

6.1 岩石弛豫信号的解谱结果与弛豫时间的布点方式有关。

6.2 在球管孔隙模型中,根据平均半径对岩石孔隙按大小依次分组。在各孔隙分组之间,球孔隙半径和毛管半径可以有独立的比例系数。比例系数之间的差异组合形成了不同的弛豫时间布点方式。

6.3 在特定参数下,球管孔隙模型可以模拟对数均匀布点方式。

6.4 球管孔隙模型证明,岩石内部的弛豫过程主要取决于其中大孔隙的数量以及大孔隙中球孔隙和毛管孔隙的配比关系。

6.5 对于评价储层孔隙结构而言,岩石含油对 T_2 分布形态没有大的干扰。

6.6 岩石在孔隙结构上的差异,其弛豫信号对含油气的敏感程度也会有所不同。

参考文献

- [1] Dunn KJ. Nuclear Magnetic Resonance Petrophysical and Logging Application. Pergamon: Elsevier Science, 2001
- [2] George R. Coates, Lizhi Xiao. NMR Logging Principles & Applications. Texas: Gulf Publishing Company, 1999
- [3] 翁爱华,李舟波,王学秋. 层状导电介质中地面核磁共振响应特征理论研究. 地球物理学报, 2004, 47(1): 156 ~ 163
Weng A H, Li Z B, Wang X Q. A study on surface nuclear magnetic resonance over layered conductive earth. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(1): 156 ~ 163
- [4] 王忠东. 核磁共振弛豫信号多指数反演新方法及其应用. 中国科学(G), 2003, 33(4): 323 ~ 332
Wang Z D. New inversion method with multi-exponent and its application. *Science in China (G)* (in Chinese), 2003, 33(4): 323 ~ 332
- [5] 王为民,李培. 核磁共振弛豫信号的多指数反演. 中国科学, 2001, 31(8): 730 ~ 736
Wang W M, Li P. A multi-exponent inversion algorithm for NMR signal. *Science in China (in Chinese)*, 2001, 31(8): 730 ~ 736
- [6] 石油情报协作组. 测井新技术应用. 北京:石油工业出版社, 1998
Petroleum Information Group. The Applications of New Well Logging Technology (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1988
- [7] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用. 北京:科学出版社, 1998
Xiao L Z. NMR Image Logging and NMR in Rock Experiments (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998
- [8] 王忠东,江浩. 核磁共振岩芯基础实验分析. 测井技术, 2001, 25(3): 170 ~ 174
Wang Z D, Jiang H. The core experiment analysis of NMR. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2001, 25(3): 170 ~ 174
- [9] Yakov V. et al. A practical approach to obtain primary drainage capillary pressure curves from nmr core and log data. *Petrophysics*, 2001, 42(4): 334 ~ 343
- [10] Robin Ausbrooks. Pore-Size Distribution in Vuggy Carbonates from Core Image. NMR and Capillary Pressure, Paper SPE 56506 presented at the 1991 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Houston, Texas, 1999. 139 ~ 152
- [11] Hurlimann M D, Venkataramanan L. Diffusion-Editing: New NMR Measurement of saturation and Pore Geometry, paper F presented at the SPWLA 43rd Annual Logging Symposium, 2002
- [12] Ausbrooks R, Hurley N. Pore-Size distribution in vuggy carbonates from core images, NMR, and capillary pressure, Paper 56506 Presented at the 1999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Houston, Texas, 3-6 October 1999
- [13] Arun T A, Majors P. Measurement of Aperture and Multiphase Flow in Fractures with NMR Imaging. SPE Formation Evaluation, 1997
- [14] Altunbay M, Martain R. Capillary Pressure Data from NMR Logs and Its Implications on Field Economics. SPE 71703 Presented at the 2001 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, 2001
- [15] 刘堂宴,傅容珊. 核磁共振谱的岩芯孔喉结构分析. 石油地球物理勘探, 2003, 38(2): 328 ~ 333
Liu T Y, Fu R S. The analysis of core pore structure with NMR spectra. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2003, 38(2): 328 ~ 333
- [16] 翁爱华. 核磁测井数据处理基础理论与实验研究[博士学位论文]. 长春:吉林大学, 2001
Weng A H. Study on basic data processing theories and experiments of NMR logging [Ph. D thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University, 2001
- [17] Dines K, Lyttle J. Computerized geophysical tomography. *Proc IEEE*, 1979, 67: 1065 ~ 1073
- [18] 陈超,刘江平,余丰. 求解位场反演问题的混合编码遗传算法. 地球物理学报, 2004, 47(1): 119 ~ 126
Chen C, Liu J-P, Yu F. The inversion of gravity data by using hybrid encoding genetic algorithm. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(1): 119 ~ 126