

# 声阻抗技术在泡沫水泥固井质量评价中的应用

李兆阳

(中国石化集团华北石油局数字测井站, 河南新乡 453700)

**摘要:**分析了泡沫水泥在固井工程方面应用的特点及传统水泥胶结测井(CBL)方法检测泡沫水泥固井质量的局限性。介绍了基于超声脉冲声阻抗测井的声阻抗差分技术的原理及应用的关键点。与常规水泥相比,泡沫水泥声阻抗值较低,用CBL中的常规声幅曲线评价泡沫水泥与套管的胶结质量,可能会得出错误的解释结果。利用超声脉冲声阻抗差分逻辑可以有效地区分泡沫水泥与流体,对第1界面作出准确评价。同时使用超声脉冲和CBL测井仪可以精确地确定水泥壳的胶结情况及水泥与套管、水泥与地层的胶结质量。用实例说明了基于超声脉冲声阻抗测井的声阻抗差分技术在检测泡沫水泥固井质量的应用效果。

**关键词:** 泡沫水泥; 声阻抗; 谐振窗口; 声阻抗差分逻辑

**中图分类号:** P631.8

**文献标识码:** A

在油气井中使用泡沫水泥固井有以下优点:①超强的泥浆替换能力;②更好地控制气体迁移;③水泥环壳具有抗应力破裂的能力,可以长期密封环面接缝。目前用于水泥胶结评价的测井仪为传统的声波水泥胶结测井仪(CBL)和超声扫描仪。传统的CBL测量信息不适用于泡沫水泥胶结的第1界面评价。泡沫水泥与常规水泥相比,减小了固有的阻尼作用,影响了CBL测井信息中声幅的测量结果。质量好的泡沫水泥胶结,其套管波幅度在20~50 mV之间,相当于常规水泥胶结差的套管波幅度值。利用一般方法对超声扫描的声阻抗成像数据进行泡沫水泥胶结评价时,因为泡沫水泥的声阻抗可能低于水、钻井泥浆或空间隔离流体的声阻抗,甚至接近自由气体的声阻抗,所以不可能得出正确的评价结果<sup>[1~3]</sup>。

使用基于超声脉冲声阻抗测井的声阻抗差分技术可以准确、有效地评价低密度水泥、泡沫水泥固井质量。同时使用超声脉冲测井仪和CBL时,可以精确地确定水泥壳的胶结情况及水泥与套管、水泥与地层的耦合情况。本文以环周超声扫描仪CAST-V为例,介绍套管井中的声阻抗测量技术和用于泡沫水泥固井质量评价的声阻抗差分技术。

## 1 套管井中的声阻抗测井技术

声阻抗测量是超声扫描仪用于评价套管井水泥胶结的基础。环周超声扫描仪CAST-V通过对套管谐振脉冲的处理,可以准确获取套管外面介质的声阻抗数组数据信息。进行固井质量测井时,CAST-V置于套管井模式,井下仪底部可旋转的

高分辨率声波传感器周向脉冲扫描率为100(扫描点数),垂直方向每英尺4次采样。反射的声脉冲信息包括套管内壁的直接反射声脉冲和随后的套管谐振脉冲(图1),谐振脉冲幅度经增益放大器放大后,与直接反射脉冲一起输入到井下仪数字转换器。图2显示的是输入到数字转换器,用于声阻抗计算的套管模式电压波形<sup>[4,5]</sup>。图中12.8 μs的时域区间即为计算、测量声阻抗的谐振窗口。

