

岩样 核磁共振分析及复杂储层 综合评价

施振飞 陆风才 编著



中国石化出版社
[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

岩样核磁共振分析及复杂储层 综合评价

施振飞 陆风才 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书以核磁共振测量分析理论为基础,介绍了岩样核磁共振仪器的解释原理及综合应用技术,同时对江苏油田的低阻油层、低孔低渗储层的测录井评价技术进行了详细的阐述,对碳酸盐岩岩心核磁共振 T_2 谱特征进行了规律性的分析。本书适合于现场从事油气勘探工作的测井、地质、油藏工作者阅读,也可作为大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩样核磁共振分析及复杂储层综合评价/施振飞,陆风才编著.
—北京:中国石化出版社,2015.10
ISBN 978-7-5114-3489-0

I. ①岩… II. ①施…②陆… III. ①核磁共振-应用-岩样-分析-研究②油气聚集-复杂地层-储集层-评价 IV. ①P584②P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 244121 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 292 千字

2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

定价:56.00 元

前 言

随着我国油气勘探开发技术的不断进步和勘探开发领域的迅速拓展,复杂储层所占的比例越来越大。近年来,岩样核磁共振分析及测录井综合评价技术也越来越受到广泛重视,并得到快速发展。

岩样核磁共振分析技术具有分析样品类型广、样品用量少、分析成本低、样品无损坏、分析速度快、一样多参数、准确性高、连续性强、可随钻分析等诸多特点。从目前来看,核磁共振分析技术是目前唯一能在钻井现场快速、准确评价储层物性、孔隙结构及流体可能性的一项录井新技术。它打破了录井长期不能定量、快速评价储层物性的局面,突破了录井不能评价流体分布状态的瓶颈,促进了综合解释水平的快速提高,在石油勘探、开发过程中发挥了重要作用。

测录井综合评价,是依据测井、录井及其他相关资料,分析钻孔地层的岩性、电性、物性和含油气性特征,进而对储层产流体性质做出评价。该项技术具有五项核心内容:目标层确定、储层物性评价、流体性质评价、含油气丰度评价和流体可动性评价。测录井综合评价结论是发现油气层、指导下一步施工措施制定、进行油气藏评价、确定开发层系、编制开发方案的重要依据。

为了推动和促进岩样核磁共振分析及测录井综合评价技术的发展,本书作者从核磁共振录井理论基础和岩样核磁共振录井解释原理入手,结合江苏油田主要地质特征、储层特征,结合实例深入浅出地对岩样核磁共振技术及与测井技术相结合对低阻、低孔低渗储层进行综合评价的理论、方法、成果进行了集中阐述。同时,对碳酸盐岩储层核磁共振测录井评价方法的应用进行了总结。

该书内容丰富,资料翔实,观点鲜明,论据充分,较系统全面地介绍了核磁共振分析技术的理论、方法。它的出版将为从事测录井相关工作的工程技术人员提供一个重要的参考信息,并对运用岩样核磁共振分析及测录井综合评价技术指导油气勘探开发具有重要的指导意义。

参加本书编写的主要人员:施振飞、陆风才、尹军强、柯涛、朱曰荣、朱

巨义、马向东、温新房、张传华、蔡晓明。全书由陆风才统稿。

该书在编写过程中得到了江苏油田科技处原副处长徐守礼、江苏石油工程有限公司装备处副处长张敏，江苏石油工程有限公司地质测井处领导以及科委办公室的大力帮助与支持，在此表示衷心地感谢。

限于作者的水平，书中不妥之处恳请专家与读者批评指正。

如有对书中内容进行深入探讨、研究、咨询、服务的读者，请与编者联系，
邮箱地址：2592099485@qq.com。

目 录

第一章 核磁共振测量分析理论基础	(1)
1.1 核磁共振国内外应用发展概况	(1)
1.2 核磁共振测量的物理基础	(2)
1.3 物质的弛豫方式	(3)
1.4 水、油、气的弛豫特征	(5)
1.5 横向弛豫 T_2 的基本测量方法	(6)
1.6 核磁共振测井提供的基本信息	(8)
1.7 流体性质识别的物理基础	(9)
第二章 岩样核磁共振仪器解释原理	(14)
2.1 岩样核磁共振实验仪器	(14)
2.2 岩样核磁共振录井解释原理	(15)
第三章 岩样核磁共振技术的综合应用	(34)
3.1 江苏油田主要地质特征	(34)
3.2 江苏油田主要储层特征	(37)
3.3 岩样核磁共振录井技术应用实例	(49)
3.4 核磁共振测井与录井结合应用实例	(51)
3.5 江苏某地区地质综合应用	(54)
第四章 低阻油层成因机理及测录井评价方法	(60)
4.1 低阻油层成因机理分析	(60)
4.2 苏北盆地低阻油层的分类	(61)
4.3 低阻油层测井评价方法	(78)
4.4 低阻油层录井评价方法	(101)
4.5 测录井新技术在低阻油层评价中的应用	(107)
第五章 低孔低渗储层成因机理及测录井评价方法	(112)
5.1 低孔低渗储层成因机理研究	(112)
5.2 低孔低渗储层成因类型	(120)
5.3 低孔低渗储层测井评价方法	(120)
5.4 低孔低渗储层录井评价方法	(133)

