

· 研究报告 ·

用于固井质量评价的声波测井仪器的刻度和标定^{*}

余 峰¹ 张秀梅^{2†} 刘西恩¹ 陈洪海¹ 林伟军² 毛 捷²

(1 中海油田服务股份有限公司油田技术研究院 河北 101149)

(2 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要 目前,中海油服已经建成了一批用于固井质量和套损检测的刻度井,刻度井群可以物理模拟不同的套管规格、水泥密度以及不同的水泥胶结状况等,可用于实现对固井质量和套损检测的声波测井仪器进行系统的标定和测试。以刻度井群中用于标定仪器在高密度和中密度水泥套管井中测量性能的应用为例,介绍了依据高精度的超声扫描、数值模拟和实际仪器的测试结果,初步实现对固井质量检测中常用的声幅-变密度测井(CBL/VDL)和扇区水泥胶结测井(SBT)仪器进行定量刻度和标定的步骤和方法。研究工作表明,质量测试可以掌握刻度井中各组成部分的声学物理参数以及胶结质量,在此基础上结合数值模拟和实际仪器的测量响应,可基本实现待测仪器工作性能的标定。

关键词 刻度井群,固井质量,定量刻度,声幅测井,扇区水泥胶结测井

中图分类号: F631; O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2014)02-0154-06

DOI:10.11684/j.issn.1000-310X.2014.02.009

Calibration and testing of acoustic logging tools used in the evaluation of cement bonding conditions

YU Feng¹ ZHANG Xiumei² LIU Xien¹ CHEN Honghai¹ LIN Weijun² MAO Jie²

(1 Well-Tech R&D Institutes, COSL, Hebei 101149, China)

(2 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract China oilfield service limited (COSL) has built a number of calibration pits to evaluate cementing quality and casing damage for cased wells. These pits simulate many cases such as casing with different specifications, cement with different densities, different bonding conditions, etc., which can be used to test and calibrate a certain kind of acoustic logging tool used in cased wells. As an example, the applications in a calibration pit designed for testing the performance of logging tools in cased wells with high and moderate density cement were introduced, where the steps and methods in calibrating two kinds of acoustic logging tools,

2013-09-06 收稿;2013-11-22 定稿

^{*} 国家科技重大专项,大型油气田及煤层气开发资助项目(2011ZX05020-006-005)和国家自然科学基金资助项目(11134011,41274134)

作者简介:余峰(1964-),男,湖北蕲春人,高级工程师,研究方向:声波测井及定向井技术。

张秀梅(1980-),女,副研究员。

刘西恩(1966-),男,教授级高级工程师。

陈洪海(1963-),男,高级工程师。

林伟军(1971-),男,研究员。

毛捷(1969-),女,研究员。

[†] 通讯作者:张秀梅, E-mail: zhangxiumei@mail.ioa.ac.cn

including cement bonding log-variable density log (CBL / VDL) and the segmented bond tool (SBT) were illustrated, which were based on the results from high-precision ultrasonic scanning, numerical simulation and data from practical logging tools. The results show that quality detection can give detailed information about the material and bonding conditions in calibration pits, the performance evaluation of the acoustic logging tools can be realized by combing the predicted and measured logging response.

Key words Calibration pits, Cementing quality, Quantitative calibration, Cement bonding log, Segmented bond tool

1 引言

近年来,国内的多个油田已经建成了一些固井质量刻度井群,可用于实现刻度标定多种声波水泥胶结质量评价仪器,以及制定水泥胶结评价规范和标准^[1-4]。目前,中海油服和中国科学院声学研究所合作设计的固井质量刻度井群(12口井)也已经建成,刻度井的高度在9 m到10 m之间。新的刻度井群充分考虑了目前实际生产中遇到的问题,并在综合研究多种因素对不同仪器测量响应的的影响的基础上建成,因此实现了利用最小的空间,最大程度的对多种固井质量评价仪器的测量性能进行标定和测试,并能够根据仪

器的测量响应修正或者提出新的固井质量检测标准。

为最大程度的发挥刻度井的作用,针对已经建成的刻度井群,制定了一系列的操作规程和标定规范。本文围绕制定的标定方法和流程,以井群中某井的应用效果为例,介绍了对声幅-变密度测井(CBL/VDL)和扇区水泥胶结测井(SBT)仪器的测量性能进行测试和标定的基本方法。

