

储层岩石 T_2-G 实验采集参数自动匹配技术研究

吴 飞^{1,2}, 范宜仁^{1,2}, 邓少贵^{1,2}, 邢东辉^{1,2}, 刘 玺^{1,2}, 巫振观¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学 CNPC 测井重点实验室, 山东青岛 266580)

摘要:针对改良式 CPMG (Car-Purcel-Meiboom-Gill) 序列测量储层岩石内部磁场梯度分布时难以确定第一个窗口持续时间 t_0 及回波个数 NE_1 的问题,在总结 T_2-G 实验采集参数人工调节规律的基础上提出 t_0 、 NE_1 的一项自动匹配技术;构造待测岩石的 T_2-G 近似分布模型,基于该模型变化 t_0 、 NE_1 进行 T_2-G 回波串正演数值模拟,结合 T_2-G 最优化采集参数的约束条件确定 t_0 、 NE_1 。该技术在保证实验精度的前提下显著提高了实验效率,不同区块 8 块砂岩的 T_2-G 实验结果也验证了该技术的可行性和实用性。

关键词:改良式 CPMG 序列; 内部磁场梯度; 采集参数; 自动匹配; 数值模拟

中图分类号:P 631.813

文献标志码:A

引用格式:吴飞,范宜仁,邓少贵,等. 储层岩石 T_2-G 实验采集参数自动匹配技术研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(4):50-56.

WU Fei, FAN Yiren, DENG Shaogui, et al. Automatic matching technology for determining acquisition parameters of formation rock T_2-G experiment[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 50-56.

Automatic matching technology for determining acquisition parameters of formation rock T_2-G experiment

WU Fei^{1,2}, FAN Yiren^{1,2}, DENG Shaogui^{1,2}, XING Donghui^{1,2}, LIU Xi^{1,2}, WU Zhenguan¹

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. CNPC Key Laboratory for Well Logging in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: In order to solve the difficulties in determining the acquisition parameters such as t_0 and NE_1 when using the modified CPMG (Car-Purcel-Meiboom-Gill) sequence to measure the internal magnetic field gradient of formation rock, an automatic matching technology for determining t_0 and NE_1 was proposed after summarizing the empirical rules applied in the field; the T_2-G approximated distribution model of tested rocks is first constructed; then with the approximated model the response of T_2-G experiment is calculated by tuning t_0 and NE_1 using numerical simulation methods, and lastly the suitable t_0 and NE_1 are determined by using constraints from the optimal model. The accuracy and efficiency of the method is further verified in the T_2-G experiment using eight sandstone samples from different regions.

Key words: modified CPMG sequence; internal magnetic field gradient; acquisition parameters; automatic matching; numerical simulation

在储层岩石的内部磁场梯度作用下,扩散弛豫将加速孔隙流体的横向弛豫衰减,影响核磁共振测井解释评价的精度和流体识别效果^[1-4]。获取储层岩石内部磁场梯度的大小及分布是消除或减小其对核磁共振测量影响的前提,但是岩石内部磁场梯度的影响因素复杂,无法使用公式直接计算^[5-7]。Ben-

del 等^[8-11]尝试使用一维核磁共振方法定量研究岩石内部磁场梯度分布,但是应用效果不佳。二维核磁共振概念提出后, Sun 和 Dunn^[12]设计出改良式 CPMG 序列,并提出相应的 T_2-G 二维核磁共振反演方法,实现了岩石内部磁场梯度的定量表征。基于常规 CPMG 序列,谢然红等^[13]利用不同回波间隔组

合回波串的联合反演实现了 $T_2 - G$ 二维分布计算^[13]。由于改良式 CPMG 序列在反演速度上的优势,该序列在岩石内部磁场梯度研究中的应用越来越广泛。改良式 CPMG 序列第一个窗口的持续时间 t_0 和回波个数 NE_1 是影响 $T_2 - G$ 实验效果的关键参数,选取不当将导致反演谱中岩石内部磁场梯度的“拖尾”现象;人工调节 t_0 、 NE_1 速度慢,增加了实验操作难度,亟需一种能够自动搜索和匹配 t_0 、 NE_1 的方法。迄今关于 $T_2 - G$ 实验采集参数自动匹配的研究成果还未见报导,笔者在总结 t_0 、 NE_1 人工调节规律的基础上实现 $T_2 - G$ 实验采集参数的自动匹配设计,并通过岩心实验考察其应用效果。