5.5	测录井新技术在低孔低渗储层测录井评价中的应用	(138)
5.6	低孔低渗储层的分布研究	(145)
5.7	江苏油田重点攻关区块低孔低渗储层测井评价	(149)
5.8	小 结	(165)
第六章	碳酸盐岩核磁共振测录井评价方法	(167)
6.1	碳酸盐岩储层的基本类型和面临的技术难题	(167)
6.2	核磁共振成像测井储层参数求取模型研究	(169)
6.3	岩心核磁共振 T_2 谱实验结果分析	(173)
6.4	核磁共振测井的应用	(183)
参 考 文 献		(194)

第一章 核磁共振测量分析理论基础

1.1 核磁共振国内外应用发展概况

核磁共振(NMR)作为一种物理现象是1946年由哈佛大学的Purcell和斯坦福大学的Bloch两人各自独立地发现的。1956年,Brown和Fatt研究发现,当流体处于岩石孔隙中时,其核磁共振弛豫时间与自由状态相比显著减小。为了寻找引起这一现象的原因,前人进行了大量的实验和理论研究,发现流体的核磁共振弛豫时间与其所处环境的孔隙大小有关。1961年,Brown对原油的核磁共振弛豫特征进行了研究。1966年,Seevers观测到核磁共振弛豫时间与岩样渗透率具有相关性。1968~1969年,Timur提出自由流体指数概念以及用核磁共振技术测量砂岩孔隙度、渗透率和自由流体指数等参数的方法。1979年,Brownstein和Tarr提出了岩石多孔介质的核磁共振弛豫理论。

核磁共振石油工业应用获得巨大发展的标志是1990年美国NUMAR公司的MRIL-B型核磁共振成像测井仪器投入商业服务。大量现场应用要求室内基础实验研究工作与之相适应,因此,国外许多学者在室内研究与现场应用结合方面陆续开展了大量研究工作。R. L. Kleinberg等对油藏流体的核磁共振弛豫特征包括含氢指数(HI)、弛豫时间(T_1 、 T_2)以及扩散系数(D)等进行了研究,另外还对油藏岩石的 T_1 弛豫时间和 T_2 弛豫时间之间的相互关系以及各自的应用进行了分析讨论。D. Marschall等对从核磁共振测井数据中获取地层孔隙分布和毛管压力曲线问题进行了研究。S. Chen等给出了从核磁共振测井数据中计算可动流体百分数的新方法。Stefan Menger和Manfred Prammer将核磁共振测井获得的地层孔隙度与常规测井孔隙度及岩心分析孔隙度进行了比较,认为核磁共振测井不但可以获得地层有效孔隙度而且还可以获得地层总孔隙度。M. B. Crowe和John P. Korkowitz等对核磁共振测井油、水分辨问题进行了研究,认为向地层内注入弛豫试剂可以有效缩短水相的弛豫时间,从而可实现地层油、水信号分辨。R. Akkurt等给出了核磁共振测井最佳参数选择方法,另外还对扩散弛豫作用进行了研究,认为在核磁共振测井中有效利用扩散作用可测定地层油相饱和度。总而言之,国外将核磁共振技术应用于石油工业方面在九十年代后形成了一个高潮。主要的石油技术测井服务公司均研制和使用商用核磁共振测井仪,并已发展到第四代产品。如斯伦贝谢(Schlumberger)公司推出的CMR测井仪、TCMR测井仪、CMR200测井仪以及1998年推出的第四代核磁共振测井仪CMR-Plus;阿特拉斯(Atlas)公司则先后推出了MRIL-A/B、MRIL-C和MRIL-C/TP测井仪;哈里伯顿(Halliburton)公司也于98年推出了第四代核磁共振测井仪MRIL-Prime,并投入商业服务。最新一代核磁共振测井仪测速和测量精度均大大提高,一次测井可得到油藏评价所需要的大多数信息,因而更加适合于现场测井和应用。在世界范围内,核磁共振测井的应用规模也在不断扩大,据报道,全世界每年进行核磁共振测井约3000口。

原石油天然气集团公司中国科学院渗流力学研究所于1991年成功地引进了国内第一台

具有世界先进水平的超导核磁共振成像仪,开展了大量的石油岩心分析和石油渗流力学方面的研究工作。渗流所于1996年研制出一套具有国际领先水平的低磁场(共振频率2MHz和5MHz)核磁共振全直径岩心分析系统,开发出了多种适合岩心分析的脉冲序列及多弛豫反演技术,实现了孔隙度、渗透率、自由流体孔隙度等岩石参数的快速无损检测,该系统根据我国岩心岩性复杂,均匀性差等特点,在国际上率先实现全直径岩心的低磁场核磁共振检测。

