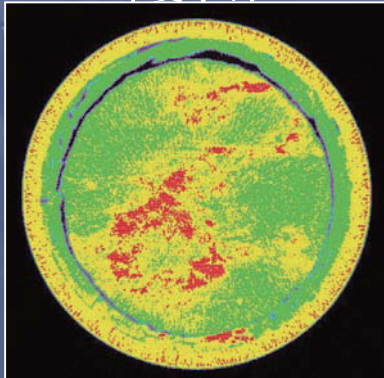


斯伦贝谢

油田新技术

2013年夏季刊



地层密度的无源测量
岩心实验-地层评价的基石
非常规油气储层的多级压裂增产技术
非常规油气资源的增产设计

Schlumberger

岩心分析：将专业知识结合在油藏分析中

通过资产管理来优化油气生产，需要了解油藏的岩石与流体特性。例如，井位规划依赖于从地震探测预测的岩石孔隙度及其他岩性。增产与完井的设计取决于地质力学强度知识以及通过测井及岩心测量获取的渗透率数据。实现油藏增产需要获取大量反映地层岩石与流体各种特性的数据，以便设计油气的现场生产。在整个油田寿命期内，岩石及岩石内部流体的评价对于油藏开发与管理至关重要。

虽然许多油藏特性可以利用地震探测或测井研究进行远程评价，但是最详细最准确的岩石与流体参数来自于岩心样品的实验室分析。新的斯伦贝谢油藏实验室机构致力于研究岩石与流体特性的相互关系，帮助作业者理解油气资源。

新机构在全球范围内拥有超过25个试验室，利用标准化的程序与设备支持岩心数据分析。这种岩石与流体分析服务的全面整合有助于客户在做出油藏开发决策时有效降低风险。同一机构结合两类服务，提高了在实验执行与实验结果解释方面的专业技术能力。

岩石一流体相互关系最为明显的一个方面在于提高采收率研究。为了检测气体混相与化学驱油的增产效果，工程师需要了解地层岩石与流体在各种储层条件下的特性。在提高采收率实验室的岩心驱油实验中，在储层条件下采用了实际储层流体。

多年以来，斯伦贝谢提供了高级流体专业技术知识、地质力学与非常规油气资源评价服务。在2012年，公司新增了几个从事常规岩心分析的商业实验室，并在休斯顿建立了中心实验室。这些实验室提供了常规与特殊岩心分析的能力，特别注重于气体混相与化学驱油是提高采收率研究。

在公司整个发展过程中，斯伦贝谢一直在利用其地质专业知识的积累来开发测井工具、随钻测井技术、压裂工艺以及其它需要理解岩石-流体相互关系的各类服务。新的商业岩心分析能力也是建立在长期岩石研究的基础之上。

作为一个企业，我们一直通过岩石物理分析来回答关于油藏的各种问题。现在，我们将这一传统延伸到常规岩心分析领域，回答了关于地层的多个基本问题：地层是否含有流体？是否存在油气？油气是否能够流过地层？（见“岩心实验-地层评价的基石”【第16页】）。答案来自于对地层孔隙度、饱和度以及渗透率的测量。

上述特性是任何油藏岩石物理研究必需包含的内容。此外，岩心测量提供了一种校准电学特性与核磁共振响应的测井解释结果，以及取得井下孔隙度与饱和度预估值的方法。油藏岩心的岩性与沉积特征也可以进行详细评价。

油藏工程依赖于动态流动模拟，而岩心分析是进行动态流动模拟的基础。多相流动特性—相对渗透率与毛细管压力—来自于在特殊岩心分析实验室开展的相关测量。其它实验室流动研究的设计目的是评价提高采收率工艺，评估多种原因造成的地层损害。

岩心分析经常被称为岩石特性的地面实况。与远程传感方式相比，在实验室中我们可以更加精确和准确地测量各种岩心特性。但同时，我们也需要了解实验室测量可能无法反映现场条件。现场条件可以在较大或较低程度上进行模拟，但是钻井和回收作业对岩石造成的改变难以逆转。要得到全面的了解需要综合所有来源的信息—包括实验室和现场信息。凭借广泛的专业知识与技能，斯伦贝谢可以提供必要的帮助和指导。

岩心分析的未来是光明的。我们正在将斯伦贝谢的数字岩心分析商业化，服务范围涵盖从全岩心分析到纳米成像与流动模拟。在未来几年中我们将引入更多的创新性服务。

马克 安德森
岩心物理学部主任
斯伦贝谢油藏实验室
美国德克萨斯州，休斯顿

马克 安德森是斯伦贝谢休斯顿岩心物理学的部门主任，于2000年加入公司。他担任了11年的油田新技术编辑与执行编辑，而后重回岩心分析岗位，帮助斯伦贝谢发展新的业务。他在斯伦贝谢的职业生涯始于1981年，任职于塔尔萨的阿莫卡研究中心岩石特性研究院。此后他在斯塔万格工作了数年，负责管理阿莫卡挪威外部研究项目并编著了北海白垩地层石油研究一书。马克也是多项技术论文的作者，包括其为油田新技术撰写的23篇文章。他取得了美国诺曼奥克拉荷马大学工程物理学的工学学士学位以及美国马里兰巴尔的摩约翰霍普金斯大学的物理学博士学位。

《油田新技术》(中文版)

主编

刘培武, 李挺, 田红
吴金龙, 纪佳佳
油田服务
斯伦贝谢中国公司

翻译

传神(中国)网络科技有限公司

制作 / 印刷

北京星宇大川商务服务有限公司

顾问委员会委员

Lawrence Chou
油田服务
斯伦贝谢中国公司

李冬松
油藏服务
斯伦贝谢中国公司

曾维忠
油田服务
斯伦贝谢中国公司

钱海燕
油田服务
斯伦贝谢中国公司

Tee Chew Poh
油田服务
斯伦贝谢中国公司

李道君
钻井与测量
斯伦贝谢中国公司

刘海
油井服务
斯伦贝谢中国公司

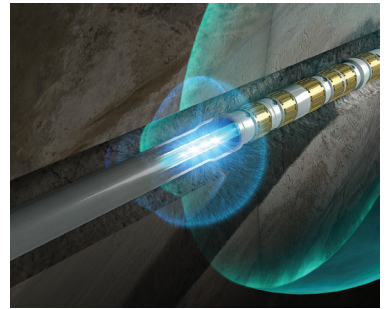
王玉玺
数据解释
斯伦贝谢中国公司

1 岩心分析：运用综合专业知识进行岩心分析

投稿：Mark A. Andersen, 岩心物理学部主任，
斯伦贝谢油藏实验室

4 地层密度的随钻无源测量

一种最近引入的地层密度测量工具利用脉冲中子发生器在地层中感应伽马射线并计算体积密度。容纳新型测量系统的随钻测井工具首次提供了一种紧凑型测井套件，可以与三元结合服务相类比，但不使用放射性核素源。



16 岩心实验—地层评价的基石

油气公司通过取芯获得地下地层的实物样品。通过细致检测样品，可以使作业者确定岩石是否存在含流体的孔隙，如果这些孔隙内含有烃类物质，这些烃类是否可以生产开发。常规岩心分析帮助作业者回答了上述问题和更多其他问题。



《油田新技术》是斯伦贝谢公司出版的季刊，该刊向油田专业人员介绍石油勘探与开发中的技术进步。斯伦贝谢公司将该刊分发给其雇员和客户。

只列有地址的作者是斯伦贝谢公司或分公司的雇员。

油田新技术按季度发行，在美国印刷。欲求电子版的英语、西班牙语、汉语及俄语文章，请访问 www.slb.com/oilfieldreview。

© 2013 斯伦贝谢版权所有。未经事先书面许可，本出版物的任何部分都不得以任何的形式或手段，如电子、机械、照相、录制等进行复制、资料检索或传送。

执行总编
Lisa Stewart

高级编辑
Matt Varhaug
Rick von Flatern

编辑
Richard Nolen-Hoeksema
Tony Smithson

特约编辑
Ginger Oppenheimer
Michael Oristaglio
Rana Rottenberg

设计 / 制作
Herring Design
Mike Messinger

插图
Chris Lockwood
Tom McNeff
Mike Messinger
George Stewart

顾问委员会委员
Gretchen M. Gillis
Aramco 服务公司
美国得克萨斯州休斯敦

Roland Hamp
Woodside 能源有限公司
澳大利亚珀斯

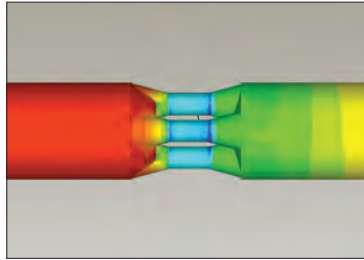
Dilip M. Kale
ONGC 能源中心
印度德里

George King
阿帕奇公司
美国得克萨斯州休斯敦

Alexander Zazovsky
雪佛龙公司
美国得克萨斯州休斯敦

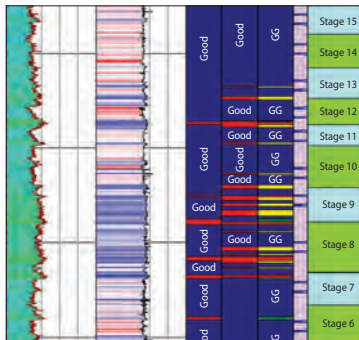
26 非常规油气储层的多级压裂增产技术

为了优化从页岩中生产石油的经济效益, 服务公司正在改良完井技术, 使致密地层的工业性开发成为可能。作业者现在可以利用新型完井工具与系统的优势, 显著提高低渗透地层增产的效益。



