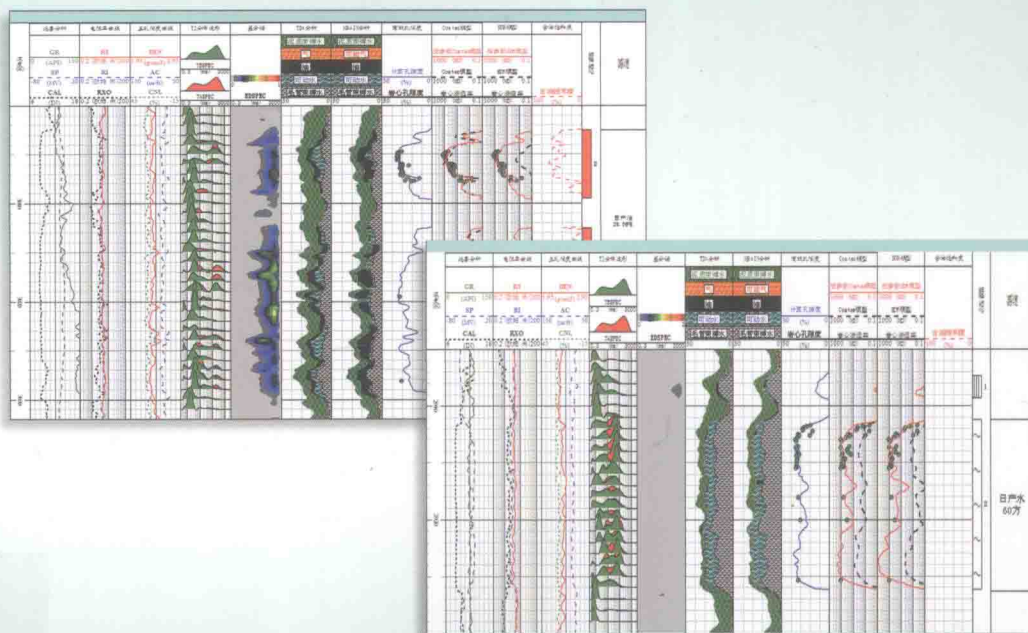


核磁共振测井技术 在准噶尔盆地 油气勘探开发中的应用

APPLICATION OF NMR IN JUNGGAR BASIN EXPLORATION AND DEVELOPMENT

匡立春 孙中春 毛志强 等著



石油工业出版社

地质遥感测井技术 在塔里木盆地 油气勘探开发中的应用

CHINA UNIVERSITY OF GEOLOGY LIBRARY COLLECTION

地质学 石油地质学 测井技术 应用



2010.10.10

核磁共振测井技术 在准噶尔盆地油气勘探开发中的应用

匡立春 孙中春 毛志强 肖 亮 罗兴平 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要为核磁共振测井技术在准噶尔盆地应用的成果总结,通过研究,解决了核磁共振测井 T_2 谱 T_2 截止值确定的技术难题,以及定量评价储层孔隙结构的方法和技术问题,形成了适用于准噶尔盆地碎屑岩和酸性火山岩为主要对象的核磁共振测井解释和评价技术体系。

本书可供从事油气测井工作的科研人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

核磁共振测井技术在准噶尔盆地油气勘探开发中的应用/匡立春等著.
北京:石油工业出版社,2015.6

(准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书)

ISBN 978-7-5183-0783-8

I. 核…

II. 匡…

III. ①准噶尔盆地-核磁测井-应用-油气勘探-研究

②准噶尔盆地-核磁测井-应用-油气田开发-研究

IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 132064 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

编辑部: (010) 64523543

图书营销中心: (010) 64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 12.75

字数: 326 千字

定价: 100.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

序

准噶尔盆地位于中国西部,行政区划属新疆维吾尔自治区。盆地西北为准噶尔界山,东北为阿尔泰山,南部为北天山,是一个略呈三角形的封闭式内陆盆地,东西长 700 千米,南北宽 370 千米,面积 13 万平方千米。盆地腹部为古尔班通古特沙漠,面积占盆地总面积的 36.9%。

1955 年 10 月 29 日,克拉玛依黑油山 1 号井喷出高产油气流,宣告了克拉玛依油田的诞生,从此揭开了新疆石油工业发展的序幕。1958 年 7 月 25 日,世界上唯一一座以石油命名的城市——克拉玛依市诞生。1960 年,克拉玛依油田原油产量达到 166 万吨,占当年全国原油产量的 40%,成为新中国成立后发现的第一个大油田。2002 年原油年产量突破 1000 万吨,成为中国西部第一个千万吨级大油田。

准噶尔盆地蕴藏着丰富的油气资源。油气总资源量 107 亿吨,是我国陆上油气资源当量超过 100 亿吨的四大含油气盆地之一。虽然经过半个多世纪的勘探开发,但截至 2012 年底石油探明程度仅为 26.26%,天然气探明程度仅为 8.51%,均处于含油气盆地油气勘探阶段的早中期,预示着巨大的油气资源和勘探开发潜力。

准噶尔盆地是一个具有复合叠加特征的大型含油气盆地。盆地自晚古生代至第四纪经历了海西、印支、燕山、喜马拉雅等构造运动。其中,晚海西期是盆地坳陷构造格局形成、演化的时期,印支—燕山运动进一步叠加和改造,喜马拉雅运动重点作用于盆地南缘。多旋回的构造发展在盆地中造成多期活动、类型多样的构造组合。

