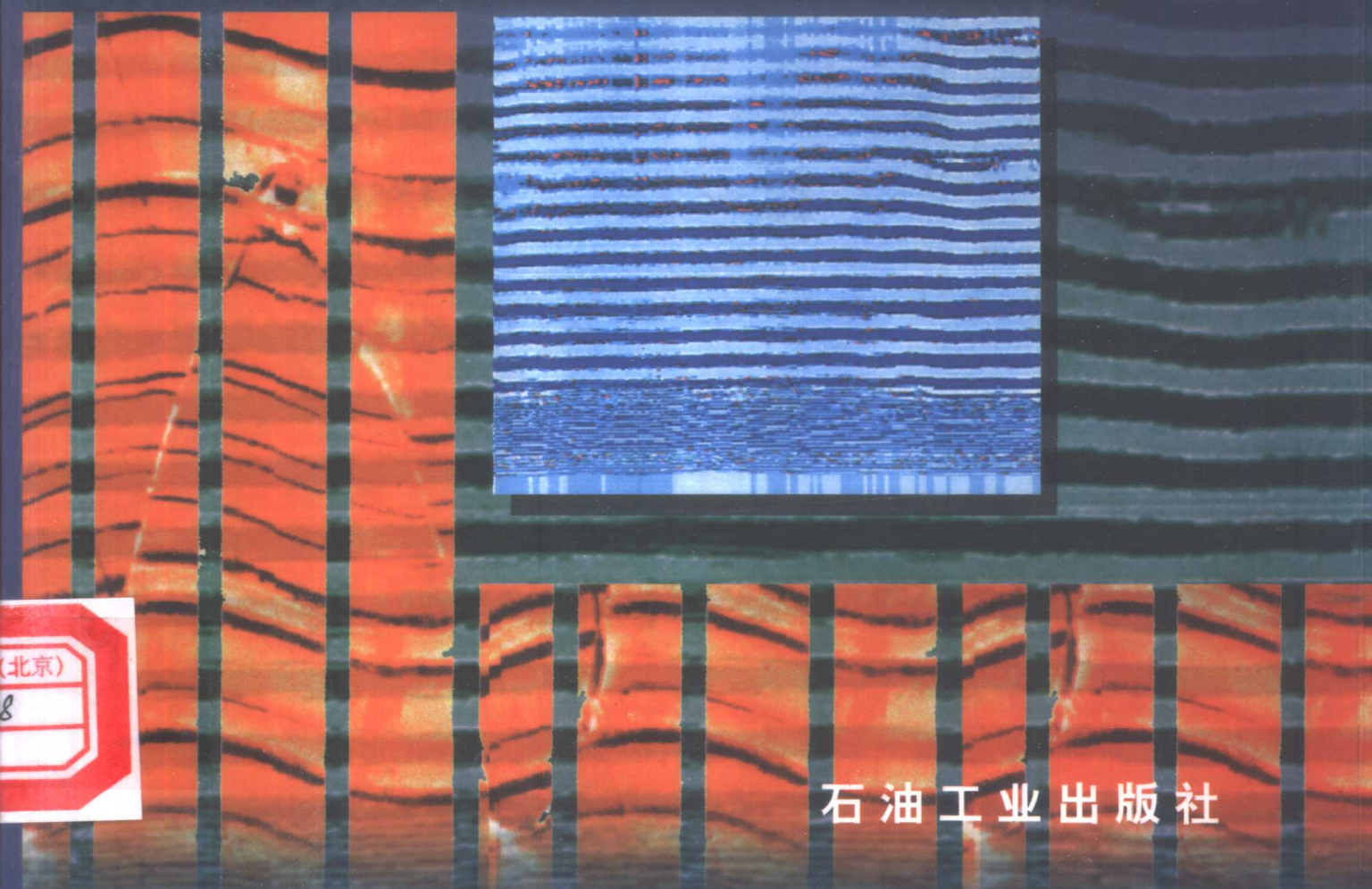


CHENGXIANG CEJING JISHU YU YINGYONG

成像测井技术与应用

贾文玉 田素月 孙耀庭 等著



(北京)
8

石油工业出版社

成像测井技术与应用

贾文玉 田素月 孙耀庭 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了斯伦贝谢公司新一代成像测井技术的原理、解释方法和地质应用实例,内容包括:核磁共振测井技术及应用;电阻率成像测井技术及应用;声波成像测井技术及应用;MDT 模块式地层动态测试器;综合孔隙度岩性测井仪;储层饱和度测井仪;快速平台测井仪。

本书适合于油田现场测井、测井解释、勘探开发地质等工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

成像测井技术与应用/贾文玉等著. —北京:石油工业出版社,
2000.8

ISBN 7-5021-3070-5

I. 成…

II. 贾…

III. 测井-技术

IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 67364 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省徐水县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 6.75 印张 31 插页 272 千字 印 1—1500

2000 年 8 月北京第 1 版 2000 年 8 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3070-5/TE·2354

定价: 40.00 元

前 言

自 20 世纪 20 年代以来,测井为油气的勘探和开发提供了大量的地质数据和资料,为油气田和社会经济的发展做出了重要的贡献,并被称为地质学家的眼睛。

随着油气田勘探开发程度的不断提高,我国已经进入了新的油气勘探开发阶段,面对的储集层类型更加复杂,钻孔深度更深,钻孔形态更加复杂(大斜度井、丛式井、水平井等),老油田二次采油、三次采油要求水准更高。复杂的地质情况给测井提出了更高的技术要求,需要高分辨率的、高精度的、功能齐全完善的、配套的测井技术,以适应和满足钻探的地质需要。

