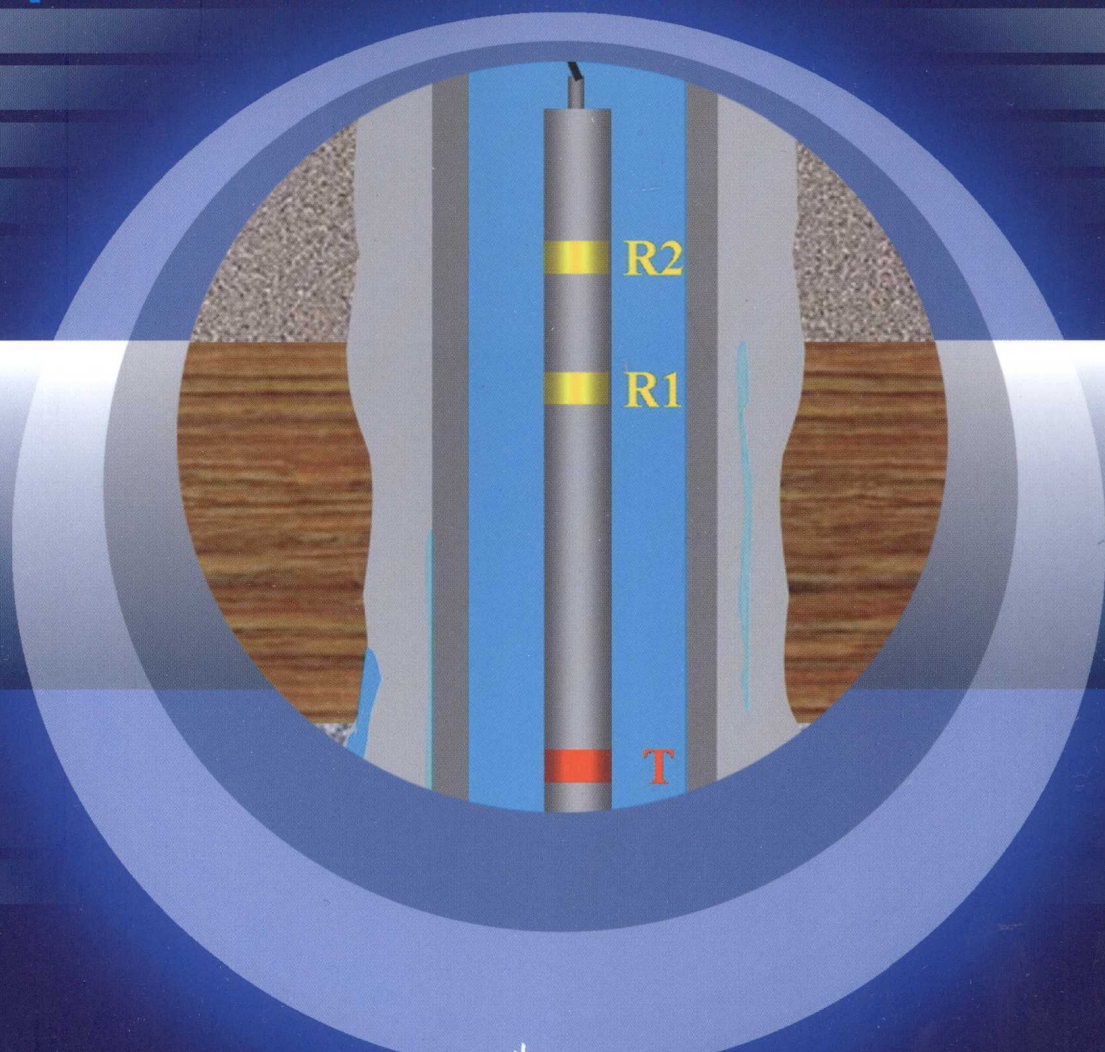


魏 涛 著

油气井固井质量测井评价

YOUQIJING GUJING ZHILIANG CEJING PINGJIA



石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了国内外主要固井质量测井仪器的基本原理、测井响应影响因素和测井资料解释方法、水泥胶结评价和水泥环层间封隔评价的最新研究成果及国内固井质量评价行业标准和现场经验。为了适应固井质量综合评价的需要,本书还简要介绍了固井工艺技术、注水泥施工评价方法、固井质量工程验证技术以及与固井质量测井有关的井中声学基础知识。

本书可供从事油气勘探开发工作的地质、测井、固井工作者及大专院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

油气井固井质量测井评价 / 魏涛著 .

北京:石油工业出版社,2010.7

ISBN 978-7-5021-7451-4

I . 油…

II . 魏…

III . 油气井 - 固井 - 质量检查

IV . TE26

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 195050 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523736 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 24.25

字数: 617 千字

定价: 90.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

序

固井质量是保证油气井生产寿命、油气田勘探开发效益和油气田开发产能建设的关键所在。固井质量评价为制定油气勘探开发工程措施提供决策依据，意义重大。

固井质量评价的核心是水泥环层间封隔评价。正确评价水泥环层间封隔，就不会因探井或评价井测试资料受邻层水窜槽干扰而造成悲观评价，漏掉油气层，耽误新油藏甚至新油田的发现。正确评价水泥环层间封隔，结合开发井油气生产数据和油藏特征，可发现邻层水突破水泥环窜槽，有助于及时采取堵水措施。正确评价水泥环层间封隔，可预测所注液体的流向和注水效果，为水力压裂和注水作业决策提供重要依据。此外，正确的固井质量评价还是详细了解注水泥施工效果，改进邻井固井质量的宝贵资料。

