

肖立志 柴细元 孙宝喜 著
陆大卫 付有升 高秋涛

Lizhi Xiao Xiyuan Chai Baoxi Sun
Dawei Lu Yousheng Fu Qiutao Gao

核磁共振测井 资料解释与应用导论

NMR Logging Interpretation
and China Case Studies

石 油 工 业 出 版 社

核磁共振测井 资料解释与应用导论

肖立志 柴细元 孙宝喜 著
陆大卫 付有升 高秋涛

石 油 工 业 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

核磁共振测井资料解释与应用导论 / 肖立志等著 .
北京: 石油工业出版社, 2001.10
ISBN 7-5021-3533-2

I . 核…
II . 肖…
III . 核磁共振 - 油气测井
IV . TE15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 065680 号

石油工业出版社出版发行
(100011 北京安定门外安华里二区-1号楼)
石油工业出版社美编室设计制作
北京国彩印刷有限公司印刷

*

889 × 1194 毫米 16 开本 13 印张 350 千字 印 1-1000
2001 年 10 月北京第 1 版 2001 年 10 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3533-2/TE · 2607

序 言

核磁共振成像测井是20世纪末测井领域最令人激动的技术成就。由于其测量信号不受固体骨架的影响、观测范围具有可选择性、以及油、气、水在核磁共振特性方面的显著差异而能够得以识别,从而克服了以体积模型为基础的传统测井方法受井眼、岩性及地层水矿化度影响的缺陷,使得诸如复杂岩性、低孔低渗、低电阻等油气藏用常规测井方法难以解决的复杂问题迎刃而解。

作为全球最大的能源服务公司,哈里伯顿充分认识到这一技术在石油勘探开发领域中的巨大潜力,于1997年花巨资收购了世界上最好的核磁共振成像测井公司--NUMAR公司,并在过去的几年里,围绕这一技术投入了大量的人力和物力,展开了深入的研究工作。先后推出了P型核磁共振成像测井仪(MRIL-P)、随钻核磁共振测井仪(MRIL-WD)以及利用核磁共振技术进行流体识别的模块式地层测试器(MRIL-FA)。在应用软件方面,先后推出了综合解释软件(MRIAN)、用于轻烃识别的时间域分析软件(TDA)以及用于稠油定量解释的扩散分析软件(DIFAN、EDM),从而提供了一整套从储层参数计算到油气水识别的解决方案。哈里伯顿公司倡导的以核磁共振为核心的“流体优先”测井理念也越来越广泛地得到各油公司的响应。

哈里伯顿与中国测井界的合作已经具有近20年的历史。在过去的20年里,哈里伯顿公司不断将其最新的测井仪器与技术介绍到中国,包括90年代中期的声、电成像测井仪(EMI、CAST-V)、目前的储层监测仪(RMT)、以及P型核磁共振成像测井仪。实践证明,一项新技术的引进和推广,需要多方面的努力,这包括好的仪器、好的培训、好的售后服务以及好的应用支持。

核磁共振测井是一项难度很高的技术。为了使其在中国得到成功应用,哈里伯顿公司作出了巨大的承诺。这包括在北京建立资料处理中心、派遣专家协助客户实施测井作业,更为重要的是肖立志博士在过去的几年里,倾注了极大的热情和努力,来培训中国的技术人员,并提供高强度的资料解释与应用支持。哈里伯顿公司在这方面的投入超过了任何一个公司在某一单项技术售后支持的强度。值得高兴的是,这些努力获得了丰硕的成果,核磁共振成像测井技术成功应用的消息捷报频传,这一融汇现代科技成果的方法在中国的石油测井界已经开花结果。

感谢肖立志博士以及中国测井界陆大卫、柴细元、孙宝喜、付有升、高秋涛等几位先生,将他们在实际应用中取得的成果汇聚在这部导论性的专著中,为我们提供了一本宝贵的参考手册。正如肖立志博士指出的那样,核磁共振测井技术仍处于不断的发展与完善之中,特别是在资料解释与应用方面还有很多工作要做。哈里伯顿公司将一如既往地提供一切必要的支持和帮助。我相信,有这么多专家学者的关心与参与,这一技术必将在中国的石油勘探开发事业中发挥更大、更好的作用。

彭文军

前言

核磁共振测井的发明、成熟和广泛应用是20世纪90年代世界测井技术的重要特征。我国利用核磁共振测井提供的信息,已经解决了复杂油气藏勘探开发中的一些疑难问题,并取得了一定的地质与工程效果。但是,这项技术还有很大的潜力尚未充分发挥,其中的关键和难点则在于对资料的解释与应用上。

从1999年开始,我国直接从NUMAR/哈里伯顿公司引进了多套最新的核磁共振成像测井仪,即MRIL-Prime,双方都十分重视对资料处理与解释应用的培训。中方选拔了优秀的技术人员赴美,哈里伯顿公司则安排了很好的授课计划和专家任教。1999年10月至2001年6月间,我在休斯敦主持了这样的培训班共6期,其中专门针对我国的有4期,来自我国五个测井公司的22位解释专家和相关技术人员参加了学习,他们正在成为我国核磁共振测井资料解释与应用的重要力量。