2 标定流程介绍

为了实现应用刻度井进行仪器测量性能的评价,需要制定一定的方法和步骤。根据目前的经验结果,制定了图1所示的标定流程示意图。

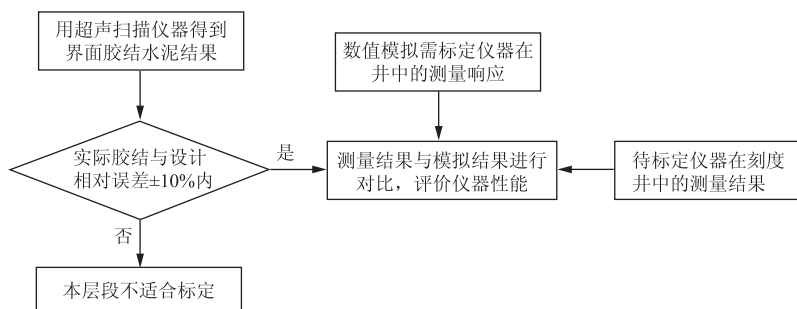


图1 仪器测量性能标定流程

Fig. 1 The procedure in calibrating measurement performance of tools

以下对流程图中几个主要的步骤进行说明。

(1) 超声扫描仪检测部分。超声检测的主要作用是对刻度井中水泥在深度和周向上的胶结情况进行精细直观的展示,可用于定量评价建成的刻度井中水泥的实际胶结情况,并与设计结果进行对比。本部分利用自主研发的超声检测仪器来实现,仪器所使用的探头可进行周向360°旋转扫描,旋转一周扫描200到400个点。考虑到刻度井的胶结质量可能随时发生一些变化,检测时间应为仪器下井标定之前的一周内。

(2) 数值模拟部分。数值模拟的主要作用是根据仪器的测量原理,结合刻度井的实际胶结情况,对每口井中的仪器测量结果进行预测。预测结果与仪器实际的测量结果进行对比,可用于制定仪器的测量标定规范。数值模拟涉及声波在三维非轴对称介质中的传播问题,该部分采用的模拟方法是柱坐标系下的三维交错网格有限差分算法^[5-6]。模拟过程中采用的参数严格按照仪器的工作测量原理、施工样品检测结果,以及超声扫描仪器得到的水泥胶结情况进行。

(3) 仪器测量部分。本部分必须保证仪器在操作过程中严格按照操作规程和刻度井的使用规范来进行。为保证测量的结果尽可能的减小系统及操作误差,需进行标定的仪器在每口刻度井中应重复测量 3 次以上。

此处需要特别指出,将流程图中实际测量的结果与模拟结果进行对比时,需要考虑两者之间的环境误差。因此,实际使用过程中,针对某类型的仪器进行标定时,初次使用需要建立数值模拟与实际测量之间的修正关系,之后根据两者的对比结果标定仪器的测量性能。另外,井况变化时,也需根据实时的参数变化情况,重新建立理论和实际测量之间的修正关系。

3 仪器的测量结果及标定

本节以应用刻度井群中某口井(称为示例井)对 CBL 和 SBT 仪器的测量性能进行标定为例,说明对仪器测量性能进行标定的步骤和方法。其中,关于这两种仪器的测量原理及各自的水泥胶结质量评价标准可参考文献[4]。

