

The background of the cover features a blue-toned image of laboratory glassware, including several test tubes and a beaker, some containing substances. The overall aesthetic is scientific and technical.

核磁共振录井

刘卫 邢立 等著

石油工业出版社

核磁共振录井

刘卫 邢立 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从核磁共振基本原理入手,全面系统、深入浅出地介绍了应用核磁共振技术检测录井岩石样品的基本理论、检测方法、数据分析解释及核磁共振录井仪器软硬件等方面的知识,并列举了大量的样品检测图谱和录井现场应用的实例。全书共9章,内容包括核磁共振现象及其弛豫特性、岩石孔隙中流体的多弛豫特性、核磁共振测量分析方法、核磁共振录井岩样分析方法、核磁共振录井仪结构及其软硬件概述、储层识别与评价、孔隙流体识别与评价、核磁共振录井新技术新方法。

本书适合于从事核磁共振技术的工作人员使用,特别是核磁共振录井仪器的操作人员和资料分析解释人员,也可作为高等院校地质录井专业的本科和专科学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

核磁共振录井/刘卫,邢立等著.
北京:石油工业出版社,2011.12
ISBN 978-7-5021-8746-0

- I.核…
- II.①刘… ②邢…
- III.核磁共振-应用-录井
- IV.TE242.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第212293号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:9

字数:200千字

定价:40.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

序

20 世纪后期核磁共振技术的迅猛发展，以其理论内涵之深厚、技术方法之先进、应用范围之广阔而令世人瞩目。在国内，核磁共振较早应用于医疗诊断、分子波谱等领域，而在石油天然气勘探开发领域的应用，则体现出了石油人的大智大慧。在储层评价方面，核磁共振分析获得的岩石孔隙度、渗透率、油气饱和度、可动流体饱和度等参数，为油田储量计算和产能评价等提供了科学依据。在石油天然气钻井现场，核磁共振测井技术以其独到的测量分析手段，成为地质家快速决策的重要工具。核磁共振技术的兴起，提升了石油人研究地层的信心，在科研生产人员不断努力和探索中，其应用领域不断扩展。

在中国石油勘探开发研究院科研团队的努力下，经过多年的刻苦攻关，我国第一台核磁共振录井仪于 2003 年研发成功，实现了岩石物理分析从实验室到现场的成功迁移。该技术具有国际先进水平。从最初 2003 年实验录井 5 口，到目前每年录井数百口，核磁共振录井解决了钻井现场无法提供储层物性参数的难题，使油、气、水层评价更准确可靠，为试油层合理选择及完井方案正确决策提供了有效的技术手段。

《核磁共振录井》是国内针对录井行业核磁共振技术出版的第一本专著，系统介绍了核磁共振基本原理、仪器结构、分析方法及录井应用，为现场提供了急需的理论支撑和技术应用方面的科学指导。因此，该书出版尤为重要，希望从事相关专业的技术及管理人员从中获益，不断提高业务素质和水平。

借此机会，感谢多年来为核磁共振录井技术发展付出辛勤劳动和汗水的科研、技术、管理人员，愿核磁共振录井技术在油气勘探开发中发挥更大的作用。

中国石油勘探与生产分公司副总经理



2011 年 11 月

前 言

随着核磁共振录井技术在国内的应用推广，广大录井工程技术人员迫切需要一本详细介绍核磁共振录井原理、仪器、方法和应用的专业书籍。中国石油勘探开发研究院作为国内最早开展核磁共振录井技术研发和核磁共振录井仪器生产的单位，与有关油田录井公司共同编写了《核磁共振录井》一书，希望能提高油田核磁共振录井技术人员的专业水平，推动核磁共振录井的发展起到积极作用。

本书汇集了国内多年来研究及应用成果，深入浅出、全面介绍了核磁共振录井技术，主要内容包括核磁共振基本理论、核磁共振测量分析方法、核磁共振录井岩样分析方法、核磁共振录井仪结构及其操作等方法。书中列举了大量核磁共振录井应用实例，阐明核磁共振录井的分析评价方法，读者可举一反三，应用于科研和生产中。