测井技术的发展使测井的服务能力和服务水平大大提高。计算机技术的飞速发展使测井技术产生了一个飞跃。进入 90 年代,利用新的科学理论和技术,开发和研究出了一批新的测井技术和方法,使测井技术发展到了一个崭新的阶段。从简单的电极电位测井到声波测井、核测井和核磁共振测井,从一维测井到二维测井、三维成像测井,测井已经成为油气勘探开发不可缺少的、而且应用范围越来越广的主要技术之一。高分辨率测井技术、成像测井技术、核磁共振测井技术的相继开发成功和商业化生产,快速测井平台技术和 MAXIS500 便携式测井系统的日臻成熟和应用,使测井的现场服务功能和测井解释能力都得到更加完善和成熟,能够更加出色地提供十分详细的高分辨率的、类似于岩心照片的井壁图像,提高地质分析和地质评价的准确性,核磁共振测井能够提供地层的可动流体体积和烃探测结果,对识别油气水层、区分产层和非产层具有很重要的意义。储层饱和度测井可以在套管井中为油田开发科学地提供最新的剩余油饱和度参数。

本书主要介绍了斯伦贝谢公司 90 年代末最新的成像测井技术,结合油田测井实例论述了各种成像测井在油气勘探开发中的解释方法和地质应用。

本书共分七章,第一章核磁共振测井技术及应用由贾文玉、孙灵芬编写;第二章电阻率成像测井技术及应用由田素月、孙耀庭编写;第三章声波成像测井技术及应用由田素月、谭海芳编写;第四章 MDT 模块式地层动态测试器由贾文玉、张增杰编写;第五章综合孔隙度岩性测井仪由闫安宇、王立新编写;第六章储层饱和度测井仪由李喜清、杨红兵编写;第七章快速平台测井仪由唐远庆编写。全书统稿工作由贾文玉、孙耀庭完成。

本书在编写过程中,廖鸿龙、刘纲、兰风、牟林、潘克静做了部分校对和编辑工作,斯伦贝谢公司王端轩、刘呈冰、高中民给予了热情帮助,在此表示感谢。

由于,作者水平有限,不妥之处难免,敬请读者批评指正。

作 者

2000 年 6 月于濮阳

目 录

第一章 核磁共振测井技术及应用	(1)
第一节 核磁共振的测井基础	(1)
一、核磁共振现象.....	(1)
二、核磁共振的测量原理.....	(2)
三、组合式核磁共振仪的测量方式.....	(4)
第二节 物质的弛豫特征	(5)
一、物质的弛豫方式.....	(5)
二、物质弛豫的加权机制.....	(6)
三、物质的弛豫特征.....	(6)
第三节 组合式核磁共振测井仪 CMR	(8)
一、仪器介绍.....	(8)
二、测井参数选择.....	(9)
第四节 核磁共振的测井解释	(11)
一、自旋回波信号的处理.....	(11)
二、 T_2 分布谱对应的各种流体成分分析.....	(11)
三、计算渗透率.....	(12)
第五节 核磁共振测井的应用	(13)
一、在低孔隙度地层中识别渗透性储层.....	(13)
二、稠油层的评价.....	(13)
三、复杂岩性地层.....	(13)
四、低电阻油层的识别.....	(14)
五、轻烃检测.....	(14)
六、用于泥质指示.....	(14)
第二章 电阻率成像测井技术及应用	(15)
第一节 全井眼地层微电阻率扫描成像测井技术 (FMI)	(15)
一、FMI 微电阻率成像测井仪器及测量原理简介.....	(15)
二、测井数据处理和成像.....	(18)
第二节 FMI 图像的解释与应用	(20)
一、裂缝识别和评价.....	(20)
二、地质构造解释.....	(23)
三、地层分析.....	(24)
四、薄层分析.....	(25)
五、FMI 测井和钻井取心.....	(25)
六、PS8 井 FMI 图像的解释与应用实例.....	(25)
第三节 阵列感应成像测井技术 (AIT) 及其应用	(29)

一、感应测井和阵列感应测井原理	(29)
二、阵列感应测井资料的解释与应用	(30)
三、阵列感应测井与相量感应测井和双侧向测井的比较	(33)
第四节 方位电阻率成像测井技术 (ARI) 及应用	(34)
一、ARI 测井仪的电极系结构和测量原理	(35)
二、ARI 测井的环境影响和校正	(36)
三、ARI 测井资料的解释与应用	(38)
第三章 声波成像测井技术及应用	(41)
第一节 超声波成像测井	(41)
一、超声波成像测井仪 (USI)	(41)
二、井眼超声波成像测井仪 (UBI)	(46)
第二节 偶极横波成像测井	(48)
一、测井原理	(48)
二、仪器结构	(49)
三、主要处理方法	(50)
四、偶极横波成像测井的应用	(51)
第四章 MDT 模块式地层动态测试器	(55)
第一节 仪器描述、技术指标和操作应用	(56)
一、标准 MDT 测试器	(56)
二、地层测试应用	(58)
三、可选择模块	(59)
四、仪器技术指标	(61)
第二节 地层测试应用实例	(61)
一、压力剖面	(61)
二、地层液体取样	(63)
三、双封隔器模块的 MDT 测试器应用	(64)
四、确定地层的渗透率	(65)
第三节 结论	(68)
第五章 综合孔隙度岩性测井仪	(69)
第一节 概述	(69)
第二节 仪器特性描述	(69)
一、APS 探头	(70)
二、HNGS 探头	(71)
三、LDS 探头	(71)
四、测井速度	(72)
第三节 孔隙度测量	(72)
一、测量特性	(72)
二、环境影响	(74)
第四节 自然伽马测量	(74)
一、测量特性	(74)