为了帮助更多的地质学家、岩石物理学家、油藏工程学家、以及测井技术人员更好地了解和应用核磁共振测井信息,在哈里伯顿公司的大力支持下,我们撰写了这部卡通式的导论,其中的原理部分大多来自于我为这些培训班所撰写的讲义和手册,并采纳了这22位学员在培训期间提出的宝贵建议和意见。作者柴细元、孙宝喜、陆大卫、付有升、高秋涛则提供了书中的实例以及对实例的分析,并参与了全书的设计和定稿。我们对哈里伯顿公司,对我国在美国参加过MRIL-Prime测井资料处理与解释应用培训的专家,对我的领导George Coates和John Lau先生、助手Jennifer Wood小姐、同事Maged Fam、Ron Bonnie、Dave Marschall、Danny Miller、Jim Galford、Bob Engelman、Ron Cherry、Paul Credo、彭文军、江国山、李可、张日文、李德芬、王敬源、哈里伯顿中国地区副总裁白东先生,以及为本书的出版做过大量工作的王艳、丁娱娇、李能根等,表示衷心的感谢!

本书顾及不同专业背景和工作经历的读者,前四章力求以简单明了的方式,把核磁共振测井最重要和最基本的内容完整地展现出来;后四章则对核磁共振测井的数据处理、测前设计、实验室岩心分析等,提供一个轮廓,用作参考。书中的图基本上自成体系,一看就懂;而图下的说明则可以进一步加深对图中内容的理解。如果你是一位繁忙的管理人员,你可以只浏览书中的图,特别是第一章和第二章。如果你是一位想应用核磁共振测井信息的地质学家、岩石物理学家或油藏工程学家,你可以把主要兴趣放在第一、二、四章。如果你是一位测井技术人员,并且想弄清楚核磁共振测井的技术细节,这本书则只是你的辅助读物,你需要弄懂第三、六、七章,并且,还必须参加至少一期正规的培训班,阅读其他的核磁共振测井书籍与论文,例如,《核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用》(科学出版社,北京,1998年8月)和《NMR Logging Principles and Applications》(美国海湾出版社,休斯敦,2000年1月)。

核磁共振测井作为裸眼井油气评价的重要手段,仍然处于不断发展与完善之中,特别是在资料解释与应用方面,还有许多事情需要做。我们渴望与同行们真诚合作,努力提高我国核磁共振测井应用水平,并对核磁共振测井技术本身,包括仪器发展、软件设计以及解释与应用的基础等,有所创新和贡献。

由于作者水平有限,书中不妥之处难免,恳请批评指正。

肖立志

NMR Logging Interpretation and China Case Studies

©2001 Halliburton International Inc.



