

用脉冲插入取代法研究物质的超声性质

冯 若 陈兆华 朱正亚 戴焕平

(南京大学声学研究所)

一、引 言

在超声传播速度和衰减系数的各种现行测试方法中,脉冲插入取代法有着简单、方便、应用范围较广、要求样品数量少等优点,并且对某些样品可获得相当高的测试精度。

二、测试方法原理^[1]

图1为水浸式脉冲插入取代法测试原理的示意图。容器C中为恒温除气蒸馏水W, T_1 与 T_2 分别为发射和接收压电换能器。射频脉冲发生器的工作频率、脉冲幅度、宽度及重复频率均可调节,它通过谐振激发使 T_1 向W中辐射超声脉冲。此声脉冲传播到 T_2 时被重新转换成电脉冲,它经过放大器和衰减器后显示在示波器上。当在 T_1 与 T_2 之间声路上插入一厚度为D的样品(若样品是

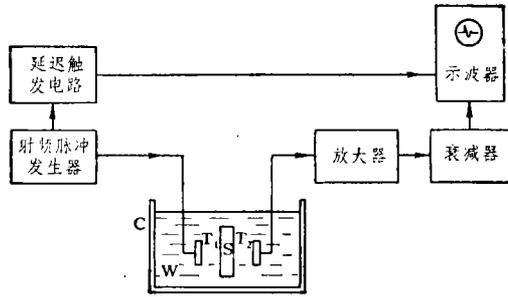


图 1

液体或动物软组织,则需装入样品盒中,在声路方向上盒的两侧为张紧的透声薄膜)时,则一般来说,由于样品的声速、声阻抗及声衰减不同于水,声波在 T_1 与 T_2 之间的传播时间及 T_2 接收到的声压幅值均将发生变化,依此则可确定样品中超声传播速度及衰减系数。

设样品被置入后,超声在 T_1 与 T_2 之间的传播时间变化为 Δt ,以 C_w 与 C_s 分别表示水和样品的声速,则显然有 $D/C_w - D/C_s = \Delta t$,整理后得:

$$C_s = \frac{DC_w}{D - \Delta t C_w} \quad (1)$$

式中 C_w 可从文献上查到公认的准确值^[2]。当 $C_s > C_w$ 时, $\Delta t > 0$;反之, $\Delta t < 0$ 。只要测出样品的厚度D和时移 Δt ,即可从式(1)得到 C_s 值。为测 Δt 值,具体操作如下:

首先取较窄的脉冲和较低速的示波器扫描档,调节延迟触发,使示波器屏幕上显示出第一个接收脉冲,它只包含少数数的载波周期且中心处呈明显的极大值。当样品置入时,由脉冲极大值的位移先粗略地确定 Δt 值的范围。然后,增大脉宽,使脉冲包含较多的载波周期以保证含有较为单纯的频谱成份,同时选择快速扫描档,调节延迟触发,使脉冲中心处一载波与示波器零线交点显示在屏幕的一侧,当插入样品时,该交点移向屏幕的另一侧,由此可直接读取 Δt 值。

下边我们分析用这个方法测声速时的误差。从式(1)有:

$$dC_s = \frac{C_w^2}{(D - C_w \Delta t)^2} (D \partial \Delta t + \Delta t \partial D) \quad (2)$$

$$\frac{dC_s}{C_s} = \frac{C_s - C_w}{C_w} \left(\frac{\partial \Delta t}{\Delta t} + \frac{\partial D}{D} \right) \quad (3)$$

式(2)右侧第一、二项分别表示时移误差 $\partial \Delta t$ 及厚度误差 ∂D 对声速误差 dC 的贡献, 相对误差公式(3)则表明: 当样品声速与水的声速接近(即 $C_s \sim C_w$)时, 误差小。对于一定的样品厚度较大时(取 D 较大, Δt 亦较大), 误差将减小。

下边我们给出相应的实验结果。

三、超声速度的测量结果与讨论

我们在测量中, 射频脉冲发生器、延时触发电路及放大器采用 UAC-77 型超声衰减比较仪的 001 及 012 部件; 衰减器部分采用 SHK-15 型衰减器。显示部分用 HP-1715 型示波器, 其各扫描档经计量单位校准。发射与接收换能器都用基频为 1 兆赫的 x 切割石英片, 其有效辐射面直径为 16 毫米。除气蒸馏水容器置于恒温水浴中, 恒温水的温度起伏为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。装液体和动物组织的样品盒为内径 30 毫米的铜环, 长度在 10—20 毫米间, 可供选择, 其两侧张紧厚度 30 微米的聚乙烯薄膜。

利用频率为 5 兆赫的超声波对铜、重火石玻璃、有机玻璃、聚碳酸酯、尼龙 66、鲜猪脑、乙醇及 $0.5\text{M} \cdot \text{MnSO}_4$ 水溶液等样品的超声速度进行了测量, 并逐一地对厚度和时移误差对声速误差的影响做了讨论。结果见表 I。