现代核磁共振技术应用于石油地质分析是20世纪90年代世界石油工业重大技术进步之一,特别是核磁共振录井技术近几年在石油储层评价方面发展较快,它利用核磁响应原理测得岩石的孔、渗、含油饱和度、可动水饱和度、束缚水饱和度等参数,对储层进行评价。实现了储层物性分析从室内向现场的迁移,将分析对象从岩心拓展到岩屑和井壁取心,同时用量少、速度快、成本低、岩样无损、多参数、准确性高、可随钻分析等,具有常规岩心分析和测井不可完全替代的优点。其分析结果与测、录井资料结合,可及时有效地对储集层进行精确评价,为油田界限层试油提供资料和数据。2005年江苏油田引进中科院廊坊渗流力学研究所 Recore-2500 型便携式核磁共振岩样分析仪以来,核磁实验室在前期基础性、参数可靠性对比实验研究方面做了大量的细致工作。这些工作包括:碎屑岩、碳酸盐岩对应的仪器参数选取;样品的处理程序标准化; T_2 截止值的分布;储层的孔隙结构评价;物性分类以及储层性质的评价方面进行研究对比工作,同时结合大量的试油资料进行对比研究,总结和创新出一批成果,在油田勘探领域取得了很好的运用效果。

1.2 核磁共振测量的物理基础

核磁共振测量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(图1-1)。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。

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:

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

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

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

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,

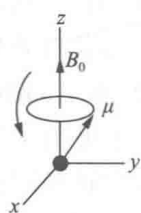


图1-1 单个核在外加磁场中的进动特性

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。恢复到平衡状态的过程叫弛豫。

若 B_0 的方向为 z 方向, 射频脉冲作用期间, 宏观的磁化矢量 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。

1.3 物质的弛豫方式

岩石由矿物骨架和孔隙流体组成。实验观测表明, 流体饱和在岩石孔隙中时其核磁共振弛豫比自由状态快得多($10 \sim 10^4$ 倍)。原因在于, 孔隙流体除了自由弛豫和扩散弛豫外, 还受到一种新的机制(即表面弛豫)的作用, 使弛豫速率大大加快。孔隙流体的纵向弛豫过程受自由弛豫和表面弛豫两种机制控制, 横向弛豫过程则受到自由弛豫、表面弛豫和扩散弛豫三种机制的作用。分子扩散使各种弛豫机制相结合, 弛豫速率加快。在满足扩散的条件下, 总的弛豫速率是单个弛豫机制引起的弛豫速率的和, 单个孔隙仍然表现出单指数弛豫规律。

1.3.1 表面弛豫

湿润的岩石颗粒表面, NMR 实验期间, 扩散将使分子有足够的机会与颗粒表面碰撞。分子碰撞颗粒表面时, 会把核自的能量传递给表面, 使质子自沿 B_0 重新取向, 由此引起纵向弛豫。同时, 自被不可逆的失相, 引起横向弛豫的加速。

岩石颗粒表面的顺磁离子, 如铁、锰、铬、镍等, 具有特别强的弛豫能力, 只要它们存在, 就会形成顺磁中心, 对表面流体的 NMR 弛豫起控制作用。通常, 砂岩含有 1% 左右的铁, 使其孔隙流体弛豫效率大为提高, 超过碳酸盐岩。

岩石颗粒表面能力的定量表征称作“表面弛豫强度”, 用符号 ρ_1 (对纵向弛豫 T_1) 和 ρ_2 (对横向弛豫 T_2) 表示。如果只有较少的表面积来弛豫流体大量自旋, 弛豫速率就会相对地慢, 因此, 表面弛豫速率是表面弛豫强度与孔隙比表面的乘积。

$$\frac{1}{T_{1s}} = \rho_1 \frac{S}{V} \quad (1-4)$$

$$\frac{1}{T_{2s}} = \rho_2 \frac{S}{V} \quad (1-5)$$

“表面弛豫强度” ρ 的值可以通过孔隙图像分析、脉冲场梯度核磁共振、压汞毛管压力曲线等方法确定, 其数值与岩石颗粒表面及胶结物的性质有关, 但不受温度及压力的影响。

1.3.2 扩散机制

对横向弛豫过程观测有显著影响的扩散弛豫是由磁场梯度中分子扩散引起的。对岩石孔隙中的流体扩散机制的认识, 取决于对岩石孔隙磁场梯度及流体分子扩散特点的了解。核磁共振测井时, 地层岩石中的磁场梯度有两个来源, 一个是测井仪器建立的, 例如: NUMAR 的 C 型 MRIL 在观测区域产生约 1.7 t/cm 的均匀梯度; 另一个来源是岩石骨架颗粒与孔隙流体之间磁化率差异引起的内部背景梯度磁场。例如, 岩石骨架颗粒通常呈顺磁