目 录

Contents

第一章 核磁共振测井的作用与意义 1

Chapter 1 Why NMR Logging

第二章 核磁共振测井提供的基本信息 13

Chapter 2 Basic Information Provided by NMR Logging

第三章 核磁共振测井的测量原理与观测模式 29

Chapter 3 NMR Logging Measurement Principles and Activations

第四章 核磁共振成像测井在中国的应用实例 47

Chapter 4 China MRIL Case Studies

第五章 核磁共振成像测井仪器的重复性与一致性 93

Chapter 5 MRIL Tool Repeatability

第六章 核磁共振成像测井资料处理流程 115

Chapter 6 MRIL Data Processing and Interpretation

第七章 核磁共振成像测井的测前设计 175

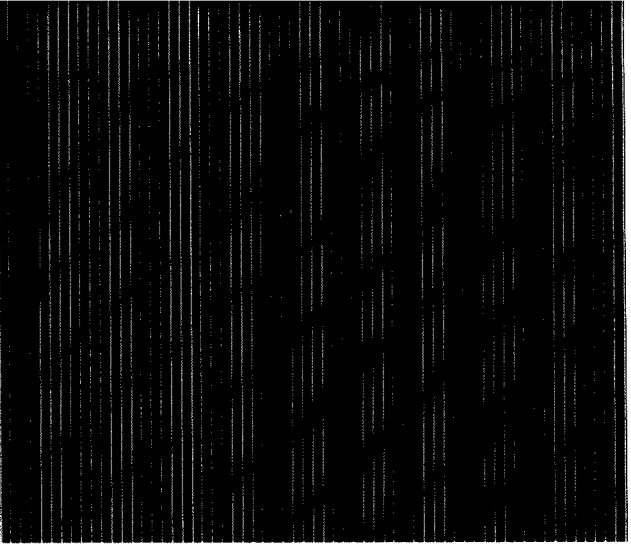
Chapter 7 MRIL Job Design

第八章 实验室核磁共振岩心分析对核磁共振测井资料解释的支持 191

Chapter 8 Laboratory NMR Supports MRIL Applications

附 录 哈里伯顿测井技术 10 年发展回顾 197

Appendix Halliburton Logging Development in Last Ten Years

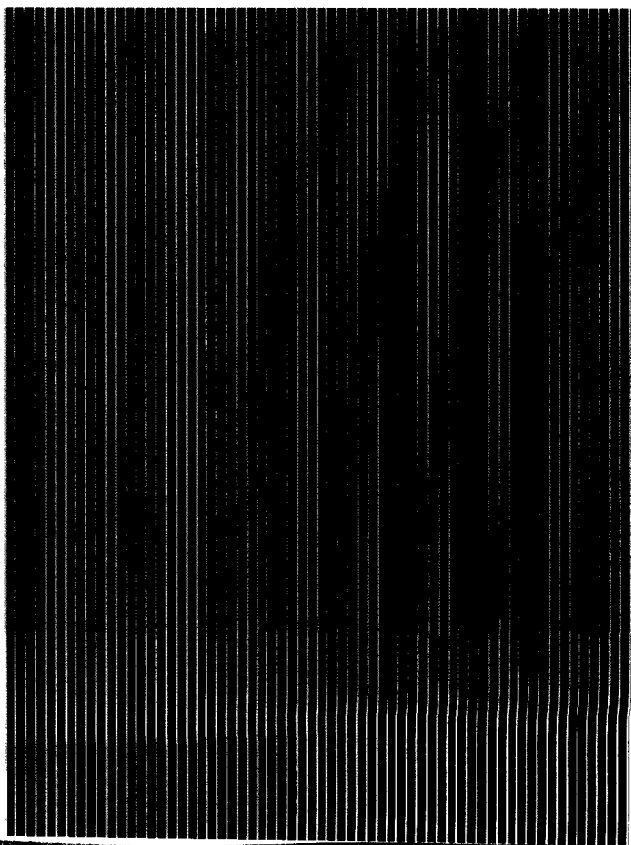


核磁共振测井是一种新型的裸眼井测井方法。它能够为地层的油气评价提供独特的、在许多情况下甚至是不可或缺的重要信息，这些信息包括：

1. 与岩性无关的孔隙度；
2. 毛管束缚水、泥质束缚水、可动流体饱和度；
3. 渗透率；
4. 可动流体中的油、气含量。等等。

这些信息的获取和应用，极大地改善了对地层油气评价的准确性、对储量计算的合理性、对产能预测的可靠性，以及对油气田增产措施评价的可能性。本章概述核磁共振测井的作用和意义

