

生物媒质中非线性声学 参量 B/A 的研究*

冯 若 龚秀芬 朱正亚 石 涛

(南京大学声学研究所)

1983年12月18日收到

提 要

本文用插入取代法测量和研究了猪全血、牛全血、牛奶和各种分子量的聚乙二醇水溶液等多种液态生物样品中的非线性声学参量 B/A 值。聚乙二醇水溶液的 B/A 值随浓度线性增加,并呈现与分子量无明显依赖关系的特性。

一、引 言

有限振幅超声波在流体媒质中传播时的非线性现象无论在理论上和实验上均已有较多的研究。非线性声学参量 B/A 是描述流体媒质非线性性质的重要参数。在文献[1—3]中曾用不同方法获得了一系列流体媒质的 B/A 值。然而,对于生物媒质中的非线性声学性质只是近几年来才开始被人们所重视^[4-7],这显然是由于医学超声诊断和治疗日益被普遍使用的结果。长期以来,人们在研究超声波传播问题时都是以小振幅声波的线性假设为前提,但实际上在医学超声所使用的频率和强度范围内这种线性假设往往失效,媒质的非线性性质应予以考虑。有限振幅超声波在生物媒质中传播时同样将伴随有一系列非线性现象。为了估计在生物医学超声应用中这种非线性现象的影响和后果,测量并研究生物媒质中乃至活体组织中非线性声学参量 B/A 是十分重要的。

作者在文献[8]中曾对若干种生物样品的 B/A 值作了研究,获得一些有意义的结果。本文将采用插入取代法^[2]对一些生物样品的 B/A 值随浓度和分子量的变化作系统测量和分析。

二、基 本 原 理

圆频率为 ω 的有限振幅声波在流体例如在水中传播时由于媒质非线性而发生波形畸变,如媒质吸收很小,则在小于稳定距离内的某 l 处接收到的二次谐波声压幅值为^[9]

$$p_2 = \frac{n+1}{4} \left(p_1^2 \frac{l\omega}{\rho_0 c_0^3} \right). \quad (1)$$

* 中国科学院科学基金资助的课题。

式中 ρ_0, c_0 为媒质的密度和声速, p_1 为声源处的基频声压幅值, $n = B/A + 1$, B/A 为媒质的非线性参量, 对于给定的媒质 B/A 为常数. 今在发射与接收换能器 T_1 与 T_2 之间声传播的路程中插入厚度为 x 的待测液体 (图 1), 待测液体置于两端口由聚乙烯透声薄膜封闭的样品盒中, 此时接收换能器收到的二次谐波应考虑到发射换能器和接收换能器间一段路程 x 通过待测液体, 而其余路程 l_1 与 l_2 则仍在水中通过, 同时还必须计及声波通过两种液体界面 (由透声膜隔开) 时的透声系数. 当被测液体与水的声阻抗相差不大时, 经过计算可以得到接收换能器接收到的二次谐波声压幅值 p_2'' ,

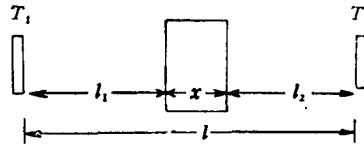


图 1

$$p_2'' = \frac{\omega p_1^2 D' D''}{4} \left[\frac{n' + 1}{(\rho_0 c_0^3)'} (l_1 + l_2 D' D'') + \frac{n'' + 1}{(\rho_0 c_0^3)''} D'' x \right]. \quad (2)$$

式中 D'' 为声压在水 $\rightarrow$ 待测液体的界面上的透射系数, D' 为待测液体 $\rightarrow$ 水的界面上的声压透射系数. 其余凡右上角带一撇的均表示对水的量, 带两撇的为对待测液体的量. 如果透声盒中也盛水, 则 $D' = D'' = 1$, 此时 (2) 式即化为 (1) 式. 如果透声盒放置在紧靠接收换能器处, 则有 $l_2 \ll x$ 及 $l_1, l_1 = l - x$, 比较 (1) 式与 (2) 式, 可得

$$\frac{(n+1)''}{(n+1)'} = \left[\frac{p_2''}{p_1'} \frac{l}{x} \frac{1}{D'' D'} - \frac{l}{x} + 1 \right] \frac{(\rho_0 c_0^3)''}{(\rho_0 c_0^3)'} \frac{1}{D''}. \quad (3)$$

式中 ρ_0, c_0 不难测得, $D'' = 2\rho_0' c_0' / [\rho_0' c_0' + \rho_0'' c_0'']$, $D' = 2\rho_0 c_0 / [\rho_0' c_0' + \rho_0'' c_0'']$, n' 已知, 只要求得 p_2''/p_1' , 由 (3) 式就可求出待测液体的 B/A 值.