新中国建立后，我国固井质量评价技术快速发展，尤其是改革开放以来，通过引进、消化和吸收，结合各油田实际情况自主创新，固井质量评价技术百花齐放，成果丰硕，对油气勘探开发作出了重要贡献。然而，在中国每年完成的 15000 多口油气井中，由于固井质量问题有上千口不能进行正常测试和生产，损失巨大。长期使用落后的固井质量检测手段，长期采用过于简化的固井质量评价方法，是许多层间封隔问题未能得到及时发现并采取补救措施的主要原因，严重影响了油气发现和油气生产。我国固井质量评价水平亟待提高。

在参与固井质量评价技术发展的过程中，本书作者积累了较为丰富的与固井质量评价有关的知识、经验和实例。现场应用和科技发展，呼唤我国油气井固井质量评价专著问世。本书正是作者在这方面的有益尝试。

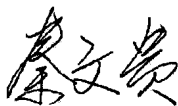
在简要介绍固井技术后，本书着重介绍了作为目前固井质量评价技术重要基础的井中声学，然后以几种典型的测井（如 CBL/VDL、SBT、PET 和伽马密度测井等）为例，分类论述了固井质量测井仪器的性能、刻度方法、主要测井曲线、测井资料质量控制方法和测井资料解释方法。按照目前各类测井仪器现场应用的重要性和广泛性安排论述的详细程度。对每类测井仪器的优势和不足，对固井质量测井新技术，都尽可能给予简单但清楚的描述。第七章专门讨论了固井质量评价标准研究问题。作者通过大量调研，吸收了国内外先进技术成果，与其他同志一道，出色完成了石油钻井工程专业标准化委员会组织的石油行业标准《固井质量评价方法》（SY/T 6592—2004）制定工作。针对固井质量评价涉及的技术复杂性和经常遇到的难题，第八章较为系统地论述了最佳候凝时间确定、固井质量测井仪器优选和固井质量综合评价方法。工程验窜和生产测井等固井质量评价的重要验证手段，专辟一章简单介绍，使得本书的技术系统较为完整。最后，对固井工艺和固井质量评价的技术管理和技术发展提出了一些建议。此外，书中还记录了作者的一些探索与思考。

了解固井技术，掌握套管井中声波测井响应规律，是高水平固井质量评价的基本功，注水泥施工记录及固井施工评价结果又是固井质量综合评价的重要参考。这是本书作者的切身体会，应当得到管理人员、研究人员和工程技术人员的高度重视。

本书对于固井质量测井技术研究人员和现场固井质量评价技术人员系统了解固井技术和常规固井质量评价技术，了解当前的固井质量评价新技术、新思路和新方法，是一本有

用的手册；对于从事油气开发、固井设计和注水泥施工的技术人员，是了解固井质量测井技术的方便的技术参考。相信本书的出版能为我国油气井固井质量评价水平的提高作出积极贡献。

中国石油工程技术分公司副总经理
石油钻井工程专业标准化委员会主任委员

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Chen Wenfei, positioned to the right of the printed text.

前言

油气井注水泥施工效果，地层测试和油气开采期间水泥环层间封隔性，是地质、钻井和测井方面共同关注的重要问题，因为固井是油气井建井的关键环节，也是保证油气分层测试、油气层分层改造和油气井生产寿命、保证油气产能和开发效果最大化的关键所在。有关数据统计表明，近年来在国内电缆测井工作量中，套管井测井接近 50%，而在套管井测井工作量和技术服务中，固井质量测井和流量测井占据着总收入的最主要部分。这充分反映了固井质量探测与评价的重要性。

20 世纪 90 年代初，笔者在参加塔里木石油会战期间开始关注固井质量评价问题。当时，除中国海洋石油总公司和中国石油塔里木油田外，国内油田基本上都采用多年熟悉的声幅测井探测固井质量，一次下井仅采集套管波声幅、自然伽马和套管接箍磁定位（俗称“固放磁”）三条曲线。这前后，国外固井质量测井技术快速发展，在 CBL/VDL 测井基础上相继推出水泥评价测井 (CET)、脉冲回波测井 (PET)、扇区水泥胶结测井 (SBT)、超声成像测井 (USI)、井周声波扫描测井 (CAST) 和伽马密度测井等，固井质量评价方法随之不断进步。从 20 世纪 90 年代中期开始，国内石油测井界奋起直追，先后研制成功 CBL/VDL、MUST 和 CBMT 等测井仪器，各油田制定了实用的固井质量评价方法和评价标准，尤其是系统研究了调整井地层压力对 CBL 的影响，在对实验井群测井资料分析和多年经验的基础上编制了固井质量评价软件，开展高压气井固井质量评价方法研究，等等。

然而，一些因素制约了我国固井评价技术的发展。首先，利用声幅测井资料评价固井质量，方法较为简单，长期以来对技术人员素质要求不高，因而对固井质量评价的仪器研制、资料解释、新技术推广和方法研究普遍重视不够。其次，片面追求虚高的固井合格率。最后，因测井信息太少，难以识别和排除诸多非固井质量因素引起的声幅波动，时常造成固井质量误评价。直到 21 世纪初，国内 95% 以上陆上油田的固井质量探测仍采用老式的声幅测井，沿用一把尺子和一支铅笔的原始的固井质量评价技术。但是，声幅测井不能全面反映水泥胶结状况，固井质量评价符合率低，往往导致本不需要的补注水泥决策甚至导致井控事故。实际上，因固井质量评价失误造成的隐性的和潜在的经济损失（油气资源、时间和资金的浪费）事件和数额，更是难以统计。

2005 年 4 月，石油钻井工程专业标准化委员会主任委员秦文贵同志指出：“虽然中国每年完成的 15000 多口油气井的固井质量合格率都在 98% 以上，但是，每年都有上千口的油气井由于固井质量问题而不能进行正常的测试和生产，损失巨大。由于长期使用声幅方法检测固井质量，一部分同志盲目陶醉于 98% 以上的固井质量合格率，故步自封，看不到固井技术和工艺进一步发展的前景。事实上是，因为旧的、不合时宜的固井质量检测方法得出的结论误差大、精度低，严重影响了生产井时常造成油公司与服务公司之间的分歧。”