准噶尔盆地沉积总厚度可达 15000 米。石炭系—二叠系被认为是由海相到陆相的过渡地层,中、新生界则属于纯陆相沉积。盆地发育了石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系六套烃源岩,分布于盆地不同的凹陷,它们为准噶尔盆地奠定了丰富的油气源物质基础。

纵观准噶尔盆地整个勘探历程,储量增长的高峰大致可分为西北缘深化勘探阶段(20 世纪 70—80 年代)、准东快速发现阶段(20 世纪 80—90 年代)、腹部高效勘探阶段(20 世纪 90 年代—21 世纪初期)、西北缘滚动勘探阶段(21 世纪初期至今)。不难看出,勘探方向 and 目标的转移反映了地质认识的不断深化和勘探技术的日臻成熟。

正是由于几代石油地质工作者的不懈努力和执著追求,使准噶尔盆地在经历了半个多世纪的勘探开发后,仍显示出勃勃生机,油气储量和产量连续 29 年稳中有升,为我国石油工业发展做出了积极贡献。

在充分肯定和乐观评价准噶尔盆地油气资源和勘探开发前景的同时,必须清醒地看到,由

于准噶尔盆地石油地质条件的复杂性和特殊性,随着勘探程度的不断提高,勘探目标多呈“低、深、隐、难”的特点,勘探难度不断加大,勘探效益逐年下降。巨大的剩余油气资源分布和赋存于何处,是目前盆地油气勘探研究的热点和焦点。

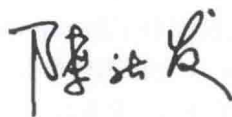
由新疆油田公司组织编写的《准噶尔盆地油气勘探开发系列丛书》历经近两年时间的努力,今天终于面世了。这是第一部由油田自己的科技人员编写出版的专著丛书,这充分表明我们不仅在半个多世纪的勘探开发实践中取得了一系列重大的成果、积累了丰富的经验,而且在准噶尔盆地油气勘探开发理论和技术总结方面有了长足的进步,理论和实践的结合必将更好地推动准噶尔盆地勘探开发事业的进步。

系列专著的出版汇集了几代石油勘探开发科技工作者的成果和智慧,也彰显了当代年轻地质工作者的厚积薄发和聪明才智。希望今后能有更多高水平的、反映准噶尔盆地特色地质理论的专著出版。

“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”。希望从事准噶尔盆地油气勘探开发的科技工作者勤于耕耘,勇于创新,精于钻研,甘于奉献,为“十二五”新疆油田的加快发展和“新疆大庆”的战略实施做出新的更大的贡献。

新疆油田公司总经理

2012. 11. 8



前言

新疆油田是国内最早引进、应用核磁共振测井技术的油田之一。1997年5月23日，彩201井成功地进行了CMR核磁共振测井作业，拉开了准噶尔盆地油气勘探、开发中核磁共振测井应用的序幕。四年后，2001年7月22日，MB2005井首次用MRIL-P型核磁测井仪完成了测井作业。2013年5月26日，夏盐18井首次应用MRIL-P型核磁测井仪进行二维核磁测井。截至2013年底，全盆地共完成了1000多口井的核磁共振测井，约占同期探井、评价井数量的80%以上。目前，核磁共振测井技术已广泛应用于勘探、开发的各个阶段，为复杂油气藏的勘探开发提供了重要的测井技术支撑。

为了做好核磁共振测井资料的推广应用工作，充分发挥核磁共振测井的技术优势，有效地解决勘探、开发过程中遇到的地质评价难题，从20世纪90年代后期开始，中国石油天然气集团公司、中国石油天然气股份有限公司、新疆石油管理局、新疆油田公司先后组织立项，有针对性地开展系统的核磁共振测井资料的应用研究工作。准噶尔盆地核磁共振测井资料的应用研究工作可分为三个阶段：

1997—2002年为初期应用研究阶段。该阶段的研究特点是分区块、岩性建立区域性的评价模型，准确地求解核磁共振测井可以“直接”提供的孔隙度、渗透率和束缚水饱和度参数，应用波谱特征定性地评价储层的孔隙结构、进行储层的孔隙结构分类。该研究阶段标志性的应用技术为储层快速评价技术。应用核磁共振测井技术快速评价复杂岩性储层的孔隙度、渗透率、束缚水饱和度，综合应用电缆地层测试技术快速识别储层流体性质、快速判定油—水界面。呼图壁气田勘探初期，在第一口评价井呼001井综合应用核磁共振和电缆地层测试技术快速地查明了储层物性参数和含气饱和度及气—水界面；在石南油田控制、探明过程中，应用核磁共振测井 T_2 谱分布特征定性地评价砂岩储层的孔隙结构、进行孔隙结构的分类，较好地解析了油藏高部位油水同出的地质问题；在陆梁油田的勘探过程中，应用核磁共振测井资料进行了系统的束缚水饱和度评价，解释了白垩系中—高孔隙储层低含油饱和度低阻油藏的成因，综合应用电缆地层测试技术快速解决了一砂一藏油水界面的确定问题，为陆梁油田白垩系低阻油藏当年发现、当年探明做出了重要贡献。

