

核磁共振成像测井 与岩石核磁共振及其应用

肖立志 著

科学出版社

核磁共振成像测井
与岩石核磁共振及其应用

肖立志 著

科学出版社

1 9 9 8

内 容 简 介

本书包括两个部分:第一部分介绍了核磁共振测井的物理基础、应用基础、解释模型以及 MRIL(磁共振成像测井)、CMR(贴井壁磁共振测井)和 NML(地磁场核磁测井)的方法原理。第二部分介绍了低场核磁共振岩心分析,以及作者利用液体高分辨、固体魔角旋转、脉冲梯度磁场、显微成像等现代核磁共振新技术和新方法,对岩石核磁共振的基本性质(谱线、弛豫、扩散、成像及其影响因素)和基本效应(场强、温度、压实程度等)所进行的实验探索。

本书可供从事岩石样品及其他孔隙介质核磁共振、核磁共振测井研究和应用的人员阅读,也可供从事油气资源评价工作的管理干部和技术人员及高等院校有关专业高年级学生、研究生参考。

核磁共振成像测井 与岩石核磁共振及其应用

肖立志 著

责任编辑 王 军

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

湖北省京山县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998年8月第 1 版 开本:850×1168 1/32
1998年8月第 1 次印刷 印张:10 3/4
印数:1~1500 字数:274 000

ISBN 7-03-006924-2/P·1072

定价:38.00元

献 给

为祖国的测井及核磁共振事业辛勤耕耘的人们

Dedicated to

All Well Logging and NMR People

谨以此书

感谢叶朝辉研究员、杜有如研究员、金振武教授、钟兴水教授、高守双教授、刘家瑾教授、Eiichi Fukushima 博士、Jasper Jackson 博士、Ken Packer 教授的悉心指导；感谢我的父母、妻子、女儿及家人的理解与支持；感谢江汉石油学院、中国科学院武汉物理与数学研究所各级领导的关怀与帮助；感谢石油科技中青年创新基金会、国家自然科学基金会、国家重点实验室基金会、中国石油天然气总公司科技局、美国 Lovelace 医学基金会、英国皇家学会、国际磁共振协会、国际职业测井分析家协会的资助；感谢英国 Nottingham 大学、美国 Lovelace Institutes、Schlumberger-Doll 研究中心、NUMAR 公司、Western Atlas 国际公司提供访问的便利和工作的机会。感谢谭廷栋、陆大卫、姜文达、欧阳健、常熹、刘凤惠、曾文冲、张树平、郭尚平(院士)、唐孝威(院士)、李大潜(院士)、俞文颺等许许多多在这里无法一一提到的领导和科学家们的长期鼓励和培养。

序

核磁共振(NMR)自1946年发现以来,已经成为物理学、化学、生物学及医学中的一个宝贵工具。随着使用永磁体和脉冲射频场方法的NMR测井仪器的发明,如今已经可以把丰富的实验室技术应用到现场地层特性的观测中,由此为地层评价和岩心分析打开了一个新的视野,正如NMR的引入使化学、生物学及医学发生了革命性的进步一样。

肖立志教授撰写了第一本系统介绍测井和岩心分析中这些新进展的专著,从物理基础到利用地磁场的核磁测井的早期努力,再到近期开发的新一代核磁共振成像测井仪,涵盖了整个领域。他还论述了孔隙介质中孔隙表面与流体相互作用的一些NMR基本问题。认识岩石孔隙中流体的NMR特性是进一步发展岩心分析和地层评价新方法的基础。

肖教授是中国NMR测井的先行者,最早把磁共振成像测井介绍到中国。相信这部著作的问世一定会对中国石油工业界的科学家和工程师们应用与发展核磁测井新技术提供及时的帮助。

Jasper Jackson*

* Jasper Jackson, 美国 Los Alamos 国家实验室著名科学家,“Inside-out”核磁测井之父,现任 *Science*(《科学》)杂志编委,美国科学促进委员会委员。

Preface

Since its discovery in 1946, nuclear magnetic resonance (NMR) has become a valuable tool in physics, chemistry, biology and medicine. With the invention of NMR well logging tools using permanent magnets and pulsed rf methods, the application of sophisticated laboratory techniques to formation properties *in situ* is now possible. This opens a new era in formation evaluation and core analysis, just as the introduction of NMR in chemistry, biology and medicine revolutionized aspects of those sciences.