3.1 示例刻度井介绍

图 2 是示例井各层的结构示意图。该井采用的固井水泥包括中等密度和高密度的水泥两种,此处的水泥密度指水泥固化后的密度。自上而下各

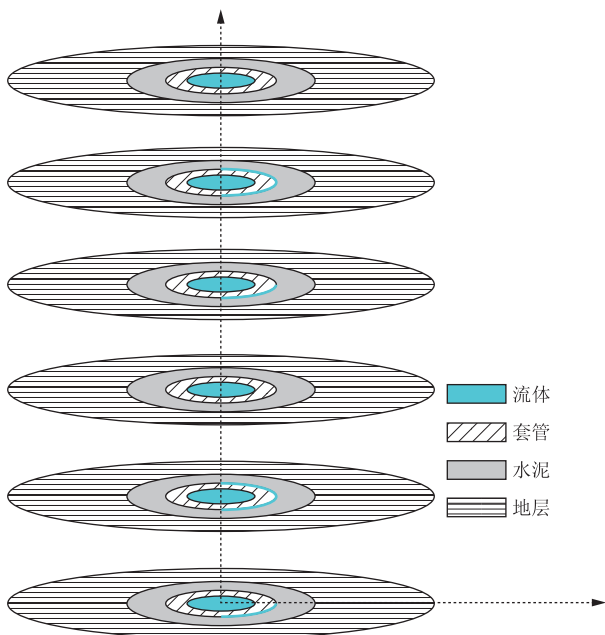


图 2 示例井的结构示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the sample well

层的胶结状态分别是:中等密度水泥下完全胶结、一界面(图 2 中套管和水泥之间的界面)水泥分别存在 180° 和 90° 水泥胶结缺失的情况;高密度水泥下完全胶结、一界面水泥分别存在 180° 和 90° 水泥胶结缺失的情况。每个层段的有效高度为 1.5 m,在刻度井的顶部留有约 1.0 m 的深度段,底部留有 3.0 m 的鼠洞,以方便实际仪器在该井中的操作。

为保证建成后的刻度井最大程度的发挥预期的应用效果,每口井的基本结构和各部分的几何和物理参数均来源于理论研究的结果。在施工建造的过程中,需实时对施工材料的声学参数进行测量。经过多次制作、取样、测量和对比等步骤后,只有达到误差允许范围内的样品才可用于最终的施工建造。一些施工材料的声学参数测量结果见表 1。

表 1 刻度井中一些材料的声学参数

Table 1 Acoustical parameters of some material used in the calibration pits

	纵波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	声阻抗 (10 ⁶ Pa · s/m)
中等密度水泥	3219	1.52	4.89
高密度水泥	3864	2.21	8.55
地层	3841	2.26	8.68
水声材料	1746	0.95	1.67

刻度井建成后,需要对其胶结质量进行检测,如果不达标,则需要重新建造。胶结质量的检测通过利用自主研发的一套水泥胶结质量超声检测装置来实现。针对施工材料的声学参数检测和建成后的水泥胶结质量的检测是井群建造和应用中必不可少的一部分,这里统称为质量检测。

图 3 是利用超声检测仪器对示例井进行扫描成像的结果,图中可较为清晰的显示一界面自上而下的粘接状况。图中左侧的百分比数值为设计脱粘比例,右侧的数值表示实际的脱粘比例。图中的对比结果表明,施工完成后的刻度井各层段实测与设计脱粘比例的相对误差均在 10% 以内,完成的水泥胶结刻度井质量基本符合设计要求。

图 4 是 CBL/VDL 仪器在刻度井中的测量响应。图中第一道标示的深度对应有效层段的深度,例如 1.5m 处是图 2 中前两层的交界面处的深度。图中第二道为 CBL 的测量结果,图中显示的是套管波的相对声幅,即测量点处的套管幅度与自由套管处的套管幅度的比值。提取某些深度点上实际测

量的数据,并将其与数值模拟的结果进行对比,可以得到图 5。图中表明,数值模拟与仪器的实际测量响应随深度的变化具有较好的一致性。其中,两者之间的误差随深度的变化结果多数在 5% 以内。考虑到数值模拟和实际测量之间的环境误差等因素,初步认为如果两者误差在 5% 以内,则此时的仪器测量性能较好。

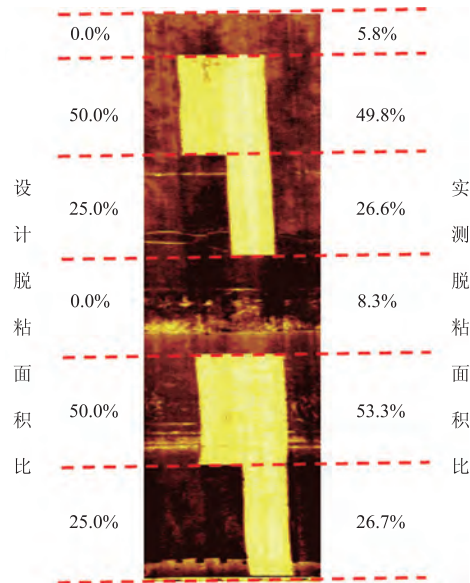


图 3 示例井中超声扫描成像的结果
Fig. 3 The results from ultrasonic scanning imaging in the sample well