油气勘探开发难度不断加大，油公司对固井评价要求不断提高，钻井和固井技术不断进步，市场经济作用不断增强，呼唤我国固井质量评价技术快速发展。在认真吸取经验教训后，近年来大力淘汰单声幅测井，固井质量测井技术快速发展。国内测井同行正抓住当前固井质量评价技术快速发展的良好机遇，认真总结过去，蓄势开拓未来。

我国有关重要专业文献记录了不同时期固井质量评价技术的发展足迹。楚泽涵教授^[1]和王冠贵教授^[2]分别在1987年和1988年讨论了声幅测井的固井质量评价基本方法,定性分析了套管尺寸、微间隙、快速地层、水泥密度、水泥环厚度和候凝时间对声幅测井的影响,引入声幅、套管尺寸与水泥抗压强度之间关系的图版,并给出固井质量评价指标(相对声幅低于20%为良好,20%~40%为中等,高于40%为差)。1990年,中国石油天然气总公司组织编写的《钻井手册》推荐,相对声幅低于10%~15%为优,15%~30%为合格,高于30%为不合格^[3]。这些著作在讨论声波测井和钻井工程时,把固井质量评价作为一个附属部分加以简介,其共同特点是:在讨论固井质量评价时关注的是水泥胶结;虽讨论声幅测井的多种影响因素,但固井评价指标均与这些因素无关;对微间隙是否会引起管外流体窜流分歧明显;没有讨论声幅测井资料质量控制以及仪器偏心、测量源距、外层套管和没有自由套管刻度对声幅测井的影响等重要问题。这是由于国内当时对固井质量测井响应和固井评价的认识不够深入,忽视上述影响因素,过分简化固井质量评价方法,仅关注水泥胶结“合格率”,仅在试油或油气开采期间地层流体产出出现异常情况时才关心水泥环层间封隔。

20世纪90年代以后,国内出版的重要专业著作紧跟固井质量测井新技术。《现代固井技术》(刘大为等,1994)、《测井学》(段康等,1998)和《油气井注水泥理论与应用》(刘崇建等,2001)都简单介绍了CBL/VDL、CET、SBT和USI等的测量原理和相应的固井质量评价基本方法。但固井评价毕竟不是这些涉猎广泛著作的讨论重点。直到现在,国内仍然没有一本专著系统而较为详细地讨论固井质量评价。

笔者有幸参与国内固井质量评价奋起直追和快速发展的进程。在进行中国石油天然气总公司“塔里木探区深井固井质量评价研究”、中国海洋石油总公司“固井质量评价方法研究”、中国海洋石油测井公司“固井质量实验井工程设计”、中海油田服务股份有限公司“低密度水泥固井质量评价研究”和塔里木油田西气东输“天然气井气层井段测井固井质量研究”等研究项目的过程中,在编写石油钻井工程专业标准化委员会组织的行业标准《固井质量评价方法》的过程中,有了接触新仪器、新方法、基础资料(包括来自不同油田近200井次的层间封隔验证资料)和多专业专家的便利,先后到中国石油工程技术研究院,西南石油大学,中国石油大学,大庆、胜利、华北、辽河、长庆、中原和四川等油田进行技术调研,不断深化对固井工程和固井评价的理论和方法技术的理解。对中国海上油气田(包括上海石油天然气总公司)、国内陆上油田(塔里木、四川、长庆、华北、河南等)和国外油田(印尼 FARIDA、哈萨克斯坦北扎布其和阿联酋 ASAB 和 UPPER ZAKUN 等)的大量固井质量测井(声幅、CBL/VDL、SBT、CET、USI、CAST、RBT 和伽马密度等)资料进行了解释、分析和研究,到辽河油田实验井群和中国海洋石油测井公司实验井进行固井质量测井资料采集和分析,对中原油田刻度井资料进行分析研究,丰富了现场经验。应 Sondex 公司的邀请,利用该公司在辽河油田固井实验井群的 RBT 测井资料分析其实际探测能力,并对其数据采集和图形显示提出建议,受到该公司测井专家 Ryan Swason 先生的高度评价。笔者通过参与石油钻井工程专业标准化委员会活动,在钻井、注水泥施工与固井质量的关系方面收获特别大。

通过不断学习、研究和实践,笔者在固井质量评价方面有了一些体会:

(1) 重视固井质量测井资料的质量,特别要关注仪器刻度、仪器居中、快速地层影响、

外层套管干扰、测量源距以及仪器使用条件等。

(2) 要在现场评价指标中体现测量源距、套管尺寸、水泥环厚度、井液密度和水泥密度的影响。

(3) 需要识别不能用 CBL 评价的情况：水泥缓凝和微间隙。

(4) 需要识别只能用 CBL/VDL 进行定性评价的情况：地层岩性和孔渗性能影响声幅和衰减率响应；受外层套管或气侵影响井段的 CBL 和 VDL。

(5) 油气井固井质量评价应当以层间封隔为核心，并注意地层流体性质和层间压差影响水泥环层间封隔效果。

(6) 从事固井质量评价的测井技术人员需要了解固井技术，熟悉井中声场和固井质量测井数据采集原理。

(7) 应重视固井质量综合评价：综合分析各种固井质量测井信息（如用套管波传播时间判断仪器偏心、根据 VDL 确定第二界面胶结状况），参考钻井、注水泥施工记录和裸眼井测井资料。

在方法研究和现场实践过程中，除了获得上述体会外，笔者还积累了一些自己认为较有价值的资料，但也时常遇到一些技术难题，逐渐萌生了将这些体会、资料和难题加以系统整理以便与感兴趣的朋友交流的念头。