1 $T_2 - G$ 基本原理与影响因素

图1是改良式 CPMG 序列示意图^[12]。CPMG 序列在时间轴上分为两个窗口:第一个窗口长度固定为 t_0 ,该窗口内的回波间隔从大变小;第二个窗口用仪器的最短回波间隔采集 CPMG 回波信号^[14]。

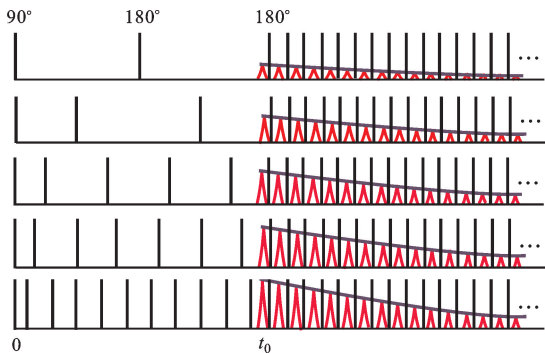


图1 改良式 CPMG 序列示意图^[12]

Fig.1 Schematic diagram of modified CPMG sequence

由多孔介质核磁共振弛豫理论,结合改良式 CPMG 序列的特征,可推得 $T_2 - G$ 实验第二个窗口采集的回波串幅度^[12-14]为

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(T_{2j}, G_p) \exp\left(-\frac{t_i + t_0}{T_{2j}}\right) \exp\left(-\frac{\gamma^2 G_p^2 D t_i^3}{12 NE_{1k}^2}\right). \quad (1)$$

式中, b_{ik} 表示第一个窗口的回波个数为 NE_{1k} 时第二个窗口中第 i 个回波的幅度,对应的采样时间为 $t_i + t_0$, k 为回波串的序号; $f(T_{2j}, G_p)$ 为横向弛豫时间 T_{2j} 、内部磁场梯度 G_p 对应的孔隙度分量; m 为横向弛豫时间 T_{2j} 分量的个数, j 为序号; n 为内部磁场梯度 G_p 分量的个数, p 为序号; γ 为氢核的旋磁比; D 为孔隙流体的扩散系数; NE_1 为整数, $NE_{1\min} = 1$, $NE_{1\max}$ 取决于核磁仪器的最小回波间隔。解谱时将 $T_2 - G$ 实验中第二个窗口采集的多条回波串利用式(1)联立反演,即可

得到储层岩石的 $T_2 - G$ 二维分布^[15-18]。

由改良式 CPMG 序列的测量原理及式(1)可知, $T_2 - G$ 测量时需根据岩石内部磁场梯度的大小和范围调节 t_0 、 NE_1 , 实现岩石内部磁场梯度信息的有效加载。图2是 N-4 号砂岩不同 t_0 、 NE_1 对应的测量结果。实验条件: 岩石饱和蒸馏水, 23 MHz 核磁共振岩心分析仪 MR - DF, 实验温度 25 °C。

由图2总结出 t_0 、 NE_1 对 $T_2 - G$ 实验结果的影响规律: t_0 过小时, NE_1 的变化范围越小, 变化 NE_1 时回波串间的幅度差较小, 实验测量易受噪声影响, 导致反演谱中内部磁场梯度的分辨率降低, 出现图2(a)所示的 G 轴“拖尾”现象; NE_1 组合不当时, 也将导致 G 轴的“拖尾”现象, 如图2(b)所示; 手动调节 t_0 、 NE_1 使回波串间隔均匀, 此时反演谱峰位清晰, G 轴没有“拖尾”现象, 如图2(c)所示。实验中人工调节 t_0 、 NE_1 繁琐费时, 尤其是 NE_1 的插值组合随机性强, 要求操作人员有相关的核磁共振背景知识, 不符合油田现场的大批量、快速测试要求。