二、环境影响	(75)
第五节 岩性密度测量	(76)
一、测量特性	(76)
二、仪器响应比较	(76)
三、测量重复性比较	(77)
第六节 应用实例	(77)
一、岩性评价	(77)
二、在泥质砂岩地层中快速直观地确定气层	(77)
三、不用化学放射性源探测气层	(78)
第七节 结论	(78)
第六章 储层饱和度测井仪	(81)
第一节 仪器设计	(81)
一、仪器结构	(81)
二、技术指标	(82)
三、仪器特点	(83)
第二节 资料采集	(84)
一、数据采集	(84)
二、能谱处理	(85)
第三节 资料解释	(88)
一、单探测器 GST 工作方式	(88)
二、双探测器 RST 资料解释模型	(89)
第四节 RST 资料应用	(93)
一、RST 测井资料的应用范围	(93)
二、RST 测井资料的综合应用	(94)
第七章 快速平台测井仪	(97)
第一节 仪器描述和技术指标	(97)
一、仪器长度更短	(97)
二、精密的测量及高分辨率的测井值	(97)
三、自动速度校正	(98)
四、通过减少时间来提高效率	(98)
五、技术指标	(99)
第二节 PLATFORM EXPRESS 解释和应用	(99)
一、快速直观解释	(99)
二、在水平井中的测井施工	(99)
三、确定渗透层	(99)
四、复杂井眼的密度资料	(100)
五、MCFL 资料与 FMI 成像资料的对比	(100)
六、方位侧向测井组合可提供倾角计算的测井组合图	(100)
第三节 结论	(100)

第一章 核磁共振测井技术及应用

几十年来，岩石储层的孔隙度评价一直靠中子、密度、声波曲线来进行，它们只能给出简单的孔隙度值，并且实践证明，中子测井和声波测井易受泥质的影响，而密度测井易受井眼的影响。进入 90 年代，一种全新的孔隙度测井方法——核磁共振测井初步展现了其独特的魅力，它可以准确地区分不同的孔隙成分，如自由流体孔隙度、毛细管孔隙度、粘土束缚水孔隙度及微孔隙度等。本章从核磁共振的物理基础出发，介绍其测井原理、测井仪器、解释方法及其在各方面成功的应用。

第一节 核磁共振的测井基础

核磁共振最初的思路是：应用线圈和高电流，在地层中产生静磁场，极化岩石孔隙中流体的氢核。迅速断开电流后，被极化的氢核会回到弱而均匀的地磁场中原来的状态，这个过程使核在线圈中产生一种按指数衰减的信号。该信号包含各种流体孔隙度的信息，分析这些信息就达到了评价岩石孔隙度的目的。

一、核磁共振现象

1. 原子核的磁性

核磁共振测井的理论基础是原子核的磁性及其在外加磁场作用下的进动特性。带有电荷的原子核不停地旋转会产生磁场，磁场的强度和方向可以用核磁矩矢量表示：

$$\mu = \gamma P \quad (1-1)$$

式中 μ ——磁矩；

P ——自旋角动量；

γ ——磁旋比。

如果没有外加磁场，单个核磁矩随机取向，表现在宏观上没有磁性。

2. 单个核在外加磁场中的行为

当核磁矩处于外加静磁场 B_0 中时，它将受到一个力矩的作用而绕外加磁场的方向进动，如图 1-1 所示。其进动频率 ω_0 为：

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (1-2)$$

3. 宏观的磁化行为

在外加磁场 B_0 中，整个自旋系统被磁化，宏观上将产生一个净的磁化矢量和。单位体积内的核磁矩的和叫宏观的磁化量，即

$$M = \sum \mu_i \quad (1-3)$$

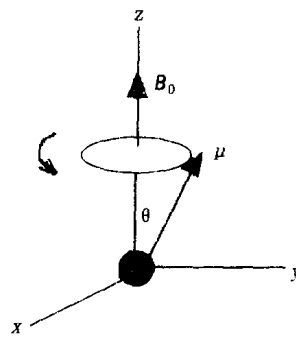


图 1-1 单个核在外加磁场中的进动

4. 核磁共振现象

对于被磁化后的核自旋系统，如果在垂直于静磁场 B_0 的方向再加一个交变电磁场 B_1 ，使其进动频率 $\omega = \omega_0$ ，那么根据量子力学原理，处于低能态的核磁矩将通过吸收交变电磁场提供的能量，跃迁到高能态。这种现象即所谓的核磁共振现象。

交变电磁场一般采用射频脉冲法产生。在射频脉冲施加以前，自旋系统处于平衡状态，宏观磁化矢量 M 与静磁场 B_0 方向相同。射频脉冲作用期间，磁化矢量受交变电磁场的作用而偏离静磁场方向；停止射频脉冲作用，磁化矢量又将朝 B_0 方向恢复，使核自旋从高能级的非平衡状态恢复到低能级的平衡状态。恢复到平衡态的过程叫弛豫。

若 B_0 的方向为 Z 方向，射频脉冲作用期间，宏观的磁化量 M 被分解为 X-Y 平面的分量（横向分量） M_{XY} 和 Z 方向的分量（纵向分量） M_Z 。射频脉冲作用结束后，横向分量 M_{XY} 往数值为零的初始状态恢复，称为横向弛豫过程，弛豫速率用 $1/T_2$ 来表示， T_2 叫横向弛豫时间。纵向分量 M_Z 往初始宏观磁化强度 M_0 的数值恢复，称为纵向弛豫过程，弛豫速率用 $1/T_1$ 表示， T_1 叫纵向弛豫时间。

二、核磁共振的测量原理

核磁测井中测量核磁弛豫的方法有多种，如自由感应衰减法、自旋回波法、CPMG 脉冲序列法和反转恢复法等。自由感应衰减法是最简单的测量 T_2 的方法，但它要求的极化时间长，测井速度慢，不利于实际应用。斯仑贝谢 CMR 测量核磁弛豫的方法主要是应用 CPMG 脉冲序列法测量 T_2 ，它可以消除由于扩散引起的误差，使结果更为准确可靠，并提高信噪比。反转恢复法是用来测量纵向弛豫时间 T_1 的。

