

ICS 75.020

E 12

备案号：48204—2015

**SY**

# 中华人民共和国石油天然气行业标准

**SY/T 6490—2014**

代替 SY/T 6490—2007

---

## 岩样核磁共振参数实验室测量规范

Specification for measurement of rock NMR parameter in laboratory

2014—10—15 发布

2015—03—01 实施

---

国家能源局 发布

## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 主要测量仪器及工作环境 .....	1
4 主要试剂制备 .....	2
5 岩样制备 .....	2
6 岩样核磁共振参数测量 .....	3
7 测量结果处理 .....	6
8 测定结果允许不确定度 .....	6
附录 A (资料性附录) 流体扩散系数核磁共振测量 .....	7
附录 B (资料性附录) $T_2$ , $T_1$ 特征参数的计算 .....	8
附录 C (资料性附录) 岩样物性参数的确定方法 .....	10
附录 D (资料性附录) 岩样核磁共振测试报告格式 .....	12

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准代替 SY/T 6490—2007《岩样核磁共振参数实验室测量规范》。本标准与 SY/T 6490—2007 相比，主要变化如下：

- 在岩样核磁共振实验测量仪“逻辑控制模块”中增加了“梯度放大器”[见 3.2 b)]；
- 在测量采集软件中增加了测量中使用的脉冲序列描述 [见 3.2 e)]；
- 增加了相关设备的主要技术指标描述（见 3.3）；
- 修改了脱水装置的最大脱水压力，增加了脱水装置的功能要求 [见 3.3 a)]；
- 在主要试剂中将“重水”改为“不同孔隙度标准样品”[见 4.1 k)]；
- 删除干岩样的制备中对岩样清洗、烘干的描述，直接引用 SY/T 5336 规定的方法（见 5.2.1，5.2.2；2007 年版的 5.2.1，5.2.2）；
- 删除脱水压力的确定描述（2007 年版的 5.4），增加了最佳脱水压力描述（见 5.4.2，5.4.3，5.4.4）；
- 在测前准备中增加了梯度磁场应用时的设备要求；增加了脱水岩心的保护方法；增加了恒温箱温度设置要求（见 6.3.1，6.3.4；2007 年版的 6.1.1，6.1.4）；
- 补充了对测量横向弛豫时间  $T_2$  时的采集参数描述（见 6.2.1，2007 年版本的 6.2.2）；
- 增加了测量纵向弛豫时间  $T_1$  时的采集参数描述（见 6.2.2）；
- 修改了横向弛豫时间  $T_2$  测量采集参数宜使用值中的描述（见表 1，2007 年版的表 1）；
- 在测前刻度中增加了对系统参数的调整（见 6.4.1）；
- 在岩样测量中修改并补充了对横向弛豫时间  $T_2$  测量的描述（见 6.5.1，2007 年版的 6.4.1～6.4.3）；
- 增加了对纵向弛豫时间  $T_1$  测量的描述（见 6.5.2）；
- 增加了对核磁共振差谱测量的描述（见 6.5.3）；
- 增加了对核磁共振移谱测量的描述（见 6.5.4）；
- 在“测量结果处理”中修改并补充了 CPMG 脉冲序列、INVERC 脉冲序列测量结果处理方法的描述（见 7.1.1，7.1.2；2007 年版的 7.1，7.2）；
- 增加了对核磁共振差谱测量结果处理方法的描述（见 7.1.3）；
- 增加了对核磁共振移谱测量结果处理方法的描述（见 7.1.4）；
- 增加了流体扩散系数核磁共振测量（见附录 A）；
- 增加了  $T_1$  分析的拟合模型描述（见 B.4）；
- 增加了岩样核磁共振  $T_1$  测试报告内容格式（见 D.5）。