本书在中国石油勘探与生产分公司的组织下，由中国石油勘探开发研究院廊坊分院渗流流体力学研究所核磁共振技术研究室负责完成。

本书主要由中国石油勘探开发研究院和中国石油、中国石化有关录井公司的专家和技术人员共同编著。

刘卫、邢立负责全书的编著和组织工作；

第一章主要由邢立、刘卫、孙佃庆、郝红编写；

第二章主要由刘卫、孙威、李振涛、杨峰编写；

第三章主要由刘卫、邢立、顾兆斌、胡伟芳编写；

第四章主要由孙威、顾兆斌、郭和坤、孙佃庆编写；

第五章主要由郭和坤、孙佃庆、刘卫、胡金堂编写；

第六章主要由陈乐乐、孙威、刘卫、钟国晓、邸占立编写；

第七章主要由王志战、郭和坤、刘宗林、牛强、杜焕福编写；

第八章主要由蒲国强、郭和坤、王志战、黄英、王鑫、许小琼编写；

第九章主要由顾兆斌、王志战、刘卫、马友生编写。

本书的审核工作由李国欣、姬月凤、陈亚西、焦香婷完成。

本书编写过程中得到了中国石油西部钻探、长城钻探、大庆钻探、渤海钻探相关录井公司，中国石化胜利录井公司、江苏油田地质测井处等单位的大力支持，在此一并表示感谢！

由于作者的水平和经验有限，书中可能存在缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
第二章 核磁共振现象及其弛豫特性	3
第一节 自旋与宏观磁化矢量	3
第二节 宏观磁化矢量的扳转角	5
第三节 弛豫和弛豫时间	7
第三章 岩石孔隙中流体的多弛豫特性	16
第一节 孔隙流体的核磁共振多弛豫特性	16
第二节 孔隙流体的多指数衰减	18
第三节 岩心样品与岩屑样品弛豫谱对比	20
第四节 反演参数及其对弛豫时间谱的影响	20
第五节 仪器测试参数对弛豫时间谱测量结果的影响	22
第六节 一些样品的典型核磁共振 T_2 弛豫时间谱	26
第四章 核磁共振测量分析方法	33
第一节 孔隙度测量分析方法	33
第二节 可动流体饱和度测量分析方法	38
第三节 渗透率测量分析方法	45
第四节 含油饱和度测量分析方法	49
第五章 核磁共振录井岩样分析方法	54
第一节 样品准备	54
第二节 油气藏岩样一次测量方法	55
第三节 油藏密闭取心样三次测量方法	56
第四节 气藏密闭取心样两次测量方法	57
第五节 油藏湿样两次测量方法	58
第六节 特殊岩性岩样测量方法	59
第六章 核磁共振录井仪结构及其软硬件概述	62
第一节 探头	62
第二节 电子线路	64
第三节 仪器的视图及其连接	65
第四节 核磁共振录井仪测控与处理软件	66
第五节 主要技术指标	72
第七章 储层识别与评价	73
第一节 储层识别	73
第二节 物性评价	75
第三节 储集空间类型评价	79
第四节 孔隙结构评价	84

第五节 孔喉分选性评价	89
第六节 有效储层识别	91
第八章 孔隙流体识别与评价	93
第一节 储层含水性识别	93
第二节 油水层评价方法	94
第三节 水淹层评价方法	101
第四节 油气产能评价	103
第九章 核磁共振录井新技术新方法	118
第一节 全直径核磁共振录井技术	118
第二节 核磁共振二维谱技术	119
第三节 钻井液核磁共振录井技术	124
附录 利用改进的奇异值分解法反演	128
参考文献	132

第一章 绪 论

核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance, 简称 NMR) 是某些具有自旋磁矩的原子核在外加磁场作用下, 吸收特定频率的电磁波, 从而改变能量状态的现象。自从 1946 年 Stanford 的 Bloch 和 Harvard 的 Purcell 各自独立观察到核磁共振现象以来, 核磁共振技术已广泛应用于医学、化学和油田勘探开发等领域。

核磁共振录井技术通过对岩样孔隙内的流体量、流体性质, 以及流体在岩石孔隙中的核磁共振特征等测试分析, 快速获得储层孔隙度、渗透率、含气饱和度、含气饱和度、可动流体饱和度、可动水饱和度、束缚水饱和度等物性和流体参数, 为地质家划分和评价有效储层、识别油水层, 提供了有效的方法和手段。

随着技术的不断发展和成熟, 钻井岩屑、钻井取心和井壁取心的“井口随钻测量分析”成为现实, 实现了岩石测量分析从室内到钻井现场的转移, 这不仅降低了测量分析成本, 而且保证了测量分析结果的准确、可靠和快速。

我国是世界上较早从事核磁共振录井研究并进行规模化应用的国家。早在 1988 年, 美国 EXLOG 公司生产的核磁共振 PK 仪就打入中国录井市场; 1998 年, 英国共振仪器公司生产的核磁共振仪器应用于中国油田核磁共振岩心分析, 取得较好的效果。2001 年, 由美国 KMS 技术公司和加拿大 NMR Plus 公司联合研制的 MR - ML 核磁共振录井仪, 进入中国录井市场。这种仪器可测多个回波信号, 获得岩石样品的孔隙度、渗透率、束缚水饱和度、自由流体指数等多项参数, 是国外核磁共振录井仪器的成熟产品。