表 I 超声速度的测试及分析数据(超声频率 5MHz)

样 品	温 度 ($^\circ\text{C}$)	D (cm)	Δt (μs)	C_s (m/s)	$ C_s - C_w $ (m/s)**	∂D (cm)及 其对 dC (m/s)贡献	$\partial \Delta t$ (μs)及 其对 dC (m/s)贡献	dC/C	C_s 文献值
铜	23.5	1.350	5.53	3859	2364	0.005, 23	0.05, 55	2%	3710 ^{[4]*}
重火石玻璃	7.3	0.796	3.36	3724	2276	0.005, 24	0.02, 24	1.3%	
有机玻璃	23.4	1.250	3.60	2623	1129	0.005, 8	0.02, 11	0.7%	2720 ^[5]
聚碳酸酯	23.9	0.221	0.495	2249	753	0.005, 25	0.005, 11	2.4%	
尼 龙 66	23.9	0.186	0.488	2527	1032	0.005, 45	0.002, 16	1.6%	
鲜 猪 脑	37.1	1.463	0.219	1559.6	35.9	0.05, 1.5	0.002, 0.3	0.1%	
乙 醇	28.2	2.00	-4.28	1138.6	367.0	0.01, 1.4	0.02, 1.3	0.24%	1139.3 ^[6]
0.5M · MnSO ₄ 水溶液	18.6	2.00	0.447	1532.6	50.8	0.01, 0.4	0.002, 0.2	0.04%	1532.5 ^[4]
0.5M · MnSO ₄ 水溶液	18.6	1.53	0.340	1532.3	50.5	0.01, 0.7	0.002, 0.3	0.07%	1532.5 ^[4]

* 此系超声在铜柱体中的传播速度, 我们所测量的是一小块铜板;

** C_w 值按经验公式 $C_w = 1557 - 0.0245(74 - T)^{2[2]}$ 计算, 式中 T 为温度($^\circ\text{C}$)。

表中前五种固体样品的厚度 D 用卡尺测量, 误差为 0.05 毫米。后四种为动物软组织及液体样品, 考虑到其容器两侧透声薄膜可能的变形及动物软组织厚度不易切割准确, 估计其误差分别为 ± 0.01 厘米及 ± 0.05 厘米。表中 Δt 值已对两侧薄膜窗口的影响做了校正(在动物组织及液体样品情况下), 其读数误差则决定于示波器上波形光迹的质量和稳定性。 D 与 Δt 误差对声速误差的贡献按式(2)计算。

由表中结果可看到, 当样品声速与水的声速差 $|C_s - C_w|$ 较大(如铜、重火石玻璃), 厚度

D 较小(如聚碳酸酯、尼龙66)时,声速误差就大。反之,如 $|C_s - C_w|$ 较小(如鲜猪脑), D 较大(比较 $0.5M \cdot MnSO_4$ 水溶液的两组数据),则声速误差就减小,与上节分析结果一致。

四、超声衰减系数的测量

如上所述,在 T_1 与 T_2 间声路上插入厚度为 D 的样品时, T_2 接收到声压幅值将发生变化。这个变化可由改变衰减器的衰减量来予以补偿,使示波器屏幕上显示的接收脉冲在样品置入前后幅度相等。显然,这时衰减器的补偿量即为样品插入的总衰减(损耗)值 IL_H ,以dB表示。在 IL_H 中包括三部分,即(1)声波在样品中的传播衰减 IL_s ,这正是我们要测量的,(2)声波在水与样品前后二个界面上的反射衰减 IL_R , (3)容器两侧薄膜窗口引入的附加衰减 IL_A (在液体及动物组织情况下)。因此,为得到 IL_s ,需从总衰减 IL_H 中设法减去 IL_R 及 IL_A 两部份。样品的声衰减系数 α_s 则应示为:

$$\alpha_s = \frac{IL_s}{D} + \alpha_w = \frac{1}{D}(IL_H - IL_R - IL_A) + \alpha_w \quad (4)$$

式中 α_w 为水的声衰减(吸收)系数。

IL_A 值可由实验确定,为此只需将样品盒充以去气蒸馏水,置入 T_1 与 T_2 之间,由衰减器直接测出。复杂的问题是界面反射衰减项 IL_R ,它不仅与样品和水的声阻抗 Z_s 、 Z_w 有关,而且还与样品厚度及超声频率有关。对于固体样品(此时 IL_A 删去),由于 Z_s 可能远大于 Z_w ,可使 IL_R 远大于 IL_s ,这使 α_s 很难测准。

