

钻井泥浆声传输函数、衰减和声速的测量

李明轩 鲁操* 施伟群 黄业栋**

(中国科学院声学所)(石油大学)

1988年9月6日收到

本文选用四种不同的钻井泥浆,测量了它们的声传输函数、声速以及声衰减随温度变化等声学特性。结果表明:在测量频段为0.8MHz—4.0MHz范围内,钻井泥浆的声传输函数中衰减系数 α 与频率的一次方成正比;在上述频段内,泥浆的声速较为稳定,不发生频散现象;选择一种完井液泥浆,从室温28℃加热至50℃,在它由50℃降温至41℃过程中,其声衰减急剧增大;再由41℃降温至28℃,声衰减逐渐减弱;在温度为41℃时声衰减最大,在室温附近声衰减趋于恒定。

一、引言

钻井泥浆是一种复杂的两相粘性流体。在钻井过程中它起着平衡井下地层压力、运输井下岩屑等作用。泥浆不仅能影响钻速,而且对井下油气渗透层的探测也有影响。目前在声波

测井工作中,人们对泥浆有关声学特性仍缺乏充分了解。我们选择了四种不同的钻井泥浆,在实验室条件下测量了它们的声传输函数、声速以及声衰减与频率及温度的关系。可为今后的声波测井工作提供初步的参数。

实验中所选用的四种钻井泥浆,其成份及物理参数如表1所示。

表1. 四种钻井泥浆成份及参数表

名称	代号	比重 (g/cm ³)	组成	外观	粘度(厘泊) P(泊)=Pa·s(帕秒)
完井液1	N1	1.425	原浆 加重剂(含钙)	固相颗粒均匀分布 稳定性好	24
完井液2	N2	1.150	原浆 加重剂(含食盐)	很稀,灰黑色 稳定性差,固相与液相分离	41
基浆1	N3	1.155	搬土浆 重晶石粉	分布均匀,稠白	17
基浆2	N4	1.04	搬土浆	乳状,稠而稍黄	15

完井液N1,比重大,含有较多的惰性固相物质,含钙盐加重剂,稳定性好。

完井液N2,比重小,虽加有含食盐加重剂,但稳定性较差,放置时间长以后有沉淀现象。

基浆N3,低比重,以搬土浆为主,加入少量重晶石粉。固相颗粒均匀分布在泥浆中。

基浆N4,比重很小,成份为搬土浆,呈乳胶状。

二、泥浆声传输函数的测量

1. 泥浆声传输函数的测量方法

我们采用比较测量方法。将一个有机玻璃小水槽放入一个大水槽中,然后在小水槽中先

* 石油大学(北京)应用地球物理系。

** 石油大学(华东)八八年应届毕业生。

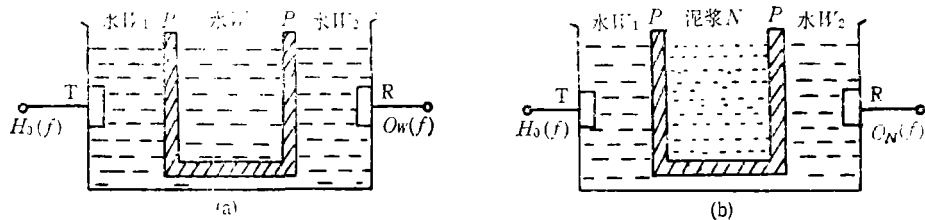


图1 声传输函数测量方法示意图

后放入水和泥浆,分别测量它们的声传输函数.如图1中(a)、(b)所示,其中T为发射探头,R为接收探头.

