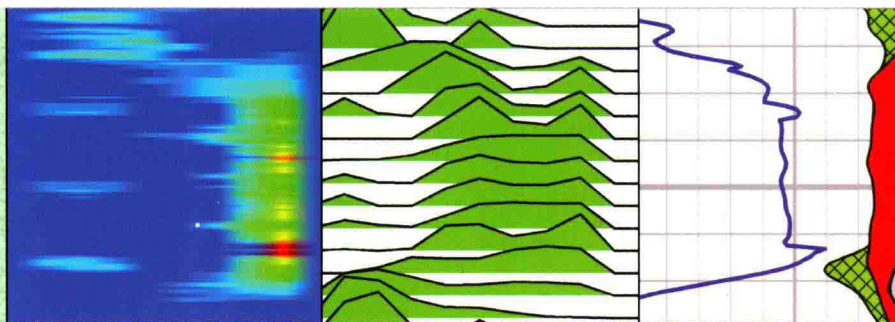


油气藏核磁共振测井 理论与应用

谭茂金 ◎ 著



科学出版社

目 (U1403191)

国家自然科学基金面上项目 (41172130)

国家科技重大专项 (2016ZX05014-001)

中央高校基本业务费项目 (292015209)

联合资助

油气藏核磁共振测井理论与应用

谭茂金 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从油气储层岩石的核磁共振测井机理出发,论述核磁共振测井理论、响应机理和响应特征,系统地建立不同岩性地层的核磁共振测井解释模型和方法,开展多维核磁共振测井理论及其流体识别方法,并介绍岩石孔隙尺度的核磁共振微观特性与响应特征。本书内容完整,体系合理,在介绍新理论、新方法的同时,注重介绍应用效果,并有机融入了近年来的最新科研成果。

本书可供广大测井研究人员、地质勘探人员以及高校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气藏核磁共振测井理论与应用/谭茂金著. —北京:科学出版社,2017.6
ISBN 978-7-03-051941-2

I. ①油… II. ①谭… III. ①油气勘探-核磁测井-研究 IV. ①TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 040415 号

责任编辑:孟美岑 陈姣姣/责任校对:杜子昂

责任印制:肖 兴/封面设计:北京图阅盛世



2017年6月第一版 开本: 720×1000 1/16

2017年6月第一次印刷 印张: 14

字数: 268 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

核磁共振测井是近代物理学核磁共振原理在地球科学中的拓展与应用，该技术测量原理精妙，方法技术优越，应用效果显著，已经成为世界各大油田勘探开发中的一项重要技术。随着应用的深入，现有核磁共振测井技术的局限性也显示出来，特别是火成岩和有机页岩的核磁共振响应受到更多因素的影响，不确定性增加，多维核磁共振探测等技术尚待探索与推广。因此，深化核磁共振测井理论和应用基础研究是非常规油气和复杂油气勘探开发的迫切需求。

核磁共振测井技术在我国规模化应用始于 1996 年。谭茂金博士较早参与了这一工作，并表现出浓厚的兴趣和工作热情，几乎参加了我组织的所有核磁共振测井技术讲座和学术交流活动。他积极思考，勇于探索，对核磁共振技术的理解不断深化，先后承担了胜利油田及其外围探区大部分核磁共振测井解释工作，在不同类型油气藏中积累了丰富的测井实例和实践经验。近几年，他紧跟核磁共振测井技术前沿，密切结合勘探需求和应用难点，凝练核磁共振科学技术问题，先后在国家自然科学基金与国家科技重大专项等项目资助下，对核磁共振探测理论与应用进行了积极有益的探索，取得了多项成果，如低信噪比核磁共振测井数据处理与流体识别，火成岩及页岩核磁共振测井解释模型，多维核磁共振探测技术数值模拟以及孔隙尺度核磁共振响应机理等。