中国石油勘探开发研究院 (本书简称“勘探院”) 是国际上最早从事核磁共振录井研究的单位, 早在 20 世纪 90 年代初就引进了国外核磁共振技术, 建立了专门研究核磁共振石油应用技术的实验室。1994 年, 实验室在国内首次实现核磁共振回波串信号驰豫谱反演, 为核磁共振录井数据处理奠定了基础; 1996 年研制出具有国际领先水平的核磁共振岩心分析系统, 实现了岩石样品孔隙度、渗透率、束缚水饱和度和含油饱和度的测量, 为核磁共振录井的发展提供了硬件保证。“岩心及其碎块对比”经典实验, 为核磁共振岩屑录井提供了实验依据。“双孔探头”等技术发明应用于新型 RecCore2500 型核磁共振录井仪, 如图 1-1 所示, 使仪器操作更加简便; “一次测量”、“两次测量”和“三次测量”等适合油田录井测量方法的创立, 使核磁共振录井作业变得更加方便、快捷和准确, 促进了核磁共振录井技术在全国录井行业迅速推广和普及。

多年来, 各油田录井公司在应用核磁共振录井技术测试分析油气藏岩石样品、识别评价储层和孔隙流体等方面取得突破, 积累了丰富的经验, 总结了许多成功的案例, 成为核磁共振技术在录井行业应用和发展的宝贵财富。

本书以勘探院研制生产的 RecCore2500 型核磁共振岩样分析仪为例, 结合油田成功录井案例, 阐述了核磁共振技术及其在录井中应用的基本原理、核磁共振录井仪软硬件基础知识、岩石样品测量分析方法、在储层和流体识别与评价等方面的知识。希望能对读者的学习和工作有所帮助。

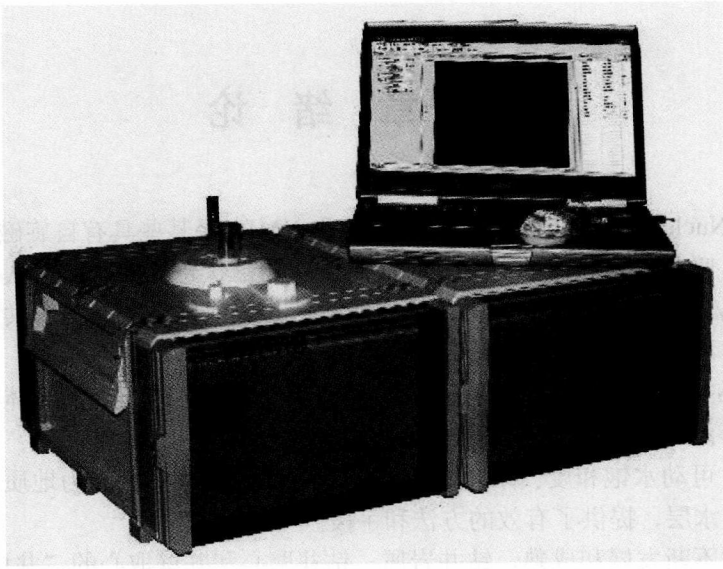


图 1-1 RecCore2500 型核磁共振岩样分析仪

第二章 核磁共振现象及其弛豫特性

核磁共振 (NMR) 研究“淹没”在恒定磁场中的某些原子核, 在另一个交变磁场的“照射”下发生的物理现象。本章通过对这些现象的讨论, 引入一些最基本的核磁共振概念, 为读者了解核磁共振录井技术、操作核磁共振录井仪器和处理核磁共振录井资料奠定基础。这些概念包括自旋、磁矩、拉莫频率、宏观磁化矢量、脉冲序列等, 以及弛豫时间 T_1 和 T_2 及其测量方法。

第一节 自旋与宏观磁化矢量

要了解核磁共振原理, 还要从自旋说起。自旋是物体对于其质心的旋转, 比如旋转的陀螺, 如图 2-1 (a) 所示, 沿自身的轴所作的转动。

众所周知, 原子核由质子和中子组成, 质子带正电荷, 中子不带电, 因此, 原子核带正电, 用 ${}^A\text{X}_Z$ 表示。其中, Z 表示电荷数, 即原子序数。 A 表示核质量数, 等于质子数加中子数。某些原子核, 如 ${}^1\text{H}_1$ 、 ${}^{19}\text{F}_9$ 、 ${}^{31}\text{P}_{15}$ 、 ${}^{23}\text{Na}_{11}$ 、 ${}^{13}\text{C}_6$ 等, 类似旋转的陀螺, 还存在另一重要特性, 即“自旋”, 如图 2-1 (a)、(b) 所示。