本标准由石油工业标准化技术委员会石油测井专业标准化委员会（CPSC/TC11）提出并归口。

本标准负责起草单位：中国石油集团测井有限公司技术中心。

本标准参加起草单位：中国石油大学（北京）、中国石油勘探开发研究院。

本标准主要起草人：罗燕颖、吴迪、杜环虹、李新、毛志强、谢然红、胡法龙、李艳婷、王蕾。

本标准代替了 SY/T 6490—2007。

SY/T 6490—2007 的历次版本发布情况为：

- SY/T 6490—2000。

## 岩样核磁共振参数实验室测量规范

### 1 范围

本标准规定了实验室内室温条件下测量岩样核磁共振参数的主要测量仪器、主要试剂制备、岩样制备、岩样测量、结果处理和允许不确定度的要求。

本标准适用于实验室内岩样或岩屑核磁共振参数的测定。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

SY/T 5336 岩心分析方法

### 3 主要测量仪器及工作环境

#### 3.1 岩样核磁共振实验测量仪器示意图见图 1。

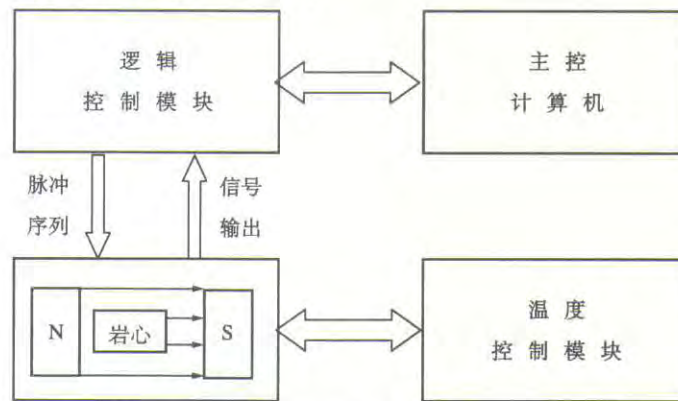


图 1 岩样核磁共振实验测量仪器示意图

#### 3.2 岩样核磁共振实验测量仪器主要由以下部分组成：

- 永磁磁体及探头模块：磁场强度 0.047T 或 0.0235T，磁场均匀度不低于百万分之一百。探头内径 40mm 或 60mm，长度 60mm，其他尺寸探头可选。
- 逻辑控制模块：含频率合成器、脉冲发生器、射频发射器、射频接收器、前置放大器、梯度放大器等。
- 温度控制模块：控制磁体和测量探头温度为恒温（常规测量温度为 35℃），温度的不确定度不超过  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。
- 主控计算机。
- 测量采集软件：采集软件中包含 CPMG, INVERC, CPMGGRAD, DEGAUSS, DIFF, DIFFTRIG 等脉冲序列。
- 数据处理软件。

## SY/T 6490—2014

### 3.3 相关设备主要如下：

- a) 脱水装置：驱替装置或具有恒温、恒湿功能的离心机；离心机温度控制范围为  $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ ，湿度控制范围为  $50\% \sim 70\%$ ；最大脱水压力不小于  $2758 \times 10^3 \text{ Pa}$  (400psi)。
- b) 电子天平：测量范围  $0\text{g} \sim 200\text{g}$ ，不确定度小于或等于  $0.01\text{g}$ ；测量范围  $0\text{g} \sim 2000\text{g}$ ，不确定度小于或等于  $0.1\text{g}$ 。
- c) 温控烘箱：范围为  $0^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。
- d) 恒温箱：范围为  $0^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，不确定度在  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  之间。

### 3.4 工作环境要求如下：

- a) 室温在  $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 。
- b) 湿度在  $50\% \sim 70\%$ 。

## 4 主要试剂制备

### 4.1 主要试剂

配备的主要试剂如下：

- a) 氯化钠（分析纯）。
- b) 碳酸氢钠（分析纯）。
- c) 氯化钙（分析纯）。
- d) 氯化锰（分析纯）。
- e) 硫酸铜（分析纯）。
- f) 变压器油。
- g) 无水煤油。
- h) 标准水样 1（蒸馏水）。
- i) 标准水样 2（ $0.05\% \text{ CuSO}_4$  溶液）。
- j) 陶瓷标样（饱和水或  $0.05\% \text{ CuSO}_4$  溶液）。
- k) 不同孔隙度标准样品。

### 4.2 配制用于饱和岩心的溶液

- 4.2.1 根据测量所需溶液矿化度及类型的要求，计算出配制  $2000\text{mL}$  溶液所需溶质的质量。
- 4.2.2 将溶质在  $100^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$  条件下烘至恒重，并放入干燥器中冷却至室温  $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 。
- 4.2.3 用电子天平称出所需的溶质。
- 4.2.4 将称好的溶质倒入  $2000\text{mL}$  的容量瓶中，再往容量瓶中加入约  $1000\text{mL}$  的蒸馏水，轻轻摇动容量瓶，至溶质完全溶解，然后边摇动边加入蒸馏水至  $2000\text{mL}$  刻度位置即可得到饱和溶液。

## 5 岩样制备

### 5.1 原始岩样的获取

根据需要获取不少于  $10\text{g}$  的岩样，一般在岩心上钻取直径为  $38.1\text{mm}$  ( $1.5\text{in}$ ) 或  $25.4\text{mm}$  ( $1\text{in}$ )、长度为  $35\text{mm} \sim 50\text{mm}$  的岩样。

### 5.2 干岩样的制备

- 5.2.1 按 SY/T 5336 的规定洗净岩样中的剩余油和剩余盐。

5.2.2 将处理后的岩样风干后，按 SY/T 5336 的规定将岩样烘干，以岩样烘干至恒重为止，然后放入干燥器中冷却至室温。若岩样疏松，经过上述烘干冷却后，用合适直径、长度比岩样长 100mm 的热缩塑料管套住岩样，在温度为  $75^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  条件下烘 0.5h，然后放入干燥器中冷却至室温。

### 5.3 饱和岩样的制备

按照 SY/T 5336 规定的方法制备饱和岩样。

### 5.4 脱水岩样的制备

5.4.1 在温度为  $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 50%~70% 的条件下，通过离心或驱替装置对岩样进行脱水处理，制作不同饱和度的脱水岩样。

5.4.2 为了确定  $T_2$  截止值，应将完全饱和水岩心中的可动水脱去，脱去可动水使用的脱水压力为最佳脱水压力。

5.4.3 碎屑岩岩样最佳脱水压力宜使用值如下：

- a) 高孔高渗、中孔中渗岩样最佳脱水压力使用  $689 \times 10^3 \text{ Pa}$  (100psi)。
- b) 低孔、低渗岩样最佳脱水压力使用  $1379 \times 10^3 \text{ Pa}$  (200psi)。
- c) 超低渗岩样最佳脱水压力使用  $2068 \times 10^3 \text{ Pa}$  (300psi)。

5.4.4 碳酸盐岩和火山岩岩样最佳脱水压力宜使用  $2758 \times 10^3 \text{ Pa}$  (400psi)。

## 6 岩样核磁共振参数测量

### 6.1 系统参数

主要包括：

- a) 核磁共振频率偏移值 01：偏移值不得超过主频率的 2%。
- b)  $90^{\circ}$  脉冲宽度。
- c)  $180^{\circ}$  脉冲宽度。
- d) 仪器要求的其他特定参数。