Professor Xiao Li Zhi has written the first book treating these new developments in well logging and core analysis. It covers the entire field, from basic physics, through early efforts to use the earth's magnetic field for well logging, to the recent development of the new generation of NMR imaging logging tools. He also includes the fundamentals of NMR as well as a thorough treatment of the interaction of fluids with pore surfaces in porous media. Understanding the NMR behavior of fluids contained in rock pores forms the basic of much of the new core analysis and formation evaluation.

Professor Xiao is well qualified to present this material. He is a pioneer in the introduction of NMR well logging in China, and is largely responsible for applying this new technique to formation evaluation in China. This new volume should help acquaint scientists and engineers in the Chinese petroleum industry with powerful new technology.

Jasper Jackson

目 录

第一部分 核磁共振成像测井

第一章 核磁共振测井概述	(3)
1. 核磁共振测井概念与仪器设计思路的发展	(3)
2. 核磁共振测井对油气资源评价的贡献	(11)
3. 核磁共振测井未来可能的发展方向	(18)
附录一 核磁共振测井发展简史	(24)
附录二 关于我国首次 MRIL 现场测井的日记	(27)
第二章 核磁共振测井物理基础	(30)
1. 核磁共振现象	(30)
2. 核磁共振的经典矢量模型描述	(34)
3. 弛豫特性	(38)
4. 基本测量方法	(39)
5. 定量分析基础	(46)
6. 核磁共振成像基本原理	(48)
附录 核磁共振技术分类	(53)
第三章 核磁共振测井应用基础与解释模型	(56)
1. 流体的核磁共振性质	(56)
2. 岩石的核磁共振性质	(64)
3. 核磁共振测井解释模型	(69)
第四章 磁共振成像测井	(87)
1. Inside-out 概念	(87)
2. MRIL 方法原理	(90)
3. MRIL 观测方式	(99)
4. MRIL 测井过程与质量控制	(112)
第五章 磁共振成像测井在我国的初步应用	(123)

1. 地质情况	(123)
2. 测井目的与内容	(124)
3. MRIL 适应性检验	(125)
4. MRIL 与电阻率及中子/密度孔隙度结合解释油、气、水	(127)
5. MRIL 与 TBR _t 结合进行薄层分析	(134)
第六章 贴井壁磁共振测井	(141)
1. CMR 方法原理	(141)
2. CMR 应用实例	(143)
3. CMR 与 MRIL 若干特性的比较	(145)
第七章 地磁场核磁测井	(149)
1. 预极化-地磁场自由进动方法原理	(149)
2. Schlumberger NML	(150)
3. 俄罗斯 NML	(155)
4. 阿塞拜疆 NML	(158)

第二部分 岩石核磁共振研究

第八章 岩石核磁共振概述	(165)
1. 岩石核磁共振的基本问题	(165)
2. 岩石核磁共振在石油勘探开发中工程化与产业化应用 的方向与途径	(167)
第九章 低场核磁共振岩心分析及其应用	(173)
1. 测量原理简介	(174)
2. 弛豫测量与数据分析	(180)
3. 扩散测量与数据分析	(188)
4. NMR 测井解释模型的建立.....	(190)
5. NMR 岩心分析实例.....	(204)
第十章 高场核磁共振成像岩心分析及其应用	(216)
1. MRI 方法简介	(216)
2. 岩样内部结构的 NMR 成像及其应用	(220)

3. 岩样驱替过程的 NMR 成像及其应用	(232)
4. 驱替过程的 NMR 定量成像	(237)
第十一章 高场条件下岩石核磁共振弛豫实验研究	(239)
1. 岩石 NMR 弛豫若干基本效应的实验研究	(239)
2. 岩石孔隙中表面流体弛豫行为的实验研究	(247)
第十二章 高场条件下岩石核磁共振谱的实验研究	(255)
1. 饱和在岩石中流体的 NMR 谱线	(255)
2. 岩石样品低速魔角旋转 NMR 特性	(264)
3. 岩样表面液体的 NMR 谱线	(268)
附录 普通样品管中液面高度对 NMR 观测谱线的影响...	
.....	(274)
文献索引	(281)
后记	(322)