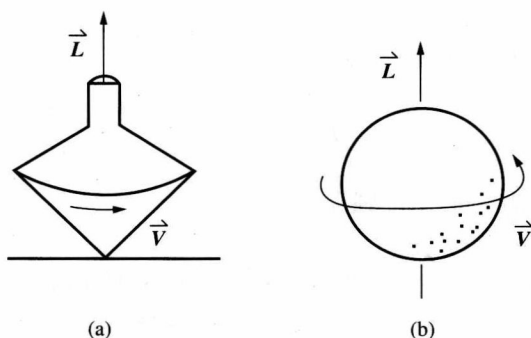


图 2-1 自旋运动

(a) 陀螺的自旋运动; (b) 核的自旋运动

由于旋转的电荷能产生磁场, 磁场方向沿电荷旋转轴的方向, 因此, 每个原子核可以看做一个小磁棒, 其磁场方向与核的自旋轴一致, 如图 2-2 (a) 所示。当没有外加磁场时, 各小磁棒随机取向, 包含大量自旋原子核的系统在宏观上没有磁性, 如图 2-2 (b) 所示。

当原子核置于外加恒定磁场 B_0 中时, 原子核在 B_0 磁场的作用下, 自旋轴沿 B_0 方向排列, 并有两种取向和能级: 与 B_0 磁场方向相同, 处于高能级; 或与 B_0 磁场方向相反, 处于低能级。

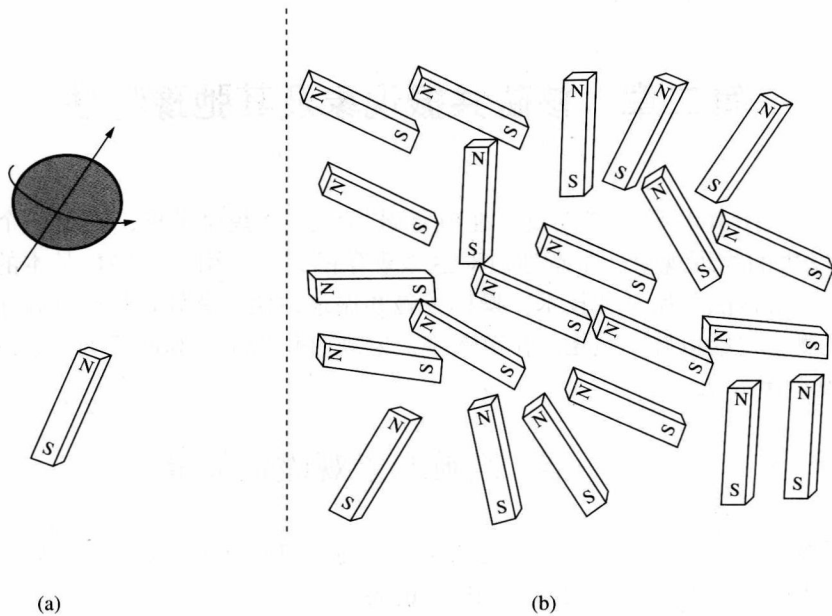


图 2-2 原子核磁棒及其随机取向

核磁共振现象就是置于外加恒定磁场 B_0 中的带有自旋原子核，可以吸收某一特定频率的电磁波（光子），发生能级跃迁，改变能量状态。这一特定频率就称为共振频率或拉莫（Larmor）频率，用 f 表示。

拉莫频率与外加恒定磁场 B_0 有关：

$$f = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \quad (2-1)$$

式中 B_0 ——外加恒定磁场的磁感应强度；

γ ——旋磁比。

不同的原子核， γ 值不同。比如氢核， $\gamma/2\pi = 42.58\text{MHz/T}$ 。

置于外加恒定磁场 B_0 中的自旋原子核，处于高能级和低能级的数目不同，宏观上产生一个净磁化矢量，称为宏观磁化矢量，用 M 表示。在一定条件下，处于高能级和低能级的原子核数达到平衡，宏观磁化矢量的方向与外加磁场 B_0 方向一致，原子核系统被“极化”，如图 2-3 所示。平衡时的宏观磁化矢量用 M_0 表示，也称初始磁化矢量。根据居里（Curie）定律：