性,油与水呈弱逆磁性,受到外加磁场作用时,在颗粒与孔隙流体分界面上产生一个磁场梯度,大小为:

$$G = B_0 \frac{\Delta\chi}{r} \quad (1-6)$$

式中, G 为内部背景磁场梯度; B_0 为外加磁场强度; $\Delta\chi$ 为骨架颗粒与孔隙流体之间磁化率的差, r 为孔隙半径。当 r 很小时,这个背景梯度可能很大,甚至远远超过仪器建立的磁场梯度。 r 对孔隙的几何结构有相当的依赖性,在地层岩石中往往很难确切知道。背景磁场梯度的有关理论与实验至今尚处于研究之中。

当流体处于岩石孔隙中时,其扩散会受到孔壁的限制,故称作受限扩散。实验表明,此时观测到的视扩散系数将随着观测时间的增加而减小。对于短时扩散行为,MITRA 等人认为,视扩散系数的表达式可以写成:

$$\frac{D(t)}{D_0} = 1 - \frac{4}{9\sqrt{\pi}} \frac{S}{V} \sqrt{D_0 t} + O(D_0 t) \quad (1-7)$$

式中, S/V 是岩石样品的比表面积; t 是扩散时间; D_0 是自由流体的扩散系数; $D(t)$ 是扩散时间为 t 时观测的视扩散系数。如果孔隙为球形,设直径为 d ,则有 $S/V = 6/d$ 。此时,视受限扩散系数将随孔径线性减小,孔径越小, $D(t)$ 相对于 D_0 减小越快。而对于中等扩散时间的行为,由于部分分子开始进入邻近的孔隙之中, $D(t)$ 趋向于变得平缓,它能够感受到孔径的分布和孔隙空间微观几何形态的变化。而在长时扩散行为中,通过分子的扩散,可以探测到孔隙空间的连通性。研究表明,随着扩散时间趋于无限,将会出现:

$$\frac{D(t)}{D_0} \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \xi = \frac{1}{F\phi} \quad (1-8)$$

式中, ξ 是孔隙弯曲程度的度量, F 是地层电阻率因素, ϕ 是孔隙度。由此,通过弯曲程度,视扩散系数与地层的电导率以及渗透率有了联系。

1.3.3 自由弛豫

岩石孔隙中的流体,仍然存在自由弛豫机制。特别是非湿润相,如亲水岩石孔隙中的油或气珠,不与颗粒表面接触,因而,保持着自由流体弛豫的特征,即有自由弛豫又有扩散弛豫。水处于非常大的孔隙中时,例如碳酸盐岩中的溶洞,极少与颗粒表面接触;非常黏的流体,如稠油,转动平均已经失效,弛豫时间相当短,分子向颗粒表面扩散的能力大大减小,即使是湿润相,自由弛豫也将成为主要因素。当孔隙流体顺磁离子浓度很高时,例如铬盐泥浆溶液中的铬离子,由于其自周围的局部场很大,使流体弛豫时间减小,也以自由弛豫为主。气体在静止状态下,极少以连续相存在,当含水饱和度比较低时,水阻塞着孔喉,气体以孤立的气泡存在于孔隙的中心。所以气体在岩石孔隙中总是非湿润相,NMR 弛豫机制只有自由弛豫(T_1)和扩散弛豫(T_2),没有表面弛豫的影响。

1.3.4 岩石骨架的 NMR 弛豫

核磁共振测井以氢核为观测对象。岩石骨架固体中,例如黏土以及含有结晶水的其他矿物,都含有丰富的氢核。众所周知,它们对测井会产生影响,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。

亲水岩石中各部分质子(孔隙水、油、气以及矿物骨架)的弛豫机制如表 1-1 所示。

表 1-1 亲水岩石的核磁共振弛豫机制

质子环境		T_1/s	$T_2/\mu s$	T_1/T_2
矿物骨架中		10 ~ 100	10 ~ 100	10^6 左右
水	砂岩中	表面弛豫	表面弛豫	1.5 左右
	溶洞中	自由弛豫	自由弛豫/扩散弛豫	$T_1 > T_2$
油	稠油	自由弛豫	自由弛豫	$T_1 = T_2$
	轻质油	自由弛豫	自由弛豫/扩散弛豫	$T_1 > T_2$
气		自由弛豫	扩散弛豫	$T_1 \gg T_2$

1.4 水、油、气的弛豫特征

油、气、水弛豫特征如表 1-2 所示。

1.4.1 水的弛豫特征

水润湿碎屑岩, 水的弛豫时间为表面弛豫所控制; 当孔隙比表面很小(如溶洞)、严重油湿岩石或含有高浓度顺铁离子时, 水的弛豫时间主要受体积弛豫和扩散弛豫控制。

1.4.2 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影响, 仅为油的组分和地层温度的函数, 主要受体积弛豫控制。