实验中采用穿透法测量,设信号源发射谱为 $H_0(f)$; 发射探头和接收探头谱分别为 $H_T(f)$ 、 $H_R(f)$; 小槽内水 W 和小槽外水 W_1 、 W_2 的传输函数分别为 $H_W(f)$ 、 $H_{W_1}(f)$ 和 $H_{W_2}(f)$; 泥浆 N 的传输函数为 $H'_N(f)$; 小槽内盛水或者泥浆时两壁的透射系数分别为 $T_{PW}(f)$ 、 $T_{WP}(f)$ 或者 $T_{PN}(f)$ 、 $T_{NP}(f)$; 小槽内盛水和泥浆时,接收信号分别用 $O_W(f)$ 和 $O_N(f)$ 表示,则对于(a)、有

$$O_W(f) = H_0(f) \cdot H_T(f) \cdot H_{W_1}(f) \cdot T_{PW}(f) \cdot H_W(f) \cdot T_{WP}(f) \cdot H_{W_2}(f) \cdot H_R(f) \cdot G_W(f)$$

式中 $G_W(f)$ 为小槽内为水时的声扩散因子. 对于(b), 同样有:

$$O_N(f) = H_0(f) \cdot H_T(f) \cdot H_{W_1}(f) \cdot T_{PN}(f) \cdot H'_N(f) \cdot T_{NP}(f) \cdot H_{W_2}(f) \cdot H_R(f) \cdot G_N(f)$$

式中 $G_N(f)$ 为小槽内为泥浆时的声扩散因子.

在测量过程中,小槽盛水和盛泥浆的实验条件基本相同.水和泥浆的声阻抗率接近,可近似取 $G_W(f) = G_N(f)$,由以上二式可得

$$H'_N(f) = \frac{O_N(f) \cdot T_{PW} \cdot T_{WP} \cdot H_W(f)}{O_W(f) \cdot T_{PN} \cdot T_{NP}} \quad (1)$$

令

$$T_{PW}(f) \cdot T_{WP}(f) = T_W;$$

$$T_{PN}(f) \cdot T_{NP}(f) = T_N;$$

由于水和泥浆的声阻抗率不同,故有 $T_W/T_N \approx 1$. 可令 $T_W/T_N = T(d, f)$, d 是小槽壁厚度.

在实验中我们直接测得 $O_N(f)$ 和 $O_W(f)$.

应用声学

若令 $H_N(f) = H'_N(f)/H_W(f)$, 即 $H_N(f)$ 为泥浆相对于水的声传输函数,通常水的衰减相对于泥浆是很小的,且近乎为与频率无关的常数,则 $H_N(f)$ 即可表示为泥浆的声传输函数. 由(1)式可写成

$$H_N(f) = \frac{O_N(f)}{O_W(f)} \cdot T(d, f) \quad (2)$$

式中 $T(d, f)$ 是槽壁引入的影响项,我们将在后面加以讨论. 由此可见,消除小槽壁的影响以后,根据测量值 $O_N(f)$ 和 $O_W(f)$ 就可求得 $H_N(f)$.

由传输函数的一般表示式

$$H_N(f) = e^{-\alpha(f) \cdot l}$$

可得泥浆的声衰减系数

$$\alpha(f) = -\frac{1}{l} \ln \left[\frac{O_N(f)}{O_W(f)} \cdot T(d, f) \right] \quad (3)$$

它是频率的函数,取 $\alpha(f) = a_0 + a_1 f + b f^2 + c f^4$, 其中 a_0 为与频率无关的衰减常数. a_1 、 b 、 c 为待定常数,它们可由实验曲线拟合后得出.

2. 泥浆声传输函数测量装置

本文采用的测量装置如图2所示.

