

# JMTC-1 型套管固井质量检测仪的试验研究

张兆俭<sup>1</sup>, 杨正伟<sup>2</sup>

(1.上海地学仪器研究所,上海 200233; 2.新疆中核天山铀业有限公司,新疆 伊犁 835000)

**摘要:**目前砂岩型铀矿开采中是采用塑料套管和用 MTC 材料固井,这类塑料套管固井具有特殊性,用检测钢套管固井质量的仪器来检测塑料套管固井质量效果不佳。为此研制了一种采用测量超声阻尼参数原理的 JMTC-1 型套管固井质量检测仪,该仪器可以适用于各种材质套管的固井质量检测。文章介绍了 JMTC-1 型套管固井质量检测仪的设计原理及其在塑料套管固井质量检测中的应用效果。

**关键词:**固井质量;超声阻尼;塑料套管;测井仪器

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)06-0054-06

## Experimental research on JMTC-1 logging tool for cementation quality

ZHANG Zhaojian<sup>1</sup>, YANG Zhengwei<sup>2</sup>

(1.Shanghai Institute of Geosciences Instruments, Shanghai 200233, China;

2.Xinjiang Tianshan Uranium Industry Co., Ltd., CNNC, Yili Xinjiang 835000, China)

**Abstract:** At present, plastic casing and MTC material are used for cementing in sandstone uranium mining. This paper discusses the particularity of plastic casing cementing. It is not effective to detect the quality of plastic casing cementing with the instruments that test the quality of steel casing cementing. Thus, a JMTC-1 logging tool using the principle of measuring ultrasonic damping parameters was developed. The instrument can be applied to the cementing quality detection for casings of various materials. This paper introduces the design principle of JMTC-1 logging tool and its application in plastic casing cementing quality detection.

**Key words:** cementing quality; ultrasonic damping; plastic casing; logging instrument

## 0 引言

砂岩型铀矿、岩盐、芒硝、钾盐、石油、天然气、煤层气、页岩气等等矿藏都是用地下钻孔抽取的开采方式。在开采钻孔中需要下入套管,并在套管外和钻孔环形空间填充胶结物,以隔断开采层和其它地层,比如隔断开采层和地下出水层即固井<sup>[1-2]</sup>。套管和地层间胶结封闭程度决定着固井质量的好坏。套管如果没有和地层胶结好,就有可能导致开采层和其它可流通地层间的窜通,造成水淹矿层或开采矿物漏失等问题。最糟糕的情况是在开采矿物的同时造成对地下水层的污染和对地面环境的污染。胶结质量或固井质量是建设这类开采钻孔最重要的指标。

石油和天然气等开采钻孔一般采用钢制套管。

胶结物一般采用高温耐油水泥。钢质套管、钻孔内的井液与大多数地层相比有较大的声阻抗差异,水泥胶结物和井液也有较大的声阻抗差异。井液、套管、水泥、地层的声阻抗界面很清晰。所以工程上一般用超声声幅测井或超声波波列测井就可以准确地评价套管和地层间的胶结质量<sup>[3-6]</sup>。

而开采砂岩型铀矿、岩盐等矿物一般要采用塑料套管,这是因为金属套管在这些场合会被酸、盐溶液腐蚀而无法使用。塑料套管的声阻抗很低,几乎和稠泥浆相似。塑料套管和孔内井液间的声阻抗差异很小,传统的声速、声幅或波列测井不能很好区分这些界面。超声波能量在塑料套管的传输衰减也比较快,超声能量传输距离相对很近,而传统仪器需要让超声波经过较长的距离传输,接收时才能明显地

**收稿日期:**2020-04-20; **修回日期:**2020-05-21 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2020.06.010

**作者简介:**张兆俭,男,汉族,1961年生,地质仪器专业,长期从事地质仪器研发工作,上海市徐汇区桂平路680号34幢2层,616537930@qq.com。

**引用格式:**张兆俭,杨正伟.JMTC-1型套管固井质量检测仪的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(6):54-59.

ZHANG Zhaojian, YANG Zhengwei. Experimental research on JMTC-1 logging tool for cementation quality[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(6):54-59.