### 6.2 采集参数

6.2.1 测量横向弛豫时间  $T_2$  时的采集参数主要包括：

- a) 回波间隔  $T_E$ ：以提高对衰减快的短横向弛豫分量的分辨能力及减小扩散对横向弛豫测量的影响为设置原则。
- b) 完全恢复时间：以使纵向磁化矢量能够完全恢复为设置原则。
- c) 采集回波个数 NECH：以提高信噪比，增强对衰减慢的长横向弛豫分量的分辨能力为设置原则。
- d) 采集扫描次数 NS：以提高信噪比为设置原则，信噪比宜控制在 80 以上。
- e) 接收增益 RG：在信号不失真的条件下，以提高信噪比为设置原则，信噪比宜控制在 80 以上。

6.2.2 测量纵向弛豫时间  $T_1$  时的采集参数主要包括：

- a)  $180^{\circ}$  脉冲与  $90^{\circ}$  脉冲之间的测量时间序列：时间序列采用对数取点法，取点个数 10 个~20 个，最短时间通常为 0.05ms，最长时间通常应大于  $5T_1$ 。
- b) 完全恢复时间：所设值为横向弛豫时间  $T_2$  测量时所设完全恢复时间的 1.5 倍。
- c) 采集扫描次数 NS、接收增益 RG 的设置分别见 6.2.1 中的 d) 和 e)。

## SY/T 6490—2014

## 6.2.3 采集参数设置原则如下：

- a) 指导现场测井，满足地质解释需要。
- b) 满足研究目的，符合用户需求。
- c) 最大限度获取岩样信息。

横向弛豫时间  $T_2$  测量采集参数宜使用值见表 1。

表 1 横向弛豫时间  $T_2$  测量采集参数宜使用值

样品	回波间隔 ( $T_E$ ) ms	完全恢复时间 s	回波个数 (NECH)	扫描次数 (NS)	接收增益 (RG) %
油样 (无水煤油)	0.7	20	8192	32	10~20
标准水样 1 (蒸馏水)	0.7	20	16384	32	10~20
标准水样 2 (0.05% $\text{CuSO}_4$ 溶液)	0.2	3	4096	32	10~20
陶瓷标样 (饱和水或 0.05% 的硫酸铜溶液)	0.2	10	4096	128	50~100
饱和岩样 (孔隙度 15% 以上)	0.2	10	4096	128	50~100
饱和岩样 (孔隙度 10%~15%)	0.2	10	4096	$\geq 128$	80~100
饱和岩样 (孔隙度 5%~10%)	0.2	6	4096	$\geq 256$	80~100
饱和岩样 (孔隙度 5% 以下)	0.2	6	4096	$\geq 256$	80~100
脱水岩样	同饱和岩样	同饱和岩样	同饱和岩样	同饱和岩样	同饱和岩样

## 6.3 测前准备

6.3.1 打开仪器电源，按照仪器要求设定磁体控制温度，并使探头和磁体保持恒温。在梯度磁场条件下进行测量时，应打开冷凝设备。

6.3.2 仪器预热 16h 以上。

6.3.3 打开计算机，进入测量控制软件。

6.3.4 将标准水样、油样、标准样、待测岩样放入恒温箱中，温度设定为磁体工作温度，恒温 6h 以上。岩样完全饱和时，应将岩样及饱和液放入密闭玻璃容器中，整体放入恒温箱中保存；岩样脱水后，应将岩样用保鲜膜紧紧包裹后置于底部盛有饱和溶液的密闭玻璃容器中，整体放入恒温箱中待用。恒温箱的温度与测量温度一致。

## 6.4 测前刻度

6.4.1 用 WOBBLE 脉冲序列调整探头位于磁场中心位置；用 FID 脉冲序列调整核磁共振频率偏移值 01、90°脉冲宽度、180°脉冲宽度。

6.4.2 将 4.2 中配置的饱和溶液 25mL~30mL、油样（无水煤油）25mL~30mL、标准水样 1（蒸馏水）25mL~30mL、标准水样 2（0.05% CuSO<sub>4</sub> 溶液）25mL~30mL、陶瓷标样（饱和水或 0.05% 硫酸铜溶液）放入恒温箱中恒温保持 6h 以上，恒温箱的温度与测量温度一致。

6.4.3 设定横向弛豫时间  $T_2$ 、纵向弛豫时间  $T_1$  测量参数，对上述样品进行横向弛豫时间  $T_2$ 、纵向弛豫时间  $T_1$  测量，将测量结果与标准谱对比，确定测量仪器的稳定性和准确性。测量结束后，将所测样品放入恒温箱中密闭保存。

## 6.5 岩样测量

### 6.5.1 横向弛豫时间 $T_2$ 测量

6.5.1.1 将准备好的待测岩样用不含氢的非磁性容器（如玻璃试管）装好，放入测量腔（岩心室或样品室）。岩样的中心位置应位于磁场的中心位置。

6.5.1.2 根据测量内容，选择相应的脉冲序列（对 MARAN 类型仪器：测量横向弛豫时间  $T_2$  选用 CPMG 脉冲序列）。

6.5.1.3 设置测量系统参数和回波间隔、完全恢复时间、采集回波个数、采集扫描次数和接收增益等采集参数，确认当前参数准确无误后，开始测量。

### 6.5.2 纵向弛豫时间 $T_1$ 测量

6.5.2.1 岩样放入测量腔要求见 6.5.1.1。

6.5.2.2 根据测量内容，选择相应的脉冲序列（对 MARAN 类型仪器：测量纵向弛豫  $T_1$  选用 INVERC 脉冲序列）。

6.5.2.3 设置测量系统参数和完全恢复时间、采集扫描次数、接收增益等采集参数；建立 180°与 90°脉冲之间的测量时间序列；确认当前参数准确无误，并装载建立好的 180°脉冲与 90°脉冲之间的测量时间序列后，开始测量。