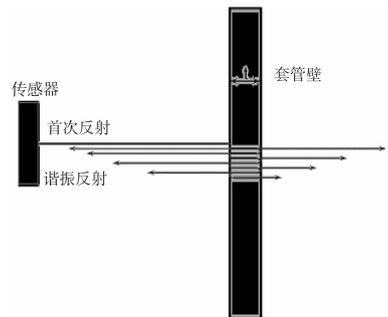


图1 套管井反射脉冲示意

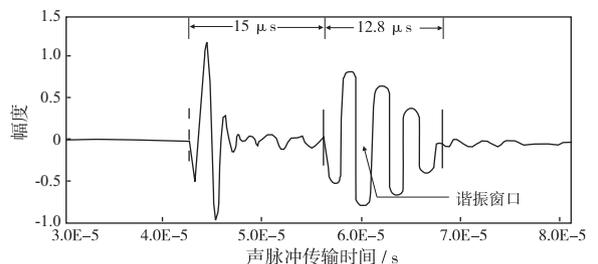


图2 套管模式波形

套管外面介质的声阻抗( $Z_p$ )测量值是套管壁

收稿日期:2006-05-10。

作者简介:李兆阳(1967—),女,工程师,1990年毕业于石油大学(山东)矿场地球物理专业,现从事测井资料解释与方法研究工作。

厚( $C_t$ )和谐振脉冲幅度计量总和( $S_{um}$ )的函数。井下仪处理器对谐振窗口内的脉冲幅度进行累加可得出总计量值  $S_{um}$ , 累加之前负值转成正值。计量总值愈小, 水泥胶结程度愈高。套管厚度的计算基于套管的谐振频率( $f_c$ ), 处理器运用傅里叶变换对谐振频率进行精算, 再结合套管的声速( $V_c$ )就可以确定套管厚度( $C_t$ ), 即  $C_t = V_c / (2f_c)$ 。  $S_{um}$  和  $C_t$  编码后经电缆上传至地面, 由地面系统计算出套管外面介质的声阻抗  $Z_P$ 。声阻抗计算公式为

$$Z_P = a_0 + b_0 C_t + c_0 \lg S_{um} + d_0 C_t \lg S_{um} \quad (1)$$

式中:  $Z_P$  为套管外面介质的声阻抗;  $C_t$  为套管厚度;  $S_{um}$  为谐振窗口内声脉冲幅度的计量总值;  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $c_0$ ,  $d_0$  为根据已知声阻抗和套管厚度理论模拟计算的相关系数。针对本文讨论的方法, 一个深度点对应的  $Z_P$  为一组 100 个点的数据阵列。

直接利用声阻抗评价泡沫水泥胶结, 不可能得出正确的解释结果。评价泡沫水泥胶结的主要问题是泡沫水泥的声阻抗可能等于或低于环形空间中泥浆或水的声阻抗, 如果利用一般方法评价泡沫水泥胶结, 很容易将胶结的泡沫水泥错误地解释为流体或水。利用声阻抗差分技术可以有效地区分泡沫水泥胶结和水。

## 2 声阻抗差分逻辑及评价技术

差分评价技术就是将不同深度的声阻抗数据进行逻辑对比来确定井下仪测井数据的活动量。进行泡沫水泥、低密度水泥胶结测井时, 如果仪器测量的是水或流体, 那么从一个采样深度到另一个采样深度, 声阻抗测量值几乎不变或显示出微小的变化。然而, 水泥胶结段的声阻抗响应应具有有一定程度的差异, 如果进一步计算出这种差异或相对变化, 就可以确定套管外低声阻抗的介质是泡沫水泥胶结还是流体或者通道<sup>[6]</sup>。

### 2.1 差分逻辑

差分处理根据不同采样深度声阻抗数据的差异, 对于某一个深度点  $n$ , 利用输入的声阻抗数组  $Z_P$  可创建  $D_Z$  和  $C_{EMT}$  数组。基本逻辑关系如下:

$$D_Z(n+k-1, i) = \frac{\sum_n^{n+2k-1} |[Z_P(n, i) - Z_P(n+1, i)]|}{2k} \quad (2)$$

式中:  $D_Z$  是微分或差分数组;  $n$  是当前深度,  $n+1$  是下一个采样深度;  $i$  是数组数据中的当前位置, 对于 CAST-V 测井仪来讲,  $i$  为 1~100;  $k$  为垂向