本书重点讨论固井质量测井原理和固井质量评价方法。

绝大多数固井质量评价测井都属于声波法。套管井中的声波测井理论基础是深刻理解这些固井质量测井原理、测井响应特征和资料解释方法的钥匙。系统掌握进而深入研究它们，对于进行固井质量评价方法研究和现场固井质量评价实践，提高固井质量评价水平，具有十分重要的意义。这便是编写本书第三章的初衷。

目前固井质量测井种类繁多，而声波法固井质量测井占绝大多数。R. J. Butsch (1995) 将声波法固井质量测井分为三大类型^[4]，即 CBL 类、衰减率类和超声反射类。前两类以主要测量结果（CBL、衰减率）分类，最后一类则指探测方式。显然，分类原则是不同的。本书根据仪器主要测井响应所反映的水泥固结特性，统一将声波法固井质量测井分为两大类，即“水泥胶结类测井”和“水泥声阻抗类测井”。同一类型测井的基本原理和资料解释方法相似。水泥胶结类测井对水泥环界面的胶结强度最为敏感，水泥声阻抗类测井对管外环空介质的声阻抗敏感。所以，这样分类易于理解各类测井响应的物理本质。在水泥胶结类测井中，又细分为“无定向水泥胶结测井”和“分扇区水泥胶结测井”。本书不可能也没有必要对每一种固井质量测井仪器的测量原理和资料解释方法一一加以描述。第四章至第六章选择每一类型中那些在技术层次上有代表性的一两种常用固井质量测井作较为系统的介绍，以点带面，读者可以触类旁通，同时力求较为完整地展现仪器不断改进的历史沿革。对与固井质量评价有关的测井仪器性能、刻度方法、每类测井仪器的优势和不足、主要测井曲线和测井资料质量控制方法，书中都力求给予简单但清楚的描述。目前现场偶尔用到的一些固井质量测井新技术，代表了固井质量测井技术的发展方向，本书也作了简要介绍。

水泥环层间封隔评价标准研究难度大，是目前较为薄弱的环节。本书第七章试图反映当前的认识水平。本书第八章强调，限于目前测井响应多解性和工程问题的复杂性，综合多种信息进行固井评价是必然选择。

除了利用声波法测井探测固井质量外，还大量使用生产测井仪器寻找管外环空流体窜

通（简称“管外窜”）。这些测井技术实际上是固井质量测井的另一大类。本书第九章对其中最常用的测井技术也给予适当的关注。作为完整固井质量评价的一部分，该章还介绍了固井质量工程判别技术。

从事固井质量评价的技术人员，以专业背景为测井或者应用地球物理者居多。掌握了测井技术，还不足以做好固井质量评价工作，因为固井质量评价是一种跨多个专业的技术工作，而固井质量受多种因素影响，固井质量测井响应多解。解决的途径之一在于真正了解固井技术。因此，本书第二章在介绍固井质量测井之前，简单但试图较为系统地介绍油气井注水泥技术，水泥浆就位后管外环空的温度、压力和体积等变化，以及各种变化对水泥胶结、水泥环封隔和固井质量测井响应的影响。

有关单极子声源位移—应力传播矩阵以及某些重要公式的推导等，列于书后附录中，使正文更加精炼。油井水泥外加剂、单位换算、各种套管尺寸和重量以及材料抗折强度试验方法等附录于书末，便于查阅。

概括起来，本书强调如下几个方面：

- (1) 注水泥基本知识；
- (2) 水泥凝固过程中的物理化学变化；
- (3) 固井施工质量评价；
- (4) 套管井声波测井理论；
- (5) 水泥环层间封隔评价；
- (6) 经验积累和目前有关水泥环层间封隔认识的局限性；
- (7) 固井质量综合评价。

希望本书能够成为从事固井质量评价的工程技术人员方便的技术参考，对现场应用和固井质量评价技术进步有所助益。也希望本书能够对与油气勘探开发有关的其他方面的专业技术人员，在需要了解固井质量测井和固井质量评价技术的时候，成为有用的手册。

固井质量评价需要理论和实验的指导，但更多地依赖于实践。我国油田众多，地质情况差异巨大。从某种意义上说，这既是巨大的挑战，也给我国固井质量评价技术研究和发

展提供了广阔的舞台。在长期的油气勘探开发过程中，每个油田都形成了各自富有特色的固井质量评价实用技术，积累了丰富的宝贵经验。有理由相信，随着固井新材料和新工艺的不断推出，随着测井技术和测井解释方法的更新换代，必将涌现出更为成熟的固井质量评价新方法并成功用于生产实践，推动固井质量评价技术的不断完善和进步。从这个意义上说，本书实际上只是一块引玉之砖。

在进行现场固井质量评价、技术研究和行业标准编写过程中，笔者得到了国内三大石油公司钻井、固井和测井界专家学者，特别是西南石油大学刘崇建教授和郭小阳教授，中国石油工程技术研究院黄柏宗教授，华北油田钻井二公司原总工程师徐惠峰，大庆油田钻井研究所高级工程师罗长吉，中国石油大学（北京）楚泽涵教授等人的指导和帮助。石油钻井工程专业标准化委员会，尤其是杨万盛、王永松、宋周成、杨小珊、杨全盛、李宝贵、宋本岭和秦宏德等，对行业标准《固井质量评价方法》（SY/T 6592—2004）作出了重要贡献。瞿亦斌、李凯军、黄导武、刘力平、张丽莹和兰洪霞等参与了本书第七章和第八章部分项目研究并获得重要成果。

石油钻井工程专业标准化委员会主任委员秦文贵热心支持笔者，并为本书作序。石油

钻井工程专业标准化委员会固井专业组组长杨万盛重点审阅了本书第一章和第二章。中国科学院声学研究所研究员张海澜审阅了本书第三章，更正了书中的一些声学概念。原中国石油天然气总公司勘探局副总工程师欧阳健多年来给予热情鼓励和指导，并对本书其他章节进行了审阅，重点审阅了前言和第十章。