把经套管传输的波和经井液、胶结物、地层等介质传输的波区分开。采用传统的超声声幅和超声波列测井来评价塑料套管与地层的胶结质量效果很差,或者说用传统的声波测井方法基本没有效果。

近年来,随着人们对环境保护的意识增强,钻井泥浆的排放是个大问题。为此人们开始研究泥浆再利用的方法,让钻孔过程产生的泥浆转化为固井所需的胶结物(泥浆转化为水泥,以下称作 MTC)。MTC 胶结物的声阻抗比水泥低很多,和塑料套管相近似。这使超声声幅测井和超声波列测井的固井质量评价方法效果更差<sup>[5]</sup>。

为了适应塑料套管和新的固井工艺方法固井质量的检测,需要开发研制出新的测井仪器和方法。

## 1 测井方法的选择

MTC 胶结物相对大多数地层是低电阻率的。胶结物和地层间虽然有较大的电性差异,但塑料套管是电绝缘的,这就无法用测量横向视电阻率参数来评价胶结质量。更无法对比裸眼钻孔时测得的电性参数来评价固井质量。行业内曾经试验用散射伽马密度测井参数来评价固井质量,但实际效果不好。因为在这种情况下,MTC 胶结物和泥浆的质量密度差很小,环形空间总体积也不大、环形空间的体积相对变化却较大。这些因素的影响结果,相对密度测量值响应和散射伽马密度测量的噪声(放射性统计起伏波动)相当。另外,放射性密度或中子孔隙度等参数的测量方法都要用到放射源,现场操作防护和放射性源的管理会非常麻烦。

电性、磁性、放射性等各种测井方法都不能很好地解决塑料套管和用 MTC 胶结物情况下的固井质量检测问题。由于塑料套管和固井材料的声阻抗差别很小的原因,利用超声声幅和波列的测井方法效果也不行。仪器研制前期,我们在矿场进行了大量的测井方法对比实验。使用过超声波变密度测井、超声声幅测井、散射伽马补偿密度测井等各种测井方法,对塑料套管和 MTC 固结物情况下的固井质量检测,所得到的实验效果都很差。实践证明,用这些已有的测井方法,对塑料套管及 MTC 材料胶结方式的固井质量进行检测,几乎是没有可信的评价效果<sup>[7-9]</sup>。

在进行各种测井方法的对比实验过程中,我们发现超声波在塑料套管中传输时,塑料套管呈现出

固有的声阻抗特性和传输衰减率。当套管内外填充的介质种类和密度不同,对塑料套管这种特有的声阻抗和传输衰减率两个参数测量值都有影响。或者说这种影响会等效于这两个参数值发生了变化。我们测量这两个参数的视值可等效反映出套管外 MTC 胶结物的密度或体积缺失情况。因此,我们研究将这样的参数测量方法,应用于塑料套管和 MTC 胶结物固井质量的评价。

## 2 阻尼测量原理

阻尼是能量传输过程中能量衰减速率的概念。超声波在自由套管中沿轴向可以传输最远的距离,这时超声波能量在传播路径上的衰减相对比较慢,即在自由套管中超声波传输受到的阻尼比较小。而在被 MTC 胶结好的套管中,沿套管传播的超声能量会衰减很快,因为沿套管的传输路程上,有相当大部分的能量会进入到胶结物和经过胶结物传播到地层中。所以胶结好的情况下,超声波能量衰减快,相当于套管中超声能量传输的阻尼变得较大<sup>[10-12]</sup>。

在塑料套管的一端用超声波激发器激发,比如用频率为 70 kHz 的超声波短脉冲激发套管一端,超声波就会沿套管轴向传播,传播能量总是随着传播距离的增大逐渐衰减到 0。传播能量衰减量随传播距离增大而增大,衰减率和套管材料、MTC 胶结物等条件因素有关。以传输距离  $x$  为自变量,可以列出符合这个物理规律的微分方程式:

$$dP/P = -k dx \quad (1)$$

式(1)表示在离发射源距离  $x$  远处,超声波能量是  $P$ 。经过一小段距离  $dx$  后有  $dP$  的相对衰减。也就是说,在  $x$  处超声波能量的衰减变化率  $dP/P$  和  $dx$  成比例,比率系数为  $k$ 。 $k$  的物理意义就是超声能量衰减过程的阻尼。式(1)右边的负号表示能量的增量是和  $x$  方向符号相反。代入初始条件,此微分方程的唯一解是:

$$P = P_0 e^{-kx} \quad (2)$$

式(2)中  $P_0$  是超声波的初始发射能量功率, $P$  是离激发源距离为  $x$  处的能量。从式(2)可以看出,当收、发距离  $x$  不断增大,接收到的能量功率将趋于 0。衰减系数  $k$  和套管、胶结物、管内泥浆、地层等的声阻抗等因素有关。如果套管、管内泥浆、地层、胶结物声阻抗因素在同一钻孔中是保持不变的,那么  $k$  就是常数。实际上这些因素是变化的,尤其

是胶结效果、套管和地层的环形空间大小的影响最大,所以测量阻尼  $k$  就可能评价胶结质量。

当收、发距离是固定的( $x = D$ ),测量到的、经传输的超声波能量大小就主要和胶结物、胶结程度、环形空间大小相关。或者说,收、发距离不变,接收到的超声能量大小和胶结好坏会有相关。胶结完好,在套管上传输的超声波能量很容易穿过胶结物进入地层传播出去,套管内剩下可传播的能量会很快变小。从物理现象上看,就是套管上超声波振动受到的阻尼增大。反之,套管外没有胶结,超声波在套管上的振动衰减慢,也就是振动阻尼小,能量可以传播到更远,接收器可接收到更大的能量。仪器设计中我们把收、发传感器的距离固定为  $D$ ,式(2)就变成式(3)。 $P_0$ 是仪器可设定不变的发射功率,测量接收的功率  $P$  按式(3)可以得到和胶结质量相关的阻尼值  $k$ 。

$$P = P_0 e^{-kD} \quad (3)$$

上述原理可以看出,超声阻尼  $k$  是可以用于评价套管与地层的胶结质量的。测量套管上等效的超声传输阻尼  $k$  和传统仪器测量孔中声幅意义完全不同。传统仪器采用发射、接收传感器在孔中居中的方式,超声波从发射器到接收器之间的传输途径较多,超声波列是各途径传输波的空间叠加,它们之间的相位关系复杂,相位变化大。在检测钢套管固井质量时,和套管胶结质量有关的是套管波的幅度大小。钢套管中的声波传输速度较快,一般它会首先到达接收器。同时也是为了减少其它影响因素,声幅测量都是测量超声波列的首波幅度。但塑料套管中的声速较低,其中超声传输的能量衰减很大,首先到达的就不是经塑料传输的套管波,而是其它传输快的途径来的波,比如来自地层的波。测量的声幅不是套管首波幅度就不反映套管胶结的真实情况。阻尼测量是通过超声波能量衰减测量,再用测量值计算获取阻尼  $k$  值。能量测量不会受首波到达时间延后和首波波形变坏的影响。由于各超声谐波成分在传输过程中要发生相位移,一般情况下声幅是复数,声幅测量不能完整获得虚、实分量信息。能量测量相当是进行复数模值测量,虚、实分量信息会同时被测得。采用测量和分析阻尼  $k$  的方法,新仪器不仅适用于塑料套管胶结的评价,也适合钢套管的胶结评价。不仅适用于套管和胶结物,胶结物和地层有较大声阻抗差别的情况,也适用于声阻抗

差别很小甚至没有差别的情况。

图1是为验证这种检测原理新设计的超声波传感器实物图。这组传感器的超声频率是70 kHz,峰值功率约50 W/0.1 s,可适应钻孔孔径是70~180 mm。为了日后保证足够的检测精度和沿井轴方向的分辨率,同时兼顾现场仪器使用效率,超声波传感器是采用短脉冲方式发射,脉冲间隔为200 ms。传感器设计成可以承受井下15 MPa的压力和70 °C的温度。