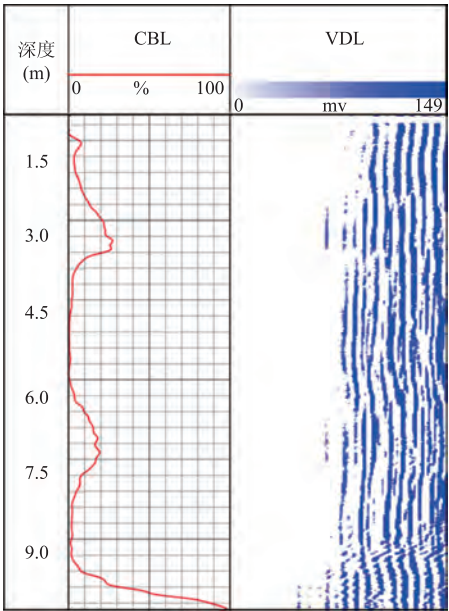
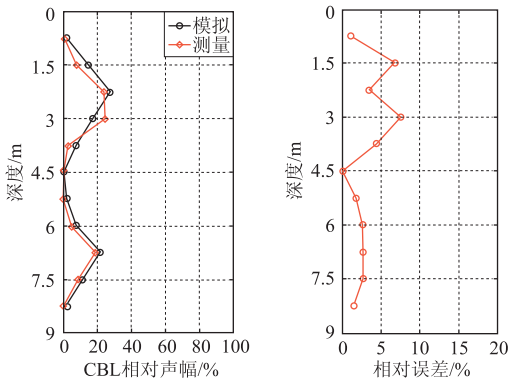


图 4 示例井中 CBL/VDL 的实际测量结果
Fig. 4 The measured results from CBL/VDL tools in the sample well



(a) CBL模拟和实际测量响应对比 (b) 两者的误差随深度的变化
图 5 示例井中模拟和测量得到的 CBL 结果的对比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured results of CBL tool in the sample well

由于示例井的有效层段的高度为 1.5 m,而 VDL 的源距较大(约 1.52 m,合 5.0 ft),因此无法完成对 VDL 的测量性能进行定量刻度,需要在刻度井群中其他的井中进行。但是,如果 CBL 的测量结果准确,则结合仪器的测量原理,可以对 VDL 灰度图像的结果进行初步的判定。

本节结合 SBT 在示例井中的测量结果,介绍应用刻度并判定该仪器测量性能的方法。图 6 是仪

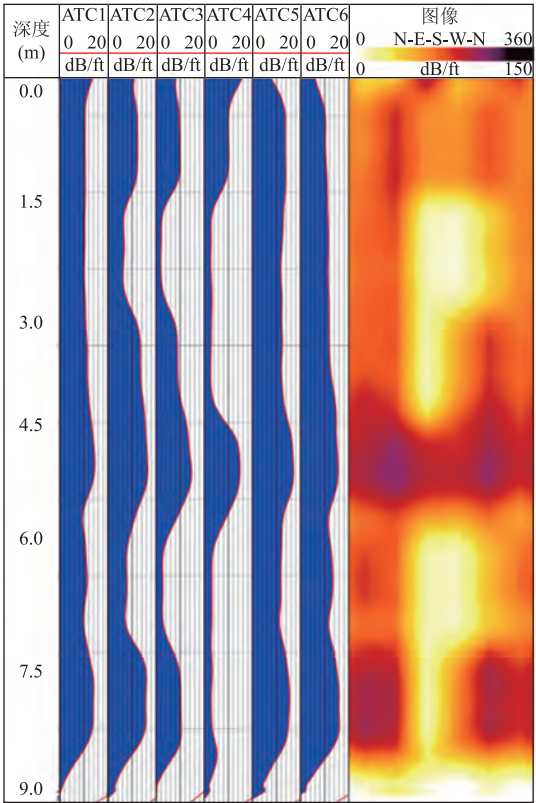


图 6 示例井中 SBT 的测量结果
Fig. 6 The measured results from SBT tool in the sample well

器在示例井中的测量结果,其中第2道依次为六个极板的补偿声波衰减率(简称ATC,即Attenuation compensated的缩写),补偿声波衰减率的大小反映了套管井中一界面的水泥胶结状态,衰减率越小,则表示胶结质量越差;反之,则表示胶结质量较好。关于该仪器的测量原理以及补偿衰减率的定义和计算公式较为复杂,具体可参考文献[4]第五章的介绍。图6中的第三道是根据第二道的测量值进行成像显示的结果。同样的,图像中颜色较浅的地