2 $T_2 - G$ 实验采集参数自动匹配技术

2.1 构造 $T_2 - G$ 近似分布模型

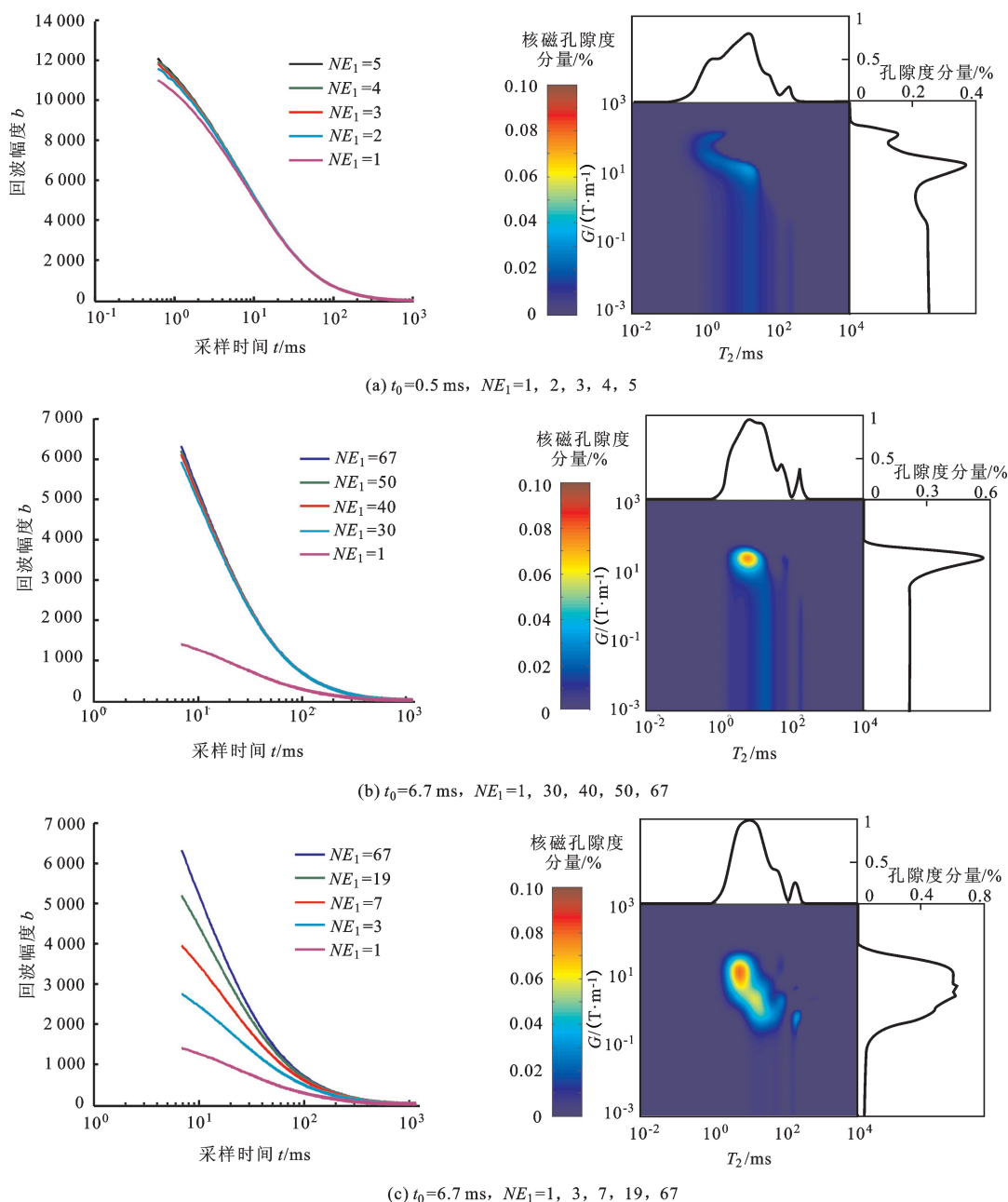
由图2(c) N-4 号饱和水砂岩的 $T_2 - G$ 反演谱可知, 储层岩石 T_2 谱和 G 谱有明显的主峰, 可构造 $T_2 - G$ 二维正态分布模型作为待测岩石的近似模型; 将岩石 T_2 谱和 G 谱的峰值设置为构造模型的几何中心, 以保证构造模型的近似程度, 本文中使用长、短回波间隔 CPMG 序列测量的 T_2 谱估算这两个重要参数。