第一章 核磁共振 测井的作用与意义



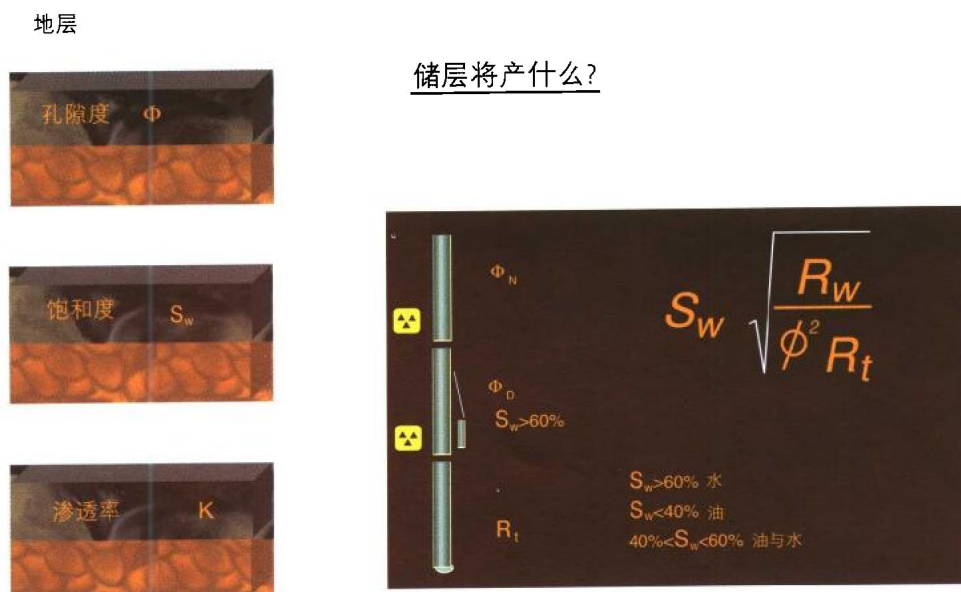


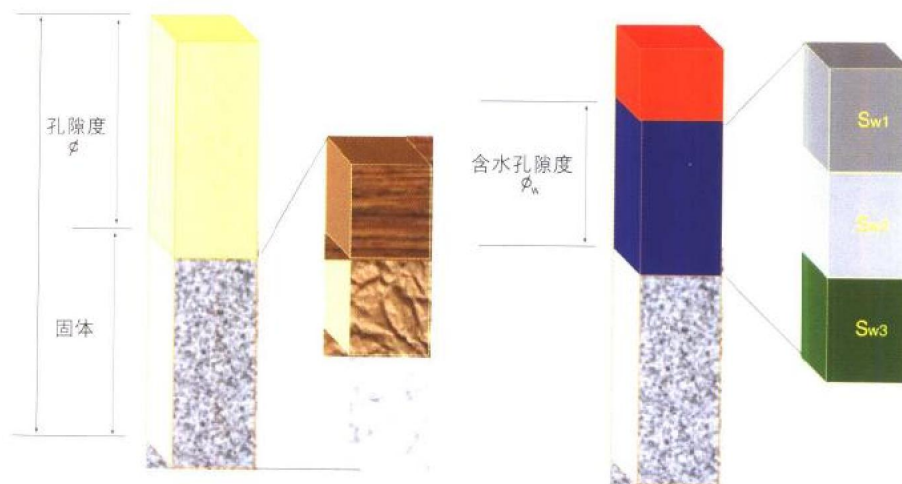
图 1-1 孔隙度、渗透率、流体饱和度是描述油气藏基本特征的重要参数

孔隙度反映了地层储存流体的能力；渗透率反映了地层允许流体流动和产出的能力；饱和度则反映了流体在孔隙空间中储存的比例。准确确定地层孔隙度、渗透率和流体饱和度是油气测井最基本和最重要的任务之一。

测井技术自1927年诞生以来，逐步形成了一套常规的确定孔隙度、含水饱和度以及识别油水层的方法。例如，利用中子、密度或声波测井可以确定地层孔隙度；利用电阻率测井结合阿尔奇公式，可以确定含水饱和度；然后，根据含水饱和度的大小，把地层划分为水层、油层或油水同层。

这些常规方法，在地质条件比较简单、岩性和地层水都比较单一的情况下是可行的。迄今，大多数油气藏的孔隙度和流体饱和度等基本特征都是这样描述出来的，但是，尚无行之有效的估算渗透率的常规方法。

图 1-2 常规测井确定孔隙度和饱和度的基础是体积模型与阿尔奇公式

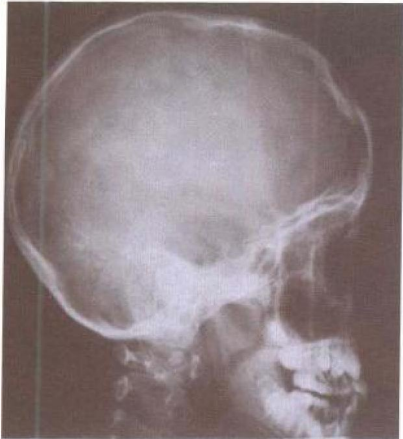


在用体积模型建立的孔隙度测井响应方程中,骨架固体的贡献,有时甚至会远大于孔隙流体的贡献;而且,在骨架矿物成分增加后,矿物组成及其参数的选取,对孔隙度计算结果会产生显著影响。这是复杂岩性以及致密地层孔隙度计算的困难之所在。

在用阿尔奇公式建立的含水饱和度方程中,地层水电阻率是最关键的参数之一。当有多种具有不同导电特性的水并存于孔隙空间时,阿尔奇公式即变得无能为力。而且,对油藏工程来说,即使含水饱和度已经被准确地计算出来,其量值的大小在很多情况下也并不是储层能否产水的唯一判据。例如,有些微孔发育或粒间水丰富的地层,电阻率测井计算的含水饱和度可能很高,但是,由于这些水均处于束缚状态,仍然可能是很好的油层。这样的地层往往以低电阻率的形式出现,很容易被漏判。这是相当一部分低阻油气藏的测井解释困难之所在。

如果有一种测井方法,在确定孔隙度时,不受骨架固体的影响;在确定流体饱和度时能够避开地层水电阻率,而且,可以把不同赋存状态的水,如束缚水和自由水区分开来,那么,它一定会成为油气评价的首选方法。核磁共振正是这样一种方法。