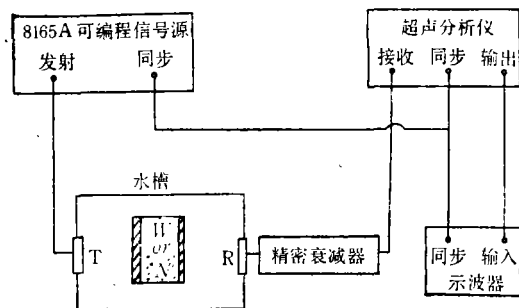


图2 实验装置图

由 8165A 可编程信号源发射正弦填充方

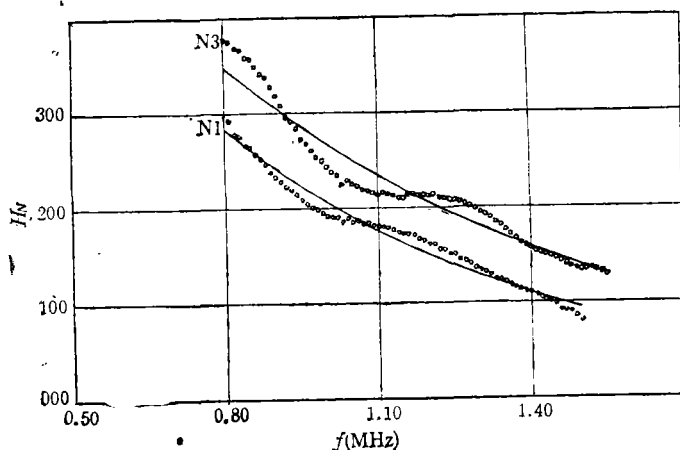


图3 低频段 N1、N3 泥浆相对于水的声传输函数测量曲线

波激发声波穿透被测物质,接收信号经精密衰减器、超声分析仪、在示波器上同步显示。为保证测量精度,测量前首先要调整发射探头和接收探头同轴,使之垂直透射小槽,直至接收信号最佳为止。

3. 测量结果及分析

首先测出 $O_N(f)/O_W(f)$, 进而求得泥浆相对于水的声传输函数。然后进行曲线拟合,求出声衰减系数 $\alpha(f)$ 中各频率方次项系数。在频段为 0.8MHz—1.5MHz 的低频范围内,泥浆 N1 和 N3 的测量结果如图 3 和表 2 所示。

表 2 ——图 3 中曲线拟后所得系数

系 数	N1	N3
a_0	0.1044	-0.0076
a_1	0.2239	0.1869
b	0	0
c	0	0

在频段为 1.2MHz—3.4MHz 中频范围内,泥浆 N1、N2、N3 声传输函数的测量结果如图 4 和表 3 所示。

表 3 ——图 4 中曲线拟合所得系数

系 数	N1	N2	N3
a_0	0.1390	-0.0048	-0.0105
a_1	0.1946	0.0662	0.1572
b	0	0.0486	0
c	0	0	0

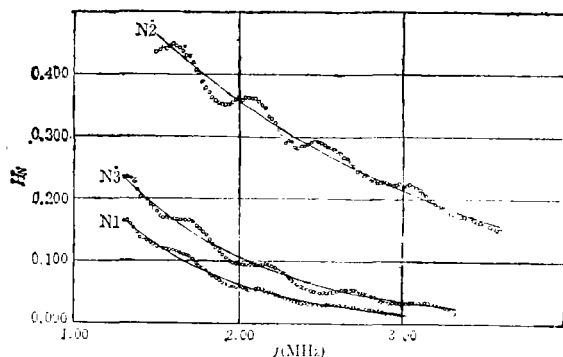


图 4 在中频段 N1、N2、N3 三种泥浆相对于水的声传输函数曲线

对于更高的频段,我们发现此时由于声衰减急剧增大,要想获得完整的传输函数曲线已比较困难。我们选择泥浆 N1,测量了频段为 2.5MHz—4.3MHz 范围内的幅度衰减曲线,如图 5 所示。图中纵坐标为直接测量的声波幅度值。

从测量到的低、中、高频段不同泥浆的声传输函数和衰减系数可以看出,声传输函数衰减因子 $\alpha(f)$ 主要与频率 f 的一次方成正比,而且在兆赫级频率范围内,声衰减随频率变化很剧烈。在 1 兆赫附近,声衰减与水相差不大,但频率为 4 兆赫时,声衰减大到几乎测不到信号。三种泥浆中,N1 声衰减最大,N3 次之,N2 声衰减最小。从这三种泥浆的物理特性上看,泥浆 N1 比重最大,含钙盐添加剂;泥浆 N3 是在