1. 横向弛豫时间 T_2

横向弛豫过程的测量采用 CPMG 脉冲序列即：

$$(90^\circ)_x - [\tau - (180^\circ)_y - \tau - \text{echo}] n$$

其基本原理是： $(90^\circ)_x$ 脉冲使磁化矢量扳转在 X-Y 平面上，磁化矢量的横向分量会由于静磁场的局部非均匀性等原因而很快散相。一定延迟 τ 时间后，连续地施加一系列间隔相同的 $(180^\circ)_y$ 脉冲，把磁化矢量扳转 180° ，到其镜像位置，结果是沿着与散相过程相反的方向使磁化矢量各横向分量得以重聚，在 180° 脉冲后的 τ 时刻，观测到一串回波信号。当被观测的横向弛豫幅度按单指数衰减时，这样测量的回波串，其幅度将按 $1/T_2$ 的速率衰减，可根据下式确定横向弛豫时间 T_2 ：

$$A(T_e) = A(0) \exp(-T_e/T_2) \quad (1-4)$$

式中：回波间隔 $T_e = 2n\tau$ ， $n = 1, 2, \dots$ ， τ 为回波间隔的一半，即 180° 脉冲到回波最大值之间的时间； $A(T_e)$ 是各 T_e 时刻测得的信号幅度； $A(0)$ 是零时刻的回波幅度，如图 1-2 所示。

当被观测的横向弛豫包含多个单指数衰减时，CPMG 回波串幅度的包络线将是多个指数的和，并且可以分解出不同指数成分。测量过程中，增加回波个数 n ，将提高信噪比，并增强对衰减慢的长 T_2 分量的分辨能力；减小时间间隔 τ ，则将减小扩散对 T_2 测量的影响，并提高对衰减快的短 T_2 分量的分辨能力。

实际应用时，需要把多次测量结果累积起来，才能得到应有的信噪比。在多次累加时，

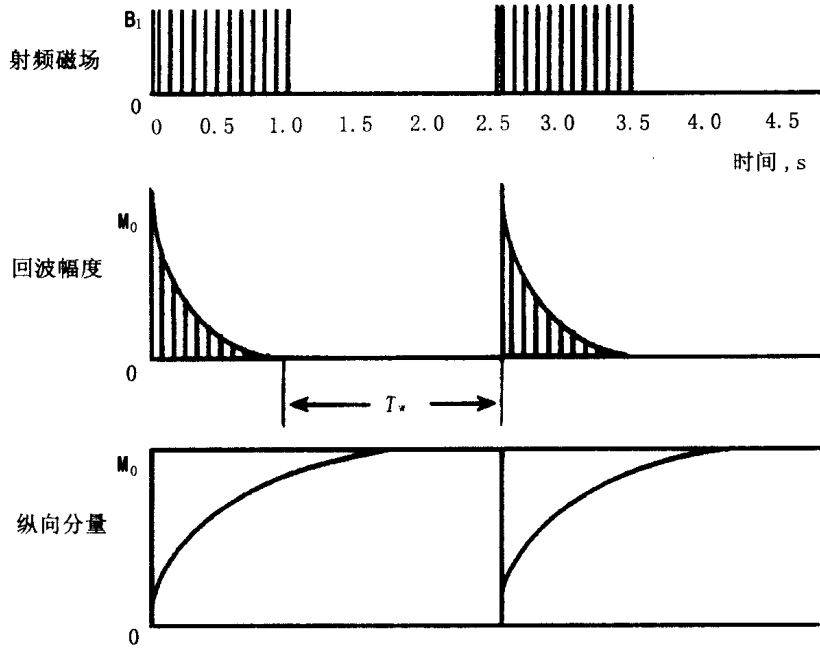


图 1-2 横向弛豫时间测量原理

两次测量之间的延迟即纵向恢复时间 (T_R 来表示) 非常重要。一个回波串采集完毕, 必须等待足够的时间 T_R , 使纵向磁化矢量完全恢复, 才能开始第二个回波串的采集。 T_R 的选取取决于被观测对象的纵向弛豫时间 T_1 , 通常取 $T_R = (3 \sim 5) T_1$ 。

横向弛豫和纵向弛豫限制了一个测量序列必须持续多长时间, 只有这些步骤都完成后 (几秒钟), 才能进行下一个序列测量。

2. 纵向弛豫时间 T_1

反转恢复法是测量纵向弛豫过程的基本方法。发射器发射的射频脉冲序列是由 n 个 ($180^\circ - \tau - 90^\circ - A_r - P_D$) 脉冲对组成, 如图 1-3a。在每个脉冲对中, 180° 脉冲使沿磁场方向的初始化矢量完全反转; τ 期间, Z 方向的纵向磁化矢量受纵向弛豫的作用而逐步恢

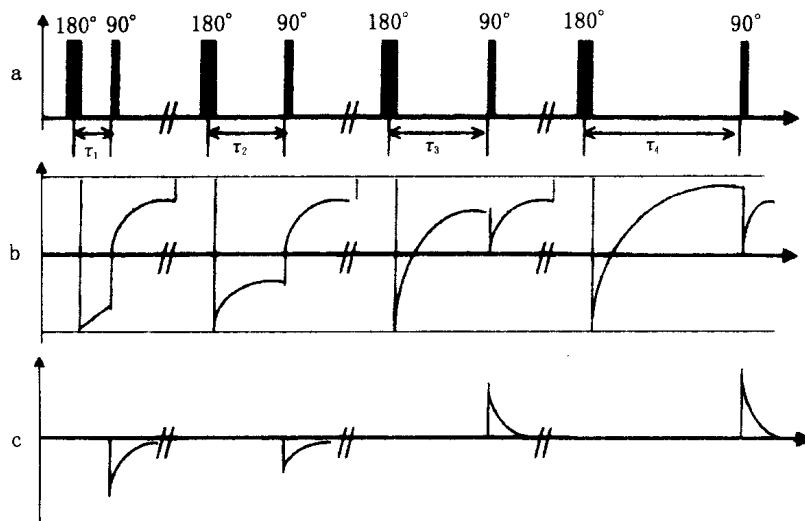


图 1-3 纵向弛豫时间测量原理

复；90°脉冲则使Z方向的磁化矢量扳转到X或Y轴，以便能够被检测； A_t 是检测期间测出的自由感应衰减； P_D 为延迟期，使磁化矢量能完全恢复正常，以便下一个回合的测量。图1-3b为整个脉冲序列作用期间纵向弛豫矢量大小的变化过程。图1-3c为每次测量得到的自由感应衰减的幅度。