34 非常规油气资源的增产设计

综合利用水平钻井与水力压裂工艺的优势, 作业者能够进入含有油气的超低渗油藏。一套经过工程设计的系统完井设计方法利用了综合工作流程管理软件系统, 使非常规油藏的油气提取更加有效。



47 投稿人

封三 《油田新技术》下期内容介绍

编辑部地址:

油田新技术
斯伦贝谢中国公司
地址: 北京市朝阳区酒仙桥
路 14 号兆维华灯大厦
邮编: 100015
电话: (86) 10-64306889
传真: (86) 10-64309505
电子邮件: jji@slb.com

订阅

您可以从任何一家斯伦贝谢销售办公室取得用户订阅。
电子邮件: jji@slb.com

英文版印发咨询

Matt Varhaug
油田新技术
美国, TX 77056,
休斯顿, 圣菲利普 5599
(1) 713-513-2634
电子邮件: DistributionOR@slb.com

地层密度的随钻无源测量

出于环境、健康与安全方面的考虑鼓励服务公司寻求地层密度测量所依赖的传统测井源的替代方案。科学家最近开发了一项利用脉冲中子发生器的可靠的随钻测井测量技术，所用中子发生器与数十年来在电缆测井工具中配置的中子发生器类似。

Françoise Allioli
Valentin Cretoiu
Marie-Laure Mauborgne
法国克拉玛特

Mike Evans
美国德克萨斯州舒格兰

Roger Griffiths
马来西亚八打零查

Fabien Haranger
Christian Stoller
美国新泽西州普林斯顿

Doug Murray
阿联酋阿布扎比

Nicole Reichel
挪威斯塔万格

《油田新技术》2013年夏季刊：25卷，第2期。
©2012斯伦贝谢版权所有。
版权 2013 斯伦贝谢
鸣谢德克萨斯州舒格兰Doug Aitken协助编撰本篇。
EcoScop与NeoScope为斯伦贝谢产品标志。

地层密度测井最初出现于20世纪50年代中期。亨利多尔在密度测量以及当今在用的许多其他岩石物理测量的发展中享负盛名，他在1951年得到了地层密度测量的专利。亨利多尔协助设计的地层密度测量工具使用放射性同位素源进行测量，放射性同位素源发出伽马射线并计算穿过地层返回工具的伽马射线数量。最近引进的一项新技术摒弃了随钻测井所应用的传统伽马射线源。

密度测量工具最初被称为伽马-伽马密度装置，因为伽马射线从测井源发出，然后穿过地层的返回伽马射线由工具计数。¹在过去的半个世纪里，计数返回伽马射线所用的硬件与电子元件可能经历了革命性变化，但是，测井源仍然是地层密度测井的一项基本要求。

传统的电缆及随钻测井地层密度测量工具使用的是铯-137伽马源。²为了取得统计精确的测量结果，通常使用63- GBq或更高的伽马源强度。³密度工具并非使用放射源进行岩石物理测量的唯一工具。传统的热中子孔隙度测量法也依靠镅-铍【²⁴¹AmBe】源产生用于测量的中子。

各家服务公司竭尽全力，将使用放射源的相关风险控制在最低水平，这些装置必须小心处理，避免造成健康、安全和环保问题。⁴在全球多个地区，传统放射源物质的使用正在得到限制，甚至禁用。作为应对，服务公

司一直尝试研发替代需要放射源的工具的方案。⁵脉冲中子发生器正在随钻测井和电缆测井应用中逐渐地替代²⁴¹AmBe中子源。⁶

脉冲中子发生器利用带电粒子加速器产生高能快中子。这些快中子之间的非弹性碰撞以及在地层流体和矿物质中发现的一系列原子的核可以使这些原子核处于激发状态。当原子核通常通过云发出一束或多束伽马射线恢复基态。这些伽马射线共同形成可以在分散在地层中的云状GR源。在穿透地层的过程中，伽马射线将经历衰减。与放射性同位素源相同，伽马射线的衰减主要取决于组成地层的物质的电子密度。

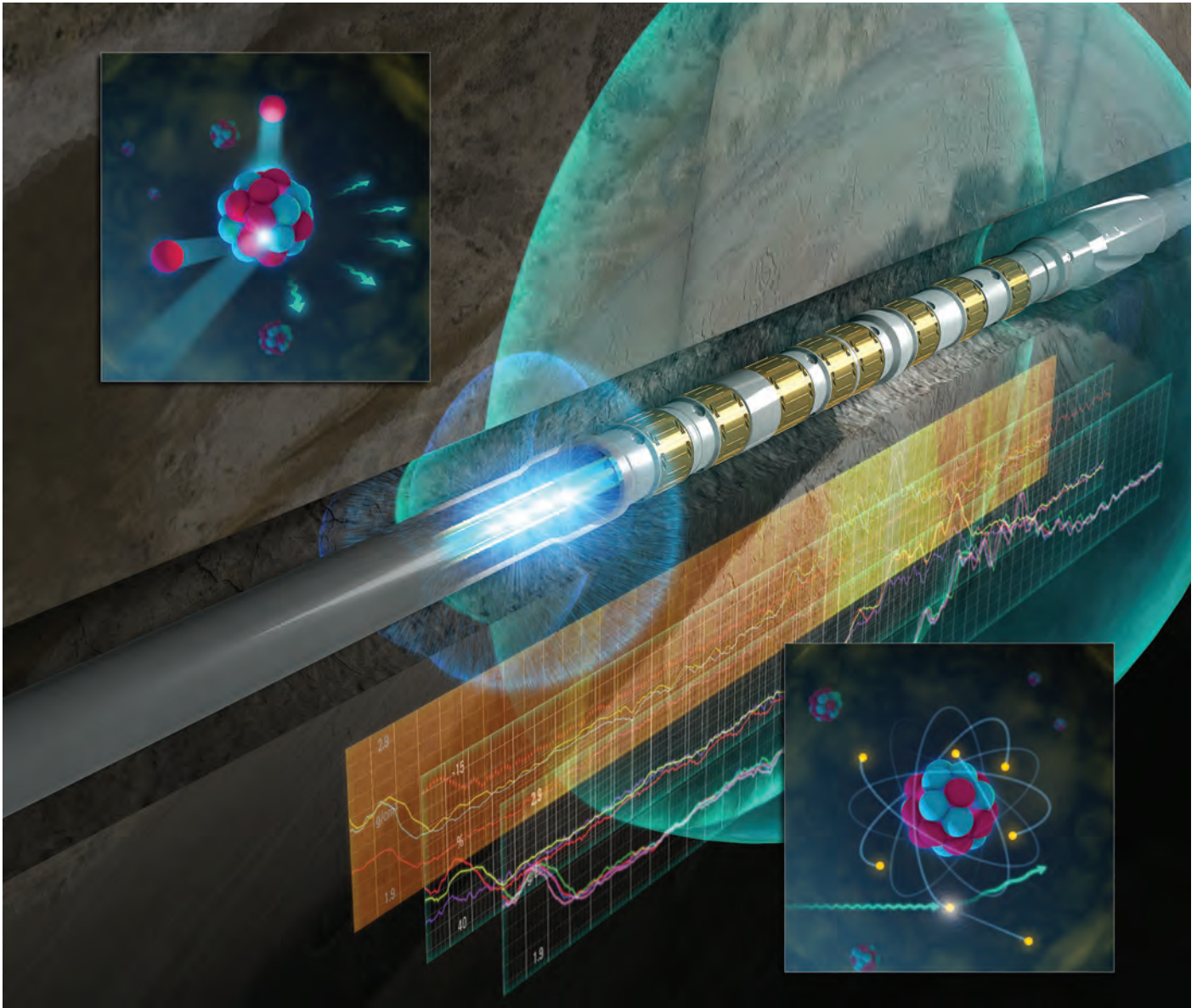
科学家已经开发了一种利用分布的伽马射线云来计算地层密度的技术，虽然他们首先必须寻找一种在工具上准确模拟伽马射线从地层到一个或多个探测器转移的方法。得到的总体积密度测量类似于从伽马-伽马密度工具进行测量。

但这种测量利用的却是中子激发伽马射线。从这种技术衍生的密度测量方法被称为无源中子伽马密度（SNGD）测量。⁷

本文提出了无源中子伽马密度测量理论，讨论了无源随钻测井密度测量工具的一些优势。现场应用验证了这项新技术。

可以合理实现的最低水平原则

用于岩石物理分析的传统放射源在运至钻井平台或回运时需要进行保护隔离，储存于能够防止人员暴露的



防护罩内。容纳放射性元素的压力容器使用特殊材料制成，这种材料能够保护放射源不受机械伤害和恶劣井筒环境中的腐蚀。

将放射源装入测井工具时，工人应严格遵守安全作业程序，以消除潜在的暴露风险。当工具下至钻台面

以下时，人员暴露于放射环境的风险也随之消失。放射源必须小心操作处理，但采取了规定的安全预防措施之后，暴露风险很低。

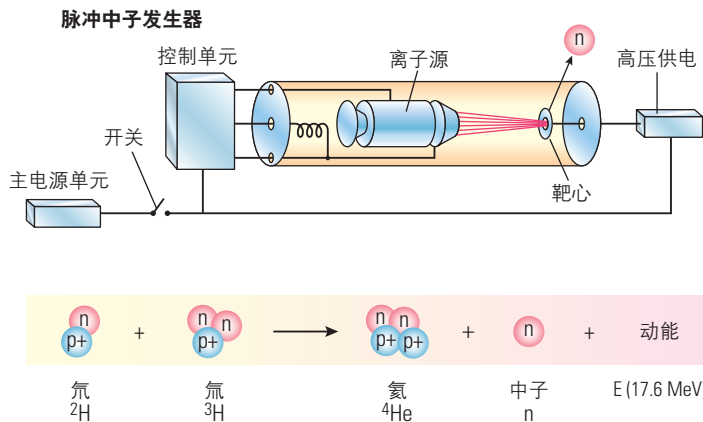
在核时代早期，在岩石物理分析中使用的许多工具正当发展，当时

防辐射安全措施集中体现在时间、距离和屏蔽方面：将暴露时间控制在最短，与放射源保持最大合理距离，并在人与放射物之间保持屏障（屏蔽）。当今，这些原则仍适用于使用传统放射源的工作，相关组织也确立