1.4.3 气的弛豫特征

天然气的 T_1 是其成分、温度和压力的函数, 弛豫为体积弛豫。天然气的 T_2 主要随温度、压力的变化而变化, 因此, 天然气的 T_2 完全受控与扩散弛豫。

表 1-2 油、气、水弛豫特征

质子环境		T_1/s	$T_2/\mu s$	T_1/T_2
矿物骨架中		10 ~ 100	10 ~ 100	约 10^6
水	碎屑岩中	表面弛豫为主	表面弛豫为主	约 1.5
	溶洞中	体积弛豫	体积/扩散弛豫	$T_1 > T_2$
油	稠油	体积弛豫	体积弛豫	$T_1 = T_2$
	轻质油	体积弛豫	体积/扩散弛豫	$T_1 > T_2$
气		体积弛豫	扩散弛豫	$T_1 \gg T_2$

1.4.4 含油饱和度与 T_2 的关系

理论和试验研究表明, 只有当岩石孔隙中仅存在单相流体时, T_2 分布才与孔径分布对应。而当孔隙中存在油水两相、或油气水三相流体时, T_2 分布不再代表孔径分布, 但包含着丰富的流体成分与含量的信息。

图 1-2 中, 岩样 100% 含水时观测得到的 T_2 谱图放在最前面, 然后向样品孔隙中注油, 随着含油饱和度的增加, 水的体积减少, T_2 分布的左边部分, 即水的峰, 逐步降低; 而右边

部分，即油的峰，则不断增加。这是因为，当孔隙中注入油后，油是非润湿相，在孔隙中处于被水包围的状态，弛豫保持其固定的 T_2 特征值，分布在 T_2 增大的方向，随着含油量的增加，峰值幅度会不断的增加，而水本身信号不仅幅度下降，其位置也往 T_2 低的方向移动。

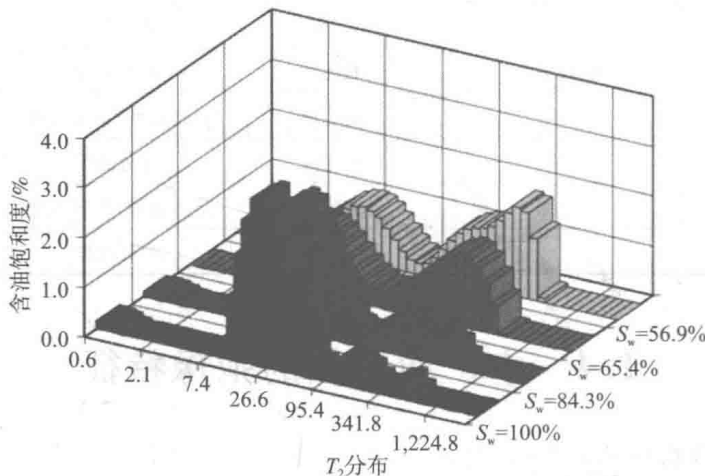


图 1-2 含油饱和度与 T_2 分布的关系

1.5 横向弛豫 T_2 的基本测量方法

在测井中， T_1 和 T_2 都是重要的参数，在连续测井时，测量 T_2 更为实际。测量 T_2 的方法有多种，如自由感应衰减法、自旋回波法、CPMG 回波序列法。

1.5.1 自由感应衰减

自由感应衰减法是最简单的测量 T_2 的方法，即利用一个 90° 射频脉冲，使原来沿静磁场方向取向的磁化矢量扳转 90° ，到 $x-y$ 平面，然后进行观测，得到的信号即是自由感应衰减信号。但是其要求极化时间长，不利于实际应用。

1.5.2 自旋回波法

自旋回波技术是核磁共振技术中非常重要的概念。它是为克服静磁场的不均匀性的影响，准确测定横向弛豫时间而发展起来的，但是，它的应用却早已超出对磁场不均匀性的补偿作用，成为现代核磁共振技术中丰富多彩的脉冲序列的重要基础。

自旋回波脉冲序列由“ $90^\circ - \tau - 180^\circ - \tau - \text{回波}$ ”所组成(图 1-3)。首先施加一个 90° 脉冲使磁化矢量扳转在 $x-y$ 平面上。 90° 脉冲停止后，磁化矢量横向分量会由于静磁场的局部非均匀性等原因很快散相；在延时 τ 后，施加一个 180° 脉冲，把磁化矢量倒转 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° 脉冲后的在 τ 时刻产生一个接收线圈可以探测到的信号，为自旋回波信号。

1.5.3 CPMG 回波序列法

CPMG(Carr, Purcell, Meiboom, Gill 四个人姓第一个字母的缩写)回波序列以自旋回波脉冲序列为基础，通过观测到的自旋回波的衰减过程来确定横向弛豫。CPMG 脉冲序列为“ $(90^\circ)_x - [\tau - (180^\circ)_y - \tau - \text{回波}]_n$ ”。即在 $(90^\circ)_x$ 脉冲之后连续地施加一系列间隔相同的