但是,对于动物软组织,问题则可大大简化。这时 Z_s 与 Z_w 很接近(一般满足 $Z_s/Z_w < 1.1$),使界面上声压反射恒小于5%,因此可近似正确地使用无限媒质界面上的声压透射公式。当 $Z_s/Z_w = 1.1$ 时,如入射声压幅值为1,在样品中产生的声压为1.0476,通过第二个界面后声压则为0.99773,对应的总反射衰减为

$$IL_R = 20 \log \frac{(Z_s + Z_w)^2}{4Z_s Z_w} = 0.0197 \text{ dB} \quad (5)$$

我们知道,动物软组织在频率为1兆赫时的超声衰减约为1dB/cm,且近似与频率一次方成正比例。当样品厚度不小于1厘米时,式(4)中 IL_R 可以忽略。此外, IL_A 及 α_w 对 α_s 的贡献亦可略去。则式(4)简化为

$$\alpha_s = \frac{1}{D} IL_H \quad (6)$$

我们对若干种一定厚度 D 的猪的新鲜软组织在3兆赫频率下的超声衰减 IL_H 进行了测量,然后按(6)式算出其声衰减系数 α_s 。组织样品从屠宰场刚宰好的猪身上取下,放在生理食盐水中带回实验室、切割并装好样品盒后,立即进行测量。测量误差估计为 $\pm 5\%$; 测量结果列于表 II。

表 I 猪的新鲜软组织的超声衰减系数(3MHz, 37°C)

样 品	脑	心	肝	肾	脾	血管
测量样品个数	2	2	6	11	5	3
平均 α_s 值及最大离散范围(dB/cm)	2.7 \pm 0.5	2.5 \pm 0.1	2.8 $\begin{smallmatrix} +1.3 \\ -1.0 \end{smallmatrix}$	2.1 $\begin{smallmatrix} +1.0 \\ -0.6 \end{smallmatrix}$	2.2 $\begin{smallmatrix} +1.0 \\ -0.4 \end{smallmatrix}$	2.8 \pm 0.2
文献 α_s (dB/cm)	2.1 ^[6]	3.6 ^[6]	2.5 ^[6]	2.8 ^[7]	2.2 ^[7]	

表 II 中所列的各次测量样品皆取自不同的动物个体。可见, 用压电换能器接收即用声压相位敏感元件所测的超声衰减系数有明显的离散性, 第三行中给出了各组数据的平均值及最大离散范围, 它落在文献^[5]报道的数据范围之内。第四行则列出了具体的文献数据。文献^[6]的数据是取自脉冲传输、脉冲反射, 辐射压力及频谱分析四种方法测量结果的平均值。

五、结 语

1. 在物质超声性质的实验研究中, 脉冲插入取代法具有简单、方便、适用性广(可用于测量固体、液体及生物组织)、要求样品数量少等优点。

2. 水浸式脉冲插入取代法用于研究生物大分子溶液、生物悬浮液及动物软组织等生物样品时, 可获得较好的精确度, 并且特别适于研究声速的频散现象。因为这时声速的误差仅来自于时移 Δt 的误差, 可达 10^{-4} 量级。对此, 我们将另有报道。

3. 本文用水浸式脉冲插入取代法, 在 3 兆赫频率及 37°C 温度下, 测量了 6 种 29 个新鲜的猪的软组织的超声衰减系数, 所获数据落在文献报道的数据范围之内。

本研究课题得到中国科学院科学基金委员会(82)第 411 号科学基金资助, 作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Kremkau F. W. et al., JASA 70 (1)(1981)29-38.
- [2] Бергман Л. «Ультразвук и его применение в науке и технике». Москва. (1956).
- [3] 同济大学声学研究室编, «超声工业测量技术», 上海人民出版社(1977)
- [4] Carstensen E. L., JASA 26 (1954) 862-864.
- [5] Pohlhammer J. D. et al., In Medical Physics and CT of Ultrasound: Tissue Imaging and Characterization, eds, G. D. Fullerton et al., (1980) 411-412.
- [6] Goos S. A. et al., Ultrasound Med. Biol., Vol.5 (1979) 181-186.
- [7] Gammell P. M. et al., Ultrasound Med. Biol., Vol.5 (1979) 269-277.

(上接第20页)

$d=0.850$ 米, 上升分贝数: 10.5分贝。

由此可见, d 的大小, 对于响应曲线低频段的上升斜率是有影响的。但是, 倒相箱面板的尺寸有限, d 可变化的范围较小, 在这样的变化范围内, 倒相孔与扬声器单元之间的距离选择, 对于响应曲线形状的影响, 常常不很明显。

参 考 文 献

- [1] 杜功焕等, «声学基础», 上海科技出版社81.7.第一版
- [2] Thiele, A. N., "Loudspeaker in Vented Boxes: Part I" J. A. E. S., Vol.19, No.5, 1971.
- [3] Thiele, A. N. "Loudspeaker in Vented Boxes: Part II" J. A. E. S. Vol.19, No.6, 1971.