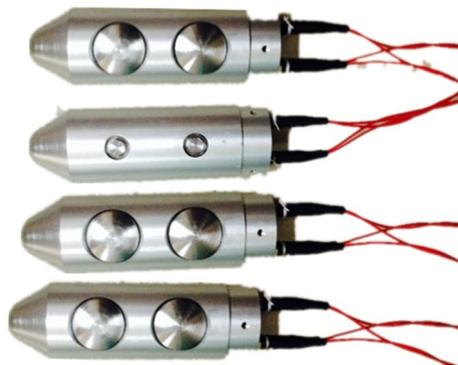


图1 超声波短脉冲传感器

Fig.1 Ultrasonic short pulse sensor

图2是一组在实验室建造的塑料套管和MTC胶结孔的模型。套管是采用天山铝业实际采矿工程中用的PVC塑料套管,胶结物是根据实际使用的MTC相近成分配制的MTC胶结物。我们采用孔径大小不同、MTC声阻抗大小不同的模型装置,进行了一系列的胶结质量和阻尼参数相关性实验研究。

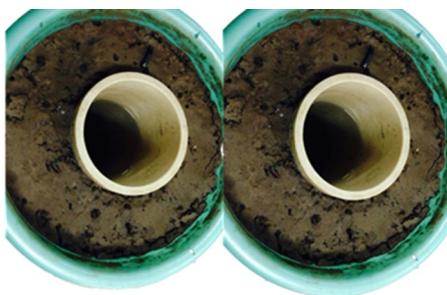


图2 实验室MTC塑料套管胶结情况实验孔

Fig.2 Experimental hole for MTC plastic casing cementation in laboratory

经过实验室内大量实验的结果清楚地表明,通过测量超声波在钻孔内沿套管传输的能量变化,进而得到阻尼参数  $k$ ,是可以很好地评价套管外有没有胶结物以及是不是已经胶结紧密。当套管和胶结物或胶结物和地层有空隙,空隙里被气体、水等低密

度流体充满时,沿套管传输超声波能量测量值相对会很大,计算后的阻尼值  $k$  很小。而胶结程度好的时候,沿套管传输的超声能量衰减快,计算得到的  $k$  值较大。这和理论设想完全一致。为了进一步得到胶结评估参数和能量测量的关系,我们定义了实用的阻尼概念,建立了胶结评估的数学方法以及和实际胶结质量的关系。为解释方便和结论直观,我们在测量程序中把阻尼的计算归一到 0~100%。当套管外完全没有胶结物或完全没有胶结,定义阻尼  $k$  值是 0,胶结很好定义  $k$  值是 100%。其它情况介于两者之间。实验表明,当测量计算的阻尼  $k$  达

50%时,套管和地层间的胶结已经很好,可以完全封隔开采地层和其它地层间的窜通。

### 3 JMTC-1 型组合测井仪设计

实际设计和生产的测井仪器(JMTC-1 型)除了能进行塑料套管固井质量检测外,还组合了自然伽马测井参数和筛管位置检测参数等,可以完整地整个钻孔的固井质量,确保检测胶结井段和筛管位置深度的准确性。考虑了用户的投入成本, JMTC-1 型组合测井仪设计成能和 JHQ-2 型轻便数字测井系统配套使用。仪器的电原理见图 3。