长、短回波间隔测量的 T_2 几何平均值与内部磁场梯度满足^[11]:

$$\frac{1}{T_{2gL}} - \frac{1}{T_{2gS}} = \frac{1}{12} \gamma^2 G_a^2 D (TE_L^2 - TE_S^2). \quad (2)$$

式中, T_{2gL} 为长回波间隔 TE_L 测量的 T_2 几何平均值; T_{2gS} 为短回波间隔 TE_S 测量的 T_2 几何平均值; G_a 为待测岩石的岩石内部磁场梯度平均值。

式(2)的假设条件: 岩石中不同尺寸的孔隙对应相同的内部磁场梯度, 因此式(2)计算的内部磁场梯度对应其平均值 G_a 。对比发现 G_a 与内部磁场梯度几何平均值 G_g (由 $T_2 - G$ 二维分布计算) 的数量级相同, 而 T_{2gS} 又反映岩石 T_2 弛豫时间的平均值, 因此以 (T_{2gS}, G_a) 为几何中心构造的二维正态分布模型可作为待测岩石的 $T_2 - G$ 近似模型。

图2 N-4号砂岩不同 t_0 、 NE_1 对应的回波串与反演谱Fig. 2 Experimental results of sample N-4 by manual changing t_0 and NE_1

以N-4号砂岩为例,图3(a)是长、短回波间隔测量的 T_2 谱,图3(b)是使用上述方法构造的 $T_2 - G$ 近似分布模型 $f(T_{2j}, G_p)$,并使 $f(T_{2j}, G_p)$ 满足归一化条件:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(T_{2j}, G_p) = 1. \quad (3)$$

2.2 $T_2 - G$ 回波串正演数学模型

$T_2 - G$ 实验时人工调节采集参数是根据第二个窗口的回波幅度差优选 t_0 、 NE_1 的,因此建立 $T_2 - G$ 回波串正演数学模型是实现 t_0 、 NE_1 自动匹配的必

要条件。

式(1)是改良式CPMG序列的回波幅度,写成矩阵形式^[13]:

$$\mathbf{B} = \mathbf{K}_T \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{K}_G. \quad (4)$$

式中, $\mathbf{B}$ 为回波幅度 b_{ik} 对应的矩阵; $\mathbf{K}_T$ 为 T_{2j} 对应的核函数矩阵; $\mathbf{K}_G$ 为 G_p 对应的核函数矩阵; $\mathbf{X}$ 为 $f(T_{2j}, G_p)$ 对应的矩阵。

核函数矩阵 $\mathbf{K}_T$ 、 $\mathbf{K}_G$ 由 t_0 、 NE_1 、 TE 、 NE (第二个窗口)以及 T_2 、 G 的布点方式计算,将构造的 $T_2 - G$ 近似模型 $f(T_{2j}, G_p)$ 赋给 $\mathbf{X}$,利用式(4)即可正演模

拟 t_0 、 NE_1 对应的回波串幅度 b_{ik} 。

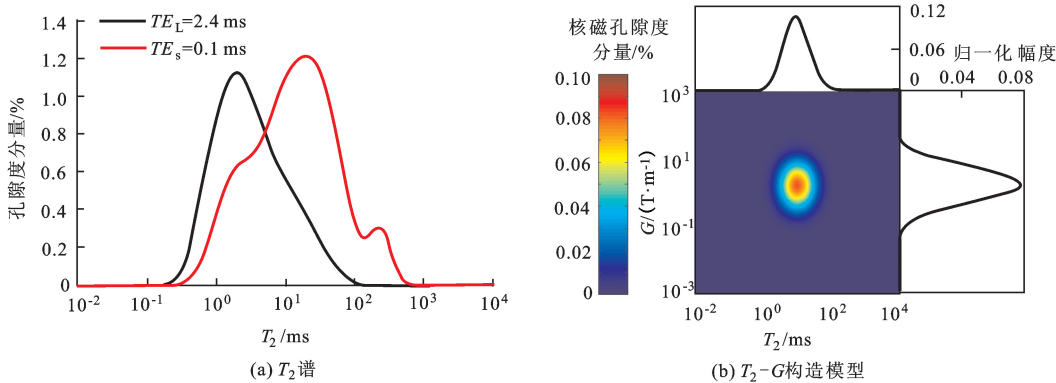


图 3 N-4 号砂岩 T_2 谱及 $T_2 - G$ 构造模型

Fig.3 T_2 spectrums and constructed T_2-G distribution model of sample N-4

2.3 t_0 、 NE_1 自动匹配算法

依据 t_0 、 NE_1 人工调节规律,结合核磁共振岩心分析仪 MR-DF 的硬件参数,将最优化 t_0 、 NE_1 的判别条件量化,最终形成 $T_2 - G$ 实验采集参数自动搜索和匹配算法,如图 4 所示。

