

有机液非线性声参量 B/A 的改进算法

毛 峰

(南京大学近代声学国家重点实验室, 南京 210093; 湖北三峡学院物理系, 宜昌 443001)

中图分类号: O422.7

文献标识码: A

Improvement on the calculation of the nonlinear parameter B/A for the organic liquids

MAO Feng

(State Key Lab of Modern Acoustics, Nanjing Univ., Nanjing 210093, Hubei Sanxia University, Yichang 443001, China)

1 引 言

非线性声参量 B/A 定义为媒质状态方程在绝热条件下作泰勒展开后, 其二阶项系数与一阶项系数之比。由于和目前广泛应用于超声诊断中的线性声参量相比较, 它反映了组织的动力学特征, 可以提供更多的组织结构信息, 能成为生物组织定征及超声医学诊断的一个重要的新参量^[1-3], 因而对该参量的研究成为近十多年来超声医学研究的持续热点及前沿课题之一。目前对生物媒质的非线性参量 B/A 的研究取得了重要的进展, 尤其是 B/A 成像技术已越来越接近临床应用的水平^[3-4], 但是已进行的研究多偏向于实验和技术, 到目前为止, 还未见从理论上计算生物媒质 B/A 的成熟理论的报导。考虑到目前研究的生物媒质的声学性质可归结为简单液体的声学性质, 因而建立简单液体 B/A 的理论成为探寻生物媒质 B/A 理论的重要途径。Nomoto^[5] 和 Hartmann^[6] 都曾在各自的假设下得到计算液体 B/A 的理论公式, 但计算值与实验测量值相差较大。文献 [7] 通过建立在 Van der waals 方程基础上的 Schaaffs 假设, 得到了计算有机液非线性声参量 B/A 的理论公式, 但由于公式中含有有机液的分子半径和比热比。而这些参数又极难获取。因而大大地限制了该公式的应用范围。该文献中也仅用此公式对四种有机液的 B/A 作了计算, 虽然理论预测值与实验测量值较好的一致, 但研究的样品实在太少。鉴

此, 本文对文献 [7] 中得到的 B/A 理论表达式进行了改进, 得到了改进的有机液 B/A 计算公式, 由于在改进后的公式中仅含有有机液的一些常见热力学参数。因而大大地扩展了 B/A 理论公式的运用范围。用改进的理论公式对有机液的非线性声参量 B/A 作了较大范围的计算。理论值和实验结果较好地吻合。本文所作的这些工作对于进一步建立成熟的生物媒质 B/A 理论有较大的意义。

2 有机液非线性声参量 B/A 改进算式的理论推导

依据非线性声参量 B/A 的定义, B/A 的表达式可写为

$$B/A = \rho_0 (\partial^2 / \partial p^2)_{s,0} \quad (1)$$

在上式中, “ s ”表示系统的熵, “ 0 ”表示无扰动时的平衡状态, 由 (1) 式可见, 欲得计算流体媒质的 B/A 的理论公式, 必须获知声速与系统状态参数的关系。

1939年, Schaaffs 经过研究, 认为 Van der waals 方程在常温常压下, 几乎可运用于一切有机液体, 并以此为基础得到了有机液的声速公式为^[8]

$$c^2 = \gamma RT \left[\frac{M}{3(M - b\rho)^2} - \frac{2}{(M - b\rho)} \right] \quad (2)$$

式 (2) 中, γ 为有机液的比热比, M 为摩尔质量, ρ 为有机液体的密度, T 为绝对温度, R 为普适气体常数, b 为 Van der waals 方程中考虑分子的实际体积所进行的修正量, 通常认为它等于 1 摩尔有机液中分子实际所占体积的 4 倍。设分子半径为 r_0 , 则 b 可写为:

$$b = 4 \frac{4}{3} \pi r_0^3 N_0 \quad (3)$$

收稿日期: 2000-01-21; 修订日期: 2000-05-15

作者简介: 毛峰 (1955-), 男, 副教授。

式(3)中 N_0 为阿佛加德罗常数。

在(2)式中,若令 $x = V/b = M/(b\rho)$, 则该式可写为:

$$c_2 = \frac{YRTx(6 - 5x)}{M(3(x-1)^2)} \quad (4)$$

文献[7]即基于上述(1)~(4)式得到了计算有机液 B/A 的理论公式:

$$B/A = (1 - \frac{1}{Y}) \frac{c_0^2 \rho_0 k}{T\alpha} + \frac{2(3 - 2x)}{3(x-1)(6-5x)} \quad (5)$$