第一部分

核磁共振成像测井

第一章 核磁共振测井概述

1. 核磁共振测井概念与仪器设计思路的发展

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。不久后,美国的 Russell Varian 证实了地磁场中的核自由进动。1952年,Varian 发明 NMR 磁力计,用于测量地磁场的强度,其基本组成是一个缠绕线圈的水瓶。当一个直流电流通过该线圈时,沿线圈轴向将产生一个磁场,瓶中水的氢核受到轴向磁场的作用,几秒钟后,改变它们原来沿地磁场的取向为沿线圈的轴线取向。然后,迅速断开电流,用该线圈作接收器,检测质子绕地磁场进动产生的信号。精确地测量进动频率,可以确定地磁场的总强度。Varian 把这种仪器设计成便携式磁力计,成功地推向了市场。一种利用气体(铷雾)中非成对电子自旋的改进仪器,至今仍然用作航测磁力计,拖在飞机的尾部进行地球物理磁力异常的观测,或海底探测。

50年代中期,Varian 提出,磁力计技术可以用于油井测量。把线圈下放到井里,与磁力计的工作原理一样,线圈中的极化电流产生一个比地磁场强得多的磁场,地层中油或水的质子将沿该磁场重新取向。然后,迅速切断直流电流,用同一线圈接收核进动产生的信号。最初的想法是试图观测信号的衰减,利用油与水弛豫时间的差别,来检测油层。Varian 向几个与石油工业有关的公司建议了一个项目,探讨开发核磁测井的可能性。一些公司表示有兴趣,其中包括 Chevron(当时叫加利福尼亚公司)。一个用电池操作的样机在加利福尼亚 Bakersfield 附近的稠油区进行试验,想看看能否从水中区分出油来。但是,结果相当不明确。

1956年,Brown 和 Fatt 在 Chevron 研究室发现,当流体处于

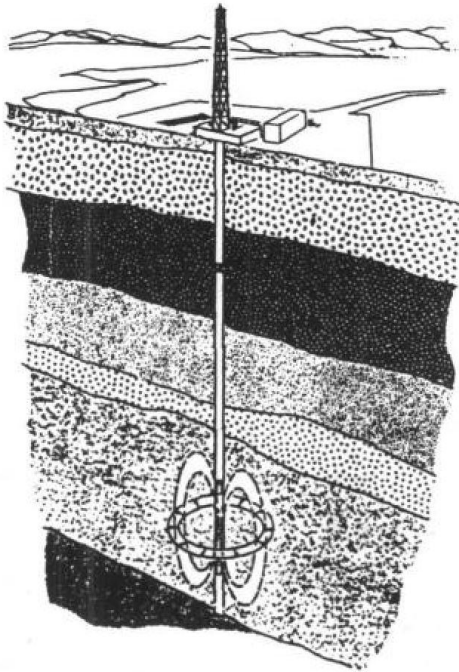


图 1-1 Jasper Jackson 设计的核磁测井方案井下测量原理示意图

小空间里时,例如,岩石孔隙中,其 NMR 弛豫时间与自由状态相比显著减小。这一现象也同样被其他油公司的研究所发现,只是由于所有权方面的原因,没有发表。受限扩散对弛豫时间的影响这一基本现象的发现非常重要,在测井工业中,它成为后来核磁测井解释和应用的基础。而且,在生物学及医学的扩散现象研究中,它也非常重要,因为细胞内水的弛豫与细胞外面的水很不一样。为了寻找引起这一现象的原因,进行了许多实验和理论研究。结果