2003—2011年为深化应用研究阶段：该研究阶段的技术特点是应用核磁共振测井资料定量地评价孔隙结构，形成了应用核磁共振测井 T_2 波谱转换毛细管压力曲线及相对完善的应用核磁共振测井资料定性识别油气层和定量计算油气饱和度的技术。玛纳斯气田气层电阻

率低, 钻井较为困难, 井眼条件相对较差, 钻井液侵入相对较深, 用电阻率法评价饱和度较为困难, 应用核磁共振饱和度计算技术, 有效地解决了饱和度评价的技术难题; 克拉美丽气田石炭系火山岩气藏, 岩性复杂、储层类型多样, 储—盖关系复杂。勘探阶段, 进行了系统的核磁共振测井, 应用核磁共振技术对储—盖关系进行了系统的研究, 形成了“穿衣戴帽”的火山岩成藏模式, 有利地指导了该区火山岩气藏的勘探。在滴西 18、滴西 10 酸性火山岩气藏, 应用核磁共振测井资料进行了系统的孔隙结构评价, 核磁含气饱和度和电法含气饱和度相互印证, 提高了酸性火山岩饱和度的计算精度; 在八区二叠系乌尔禾巨厚砾岩油藏开发调整过程中, 进行了系统的核磁共振测井, 差谱和移谱技术及孔隙结构评价技术得到了广泛应用, 为查明开发层段的水淹层及发现上部大段未动用油层提供了重要的技术支持, 为调整方案设计提供了重要的基础资料。

2012 年至今为拓展应用研究阶段: 该阶段的研究目标是核磁共振测井资料在致密油气储层的拓展应用。现有的核磁共振储层参数评价理论是建立在常规储层的基础上, 对于致密储层存在一定的不适应性。该阶段的研究目的是建立致密油气储层核磁共振测井资料储层物性表征、孔隙结构评价及含油性评价及饱和度计算技术。

本书主要是准噶尔盆地前两个阶段研究成果的总结, 着重方法研究和技术应用。第一, 通过配套岩石物理基础实验研究, 使复杂、晦涩的核磁共振测井理论和测井响应机理通过盆地目标储层的具体对象得到了清晰的表征。如饱和多相流体侏罗系和白垩系砂岩储层样品核磁共振测井 T_2 谱在不同回波间隔、不同等待时间等测量条件下的特征和变化规律, 对于深入理解孔隙流体弛豫机制, 正确解释和分析核磁共振测井 T_2 谱意义重大。第二, 通过研究, 解决了核磁共振测井 T_2 谱 T_2 截止值确定的技术难题。早期的文献和服务公司的推荐做法, 均把砂岩和碳酸盐岩储层 T_2 截止值作为常数, 然而准噶尔盆地及同期国内其他盆地的实验室测量结果却表明这个关键参数不是一个常数。不同储层、甚至同一套储层的不同实验样品, 其 T_2 截止值测量结果通常都在一个相当大的数值区间发生变化。基于大量实验数据和测井数据, 提出了利用核磁共振测井 T_2 谱形态特征自动确定 T_2 截止值的方法和技术, 应用效果明显, 这项方法和技术获得了国家发明专利。第三, 解决了核磁共振测井 T_2 谱定量评价储层孔隙结构的方法和技术问题。提出并形成了根据储层孔隙结构类型、分类非线性构造核磁(伪)毛细管压力曲线的方法和技术, 该方法同样取得了国家发明专利授权。这一方法的利用和技术成果的取得, 使得利用核磁共振测井资料评价储层孔隙结构由定性分析上升到了定量评价的层次, 方法与技术研究进展始终与国际上同类研究保持同步。第四, 形成了适用于准噶尔盆地碎屑岩和酸性火山岩为主要对象的核磁共振测井解释和评价技术体系, 包括储层有效孔隙度、束缚水饱和度和渗透率等储层参数的定量计算, 核磁毛细管压力曲线连续转换技术, 以及基于核磁毛细管压力曲线的储层孔隙结构定量评价、油气藏饱和度确定, 与电法测井饱和度结果联合进行的油气藏油(气)—水界面预测技术等, 应用效果明显。

全书共分八章。第一章第二节、第二章第四节、第七章由匡立春编写。第四章、第五章第一节、第六章第二节由孙中春编写。第一章第一节、第二章第一至三节、第五章第二节、第六章第三节由毛志强编写。第三章第一至五节、第八章由罗兴平编写。第三章第六、七节、第五章第三节、第六章第一、二节由肖亮编写。全书由匡立春统稿。

由于笔者水平有限, 书中谬误在所难免, 望读者批评指正。

CONTENTS 目录

第一章 核磁共振测井基本原理	(1)
第一节 核磁共振测井的物理学基础	(1)
第二节 核磁共振测井仪器及测量原理	(11)
第二章 核磁共振的岩石物理学基础	(20)
第一节 孔隙流体含氢指数	(20)
第二节 岩石孔隙流体的核磁共振弛豫机理	(22)
第三节 孔隙流体弛豫谱	(31)
第四节 准噶尔盆地岩心实验及核磁测井响应弛豫机理分析	(35)
第三章 核磁共振测井技术的基本应用	(42)
第一节 岩石孔径大小及其分布	(42)
第二节 束缚水饱和度	(44)
第三节 渗透率	(49)
第四节 孔隙度	(51)
第五节 饱和度	(56)
第六节 一维核磁共振测井技术	(61)
第七节 二维核磁共振测井技术	(67)
第四章 储层岩石核磁实验研究及测井采集模式	(73)
第一节 储层流体的核磁共振特性	(73)
第二节 岩心不同饱和状态下的实验结果	(79)
第三节 不同岩性储层的实验结果	(84)
第四节 测前设计原则及测井实例	(87)
第五章 核磁共振测井 T_2 截止值确定方法及其应用研究	(93)
第一节 核磁共振测井 T_2 截止值及其确定方法	(93)
第二节 核磁共振测井 T_2 截止值自动确定方法研究	(100)
第三节 核磁共振测井 T_2 截止值自动确定应用技术研究	(106)
第六章 储层孔隙结构定量评价方法和技术研究	(115)
第一节 理论基础及方法	(115)
第二节 核磁毛细管压力曲线构造方法和技术研究	(125)