上式中, $k = -(1/V)(\partial V/\partial P)_T$ 为等温压缩系数, $\alpha = (1/V)(\partial V/\partial T)_P$ 为定压膨胀系数。文献(9)中,利用公式(5)计算有机液的 B/A 时, x 是由分子半径确定的,另外,利用该公式进行计算,还需要获知有机液的比热比,而对于大多数有机液来讲,寻求这两个参数都是相当困难的,这样就使得利用该公式计算有机液的 B/A 时,其实际运用范围受到了极大的限制。为了解决这一难题,我们对公式(5)作了二点改进:一是通过(4)式把(5)式中的 x 与声速联系起来,用声速等参数直接确定 x ;具体过程为从(4)式中解出 x 得:

$$x = [(a+3) \pm \sqrt{a+9}]/(a+5) \quad (6)$$

其中, $a = 3M^2 c_0^2 / YRT$, 因 $x > 0$, 故 $x = [(a+3) - (a+9)^{1/2}]/(a+5)$ 应舍去,于是有

$$x = [(a+3) + \sqrt{a+9}]/(a+5) \quad (7)$$

在(7)中,令 $\theta = \sqrt{a+9}$, 则:

$$x = (\theta + 3)/(\theta + 2) \quad (8)$$

将(8)式代入(5)式得:

$$B/A = \left(1 - \frac{1}{Y}\right) \frac{c_0^2 \rho_0 k}{T\alpha} + \frac{2\theta^2}{3(\theta - 3)} \quad (9)$$

其中 $\theta = \frac{3M c_0}{\sqrt{YRT} + 9}$ (10)

二是利用文献[10]给出的如下两个关系式:

$$Y = 1 + T\alpha^2 c_0^2 / c_p$$

$$C_p = T\alpha^2 c_0^2 / (c_0^2 k \rho_0 - 1) \quad (11)$$

其中 C_p 为有机液的定压比热,确定(9)、(10)式中的 Y 。由式(11)解得 Y 为:

$$Y = c_0^2 k \rho_0 \quad (12)$$

将(12)式代入(9)、(10)式中分别得:

$$B/A = \left(\frac{c_0^2 \rho_0 k}{T\alpha} - \frac{1}{T\alpha} \right) + \frac{3\theta^2}{3(\theta - 3)} \quad (13)$$

$$\theta = \frac{M/RT k \rho_0 + 9}{1} \quad (14)$$

以上两式即是我们得到的计算有机液 B/A 的改进表达式。显然利用它进行计算,只需知道有机液的声速和一些常见的热力学参数,避免了查找 Y 和 r_0 产生的困难,便于在较大的范围内对有机液的 B/A 进

行研究。

3 计算结果及讨论

表1给出各有机液的声速,密度,等温压缩系数,定压膨胀系数及摩尔质量等参数,表2则依据表1提供的有关参数,运用公式(13)、(14)对各有机液的非线性声参量 B/A 进行了计算。该表除列出了各有机液的 B/A 理论计算值外,还给出了有关文献报道的 B/A 测量值,以便将理论值与实验结果对照。由表2可见,各有机液样品的 B/A 理论计算值与相应的文献报道的 B/A 测量值均相当好的吻合。这说明用改进的 B/A 理论公式计算有机液的非线性声参量是成功的。理论计算值与实验测量值之间产生一定偏差的主要原因:一是各文献给出的有关参数具有一定的离散性,尤其是本文的计算是在温度为25的条件下进行的,而对各有机液样品都要严格地获知该温度下

表1 有机液声速和热力学参数(T=25)

液体	$c_0/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\rho_0/\text{kg}\cdot\text{gm}^{-3}$	$k \times 10^{11}/\text{m}^2\cdot\text{N}^{-1}$	$\alpha \times 10^5/\text{K}^{-1}$	M
丙酮	1192 ^[8]	792 ^[8]	110 ^[13]	149 ^[13]	58
甲醇	1123 ^[8]	792 ^[8]	129.3 ^[13]	126 ^[13]	32
四氯化碳	928.7 ^[8]	1595 ^[8]	90.4 ^[13]	123.6 ^[13]	154
乙醇	1180 ^[8]	789 ^[8]	119.1 ^[13]	104 ^[13]	46
正己烷	1103 ^[8]	654 ^[8]	156 ^[13]	135 ^[13]	86
戊烷	1008 ^[8]	626 ^[8]	238 ^[13]	161 ^[13]	72
庚烷	1162 ^[8]	684 ^[8]	132 ^[13]	124 ^[13]	100
辛烷	1197 ^[8]	703 ^[8]	119 ^[13]	116 ^[13]	126
壬烷	1248 ^[8]	738 ^[8]	123.1 ^[13]	107 ^[13]	128
正丙醇	1223 ^[8]	804 ^[8]	89.5 ^[13]	95.6 ^[13]	60
正丁醇	1268 ^[8]	810 ^[8]	88.84 ^[13]	95 ^[13]	74

表2 B/A 计算值和测量值的比较(T=25)

液体	B/A 计算值	B/A 测量值
丙酮	9.78	9.441 ^[10] ; 9.2 ^[11]
甲醇	8.90	9.34 ^[7] ; 9.47±0.47 ^[9] ; 9.62 ^[10] ; 9.6 ^[11]
四氯化碳	11.18	10.8 ^[5] ; 9.62 ^[7] ; 9.00±0.45 ^[9] ; 11.54 ^[12]
乙醇	9.65	10.24 ^[7] ; 10.85±0.54 ^[9] ; 10.57 ^[10]
正己烷	10.42	9.47±0.47 ^[9] ; 9.9 ^[11]
戊烷	9.70	9.72 ^[11]
庚烷	11.24	11.14 ^[12]
辛烷	11.96	11.34 ^[12]
壬烷	12.81	11.27 ^[12]
正丙醇	10.06	10.46 ^[7] ; 10.7 ^[10]
正丁醇	10.96	10.36 ^[9] ; 10.72 ^[10]