### 6.5.3 核磁共振差谱测量

6.5.3.1 岩样放入测量腔要求见 6.5.1.1。

6.5.3.2 选择的脉冲序列见 6.5.1.2。

6.5.3.3 系统参数与采集参数的设置见 6.5.1.3。

6.5.3.4 进行不同恢复时间横向弛豫时间  $T_2$  测量。

### 6.5.4 核磁共振移谱测量

6.5.4.1 打开梯度放大器电源，预热 0.5h 以上；打开冷凝设备，并将其温度调节与测量温度一致。

6.5.4.2 岩样放入测量腔要求见 6.5.1.1。

6.5.4.3 根据测量内容，选择相应的脉冲序列（对 MARAN 类型仪器：核磁共振移谱测量建议选用 CPMGGRAD 脉冲序列）。

6.5.4.4 设置测量系统参数和回波间隔、完全恢复时间、采集回波个数、采集扫描次数、接收增益和梯度磁场强度等采集参数。

6.5.4.5 进行加梯度磁场条件下不同回波间隔横向弛豫时间  $T_2$  测量。



## SY/T 6490—2014

注：在进行每一种回波间隔测量前，需用 DEGAUSS 脉冲序列对仪器进行消磁。

### 6.5.5 流体扩散系数核磁共振测量

流体扩散系数核磁共振的测量参见附录 A。

### 6.6 测量结果

测量完成后，将测量结果保存。

### 6.7 测后检验

将恒温密闭保存的饱和溶液、无水煤油及标准样品进行测量。将所得到的测量结果与 6.4 中的测量结果进行对比，检测测量前后仪器的稳定性；与标准谱进行对比，确定测量结果的准确性。如果谱的峰值位置和面积与 6.4 中的测量结果及标准谱的相对不确定度低于 3%，则所得到的岩样测量结果准确可靠；否则，应查明原因并重新测量。

## 7 测量结果处理

### 7.1 测量结果处理方法

7.1.1 采用 CPMG 脉冲序列进行横向弛豫时间  $T_2$  测量之后，由处理程序（如 MARAN 类型仪器采用的 WinDxp）求出横向弛豫时间  $T_2$  分布。

7.1.2 采用 INVERC 脉冲序列进行纵向弛豫时间  $T_1$  测量之后，由处理程序（如 MARAN 类型仪器采用的 WinDxp）求出纵向弛豫时间  $T_1$  分布。

7.1.3 采用 CPMG 脉冲序列进行核磁共振差谱测量之后，由处理程序（如 MARAN 类型仪器采用的 WinDxp）求出不同恢复时间横向弛豫时间  $T_2$  分布。

7.1.4 采用 CPMGGRAD 脉冲序列进行核磁共振移谱测量之后，由处理程序（如 MARAN 类型仪器采用的 WinDxp）求出不同回波间隔横向弛豫时间  $T_2$  分布。

### 7.2 保存相关数据及图件

测量结果处理完成后，保存相关数据及图件。

### 7.3 编写测试报告

测试报告应包括主要的采集参数、原始衰减曲线、 $T_1$  谱、 $T_2$  谱以及处理得到的相关岩物性参数等内容。 $T_1$ 、 $T_2$  特征参数的计算参见附录 B。岩物性参数由岩样核磁共振实验测量结果计算确定，确定方法参见附录 C。岩样核磁共振测试报告参见附录 D。

## 8 测定结果允许不确定度

8.1 标准样品核磁共振实验测量的纵向弛豫时间  $T_1$  和横向弛豫时间  $T_2$ ，其特征参数与标准谱特征参数的相对不确定度应小于 3%。

8.2 对所测岩样抽样重复测量进行检测，抽样率为 10%。最小抽样岩样数为两块；实验测量的纵向弛豫时间  $T_1$  和横向弛豫时间  $T_2$ ，其特征参数的相对不确定度应小于 5%。

附 录 A  
(资料性附录)  
流体扩散系数核磁共振测量

### A.1 流体扩散系数核磁共振测量方法

A.1.1 打开梯度放大器电源,预热 0.5h 以上;打开冷凝设备,并将其温度调节与测量温度一致。

A.1.2 将准备好的待测岩样用不含氢的非磁性容器(如玻璃试管)装好,放入测量腔(岩心室或样品室)。岩样的中心位置应位于磁场的中心位置。

A.1.3 根据测量内容,选择相应的脉冲序列。对 MARAN 类型仪器有如下两种方法可以进行流体扩散系数测量:

- a) 应用 DIFF 或 DIFFTRIG 脉冲序列测量流体扩散系数:
  - 1) 设置测量系统参数和完全恢复时间、采集扫描次数、接收增益、梯度磁场强度、梯度脉冲宽度时间等采集参数;
  - 2) 设立梯度脉冲宽度时间测量序列,确认当前参数准确无误,开始测量;
  - 3) 开始测量前及测量结束后,需用 DEGAUSS 脉冲序列对仪器进行消磁。
- b) 应用 CPMGGRAD 脉冲序列测量流体扩散系数:
  - 1) 设置测量系统参数和回波间隔、完全恢复时间、采集回波个数、采集扫描次数、接收增益、梯度磁场强度等采集参数;
  - 2) 进行固定梯度磁场强度,改变回波间隔横向弛豫时间  $T_2$  测量(回波间隔变化值不少于五个);或进行固定回波间隔,改变梯度磁场强度横向弛豫时间  $T_2$  测量(梯度磁场强度变化值不少于五个);
  - 3) 在进行每一种回波间隔(或每一种梯度磁场强度)测量前需用 DEGAUSS 脉冲序列对仪器进行消磁。