翻阅谭茂金博士的这部新书，可以看出他对测井新技术的孜孜追求，细细读来，发现全书内容丰富，思路清晰。围绕复杂碎屑岩、有机页岩及火成岩的核磁共振测井难点，进行了深入的理论与实验分析，通过优化反演算法，构建合理解释模型，发展了评价方法，见到了应用成效。书中，对新兴的多维核磁共振探测理论和数值模拟方法进行了深入探索，提出了混合反演算法，有利于多维核磁共振测井的推广应用。此外，还从孔隙尺度、岩心尺度和地层尺度，研究并对比分析了核磁共振响应机理与响应特征，丰富了多尺度岩石物理学。全书深入浅出，论述细致，理论阐述和实例分析相得益彰。所以，我很高兴为这部新书作序。

核磁共振技术在化学、物理学、生物学等领域持续快速发展，我相信这些领域的新理论和新方法经过改进可以应用到核磁共振测井中，从而推动地球物理测井技术的进步。希望本书的出版能够助力我国核磁共振测井评价技术的深化应用，也能对后续新思想、新技术的研发产生重要启迪。当然，核磁共振测井理论与应用还任重道远，希望谭茂金教授再接再厉，把现有成果不断深化和升华，使这项地球物理测井技术进一步发扬光大。

教育部“长江学者”特聘教授
中国石油大学（北京）教授



2017年1月16日

前 言

核磁共振(NMR)测井是一种十分重要的地球物理勘探方法,在油气藏勘探开发中发挥着不可替代的作用。目前,核磁共振测井技术在砂岩、碳酸盐岩等沉积岩储层划分、流体识别、孔隙结构研究,以及孔隙度、渗透率计算等方面的应用效果非常显著。应用核磁共振测井技术发现了一些疑难油气藏,具有常规测井技术无法比拟的优越性。近年来,新的二维、三维核磁共振测井得到了长足的发展,将观测结果从单个横向弛豫时间(T_2)扩展到油、气、水的纵向弛豫时间(T_1)、横向弛豫时间(T_2)和扩散系数(D)三个维度参数上,利用油、气、水在(T_2 , D)、(T_1 , T_2)二维平面,甚至(T_1 , T_2 , D)三维空间交会技术,清晰地刻画了不同储层的特征,有效地提高了流体识别的精度,具有广阔的应用前景。页岩油气等非常规油气藏的兴起催生了高分辨率核磁共振测井技术的发展,其响应机理、响应特征和解释方法亟待研究与发展。而且,微纳尺度岩石物理学的兴起,可从微观上剖析孔隙流体的核磁共振微观响应机制,通过与岩心核磁共振实验、储层核磁共振测井对比分析,实现多尺度的核磁共振融合分析和综合解释。

“油气藏核磁共振测井理论与应用”涵盖多维多尺度核磁共振测井理论、响应特征与解释方法,碎屑岩、碳酸盐岩、有机页岩甚至火成岩等多种岩性地层的应用。本书共7章,第1章介绍基本原理,立足核磁共振基本物理现象,结合储层流体的核磁弛豫特性,简述核磁共振测井基本原理。第2章为核磁共振测井数据处理方法,包括回波信号预处理方法和回波信号反演方法。第3章为核磁共振测井解释理论与复杂碎屑岩应用。第4章为有机页岩核磁共振测井理论与应用,包括响应特征,解释模型和实例分析。第5章为火成岩核磁共振影响因素与测井解释方法,包括影响因素分析、校正方法与解释应用。第6章为多维核磁共振测井理论与应用,主要介绍多维核磁共振基本理论、数值模拟、观测参数设计及流体识别,并进行实例分析与应用。第7章为孔隙尺度核磁共振微观响应,介绍孔隙尺度的核磁共振数值模拟理论和微观响应特征。第3~7章为全书的研究重点和亮点。