上用于数据大小比较的采样点数, 可以取 2, 4, 6, 8, ...;  $Z_P$  为套管外介质的声阻抗数组。

差分数组  $D_Z$  是采样点之间声阻抗的绝对差异, 数据数组大小与  $Z_P$  相同。将  $Z_P$  和  $D_Z$  的数值进行逻辑对比可产生最终的水泥胶结指示曲线  $C_{EMT}$ 。该数组曲线由 1 或 0 (1 和 0) 组成, 1 代表水泥胶结, 0 代表流体。

### 2.2 差分逻辑评价

通过差分处理和逻辑对比, 可以有效区分固结的泡沫水泥和流体。如果认为某采样点的介质为流体, 则必须同时满足 2 个条件: ①  $D_Z[n, i] < D_{ZWAT}$ ; ②  $Z_P[n, i] < C_{EMILIM}$ ; 否则为固结的泡沫水泥。  $D_{ZWAT}$  为声阻抗变化截止参数或者为流体截止值,  $C_{EMILIM}$  是被考虑为流体的最高声阻抗读数。仪器设计(传感器尺寸、发射频率和脉冲扫描点数)不同, 这 2 个参数的设置不同。对于 CAST-V 测井仪来讲, 通常将  $D_{ZWAT}$  和  $C_{EMILIM}$  分别设为 0.15 和 2.7。

在进行逻辑判断时, 如果不以原始数据  $Z_P$  为基准, 而单独使用  $D_Z$ , 很可能对固井作业作出错误的解释<sup>[7]</sup>。例如, 水泥胶结很好, 且声阻抗值大于 3, 但数值变化非常小, 如果只用  $D_Z$ , 则可能错误地解释为水。如果微分  $D_Z$  和标定的声阻抗数组  $Z_P$  均指示为水, 就解释为水; 如果这 2 个数组均指示水泥胶结, 就解释为水泥胶结, 这就是创建水泥胶结数组  $C_{EMT}$  的逻辑。

## 3 应用实例

图 3 是某井的泡沫水泥固井质量解释成果图。同时使用超声扫描仪 CAST-V 和 CBL 可以准确地评价泡沫水泥的第 1 界面和第 2 界面。图中第 1 道显示的  $Z_{AVG}$  和  $D_{ZAVG}$  分别为平均声阻抗曲线和声阻抗平均差分曲线。从图中可以看出, 2 369.3 m 上下的平均声阻抗基值基本相同, 但声阻抗平均差分曲线  $D_{ZAVG}$  在该深度点的上部、下部差别很大。该深度点上部  $D_{ZAVG}$  曲线基值较高, 且变化剧烈, 对应泡沫水泥胶结段; 下部  $D_{ZAVG}$  曲线基值明显减小, 变化平缓, 套管外为流体。第 2 道  $A_{MP}$  为 CBL 测井仪测得的声幅曲线。第 3 道  $W_{MSG}$  为常规变密度显示。第 4 道显示的是用超声扫描仪测得的声阻抗数组  $Z_P$  的成像。第 5 道为基于声阻抗  $Z_P$  的差分变量  $D_Z$ 。第 6 道  $C_{EMT}$  为经声阻抗差分逻辑处理后的最终结果, 直观显示第 1 界面的胶结情况。从图中可以看出, 2 369.3 m 上部常规

声幅曲线值在 42%~48% 之间,套管波波至呈明显的黑色条带显示, CBL 的测量信息显示第 1 界面胶结很差,而经声阻抗差分逻辑处理后的  $C_{EMT}$  显示该段第 1 界面胶结较好,这说明常规的 CBL 测井仪不适用于泡沫水泥与套管(第 1 界面)的胶