第三节 基于核磁共振的储层渗透率评价方法及模型研究 (139)

第七章 油气藏饱和度评价和油—水界面预测 (152)

第一节 理论基础 (152)

第二节 应用实例及效果分析 (159)

第八章 综合应用实例及效果 (171)

第一节 阜东侏罗系碎屑岩低阻油藏 (171)

第二节 克拉美丽石炭系火山岩气藏 (180)

参考文献 (190)

第一章 核磁共振测井基本原理

核磁共振 (NMR: Nuclear Magnetic Resonance) 测井技术在储层评价中独特的技术优势随着其仪器性能的不断改善以及针对性的岩石物理研究成果不断彰显。核磁共振测井技术用于准噶尔盆地以来, 由于仪器的升级换代, 先后有不同服务公司的多种核磁共振测井仪器在盆地内服务。为了阅读方便、便于理解, 本章对核磁共振测井的基本理论及在用仪器基本性能作一概括介绍。

本章介绍了核磁共振及核磁共振测井的物理学基础, 主要包括极化、磁共振和弛豫等基本概念, 旨在使读者了解核磁共振的微观机制和宏观响应特征, 为核磁共振测井资料分析与解释奠定理论基础。

准噶尔盆地主要使用的核磁共振测井仪器类型有 Halliburton-NUMAR 公司的 MRIL 系列 (P 型) 以及 Schlumberger 公司 CMR 系列 (CMR-200 和 CMR-plus 等)。本章对上述仪器的发展和特点进行了对比介绍。在对核磁共振测井技术的发展情况、测量的基本原理进行概述的基础上, 介绍了 MRIL 系列以及 CMR 系列核磁共振测井仪器的磁体结构和回波串设计。

第一节 核磁共振测井的物理学基础

简单地说, 井中核磁共振测量包含几个过程: 首先, 使用静磁场使测量空间的氢核定向排列 (即极化) 并形成宏观磁化矢量。其次, 施加交变电磁场使测量空间的氢核吸收磁场能量产生共振, 共振的结果是使宏观磁化矢量的方向发生改变 (扳转)。然后, 撤掉交变磁场, 测量宏观磁化矢量信号的衰减过程 (自旋回波)。过去几十年来, 核磁共振测井技术的最大突破是采用自旋回波方式, 克服了由于不可能在井下形成一个强度绝对均匀的静磁场产生进动失相而导致无法有效地测量磁化矢量衰减过程的技术难题。

一、原子核的磁性

核磁共振研究的是原子核在磁场中的行为和性质。如同医学领域一样, 核磁共振测井测量的也是氢核的磁共振性质。沉积岩石中氢原子核主要存在于岩石孔隙流体中, 因此, 核磁共振测井主要研究的是孔隙流体的核磁共振性质及孔隙流体与固相介质的作用机制。

自然界中有很多原子核会发生自旋, 由于原子核是带电的粒子, 原子核在自旋过程中会产生磁场 (相当于一个具有 N 极和 S 极的小磁棒, 如图 1-1a 所示), 这个磁场又被称作核磁矩矢量。一个自旋的氢核所产生的核磁矩矢量用 μ 表示:

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

式中 γ ——氢核的旋磁比, 其数值等于 $2.675197 \times 10^8 \text{ rad} / (\text{s} \cdot \text{T})$;

