

脉冲的幅度和回波次数都明显增加。图 7 是图 6 的频谱,不难看出,在样品表面加硅油之后,声信号的频率成份也有了变化。

另一组实验的原理图及实验结果如图 8 所示。这是在厚度为 25mm 的低碳钢样品上,制备了一个深度为 15mm 的平底孔作为模拟伤。这时检测到的超声信号中增加了模拟伤的信号,见图 8 中上面波形,下面的波形为没有模拟伤时检测到的声信号。

四、讨 论

从声波信号的时间间距,信号的幅度等特征,可以证明,在 TEACO₂ 脉冲激光的作用下,在铝、铜和低碳钢等金属样品中得到了声波脉冲。

关于声脉冲的幅度对于激光脉冲能量的依赖关系,已有一些文章做了比较详尽地分析,但是,他们对于单次激光产生的声脉冲的频谱没有进行讨论。被多数人已承认的热弹模型也未

涉及对于声脉冲频率的解释。

从我们的实验结果,可以得到如下的初步结论:声脉冲的频谱与激光光束的波长、光脉冲能量没有明显的关系;对于铝、铜、低碳钢等不同的金属材料,声脉冲信号的频谱没有变化,几乎不出现新的频率成份。关于声脉冲信号的频谱和激光脉冲宽度的关系,还有待于进一步的实验。

以上的测量和分析将有助于建立激光激励声脉冲这一过程的物理模型。这一方法对于建立非接触超声无损检测具有显然的潜力。这项工作有待进一步地深入研究。

参 考 文 献

- [1] White, R.M., *J. Appl. Phys.*, **34** (1963), 3559.
- [2] Ledbetter, H. M., Moulder, J. C., *J. Acoust. Soc. Am.*, **65**(1979), 840.
- [3] Aindow, A. M., Dewhurst, R. J., Hutchins, D. A., and Palmer, S. B., *J. Acoust. Soc. Am.*, **69** (1981), 449.
- [4] Hutchins, D. A., Dewhurst, R. J., and Palmer, S. B., *Ultrasonics*, May (1981), 103.

固井水泥传输函数及其含水成份对声速和声衰减影响的实验研究*

李明轩 鲁操 陆宏玖 余峰 朱军

(中科院声学所)

(石油大学北京研究生部)

1988 年 4 月 26 日收到

本文采用实验方法初步研究了固井水泥的超声传输函数、声衰减和频率的关系以及含水饱和度对声速和衰减的影响。实验中我们对若干种不同型号、水灰比和固化温度的水泥样品进行了声传输函数测量,测量频段为 1.5MHz—4.5MHz。并使用中心频率为 1.25MHz 探头测量了固井水泥含水饱和度对声速和声衰减的影响。结果表明,在本测量频段内,各种固井水泥的声衰减系数主要与频率一次方成正比。随着固化温度的增加,固井水泥的声衰减系数有增大的趋势,水灰比由 40% 增至 50% 时,衰减系数有减小的趋势。固井水泥含水饱和度变化对声衰减影响剧烈,当含水饱和度由 100% 降至 80% 时,声衰减增加最快。含水饱和度变化对固井水泥声速度的影响不大。

一、引 言

固井水泥是油田中使用的一种重要工程材

料,了解固井水泥的声学特性对与之有关的声学检测工作具有重要的意义。有关这方面的研

* 国家自然科学基金资助项目。

究报导还比较缺乏。在油田有关方面的帮助下,我们按标准制作了一批不同型号、水灰比以及不同固化条件的固井水泥样品。通过实验初步研究了固井水泥的超声传输函数、声衰减系数与频率的关系以及含水饱和度对声速和声衰减的影响。

二、测量方法及原理

1. 声传输函数和声衰减测量

本文采用水浸比较法测量固井水泥样品的声传输函数,测量方法框图如图1所示。

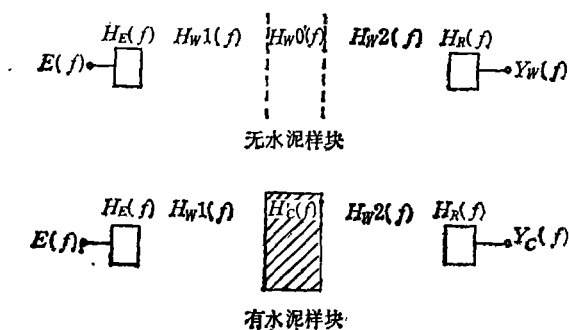


图1 水泥样品声传输函数测量原理示意图

没有水泥样品时,接收信号的频谱 $Y_W(f)$:

$$Y_W(f) = E(f)H_E(f)H_{W1}(f)H_{W0}(f) \times H_{W2}(f)H_R(f)G_W(f) \quad (1)$$

加入水泥样品后所得接收信号的频谱 $Y_C(f)$:

$$Y_C(f) = TE(f)H_E(f)H_{W1}(f)H_C(f) \times H_{W2}(f)H_R(f)G_C(f) \quad (2)$$

其中: $E(f)$ 为激励源的频谱; $H_E(f)$ 、 $H_R(f)$ 分别为发射与接收探头的频率响应; $G_W(f)$ 、 $G_C(f)$ 分别为两种情况下的声扩散因子; $T = t_{CW} \cdot t_{WC}$, t_{CW} 和 t_{WC} 分别为水到水泥和水泥到水两界面的透射系数。 $H_{W1}(f)$ 、 $H_{W2}(f)$ 为传播水层中的声传输函数; $H_{W0}(f)$ 为替代水泥样品水层的传输函数, $H_C(f)$ 为水泥样品的声传输函数。由(1)、(2)式可求得水泥样品的声传输函数为:

$$H_C(f) = \frac{H_{W0}(f)}{T} \cdot \frac{G_W(f)}{G_C(f)} \cdot \frac{Y_C(f)}{Y_W(f)} \quad (3)$$

在本文所涉及的实验条件下,考虑到水泥样品厚度有限, 测量频率范围为 1.5MHz—

4.5MHz, 与水泥样品相比, 水的声衰减很小。我们取近似令

$$K = \frac{H_{W0}(f)}{T} \cdot \frac{G_W(f)}{G_C(f)}$$

为常数,则有:

$$H_C(f) = K \frac{Y_C(f)}{Y_W(f)} \quad (4)$$

水泥样品的传输函数 $H_C(f)$ 与声衰减系数 $\alpha(f)$ 和样品厚度 l 的关系通常可以表示为:

$$H_C(f) = H_0 e^{-\alpha(f) \cdot l} \quad (5)$$

$\alpha(f)$ 取一般表示式 $\alpha(f) = a_0 + af + bf^n$ (其中 a_0 、 a 、 b 、 n 为待定常数), 则可得:

$$-1/l \ln \frac{Y_C(f)}{Y_W(f)} = af + bf^n + 1/l \ln \frac{K}{H_0} + a_0 \quad (6)$$

经曲线拟合, 可从 $Y_C(f)/Y_W(f)-f$ 曲线中求出 a 、 b 和 n 值。即得到了水泥样品的声传输函数表达式(5)以及声衰减和频率的方次关系。这种测量方法的优点是可以消除测量系统以及声耦合问题带来的影响。

实验装置见图2, 采用方波调制的正弦波作激励信号, 正弦波幅度不变, 频率可调。无水水泥样品时接收信号为 $i_W(f_k, t) = i_W(f_k)F_k(t)$, 有水泥样品时的接收信号为 $i_C(f_k, t) = i_C(f_k)F_k(t)$, 其中 $i_W(f_k)$ 、 $i_C(f_k)$ 分别为频率 f_k 下两种情况的接收信号幅度, $F_k(t)$ 是频率 f_k 下的归一化接收信号波形, 这里认为在有效测量范围内, 有无水泥样品时的波形 $F_k(t)$ 不变。相应的频谱 $Y_W(f_k)$ 、 $Y_C(f_k)$ 为

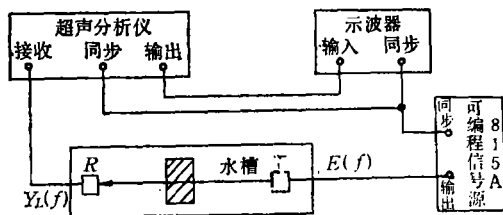


图2 实验装置示意图

$$Y_W(f_k) = \frac{i_W(f_k)}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F_k(t) e^{-i2\pi f_k t} dt \quad (7)$$

$$Y_c(f_k) = \frac{i_c(f_k)}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F_K(t) e^{-i2\pi f_k t} dt \quad (8)$$