本书的出版是国家自然科学基金“有机页岩多维多尺度核磁共振探测理论研究”(U1403191)、“页岩气储层测井响应机理与解释模型研究”(41172130)、中国石化“火成岩核磁共振影响因素与测井解释方法研究”以及国家科技重大专项“碳酸盐岩不同缝洞储集体测井解释与井震关系研究”(2016ZX05014-001-007)的主要研究成果。本书还得到了“地下信息探测与仪器”教育部重点实验室的支

持。在本书撰写过程中,得到了中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院的大力支持和恳切鼓励,并提出了很多建设性意见。教育部“长江学者”特聘教授、著名核磁共振专家、中国石油大学(北京)肖立志教授把笔者引入了核磁共振领域的学术殿堂,在中国和美国多次聆听肖老师授课和技术指导,还欣然为本书作序。笔者对核磁共振测井的研究开始于在胜利油田工作期间,笔者在运华云副总工程师、赵文杰教授等专家的指导下,积极探索核磁共振测井资料采集、数据处理以及不同油气藏的测井解释与应用。中国石化胜利石油工程有限公司的张晋言教授、毛克宇高级工程师在火成岩核磁共振测井研究中给予了具体的指导与建议。中国石油勘探开发研究院周灿灿教授、李潮流博士在致密砂岩核磁共振微观响应研究方面提供了重要支持与帮助。中国石化石油勘探开发研究院李军教授在火山岩岩石物理实验方面进行有益的讨论。对上述专家的指导和帮助表示衷心的感谢!

在核磁共振研究和本书撰写过程中,笔者指导的研究生开展了大量的研究工作。研究生邹友龙研究了二维核磁理论算法和数值模拟研究,王鹏开展了三维核磁共振测井理论与应用研究,徐晶晶、邹友龙、王琨先后开展了孔隙尺度的沉积岩重构以及核磁共振微观响应研究,范璐娟、杜欢进行了火成岩核磁共振影响因素研究,宋晓东开展了页岩核磁共振分形孔隙结构与数字岩心流体分布研究,方驭洋开展了页岩岩石物理实验和解释模型研究。本书成果的取得与他们的辛勤努力是分不开的,正是青年学生的孜孜探索,才使得这一研究方向得以传承和延续。此外,吴静、白泽、苏梦宁等研究生参与了部分图件的修改与绘制。对于研究生的勤奋努力和创新工作,在此一并表示感谢!

本书着眼于核磁共振测井理论与解释方法,适合于测井、石油地质研究人员和地质、石油院校师生阅读参考。由于多维核磁共振测井解释方法和核磁共振微观响应机理研究还处于不断发展中,实际应用还有待进一步实践和深化,希望本书的出版能起到“抛砖引玉”的作用。同时,由于笔者水平有限,书中不妥之处恳请读者批评指正!

谭茂金

2017年1月16日

目 录

序

前言

第 1 章	核磁共振测井基本原理	1
1.1	核磁共振基本原理	2
1.1.1	原子进动理论	2
1.1.2	自由衰减信号探测	2
1.2	核磁共振弛豫机理	3
1.2.1	表面弛豫	4
1.2.2	扩散弛豫	4
1.2.3	流体弛豫	5
1.3	核磁共振谱方程	6
1.4	核磁共振成像测井	8
1.4.1	核磁共振测井基本原理	8
1.4.2	核磁共振测井观测方式与采集成果	9
第 2 章	核磁共振测井数据处理方法	15
2.1	回波信号预处理方法	15
2.1.1	回波信号合成	15
2.1.2	回波信号滤波	16
2.2	回波信号反演方法	19
2.2.1	基本原理与多指数拟合	19
2.2.2	反演方法	21
2.2.3	处理流程	25
2.3	实例分析	26
第 3 章	核磁共振测井解释理论与复杂碎屑岩应用	30
3.1	核磁共振测井解释方法	30