$(180^\circ)_y$ 脉冲,从而采集到一串回波如图 1-3 所示。当被观测的横向弛豫服从单指数衰减时,这样测得的回波串其幅度将按 $1/T_2$ 的速率衰减,根据式(1-9)即可确定横向弛豫时间 T_2 : 式中, $T_e = 2n\tau$, $n = 1, 2, \dots$; 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 时刻测得的回波信号幅度; $A(0)$ 是零是刻的回波幅度,如图 1-4 所示。

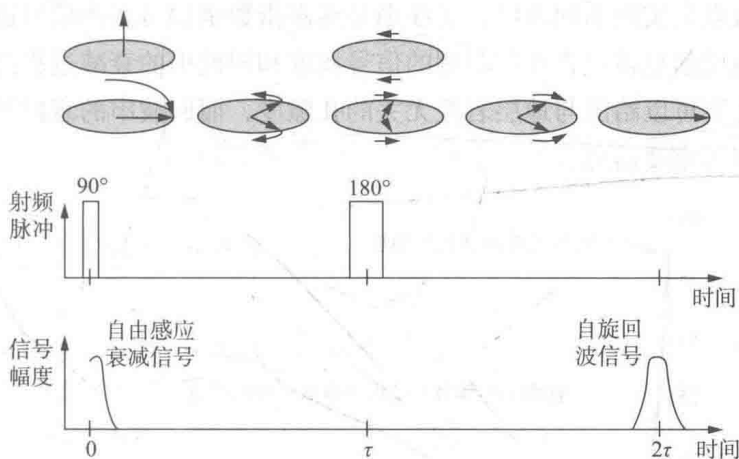


图 1-3 自旋回波序列

$$A(T_e) = A(0) \exp(-T_e/T_2) \quad (1-9)$$

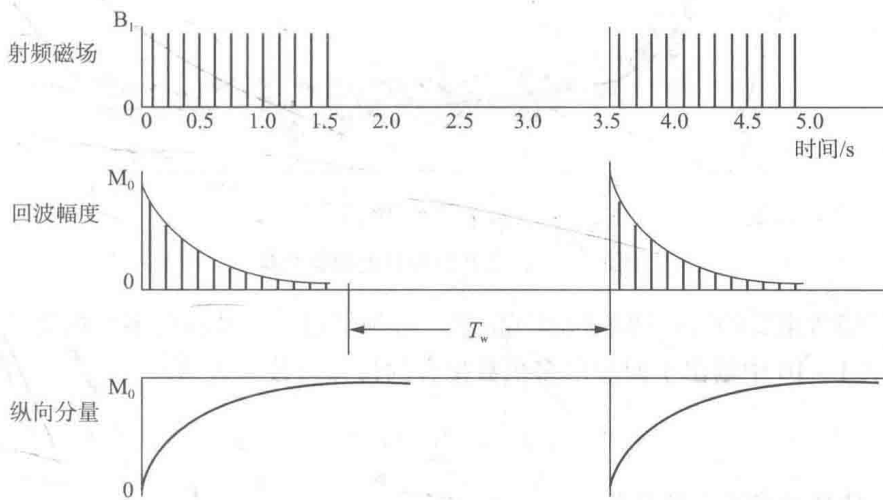


图 1-4 横向弛豫时间测量原理

当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,可以分解出不同的指数成分。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;减少回波间隔 τ ,则将减少扩散对 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。

实际实验时,极少只做单次测量,而是需要把多次测量结果积累起来,才能得到应有的信噪比。在多次累加时,两次测量之间的延迟即纵向恢复时间非常重要。一个回波串采集完毕,必须等待足够的时间,使纵向磁化矢量完全恢复,才能开始第二个回波串采集。等待时间的选取取决于被观测对象的纵向弛豫时间 T_1 ,通常取 3~5 倍 T_1 。

1.6 核磁共振测井提供的信息

由核磁共振测井的测量方式可知,核磁共振测井的原始数据,在形式上其实十分简单,是幅度随时间衰减的回波信号。图 1-5 中,横轴是时间,纵轴是回波信号幅度,它被刻度成孔隙度单位。散点是实测的回波串,实线则是用多指数函数对实测信号进行拟合计算的回波信号理论值。地层信息被包含在零时刻的信号幅度和回波串的衰减过程之中。零时刻的信号幅度在一定条件下可以给出与地层岩性无关的孔隙度,而回波串的衰减过程则能够提供孔隙直径、流体类型等重要信息。