医学X射线成像：
只有固体被看到



医学MRI：
只有流体被看到



图1-3 X射线CT与核磁共振成像是医学中非常重要的诊断工具

现代医学中，X射线CT和核磁共振成像（MRI）是两项常用的重要诊断工具，前者主要反映骨骼方面的病变；后者则更能反映软组织表现出来的疾病。

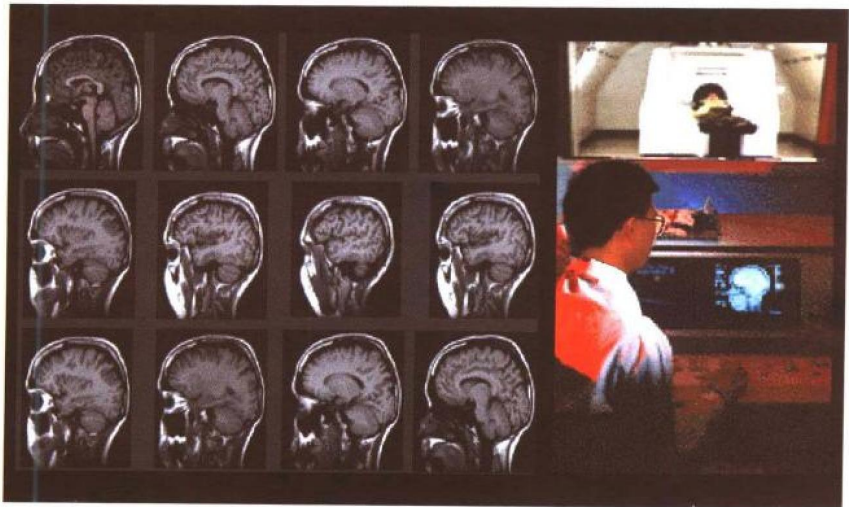
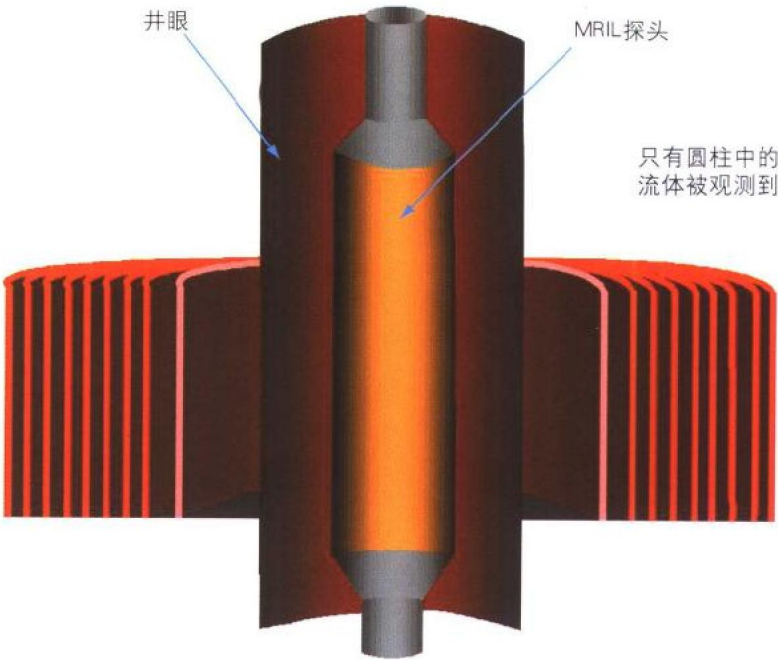


图1-4 核磁共振成像具有许多独特的优越性

在这张医学核磁共振成像系统（右）和人脑成像（左）的示意图中，平放着的磁体在其中有一个圆腔，病人可以躺在其中接受观测（右上）。操作人员通过计算机实现观测模式的设置、射频脉冲的发射、回波信号的采集以及图像信号的处理与显示（右下）。受检部位的内部结构与病变情况可以以直观明了的方式显示出来（左）。这些图像显示了人脑不同部位的内部结构，其独特之处在于：

1. 它们都是一些很薄的切片，相互之间没有影响，切片外面的物质对切片内的观测也没有影响；
2. 只有流体或软组织的信号被观测和记录下来，固体对观测结果没有影响；
3. 利用不同的观测模式，可以对不同的核磁共振特性进行观测，从而有效地检测成像部位的病变情况和程度。

图 1 - 5 核磁共振测井是医学核磁共振成像原理的直接应用



医学核磁共振成像的独特之处在核磁共振测井中得到充分体现。图中，一支新型磁共振成像测井仪（MRIL - Prime）的探头，由磁体和天线组成，被置于井眼的中心；而地层，作为观测对象，则处于探头之外，这一点与医学核磁共振成像完全不同。磁体在探头外围产生一个梯度磁场，使得离探头不同距离的氢核具有不同的共振频率。天线发射的电磁波，依频率不同实现对不同径向距离地层的切片观测；对每一个切片，只有孔隙中的流体信号被观测和记录下来，固体骨架对观测结果没有影响；利用不同的观测模式，可以对孔隙流体不同的核磁共振特性进行观测或加权观测，从而有效地区分孔隙中流体的成分和赋存状态。