P ——氢核的自旋角动量 (子)。

如果一个给定的研究对象中包含大量氢核, 称之为一个自旋体系 (或自旋系统)。若无

外加磁场作用于该自旋体系，其中的核磁矩矢量方向随机分布（图 1-1b）。因此，宏观上这个自旋体系是观测不到磁场的，表现为无磁性。

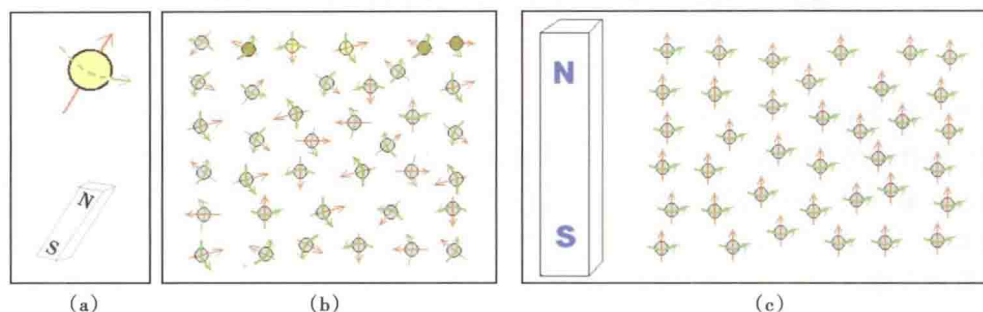


图 1-1 核磁矩及自旋体系在外加磁场作用下的定向排列

- (a) 单个氢核自旋产生一个核磁矩；(b) 自旋体系无外加磁场作用的无序排列；
(c) 外加磁场作用下自旋体系中的核磁矩矢量定向排列

二、极化与进动

如果把一个自旋体系置于一个给定磁场强度的静磁场中，磁场将对自旋体系施加一个力矩并使其沿静磁场方向定向排列（图 1-1c）。

当一个自旋物体被施加一个力矩后，自旋物质会以其轴与力矩垂直的方向运动，这一运动过程叫作进动。外加静磁场强度为 B_0 ，就像陀螺在重力场中进动一样，单一的自旋也会绕外加磁场 B_0 进动（图 1-2）。

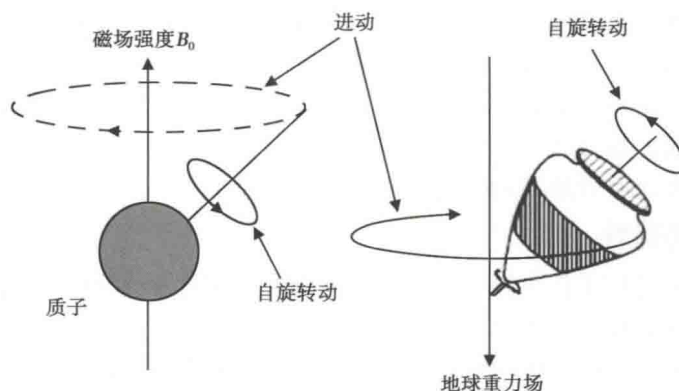


图 1-2 质子在静磁场中的进动，其过程可类比为陀螺在重力场中的运动

一个自旋核在外加磁场 B_0 的作用下沿着 B_0 进动的频率 f 称为拉莫尔（Larmor）频率：

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

式（1-2）表明，自旋核的拉莫尔进动频率与静磁场强度以及旋磁比成比例。当外加静磁场强度 B_0 一定的情况下，不同类型的自旋核具有不同的拉莫尔频率（旋磁比不同所致）；

因此，不同类型的自旋核，可以根据其频率的差异加以区别。

根据量子力学理论，当一个质子（氢核）处于静磁场中时，质子必然会处于两种能量状态（能级：即低能级和高能级）之一（图 1-3b）。质子所处的能级取决于质子的进动轴方向与外加磁场方向的关系。平行于 B_0 方向进动的质子处于低能态，反平行于 B_0 方向进动的质子则处于高能态。

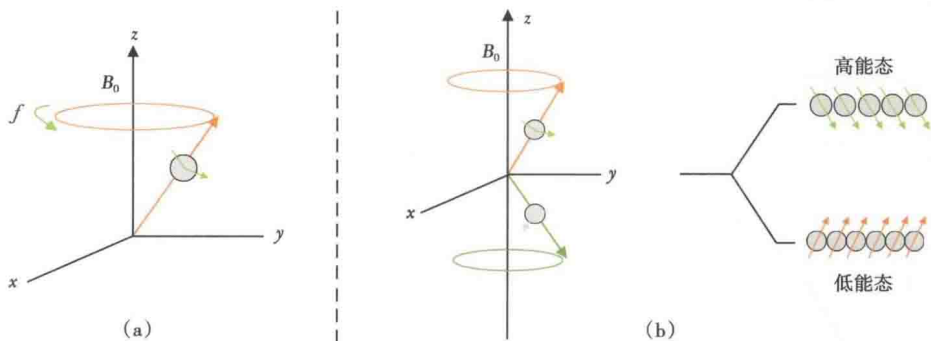


图 1-3 单个氢核 (a) 及多个氢核在外加磁场中的进动和能量状态 (b)

若存在大量的自旋质子绕外加静磁场 B_0 进动，则质子会处于一种热平衡状态下，导致与 B_0 平行进动的自旋（低能态）比反平行于 B_0 的自旋（高能态）多。这种数量上的不同形成了宏观磁化矢量 M_0 ， M_0 提供了能被核磁共振测井仪器测量的信号。大量质子在外加静磁场中的进动过程及宏观磁化矢量的形成过程如图 1-4 所示。

宏观磁化矢量 M_0 定义为单位体积内的净核磁矩（所有质子的核磁矩之和）。假设单位体积介质内存在 N 个氢核（质子），根据 Curie 定律，宏观磁化强度可通过式 (1-3) 计算得到：

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

式中 k ——玻尔兹曼常数，其数值为 $1.3806505 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ；

T ——绝对温度，K（开尔文）；

h ——普朗克常量，其数值为 $6.62606896 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ；