$$M_0 = \frac{N\gamma^2 h^2 (I+1) B_0}{3(4\pi^2) kT} \quad (2-2)$$

式中 k ——玻尔兹曼常数；

T ——绝对温度；

N ——原子核的自旋数；

h ——普朗克常数；

I ——原子核的自旋量子数， $I=0, 1/2, 1, 3/2, \dots$ 。

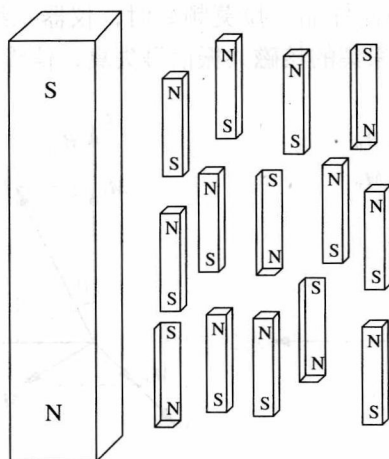


图 2-3 激化过程及宏观磁化矢量的形成

由此可见，只有存在自旋的原子核，才能“看成小磁棒”，在外加恒定磁场 B_0 作用下，才能被极化，产生宏观磁化矢量，发生核磁共振现象，所以“带自旋的原子核才能发生核磁共振现象”。

储层中原油、天然气和水中富含的氢 (^1H) 原子核，是核磁共振录井主要研究对象，所以本章主要讨论“带自旋的氢原子核”（本书简称“自旋”）及其“核自旋系统”产生的宏观磁化矢量 M 的物理规律。

宏观磁化矢量 M 是一个可被仪器检测的物理量，据式 (2-2)，与自旋数量成正比，也就是与样品中油、气、水的氢核含量成正比，这是核磁共振录井测量岩石样品中流体含量，得到孔隙度等参数的理论基础。

第二节 宏观磁化矢量的扳转角

根据核磁共振原理，“淹没”在恒定磁场 B_0 中，被“极化”的核自旋系统，在垂直于恒定磁场 B_0 的方向再施加一个频率等于拉莫频率的交变磁场 B_1 ，“照射”核自旋系统，系统将吸收 B_1 场的能量，使宏观磁化矢量 M 被“激发”，偏离 B_0 方向。偏离的角度 θ 称为宏观磁化矢量 M 的扳转角，如图 2-4 所示。

扳转角度由交变磁场 B_1 及其持续时间决定：

$$\theta = \gamma B_1 \Delta t \quad (2-3)$$

式中 θ ——扳转角；

B_1 ——交变磁场磁感应强度；

Δt ——交变磁场的持续时间；

γ ——旋磁比。

核磁共振录井仪器一般采用高功率 (25W ~ 1kW) 和短持续时间 (1 ~ 50 μs)， B_1 磁场 (又称脉冲磁场) 激发宏观磁化矢量 M ，因此称为“脉冲核磁共振”。交变磁场的持续时间 Δt 也称为脉冲宽度。 B_1 交变磁场是由仪器系统产生、放大、发射，“照射”核自旋系统，其频率又称为系统频率，一般用 SF+O1 (SF 表示主频，O1 表示偏频) 表示。显然，当

系统频率等于核自旋系统（被测样品）拉莫频率时，仪器系统为最佳频率状态。系统频率与拉莫频率偏差过大，将导致采集的核磁共振信号失真，信噪比降低，甚至采集不到信号。

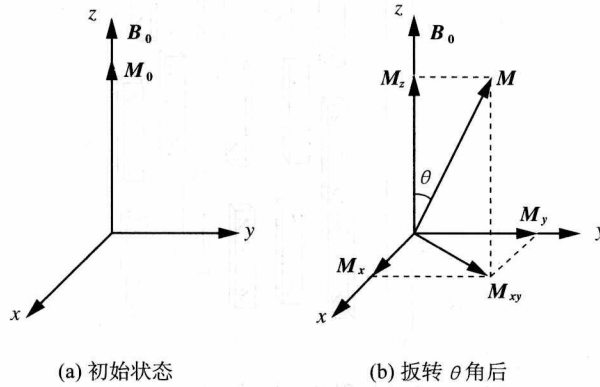


图 2-4 外加交变磁场使磁化矢量扳转

当外加脉冲磁场 B_1 将宏观磁化矢量 M 扳转 θ 角后， M 在 $x-y$ 平面上的分量 $M_{xy}=M_0\sin\theta$ ，随着扳转角 θ 的增大而增大；在 z 方向的分量 $M_z=M_0\cos\theta$ ，随着扳转角 θ 的增大而减小。

当外加脉冲磁场 B_1 结束后， M_{xy} 以拉莫频率绕 z 轴在 $x-y$ 平面内旋转，从而在空间产生与拉莫频率同频率的感生电动势，即核磁共振信号。核磁共振录井仪在 $x-y$ 平面上放置一个检测天线，测量这一感生电动势的变化，从而得到样品核磁共振信号。