表明,弛豫时间与孔隙大小有关,而且,比较小的孔具有比较短的弛豫时间。对于球形孔,弛豫时间则与孔隙半径成正比。以此为基础,发展出分析岩心与测井数据的经验方法。实验观测到的非指数衰减信号,可以分解成两条指数曲线,对应长短两个弛豫时间。短弛豫时间部分归并成小孔隙中的流体,并设想它们是不可采的;长弛豫时间对应大孔隙,其中的流体是可采的,这一部分也被称作自由流体指数 (FFI)。对这一部分可采油的测量是地磁场核磁测井 (NML) 的主要应用。

Chevron 公司的 Brown 和 Gamson 于 1960 年研制出利用地磁场的核磁测井仪器样机。在进行了初步尝试之后,几个油田服务公司为这项技术发放了许可证,并开始提供 NML 测井服务。许多石油刊物上都刊登广告,说这种方法能够对油层的许多问题提供

答案。

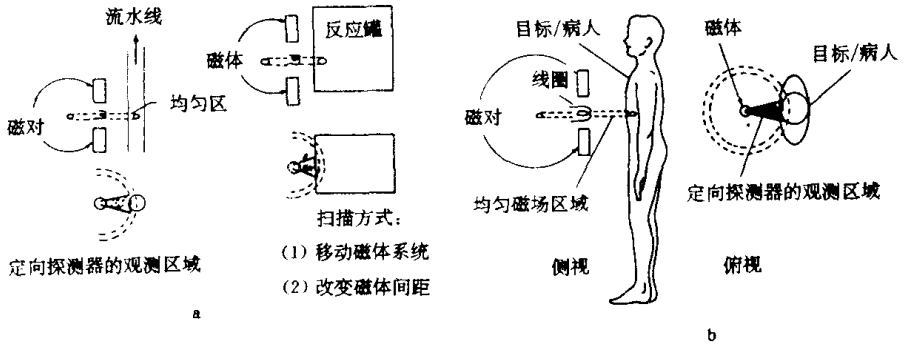


图 1-2 Inside-out 概念的可能用途

a. 化学过程监测; b. 诊断医学

但是,这种方案在使用上受到两个很大的限制。首先,仪器周围的流体主要是井眼里的钻井泥浆,除非进行某种测量来消除井眼信号,否则就不能观测到地层流体信号,因为地层信号比井眼信号小几个数量级。人们想到一个办法,把数量可观的磁粉混合到泥浆中。但是,混合这些磁粉通常需要数小时,在井口不能做其他任何事情,钻井人员对此很不乐意。第二个限制是技术上的,即在检测信号之前切断很高的直流电流,需要相当长的时间(与核磁弛豫时间相比)。“死时间”很长意味着小孔隙中的信号无法观测到,从而导致将长短两个衰减时间曲线外推到零时刻得到它们的大小,并导出 FFI 时,带来很大的不准确性。

由于这些问题的存在,使得 NML 没有被石油工业接受成为一种标准的常规测井方法,尽管 Schlumberger 直到 80 年代末期仍然在用这种测量原理,俄罗斯、阿塞拜疆等原苏联各国甚至沿用至今。

1978 年,美国 Los Alamos 国家实验室的 Jasper Jackson 到 Chevron 研究室进行了一次私人访问,看到 NML 测井前混合磁粉时漫长与麻烦的过程,他开始着手寻找一种新方案,把 NMR 测井的灵敏区域“聚集”到井眼外面,从而不需对井眼流体加磁粉。寻找的结果是提出“Inside-out”概念,发明了基于反向磁体的