结评价。CBL 波形中的地层波可用于确定泡沫水泥与地层的胶结。第 7 道为结论,其中 1 是根据声阻抗差分逻辑处理出的、泡沫水泥第 1 界面的解释结果,2 是根据 CBL 波形中的地层波得出的第 2 界面评价结果。

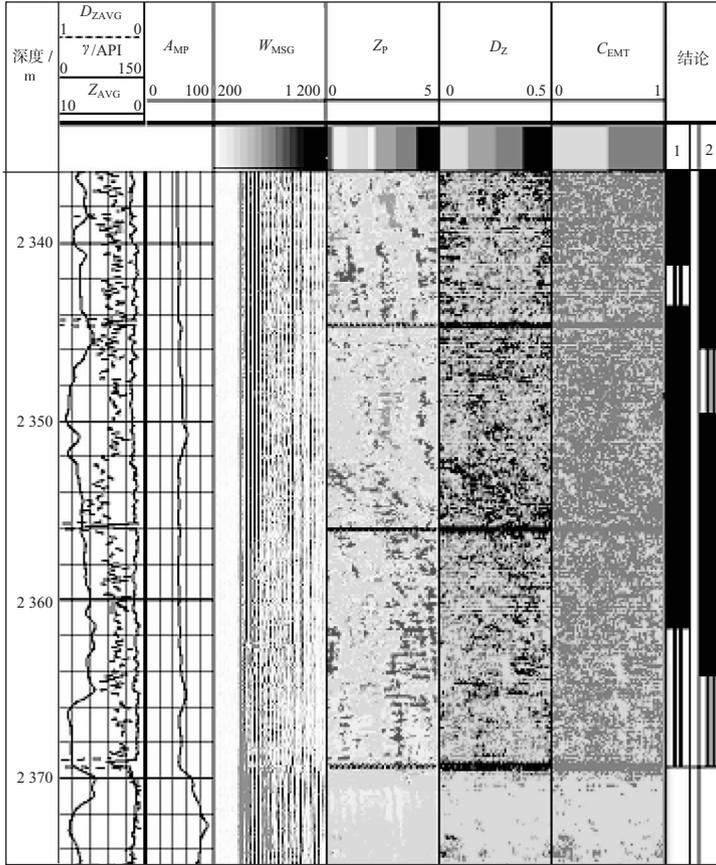


图 3 泡沫水泥固井解释成果

## 4 结论

1) 传统的 CBL 测井信息可用于常规水泥固井质量评价,但不适用于低密度水泥、泡沫水泥的胶结评价。

2) 利用声阻抗测井及其差分逻辑可以准确确定泡沫水泥与套管的胶结情况,有效区分泡沫水泥与流体或水。

3) 同时使用 CBL 和超声脉冲测井仪,并对声阻抗进行差分逻辑处理,可以精确地评价水泥壳的胶结情况及第 1 界面、第 2 界面的固井质量。

### 参 考 文 献

1 Harness P E, Sabins F L, Griffith J E. New technique provides better low-density-cement evaluation [J]. The

1992 SPE Western Regional Meeting, 1992, SPE24050

2 Frisch G J, Graham W L, Griffith J. Assessment of foamed cement slurries using conventional cement evaluation logs and improved interpretation methods[J]. The SPE Rocky Mountain Regional Meeting, 1999, SPE55649

3 石油测井情报协作组. 测井新技术应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1998. 304

4 李甲. 水泥胶结测井在开窗侧钻井中的应用与评价[J]. 石油物探, 2003, 42(1): 122~125

5 秦绪英, 宋波涛. 测井技术现状与展望[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(1): 26~34

6 孙建孟, 苏远大, 李召成等. 定量评价固井 II 界面胶结质量的方法研究[J]. 测井技术, 2004, 28(3): 199~202

7 车小花, 乔文孝, 闫向宏. 不同胶结状况对固井质量测井影响的模拟实验研究[J]. 测井技术, 2005, 29(3): 185~187