对纵向磁化矢量做一系列不同 τ 值的观测，得到一组 M_z 值。取一个足够长的 τ （通常大于 $5T_1$ ），用于确定 M_0 。若被观测的纵向弛豫过程服从单指数规律，那么，测得的信号串幅度 M_z 将按 $1/T_1$ 的速率呈指数恢复，即

$$M_z = M_0 [1 - 2e^{(-\tau/T_1)}] \quad (1-5)$$

当被观测的纵向弛豫过程服从多指数规律时，测得的 M_z 将是一个多指数函数的和，并且由该组 M_z 的观测值可以分解出多指数函数的形式及其对观测磁化矢量的贡献。

由上可知，纵向弛豫过程的观测通常是很费时间的，相比之下，横向弛豫时间的测量要快得多。就电缆测井而言，由于对测速总是有一定的要求，多选择横向弛豫为测量对象，纵向弛豫则被用作加权机制，实现对流体成分的识别。

三、组合式核磁共振仪的测量方式

1. 标准 T_2 测井

标准 T_2 测井利用适当的恢复时间 T_R （一般要求 $T_R > (3 \sim 5) T_1$ ）和标准回波间隔 T_E ，测量自旋回波串。通过对回波串的多指数拟合常规处理，得到 T_2 分布和孔隙度成分；结合岩心分析确定的束缚水 T_2 截止值，可以计算束缚水孔隙体积和自由流体孔隙体积；再根据核磁共振渗透率模型，进一步估算地层渗透率；通过与常规电阻率及孔隙度测井资料的综合解释，确定自由流体中烃的孔隙体积。

2. 双 T_E 测井

双 T_E 测井设置足够长的等待时间，使 $T_R > 3 \sim 5 T_{1h}$ （ T_{1h} 为轻烃的纵向弛豫时间），每次测量时使纵向弛豫达到完全恢复，利用两个不同的回波间隔 T_{EL} 和 T_{ES} ，测量两个回波串。由于水与气或水与中等粘度的油扩散系数不一样，使得各自在 T_2 分布上的位置发生变化，由此，对油、气、水进行识别。

3. 双 T_w 测井

由于水与烃的纵向弛豫时间 T_1 相差很大，水的纵向恢复远比烃快。如果选择不同的等待时间，观测到的回波串中将包含不一样的信号分布。用特定的回波间隔采集回波数据，等待一个比较长的时间 T_{WL} ，使水与烃的纵向磁化矢量全部恢复；再采集第二个回波串，等待一个比较短的时间 T_{WS} ，使水的纵向磁化矢量完全恢复，而烃的信号只部分恢复。 T_{RL} 回波串得到的 T_2 分布中，油、气、水各相都包含在其中，而且完全恢复； T_{RS} 回波串得到的 T_2 分布中，水的信号完全恢复，油、气信号只有很少一部分；两者相减，水的信号被消除，剩下油与气的信号。由此对油气进行识别和解释。

双 T_w 测井利用的回波间隔和长、短两个不同的等待时间 T_{WL} 和 T_{WS} 的关系为： $T_{RL} > (3 \sim 5) T_{1h}$ ，其中， $T_{RL} = T_{WL} + N_e \times T_E$ ， T_{1h} 为轻烃的纵向弛豫时间，及 $T_{RS} > (3 \sim 5) T_{1w}$ ，其中， $T_{RS} = T_{WS} + N_e \times T_E$ ， T_{1w} 为水的纵向弛豫时间。

双 T_w 测井也可以利用液体与气体之间扩散系数 D 的差异来区分烃的类型。

第二节 物质的弛豫特征

一、物质的弛豫方式

核磁测井测量了地层中含氢流体中质子的纵向弛豫时间 T_1 和横向弛豫时间 T_2 ，地层中氢核的弛豫方式有三种：即颗粒表面弛豫、梯度场中分子扩散引起的弛豫和体积流动引起的弛豫。

1. 表面弛豫

流体分子在孔隙空间内不停地运动和扩散，使它有充分机会与颗粒表面碰撞。当流体分子碰到颗粒表面时，氢核将自旋能量传递给颗粒表面，使之按静磁场 B_0 的方向重新线性排列，这就是表面弛豫对纵向弛豫时间的贡献。另一方面，质子可能不可逆地失相是表面弛豫对横向弛豫时间的贡献。

在表面弛豫中，孔隙大小至关重要。弛豫速度与碰撞的频率有关，也就与表面体积比 (S/V) 有关。在大孔隙中，碰撞次数少，其 S/V 小，因此弛豫相对长。而小孔隙 S/V 大，弛豫时间短。

对于单个孔隙，信号幅度与表面体积比的关系为：

$$1/T_2 = \rho_2 S/V \quad (1-6)$$

$$1/T_1 = \rho_1 S/V \quad (1-7)$$

式中 ρ_1 和 ρ_2 ——岩石颗粒表面纵向和横向弛豫强度；

S ——孔隙表面积；

V ——孔隙体积。

岩石具有不同大小的孔隙分布，每个孔隙的 S/V 值不同。总的磁化矢量是来自各个孔隙信号的和。所有孔隙体积之和等于岩石的流体体积，即孔隙度。所以，总信号与孔隙度成正比，总衰减是各个衰减之和，各个衰减反映孔隙大小分布。核磁共振测井孔隙度和孔隙大小分布是核磁共振测井解释的关键因素。

2. 扩散弛豫

静磁场中存在磁场梯度时，分子运动可引起失相，影响 T_2 弛豫， T_1 弛豫不受影响。磁场完全均匀时，分子扩散不会引起核弛豫。

斯伦贝谢公司的 CMR 仪器产生的梯度场在采样区域内是变化的，梯度为 $20 \times 10^{-4} T/cm$ 时仪器对扩散响应达峰值。

CPMG 法是已知的减小梯度场扩散影响的最好脉冲序列。使 CPMG 回波间隔达到极小值可减小扩散对 T_2 弛豫的影响，使之忽略不计。对于间隔较近的脉冲， T_2 弛豫主要为表面或体积弛豫。当采用较大的回波间隔，或者当扩散系数很高如气体或高温下的水和轻烃，扩散影响十分显著。