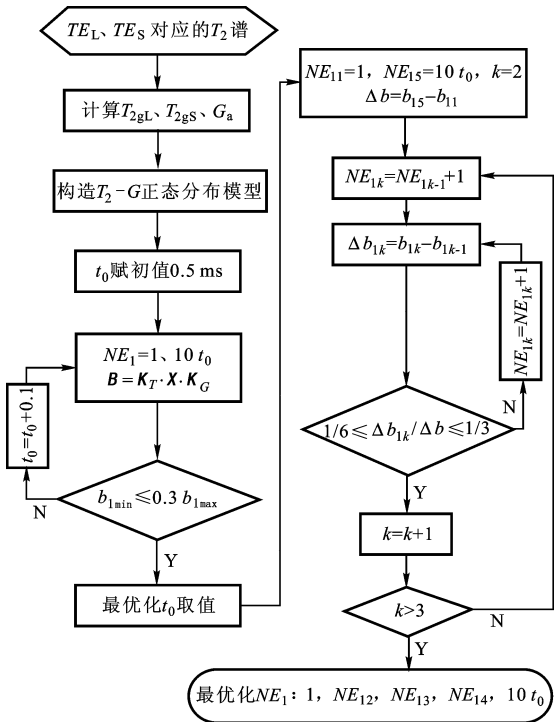


图 4 $T_2 - G$ 实验采集参数自动匹配算法

Fig.4 Automatic matching algorithm for searching acquisition parameters of T_2-G experiment

用 Matlab 软件实现图 4 的算法,输入数据:待测岩石在长、短回波间隔下测量的 T_2 谱,回波间隔 TE_L 、 TE_S ;输出数据:待测岩石 $T_2 - G$ 实验优化采集参数 t_0 、 NE_1 。

N-4 号砂岩 $T_2 - G$ 采集参数自动匹配结果: $t_0 =$

6.4 ms, $NE_1 = 1, 3, 8, 17, 64$,图 5 是这组参数的测量结果。构造模型只能近似表征待测岩石的 $T_2 - G$ 分布,无法反映 T_2 或 G 谱的一些细微特征,导致图 5 中回波串之间的间隔没有图 2(c) 中的均匀,但是反演谱中内部磁场梯度的分布范围和形态与图 2(c) 一致,说明本文中设计的 t_0 、 NE_1 自动匹配技术满足储层岩石的 $T_2 - G$ 实验设计要求。

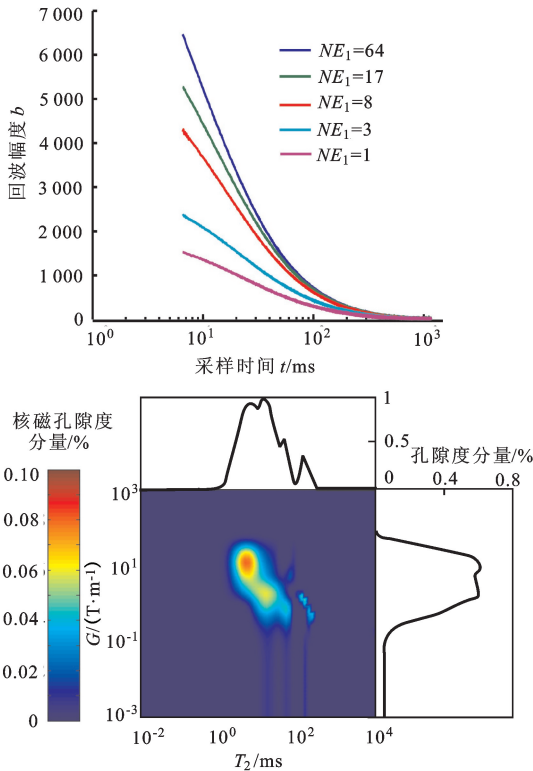


图 5 N-4 号砂岩自动匹配 t_0 、 NE_1 对应的回波串与反演谱

Fig.5 Experimental results of sample N-4 by automatic matching t_0 and NE_1

3 应用效果分析

为检验上述 $T_2 - G$ 实验采集参数自动匹配技术的实用性,从国内外四个不同区块选择 8 块不同物性的砂岩进行 $T_2 - G$ 实验,表 1 是实验岩心的基础数据及 t_0 、 NE_1 自动匹配结果。