三、实验方法

实验装置示于图 2. 2 兆赫的射频脉冲加至工作在谐振频率的发射石英换能器上, 为有效地接收和观察二次谐波, 除用基频为 4 兆赫的石英换能器接收外, 还用带阻滤波器对 2 兆赫的信号抑制 40 分贝, 用选频放大器对 4 兆赫的信号放大 80 分贝. 测量示波器用于测量二次谐波的幅值. 加在发射换能器上的电压峰值不超过 80 伏.

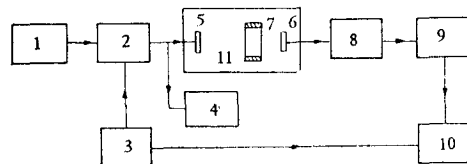


图 2

- 1——信号发生器; 2——电子门; 3——脉冲发生器; 4——监控示波器; 5——发射换能器;
6——接收换能器; 7——样品盒; 8——带阻滤波器; 9——选频放大器; 10——测量示波器;
11——水槽

本文采用插入取代法测量生物样品的非线性参量 B/A 。待测样品置于样品盒内,并放置在紧靠接收器的位置上以满足(3)式的条件。所有待测样品的 B/A 值均相对于蒸馏水而确定,取水的 B/A 值为 5.2^[7]。此方法的优点是所需样品量小且操作方便。为保证测量在稳定距离内进行,根据样品的性质可选用不同长度的样品盒(3.2 厘米、2 厘米和 1.1 厘米),盒的直径为 5 厘米。为减小测量误差,要求发射换能器、样品盒和接收换能器间有良好的平行度。用本方法测量 B/A 值的误差估计小于 8%。

利用本装置对新鲜猪全血、牛全血及牛奶的 B/A 值在 26℃ 下进行了测量。猪全血的提取法与文献[8]同,新鲜牛全血由南京生物制品研究所从牛静脉中抽取提供,血液离体后做抗凝处理,牛奶是从挤奶场取得的未加工的鲜牛奶,测量均在取得样品后两小时内完成。此外,还测量了六种不同分子量的聚乙二醇水溶液的 B/A 值及其与溶液浓度的依赖关系,它们是: EG 62.07, PEG 200, PEG 400, PEG 800, PEG 1000, PEG 1540。聚乙二醇样品用蒸馏水配制成不同浓度的水溶液。

四、结果与分析

表 1 中列出了我们测得的若干液体及生物样品的 B/A 值,表中还列出了其他作者的结果。声速 c 及密度 ρ 采用与文献[8]中相同的方法测量。

表 1

名 称	密 度 ρ (克/厘米 ³)	声 速 c (米/秒)	B/A				
			本文 ¹⁾	[8] ¹⁾	[7] ²⁾	[2] ³⁾	[1]
乙 醇	0.789	1158	9.9	9.5	—	9.8	10.5
丙 酮	0.792	1159	8.8	9.0	—	9.0	9.2
乙二醇	1.114	1670	9.7	9.1	—	—	9.7
猪全血	1.081	1601	5.8	5.8	6.2	—	—
牛全血	1.075	1605	5.5	—	—	—	—
牛 奶	1.025	1531	5.1	—	—	—	—

1) 温度为 26℃, 2) 温度为 30℃, 3) 温度为 20℃。

图 3 表示六种分子量的聚乙二醇水溶液的 B/A 值随溶液浓度的变化关系,实验点“.”是对给定浓度时各分子量的 B/A 取平均的结果。图上也给出了不同分子量的 B/A 偏差范围。分析这些数据发现, B/A 值随浓度呈线性增长的关系,同一浓度不同分子量的 B/A 值与直线的偏离基本上在测量误差范围以内,因此可认为 B/A 值随浓度增加而变大的这种线性依赖关系与分子量几乎无关。