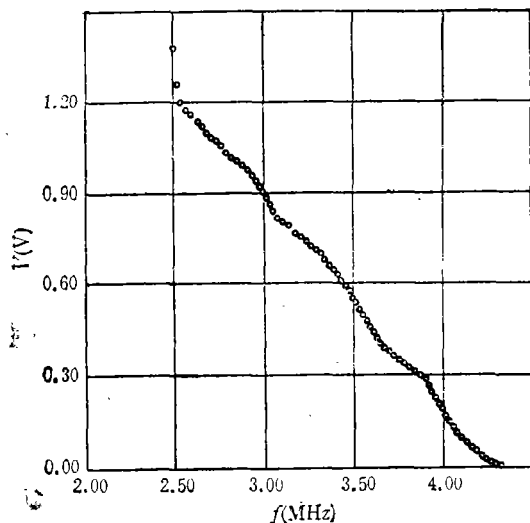


图5 泥浆 N1 在高频段的声衰减曲线

搬土浆中加少量重晶石粉制成,固相颗粒分布均匀;泥浆 N2 比重小,含有 10% 的可溶性食盐,泥浆因而较稀,氯化钠含量增多后,导致固相颗粒聚结成大颗粒,长期放置后会导致沉淀.三种泥浆上述不同的物理特性,导致它们不同的声衰减特性.

我们从泥浆的声传输函数曲线上可观察到,每一种泥浆上都叠加了一个周期性的振荡,泥浆的声衰减越小,周期性振荡越明显.例如如图 6 给出泥浆 N2 测量曲线的振荡周期为 0.48 MHz.如果取有机玻璃声速 $c = 2720\text{m/s}$,由小槽壁厚 $d = 2.80(\text{mm})$,可求出反映在 $T(d, f)$ 中的小槽壁厚共振频率为 0.48MHz,这与测量曲线上的振荡周期吻合.由此可说明曲线上周期振荡的出现,是由前述的小槽壁透射系

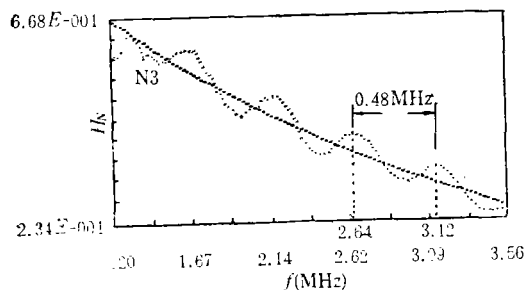


图6 泥浆 N3 声传输函数曲线

应用声学

数因子 $T(d, f)$ 产生的,实际上是小槽壁厚度振动引起的.由于这一振荡具有固定的周期,我们认为它对曲线拟合结果影响不大.

为验证实验结果的精确性,我们在频段为 1.26 MHz—3.56 MHz 内对泥浆 N2 进行了三次独立测量,结果如表 4 所示.一次方系数 a_1 的平均值 $\bar{a}_1 = 0.0621$,偏差 $\sigma\bar{a}_1 = 0.0043$,所得测量的相对误差为 7%.

表4 —— 泥浆 N2 三次测量系数

次 数	a_0	a_1
第一次	-0.0117	0.0562
第二次	-0.0442	0.0639
第三次	-0.0481	0.0662

三、一种泥浆在不同温度下的声衰减测量

在频率为 2.5MHz 条件下,我们测量了在 28℃—50℃ 范围内泥浆 N1 的声衰减与温度的关系曲线.实验中我们将泥浆加热至 50℃,然后在降温过程中测出声波幅度随温度变化的关系曲线,如图 7 所示.