3.1.1	孔隙度计算	30
3.1.2	束缚水体积计算	31
3.1.3	渗透率计算	32
3.1.4	饱和度评价	34
3.2	核磁共振测井流体识别方法	35
3.2.1	时间域分析	35
3.2.2	扩散分析	39
3.2.3	结合常规测井参数计算	41
3.3	核磁共振测井解释实例与分析	42
3.3.1	储层识别与划分	42
3.3.2	储层空间类型划分	45
3.3.3	孔隙结构研究	47
3.3.4	核磁共振测井流体识别	49
第4章	有机页岩核磁共振测井理论与应用	56
4.1	页岩核磁共振响应特征	56
4.1.1	核磁共振数值模拟与响应特征	57
4.1.2	核磁共振实验与响应特征	61
4.2	核磁共振解释模型和测井解释方法	63
4.2.1	影响因素分析	63
4.2.2	核磁共振测井解释模型	65
4.2.3	实例分析	71
4.3	有机页岩的分形维研究	75
4.3.1	页岩储层的分形维研究	75
4.3.2	分形维数的确定	76
4.3.3	分形维对页岩孔隙结构的表征	77
第5章	火成岩核磁共振影响因素与测井解释方法	81
5.1	国内外研究进展	81
5.2	火成岩核磁共振影响因素实验分析	83
5.2.1	火成岩岩石物理实验	83
5.2.2	火成岩核磁共振影响因素分析	90
5.3	火成岩核磁共振理论分析	97
5.3.1	核磁共振弛豫理论	97

5.3.2	核磁共振数值模拟及其分析	100
5.4	火成岩核磁共振校正与数据处理方法	107
5.4.1	核磁共振测井校正方法	108
5.4.2	实例分析与检验	112
5.5	火成岩核磁共振测井解释方法	117
5.5.1	火成岩 NMR 渗透率计算	117
5.5.2	火成岩饱和度评价	118
5.5.3	核磁共振测井解释实例	120
第 6 章	多维核磁共振测井理论与应用	123
6.1	二维核磁共振测井理论	123
6.1.1	二维核磁共振基本原理	124
6.1.2	混合反演算法与算例	125
6.1.3	采集参数设计	131
6.1.4	信噪比的影响	137
6.2	三维核磁共振测井与响应特征	139
6.2.1	三维核磁共振反演方法	139
6.2.2	反演效果对比与分析	142
6.3	三维核磁共振解释方法	150
6.3.1	采集参数优化	150
6.3.2	流体定量解释与评价方法	157
6.4	多维核磁共振测井技术及其应用	159
6.4.1	MRScanner 测井技术概述	159
6.4.2	储层参数评价方法	161
6.4.3	核磁共振采集模式及实例分析	163
第 7 章	孔隙尺度核磁共振微观响应	176
7.1	孔隙尺度核磁共振数值模拟	176
7.1.1	NMR 弛豫机理	177
7.1.2	随机行走法模拟方法	177
7.1.3	沉积岩孔隙尺度核磁共振微观响应	179
7.2	实际砂岩孔隙尺度核磁共振响应	182
7.2.1	Berea 砂岩核磁共振响应	182
7.2.2	致密砂岩核磁共振响应	184

7.3	数字岩心流体模型构建与核磁共振微观响应	187
7.3.1	数字岩心流体模型构建	187
7.3.2	数字岩心微观核磁共振响应	190
7.3.3	两相流体数字岩心核磁共振微观响应	194
7.4	实际页岩孔隙尺度核磁共振数值模拟与微观响应	196
7.4.1	页岩数字岩心构建与特征	196
7.4.2	核磁共振数值模拟与微观响应	197
参考文献		200