### A.2 流体扩散系数核磁共振测量结果处理

#### A.2.1 采用 DIFF 或 DIFFTRIG 脉冲序列

测量之后,由处理程序(如 MARAN 类型仪器采用的 RI Diffusion)求出流体扩散系数。

#### A.2.2 采用 CPMGGRAD 脉冲序列

A.2.2.1 进行固定梯度磁场强度,改变回波间隔横向弛豫时间  $T_2$  测量,或进行固定回波间隔,改变梯度磁场强度横向弛豫时间  $T_2$  测量之后,由处理程序(如 MARAN 类型仪器采用的 WinDxp)求出不同回波间隔横向弛豫时间  $T_2$  值,或不同梯度磁场强度横向弛豫时间  $T_2$  值。

A.2.2.2 计算不同回波间隔下(或不同梯度磁场强度下)的  $(\gamma \times G \times T_E)^2/12$  值(其中: $\gamma$  为旋磁比,其值可取为  $2.68 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ ;  $G$  为梯度磁场强度;  $T_E$  为回波间隔)。

A.2.2.3 将不同回波间隔下(或不同梯度磁场强度下)的  $1/T_2$  值作为 Y 轴值,  $(\gamma \times G \times T_E)^2/12$  值作为 X 轴值,通过线性拟合,得出一条线性拟合线,该线的斜率就为所测流体的扩散系数。

**附 录 B**  
(资料性附录)  
 **$T_2$ ,  $T_1$ 特征参数的计算**

**B.1  $T_2$ 谱分析的拟合模型**

利用数据处理软件可对横向弛豫测量到的回波串作单指数、双指数以及多指数拟合。

单指数拟合的基本关系式见公式 (B.1):

$$A_1(t) = A_0 e^{-t/T_2} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

双指数拟合的基本关系式见公式 (B.2):

$$A_2(t) = A_a e^{-t/T_{2a}} + A_b e^{-t/T_{2b}} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

多指数拟合的基本关系式见公式 (B.3):

$$A_n(t) = \sum_{j=1}^N A_j e^{-t/T_{2j}} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

$A_1(t)$ ,  $A_2(t)$ ,  $A_n(t)$ ——核磁共振横向弛豫回波幅度值;

$A_0$ ,  $A_a$ ,  $A_b$ ,  $A_j$ ——核磁共振横向弛豫曲线的拟合系数;

$T_2$ ——横向弛豫时间,单位为毫秒(ms);

$N$ ——横向弛豫时间  $T_2$ 的拟合分量数目;

$T_{2a}$ ,  $T_{2b}$ ,  $T_{2j}$ ——横向弛豫时间  $T_2$ 的拟合分量,单位为毫秒(ms)。

**B.2  $T_2$ 截止值的确定**

确定  $T_2$ 截止值  $T_{2\text{cutoff}}$ 的方法:根据脱去可动水后岩心  $T_2$ 谱,计算累积孔隙度,再在完全饱和水岩心的  $T_2$ 谱上找一点,使其左边累积孔隙度与脱去可动水后总累积孔隙度相等,该点对应的  $T_2$ 值即为  $T_2$ 截止值  $T_{2\text{cutoff}}$ 。

**B.3  $T_2$ 的平均值**

常用  $T_2$ 的平均值来表征  $T_2$ 分布,  $T_2$ 的算术平均值、几何平均值和调和平均值分别按公式 (B.4)、公式 (B.5) 和公式 (B.6) 计算:

$$T_{2a} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{2i} \phi_i}{\phi_{\text{nmr}}} \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

$$T_{2g} = \left( \prod_{i=1}^N T_{2i}^{\phi_i} \right)^{\frac{1}{\phi_{\text{nmr}}}} \quad \dots\dots\dots (B.5)$$

$$T_{2h} = \frac{\phi_{nmr}}{\sum_{i=1}^N (\phi_i / T_{2i})} \dots\dots\dots (B. 6)$$

式中：

- $T_{2a}$ —— $T_2$ 算术平均值，单位为毫秒（ms）；
- $T_{2g}$ —— $T_2$ 几何平均值，单位为毫秒（ms）；
- $T_{2h}$ —— $T_2$ 调和平均值，单位为毫秒（ms）；
- $\phi_{nmr}$ ——核磁孔隙度，以百分数表示（%）；
- $\phi_i$ ——对应分量  $T_{2i}$  的孔隙度分量，以百分数表示（%）；
- $T_{2i}$ ——横向弛豫时间  $T_2$  的拟合分量，单位为毫秒（ms）；
- $N$ ——横向弛豫时间  $T_2$  的拟合分量数目。

#### B.4 $T_1$ 分析的拟合模型

利用数据处理软件可对纵向弛豫反转恢复法测量到的 FID 信号串作单指数及多指数拟合。单指数拟合的基本关系式见公式（B.7）：

$$B_1(t) = B_0(1 - 2e^{-t/T_1}) \dots\dots\dots (B. 7)$$

多指数拟合的基本关系式见公式（B.8）：

$$B_n(t) = \sum_{j=1}^N B_j(1 - 2e^{-t/T_{1j}}) \dots\dots\dots (B. 8)$$

式中：

- $B_1(t)$ ,  $B_n(t)$  ——核磁共振纵向弛豫信号幅度值；
- $B_0$ ,  $B_j$  ——核磁共振纵向弛豫曲线的拟合系数；
- $T_1$  ——纵向弛豫时间，单位为毫秒（ms）；
- $N$  ——纵向弛豫时间  $T_1$  的拟合分量数目；
- $T_{1j}$  ——纵向弛豫时间  $T_1$  的拟合分量，单位为毫秒（ms）。