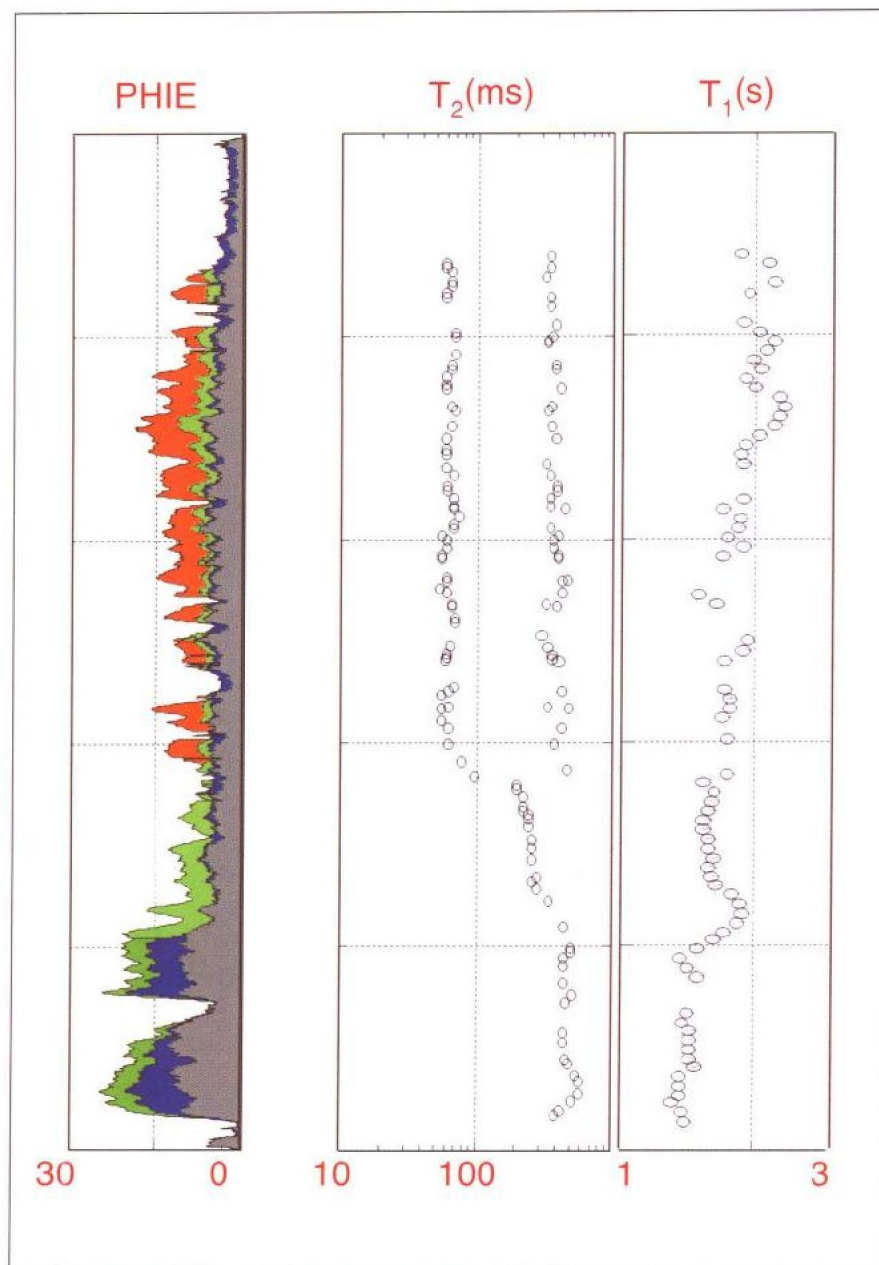
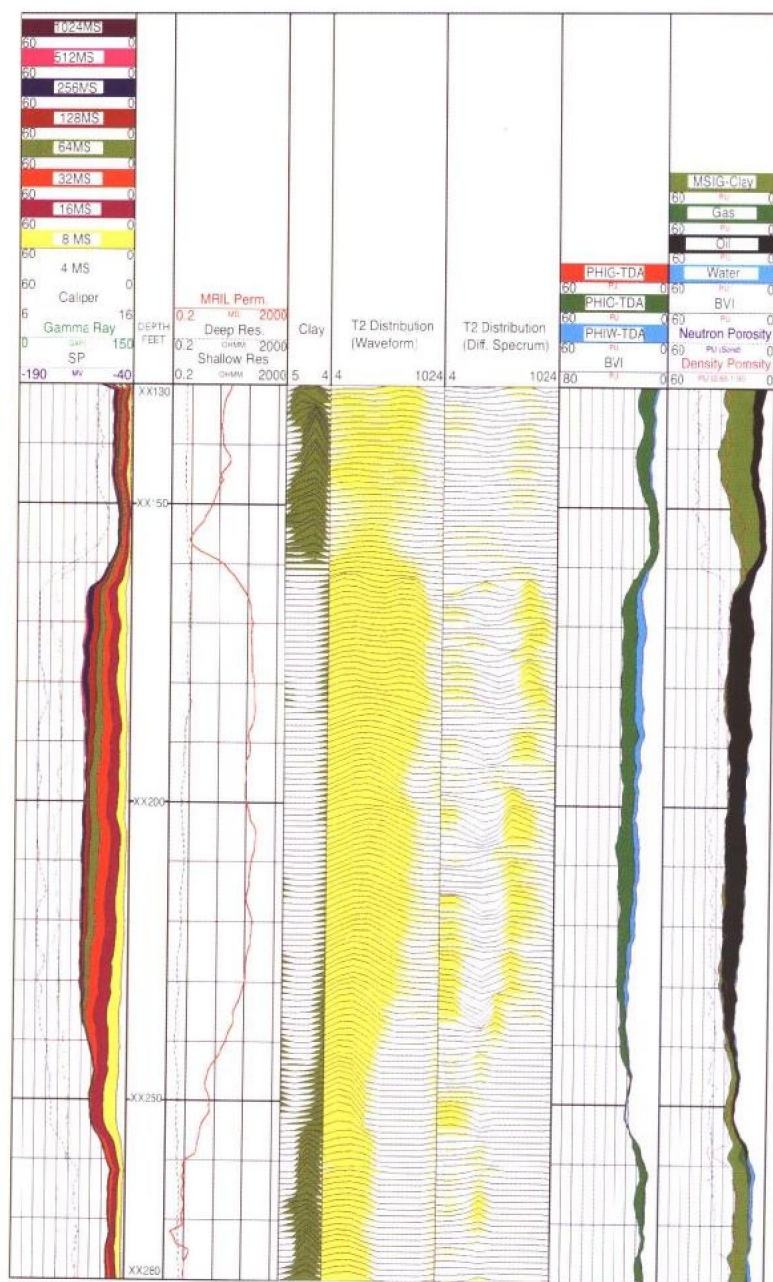