I ——核的自旋量子数，无量纲。

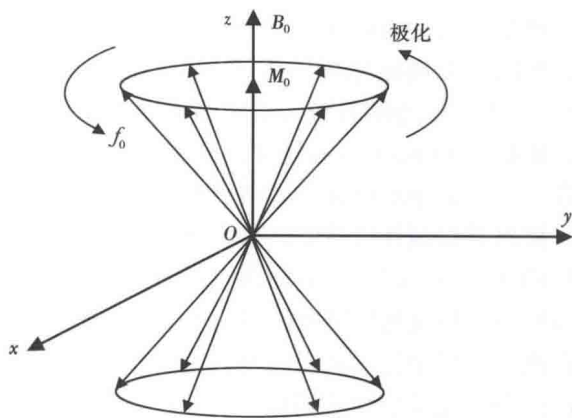


图 1-4 宏观磁化矢量的形成（据肖立志，1998）

由式 (1-3) 可知，宏观磁化矢量 M_0 与质子数量以及外加磁场强度 B_0 成正比，与绝对温度成反比。质子沿静磁场方向排列后，就称它们被极化了。极化并不立即发生，而是随一个时间常数增加而增加（Fukushima 等，1981），这个时间常数被称之为纵向弛豫时间 T_1 ：

$$M_z(t) = M_0 (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (1-4)$$

式中 t ——质子处于静磁场中的时间（极化时间），ms；

$M_z(t)$ ——在时间 t 时 z 轴方向磁化矢量的强度，A/m；

M_0 ——在给定磁场中最终和最大的磁化矢量，A/m。

纵向弛豫时间 T_1 是磁化量达到极大值的 63% 时所需的时间，3 倍于 T_1 的极化时间可以使极化矢量达到最大极化矢量的 95%（图 1-5）。对于不同的流体，例如水、油、气等，其纵向弛豫时间不同。

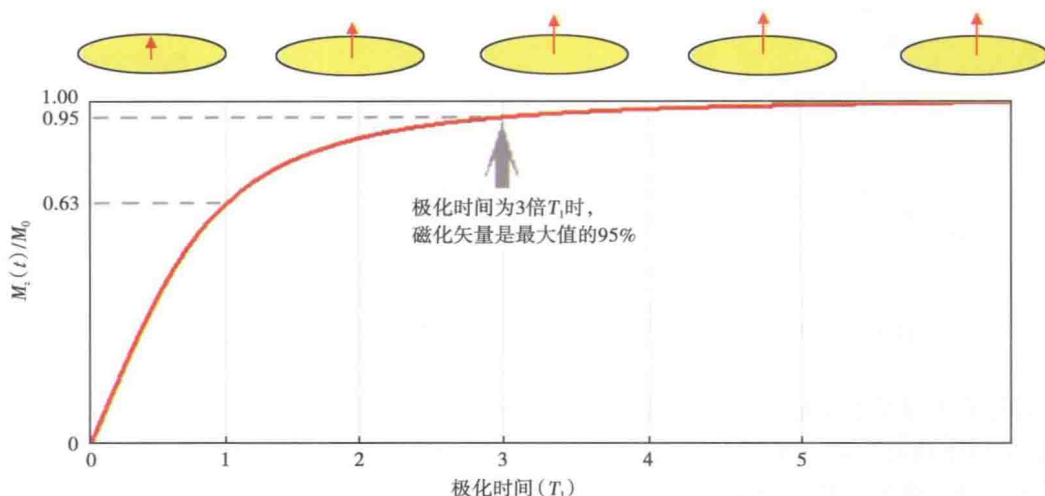


图 1-5 氢核的纵向弛豫过程

从量子力学的角度，一个无外加磁场的自旋系统，高能态和低能态的自旋数目基本相等，所以其宏观磁化矢量为零。但是，如果在 z 方向上施加一个非零磁场（磁场强度为 B_0 ），一些高能态的自旋（核）将向其周围的分子释放能量而转变为低能态。随着时间增长，根据 Boltzmann 分布规律，低能态的自旋核数目逐渐增加，而高能态的自旋核数目逐渐下降。系统的净磁化强度逐渐达到热力学平衡态值 M_0 。

核磁共振测井仪器中的永久磁铁可在井壁附近地层中产生一个均匀或具有一定（径向）梯度的静磁场，以达到对探测空间内的氢核进行极化的目的。一般来讲，地层（孔隙流体）中氢核完全被极化所需要的时间不会超过数秒，只要永久磁铁在井轴方向的长度足够长，以及在测量过程中进行适当的测井速度限制（实现预极化的功能），可以保证对被测介质中氢核的完全极化及后续的测量。

三、共振与弛豫

一旦自旋体系被极化，就处于一种非平衡态，即在外加静磁场方向形成宏观磁化矢量 M_0 。核磁共振检测的第二个步骤是将这个磁化矢量扳转到横向上，即 $x-y$ 平面上。

图 1-6 形象地描述了原子核在外加磁场作用下被扳倒不同角度后形成宏观磁化矢量 M 的过程。如果在 x 轴方向施加一个磁场强度为 B_1 的交变电磁场，且 B_1 的频率等于这个自旋系统的拉莫尔频率，宏观磁化矢量 M 将会偏离 B_0 （ z 轴）方向。现代核磁共振技术中交变电磁场 B_1 常以短脉冲的形式施加，由于该脉冲的工作频率多为射频段，故称之为射频脉冲。

从微观上讲,射频脉冲为自旋系统提供能量,使部分低能态的自旋质子吸收交变电磁场能量而跃迁为高能态。射频脉冲的另一个特性是使自旋系统中的自旋以相同的相位进动。射频场作用于自旋系统发生的核磁矩能级跃迁和自旋同相位进动的必要条件是射频脉冲的频率要与已经极化的自旋系统的拉莫尔频率相等。在这种条件下,自旋系统中才可能发生能量的共振吸收,所以这种过程又称为(核磁)共振。射频场作用期间,自旋系统内的全部核磁矩均绕 B_1 同相位进动,使宏观磁化矢量方向偏转。宏观磁化矢量偏离 z 轴方向的角度取决于射频场作用的时间,亦即被扳倒的角度(以下称扳倒角)。宏观磁化矢量扳倒角可通过式(1-5)计算得到:

$$\theta = \gamma B_1 \tau \quad (1-5)$$

式中 θ ——扳倒角,°;