当脉冲磁场 B_1 的脉冲宽度正好使扳转角 $\theta = \pi/2$ ，宏观磁化矢量 M 被扳转到 $x-y$ 平面， M_{xy} 达到最大，核磁共振信号最强。这时，脉冲磁场称为 90° 脉冲，持续时间用 $P90$ 表示，如图 2-5 (a) 所示。

当脉冲磁场 B_1 的脉冲宽度正好使扳转角 $\theta = \pi$ ，作用后的宏观磁化矢量与作用前的宏观磁化矢量相比大小相等、方向相反，此时的脉冲磁场 B_1 称为 180° 脉冲，持续时间用 $P180$ 表示，如图 2-5 (b) 所示。平衡时宏观磁化矢量在施加 180° 脉冲作用后，大小不变，方向由 $+z$ 轴转向 $-z$ 轴。

显然， $P180$ 等于 $P90$ 的 2 倍。对于核磁共振录井仪器，一般情况下， $P90$ 取值范围为几微秒至几十微秒。

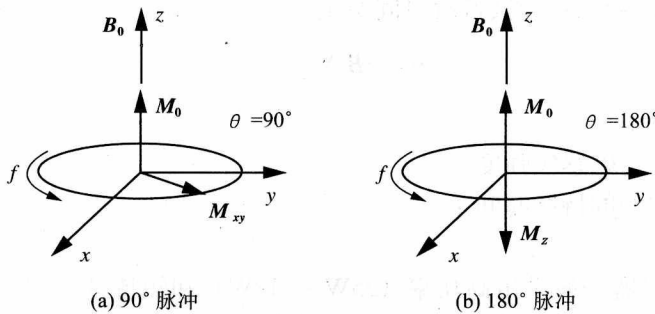


图 2-5 宏观磁化矢量与 90° 、 180° 脉冲

第三节 弛豫和弛豫时间

如前所述，置于恒定磁场 B_0 中的被极化核自旋系统，在频率等于拉莫频率脉冲交变磁场 B_1 作用下，自旋吸收能量，宏观磁化矢量 M 被扳转，偏离平衡位置，在 z 轴的分量小于 M_0 ，在 $x-y$ 轴的分量 M_{xy} 不等于 0。

B_1 场结束后，自旋将逐步释放或交换能量，宏观磁化矢量 M_{xy} 逐渐消失，恢复到平衡状态。自旋系统的这一恢复过程，称为弛豫。恢复过程的快慢，用弛豫时间表示。

弛豫分为纵向弛豫和横向弛豫，与之对应，弛豫时间分为纵向弛豫时间和横向弛豫时间。

一、纵向弛豫

在外加恒定磁场 B_0 的作用下，自旋系统被极化，达到平衡状态。施加交变脉冲磁场 B_1 后，自旋吸收能量，发生能级跃迁，宏观磁化矢量 M 被扳转。当撤去脉冲磁场 B_1 后，宏观磁化矢量 M 的纵向分量 M_z 逐步增加，最后达到 $M_z=M_0$ ，核自旋系统恢复到施加交变脉冲磁场 B_1 前的平衡状态，这一过程称为纵向弛豫，如图 2-6 所示。

纵向弛豫实质上是自旋与环境交换能量的过程。样品中自旋并不是孤立的，它位于其他介质（晶格）之中，因此宏观样品是由自旋和晶格系统组成。脉冲磁场 B_1 结束后，核自旋系统逐步释放能量，转化为晶格系统热运动，原子核从高能级恢复到低能级，直到晶格系统不再接收原子核系统释放的能量，原子核系统和晶格系统达到热平衡状态，所以纵向弛豫又称为“自旋晶格弛豫”。

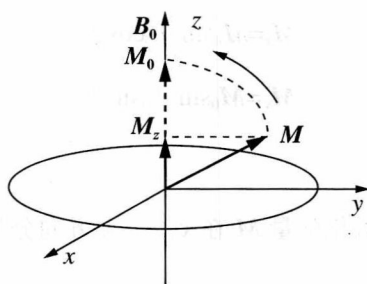


图 2-6 纵向弛豫过程

二、横向弛豫

横向弛豫是自旋与自旋之间交换能量的过程，表征宏观磁化矢量 M 在 $x-y$ 平面分量 M_{xy} 的变化规律。 B_1 场结束后， $M_{xy} \neq 0$ ，并绕 z 轴旋转，如图 2-7 所示。因为核自旋系统中各自旋之间存在相互作用并交换能量，所以一些自旋从其他自旋获取能量，绕 z 轴旋转速度变快，而另一些则变慢，使自旋在 $x-y$ 平面上发生“相散”， M_{xy} 随时间逐渐减少，最后达到 $M_{xy}=0$ ，这一过程称为横向弛豫，又称“自旋-自旋弛豫”。