方表示一界面胶结质量较差,较深的地方代表胶结质量较好。

类似的,在充分掌握 SBT 仪器的测量原理和仪器结构后,结合质量检测中给出的刻度井各层材料的参数及粘接状况,我们可以应用数值模拟的方法得到六个极板接收到的声场全波信号,进而得到声幅的补偿衰减率和环向上的灰度成像结果。图7是数值模拟得到的补偿衰减率及成像结果。

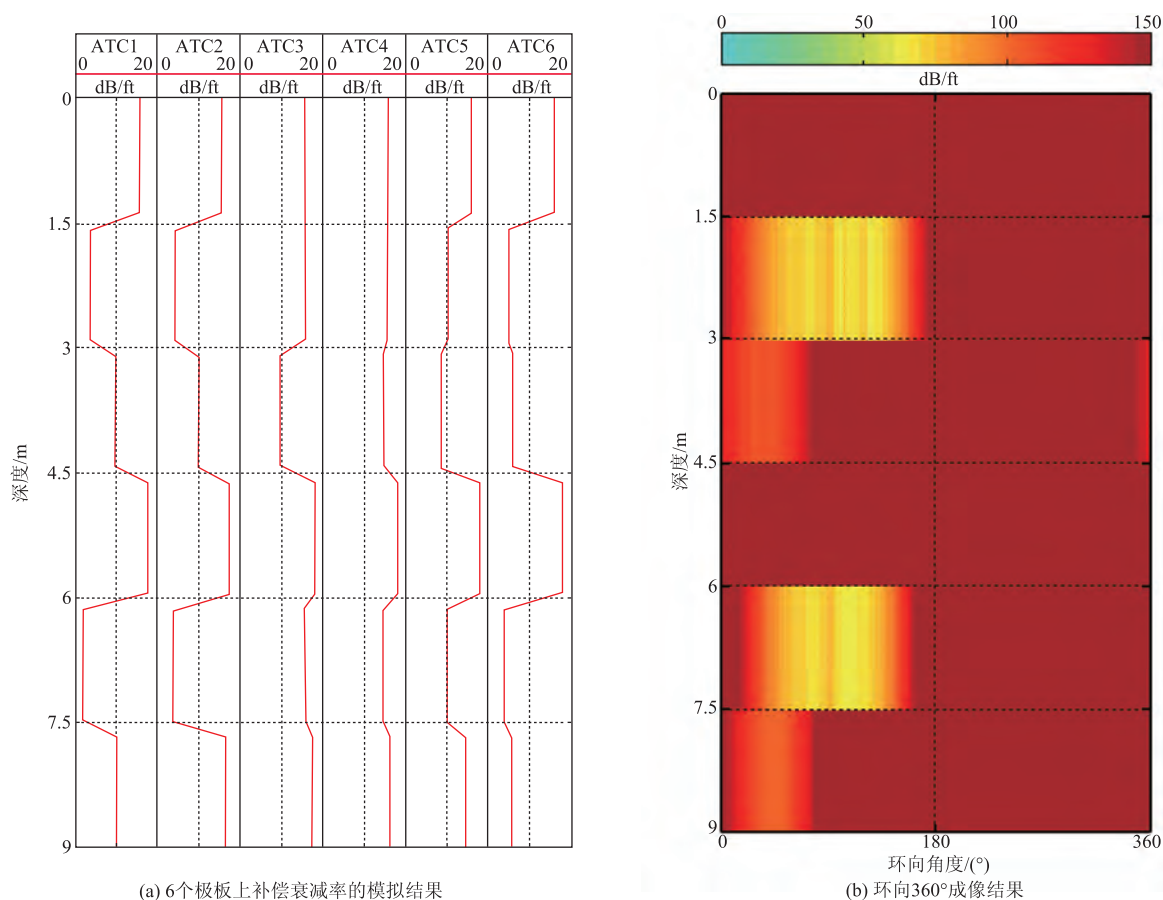


图7 示例井中 SBT 的模拟结果

Fig. 7 The simulated results of SBT tool in the sample well

将 SBT 仪器测量性能的标定分为三个层次。首先根据仪器在环向胶结均匀的层段(如示例井中第一和第四层)测量的结果判断 6 个极板的工作性能及其一致性。根据图 6 及图 3 中对仪器在第一和第四层段的测量结果,认为 6 个极板的工作性能良好,一致性也较好。其次,将 SBT 第三道的灰度成像结果与超声扫描的成像结果