多年来，中海油田服务股份有限公司以及原中国海洋石油测井公司给笔者提供了有关技术研究和交流的宝贵机会。

在此一并深表谢忱！

限于笔者水平，书中存在不足之处，敬请读者提出宝贵意见。

目 录

第一章 概论	1
第一节 固井在油气勘探开发中的作用	1
第二节 固井质量备受关注	2
第三节 固井质量评价的主要任务	3
第四节 固井质量评价技术发展简介	5
第二章 固井技术简介	15
第一节 历史回顾	15
第二节 井眼和套管	17
第三节 水泥浆	20
第四节 水泥浆性能及其试验	31
第五节 水泥浆顶替过程中的流变学	33
第六节 常规固井技术	36
第七节 固井施工后水泥的化学和物理变化	49
第八节 影响固井和水泥胶结质量的主要因素	54
第九节 防窜理论和技术简介	61
第十节 补注水泥	66
第三章 声波法固井质量测井理论基础	70
第一节 介质的声学特性	70
第二节 介质中的声波传播规律	75
第三节 套管井单极子声源声场	96
第四节 套管井中的瞬态波场特征	102
第四章 无定向水泥胶结测井固井质量评价	121
第一节 声波幅度测井	121
第二节 CBL/VDL 测井仪器和数据采集	123
第三节 CBL/VDL 测井资料及其质量控制	129
第四节 CBL/VDL 固井质量评价基本方法	131
第五节 利用套管井单极子全波波列评价固井质量	141
第六节 声波变密度—伽马密度组合测井	145
第七节 CBL 测井的不足和有关固井评价可靠性的讨论	154
第五章 分扇区水泥胶结测井固井质量评价	157
第一节 阿特拉斯公司 SBT 测井仪及其测量原理	157
第二节 阿特拉斯公司 SBT 测井资料及其质量控制	159
第三节 阿特拉斯公司 SBT 测井响应规律	164
第四节 阿特拉斯公司 SBT 测井固井质量评价基本方法	169
第五节 阿特拉斯公司 SBT 的优势和不足	176
第六节 康普乐公司扇形水泥胶结测井	178
第七节 Sondex 公司 RBT 测井	181

第六章 水泥声阻抗类测井	191
第一节 水泥声阻抗类测井的物理基础	191
第二节 哈里伯顿公司水泥声阻抗类测井	193
第三节 斯伦贝谢公司水泥声阻抗类测井	200
第四节 多参数超声工程测井原理与应用	211
第五节 水泥环封隔成像测井	215
第七章 固井质量评价方法和标准研究	220
第一节 固井质量评价标准：理论和实验指导下的经验	220
第二节 固井质量评价标准演变	221
第三节 水泥强度、胶结强度及其与测井响应的关系	225
第四节 水泥胶结评价的测井研究方法	233
第五节 水泥环层间封隔评价研究	244
第六节 目前主要固井质量评价指标的依据	253
第八章 固井质量综合评价	256
第一节 综合评价的重要性	256
第二节 固井施工质量评价	269
第三节 利用测井资料正确评价固井质量的前提	273
第四节 以测井资料为主，综合评价固井质量	283
第九章 水泥环封固质量验证	301
第一节 生产测井	301
第二节 水力测试	315
第三节 地层漏失试验	316
第四节 由油气层测试或开采期间流体产出异常判断	318
第十章 挑战与展望	321
第一节 固井质量评价面临挑战	321
第二节 认识上的局限性	325
第三节 观念更新，促进技术进步	334
第四节 迎接固井和固井评价技术的辉煌未来	341
附录 1 套管尺寸和重量数据表	344
附录 2 油井水泥外加剂品类一览表	347
附录 3 常用许用单位与非许用单位换算用表	353
附录 4 单极子居中声源声场的位移—应力矩阵	354
附录 5 多极子声源声场的位移—应力矩阵	355
附录 6 套管波预测到达时间数据表	358
附录 7 根据 CBL 计算衰减率、胶结指数和胶结比	362
附录 8 SBT 测井衰减率扩散系数推导	365
附录 9 抗折强度试验	366
附录 10 产层流体向管外环空流动	368
参考文献	370

第一章 概 论

水泥浆通过套管被注入井下，到达井底后沿套管和地层间的环空（本书有时简称为“管外环空”）上返，经过一段时间，水泥凝固形成水泥环。这就是固井。固井又称油气井注水泥。在油气井中，无论在预探井、评价井，还是在生产井或调整井中，甚至在注水井中，一般都要多次固井。市场经济条件下的油气勘探开发注重效益，而作为油气井建井“临门一脚”的固井施工，必然备受关注。实践证明，利用地球物理测井资料可以迅速、经济而有效地评价固井质量。

第一节 固井在油气勘探开发中的作用

固井质量对保护油气层和保证油气井生产寿命，对油气田勘探开发效益和油气田开发产能建设，对油气勘探开发安全和环境保护，都具有十分重要的意义。

为了实现油气勘探开发目标并在油气井的整个寿命中保持良好的效益，固井施工后形成的水泥环必须满足支撑套管和层间水力封隔这两项基本要求。这两项要求也是固井工程必须达到的两个主要目的。

一、形成足够的剪切胶结力，支撑套管

在钻井过程中，井壁附近地层受到钻井液滤液浸泡，受到地应力作用，还受到钻头振动、碰撞或拖刮，井眼易于扩大。地应力或塑性地层蠕变等将导致井眼强烈变形甚至破裂。随着时间的推移，井壁垮塌和（或）崩落可能越来越严重，在疏松地层井段，在地应力集中井段，在含有遇水膨胀的蒙脱石、伊利石地层井段，则表现得更为严重。

随着浸泡时间的延长，裸眼储集层井段近井壁地层受到越来越严重的钻井液污染。如果遇到高压地层，钻井液密度偏低会出现井涌甚至发生井喷事故，太高了又会压漏地层，尤其是松软的地层，所受影响将更为严重。