表 1 中不同区块砂岩的 t_0 、 NE_1 差异明显,同一区块砂岩的 t_0 、 NE_1 也不相同,这也印证了 $T_2 - G$ 实验采集参数优化匹配的必要性。图 6 ~ 9 中给出了 N-1、S-2、T-1、B-1 号砂岩(对应 4 个不同区块)的测量结果;每块岩心回波串的幅度差明显,反演谱中峰位清晰,G 轴没有“拖尾”,说明本文中设计的 t_0 、 NE_1 自动匹配方法能够适应不同区块、不同内部磁场梯度大

小、不同物性砂岩的 $T_2 - G$ 实验测量。

表 1 实验岩心基础数据及 t_0 、 NE_1 自动匹配结果

Table 1 Basic data and automatic matching t_0 and NE_1 of experimental rocks					
编号	岩性	$\phi_g / \%$	$K_g / 10^{-3} \mu m^2$	t_0 / ms	NE_1
N-1	细砂岩	17.08	11.72	9.6	1,3,7,22,96
N-2	细砂岩	17.02	2.21	6.7	1,3,6,17,67
N-3	细砂岩	23.87	144.85	2.0	1,2,5,14,20
S-1	中细砂岩	11.45	1.21	0.8	1,2,4,6,8
S-2	中细砂岩	13.24	0.87	2.2	1,4,9,16,22
T-1	粉细砂岩	16.24	6.00	2.3	1,2,5,12,23
T-2	粉细砂岩	13.46	0.39	2.6	1,3,6,14,26
B-1	贝雷砂岩	19.86	278.41	15.5	1,2,5,18,155