1. 在本文中，放射源指的是在岩石物理测井工具中使用的发出电离辐射的放射性同位素装置。
2. 放射性同位素¹³⁷Cs的半衰期为31.17年，以662 keV的平均能量水平发出伽马射线。
3. 贝克勒尔 (Bq) 是一定数量放射性物质的活度单位，每秒有一个原子核发生衰变。在采取Bq作为标准SI测量单位之前，放射性用居里 (Ci) 表达，即1克镭同位素²²⁶Ra的放射性。1GBq = 0.027027 Ci。
4. Evans M, Alliofi F, Cretoiu V, Haranger F, Laporte N,

- Mauborgne M-L, Nicoletti L, Reichel N, Stoller C, Tarrus M 和 Griffiths R: “无源中子—伽马密度 (SNGD): 一种无放射性同位素体积密度测量方法: 物理原理、原则、环境效应及应用。” SPE 论文 159334, SPE 年度技术会议展览文章, 美国德克萨斯州圣安东尼奥 2012 年 10 月 8 日 -10 月 10 日。
5. Reichel N, Evans M, Alliofi F, Mauborgne M-L, Nicoletti L, Haranger F, Laporte N, Stoller C, Cretoiu V, El Hehiawy E 和 Rabrei R: “中子—伽马密度 (NGD): 无放射性同位素体积密度测量的原则、井场测试结果与测井质量控制。” SPWLA 第 53

- 届测井专题年会论文集, 哥伦比亚, 卡塔赫纳, 2012 年 6 月 16 日 -6 月 20 日, 论文 GGG。
6. 关于脉冲中子发生器的更多信息: Adolph B, Stoller C, Archer M, Codazzi D, el-Halawani T, Perciot P, Weller G, Evans M, Grant J, Griffiths R, Hartman D, Sirkin G, Ichikawa M, Scott G, Tribe I 和 White D: “不再等待: 随钻地层评价” *油田新技术* 17, 3号 (2005秋季): 4-21。
 7. 无源一词表示该测量方法不使用放射性同位素源。



▲ 脉冲中子发生器 (PNG)。脉冲中子发生器是利用聚变反应产生中子的自持式粒子加速器。高压电位将氢的电离氘和氚同位素向掺杂氦的靶心 (顶) 加速。聚变反应 (底) 产生一个 ^4He 核与一个中子。反应能转变成两个粒子的动能, 并当粒子在物质中被阻止时转化成热能。中子以很快的速度离开反应, 保留着释放总能 17.6 MeV 中大约 14 MeV 的动能。断开主电源时, 脉冲中子发生器不产生中子。

了暴露极限来保障经常处理这些物质的工人的安全与健康。同时工人也将处在密切监控之下, 以确定暴露水平。

但是, 关于核装置表面爆炸对人体造成的长期辐射效应的观察, 引领科学家们去开发一种应对人体暴露的新方法。因此出现了可以合理实现的最低水平 (ALARA) 原则, 成为法规制定者的标准。可以合理实现的最低水平原则的目标是随时随地尽可能消除暴露, 这一目标驱使服务公司开始研究 ^{137}Cs 和 $^{241}\text{AmBe}$ 等传统放射源的替代。脉冲中子发生器是传统放射源替代品的一个例子。⁸

脉冲中子发生器是一种微型粒子发生器。氘 [^2H] 和氚 [^3H] 加速进入氦靶, 释放出高能 (约 14 MeV) 中子 (上文图)。不通电时, 脉冲中子发生器不发出外部辐射。科学家与工程师们于 20 世纪 50 年代开发出第一代脉冲中子发生器。此后, 这些装置一直在多种井下应用中实施。包括中子密度测量工具, 过套管地层评价工具以及俘获与非弹性散射能谱服务。

脉冲中子发生器作为 $^{241}\text{AmBe}$ 中子源的可行替代品出现。为了进行随钻测井操作, 人们开发了涡轮发电机, 用来提供操作脉冲中子发生器所需的井下电源。这一进步使设计工程师能

够将脉冲中子发生器结合在 EcoScope 多功能随钻测井等服务和 NeoScope 工具中。⁹ 地层密度被许多地质学家视为地层孔隙度量化测定的最重要参数之一, 而替代地层密度测量-伽马-伽马密度工具中使用的 ^{137}Cs 放射源的尝试却一直没有成功, 直至最近才有成就。

出于数个原因, 科学家们一直不能找到 ^{137}Cs 放射源测量的替代方法。例如, 没有可比较的电子伽马射线发生器, 代替其他放射源被视作更重要的选择。 $^{241}\text{AmBe}$ 的半衰期为 432 年, 大大超过了 ^{137}Cs 大约 30 年的半衰期。 $^{241}\text{AmBe}$ 中子源的活性较高, 同时也更难屏蔽。¹⁰ 如果随钻测井工具在井中遇卡, 作业者必须确保放射源将在数百乃至数千年里保持原位, 并保持完整与隔离状态。 ^{137}Cs 较短的半衰期与较低的辐射毒性并不能消除风险, 但与 $^{241}\text{AmBe}$ 相比, ^{137}Cs 造成长期后果的可能性降低。¹¹

作为一种规避 $^{241}\text{AmBe}$ 中子源相关风险的方法, 部分作业者专门选择使用了以脉冲中子发生器为基础的电测井工具和随钻测井中子密度工具, 避免使用带有传统放射源的工具。此外, 某些国家可能强制性完全禁用传统放射源, 这是也作业者与服务公司关注的问题。

造成密度测量放射源替代延迟的另一个原因是, 伽马-伽马测量法测得的体积密度是一个较直观的岩石物理参数, 在数十年里被测量解释单位所接受。使用脉冲中子伽马密度测量工具代替伽马-伽马密度测量工具, 增加了复杂程度并对基础测量物理进行改变。¹² 因此, 科学家们已经投入大量时间与资源来理解使用感生伽马射线进行密度测量所涉及的物理学条件。在 2005 年, 斯伦贝谢的科学家与工程师们提出了计算脉冲中子伽马密度测量结果所需的运算法则, 展示了复制传统地层密度测量法的无源密度测量是可以开发的。七年后, 他们在油气开发领域推出了第一代商业化、以脉冲中子发生器为基础的随钻测井伽马密度测量工具。这套工具能够提供可与传统伽马-伽马密度工具相比拟的高品质体积密度测量结果。由于该项技术利用脉冲中子发生器而不使用传统放射源, 新工具符合可以合理实现的最低水平 (ALARA) 目标的要求。¹³

8. 关于测井工具中使用的放射源的更多信息: Aitken JD, Adolph R, Evans M, Wijeyesekera N, McGowan R and Mackay D: “钻井工具放射源: 随钻测井工具设计、开发与操作全面风险分析” 论文 SPE 73896, 于 SPE 油气勘探和生产健康安全环境国际会议上提出, 吉隆坡, 2002 年 3 月 20 日-3 月 22 日。

9. 日本国家石油和金属公司 (JOGMEC), 日本国家石油公司 (JNOC) 前身, 与斯伦贝谢在一个研究项目中合作开发能够降低传统化学源需求的随钻测井技术。围绕脉冲中子发生器 (PNG) 设计的 NeoScope 与 EcoScope 服务就利用了技术合作形成的技术。脉冲中子发生器与单钻链内综合测量套件是 NeoScope 与 EcoScope 服务的关键构件, NeoScope 与 EcoScope 服务提供了改变游戏格局的随钻测井技术。

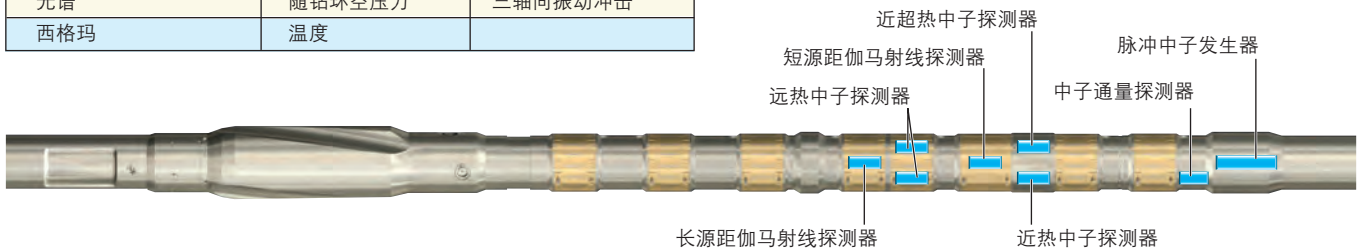
10. 发出伽马射线的放射源可以使用铅进行屏蔽, 虽然铅并不是中子的有效屏障。中子源屏蔽体通常含有聚乙烯。