下一层或多层技术套管，将上部钻遇的复杂地层封固，水泥固结后的套管形成坚固而光滑的新井壁，给顺利钻达目的层创造了良好条件。生产套管固井则便于后续井下作业（起下工具，在给定深度固定井下作业工具等），油气层改造，防止套管腐蚀，保护生产管柱，等等。

水泥环对套管形成关键的机械支撑作用。这就需要它与套管的界面具有足够的剪切胶结强度。由于水泥环与套管或地层的胶结面一般很大，单位界面上承受的剪切力不会很大，所以单就套管串悬挂来说，套管周围可以不是 100% 水泥胶结。

二、形成足够的水力胶结力，封隔油、气、水层

要实现预探井和评价井油气分层测试，实现油气生产井分层开采并达到应有产能，实现注水井分层注水，就要限制流体的流动路径，防止流体通过管外环空不受约束地乱窜。这主要取决于完井过程中水泥环所达到的层间封隔程度。封隔油、气、水层是固井的最主要目的，而固井质量成为影响层间封隔的最重要因素。

如果固井质量达到要求，油气勘探开发就时效高，效果好：对于探井和评价井，根据油气测试资料可以正确分析产层的流体性质和评价油气产能；对于开发井，油气层改造和整个注、采期间油气层相互之间或者油气层与邻近水层之间管外环空封隔良好，就能够顺利进行油气生产，延长开发井的使用寿命。

反之，如果固井质量不好，将导致层间流体窜通，勘探开发成本大幅度上升，效益大幅度下降。对于采油井，固井质量不好将导致生产层相互之间以及生产层与非生产层之间流体窜通。如果是水窜，产液含水量将快速升高直至不产油气，造成地下储量的大量浪费。如果是油（气）窜，将造成地下压力剖面紊乱，后期调整井将无法实施；按规划不该动用的层系被动用，将影响整个采油规划的实施。对于注水井，固井质量不好将导致注入水乱窜，影响注入效果，甚至水淹某些尚未动用的开发层系，使将来的油气开发工作复杂化，还将破坏开发区块的地应力平衡，引起套管大面积损坏。这些，都将造成巨大的经济损失和时间浪费。

为了实现管外环空有效层间封隔，必须用非渗透性材料至少在所有关键井段百分之百地密封套管与地层之间的环空，而水泥环提供的界面水力胶结强度必须足够大。

第二节 固井质量备受关注

油田勘探开发有关部门和服务承包商都关注固井质量，但它们关注的重点则有所不同。这是固井质量评价技术人员应当注意的。

一、油田勘探部门的主要关注点

- (1) 保护油气层，使之免遭进一步污染；
- (2) 便于中途测试，及时发现油气层；
- (3) 封隔油、气、水层，以便分层测试。

对于油田的重点探井或评价井，当试油结果表明地层流体性质与测井油、气、水解释结论出入较大时，当需要详细了解关键油气层的产能尤其是主力油气层邻近水层时，固井质量很可能成为油田主要领导和多个部门关注的焦点。

二、油田采油部门的主要关注点

- (1) 封隔油、气、水层，以便分层开采、分层注水和分层改造；
- (2) 保护油气层，使之免遭进一步污染；
- (3) 在油气生产期间管外环空水泥环保持良好的层间封隔，防止套管和水泥环被腐蚀破坏。

生产井固井质量检查通常主要针对生产井段，而非生产井段固井质量检查也不能忽视。地层水活跃的非生产井段随着开发时间延长，也可能对井身质量造成破坏。为满足油田动态分析需要，宋立会等人认为以下情况应进行固井质量检查^[9]：经过动态分析，认为固井质量问题可能影响了油田正常生产的单井；经过若干年开发，油水界面可能推进至固井质量较差井段，造成含水较高的单井；经酸化压裂，生产井段固井质量可能受损的单井；地层水活跃、呈酸性，生产5年以上，固井质量可能已受损的单井；补孔和油气层改造措施前，油层段固井质量有必要落实的单井；补注水泥后需要检查封堵效果的单井。

三、钻井服务承包商的主要关注点

- (1) 保护井壁，封隔复杂地层，以利继续钻进；
- (2) 安装井控装置，便于实施二次井控乃至三次井控；
- (3) 悬挂套管；
- (4) 安全、优质、快速地完成钻井作业。

四、固井服务承包商的主要关注点

固井服务承包商关心固井作业质量是否达到设计要求，以及能否向油公司交井。过去，根据测井资料评价固井质量为“合格”或“不合格”，主要基于这个目的。如果固井质量“合格”，则该井包括水泥浆配方和施工工艺的固井设计符合要求，在邻井中仍可采用。否则，则要修改固井设计。

因此，如果固井质量评价结论不符合实际，就向固井公司发出错误信号。原本固井质量合格的注水泥作业被评价为“不合格”，固井服务承包商必然修改固井设计，结果一方面可能将在本井造成对试油资料和生产动态资料的错误分析，从而耽误油气层发现或造成不必要的验窜和补注水泥等作业；另一方面，原本固井质量不合格的注水泥作业被评价为“合格”，固井服务承包商必然认为目前的固井设计和施工工艺是可行的，结果同样将可能在邻井造成固井问题。

第三节 固井质量评价的主要任务

由本章第二节分析可知，固井作业后油公司主要关心两个问题：第一，固井施工质量是否达到设计要求；第二，油气层相互之间以及油气层与邻近水层之间的水泥环封隔是否良好。这也正是固井质量评价需要完成的两个中心任务。

一、固井施工质量评价

如果固井施工质量达到设计要求，就可以再次开钻向深层钻进或进行完井作业。在钻达设计井深后，如果固井施工质量“合格”，钻井承包商就可以向油公司交井，固井承包商根据作业合同从油公司那里获取作业服务费。