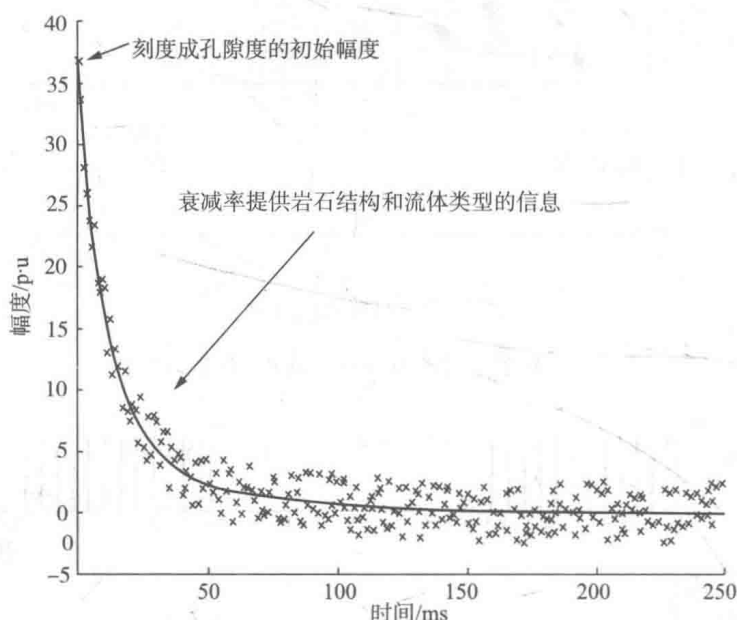


图 1-5 核磁共振测井的原始数据

回波信号隐含重要的岩石物理和油气信息,必须经过一个基本的多指数变换,得到所谓的 T_2 分布。式 1-10 中给出了回波串多指数拟合的过程与数学表达式:

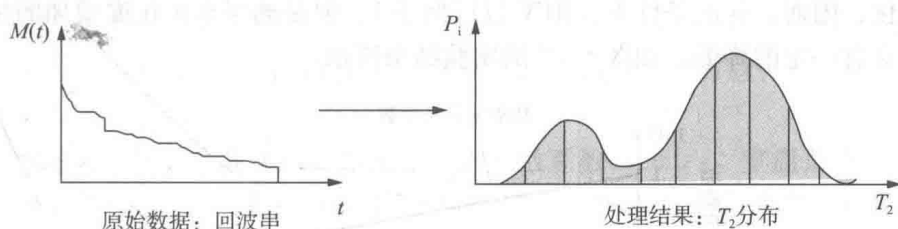
$$A(t) = \sum_{i=1}^m P_i e^{-\frac{t}{T_{2i}}} \quad (1-10)$$

式中 P_i ——特征弛豫所占的比例;

T_{2i} ——预设横向特征弛豫时间;

m ——弛豫组分数。

求解 P_i 的过程称为解谱。由于 P_i 反映的是各特征弛豫所占的比例,一系列 P_i 就构成了 T_2 分布,经过适当刻度就可以转换为孔隙度值。图 1-6 左显示了原始回波数据,横轴为观测时间 t ,纵轴为信号幅度 $M(t)$;图 1-6 右显示了 T_2 分布,横轴为 T_2 (ms),叫做横向弛豫时间;纵轴为区间孔隙度,反映不同 T_2 分量对测量孔隙度的贡献。 T_2 分布包含了回波串的全部信息, T_2 分布的面积等于回波串零深刻的幅度,而整个分布则反映了回波信号的衰减情况。

图 1-6 回波串拟合得到 T_2 谱

1.7 流体性质识别的物理基础

1.7.1 流体性质的核磁特性

核磁共振测井的目的是要通过对氢核的核磁共振信号测量, 识别地层孔隙中的流体及其含量。因此要利用核磁共振测井进行储层流体识别, 首先要了解储层条件下各种流体的核磁共振性质。这些性质包括: 含氢指数(I_H)、扩散系数(D)、纵向弛豫时间(T_1)、横向弛豫时间(T_2)和回波时间间隔 T_E , 见表 1-3。

表 1-3 油、气、水核磁共振特性参数值

流体	T_1/ms	T_2/ms	典型 T_1/T_2	$\mu/\text{mPa} \cdot \text{s}$	I_H	$D_0 \times 10^{-5}/(\text{cm}^2/\text{s})$
水	1 ~ 500	1 ~ 5000	2	0.2 ~ 0.8	1	1.8 ~ 7
油	1 ~ 4000	1 ~ 1000	4	0.2 ~ 1000	1	0.0015 ~ 7.6
气	2000 ~ 5000	1 ~ 60	80	0.011 ~ 0.014(甲烷)	0.2 ~ 0.4	80 ~ 100

1.7.2 含氢指数

与中子测井一样, 核磁共振测井也可以测量地层的含氢指数, 但是, 两者在储层的响应特性方面具有很大的差别。首先, 核磁共振对核素有选择性, 核磁共振测井主要观测地层中的氢核; 而中子测井还受到地层中氯离子和一些稀有金属对它吸收和强散射的影响; 其次, 核磁共振测井测量的氢核可以将黏土结构水、毛管束缚水和自由流体束缚水等不同流体性质的氢核分开, 而中子测井测量的是地层中所有氢核的含氢指数, 无法区分自由流体和束缚流体, 因此核磁测井在详细描述储层含氢指数上是目前其他所有测井方法都无法比拟的。第三, 核磁测井响应中不受挖掘效应的影响, 信号的幅度基本与岩性无关。第四, 核磁共振测井基本不受井眼流体的影响, 当测量确实受到井眼环境的影响时, 测量结果可以直观的显示出来, 所以核磁测井的井眼影响是决定该井是否适合测量核磁测井的条件, 而不是进行复杂井眼校正的条件。