第 1 章 核磁共振测井基本原理

自 1946 年发现核磁共振 (NMR) 现象以来,核磁共振已经在物理学、化学、生物学及医学领域得到了广泛应用,并在石油工业和地球科学研究中也得到了发展。1952 年,Varian 发明了 NMR 磁力计,用于测量地磁场的强度,不久后,Varian 提出磁力计技术可以用于油井测量,由此开始了 NMR 测井的长期探索。1956 年,Brown 和 Fatt 在雪佛龙 (Chevron) 研究室发现,当流体处于微小空间,如岩石孔隙中,其 NMR 弛豫时间与自由状态相比会显著减小。进一步的实验与理论研究表明,弛豫时间与孔径大小有关,小孔隙具有比较短的弛豫时间。1960 年,Brown 和 Gamson 在 Chevron 研究室研制了利用地磁场的 NMR 测井样机。1979 年,由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) Jasper Jackson 提出使用永久磁铁和脉冲射频场的 NMR 测井仪器设计原理,奠定了 NMR 测井商业化应用的基础。1985 年,以色列威兹曼科学院的两位科学家 Zvi Taicher 和 Schmuel Shtrikman 发明了梯度场条件下核磁共振成像测井仪 (MRIL),并于 1990 年由哈里伯顿 (Halliburton) 公司正式为油田公司提供商业化服务,为复杂储层评价提供了一项有效技术。斯伦贝谢 (Schlumberger) 公司于 1991 年发明组合式核磁共振测井仪 (CMR),1995 年商业化应用后大大加快了 NMR 测井的推广使用。1993 年,肖立志等提出魔角旋转 NMR 岩心分析技术,能够对岩心样品中的原油成分进行精细分析。1996 年,Akkurt 和 Vinegar 等提出 NMR 识别油气的方法,使 NMR 测井应用从孔隙度、束缚水和渗透率计算延伸到油气饱和度评价,NMR 技术开创了储层油气评价和岩心分析工作的新纪元。

20 多年来,各大油田服务公司陆续推出新的电缆核磁共振测井仪器和随钻核磁共振测井仪器。目前国际上三大测井服务公司 (哈里伯顿、斯伦贝谢、贝克休斯) 都已经能够承担核磁共振测井服务。近年来,中国石油集团测井有限公司、中国海洋石油总公司都相继开发了成熟配套的核磁共振测井仪 (MRT 或 EMRT) 和相应采集技术,同时与此配套的核磁共振岩心分析实验仪器也得到了长足发展和应用。

1.1 核磁共振基本原理

1.1.1 原子进动理论

核磁共振是一种物理现象,即原子核对磁场所作出的一种响应。很多原子核都具有磁矩,其特性就像旋转的磁棒一样。核磁共振技术的基础是原子核的磁性及其与外加磁场的相互作用,要解释这种作用,首先要了解原子核的自旋特性。原子核由带电的质子和不带电的中子组成,而含奇数个核子或总原子序数为奇数的原子核都会不停的旋转,都具有内禀角动量,这时就会产生自旋磁场(肖立志, 1998; Coates *et al.*, 1999; 邓克俊, 2010),即

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

式中, μ 为磁矩; P 为自旋角动量; λ 为原子的特征系数,称为旋磁比。

当没有外加磁场时,单个核磁矩随机取向,宏观上系统没有磁性显示。但是当核磁矩处于外加静磁场中,受力矩的作用,从而绕外加磁场方向进动,进动频率由 Larmor 方程确定:

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

式中, ω_0 为进动频率; B_0 为外加磁场强度。

在外加磁场的作用下,整个自旋系统被磁化,核磁矩与外磁场方向一致,宏观上产生一个净磁化矢量 M_0 。此时宏观磁化量与外加磁场的方向相同,整个系统处于平衡状态。

1.1.2 自由衰减信号探测

为了检测原子核的进动信号,利用频率为 ω_0 的射频脉冲将宏观磁化矢量相对静磁场 B_0 方向扳转 90° ,射频磁场结束后,原子核继续受静磁场 B_0 的作用并绕之进动。若在与 B_0 垂直的平面上(即为 xoy 平面)布置检测线圈,就可以观测到磁化矢量 M_0 在 xoy 面上的分量,这种信号是随进动衰减的,称为自由感应衰减(FID)信号,如图 1-1 所示。根据 Bloch 给出的旋转坐标对各分量磁化矢量的描述(Dunn *et al.*, 2002),它们之间有如下关系:

$$M_x = M_y = M_0 \exp(-t / T_2) \quad (1-3)$$

$$M_z = M_0 [1 - \exp(-t / T_1)] \quad (1-4)$$

式中, M_x 和 M_y 为 M_0 在 xoy 平面上的横向分量; M_z 为与 xy 平面垂直的 z 方向上的纵向分量; 整个衰减特性用时间 T_2 和 T_1 表示, 分别称为横向弛豫时间和纵向弛豫时间。