11. Aitken et al, 参考 8。

12. 在部分地区, 作业者将硬石膏测定视作一种验证工具正确校准的方法。该数值-密度 2.98 g/cm³ 在无源中子伽马密度测量取得的地层密度范围之外。

13. NeoScope 工具使用的脉冲中子发生器含有少量的氚的放射性同位素-氚-1.6 Ci。氚的半衰期为 12.3 年。氚也可以与磷联合使用于夜光表盘和建筑物出口标志。

以脉冲中子发生器为基础的测量	其他测量	
中子-伽马密度	排列电阻率	方位伽马
中子孔隙度	双井径超声测井	近钻头井斜角
光谱	随钻环空压力	三轴向振动冲击
西格玛	温度	



▲ NeoScope 随钻测井工具及其能力。工程师设计了 NeoScope 工具（下方图），即在一根 7.6-m【25 英尺】长的钻铤中并置几种岩石物理测量。表格（上方表）汇总了工具的测量能力。

不只是密度

开发无源中子伽马密度测量模型的科学家们与工程师一起将这一新的设计概念结合在 NeoScope 无源随钻地层评价服务之中。NeoScope 平台结合了六项岩石物理测量-无源中子伽马密度，中子密度，元素俘获谱，西格玛，电阻率与方位自然伽马射线—这些都配置在同一条较短的钻铤中（上文中）。NeoScope 随钻测井工具一般靠近钻头，向钻井工程师提供早期准确的地质导向数据。近钻头定位使得工具能够在钻井液侵入最低时测量，进一步简化数据解释和建模。对于西格玛测量，这特别重要。NeoScope 工具也包括测量井眼的尺寸、环空的压力与温度、近钻头井以及三轴冲击振动的传感器。

除了靠近钻头的测量元件之外，NeoScope 工具的设计还具有其他益处；无源中子伽马密度测量比传统的伽马—伽马密度测量探测深度更大，而且测量准确度较不依赖与井壁接触。即使伽马—伽马密度测量工具间距较小，也可能引起测量数据失准，而且井眼不规则度对于传统密度测量工具一直是一个问题（见右侧）。

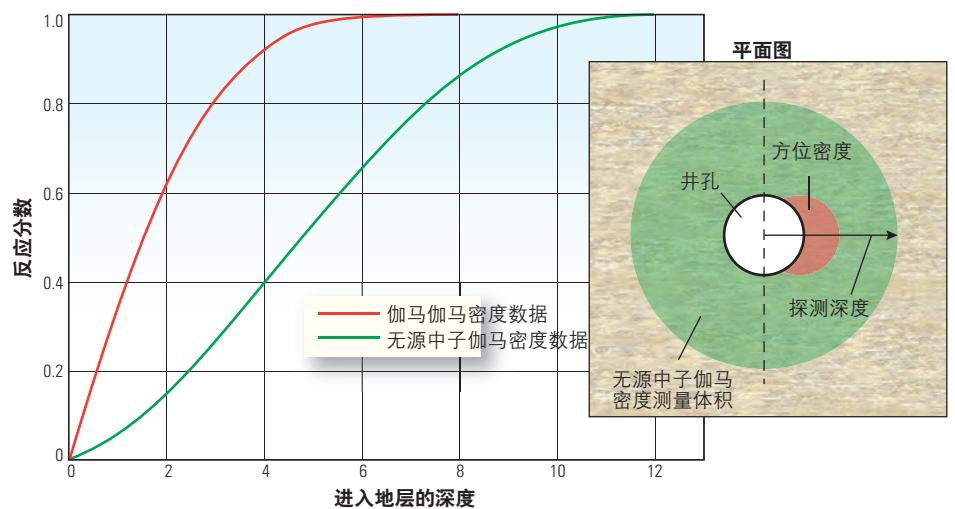
无源中子伽马密度测量工具与其他中子基础测量和电阻率测量工具放在同一钻铤。常规测井管串通常分有进行不同测量独立的工具。配置做进同一根工具的传感器降低了可造成深度参考点错位的工具不规则运动的影

响。这种配置也简化了数据解析，因为传感器在相同静态动态条件下同时测量相同的地层体积。

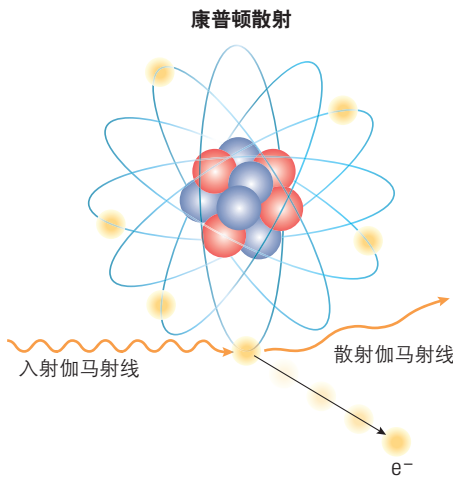
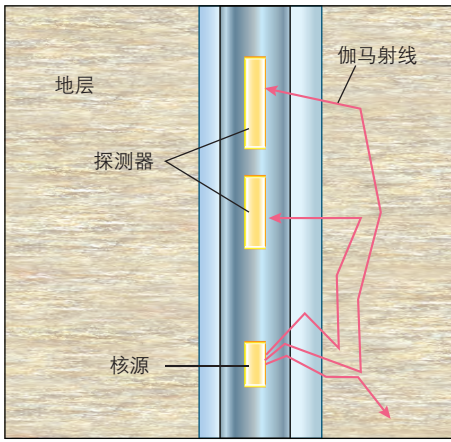
NeoScope 服务工具可测量体积密度和基于中子的岩石物理特性。多数电缆与中子密度历史数据来源于使用 $^{241}\text{AmBe}$ 中子源的工具；NeoScope 服务工具提供了可比较的热中子测量数据。地层含氢指数是中子密度计算的基础，也是工具的输出参数。近-氦3 探测器与远氦-3 探测器的中子计数率用于确定含氢指数与热中子孔隙度。与传统的热中子孔隙度相比，这种井眼基于脉冲中子发生器的含氢指数对环境条件较不敏感。

西格玛—NeoScope 工具的另一个输出参数一是宏观热中子俘获截面。西格玛测量地层俘获或吸收热中子的能力，该项测量可以提供在存在地层盐水的条件下与电阻率无关的流体饱和度。高能快中子由工具发出，与地层中的元素-主要是氢-的核子发生碰撞后减速，然后被受体原子和分子吸收。这些原子被吸收之后产生俘获伽马射线，射线通过探测器计数。热中子被俘获的比率取决于吸收中子的元素的俘获截面—西格玛。

氯是测井中遇到的常见元素中最强的中子吸收剂，其俘获截面大于油或气的俘获截面。如果孔隙度与地层



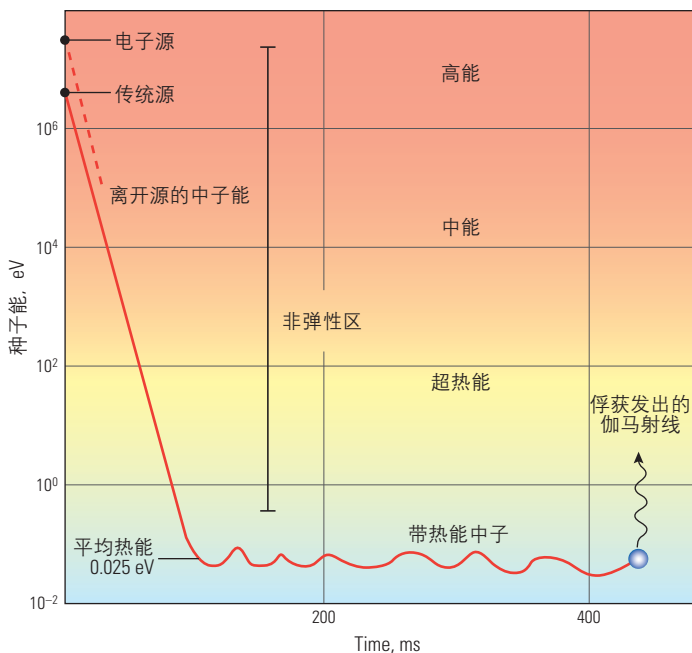
▲ 无源中子伽马密度测量的较大探测深度。传统的伽马—伽马密度测量，例如从随钻测井方位密度工具进行的测量，只能读入地层几英寸深（左图红线），而且测量孔径较窄（右图）。井眼不规则度可能对测量质量带来负面影响。虽然无源中子伽马密度测量具有较大的探测深度，造成测量对于井孔不规则性和间隙较不敏感，但是无源中子伽马密度测量却没有方位分量。



▲ 伽马射线的康普顿散射。对于传统密度测量工具（左图），伽马射线由放射源发出，然后以三种主要方式与地层发生相互作用。康普顿散射（右图）是与体积密度测量相关的主要相互作用方式。其他两种作用是对产生和光电效应（未显示）。在多数测井情况下，光普顿散射量与组成地层矿物与流体的原子的电子密度有关。而电子密度与体积密度直接相关。地层体积密度根据从源中发出，穿过地层后返回探测器的伽马射线的数量进行计算。与密度较低地层的测量结果相比，在密度较高的地层中返回的伽马射线数量较少。

水盐度为已知数，则水饱和度可以根据西格玛确定。由于测量从近钻头处取得，因此在没有泥浆滤液侵入的情况下可以确定西格玛。这建立了与后期过管西格玛测井进行对比的可靠基线。

从西格玛数据计算得来的水饱和度的另一个益处在大角度井测井中显现。当大角度水平井穿过或接近带有电阻率对比度的层面时，电阻率测量结果通常显示出异常读数。由于西格玛数据在层界面不受类似影响，根据