图 1-6 核磁共振测井能够单独进行孔隙流体的识别。

在这个核磁共振成像测井应用实例中，第1道为核磁共振获得的有效孔隙度中毛管束缚水（灰色）、可动水（蓝色）、油（墨绿色）、和气（红色）的孔隙体积；第2和第3道分别为可动流体的核磁共振特性（ T_2 与 T_1 ）搜索结果，可以看出它们与第1道具有对应关系。上部，反映长、短TW回波串差的信号包含两个 T_2 分量，对应天然气和油基钻井液滤液的信号；中部和下部，则只包含一个分量，但在不同层段， T_2 数值有明显的变化。下部可以解释为水层，回波串差中的剩余信号来自油基钻井液滤液，中部可以解释为油层，其 T_2 不同于油基钻井液滤液。可见， T_2 的数值清楚地反映油、水，以及油、气的接触面。

图 1-7 核磁共振测井与常规测井结合实现对孔隙流体的准确描述



在这个低电阻率油藏的实例中,核磁共振测井提供的信息极大地丰富了对储层的认识。第1道除了常规 GR、SP 和井径外,还有从 4 至 1024ms 对应的孔隙度分布;第2道为深、浅电阻率以及核磁共振测井估算的地层渗透率;第3与4道为 T_2 分布(从 0.5ms 到 1024ms);第5道为双 TW 测井 T_2 分布的差;第6道为基于双 TW 测井的时间域分析(TDA)结果,它反映了侵入带孔隙流体的情况;第7道包括中子、密度孔隙度,以及核磁共振与常规电阻率测井综合解释得到的原状地层孔隙流体估算。该井使用的是水基钻井液,TDA 与综合解释结果的差异反映了水基钻井液滤液对 TDA 结果的影响。

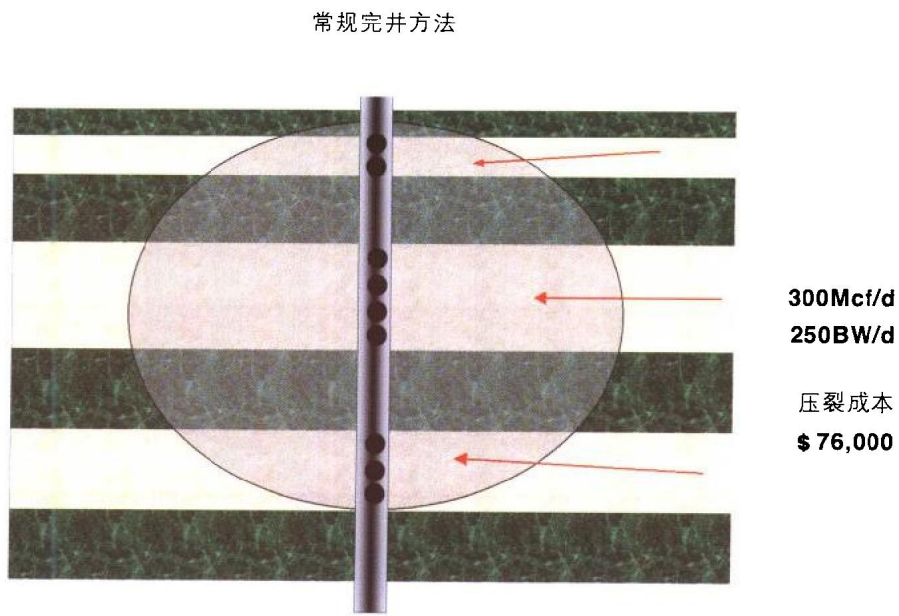
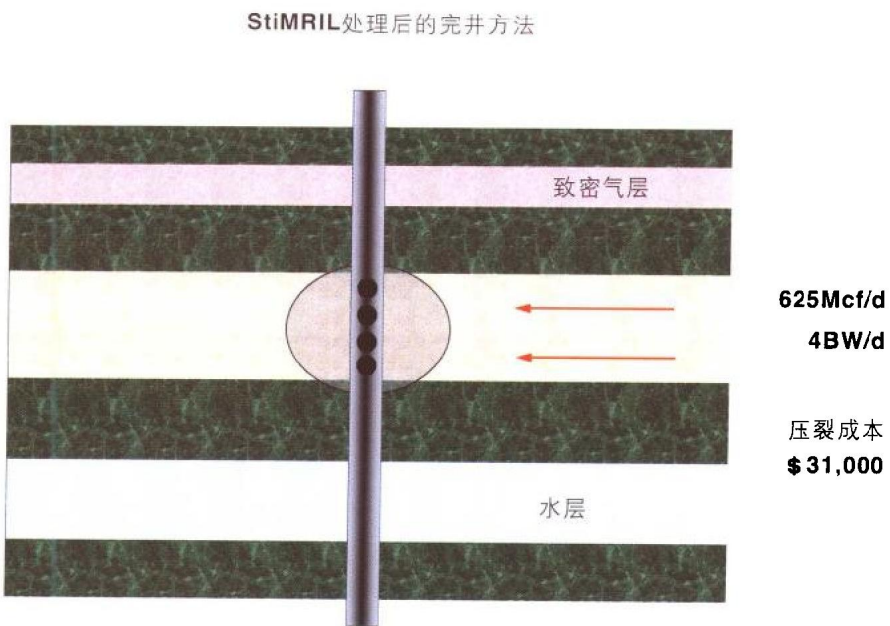