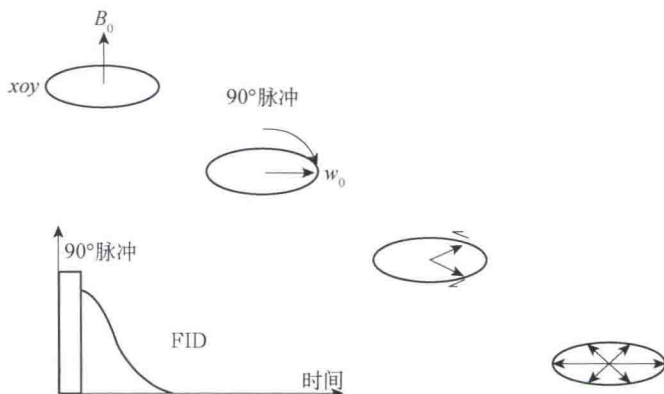


图 1-1 自由感应衰减 (FID) 信号的检测

为了提高接收信号的信噪比, 采集时, 每间隔 τ 的 180° 射频脉冲来采集一系列自由感应衰减信号, 称为 CPMG 脉冲序列 (图 1-2), 得到一系列 CPMG 自旋回波串。核磁共振测井仪器测量到这些回波, 并记录下来, 组成核磁共振测井的原始数据。

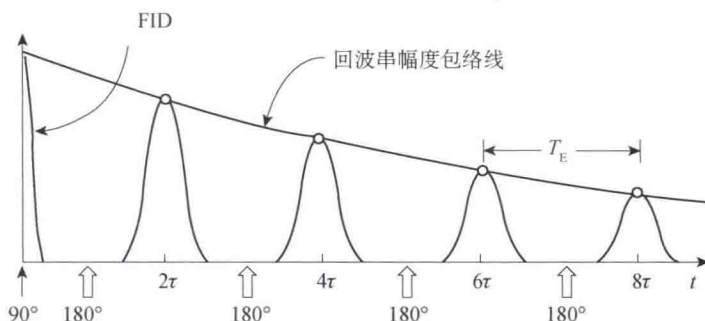


图 1-2 CPMG 脉冲序列

1.2 核磁共振弛豫机理

理解饱和流体岩石的 NMR 弛豫机理对于地层的 NMR 测井评价是至关重要的。要想得到岩石物理信息, 如孔隙度、孔隙大小分布、束缚流体体积、可动流体体积以及由上述参数计算渗透率等都离不开 NMR 弛豫机理。

横向弛豫时间 (T_2) 和纵向弛豫时间 (T_1) 均是氢质子在磁场中的相互作用引起的物理量。弛豫速率用 $1/T_1$ 或 $1/T_2$ 表示。

核磁共振弛豫机理有三种, 分别为颗粒表面弛豫、体积流体进动引起的弛豫和梯度场中分子扩散引起的弛豫。相应地, 弛豫时间也由这三部分组成, 对横向弛豫来说:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2D}} \quad (1-5)$$

式中, T_{2S} 为颗粒表面横向弛豫时间; T_{2B} 为体积流体横向弛豫时间; T_{2D} 为扩散横向弛豫时间。其中, 颗粒表面横向弛豫时间和体积流体横向弛豫时间统称为孔隙度流体的固有横向弛豫时间 (T_{2int})。