3. 体积弛豫

即使不存在表面弛豫和扩散弛豫，在体积流体内也会发生弛豫。

对于水和烃，体积流体弛豫主要是邻近自旋随机运动产生的局部磁场波动造成的。通常，体积弛豫可以忽略。但当非润湿相与固体表面接触时，体积弛豫就十分重要了。在水润

湿性岩石中，水的弛豫主要是与颗粒表面碰撞造成的，即表面弛豫。而孔隙中心的小油滴或气无法接近岩石表面，因此仅有体积弛豫。如果水存在于很大孔隙中，只有少量水可接触孔隙表面，此时体积弛豫明显。

对于粘滞流体，即使构成润湿相，其体积弛豫也十分重要。在这种流体中，弛豫时间相对短，短的弛豫时间和扩散到颗粒表面能力的减弱使体积弛豫变得非常显著。所以，流体粘度增加会缩短流体弛豫时间。

二、物质弛豫的加权机制

各种弛豫过程并联后得形式为：

$$(1/T_2) = (1/T_{2S}) + (1/T_{2D}) + (1/T_{2B}) \quad (1-8)$$

式中 $(1/T_{2S})$ ——表面弛豫的贡献；
 $(1/T_{2D})$ ——磁场梯度扩散引起的贡献；
 $(1/T_{2B})$ ——体积弛豫的贡献。

$$\text{对于 } T_1: \quad (1/T_1) = (1/T_{1S}) + (1/T_{1B}) \quad (1-9)$$

扩散对 T_1 无贡献，因为扩散过程仅引起散相。

对于 CMR 仪器，润湿相时表面弛豫是主要的；非润湿相时，体积流体弛豫机制是主要的。

三、物质的弛豫特征

1. 流体的弛豫特征

1) 水的弛豫特征

常温常压下，水的含氢指数为 1。由于密度几乎不随温度和压力变化，井底条件下水的含氢指数近似为 1。但是大量溶解盐的存在会使水的含氢指数明显减小。

假设某一井段中地层水的矿化度基本不变，在水润湿的碎屑岩中，水的弛豫时间为表面弛豫所控制。弛豫速度与充满水的孔隙空间的比面和颗粒矿物成分有关。在下列情况下，水的弛豫时间主要受控于体积和扩散弛豫：①孔隙比面很小；②严重油湿岩石；③含有高浓度顺磁离子如铁、铬的原生水或滤液。其核磁共振弛豫速度为：

$$1/T_1 = 1/T_{1B} \quad (1-10)$$

$$1/T_2 = 1/T_{2B} + 1/T_{2D} \quad (1-11)$$

水的扩散系数 D 受温度的影响最大，它使得其扩散弛豫显得更为重要，如图 1-4 所示。 D 基本上与压力无关。室温下，水的扩散系数 $D = 2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

2) 油的弛豫特征

在水润湿岩石中，油的弛豫时间不受地层特性的影响，仅为油组分和地层温度的函数，如图 1-5 所示。这样就可以预测油信号在 T_2 弛豫时间分布上出现的位置。

在预测原油 T_2 时，首先是确定井下油的粘度。由于原油是不同类烃的混合物而具有弛豫时间分布，与具有窄 T_2 分布的成品油对比，原油的 T_2 分布跨度大，典型的分布是由一个源于最具流动性氢核的较长 T_2 峰和一个来自运动受限制氢核的较短弛豫时间的尾组成。