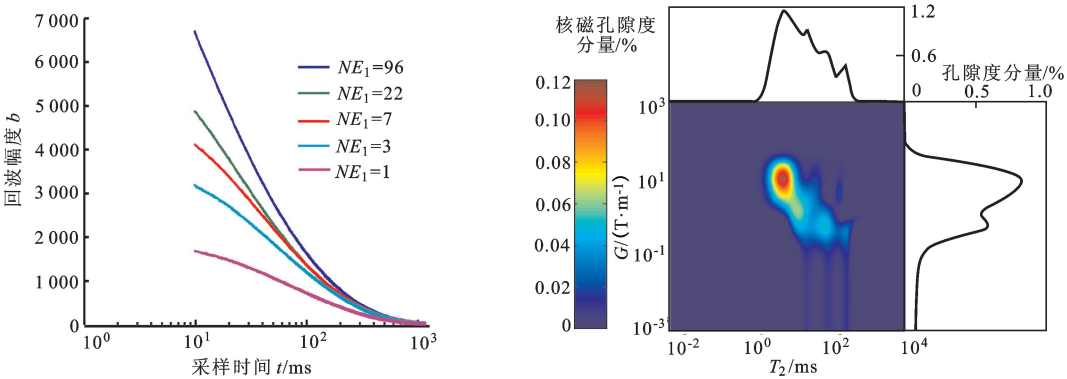


图 6 N-1 号岩心自动匹配 t_0 、 NE_1 对应的回波串与反演谱

Fig. 6 Experimental results of sample N-1 by automatic matching t_0 and NE_1

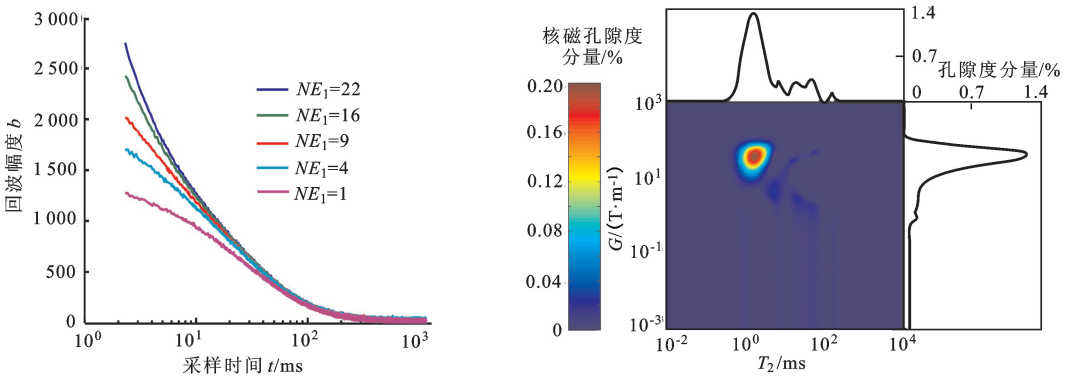


图 7 S-2 号岩心自动匹配 t_0 、 NE_1 对应的回波串与反演谱

Fig. 7 Experimental results of sample S-2 by automatic matching t_0 and NE_1

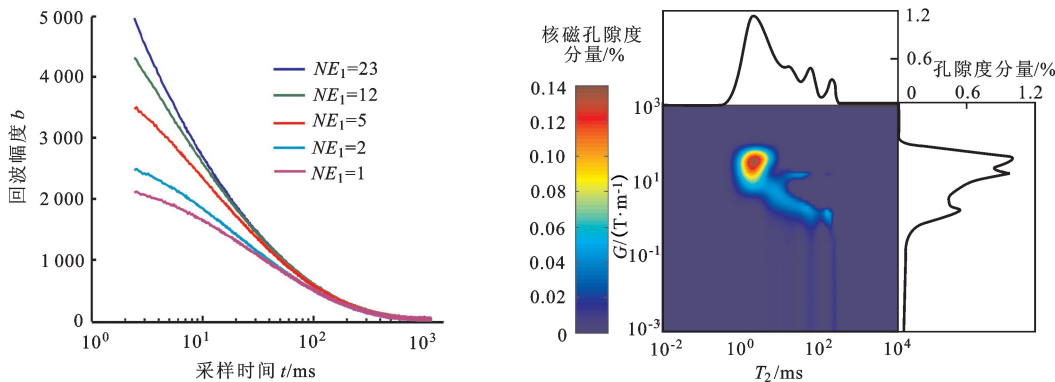


图 8 T-1 号岩心自动匹配 t_0 、 NE_1 对应的回波串与反演谱

Fig.8 Experimental results of sample T-1 by automatic matching t_0 and NE_1

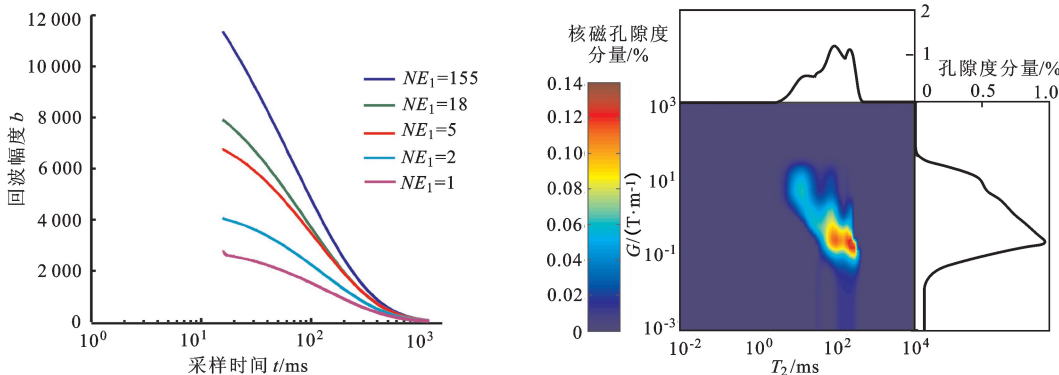


图 9 B-1 号岩心自动匹配 t_0 、 NE_1 对应的回波串与反演谱

Fig.9 Experimental results of sample B-1 by automatic matching t_0 and NE_1

4 结 论

(1) 改良式 CPMG 序列的 t_0 、 NE_1 是影响 $T_2 - G$ 实验效果的重要参数,选取不当将导致反演谱中 G 轴的“拖尾”,不同地区储层岩石的内部磁场梯度差异明显,不能使用相同的 t_0 、 NE_1 。