附 录 C  
(资料性附录)  
岩样物性参数的确定方法

### C.1 孔隙度的确定

对完全饱和岩样测得的  $T_2$  谱, 利用标准样品进行刻度, 将信号强度转换成孔隙度, 转换公式见公式 (C.1):

$$\phi_{\text{nmr}} = \sum_i \frac{m_i}{M_b} \cdot \frac{S_b}{s} \cdot \frac{G_b}{g} \cdot \frac{V_b}{V} \cdot 100\% \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

- $m_i$ ——岩样第  $i$  个  $T_2$  分量的核磁共振  $T_2$  谱幅度;
- $M_b$ ——标准样品  $T_2$  谱的总幅度;
- $S_b$ ——标准样品在 NMR 数据采集时的扫描次数;
- $s$ ——岩样在 NMR 数据采集时的扫描次数;
- $G_b$ ——标准样品在 NMR 数据采集时的接收增益;
- $g$ ——岩样在 NMR 数据采集时的接收增益;
- $V_b$ ——标准样品总含水量, 单位为立方厘米 ( $\text{cm}^3$ );
- $V$ ——岩样的体积, 单位为立方厘米 ( $\text{cm}^3$ )。

### C.2 渗透率的确定

利用岩样的空气渗透率同核磁共振岩样测量结果进行统计分析, 主要采用四种核磁共振渗透率的计算模型进行分析对比, 方法如下:

- a) SDR 模型: 用饱和水岩样的核磁孔隙度、 $T_2$  几何平均值计算核磁渗透率, 模型参数  $C_{s1}$  由公式 (C.2) 统计分析求得:

$$K_1 = C_{s1} \times \left( \frac{\phi_{\text{nmr}}}{100} \right)^4 \cdot T_{2g}^2 \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

- $K_1$ ——SDR 模型的核磁渗透率, 单位为毫达西 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ );
- $C_{s1}$ ——模型参数, 由相应地区的岩样实验测量数据统计分析求得。

- b) SDR 扩展模型: 利用饱和水岩样的核磁孔隙度、 $T_2$  几何平均值计算核磁渗透率, 模型参数  $C_{s2}$ ,  $m$  和  $n$  由公式 (C.3) 统计分析求得:

$$K_2 = C_{s2} \cdot \left( \frac{\phi_{\text{nmr}}}{100} \right)^m \cdot T_{2g}^n \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

- $K_2$ ——SDR 扩展模型的核磁渗透率, 单位为毫达西 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ );
- $C_{s2}$ ,  $m$ ,  $n$ ——模型参数, 由相应地区的岩样实验测量数据统计分析求得。

- c) Coates 模型: 利用饱和水岩样的核磁孔隙度以及由  $T_2$  截止值法或 SBVI 方法求得的束缚水体积和可动水体积计算渗透率, 模型参数  $C_{n1}$  由公式 (C.4) 统计分析求得:

$$K_3 = \left(\frac{\phi_{nmr}}{C_{n1}}\right)^4 \cdot \left(\frac{\phi_{nmrm}}{\phi_{nmrb}}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

$K_3$ ——Coates 模型的核磁渗透率, 单位为毫达西 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ );

$C_{n1}$ ——模型参数, 由相应地区的岩样实验测量数据统计分析求得;

$\phi_{nmrm}$ ——核磁可动流体孔隙度, 以百分数表示 (%);

$\phi_{nmrb}$ ——核磁束缚流体孔隙度, 以百分数表示 (%).

d) Coates 扩展模型: 利用饱和水岩样的核磁孔隙度以及  $T_2$  截止值法或 SBVI 方法求得的束缚水体积和可动水体积计算渗透率, 模型参数  $C_{n2}$ ,  $p$  和  $q$  由公式 (C.5) 统计分析求得:

$$K_4 = \left(\frac{\phi_{nmr}}{C_{n2}}\right)^p \cdot \left(\frac{\phi_{nmrm}}{\phi_{nmrb}}\right)^q \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

$K_4$ ——Coates 扩展模型的核磁渗透率, 单位为毫达西 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ );

$C_{n2}$ ,  $p$ ,  $q$ ——模型参数, 由相应地区的岩样实验测量数据统计分析求得。

### C.3 束缚水饱和度的确定

核磁束缚水饱和度的确定一般采用如下两种方法求取:

- 用  $T_2$  截止值法求束缚水饱和度, 即对应于岩样核磁共振  $T_2$  谱曲线, 核磁束缚水饱和度等于  $T_2$  谱中小于  $T_2$  截止值  $T_{2\text{cutoff}}$  的不可动峰下包面积与整个  $T_2$  谱下包面积之比。束缚水体积等于束缚水饱和度与孔隙体积之积, 可动水体积等于孔隙体积与束缚水体积之差。实际资料处理中,  $T_2$  截止值  $T_{2\text{cutoff}}$  的确定是关键。
- 用 SBVI 法求束缚水饱和度, 即对应弛豫时间的每一项都包含了束缚水的贡献, 只是弛豫时间的大小不同, 其对应的孔隙中包含的束缚水不一样。根据确定每个弛豫时间项中束缚水所占的比例, 给出各个  $T_2$  弛豫时间项的束缚水权系数, 按公式 (C.6) 和公式 (C.7) 计算岩样的束缚水饱和度:

$$S_{\text{wir}} = \sum_i W_i T_{2i} \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

$$W_i = 100 / (\alpha T_{2i} + 1) \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