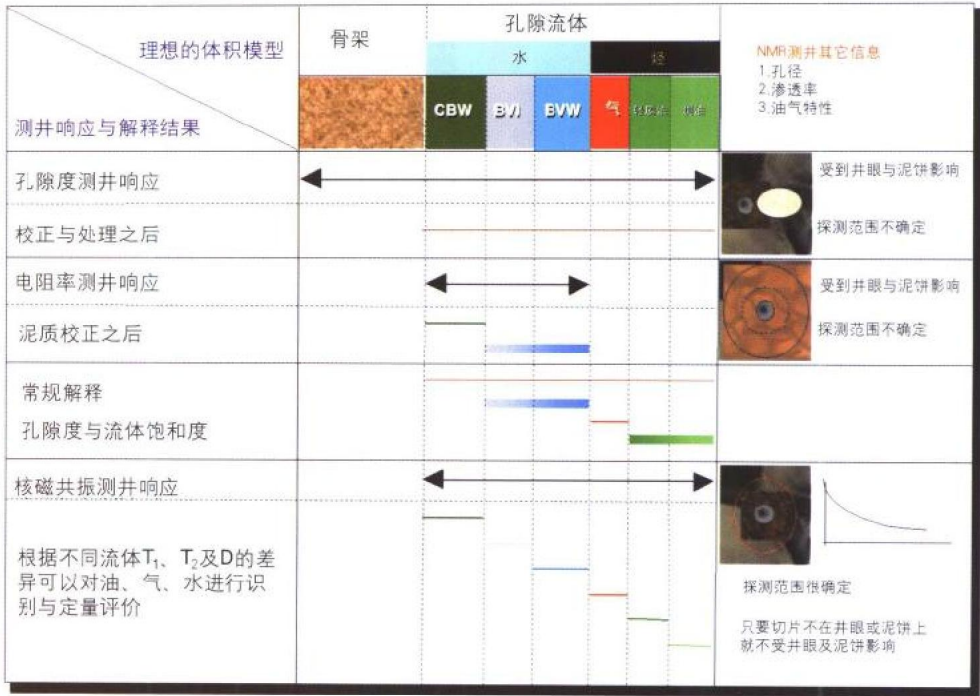
图 1—8 核磁共振渗透率帮助评价油田增产方案



在过去的完井方案和油田增产措施设计中，测井资料的作用较小。核磁共振测井提供的束缚水和渗透率信息则可以为完井及增产措施的效果评价提供更大的帮助。

本例中，常规完井方法把上、中、下三层一起考虑，日产液 300Mcf，其中水 250B，而工程成本达 \$ 76,000。在利用核磁共振测井信息后，发现上部致密气层无压裂价值，下部水层则更不必包含在生产方案中，只有中间的一层有意义，完井后日产液 625 Mcf，其中水 4 B，工程成本只有 \$ 31,000。

图 1-9 核磁共振测井与常规孔隙度及电阻率测井响应特征的比较



体积模型的基本构成包括骨架固体和孔隙流体两部分。孔隙流体可以分成水和烃；水又可以细分成泥质束缚水、毛管束缚水、可动水；而烃则能细分成天然气、轻质油和稠油。

对于常规孔隙度测井，体积模型中的各个组成部分对它们的响应都有贡献，而且，骨架矿物与干粘土的贡献甚至大于孔隙流体的贡献，即骨架的变化更容易使孔隙度测井响应发生变化。

对于电阻率测井，它是含水孔隙体积的反映，体积模型中的水，包括泥质束缚水、毛管束缚水、可动水等，都会有相应的贡献。通常，泥质束缚水与非泥质束缚水之间在导电性能上可能存有差异，并有相应的模型加以区分，如双水模型。但是，毛管束缚水与可动水，尽管对油气开采具有完全不同的意义，在导电性能上却没有任何差异，不能依电阻率测井响应来区分。

常规孔隙度测井与电阻率测井在响应方式上都是一中宏观平均效应，其探测范围都是边界不明确且多变的区域，井眼、泥饼、侵入等都会对观测结果产生影响。

核磁共振测井，固体骨架对其响应没有贡献，观测信号只来自于孔隙中的流体。而且，孔隙中不同的流体，如泥质束缚水、毛管束缚水、可动水、天然气、轻质油、稠油等，具有不同的核磁共振性质，通过一定的方式或观测模式，可以有效地识别这些流体，并进行定量解释。

核磁共振是一种定位的切片观测，探测区域是一个可以预先知道的固定形状，井眼、泥饼等区域只要不在这个固定形状当中，就不会对观测结果产生影响。

此外，核磁共振测井还提供岩石孔隙直径、渗透率、油气特性、泥质等用别的方法无法得到的许多重要信息。观测区域内岩石的粒径、裂缝、溶洞等在核磁共振响应中也会有一定的表现，对它们的分析和应用仍然在研究之中。