由(7)、(8)式和(4)式可得水泥样品的声传输函数:

$$H_c(f_k) = K \frac{i_c(f_k)}{i_w(f_k)}$$

通过 $i_c(f_k)/i_w(f_k)-f_k$ 实验曲线可求出声衰减系数和频率的关系。

实验中使用的换能器中心频率为 2.5MHz, 有效频率覆盖范围为 1.5MHz—4.5MHz, 测量时频率采样间隔为 0.02MHz。

2. 含水饱和度对声速度和声衰减的影响

我们用干燥法将饱含水的水泥样品逐渐脱水, 在不同含水饱和度下进行声速度和声衰减测量。为减小测量系统及声耦合带来的误差, 测量时采用脉冲多次回波法, 方法原理见图 3。测出第一次和第二次回波脉冲的到达时间, 由水泥样品的厚度便可求出其纵波速度。第一次和第二次回波脉冲幅度可表达为:

$$A_1(S_w) = A_0 T_{sc}(S_w) e^{-\alpha_1(S_w) \cdot 2l} T_{cs}(S_w) G_1(S_w)$$

$$A_2(S_w) = A_0 T_{sc}(S_w) e^{-\alpha_2(S_w) \cdot 4l} T_{cs}(S_w) \times G_2(S_w) R_{sc}(S_w)$$

式中: $T_{sc}(S_w)$ 、 $T_{cs}(S_w)$ 为换能器和水泥样品耦合界面的声透射系数; $\alpha_1(S_w)$ 、 $\alpha_2(S_w)$ 分别为第一次和第二次回波各自主频下的衰减系数; $G_1(S_w)$ 、 $G_2(S_w)$ 分别为第一、第二次回波的声扩散因子; $R_{sc}(S_w)$ 为换能器和水泥样品

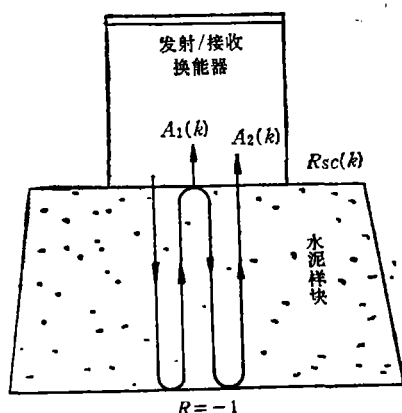


图 3 水泥样品声速、声衰减测量方法示意图

界面的反射系数; l 为水泥样品厚度; S_w 为含

水饱和度 ($0 \leq S_w \leq 1$)。

为描述水泥样品含水饱和度对声衰减的影响, 作如下数据处理:

$$\begin{aligned} M(S_w)' &= \frac{A_2(S_w)}{A_1(S_w)} \\ &= R_{sc}(S_w) \frac{G_2(S_w)}{G_1(S_w)} e^{-[\alpha_2(S_w) - \alpha_1(S_w)] \cdot 2l} \end{aligned}$$

一般情况下, 由于第二次回波频谱主值比第一次回波频谱主值低, 衰减系数又是频率的增函数, 故有 $\alpha_2(S_w) < \alpha_1(S_w)$ 。在本文的实验条件下, $G_2(S_w)/G_1(S_w)$ 约为常数, $R_{sc}(S_w)$ 随含水饱和度变化幅度不大。令

$$\alpha(S_w) = 2\alpha_2(S_w) - \alpha_1(S_w).$$

为突出反映衰减的影响, 将 $M(S_w)'$ 关于饱和水的 $M(1)'$ 值作归一化处理:

$$\begin{aligned} M(S_w) &= \frac{M(S_w)'}{M(1)'} \\ &= \frac{R_{sc}(S_w)}{R_{sc}(1)} e^{-[\alpha(S_w) - \alpha(1)] \cdot 2l} \quad (9) \end{aligned}$$