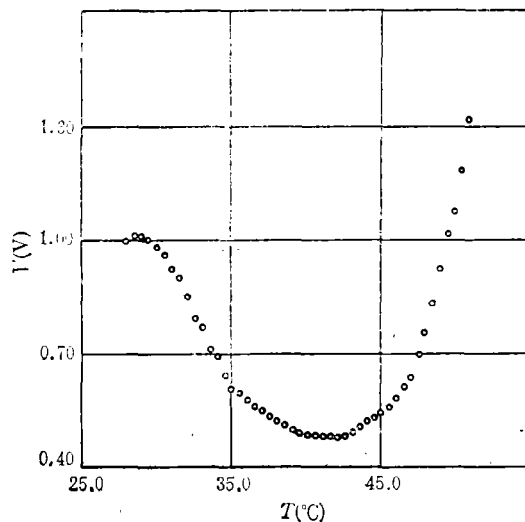


图7 泥浆 N1 声幅度随温度变化曲线

从图中可以看出,在温度较高时,泥浆 N1 的声波幅值较大,随着温度的降低声幅值不断

• 9 •

下降,当温度降至约 41℃ 时,声幅值达到最小值。温度再降低,声幅值随温度变化而回升,温度降至 30℃ 以下,声幅值变化趋于平缓。由此可见,泥浆声衰减随温度的变化是比较复杂的。

对于上述结果,我们认为可能是由于该泥浆内含有钙盐,其溶解度一般在 40℃ 左右最大。在温度由 50℃ 降至 41℃ 过程中,钙盐溶解度逐渐变大,析出量逐渐减少,泥浆粘滞性越来越大,离子间的相互作用逐渐加强,使得泥浆的声波粘滞吸收和弛豫吸收增大,从而声衰减逐渐增大。在温度由 41℃ 降至 30℃ 过程中,钙盐溶解度逐渐变小,析出量增加,因而泥浆中声波的弛豫吸收变小,热传导吸收也变小,使得声衰减逐渐变小。在温度由 30℃ 降至 28℃ 过程中,由于上述泥浆的内部活动比较缓慢,声衰减趋于平缓。在 41℃ 时泥浆的声衰减最大。

实验结果表明,泥浆声衰减随温度变化并非是非单调的。由于盐类溶解度、粘滞性、固相颗粒结构和分布,以及热传导等诸多因素的影响,使其过程变得复杂。由于实验只是针对一种泥浆而做的,其结果不能代表一般规律。加上我们对各种泥浆在不同温度下物理特性的变化了解甚少,上述分析还需作进一步验证。

四、泥浆声速的测量

声速是泥浆声学特性中的一个重要参量。

表 5 ——四种泥浆的声速测量值

名 称	声速 (m/s)
水	1455
N1	1521
N2	1583
N3	1427
N4	1423

我们在测量泥浆声传输函数及衰减特性的同时也进行了声速测量。测量结果如表 5 所示。

声速测量结果表明,完井液的声速较大,且大于水的声速,而基浆的声速小于水的声速。在频段 0.8MHz—4.0MHz 范围内,声速基本上无频散现象。

五、结 论

在频段 0.8MHz—4.0MHz 范围内,我们测量了四种泥浆的声传输函数、声速、声衰减和温度的变化关系等,得出了如下结论

1. 泥浆比重越大,其声衰减有增大趋势。泥浆声传输函数中的衰减系数 α 与频率 f 之间主要表现为一次方关系。引起声衰减的主要原因,我们认为是粘滞吸收和弛豫吸收。在兆赫频率范围内,声衰减变化剧烈。

2. 在泥浆声衰减随温度的变化过程中,引起声衰减的粘滞吸收、弛豫吸收、热传导吸收等主要方面,都存在着不同程度的转变过程。对完井液 N1 的测量表明,在温度为 41℃ 时,声衰减达到最大,这个温度刚好与该泥浆中所含钙盐溶解度最大时的温度相对应。

致 谢

石油大学开发系泥浆教研室向我们提供了实验所需的泥浆样品,并测定了有关物理参数。石油大学陆宏玖、声学所许建平参加了本文工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 华东石油学院,《钻井泥浆》,石油工业出版社,1978。
- [2] 李明轩,鲁操、陆宏玖、余峰、朱军,应用声学 8-2 (1989),12—16。