▲ 中子寿命。电子源与传统源都能释放高能快中子。在 NeoScope 工具中使用的来自脉冲中子发生器电子源的中子，初始动能约为 14 MeV，但是在几微秒内达到热能水平（约 0.025 eV）。在开始的几微秒内，中子动能降到约 1 MeV 之前，中子将经历非弹性碰撞，产生伽马射线。这些就是用于无源中子伽马密度处理的伽马射线。数微妙之后，中子达到热能水平并最终被俘获。俘获原子生成伽马射线以返回基态。

西格玛数据计算的饱和度结果可能比以阿尔奇公式为基础的传统计算方法更精确。

无源中子伽马密度测量不具备的是光电因子测量。常规密度测量工具包括了这一推断岩石骨架的岩性指标，而岩石骨架是计算密度孔隙度的关键输入。虽然新技术不能进行光电因子测量，但是 NeoScope 工具可提供中子俘获能谱，传递地层的元素组成信息。与光电因子测量相比，这些数据向岩石物理学家提供了更加精确可靠的岩性判别依据。

促进无源密度测量工具发展的主要驱动因素一直是环保与安全问题。在世界部分地区，相关法规禁止钻井作业者重新进入含有遇卡钻具、遗留传统放射源的储层中。由于脉冲中子发生器不具有放射性，而且当循环停止时不会产生中子，作业者经常被允许在非常靠近丢失无源工具的井眼的区域钻侧钻井。¹⁴

NeoScope 服务工具不使用放射性同位素的性质在非正规区域也很有吸引力，因为许多非常规区带靠近人口中心，当地公众可能对传统放射线持警戒态度。Neoscope 服务工具不使用传统放射源，完全消除了放射源运输与井场处置的需要。Neoscope 服务提供了用于钻井导向的实时自然伽马图像，用于岩石物理分析的三组合数据以及准确评价油藏质量的光谱岩性信息，同时避免了由于放射源存在的公众关注。

并不简单

使用伽马-伽马密度工具测量地层密度的物理学原理相对直接。典型测井放射源中的 ¹³⁷Cs 的衰变时每秒会发出 5.0×10^{10} 伽马射线 (GR/s)。这些伽马射线与地层中原子的电子以几种不同方式发生相互作用，但主要作用方式为康普顿散射（上页，顶部图）。¹⁵ 此类相互作用造成大多数伽马射线被地层吸收，但有少数射线会返回到有固定源距的测井工具的探测

器中。地层密度根据从放射源穿行到探测器的伽马射线的数量进行计算。

一小部分散射的伽马射线-几百到超过10,000 GR/s-将会从放射源发出的伽马射线的原池中抵达探测器。与充满水、油或气的多孔岩石中的情况相比，低孔隙度高密度的岩石会造成返回工具的伽马射线数量较少。

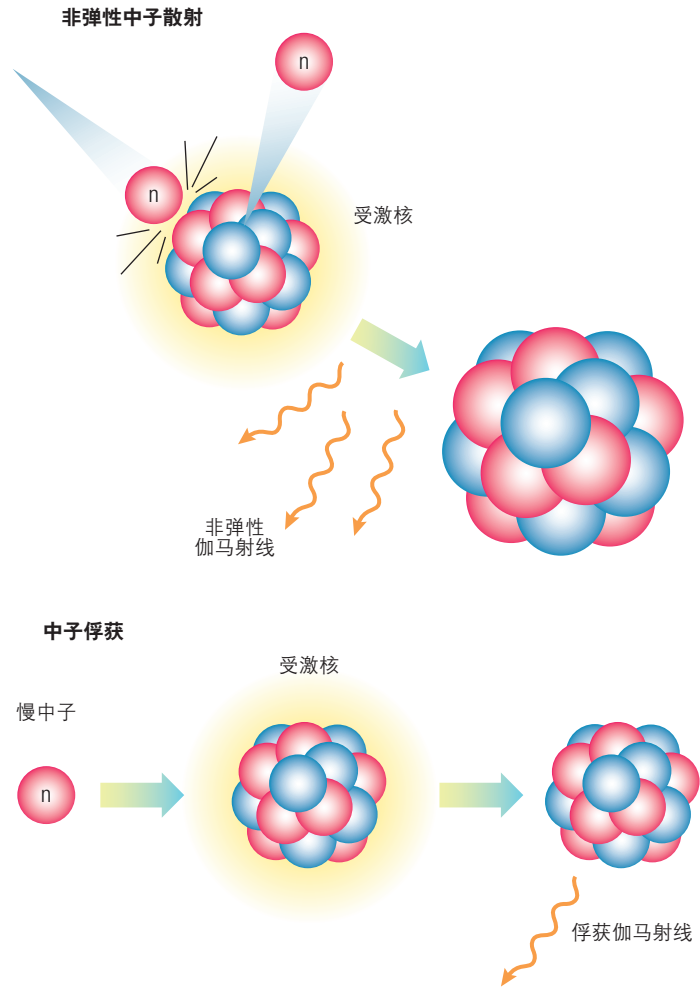
伽马射线输出量在源与源之间也可能不同。为了补偿各类放射源与探测器效率的差异，各套工具都要刻度至固定的参考值，保证工具提供正确的井下密度值。

如前文所说，工程师们已经成功开发了在中子密度与俘获谱方面使用以脉冲中子发生器为基础的工具代替²⁴¹AmBe源的工具。但由于缺乏与脉冲中子发生器类似的电子伽马射线发射器来代替¹³⁷Cs，人们对高品质、不使用放射性同位素的密度测量的追求变得更加捉摸不定。为了攻克这一难关，斯伦贝谢的科学家们调整了部分中子基础测量的应用原则-例如光谱学和西格玛-来开发无源中子伽马密度测量。

脉冲中子发生器产生短脉冲高能中子。中子离开工具并与地层岩石与流体的各种元素发生相互作用。具有最强烈效应的相互作用是占主导地位的中子与氢核弹性碰撞（前页，底部图）。随着连续碰撞，最初的高能中子逐渐慢下来并达到热能水平。¹⁶热中子密度测量工具计数返回工具的热中子数量；根据该计数率计算传统热中子密度。¹⁷

并非所有碰撞都是弹性碰撞。紧随着中子从脉冲中子发生器中首次猝发，但是在中子达到热能水平之前，快中子与地层中的原子核之间发生非弹性碰撞（上方右图）。非弹性碰撞使部分原子核变成受激状态并发出一束或多束伽马射线，返回基态。

科学家们能够利用非弹性伽马射线的能量谱来识别元素，例如碳、氧、硅、钙、铁与硫。工程师们利用



^ 中子相互作用。与岩石物理测井相关的中子相互作用可以分为三类：非弹性散射（顶部图），弹性散射（未图示）与俘获（底部图）。非弹性伽马射线通过一个快中子 - 一般是能量大于1 MeV的中子 - 与一个核子之间的相互作用产生。这种相互作用将核子投入受激状态，使中子以较低能量出现，并发出一束或多束伽马射线。在非弹性伽马射线中，被计数的射线也包括经历高能核反应（例如中子从核子中击出一个粒子 - 如一个阿尔法粒子、质子或第二代中子 - 的核反应）的射线。在弹性散射中，中子在不将核子推入受激状态的情况下从核子反弹。唯一的能量损失来自于传递至发生散射的核子的动能。氢原子弹性散射是中子密度测量的基本机理，这种弹性散射是同质量粒子 - 中子与质子 - 之间相互碰撞引起的（造成最大能量损失）。在中子俘获反应中，一个中子可以被一个核子吸收，中子俘获反应在中子能在低水平时处于主导地位。这将吸收核保持在受激状态，退激过程将伴随着伽马射线的发射。

14. 1999年，美国核管理委员会修改了相关法规，允许脉冲中子发生器可以免于执行放射性同位素源的油井废弃程序。更多信息：美国核管理委员会：“测井能量补偿源法规分析及其他法规澄清-10 CRF 第39部分修改案”，核材料安全与防护办公室（1999年12月），<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0036/ML003690515.pdf>（2013年4月29日访问）。

15. 当一束伽马射线与一个电子碰撞并将其部分能量传递给电子，同时自身被散射时，即发生康普顿散射。伽马射线继续以降低的能阶穿行。康普顿散射的程度取决于目标物质的电子密度。随着电子密度增加，伽马射线的能量衰减越多。

16. 脉冲中子发生器发出动能值约为14 MeV的快

中子。热中子在室温条件下的动能约为0.025 eV。

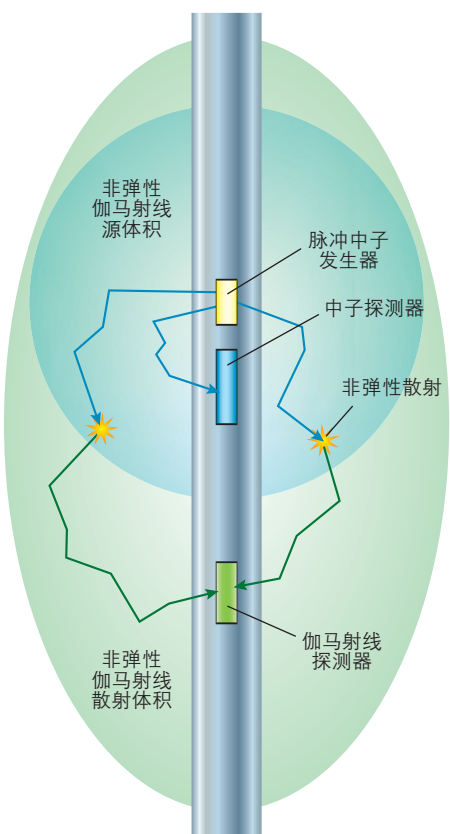
17. Weller G, Griffiths R, Stoller C, Allioli F, Berheide M, Evans M, Labous L, Dion D 和 Perciot P：“一个新的综合随钻测井平台带来下一代地层评价服务技术”，SPWLA 第46届测井专题年会论文集，新奥尔良，2005年6月26日-6月29日，H卷。