对于横向弛豫，在自旋系统中各自旋相互交换能量，自旋总数和系统中自旋总能量均未发生变化。

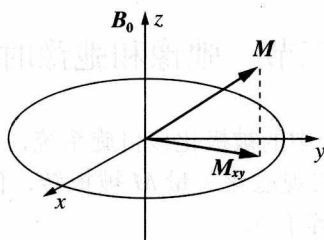


图 2-7 B_1 场结束后, M_{xy} 绕 z 轴旋转

三、Bloch 方程与弛豫时间

根据核磁共振理论, 一般用 Bloch 方程描述弛豫过程:

$$\frac{dM_x}{dt} = \gamma B_0 M_y - \frac{M_x}{T_2} \quad (2-4)$$

$$\frac{dM_y}{dt} = -\gamma B_0 M_x - \frac{M_y}{T_2} \quad (2-5)$$

$$\frac{dM_z}{dt} = \frac{(M_z - M_0)}{T_1} \quad (2-6)$$

脉冲磁场 B_1 结束后, 宏观磁化矢量 M 为:

$$M_z = M_0 \cos \theta_0$$

$$M_x = M_0 \sin \theta_0 \cos \phi$$

$$M_y = M_0 \sin \theta_0 \sin \phi$$

式中 θ_0 ——扳转角;

ϕ —— B_1 相位。

解 Bloch 方程, 得出宏观磁化矢量 M 在 x 、 y 、 z 方向分量的运动方程:

$$M_x = M_0 \sin \omega_0 t \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \quad (2-7)$$

$$M_y = M_0 \cos \omega_0 t \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \quad (2-8)$$

$$M_z = M_0 \left[1 - (1 - \cos \theta_0) \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right] \quad (2-9)$$

当 $\theta_0 = 180^\circ$ 时, 带入公式 (2-9) 可得:

$$M_z = M_0 (1 - 2e^{-t/T_1}) \quad (2-10)$$

由此可知, M_z 以指数规律逐步上升至初始值 M_0 , 如图 2-8 所示, 其时间常数 T_1 称为纵向弛豫时间。 T_1 表征宏观磁化矢量 M 恢复到初始值 M_0 的快慢, T_1 越小恢复越快,

反之越慢。对于纯水样品， T_1 约为几秒；对于岩样中流体，由于受岩石固体表面作用力大小不同，导致弛豫时间 T_1 会被缩短至几百毫秒，甚至几毫秒。

撤去 B_1 场后，一般应等待足够长的时间，使宏观磁化矢量 M 恢复到平衡状态 M_0 ，才能再次施加下一个 B_1 场，这段时间称为恢复时间，用 RD 表示。对于核磁共振录井仪， RD 一般应大于 $3T_1 \sim 5T_1$ 。

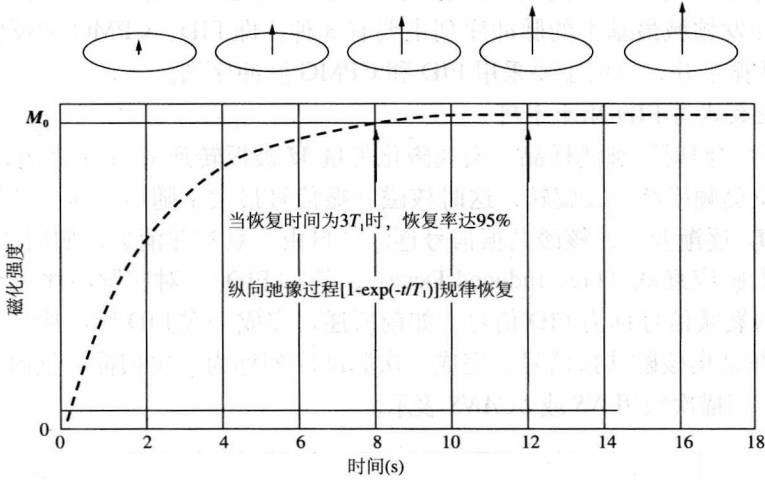


图 2-8 质子极化曲线

类似地，表征横向弛豫快慢的时间常数，称为横向弛豫时间，用 T_2 表示，如图 2-9 所示。由公式 (2-7) 和公式 (2-8) 得：

$$M_{xy} = M_0 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \quad (2-11)$$