式中:

$S_{\text{wir}}$ ——用 SBVI 法计算的核磁束缚水饱和度, 以百分数表示 (%);

$W_i$ ——权系数;

$\alpha$ ——计算权系数的权因子, 采用统计的方法求出;

$T_{2i}$ ——横向弛豫时间  $T_2$  的拟合分量, 单位为毫秒 (ms)。

附录 D  
(资料性附录)  
岩样核磁共振测试报告格式

D.1 岩样核磁共振测试报告封面正面格式

岩样核磁共振测试报告封面正面格式如图 D.1 所示。

No.
<h1>测试报告</h1>
测试项目: <u>岩样核磁共振参数</u>
油 / 气 田: _____
井 号: _____
井 段: _____
委托单位: _____
报告日期: _____
××××××实验室 ×××××× Laboratory

图 D.1 岩样核磁共振测试报告封面正面格式

## D.2 岩样核磁共振测试报告封面背面格式

岩样核磁共振测试报告封面背面格式如图 D.2 所示。

<h3>说 明</h3>
<ol style="list-style-type: none"><li>1. 本测试报告结果仅对受检样品负责。</li><li>2. 送样单位（人员）如对本测试报告结果持有异议，请于收到本报告后 15 天内向本实验室提出质量申诉，超过申诉有效期恕不受理。</li><li>3. 本测试报告封面应加盖本实验室印章。凡封面未加盖本实验室红色印章、无签发人签名以及内页数据有涂改者，一律无效。</li><li>4. 余样或检测过的样品，若无特殊说明本实验室仅负责保存 3 个月，逾期将自行处理。</li></ol>
通信地址：
电 话：
传 真：
电子信箱：
邮政编码：

图 D.2 岩样核磁共振测试报告封面背面格式



D.3 岩样核磁共振测试报告第一页格式

岩样核磁共振测试报告第一页格式如图 D.3 所示。

		第 页 共 页
本报告共有 块样品测试结果，报告共 页。		
测试执行标准：		
测试主要设备及编号：		
温 度：		℃
湿 度：		%
测 量 人：		
校 核 人：		
测 量 日 期：		
签 发 人：		
签 发 日 期：		