固井施工设计必须满足如下基本要求：

- (1) 顶部：水泥返高高过设计高度下限，密封井段足够长且胶结强度足够高，以便封住最上部的油气层，封住尾管串与外层套管重叠部分的环空；
- (2) 中间：水泥充满设计封固井段的管外环空，纵向和环向分布均匀，把油、气、水层分隔开来，同时在各种井下作业情况下保证水泥环能承受温度波动和套管内压力波动；
- (3) 底部：套管鞋处水泥环密封井段足够长且胶结强度足够高，以便封住最下部的油气层；
- (4) 整个固井井段：水泥环界面剪切胶结力足够大，以悬挂住套管串。

固井质量与多种因素有关，这些因素包括钻井液性能，井眼准备情况，套管扶正情况，冲洗液和隔离液性能、数量以及泵送情况，水泥浆性能、数量和注水泥情况，水泥候凝方式等。固井施工单位在现有井眼状况和地层条件下，发挥主观能动性，努力使固井施工效果达到最佳。

固井施工单位向油公司交井，早先基本上都依据井温测井来检查水泥顶；后来发展为主要利用声波法固井质量测井资料来确定水泥返高并评价水泥胶结质量。

在国外，也是大量利用固井质量测井评价注水泥施工质量^[6]，但近年来做法有所不同，即根据最初几口井以测井资料为主的多种资料，分析一个开发区块的施工效果，发现不足之处，修改、完善该区块的后续固井设计及注水泥工艺设计，不断改进现场的注水泥施工直到注水泥施工达到要求。从此，这一开发区块基本不再进行固井质量测井（特殊情况除外）。阿联酋阿布扎比石油公司在注水泥后固井质量测井前，首先根据固井施工记录评估固井质量（cement quality prediction）。只有固井施工质量不能通过才进行固井质量测井。国内油田基本上每口井都检测固井质量。如果根据测井资料评价固井施工质量合格，钻井部门就可以向油田油气开发部门交井，否则，就要采取补救措施，直到评价合格。

固井施工质量评价还包括，通过试压检查套管串下部结构固井质量是否达到设计要求。

谈到固井施工质量评价，不能不强调固井施工详细记录的重要性。固井施工过程记录是值得重视的基础资料。国外正规的油田技术服务公司都将固井施工过程详细记录下来，特别是把水泥浆密度、排量和泵压等参数以时间曲线形式记录下来。这样做的好处是：第一，可以以此评估施工质量；第二，有助于检查发现设计、设备、材料、工具和固井现场操作等方面的不足，以便不断改进；第三，界定导致固井质量问题的关键环节，例如可能是水泥浆性能问题，或者可能是套管偏心问题，有时候可能是钻井液问题，等等；第四，对利用测井资料进行固井质量综合评价提供重要的参考。

二、水泥环层间封隔评价

建立水泥环层间封隔是固井的主要目的。影响水泥环层间封隔的因素很多，有固井设计方面的，有现场注水泥施工方面的，也有地质和其他工程方面的。即使固井施工总体符合设计要求，也不能保证每一个油气层与邻近储集层之间的水泥环具有足够的封隔性。如果水泥环层间封隔效果不好，就可能导致地层油气储量的流失、产层污染、产出不需要的流体、环境污染甚至安全事故等问题，因此必须采取诸如补注水泥之类的补救措施。

勘探开发部门最关心的是油、气层相互之间，特别是它们与水层之间水泥环的封隔效果，希望根据固井质量测井资料能给出确切的评价结论。水泥环层间封隔成为固井质量评价的最重要，也是最困难的任务。

除了根据工程测试和油气生产异常数据分析外，分析和解释测井资料，是目前评价水泥环层间封隔的最主要手段。其方法是，针对裸眼井常规测井评价成果给出的油、气、水层位置，根据固井质量测井资料分析水泥环纵向上或环向上的胶结缺失，分析水泥环与套管之间（第一界面）以及水泥环与地层之间（第二界面）的胶结状况，最后给出常规层间压差条件下的水泥环层间封隔综合评价结论。

正确评价水泥环层间封隔，有助于科学分析油气测试数据，正确认识地层孔隙流体性质，正确评价产能。正确评价水泥环层间封隔，有助于正确分析油气生产异常动态数据，优化油气生产，防止层间油、气、水窜通。只有正确评价水泥环层间封隔，才能为补注水泥等下一步井下作业决策提供可靠依据，节省昂贵的补注水泥作业和大量而宝贵的井场作业时间，并降低油气产层的污染程度。

固井质量测井是地球物理探测技术之一。与所有其他地球物理探测技术一样，其响应不可避免地存在多解性，存在解决实际问题能力的局限性，需要参考包括固井施工记录在

内的多种有关技术资料进行固井质量综合评价。

第四节 固井质量评价技术发展简介

固井质量评价起始于根据注入井中的水泥浆及其后续流体数量推算水泥顶深度。随着科学技术的发展,石油地质家以及石油工程技术专家对固井质量评价要求的提高,用于评价固井质量的井下仪器和测井资料解释方法不断地推陈出新。固井施工过程记录和施工质量评价由早期的简单粗放逐渐演变成如今的详细规范。固井质量工程验证技术由依赖于射孔验窜发展到多种无射孔条件下的管外流体窜通检测技术。

一、固井质量探测和固井施工信息采集技术发展

用于固井质量分析的主要信息的采集技术可以划分为三类,即固井质量测井信息采集技术、固井施工信息采集技术和工程验窜信息采集技术。其中,固井质量测井探测和数据采集技术发展最快。