1.2.1 表面弛豫

颗粒表面弛豫时间的影响因素主要有颗粒表面弛豫率和孔隙结构:

$$\frac{1}{T_{2S}} = \rho_2 \frac{S}{V} \quad (1-6)$$

式中, ρ_2 为孔隙横向表面弛豫率; S/V 为孔隙的比表面积, S 为孔隙的面积, V 为孔隙的体积。

孔隙横向表面弛豫率反映质子的横向弛豫能力, 主要由孔隙周围的矿物控制, 碎屑岩的表面弛豫率比碳酸岩的大, 说明波在碎屑岩中衰减得快, 在碳酸岩中衰减得慢。铁磁矿物 (如绿泥土和赤铁矿等) 有较高的磁敏感性, 会大大加速 T_2 的衰减。

孔隙大小在表面弛豫过程中也起着重要作用。弛豫的速率取决于质子同表面碰撞的几率, 而这取决于表面面积与体积之比 S/V 。在大孔隙中 (小 S/V 值), 质子碰撞机会较少, 则弛豫时间较长; 相反, 小孔隙具有较大的 S/V 值, 弛豫时间较短。

1.2.2 扩散弛豫

在梯度磁场中, 分子会出现扩散弛豫, 并且 T_2 值会随回波间隔 T_E 的变化而变化, 即

$$\frac{1}{T_{2D}} = \frac{CD_a(G\gamma T_E)^2}{12} \quad (1-7)$$

式中, G 为磁场梯度值, $\text{Gs}^{①}/\text{cm}$; γ 为氢质子的旋磁比; T_E 为回波间隔, ms ; D_a 为孔隙流体的视扩散系数, cm^2/s ; C 为与磁场中受限扩散和自旋回波有关的常数,

① $1\text{Gs}=10^{-4}\text{T}$ 。

对 MRIL, $C=1.08$, 有时该系数可忽略。

存在磁场梯度时, 在地层岩石中会产生分子扩散, 导致横向弛豫速率加快, 对纵向弛豫速率没有影响 (Grunewald and Knight, 2009; Xie *et al.*, 2008; 邓克俊, 2010)。地层岩石中的磁场梯度主要有两个来源, 一个是仪器测量时的外加磁场, 另一个是岩石骨架颗粒与孔隙流体之间的磁化率差异引起的内部磁场。当施加外部磁场时, 颗粒与孔隙流体分界面上产生的磁场梯度大小为

$$G_{in} = B_0 \frac{\Delta\chi}{r} \quad (1-8)$$

式中, G_{in} 为内部磁场梯度, Gs/cm; B_0 为外加磁场强度; $\Delta\chi$ 为骨架颗粒与孔隙流体之间的磁化率差异; r 为孔隙半径。当 r 很小时, 可能内部磁场梯度很大。通常砂岩骨架颗粒呈顺磁性, 油、水呈弱逆磁性。

可以看出, 在梯度场中, 分子的扩散能够加快回波串的衰减速度, 使弛豫时间变短, 因此核磁共振中引入扩散系数 D 来表征流体分子的弛豫特性。油、气、水都是能够扩散的流体, 尤其是天然气, 其在 CPMG 观测中均会受到扩散弛豫的影响。

1.2.3 流体弛豫

自由流体为不受空间限制的理想状态流体, 其核磁共振特性反映流体本身的弛豫特性, 也称为流体的自由弛豫或体弛豫, 主要是邻近核自旋随机运动所产生的局部磁场涨落的结果。水的自由弛豫只与温度有关, 且 $T_2=T_1$; 油的自由弛豫与油的成分、黏度 η 及温度有关, 对于原油来说, 其弛豫时间是多个被展宽的时间分布; 天然气仅 T_1 有自由弛豫, T_2 比 T_1 小很多。

当不存在颗粒表面弛豫和内部磁场梯度时, 体积流体内部会发生弛豫, 水的体弛豫通常可以忽略不计。当存在油气时, 因为非润湿相流体不与孔隙表面接触, 所以不可能发生表面弛豫。同样, 流体黏度增加会缩短流体弛豫时间。因此, 尽管 NMR 孔隙度与矿物无关, 但 NMR 衰减的轮廓受孔隙中矿物类型、孔隙几何形态及孔隙中的流体黏度和扩散系数的影响。