(图 3)进行对比,可以初步判定本次 SBT 测量的效果。两者的对比结果表明,SBT 仪器的成像图中可以较明显的显示水泥缺失的信息,水泥缺失的深度位置和角度大小与超声扫描结果基本一致。最后,对每个层段上各极板上补偿衰减率的实际测量和数值模拟结果进行对比,得到表 2。

表 2 6 个极板衰减率的测量和模拟结果的对比

Table 2 Comparison of measured and simulated results of the attenuation compensated of the six plates

层位	ATC1 ~6 测量结果 (dB/ft)	ATC1 ~6 模拟结果 (dB/ft)	判定标准
1	均值 11,最大 14,最小 10	6 道 = 16	6 道均应在测量均值的 20% 以内
2	3 道 < 10,1 道 = 10,2 道 > 10	3 道 < 10,1 道 = 10,2 道 > 10	3 道 < 10 dB/ft
3	2 道 < 10,4 道 > 10	2 道 < 10,3 道 = 10,2 道 > 10	2 道 < 10 dB/ft
4	均值 15.3,最大 18,最小 14	6 道 = 18	6 道均应在测量均值的 20% 以内
5	3 道 < 10,1 道 = 10,2 道 > 10	3 道 < 10,1 道 = 10,2 道 > 10	3 道 < 10 dB/ft
6	1 道 < 5,1 道 = 10,4 道 > 10	1 道 < 5,1 道 = 10,4 道 > 10	2 道 < = 10 dB/ft

此处需要说明,由于实际的测量条件与数值模拟存在差别,例如,当水泥在环向上存在一定角度的缺失时,模拟计算中每个极板的方位很难与仪器在实际操作过程中的情况一致,所以每个极板的测量值难以用某一具体的数字来判定。

文中给出的评价流程和针对这两种仪器制定的测量性能评价标准是一些经验总结的结果,在刻度井群以后的使用过程中会根据实际情况进行实时调整,以制定更为合理和完善的方法和步骤。

4 结论

在吸收和借鉴国内外固井质量刻度井工作的基础上,中海油服目前已经建成了一批用于固井质量评价和套损检测的刻度井,可用于对多种固井质量评价仪器和套损成像检测仪器的测量性能进行测试和评价。在刻度井群的设计和施工前后,都包括大量的基础研究和质量测试工作,这些都充分保障了建造的刻度井群能够达到预期的应用效果。

本文以刻度井群中一口刻度井的基本应用情况为例,介绍了应用刻度井对固井质量评价仪器进行测试和标定的基本方法和步骤,文中涉及的仪器主要是 CBL/VDL 和 SBT 两种。结果表明,结合质量测试、数值模拟和实际测量的响应进行的标定流程,可用于实现仪器测量性能的初步定量标定。

特别的,根据国内外以往建造刻度井的经验,

刻度井中一些层段的胶结状态可能随时间的推移发生变化。因此,在刻度井使用的过程中需要定期维护和检测,并根据实际情况进行调整,以制定更为合理和完善的评价体系。

参 考 文 献

[1] 姜皓,楚泽涵,薛梅. 声波测井仪器发展及刻度井研究[J]. 特种油气藏. 2001,8(4):92-95.
JIANG Hao, CHU Zehan, XUE Mei. The development of acoustic logging tools and the research on calibration pits[J]. Special oil and gas reservoirs, 2001,8(4):92-95.

[2] 何建新. 俄罗斯固井质量测井仪器刻度井群实验数据分析[J]. 测井技术,2010,34(2):120-124.
HE Jianxin. The data analysis of calibration well group experiment in the Russian equipment [J]. Well logging technology, 2010,34(2):120-124.

[3] 何建新. 不同密度水泥固井质量评价的实验研究[J]. 测井技术,2009,33(4):329-332.
HE Jianxin. Experimentl study on different slurry cementing quality evaluation[J]. Well Logging Technology, 2009,33(4):329-332.

[4] 魏涛. 油气井固井质量测井评价[M]. 北京:石油工业出版社,2010.

[5] 张海澜,王秀明,张碧星. 井孔的声场和波[M]. 北京:科学出版社,2004.

[6] CHEN Y H,CHEW W C,LIU Q H. A three-dimensional finite difference code for the modeling of sonic logging tools[J]. J. Acoustic. Soc. Am. ,1998,103(2):701-712.