我们用 $(\tilde{B}/A)$ 表示溶液的单位浓度变化引起的 B/A 逾值,即

$$\left(\frac{\tilde{B}}{A}\right) = \frac{\left(\frac{B}{A}\right)_{\#} - \left(\frac{B}{A}\right)_{*}}{g}$$

式中 g 为溶液的重量百分比浓度。图 4 为 $(\tilde{B}/A)$ 与被测样品分子量之间的关系。图上

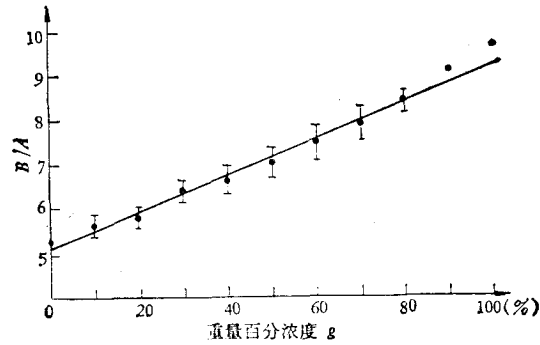


图 3

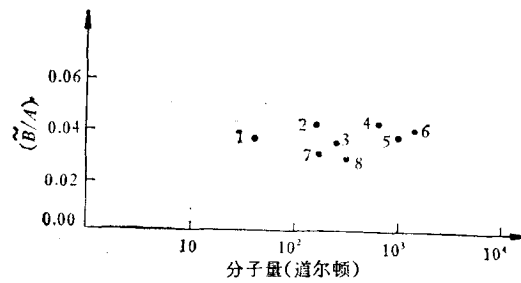


图 4

1—EG62.07; 2—PEG 200; 3—PEG 400; 4—PEG 800;
5—PEG1000; 6—PEG 1540; 7—葡萄糖; 8—蔗糖

除列了六种不同分子量的聚乙二醇的数据外, 还列出了葡萄糖及蔗糖水溶液的数据^[8]。由图 4 可知, $(\tilde{B}/A)$ 与溶质的分子量无明显的依赖关系, 这与 Dunn 等人对其他生物样品的研究结果也是相符的^[7]。

本工作得到魏荣爵教授和美国 Illinois 大学 F. Dunn 教授的关注, 在工作中曾与吴文虬同志和冯绍松同志进行过十分有益的讨论, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] R. T. Beyer, "Nonlinear Acoustics", Naval Ship System Command, Dept. of The Navy, (1974), 99.
- [2] В. В. Шкловская-Корди *Акуст. Жур.* (1963), 107.
- [3] И. Г. Михайлов, В. А. Шутюлов *Акуст. Жур.* (1960), 340.
- [4] T. G. Muir and E. I. Carstensen, *Ultrasound Med. Biol.*, **6** (1980), 345.
- [5] E. I. Carstensen W. K. Law and N. D. McKay, T. G. Muir, *Ultrasound Med. Biol.*, **6** (1980), 359.
- [6] F. Dunn, W. K. Law and L. A. Frizzell, *Br. J. Cancer*, **45** (1982), 55.
- [7] W. K. Law, L. A. Frizzell and F. Dunn, *J. Acoust. Soc. Am.*, **69** (1981), 1210.
- [8] 龚秀芬、冯 若、朱正亚, 已投声学学报。
- [9] 杜功焕、朱哲民、龚秀芬, 声学基础, 上海科学技术出版社, (1981)。

STUDY OF ACOUSTICAL NONLINEARITY B/A IN BIOLOGICAL MEDIUM

FENG RUO GONG XIU-FEN ZHU CHENG-YA SHI TAO

(Institute of Acoustics, Nanjing University)

ABSTRACT

By using insert substitution method, the acoustical parameter of nonlinearity B/A have been determined for a series of liquid biological samples: porcine whole blood, bovine whole blood, milk and aqueous solutions of polyethylene glycol of various molecular weight. The values of B/A for solutions of PEG increase linearly with solute concentration and exhibit no evident dependence on solute molecular weight.