这些元素的体积存量来计算岩性，这也是中子频谱测量的基础。非弹性伽马射线的能量谱也是碳氧比测量工具（用于在套管井中识别含油气区带）的基础。

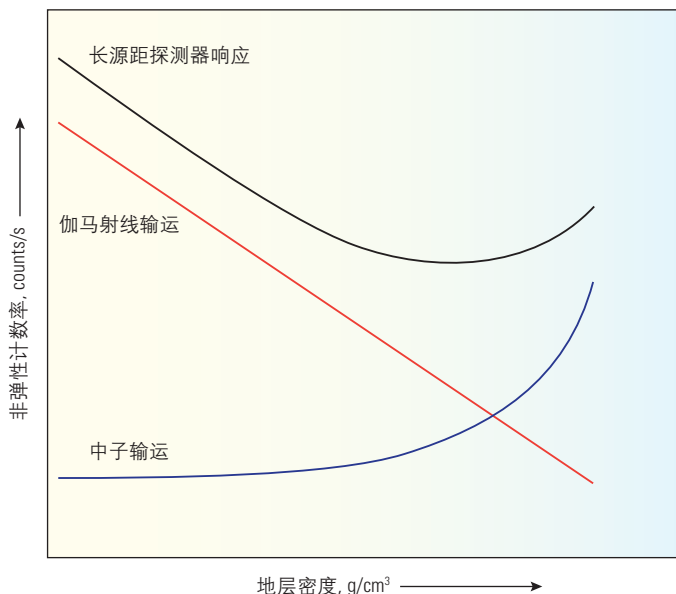
在短期非弹性碰撞期内，会形成伽马射线云（下图）。这种人工生成的伽马云以 10^8 GR/s的速度发出伽马射线，比典型的 ^{137}Cs 源发出的射线数量低大约两个数量级。但是科学家们已经确定，所产生的伽马射线数量充足，能够按照与传统放射源相似的方式发挥作用。伽马云寿命短，因为产生伽马射线的中子会与其他核子碰撞，速度迅速降低至热能水平，然后被俘获。

非弹性碰撞引起的从伽马云到达探测器的伽马射线的数量受三个因素影响：

快中子从脉冲中子发生器至地层内产生非弹性伽马射线的点的运输、



▲ 非弹性伽马射线云。脉冲中子发生器产生的中子从源中离开并与地层中的原子发生非弹性碰撞（蓝色阴影区）。通过碰撞形成了非弹性伽马射线云（绿色阴影区）。这些伽马射线中的一部分将返回工具，被探测器计数。



▲ 核运输与长源距探测器响应。长源距伽马射线探测器的响应（黑色曲线）在很大程度上由中子（蓝色曲线）与伽马射线运输（红色曲线）决定。中子运输与中子和地层中原子核之间的相互作用有关。非弹性伽马射线在快中子非弹性散射期间产生。弹性散射主要在中子与氢核碰撞时发生，将快中子的能量降低到可产生非弹性伽马射线的能量门限值以下。所以，地层密度越大（低孔隙度），可供弹性散射的氢核越少，因此，可用作产生非弹性伽马射线的快中子也越多。伽马射线运输与非弹性伽马射线计数数量随着地层密度的增加而减少，因为更高的电子密度为伽马射线相互作用和能量衰减提供了更多机会。

伽马射线从原点返回工具中探测器的运输以及地层的电子密度。地层中由非弹性相互作用产生的伽马射线穿过地层迅速移动，按照与放射性同位素源产生的伽马射线相似的方式进行作用，并通过与地层中的电子相互碰撞——主要是康普顿散射（上图）——发生衰减。确定刻度之后，探测器的计数将用于计算地层的电子密度，而电子密度则进一步用于计算地层体积密度。¹⁸

如果只有非弹性伽马射线存在，特性鉴定将更容易开展；但是，伽马射线的另一个产生源使测量变得复杂。快中子会最终转变成热中子并被地层中的原子俘获。俘获热中子的核发出伽马射线，并以一种与非弹性碰撞产生伽马射线类似的方式，返回到稳定的能态。可俘获热中子的群体密度与地层中氢原子的数量直接相关。

在典型的井下环境中，吸收热中子概率最大的元素为氯【Cl】氯的数量密度与地层流体的矿化度有关。无源中子伽马密度测量只依靠非弹性碰撞产生的伽马射线。为了正确计算体积密度值，必须对中子俘获导致的俘获伽马射线的贡献进行量化并从测量

中去除。¹⁹

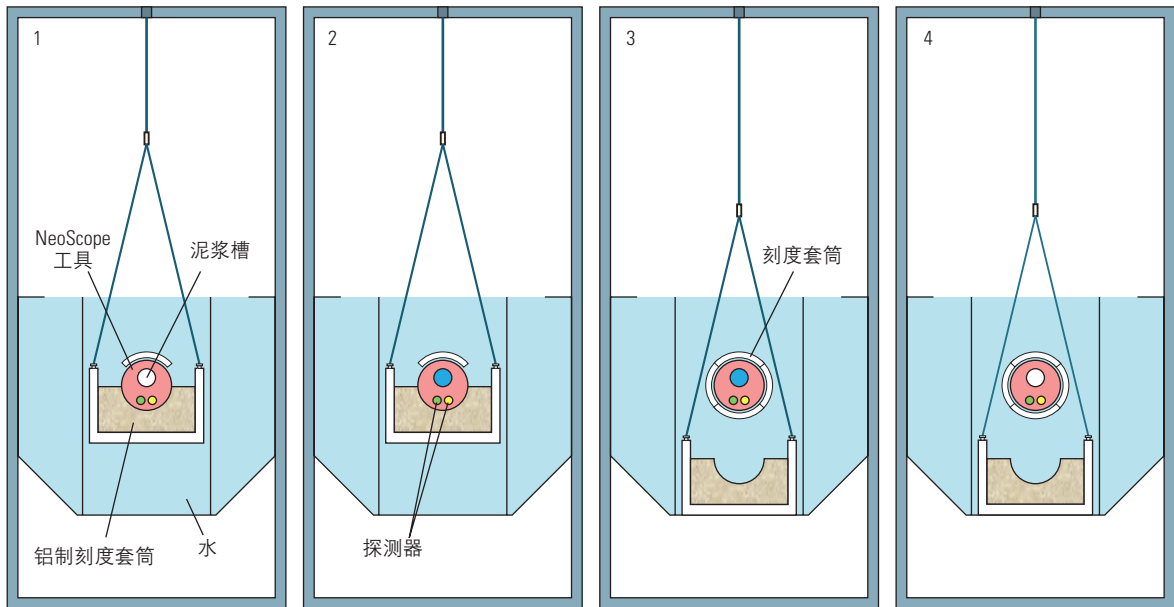
另外，工程师们也必须考虑初始源强度的可变性。虽然传统放射源的输出强度可能因放射性核素的年龄与活性水平而发生改变，但其输出还是相当稳定的，而且随时间的变化量也是可以预测的。通过伽马-伽马密度测量工具的刻度，将工具调校到一个已知参考值，来补偿放射源与探测器效率的可变性。脉冲中子发生器的输出不如传统放射源具有可预测性，可能在短时间内甚至在中子发射间隔中出现变化。NeoScope工具的控制环路能够调整脉冲中子发生器，使其保持恒定的平均输出，而且工具的脉冲中子发生器配置了探测器，用于确定中子输出和补偿变化量。

为了提供密度测量所需的规定精确度 0.025-g/cm^3 ，无源中子伽马密度模型利用了多个探测器的响应组合，同时模型也需要严格复杂的刻度。该

18.Reichel et al, 参考5。

19.在室温条件下，超热中子的能量范围间于 0.02 eV 至 10 keV 。

NeoScope刻度装置



▲ NeoScope 刻度装置。上图是针对 NeoScope 工具专门开发的一种特殊的刻度装置。使用刻度套筒和模拟泥浆槽，在充满水的罐中进行四种测量。启动脉冲中子发生器，按四种配置测量响应情况：套筒提起，泥浆槽充满空气（1）；套筒提起，泥浆槽充满水（2）；套筒放下，泥浆槽充满水（3）；以及套筒放下，泥浆槽充满空气（4）。通过这四种测量可以计算刻度增减量，提供工具质量确认的依据。