地层中常见的流体有束缚水、自由水、轻质油、天然气等孔隙流体类型, 表 1-1 给出了纵向弛豫时间 T_1 、横向弛豫时间 T_2 及扩散系数 D 的分布范围。

表 1-1 油、气、水核磁共振特性

流体类型	T_1/ms	T_2/ms	T_1/T_2 (典型)	HI	$\eta/(\text{mPa} \cdot \text{s})$	$D/(\text{cm}^2/\text{s})$
水	1~500	1~500	1~2	1	0.2~0.8	1.8~7
油	3000~4000	300~1000	1~4	1	0.2~1000	0.0015~7.6
气	4000~5000	30~60	80	0.2~0.4	0.011~0.014 (甲烷)	80~100

资料来源: Coates *et al.*, 1999

岩石孔隙中的流体与自由流体的核磁共振弛豫特性有很大差别,当孔隙饱和流体时,其核磁共振弛豫要比自由状态时的弛豫快很多,这是因为孔隙流体除具有自由弛豫和扩散弛豫特征以外,还具有固液界面引起的表面弛豫特征,加快了弛豫速率。

1.3 核磁共振谱方程

通常情况下,核磁共振观测根据外加磁场作用下的核磁弛豫特性来反映地层流体性质,计算孔隙度和计算地层中组分流体体积。一维核磁共振观测到的自旋回波,实际上是多种横向弛豫分量共同作用的结果,可以用一个多指数函数表示,该方程为第一类 Fredholm 方程 (Provencher, 1982; Wang *et al.*, 2001, 2004; Thamman and Pereverzev, 2007; Tan *et al.*, 2013a, 2013b)。

$$b(t) = \int K_2(t, T_2) \cdot f(T_2) dT_2 + \varepsilon \quad (1-9)$$

当地层中含有两种以上流体时,如不同黏度的流体与水信号在 T_2 分布上会交叠在一起,为了提高流体识别的精度,还需要考察流体的纵向弛豫时间和流体的扩散系数。如果核磁共振观测能够同时采集多个等待时间 T_w 或多个回波间隔 T_E 下的回波串数据,组合不同参数采集的回波串,增强各个弛豫分量在回波信息中的独立性,就能够反演出流体纵向弛豫时间 T_1 、横向弛豫时间 T_2 和扩散系数 D 的分布,这就是二维核磁共振。二维核磁共振测井利用波谱学中二维的概念,通过设计多参数的采集数据方法,发展了识别储层流体的两种二维核磁共振: (T_2, T_1) 和 (T_2, D) 。

当选择测量等待时间 T_w 足够长,反映流体极化项的纵向弛豫时间 T_1 可以忽略, $f(T_2, D)$ 就能够反映流体横向弛豫时间 T_2 和扩散系数 D 的二维空间分布,其谱方程为

$$b(t, T_E) = \iint f(T_2, D) K_2(t, T_2) K_3(t, T_E, D) dD dT_2 + \varepsilon \quad (1-10)$$

当无梯度磁场测量时,采用较小的回波间隔 T_E 梯度场条件下,流体的弛豫特征方程可以写为纵向弛豫时间 T_1 和扩散系数 D 的二维空间分布形式,其谱方程为

$$b(t, T_w) = \iint f(T_2, T_1) K_1(T_w, T_1) K_3(t, T_2, D) dT_2 dT_1 + \varepsilon \quad (1-11)$$

处于梯度磁场中的饱和流体岩石,改变 CPMG 脉冲序列的回波间隔 T_E ,并且给定有限的测量等待时间 T_w ,结合式 (1-10)、式 (1-11) 弛豫模式,测量到的 CPMG 回波串的幅度可以表示为