图 D.3 岩样核磁共振测试报告第一页格式

## D.4 岩样核磁共振测试报告内容格式

岩样核磁共振测试报告内容格式如图 D.4 和图 D.5 所示。

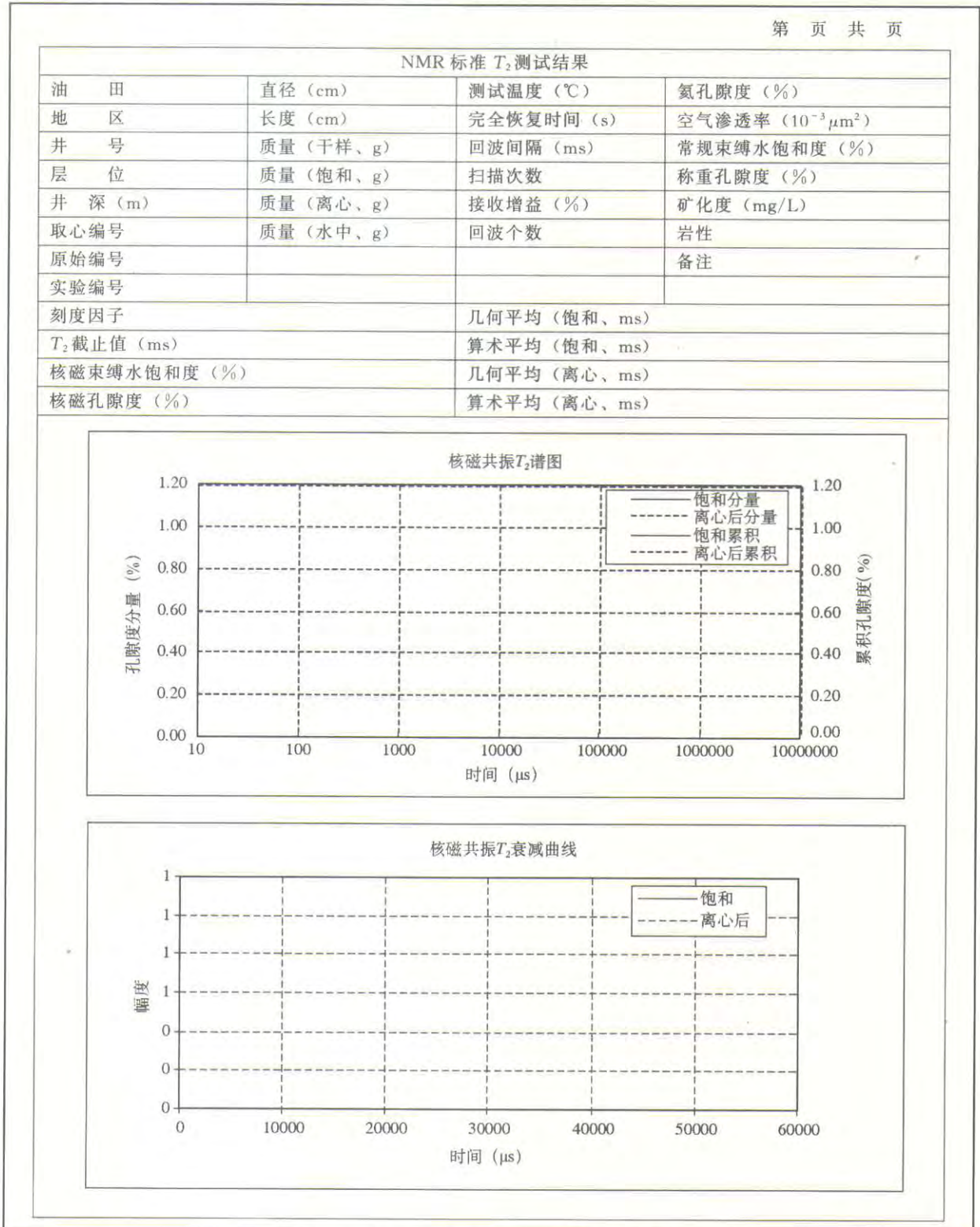
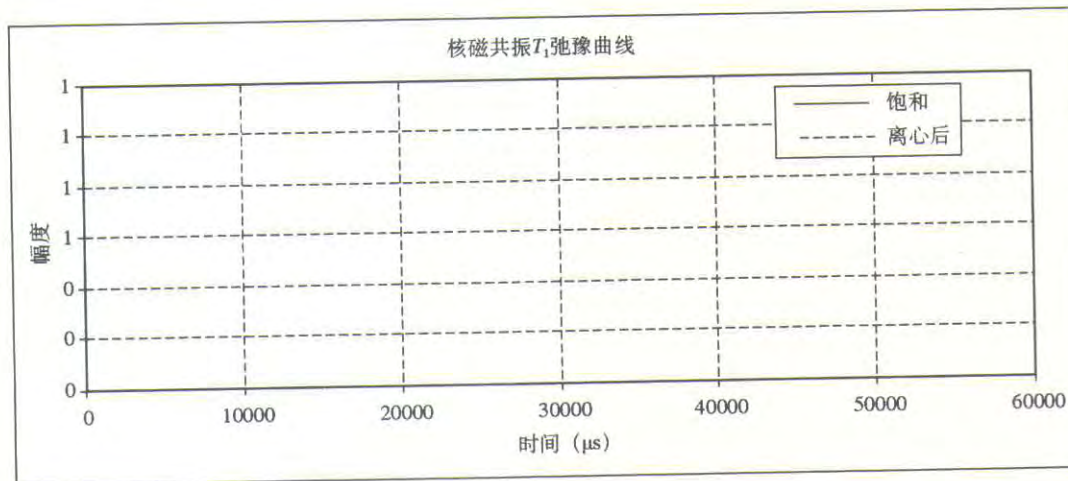
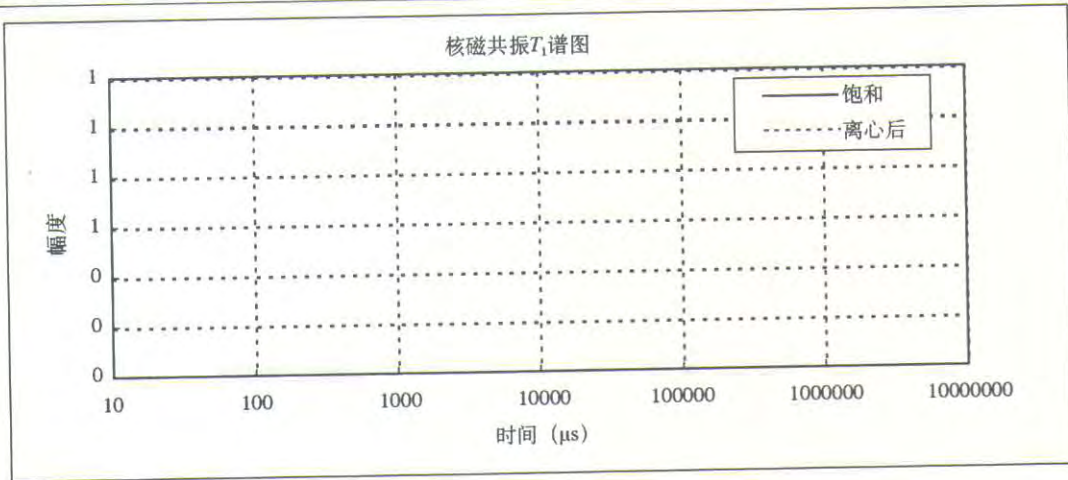


图 D.4 岩样核磁共振  $T_2$  测试报告内容格式

NMR 标准 $T_1$ 测试结果			
油 田	直径 (cm)	测试温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	氦孔隙度 (%)
地 区	长度 (cm)	完全恢复时间 (s)	空气渗透率 ( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )
井 号	质量 (干样、g)	$180^{\circ}$ 至 $90^{\circ}$ 脉冲间隔最短时间 (ms)	常规束缚水饱和度 (%)
层 位	质量 (饱和、g)	$180^{\circ}$ 至 $90^{\circ}$ 脉冲间隔最长时间 (ms)	称重孔隙度 (%)
井 深 (m)	质量 (离心、g)	扫描次数	矿化度 (mg/L)
取心编号	质量 (水中、g)	接收增益 (%)	岩性
原始编号			备注
实验编号			

$T_1$  多指数拟合公式



D.5 岩样核磁共振  $T_1$  测试报告内容格式

中华人民共和国  
石油天然气行业标准  
**岩样核磁共振参数实验室测量规范**  
SY/T 6490—2014

\*  
石油工业出版社出版  
(北京安定门外安华里二区一号楼)  
北京中石油彩色印刷有限责任公司排版印刷  
新华书店北京发行所发行

\*  
880×1230 毫米 16 开本 1.5 印张 38 千字 印 1—800  
2015 年 2 月北京第 1 版 2015 年 2 月北京第 1 次印刷  
书号：155021·7269 定价：18.00 元  
版权专有 不得翻印