刻度过程需要将工具各个探测器测得的计数率与参照工具在同样环境下测得的数值相关联。

为此，工程师们设计了一种可以对计数率进行广泛测量的刻度罐（上图）。

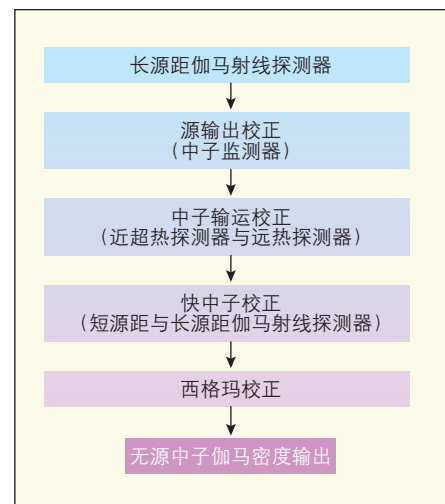
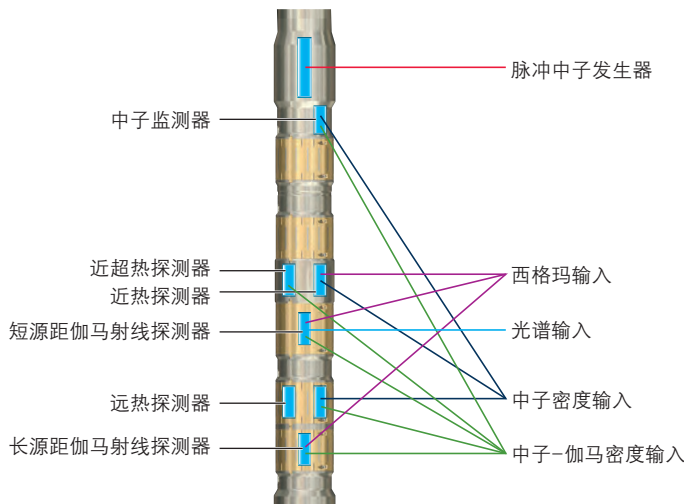
在井下测井测量中发现的不确定

性源于测量、校正以及从被测参数到地层特性的转化。

为了规避这些不确定因素，NeoScope服务工具结合配置了质量控制

传感器响应的综合测量（下图）。工艺的最后一步是对可能用到多端测量的最终综合解释进行质量控制。

可能影响精确度的具体质量控制考虑因素包括传感器与硬件的功能性、无源中子伽马密度范围1.7-至2.9-g/cm³之内的密度值以及工具间距。



▲ 多输入、多输出测量。NeoScope 工具的核心部分（左侧图）使用单独的脉冲中子发生器产生中子，但是结合多个探头的响应得出具体的测量结果。例如，西格玛数据来自于近热探测器、短源距伽马射线和长源距伽马射线探测器。无源中子伽马密度，NeoScope 工具最复杂的测量参数，主要根据长源距伽马射线探测器的计数进行计算，但来提供准确的最终答案，还需要来自中子监测器、近超热探测器、短源距与长源距伽马射线探测器以及远热探测器的输入。流程图（右侧图）说明了达到最终密度输出值所应用的各项校正。

	无源中子伽马密度	伽马伽马密度
密度范围	1.7至2.9 g/cm ³	1.7 to 3.05 g/cm ³
机械钻速61 m/h 【200 ft/h】时的精度	0.018 g/cm ³	0.006 g/cm ³
精确度		
• 干净的砂岩、石灰岩与白云石	0.025 g/cm ³	0.015 g/cm ³
• 页岩	0.045 g/cm ³	0.015 g/cm ³
• 盐	不适用	0.015 g/cm ³
• 硬石膏	不适用	0.015 g/cm ³
轴向分辨率	89 cm 【35 in.】	36 cm 【14 in.】
探测深度	25 cm 【10 in.】	10.2 cm 【4 in.】
成像能力	无	有

▲ 无源中子伽马密度与伽马—伽马密度测量工具规格

此外，环境质量控制因素，包括井眼直径、斜度、机械钻速与地层泥质含量，都可能影响测量的准确度（上图）。这些指标都分配了测量质量控制旗标。绿旗表示测量结果准确并且在规定的限值范围之内。黄旗表示测量结果可能在其规定范围之内，但可能需要进一步解释。

红旗表示测量结果超出了规定的精确度参数。对于伽马—伽马密度测量与无源中子伽马密度的测量的精确度比对，这些质量标记值非常重要。

井场测试及其他

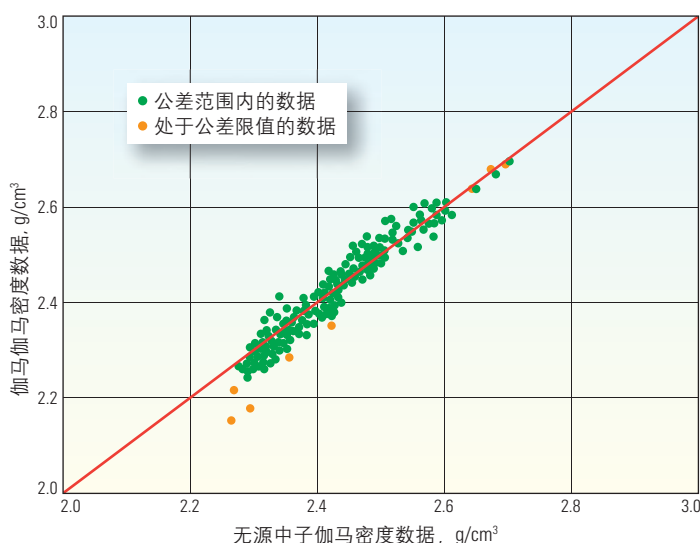
无源中子伽马密度测井的井场

测试包括：使用经过调整、能够使工程师们通过相同的井下钻具组合从同一口井中同时取得两种测量结果的工具，然后将无源中子伽马密度测井与伽马伽马密度测量结果相比较。

井场测试的目标包括下列条件下的测井：

- 干净的砂岩、石灰岩与白云石
- 硬石膏
- 页岩
- 气藏与轻油油藏
- 大井眼
- 斜井与直井

科学家们对伽马—伽马密度测井与无源中子伽马密度测量的结果进行



▲ 交会对比。伽马—伽马密度测量工具测得的密度数据与无源中子伽马密度测量工具的数据相对比：数据按各自的质量标记值分配颜色标记。当无源中子伽马密度数据在公差范围之内时，两种测量数据表现出较高的一致性。数据点沿理想轴线整齐分布，标记为绿色。在大约 2.3g/cm³ 的较低密度范围内，侵入效应开始显现。在理想轴线周围分散的数据点对应的是以大斜度穿过各层地层时两种测量方式的轴向分辨率的差值。

了对比，考虑了参考基准并研究了两种测量方式的差异与局限。验收标准以两种测量方式的系统评价为基础，最终分析以一套数值解释标准为基础。²⁰

对比两种独立的测量方式时，最大可接受误差是两者各自精确度之和。因此，两种测量在干净的地层中的可接受误差为 0.040g/cm³，在页岩中为 0.060g/cm³。²¹组合工具提供的数据被绘制成图，方便工程师们量化对绝对标准的偏差。

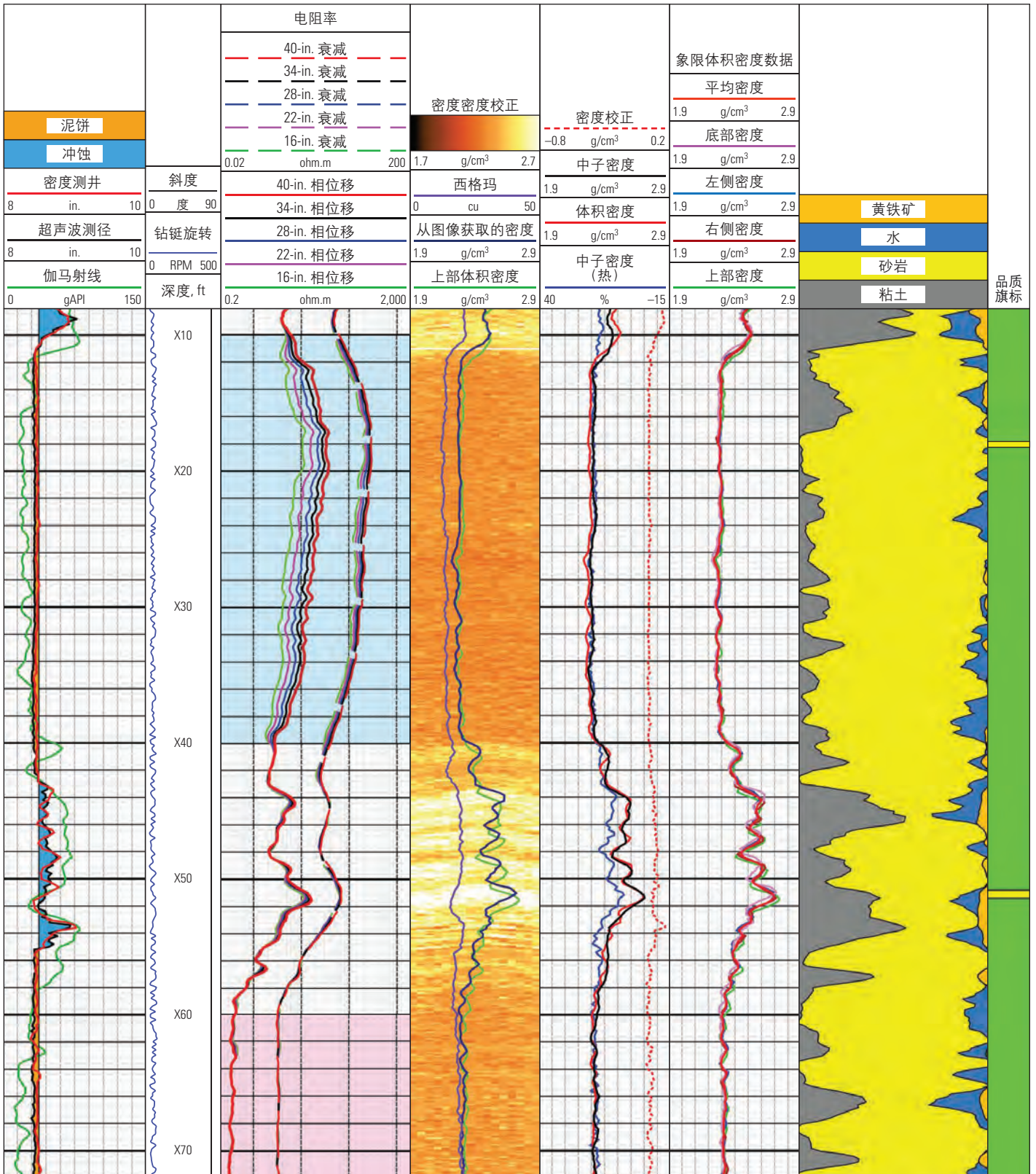
另外，科学家们必须考虑各口井中可能影响伽马—伽马密度与无源中子伽马密度对比的具体井况。这些井况包括滤液侵入、可随时间及各种钻井条件（例如泥浆密度、流体变化与机械钻速改变）改变的气体或轻油的存在。如果两种测量之间的较大差异可以用环境影响来解释，则测试被视为可接受。所有测试均在 8 1/2 英寸井眼中开展。