3) 气体的弛豫特征

气体的 T_1 为其成分、温度和压力的函数，弛豫为体积弛豫。图 1-6 为甲烷的 T_1 随温

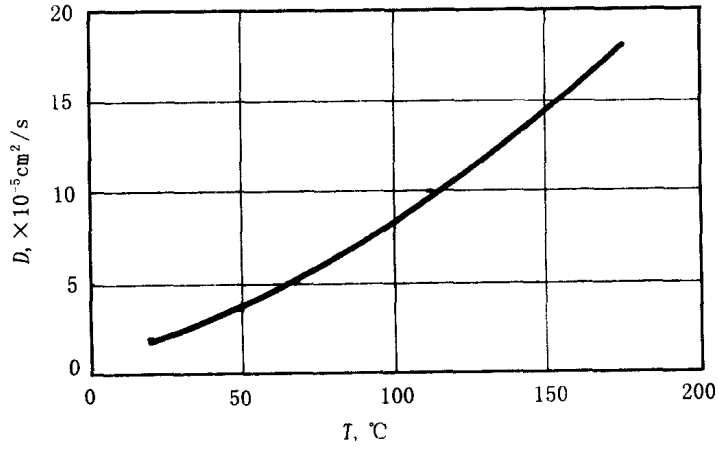


图 1-4 水的扩散系数与温度关系

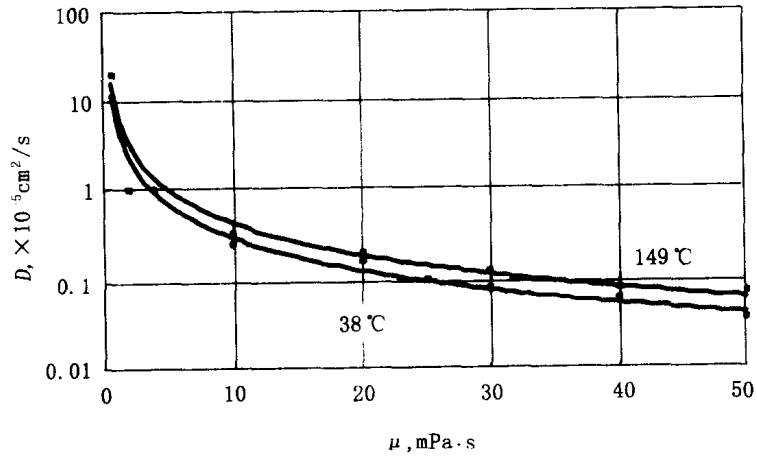


图 1-5 原油的扩散系数与粘度的关系

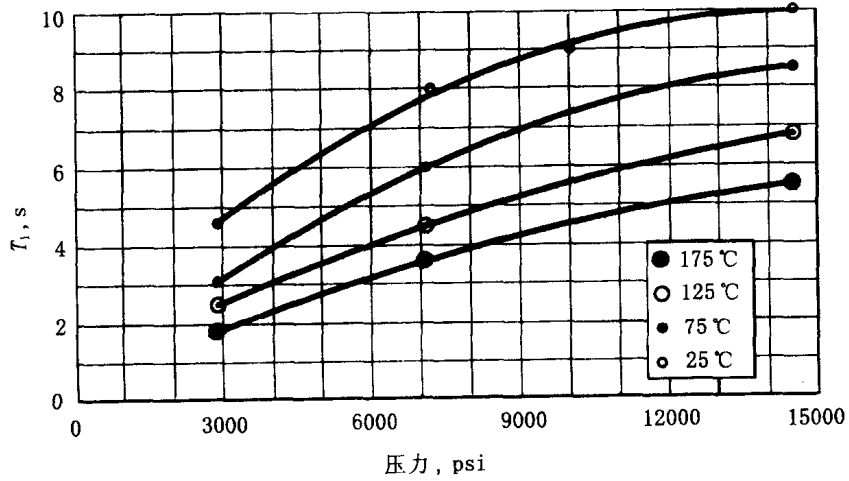


图 1-6 甲烷气的 T_1 与温度和压力的关系

度和压力变化的情况。气体的 T_2 完全受控于扩散弛豫。甲烷的扩散系数很高，因而其扩散弛豫时间很小，如图 1-7 所示。

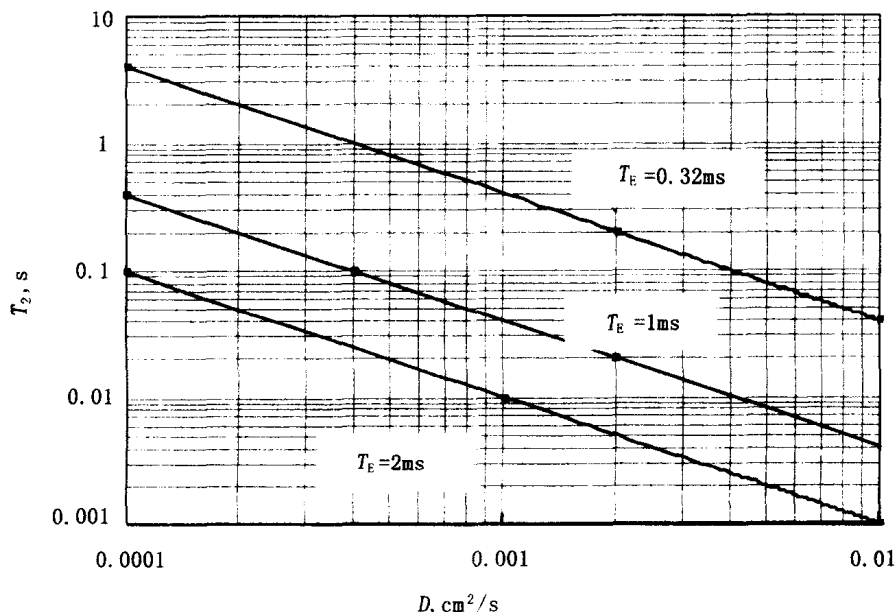


图 1-7 未限制扩散的甲烷的弛豫情况

2. 岩石骨架的核弛豫特征

核磁共振测井以氢核为观测对象。岩石骨架固体中，粘土和含有结晶水的其他矿物，都含有丰富的氢核。它们对 neutron 测井会产生影响，但对核磁共振测井响应不会有贡献。一方面，固体中氢核的横向弛豫时间很短，仅数十微秒，在仪器采集回波信号之前早已全部衰减掉；另一方面，它们的纵向弛豫时间又非常长，达数十秒，不易被运动中的仪器磁场所磁化。因此核磁共振测井结果不受岩性的影响，这是其优越性之一。

第三节 组合式核磁共振测井仪 CMR

一、仪器介绍

核磁共振测量装置核心部件有磁体，用于产生强度高、均匀性好的磁场；射频线圈，用于发射和接收射频信号。

1. CMR 仪器

组合式核磁共振测井仪 CMR 是斯伦贝谢公司推出的新一代核磁共振测井仪器。它采用磁性很强的永久磁铁产生静磁场，在井眼之外的地层中建立一个比地磁场强度大 1000 倍的均匀磁场区域，天线发射 CPMG 脉冲序列信号并接收地层的回波信号。CMR 原始数据是由一系列自旋回波幅度组成，经处理得到 T_2 弛豫时间分布。 T_2 分布为主要的测井输出，由此可导出 CMR 孔隙度、束缚流体孔隙度、自由流体孔隙度和渗透率。