B_1 ——交变磁场(射频脉冲)强度, A/m;

τ ——交变磁场作用时间, ms。

由式(1-5)可知,扳倒角与 $B_1 \tau$ 成正比,反映了 B_1 提供给质子自旋系统的能量。增加交变磁场强度和增加交变磁场的作用时间都会增加扳倒角。式中,扳倒角与交变场的关系如图1-6所示。

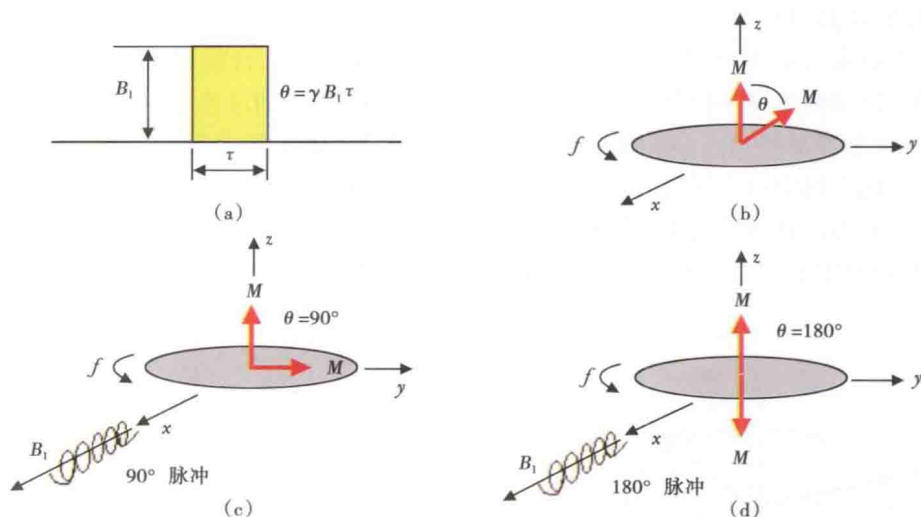


图1-6 扳倒角与交变场的关系(据 Fukushima 等, 1981)

应用于核磁共振测井中的 B_1 是一个脉冲交变磁场。一般用角脉冲形式来表示,例如 π 脉冲(或 180° 脉冲)和 $\pi/2$ 脉冲(90° 脉冲),角脉冲中的角是指宏观磁化矢量 M 被 B_1 所扳倒的角度。

当一个核磁共振仪器对自旋系统施加 90° 脉冲时,核磁矩将产生新的极化作用,导致其在横向平面($x-y$)上发生同相位进动。从宏观意义上说,宏观磁化矢量被扳转了 90° (图1-6c),在横向 $x-y$ 平面上进动。此时,如果撤掉交变电磁场 B_1 ,自旋体系中通过共振吸收处于高能态的核磁矩又将释放能量变成低能态,被扳转到 $x-y$ 平面上的宏观磁化矢量将

逐渐恢复到原始的 B_0 方向，这一过程被称作弛豫。弛豫包括两种能量转换机制。

由 90° 脉冲扳转到 $x-y$ 平面上的宏观磁化强度具有两个分量： $x-y$ 平面分量 M_{xy} 和 z 轴分量 M_z 。弛豫的结果使 M_{xy} 由一个最大值逐渐变为 0，这个过程称为横向弛豫，弛豫速率用 $1/T_2$ 表示，其中， T_2 为横向弛豫时间。横向弛豫的微观机制认为，自旋（核磁矩）与自旋之间的进动相位由于静磁场强度 B_0 的非均质性而改变，即失相，最终导致自旋体系中的核磁矩进动相位无序分布，使得 M_{xy} 数值趋于 0。横向弛豫机制中自旋与晶格（环境）之间没有能量的交换，只是自旋之间进动失相导致的磁化矢量分量衰减，所以这种弛豫又称为自旋—自旋弛豫。

z 轴方向上的磁化矢量分量 M_z 随弛豫的进行，由 0 逐渐向原始磁化矢量 M 恢复，弛豫速率用 $1/T_1$ 表示，这种弛豫过程称作纵向弛豫， T_1 为自旋系统的纵向弛豫时间。纵向弛豫的微观机制解释为，在交变磁场作用期间，通过共振跃迁为高能态的核磁矩通过释放能量变为低能级自旋，并继续在 B_0 作用下进动。高能态自旋释放的能量被晶格吸收，所以纵向弛豫又被叫作自旋—晶格弛豫。

四、失相与自由衰减

失相又称散相，是指被极化的自旋体系由于磁场的非均匀性——即自旋体系中由于磁场强度的微小差异，导致不同的自旋进动频率发生变化。自旋之间的进动频率不一致，使得核磁矩矢量的方向失相，最终导致宏观磁化矢量快速衰减。

如宏观磁化矢量 M 被从 B_0 方向扳转 90° 到 $x-y$ 平面后，自旋即在与 B_0 垂直的平面上开始进动，进动频率等于拉莫尔频率，质子在 $x-y$ 平面的进动过程见图 1-7。