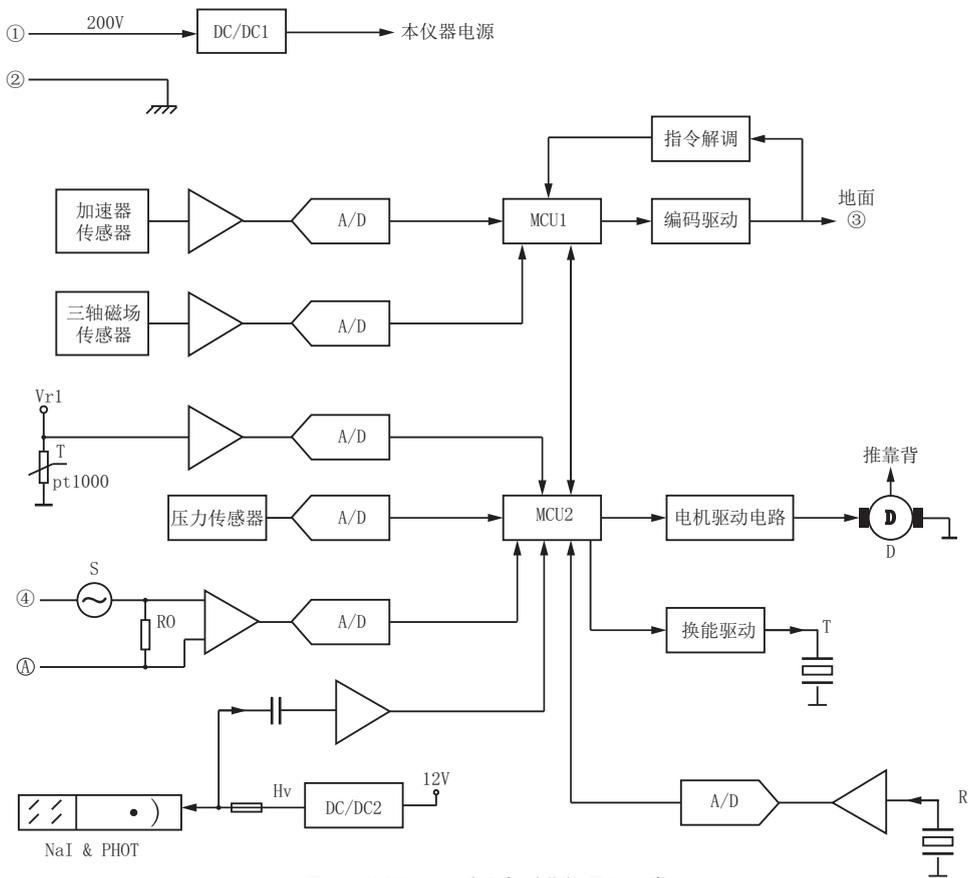


图 3 JMTC-1 型组合测井仪原理示意

Fig.3 Schematic diagram of the principle for JMTC-1 combined logging tool

JMTC-1 型组合测井仪一次下井能获取测自然伽马、单极电流、井温、井底出砂高度、井斜和阻尼等多个参数。自然伽马和单极电流参数用于检查确定筛管和矿层的位置是否一致。井温、井斜、井底出砂高度等参数是后续孔中安装开采设备必需的数据。采用 JMTC-1 型组合测井仪可以一次完成过去需要多次测井才能完成的工作,大大提高了工作

效率。仪器传感器探测的信号在井下经过放大、处理和计算,再通过数字信号编码传输到地面。测量和信号处理都在 JMTC-1 型仪器内部完成,然后再把处理好的信号以数字编码方式传输到地面,避免了模拟信号在测井电缆上的衰减和长线干扰问题。仪器在地面事先经过刻度标定,测量的参数传输到地面已经是成果数据<sup>[10-13]</sup>。

设计 JMTC-1 型仪器时考虑了仪器能适用更广泛的行业,仪器外壳采用耐酸、耐盐材料制造。仪器可耐水压 15 MPa,耐环境温度 70 °C,可以用于地下深度在 1500 m 以浅的各类矿藏开采孔的套管固井质量检测。

JMTC-1 型仪器中采用了双微处理单元(MCU)设计<sup>[10-15]</sup>,具有很好的自适应工作状态调整功能,保证了仪器的可靠性和测量精度。仪器在地面事先经过刻度标定,标定方程存储在仪器内部,工作时 MCU 根据标定方程处理测量数据,不需要操作人员处理数据,所以仪器在现场使用很方便,接上测井电缆即可下井测量。测量过程不需要人工处理数据操作,保证了测量结果不受人为因素的影响。

无论是初学者或者有经验者,获取的成果资料都是很优的。

图 4 是实际测井成果曲线。图中左边的阻尼曲线是注浆前测得的(固井前),右边的是注浆后测得的。左边曲线的阻尼值很小,在套管节箍处因为套管变厚,等效阻尼会有规律的变大。右边的曲线阻尼值都变成大于 80%,说明套管和地层间的环形空间注浆充分,该孔段的胶结良好。这样的胶结质量就不会存在上下地层流体窜通的情况。实验室的实验表明,胶结物的密度超过 1.4 g/cm<sup>3</sup>,胶结良好的话,阻尼值都会在 70% 以上。胶结物密度越高,胶结强度越好,阻尼值越大,固井质量越高。