M 值主要反映了在某一含水饱和度下, 水泥样品相对于饱含水时声衰减的程度。 M 值越大衰减越小, M 值越小衰减越大。

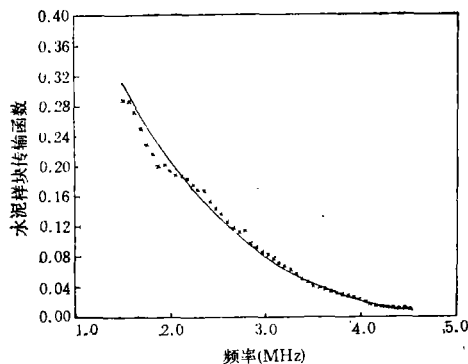
三、测量结果

1. 声传输函数和衰减系数

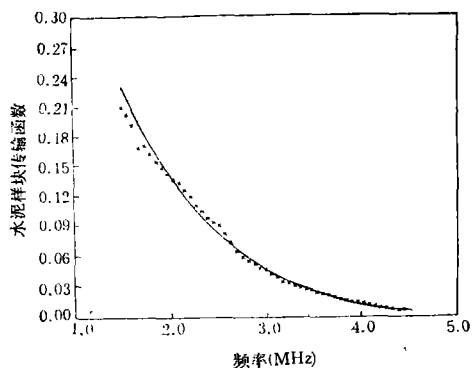
根据上述方法原理, 本文测量了近二十种固井水泥样品, 它们的固化温度变化范围为 60℃ 至 120℃, 水灰比为 40% 至 50%, 有些水泥样品加有添加剂。在 1.5MHz—4.5MHz 测量频段内, 固井水泥的声传输函数显示为指数型曲线如图 4 所示。绝大部分水泥样品的声衰减系数与频率呈一次方关系, 在较高的频段(例如 3.5MHz 以上) $\alpha(f)-f$ 曲线出现弯曲现象, 体现了声衰减与频率存在高次方关系如图 5 所示。经曲线拟合表明声衰减系数为频率的一次方和四次方线性组合, $\alpha(f) = a_0 + af + bf^4$ 。表 1 为其中有代表性的十二种水泥样品测量结果。从表中可以看出, 随着固化温度的增加, 声衰减系数中占主要地位的一次方项系数 a 有增

大趋势, 这表明固化温度高的水泥样品声衰减也大。在实验中我们注意到, 在同一固化温度下, 水灰比为40%、45%、50% 时相比较, 声

衰减在水灰比为50% 时最小, 40% 时为最大。由于样品制作技术上的困难, 水灰比的范围不能取太宽, 因此这些测量结果还不足以说明水

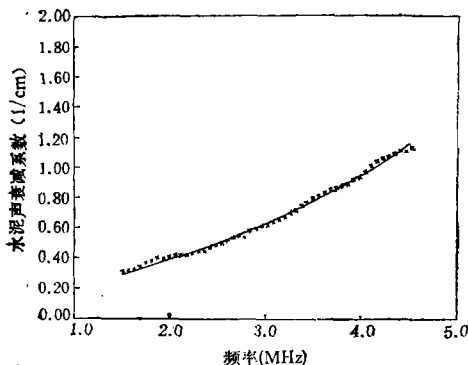


(a) 水灰比 45%, 固化温度 60 度

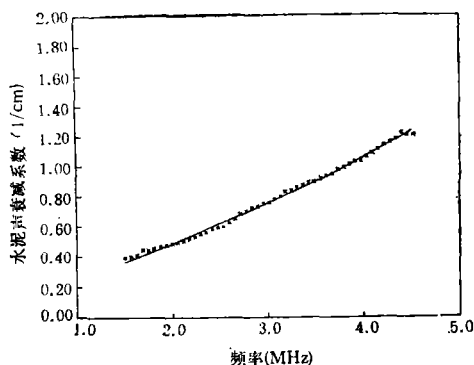


(b) 水灰比 50%, 固化温度 75 度。

图 4 水泥样块传输函数实验曲线



(a) 图 4(A) 对应 $\alpha(f)$ - f 曲线



(b) 图 4(B) 对应 $\alpha(f)$ - f 曲线

图 5 水泥声衰减系数与频率关系曲线

表 1 各种固井水泥声传输函数衰减系数测量结果

固化温度 (°C)	水灰比 (%)	测量频段 (MHz)	$\alpha(f) = af + bf^2$	
			a	b
60	45	1.5—4.5	0.17	0.0008
	50	1.5—4.2	0.16	0.0017
75	40	1.5—4.0	0.39	0.0207
	45	1.5—3.2	0.26	0.0049
	50	1.5—4.5	0.23	0.0004
80	45	1.9—3.5	0.62	
	50	1.9—3.5	0.61	
85	45	1.54—3.2	0.48	0.0005
	50+	1.61—3.0	0.60	0.0012
95	45	1.61—3.2	0.44	0.0043
	50+	1.61—3.2	0.76	0.0022
120	50	1.49—3.0	0.73	0.0204