的各种参数是困难的,这将导致计算值与测量值产生一定的偏差;二是从理论上讲,用热力学方法测定样品的非线性声参量 B/A 会产生 2% 左右的误差,而用有限振幅法测量的误差可达 5% 左右,实际测量过程中,由于测量条件的复杂性, B/A 的实际测量误差可能高于理论误差。另外,表 2 给出的 B/A 测量值也并非全部都是在 25 °C 时测量的,只能说测量温度在 25 °C 附近。这也是造成本文理论预测值与测量值有一定偏差的重要原因之一。考虑到以上诸多因素,我们认为理论值与测量值之间有一定的偏差也是合理的。

本文的研究表明,对文献[9]得到的计算有机液非线性声参量 B/A 的理论公式进行改进是必要的,改进后的理论公式由于需要的参量少,且均是常见参数,避免了原公式查找 γ 和 r_0 产生的困难,便于对大量有机液样品进行理论研究。用改进的理论公式计算得到的有机液 B/A 值与有关文献报道的测量值相当好的吻合,说明用改进的 B/A 理论公式研究有机液的非线性声参量是可行的。

作者感谢南京大学声学研究所龚秀芬教授的指

导和徐晓辰等同志的帮助。

参考文献:

- [1] 龚秀芬. 医学超声中的声学非线性研究[J]. 物理学进展, 1996, 16(3-4): 286-298.
- [2] 龚秀芬等. 生物组织的组分和结构特性对非线性超声参量值的影响[J]. 声学学报, 1992, 17(6): 425.
- [3] 龚秀芬, 章东. 非线性声参量层析成像与生物组织定征[J]. 声学学报, 1998, 23(3): 197-203.
- [4] Takuso Sato, Arira Fukusima, et al. [J]. Ultrasonic Imaging, 1985, 7: 49-59.
- [5] Nomoto, O. [J]. J. Phys. Soc. Jap., 1966, 24: 569.
- [6] Hartmann, B. [J]. J. A. S. A., 1979, 65: 1392.
- [7] 全杰, 董彦武等. 有机液非线性声参量量级的研究[J]. 科学通报, 1988, 5: 348.
- [8] L. 别尔格曼著, 曹大文等译. 超声[M]. 国防工业出版社, 1964: 198-229.
- [9] 朱哲民等. 改进的热力学方法研究液体的非线性声参量 B/A [J]. 声学学报, 1988, 4: 306
- [10] Coppens, A. B. et al [J]. J. A. S. A., 1965, 38: 797.
- [11] Beyer, R. T., Nonlinear Acustica [M]. U. S. Naval Ship Sestem Command Washington. D. C., 1974.
- [12] Prakash, S. et al. [J]. Acustica, 1972, 27: 28.
- [13] 姚允斌等编. 物理化学手册[M]. 上海科学技术出版社, 1985, 593.

新技术和新产品报道

泡沫铝吸声板高新技术成果转化通过专家认定

吉林工业大学和上海众汇泡沫铝材有限公司联合开发的新型泡沫铝吸声板高新技术成果转化认定会于 2000 年 5 月 31 日在上海举行,上海市高新技术成果转化办公室和上海市南汇县科委主持了认定会,会议邀请同济大学洪宗辉教授、中科院硅酸盐所王炳堂教授、华东建筑设计院顾身信高工、第九设计研究院吕玉恒高工、公安部上海消防研究所唐明黎高工等组成专家评审组,对此产品进行认定。

泡沫铝吸声板采用加压渗流法工艺制成厚度为 6mm、8mm、10mm、20mm、50mm、100mm 板材,每块规格 $250 \times 250\text{mm}^2$ 、 $500 \times 500\text{mm}^2$ 、 $500 \times 1000\text{mm}^2$ 、 $1000 \times 1500\text{mm}^2$ 等,有各种颜色可供选择。泡沫铝吸声板具有高空隙率、高通孔率、吸声、屏蔽、不燃、耐温、耐潮、质轻、抗老化、防眩、无污染等特点,是一种新型无纤维环保型吸声板材,平均吸声系数大于 0.5。可广泛应用于建筑声学 and 噪声控制工程中,例如影剧院、体育馆、游泳馆、演播厅、录音室、高级宾馆等顶棚和墙面的吸声,也可用于室外道路声屏障、地下工程的吸声降噪等。泡沫铝吸声板的制造工艺、设备、检测手段等均已成熟完善,已具备年产 2 万 m^2 的生产能力,价格仅为国外同类产品的 1/3。经上海市科技情报中心检索和专家认定,该项成果属国内领先,达到了 90 年代初国际同类产品的先进水平,建议通过高新技术成果转化认定,投入批量生产。

中国船舶工业第九设计研究院 吕玉恒