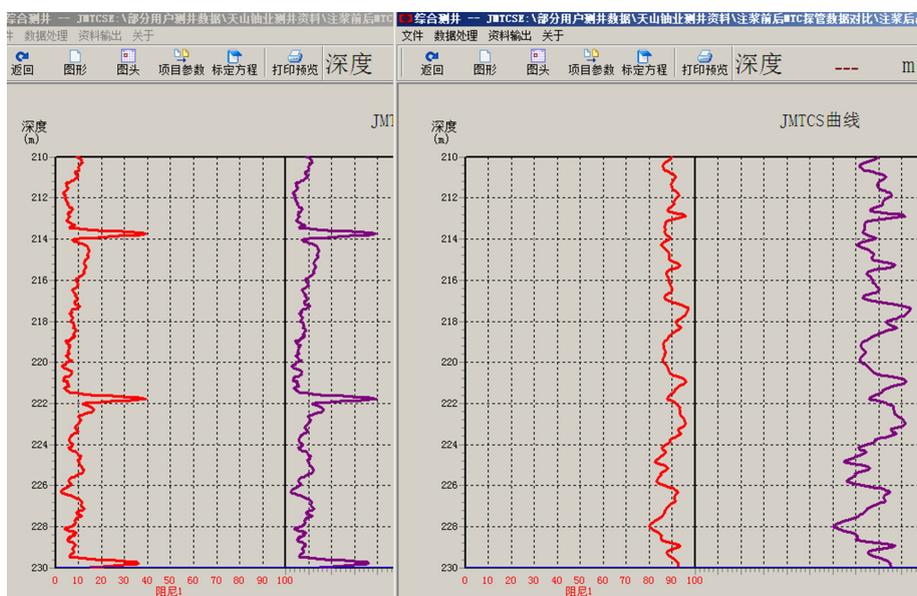


图 4 实际钻孔中塑料套管固井前后的实测资料对比

Fig. 4 Comparison of logging data before and after cementing of plastic casing in actual boreholes

为了在使用现场也能标定和检验仪器,在新疆某地的砂岩铀矿开采现场建造了塑料套管和 MTC 胶结质量评估的标准孔(见图 5)。设计孔深 6 m,胶结物是铀矿开采工程实际使用的 MTC 材料。标准孔深度剖面为砾料厚 1 m;泥浆混合物厚 1 m;高标水泥厚 1 m;MTC 料厚 1 m;二次封孔砾料厚 1 m;造空 1 m;塑料管内径 104 mm,外孔 300 mm。利用该仪器进行实际检测,取得了良好的效果。目前已有数家单位正在使用该仪器进行检测工作。



图 5 矿场现场建设的胶结质量评估标准孔

Fig. 5 Cement quality evaluation standard holes constructed on site

#### 4 结语

JMTC-1 型组合测井仪的阻尼参数测井方法

是新推出的一种测井方法,在国内外首先应用。实践证明用阻尼参数  $k$  评价塑料套管和地层胶结状况是一种比较好的方法。JMTC-1 型组合测井仪是一种小直径的仪器( $D=50\text{ mm}$ ),适用孔径范围大( $70\sim 180\text{ mm}$ )。JMTC-1 型组合测井仪测量的阻尼参数和套管胶结质量相关性好,物理原理和数学模型简单,测量结果没有人为因素影响和多解性,仪器在现场应用方便。阻尼参数  $k$  的测量方法可适用于各类套管。套管、胶结物的声阻抗不同,测量评价结论都是正确的。所以这种方法和这种仪器适用的行业范围更广泛。随着地下矿藏开采的套管胶结、地下储存罐稳固、地下建设管线固定等项目的工程量增多,超声阻尼测量方法将是一种很方便实用的胶结检测法。采用这种方法不仅方便准确,也是一种无损工程质量检测方法,没有操作危险和危害。

JMTC-1 型组合测井仪阻尼参数  $k$  测量用的是水声传感器。需要借助井液耦合才能完成超声发射和接收,所以钻孔内没有井液就没法应用。这对于钻孔内没水和水位很深的情况,使用就不方便,需要在测井前灌水。