撤掉 90° 射频脉冲后，自旋将会绕静磁场 B_0 进动，由于静磁场强度 B_0 不可能绝对均匀，处于极化空间中的不同自旋会因为 B_0 的差异而具有不同的进动频率，导致各种质子在进动过程中失相，具体的进动和散相过程见图 1-8。若被测空间 A 、 B 两点的磁场强度不同，则 A 点和 B 点的自旋会以不同的频率进动，即失相或散相。

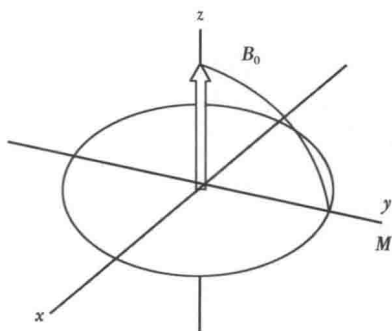


图 1-7 质子在 $x-y$ 平面的进动
(据肖立志, 1998)

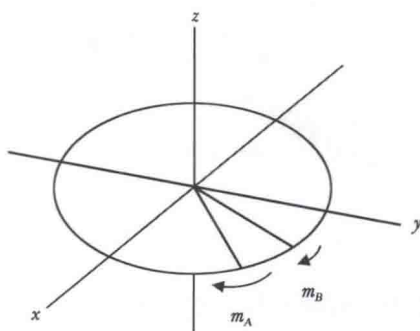


图 1-8 自旋质子在 $x-y$ 平面的进动及失相
(据 Schlumberger, 1995)

失相过程可以形象地类比为运动员在赛道上进行赛跑（图 1-9），施加的 90° 脉冲相当于令所有参加比赛的选手（自旋）处于同一条起跑线上（所有自旋的进动频率一致，形成的宏观磁化矢量最大）。 90° 射频脉冲结束，相当于起跑发令枪响，选手们开始沿跑道奔跑，

由于每个运动员跑步的速度不同（相当于不同的自旋，其进动频率不一致），导致随着时间的推移，运动员慢慢地沿着跑道分散开来（图 1-9a~图 1-9c）。对于自旋体系而言，由于静磁场强度的非均匀性，导致不同的自旋会以不同的频率进动，导致宏观磁化矢量幅度降低。当自旋进动完全失相时，磁化矢量在 M_{xy} 平面上的分量将由于自旋的完全失相而变为 0。

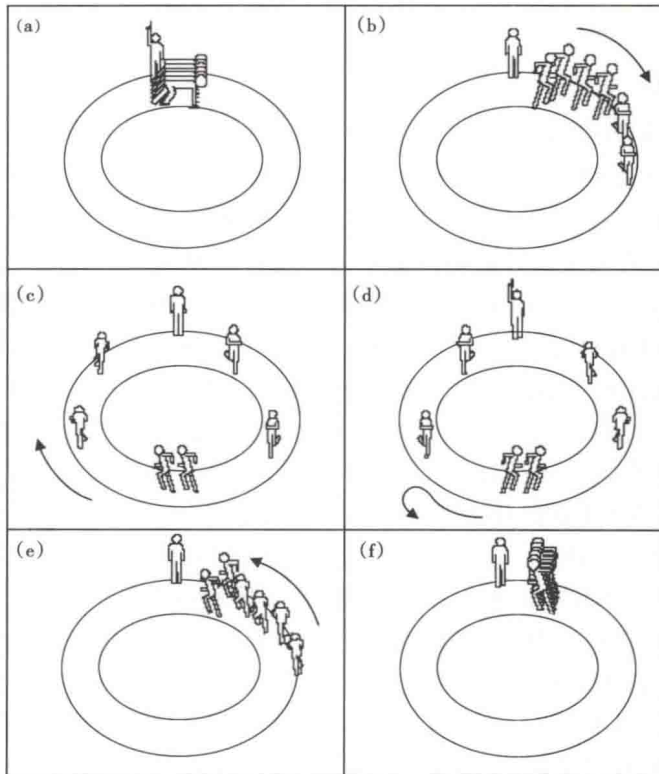


图 1-9 失相和重聚过程可形象地类比为运动员在跑道上比赛

宏观磁化矢量被 90° 脉冲扳倒到 $x-y$ 平面后，横向弛豫分量 M_{xy} 可以通过自由感应衰减 (FID) 方法进行观测（图 1-10）。 M_{xy} 将以有效横向弛豫时间 T_2^* 的速率衰减：

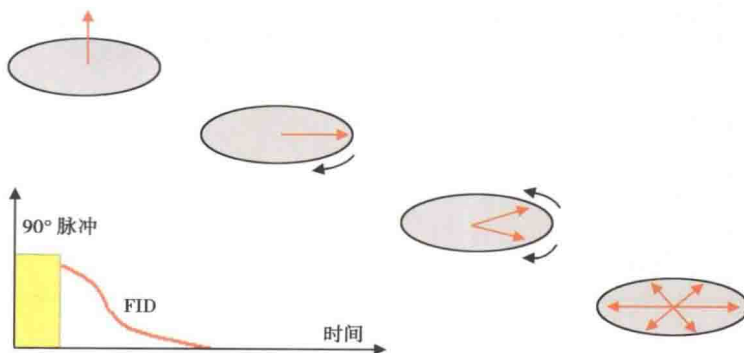


图 1-10 FID 信号的观测