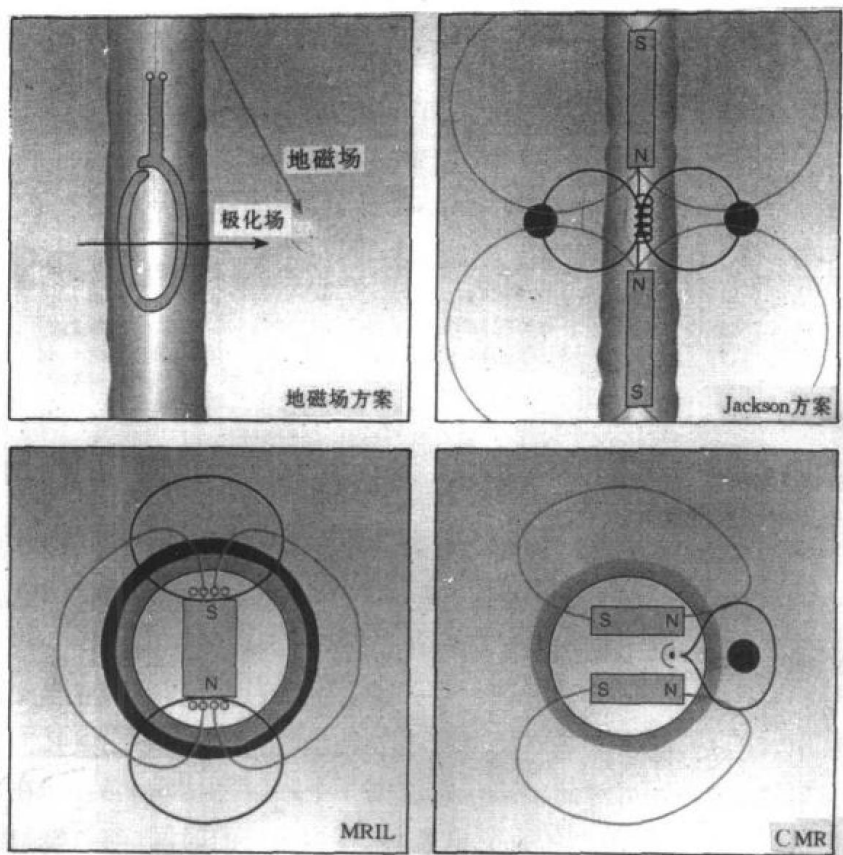


图 1-3 核磁测井下仪器设计思想的发展(从地磁场预极化方法到 Jackson 方案,再到 NUMAR 的 MRIL 及 Schlumberger 的 CMR)

“Inside-out”NMR 测井仪,即不用地磁场,而是在井中放置一个磁体,使其在井眼周围的地层中产生均匀磁场,建立磁共振条件,共振区域在井眼之外,由此达到消除井内泥浆影响的目的。与“预极化-地磁场自由进动方法”相比,Inside-out 技术是一个很大的进步,它是核磁测井大规模商业化应用的重要基础。除了勿需在泥浆中添加磁粉外,Inside-out 技术较 NML 还有其他的一些优越性。首先,磁场强度比地磁场更高,观测信号更大(单位体积样品);其次,最重要的一条,是利用射频磁场扳转磁化矢量,操纵自旋系统,产生自旋回波。这样一来,一方面,由于射频场的切断可以非常快,



图 1-4 医用磁共振成像

1. 可以得到人体中任何部位的薄片图像。通过对自旋密度、纵向弛豫时间、横向弛豫时间等成像机制的综合利用,能够直观地显示各种病变,已经成为诊断医学中十分重要的工具。

2. 只有薄片中的流体产生可观测的信号,而固体部分如骨头等,由于其信号衰减非常快,对图像几乎没有影响,构成磁共振成像的独特魅力。而且,磁共振成像不含任何对人体有害的放射性源。

同样,这两个特征使磁共振成像在测井技术中也显得特别有意义。首先,切片的概念使磁共振成像测井的探测范围变成一个清晰的可控制区域,它是一个由静磁场梯度及射频磁场频率确定的圆柱壳,壳之外的地层对观测信号没有影响。其次,观测信号只来自圆柱壳内孔隙中的流体,而矿物骨架对观测信号几乎没有影响。再次,有多种可利用的对比机制,如通过纵向弛豫时间、横向弛豫时间、扩散系数等,把观测信号中对应的不同流体成分区分开。

所以能够使仪器的“死时间”大大减小。短的“死时间”允许对极小的孔隙中的信号进行观测,并对数据进行更好的分析。另一方面,它打开了应用各种有效的射频脉冲序列的大门,通过对自旋系统的操作,提取地层流体的化学和物理的信息,把它们变得像化学实验中 NMR 的常规应用一样。这是第一支脉冲核磁共振测井仪的最初愿望。