地层中每一种流体的含氢指数是不同的, 而且是地层温度和压力的函数。水的含氢指数与盐的溶解量有一定的关系, 但目前一般的实验表明, 水的矿化度变化对核磁共振测量结果影响很小。对于地层水以及多数有经济价值的原油, 井底条件下温度和压力的影响趋向于相互抵消, 其含氢指数与地面条件纯水的值差别不大。但气体的含氢指数在井底条件下随温度与压力的增加而显著增加, 从而成为可观测的对象。

1. 水的含氢指数

定义地表温度和压力条件下水的含氢指数为 1, 即 $I_{HW} = 1$ 。由于水的密度几乎不随温

度和压力变化，因而，井底条件下，IHW 也近似于 1，但是地层水矿化度增加的情况下，水的含氢指数会有一定的降低。如图 1-7 的实验结果所示。

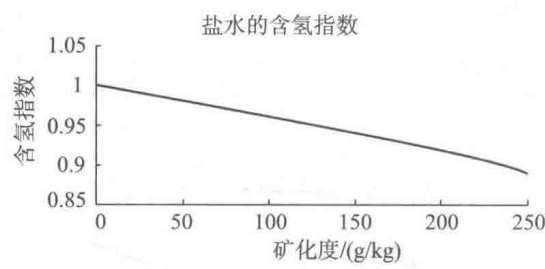


图 1-7 盐水的含氢指数

2. 纯烃的含氢指数

纯有机化合物的含氢指数可以由体积密度 $d(\text{g}/\text{cm}^3)$ ，分子质量 $W_m(\text{g}/\text{mol})$ ，以及化学分子式中氢原子数 n_H 确定。纯水的质子密度为 $0.11\text{mol}/\text{cm}^3$ ，用这个值把质子密度转换成含氢指数：

$$I_H = \frac{dn_H}{0.11W_m} \tag{1-11}$$

石油中的常见成份正辛烷含氢指数为一个单位。被饱和的普通直链和支链与这个值的偏差在 5% 以内。非饱和和烃(双键及三链键)含氢指数会减少。芳香化合物是非饱和的环，含氢指数也比较低。苯的含氢指数更低，只有 0.61。

3. 原油的含氢指数

原油是不同含氢量的有机分子组成的碳氢混合物，其含氢指数与黏度有关(用 API 标准比重表示)。如图 1-8 反映了无气原油的质子密度 NMR 测量值与它们的 API 标准比重之间的关系。比较轻的原油(API > 250)，含氢指数接近于一个单位；低于 170API 标准比重时，测量的含氢指数明显减少，主要受原油中弛豫快于 1ms 的成分影响。稠油通常有比较高的芳香烃含量，其质子密度比较低，为了得到正确的孔隙度，需要进行含氢指数校正。

4. 天然气的含氢指数

天然气通常以甲烷为主，另加少量比较轻的烷烃和惰性成分，其含氢指数比较低，且与温度、压力直接有关。常温常压时，用核磁共振不易观察到信号，但是在储层温度与压力条件下，可以达到能够进行观测的程度。甲烷的含氢指数与温度及压力(深度)的关系如图 1-9 所示，图中曲线模数为地温梯度。

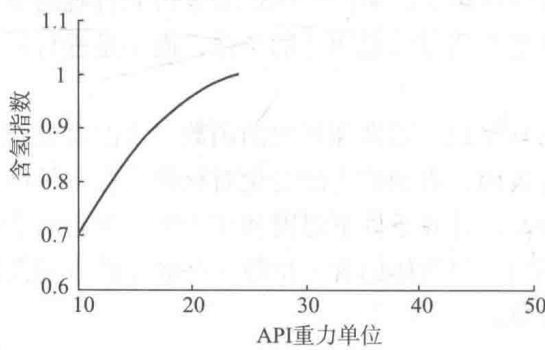


图 1-8 原油的含氢指数

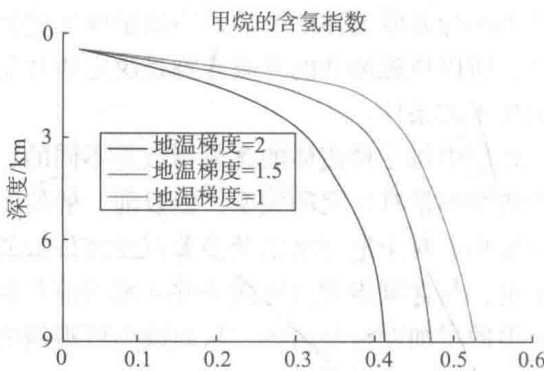


图 1-9 甲烷的含氢指数