(2) 基于长、短回波间隔 CPMG 测量及 $T_2 - G$ 回波串正演数值模拟,实现了 $T_2 - G$ 实验采集参数的自动搜索和匹配,有效降低了实验操作难度,显著提高了实验效率;8 块不同性质砂岩的 $T_2 - G$ 实验效果验证了该技术的可行性和实用性。

(3) 为进一步提高实验效率,将 t_0 、 NE_1 自动匹配方法集成到核磁共振岩心分析仪的采集软件,实现 $T_2 - G$ 实验的智能采集是下一步研究方向。

参考文献:

[1] KLEINBERG R L, VINEGAR H J. NMR properties of reservoir fluids [J]. Log Analyst, 1996,37(6):20-32.
[2] DUNN K J. Enhanced transverse relaxation in porous media due to internal field gradients[J]. Journal of Mag-

netic Resonance, 2002,156(2):171-180.
[3] ZHANG G Q, HIRASAKI G J, HOUSE W V. Effect of internal field gradients on NMR measurements [J]. Petrophysics, 2001,42(1):37-47.
[4] HURLIMANN M D. Effective gradients in porous media due to susceptibility differences[J]. Journal of Magnetic Resonance, 1998,131(2):232-240.
[5] ZHANG G Q, HIRASAKI G J, HOUSE W V. Internal field gradients in porous media: proceedings of SPWLA 41st Annual Logging Symposium, Dallas, TX [C]. Houston: The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts,2000,paper AA.
[6] QUAN C, ANDREW E M, BRUCE G C, et al. The internal magnetic field distribution and single exponential magnetic resonance free induction decay in rocks [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2005,175(2):300-308.
[7] APPEL M, FREEMAN J J, PERKINS R B, et al. Restricted diffusion and internal field gradient: proceedings of SPWLA 40th Annual Logging Symposium, Oslo, Norway [C]. Houston: The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts,1999, paper FF.
[8] BENDEL P. Spin-echo attenuation by diffusion in nonuni-

- form field gradients [J]. Journal of Magnetic Resonance, 1990, 86(3): 509-515.
- [9] ZHANG G Q, HIRASAKI G J, HOUSE W V. Diffusion in internal field gradients: proceedings of International Symposium of the Society of Core Analysts [C]. The Hague, Canada: Society of Core Analysts, 1998, paper 23.
- [10] SHAFER L S, MARDON D, GARDNER J. Diffusion effects on NMR response of oil & water in rock: impact of internal gradients: proceedings of International Symposium of the Society of Core Analysts, Golden [C]. Colorado, Canada: Society of Core Analysts, 1999, paper 16.
- [11] DUNN K J, APPEL M, FREEMAN J J, et al. Interpretation of restricted diffusion and internal field gradients in rock data: proceedings of SPWLA 42nd Annual Logging Symposium, Houston, TX [C]. Houston: The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 2001, paper AAA.
- [12] SUN B Q, DUNN K J. Probing the internal field gradients of porous media [J]. Phys Rev E, 2002, 65(5): 051309.
- [13] 谢然红, 肖立志. 核磁共振测井探测岩石内部磁场梯度的方法 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(5): 1341-1347.
- XIE Ranhong, XIAO Lizhi. NMR logging probing the internal magnetic field gradients of rocks [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 2009, 52(5): 1341-1347.
- [14] 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.
- [15] SUN B Q, DUNN K J. A global inversion method of multi-dimensional NMR logging [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2005, 172(1): 152-160.
- [16] VENKATARAMANNAN L, SONG Y Q, HURLIMANN M D. Solving fredholm integrals of the first kind with tensor product structure in 2 and 2.5 dimensions [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2002, 50(5): 1017-1026.
- [17] ARNS C H, WASHBUEN K E, CALLAGHAN P T. Multidimensional inverse Laplace NMR spectroscopy in petrophysics: proceedings of SPWLA 47th Annual Logging Symposium, Veracruz, Mexico [C]. Houston: The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 2006, paper X.
- [18] SUN B Q, DUNN K J. Core analysis with two dimensional NMR: proceedings of International Symposium of the Society of Core Analysts, Monterey, USA [C]. Houston: The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 2002, paper 38.

(编辑 修荣荣)