+——加入缓凝剂。

灰比和声衰减之间的关系。水泥样品中添加剂的存在对声衰减系数测量结果影响并不明显。

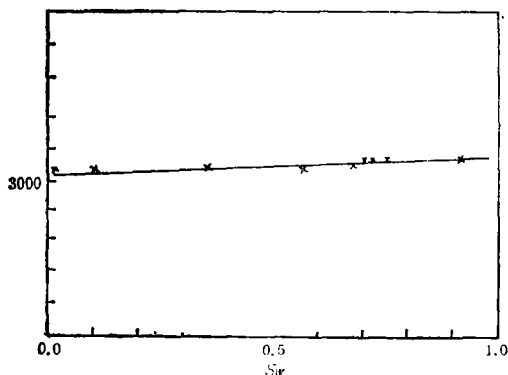
各种固井水泥样品的孔隙度测定结果表明, 孔隙度变化范围为10%至21%。一般来说, 固化温度高的水泥样品孔隙度较大。从外观上看, 可以将固井水泥样品视为与岩石相似的孔隙介质。经实验测量得到的固井水泥声衰减系数可以被认为由两部分组成: 由声吸收引起的频率一次方项 af 以及由水泥样品内孔隙和颗粒引起的瑞利散射而导致的衰减项 bf^2 , 在高频段瑞利散射比较明显。

2. 含水饱和度对声速和声衰减的影响

我们采用干燥法改变固井水泥样品的含水饱和度。在饱和水 ($S_w = 1$) 时称得水泥样品

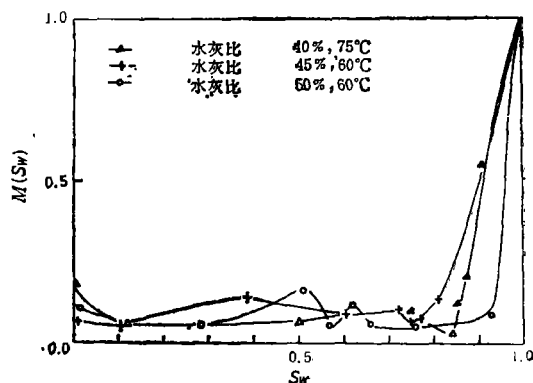
的重量为 $W_{\text{饱和}}$, 逐次使样品脱水, 在每次测量之前称得其重量为 W_{SW} , 经若干次测量后, 最后将水泥样品放置恒温箱抽空加热超过 48 小时, 使样品完全干燥后称得重量为 $W_{\text{干}}$. 则每次测量时水泥样品的含水饱和度可由下式求得:

$$S_w = \frac{W_{SW} - W_{\text{干}}}{W_{\text{饱和}} - W_{\text{干}}} (\%)$$



(a) V_p - S_w 曲线

对各种固井水泥样品在不同含水饱和度下的纵波速度进行测量, 结果表明声速随含水饱和度的增加而上升. 从干样品到饱含水样品, 声速增加幅度不大, 一般为 3% 到 6% 左右, 个别样品可达到 10%. 图 6(a) 为实测 V_p - S_w 曲线示例. 各种水泥样品在饱含水时的纵波速度为 3000—3500(m/s).



(b) $M(S_w)$ - S_w 曲线

图 6 含水饱和度对声速和声衰减的影响

根据前述方法测量了各种固井水泥样品的 $M(S_w)$ - S_w 曲线. 图 6(b) 给出了三种水泥样品的实测曲线, 从图中可以看出, 含水饱和度对声衰减影响非常大, 饱含水水泥样品在刚失水时声衰减就有明显的增加. 在绝大多数情况下, 当含水饱和度由 100% 降至 80% 一段范围内, 水泥样品的声衰减增加最快.

四、结 论

本文采用水浸比较法和脉冲回波法测量了多种固井水泥的声传输函数、声衰减系数与频

率的关系以及含水饱和度对声速和声衰减的影响. 测量结果表明, 在 1.5MHz—4.5MHz 测量频段内, 固井水泥的声衰减系数主要与频率一次方成正比, 在较高频段 (3.0MHz—4.5MHz) 呈现与频率的四次方关系. 固井水泥的声衰减特性与固化温度、水灰比和含水饱和度等因素有关, 声衰减系数随固化温度的升高而增加; 随着含水饱和度的下降, 固井水泥的声衰减增大, 在含水饱和度由 100% 降至 80% 一段范围, 声衰减增加最剧烈. 固井水泥的纵波传播速度受固化温度、水灰比、添加剂以及含水饱和度的影响相对较小.

(上接第 47 页)

四、音乐和计算机

值得注意的是已将分岔混沌现象及理论用于计算机合成音乐, 以提高合成的自然度.

总之, 数字技术和计算机技术的结合 (如数码音响

工作站)、无磁带录音和大容量贮存、乐器世界和音响世界的密切联系, 使音响工程的前景十分美好.

(包紫薇)