在一次 NeoScope 工具井场测试中，作业者采用 1.26-g/cm³ 【10.5-lbm/galUS】水基泥浆（WBM），穿过砂岩储层以 60° 的平均倾斜角钻了一口井。井径测井结果显示井眼直径合格，不需要伽马—伽马密度数据校正。另外，伽马—伽马密度数据显示没有重大的方位密度变化。西格玛处于一个对无源中子伽马密度数据做最小校正的范围内。在地层含油气区段中，电阻率测井数据显示存在一定的侵入现象（下页）。由于各自探测深度不同，在该区段种无源中子伽马密度测量与伽马—伽马密度测量的输出也略有差异。通过对比，两种测量方式在地层的未侵入含水地带中几乎相同。无源中子伽马密度数据在整口井中都处于精度限值范围之内（左图）。

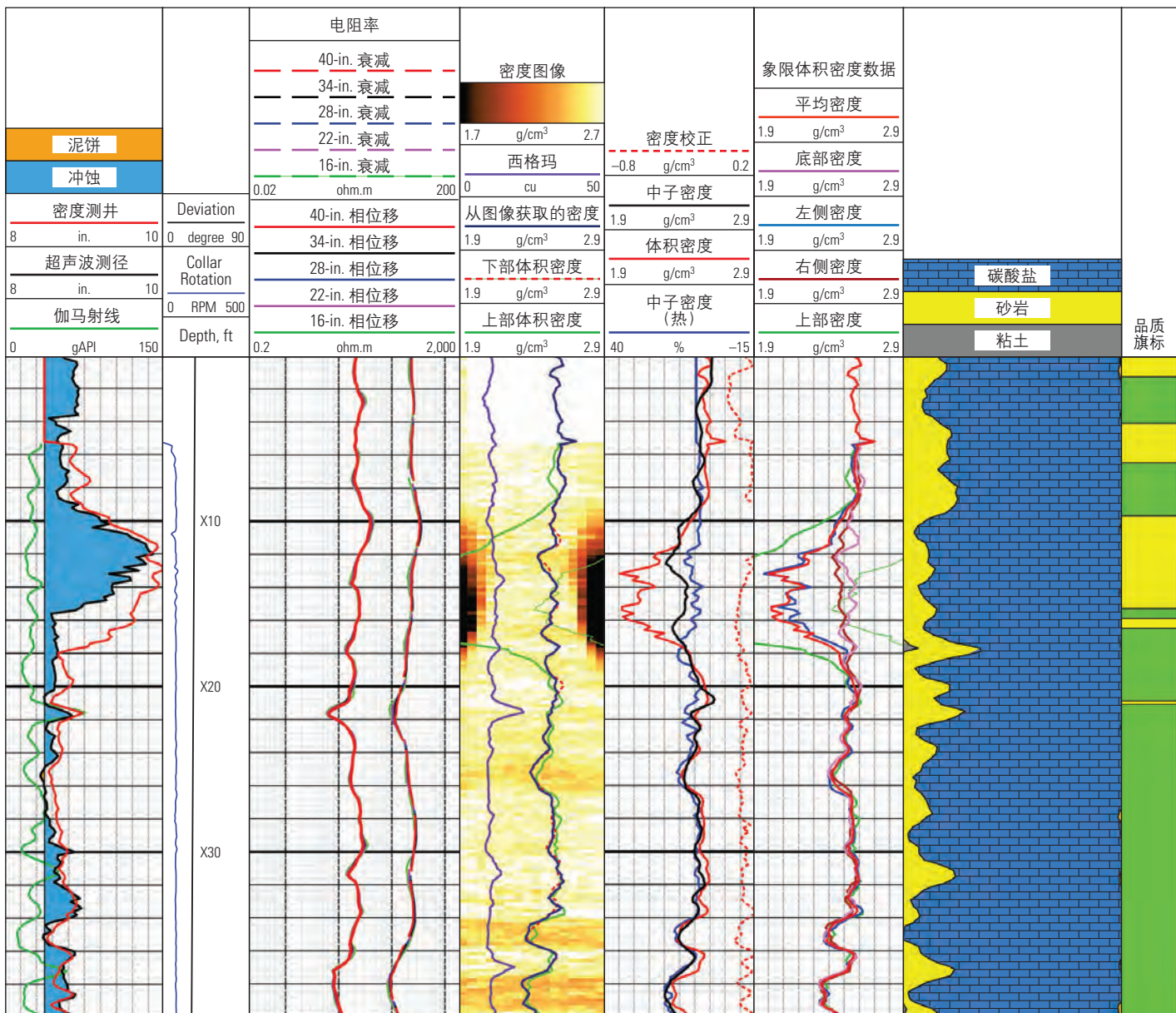
在位于美国德克萨斯州卡梅隆的斯伦贝谢试验机构进行的另一次石灰岩地层现场测试中，工程师们使用密度为 1.13-g/cm³ 【9.4-lbm/galUS】的水基泥浆钻了一口平均倾斜度为 25° 的井

20. Reichel et al, 参考5。

21. Theys P: 测井数据的采集与质量控制。巴黎：Editions Technip, 第2版, 1999。



▲ 被侵入含油区的密度对比。从 X10 到 X40 英尺的区段是被泥浆滤液侵入的含油砂岩。滤液侵入由电阻率曲线的分离体现（第 2 轨道，蓝色阴影）。X60 英尺以下的砂岩充满水，曲线缺少分离表示侵入少或无侵入。NeoScope 工具—与常规伽马—伽马密度随钻测量工具一起—下入该井。密度图像（第 3 轨道）与从光谱数据（轨道 6）计算的岩性，均显示出一个相当均质的油藏。象限密度数据（轨道 5）曲线穿过两个区段相互重叠，这是高质量井眼条件下的预期情形。传统密度数据（轨道 4，红色）与 NeoScope 密度数据（黑色）保持很高的一致性，虽然两个数据集在含油区段因侵入效应而略有差异。在充满水或油的干净岩石中，这些数据与热中子密度数据（蓝色）重叠。（改编自 Reichel et al, 参考 5）



▲ 冲蚀对密度的影响对比。密度数据使用 NeoScope 工具和常规伽马—伽马密度随钻测井工具，穿过测试井中显著充水的碳酸盐区段（轨道 6，岩性）进行采集。来自 Neoscope 工具（黑色）和传统密度工具（红色）的测径数据（轨道 1）显示，在 X12 英尺以上和以下并径扩大（蓝色阴影）。电阻率数据在轨道 2 中显示。轨道 3 包括来自传统工具的密度图像数据以及来自底部象限（红色虚线）和上部象限（绿色线）的方位密度数据，一条从图像获取的密度曲线（黑色）和西格玛数据曲线（紫色）。来自传统工具的体积密度数据（轨道 4，红色曲线）受到了 X10 到 X18 英尺区段并眼条件的影响，但是 NeoScope 工具却提供了良好的密度数据（黑色）。传统伽马—伽马密度测量工具象限数据的差异（轨道 5）代表了并眼扩大的影响。左象限数据（蓝色）与上部象限数据（绿色）无效，计算的平均密度（红色）也无效。底部象限数据（粉红色）与右象限数据（暗红色）更加接近于第 4 轨道的 NeoScope 密度数据。NeoScope 密度测量具有更大的探测深度，较不易受到冲蚀或并眼不规则的影响，黄色旗标（轨道 7）表示测量结果接近于限值。（改编自 Reichel et al，参考 5）

（上文）。测径记录显示上部区段出现并眼扩大。在无源中子伽马密度质量控制旗标为黄色的区域，无源中子伽马密度数据与伽马—伽马密度数据之间存在显著差异。

伽马—伽马密度数据的校正范围基本上在 0.1 至 0.15g/cm³ 之间，这一般不表示由于并眼不规则而造成数据质量差，虽然象限密度数据清楚地显示

出扩大并眼的影响。

这两种测井数据的分析强调了无源中子伽马密度测量更大探测深度的价值。无源中子伽马密度数据经过了并眼校正，而且由于 NeoScope 工具的更大探测深度，无源中子伽马密度数据受近井孔环境变化的影响较小。

无源中子伽马密度曲线与干净地层中的热中子密度曲线趋势吻合。无

源中子伽马密度数据显得比传统的伽马—伽马密度测量更加可靠。

中东的一家作业者在四种环境下对新的无源中子伽马密度测量设计进行了测试。²² NeoScope 工具分别被下入一个使用非水基泥浆钻入的大斜度高含气饱和度储层，一个使用水基泥浆钻入的高含气饱和度储层，一个使用高盐度水基泥浆钻入的油饱和和碳酸