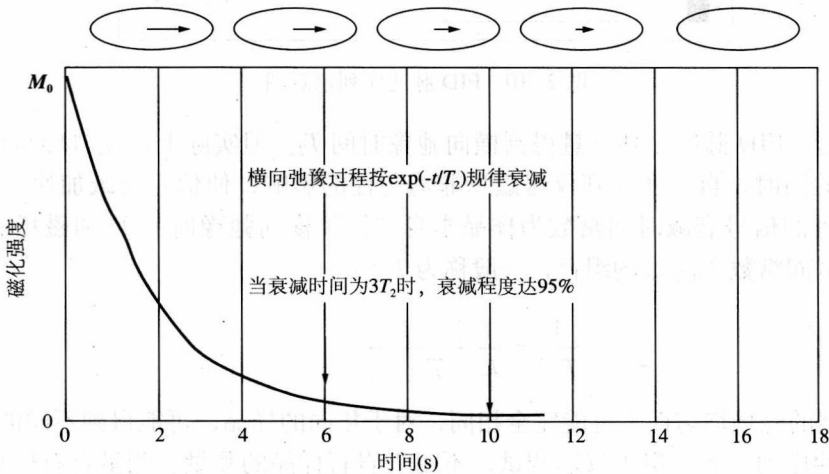


图 2-9 指数衰减曲线

岩石中流体的弛豫时间 T_1 和 T_2 与流体本身的性质、流体与岩石孔隙表面相互作用等因素有关，包含着丰富的岩石物性与流体性质信息，架起了核磁共振与地质录井之间的桥

梁，所以准确测量岩石中流体的弛豫时间是核磁共振录井的关键之一。

四、脉冲序列与弛豫时间测量

脉冲序列是用一系列、有规律 B_1 场“照射”置于恒定磁场 B_0 中的被测样品，按一定规则“扳转”宏观磁化矢量 M ，并采集由此而产生的特定核磁共振信号的核磁共振测量方法。不同的脉冲序列就是不同的核磁共振测量方法。理论上，脉冲序列可以是无限多的，但在石油勘探开发领域最基本的脉冲序列主要有 3 种，即 FID、CPMG 和反转恢复脉冲序列。对于核磁共振录井，目前主要采用 FID 和 CPMG 脉冲序列。

1. 自由感应衰减与 FID 脉冲序列

用 90° 脉冲“照射”被测样品，宏观磁化矢量 M 被扳转到 $x-y$ 平面内， M_{xy} 与 M_0 大小相同，并以拉莫频率绕 z 轴旋转，这时核磁共振信号最大；随后，这些“聚相”的自旋群开始散相， M_{xy} 逐渐变小，核磁共振信号逐渐“自由”衰减并消失，如图 2-10 所示。这一过程称为自由感应衰减 (Free Induced Decay，简称 FID)，对应脉冲序列称为 FID 脉冲序列，检测到的衰减信号称为 FID 信号。如前所述，完成一次 FID 脉冲序列，只需发射一个 90° 脉冲，并采集核磁共振信号。完成一次脉冲序列称为一次扫描，核磁共振测量一般采用多次扫描，扫描次数用 NS 或 $SCANS$ 表示。

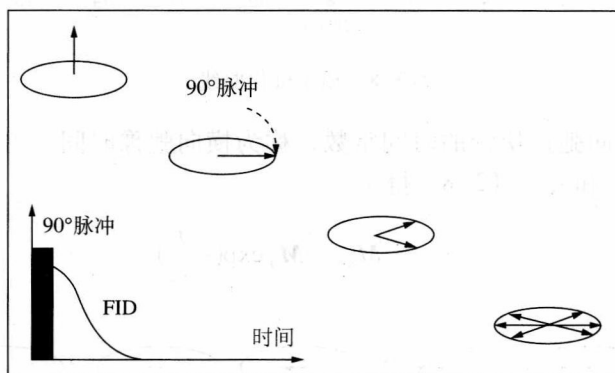


图 2-10 FID 脉冲序列示意图

表面上看，FID 脉冲序列测量得到横向弛豫时间 T_2 。但实际上，在自旋与自旋交换能量发生相散的同时，自旋还受到仪器磁场非均匀性的影响，使信号衰减加快。所以，FID 脉冲序列测到的信号衰减时间常数为样品本身“纯”横向弛豫时间 T_2 和磁场非均匀性影响所产生的时间常数 $T_{2inhomo}$ 的组合，一般称为 T_2^* ：

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_{2inhomo}} \quad (2-12)$$

不同仪器的磁场均匀性不可能完全相同，对于相同的样品，可能得到不同的测量结果，所以 FID 脉冲序列一般只用于仪器调试，不用于岩石样品的测量。测量岩石样品应选择不受仪器磁场非均匀性影响的测量方法，也就是 CPMG 脉冲序列。

2. CPMG 脉冲序列与 T_2 的测量

根据核磁共振原理，CPMG (Carr、Purcell、Meiboom、Gill 四个人姓氏第一个字母的缩写) 脉冲序列可克服仪器本身磁场非均匀性的影响，测定被测样品的横向弛豫时间 T_2 。