测量参数  $k$  的物理意义明确、概念可靠,测量方法相对简单,容易实现和计算,同时从仪器实际应用的效果看,JMTC-1 型组合测井仪达到了设计的目的。

## 参考文献 (References):

- [1] 陈鹏,郑毅.MTC 固井质量检验方法及评价标准[J].钻井液与完井液,1998,15(1):16-19.  
CHEN Peng, ZHENG Yi. MTC cementing quality inspection method and evaluation criteria[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1998,15(1):16-19.
- [2] Erik B. Nelson.现代固井技术[M].刘大伟,田锡君,廖润康,译.沈阳:辽宁科学技术出版社,1994:26-64.  
Erik B. Nelson. Well cementing[M]. Translated by LIU Dawei, TIAN Xijun, LIAO Runkang. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1994:26-64.
- [3] 程宗芳.地浸工艺钻孔中的施工技术[J].铀矿冶,2003,22(2):61-64.  
CHENG Zongfang. The construction technique of borehole for in-situ leaching process[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2003,22(2):61-64.
- [4] 王海峰,阙为民,钟平汝,等.原地浸出采铀技术与实践[M].北京:原子能出版社,1998:116-119.  
WANG Haifeng, QUE Weimin, ZHONG Pingru, et al. Technology and practice of in-situ leaching of uranium[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1998:116-119.
- [5] 王海峰,田时丰.地浸采铀钻孔套管壁厚的讨论[J].铀矿冶,

- 2006,25(3):113-115,126.  
WANG Haifeng, TIAN Shifeng. Discussion on thickness of borehole casing for in-situ leaching of uranium[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2006,25(3):113-115,126.
- [6] 黄河福,步玉环,田辉,等.MTC 固井液二界面胶结强度实验研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(6):46-50.  
HUANG Hefu, BU Yuhuan, TIAN Hui, et al. Bonding strength experiment of mud to cement fluid on the second interface[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(6):46-50.
- [7] 陈荷娟,马宝华.水中探测超声换能器研究[J].仪表技术与传感器,2001(7):9-11.  
CHEN Hejuan, MA Baohua. Reserch of ultrasonic transducer for underwater detecting[J]. Instrument Technique and Sensor, 2001(7):9-11.
- [8] 胡建恺,张谦琳.超声检测原理和方法[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1993:78-100.  
HU Jiankai, ZHANG Qianlin. Principle and method of ultrasonic detection[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1993:78-100.
- [9] P.G.柏克曼,等.水声学物理基础(上)[M].邵维文,桂宝康,吴绳武,等译.北京:科学出版社,1958:69-99.  
P.G. Berkman, et al. Physics of sound in the sea (Part 1)[M]. Translated by SHAO Weiwen, GUI Baokang, WU Shengwu, et al. Beijing: Science Press, 1958:69-99.
- [10] 楚泽涵.声波测井原理[M].北京:石油工业出版社,1987:162-177.  
CHU Zehan. Principles of sonic logging[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987:162-177.
- [11] 朱英启,尹悦生.测井专用仪器[M].北京:石油工业出版社,1993:157-172.  
ZHU Yingqi, YIN Yuesheng. Special logging instrument [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993:157-172.
- [12] 胡澍.地球物理测井仪器[M].北京:石油工业出版社,1991:150-225.  
HU Shu. Geophysical logging instrument[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991:150-225.
- [13] 德莱赛-阿特拉斯公司.测井与解释技术[M].尚作源,黄隆基,洪有密,等译.北京:石油工业出版社,1991:159-177.  
Dresser Atlas. Well logging and interpretation techniques [M]. Translated by SHANG Zuoyuan, HUANG Longji, HONG Youmi, et al. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991:159-177.
- [14] 赵仕俊.石油仪器概论[M].北京:石油工业出版社,2011:89-128.  
ZHAO Shijun. Introduction to petroleum instruments[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011:89-128.
- [15] 张家田,陈宝,严正国.测井电子信息技术[M].北京:石油工业出版社,2010:161-212.  
ZHANG Jiatian, CHEN Bao, YAN Zhengguo. Electronic information technology for well logging [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010,161-212.