(一) 固井质量测井探测和信息采集

1. 井温测量

1) 水泥顶探测

1934年,斯伦贝谢公司取得了用井温测量仪确定水泥返高位置(TOC)的专利。井温测井是最早用于固井质量评价的测井仪器。

水泥凝固过程中水化反应产生的热会引起高井温异常,这是温度测井被用来确定水泥顶的物理基础。在水泥水化反应放热高峰时段附近进行温度测量,是成功评价水泥顶的关键。

2) 探测管外流体窜通

对于从固井施工结束后到井温测井前没有投入油气生产的井段,如果套管井地温梯度测井曲线与裸眼井地温梯度测井曲线一致,表明套管外不存在流体窜通。如果测井曲线局部明显高于或者低于地温梯度曲线,则测井曲线峰值点对应于套管外的流体流出或流入深度点。换言之,相应井段套管外固井质量存在问题。对于井温测井前已经投入生产的井段,可以利用微差井温曲线的异常升高或降低来寻找管外环空的窜槽位置。

井温测井的优点是简单而便宜。由于这种测井利用管外环空温度变化和流体流动间接探测管外窜槽,其有效探测窜槽的前提是:(1)在水泥水化反应强烈时测量,探测水泥顶;(2)管外环空不仅存在水泥胶结问题,而且由于存在层间压差正在发生或不久前曾经发生过流体窜流。

由于对测井时间要求苛刻,并难以确定对层间封隔分析起关键作用的管外水泥分布状况,在固井质量评价方面,井温测井渐渐为后来出现的声波法固井质量测井技术所替代。现在井温测井常用于生产测井,井温资料偶尔用于固井质量评价的参考,很少单独用于固井评价。

2. 声波法固井质量测井

声波测井于1950年问世。早期裸眼井纵波速度测井主要用于地面地震的时深转换^[7]。20世纪50年代中期开始出现单发单收声波幅度测井。从60年代初开始,声波法固井质量测井技术发展异常迅速。这种技术的优点在于,它是一种非破坏性的测试方法。过去推荐用于油田现场的固井质量检验方法,都是类似于抗压强度测定式的破坏性检验方法。

1) 声波幅度测井

1954 年, Dresser 公司推出声波测井并进行商业性服务^[8]。声波幅度测井探测的套管波幅度, 可以反映水泥环与套管外表面的水泥胶结 (cement bond) 状况。大量现场应用可以追溯到 1959 年 4 月^[9]。从那时起至 1960 年 11 月, 这种测井方法在美洲测井数百口。其明显的缺陷是, 没有反映水泥环第二界面胶结状况和仪器居中状态的信息, 同时由于快速地层波等的干扰, 声幅曲线多解性问题较为突出。

于是, 除了测量套管波声幅外, G. Harcourt 等人 (1964) 还提出用微地震图 (Micro-Seismogram) 评价固井质量。1966 年, 在 P. E. Chaney 等人的论文中出现了称之为“变密度记录” (Variable density recordings) 的全波显示^[10]。

2) CBL/VDL 测井

1971 年, H. D. 布朗等人提出采用单极子声波换能器发射, 用 3ft 源距接收换能器进行水泥胶结测井 (CBL), 而用 5ft 源距记录变密度测井 (Variable Density Log, 简称 VDL), 并根据现场经验给出不同套管外径下的水泥环最小封隔长度。根据 CBL 测井可以确定水泥上返高度和第一界面胶结状况, 根据 VDL 测井还可分析第二界面胶结状况。20 世纪 70 年代和 80 年代, 这种测井仪器在世界范围内得到广泛应用。

现场应用表明, CBL/VDL 测井明显优于井温测井、放射性示踪测井和声幅测井, 但其测井响应受仪器偏心、套管尺寸、快速地层和井液密度等的影响较大, 自由套管刻度的条件也限制了其应用范围。

20 世纪 80 年代初, 相继推出了间距和 (或) 源距都较小的衰减率测井。

3) 套管波衰减率测井

实际上, 在 CBL 解释图版中就有衰减率轴, 其作用与声幅一样用于估计胶结水泥的视抗压强度。

1982 年斯仑贝谢公司推出 CBT 测井 (Cement Bond Tool), 双发双收 (两个发射换能器相距 5.8ft, 相距 1ft 的两个接收换能器对称地位于中间) 进行补偿式衰减率测量, 还有一个距上发射换能器 0.8ft 而源距为 5ft 的接收换能器记录 VDL^[11]。这种测量的优势是衰减率与接收换能器灵敏度以及流体衰减无关, 无需自由套管井段刻度, 且对仪器偏心不大敏感。但是, 无定向的声波激发和接收还是探测不了水泥沟槽。1987 年吉尔哈特公司研制成功比例胶结测井 (Ratio Bond Tool)^[12]。这两种仪器测量原理和仪器结构类似, 只是源距稍有不同。

两年后, 西方阿特拉斯公司研制了探测能力更强的衰减率测量仪器。

为了正确地分析试油结果, 保证油气的分层测试和分层开采, 石油工业界不仅需要弄清水泥环纵向胶结不均匀性, 也需要了解其环向胶结不均匀性。无论是早期的井温测量和放射性示踪测井, 还是后来出现的声幅测井和 CBL/VDL 测井, 固井质量评价效果都不太理想。一个主要原因是, 这些测井仪器测得的物理量都是井周 360° 物理响应的平均结果, 无法反映环向上水泥不均匀分布 (水泥沟槽是其典型情况), 而把两相邻产层连接起来的连续水泥沟槽将导致管外层间流体窜通。定向井和水平井在油气开发中越来越普遍, 套管居中困难, 探测水泥沟槽成为必不可少的技术手段。

人们意识到, 即使不能成功地补注水泥, 也有必要将流体窜通通道探测出来。从 20 世纪 80 年代初开始, 为了克服 CBL/VDL 测井不能探测水泥沟槽的缺陷, 声波法固井质量测井技术沿着两个不同方向发展: 一个方向采用扇区测量“滑行”套管波幅度 (或衰减) 的测量方式, 另一个方向采用向套管垂直入射高频声脉冲激发套管共振反射回波的测量方式。