CMR 仪为小型滑板仪，连接长度 14.2ft，重 150kg，其结构及横剖面图见图 1-8。

石油测井技术及应用

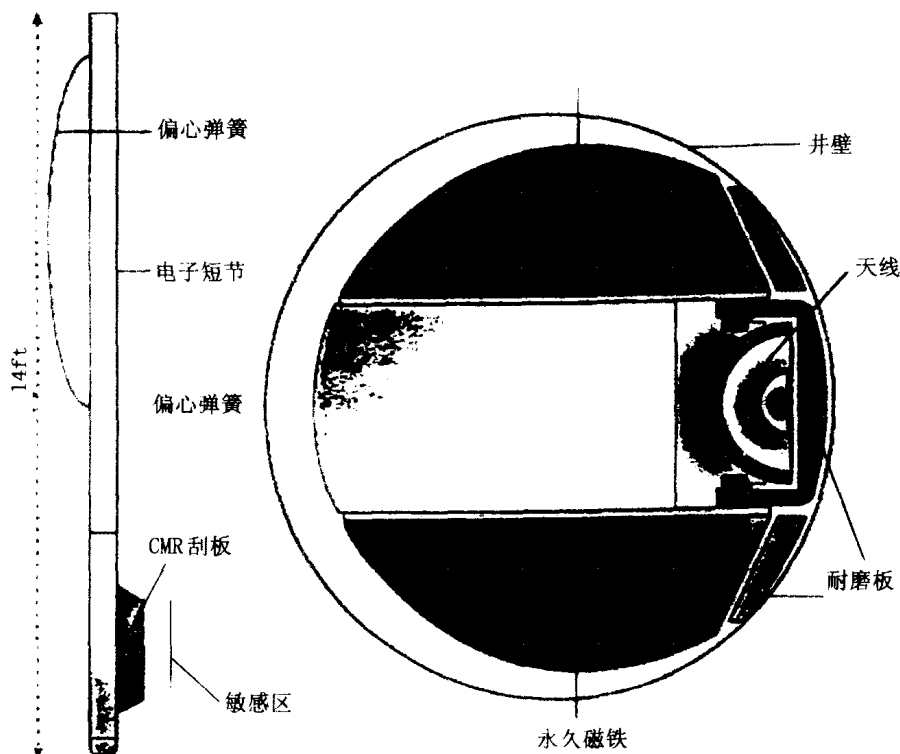


图 1-8 CMR 仪器的结构和横剖面图

CMR 必须用弓型弹簧、在线偏心器或动力井径进行偏心测量。探测器最大宽度 5.3in，带有滑套弓型弹簧的最大总直径为 6.6in。仪器的基本特点见表 1-1。

表 1-1 CMR 仪器的参数响应特征

仪器参数	最大测速	探测深度	纵向分辨率	共振频率	回波间隔	耐 温	仪器外径	耐 压
回波串	82m/h (砂岩)	2.5cm (从井壁起)	25cm (慢测)	2MHz	0.32ms	175℃	17/13.5cm	137.9MPa
	91m/h (石灰岩)		15cm (点测)					

对于一般的井眼条件，推荐的最小井径为 6.25in。当井眼条件很好，CMR 可在 5.785in 的井眼中进行测井。

2. CMR-2000 型仪器

CMR-200 型仪器提供了微孔隙更大的测量范围，它把原来的 CMR 仪器的信噪比提高了 50%，回波间距降低到 0.2ms，因而连续测井横向弛豫时间 T_2 的分辨率从 3ms 扩展到 0.3ms，点测的横向弛豫时间 T_2 的分辨率为 0.1ms，这使得微孔隙流体的测量更加精确

二、测井参数选择

等待时间、采集的回波数和回波间隔称为脉冲序列参数。这些连续测井参数的选择应根据储层的特征及测井的目的来确定。

理想情况下等待时间越长越好，以使氢核完全极化。通常，等待时间比孔隙流体的平均

T_1 长三倍。由于发射线圈频宽比的限制，最小等待时间约为采集时间的两倍。具有长 T_2 的孔隙流体也有长 T_1 ，因此需要较长的等待时间。

一般在连续测井时应用回波常数 1800；在点测时，最少的回波数为 3000，以保证提供详细准确的 T_2 分布。

为了提高对快速衰减组分（即小孔隙和高粘度油）测量的敏感性，CMR 测井通常采用最小回波间隔。若要增强扩散弛豫，须增大回波间隔，这适用于不含大量微孔隙的纯地层。一般为了保持对微孔隙的敏感性，回波间隔很少超过 1ms。

1. 对于中至高粘度油（大于 $4\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）的储层

中高粘度油的 T_1 相对短，CMR 脉冲序列主要根据孔隙水的 T_1 选择。根据经验推荐用于连续测井的脉冲序列见表 1-2，表中第二列为油的粘度阈值，超过阈值需要更长的等待时间。如果储层含有特别大孔隙，也需要较长的等待时间。

表 1-2 常规连续测井

岩性	粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$	等待时间, s	回波数	测速, ft/h
砂岩	4	1.3	600	600
碳酸盐岩	2	2.6	1200	300

2. 具有低粘度油（小于 $4\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）的储层

当储层含轻油或当用油基泥浆钻井时，CMR 脉冲序列根据油的 T_1 确定。需要长的等待时间和慢的测井速度。

3. 含气储层

在含气地层中，CMR 测井主要采用不同回波间距或不同等待时间的两次 CMR 测井进行轻烃识别。

在浅地层（气体氢指数太小）和低至中孔隙的地层（含少量残余气体）中，气体信号太小而不能被检测到。最有效的方法是用相对短的等待时间测井，只要有足够时间使水极化即可。这时气信号幅度变为最小，CMR 孔隙度的减小可能是由于气体造成的。在深层高孔隙地层中，单独的 CMR 测井通过改变等待时间和回波间隔就可识别出气层。

4. 束缚流体

束缚流体具有低的 T_1 ，通常在砂岩和碳酸盐岩中分别小于 50ms 和 150ms。因此，束缚流体测井曲线用短等待时间、高测速的测量得出（表 1-3）。

表 1-3 束缚流体测井

岩性	等待时间, s	回波数	测速, ft/h
砂岩	0.3	600	1800
碳酸盐岩	0.45	600	1500

点测参数的选择：进行点测是为了提高 CMR 孔隙度测量精度并获取详细的 T_2 分布。测量原理与连续测井相同，但点测没有周期时间的限制。一般使用较长的等待时间，收集更多的回波数以便与连续测井进行比较。表 1-4 给出砂岩、碳酸盐岩和轻质油/油基钻井液的脉冲序列。