

猪的新鲜离体软组织的超声衰减和速度*

冯 若 FENG RUO 陈兆华 CHEN ZHOU-HUA

朱正亚 ZHU ZHEN-YA 戴焕平 DAI HUAN-PING

南京大学声学研究所 (Institute of Acoustics, Nanjing University)

1983年8月20日收到 (Received August 20, 1983)

摘要 本文使用脉冲插入取代法测量了猪的6种新鲜软组织(血管、脑、肾、心、脾及肝)的超声衰减和传播速度。在37°C下,6种软组织的超声衰减系数 α_s 与频率 f 之间均满足幂函数 $\alpha_s \sim f^n$ 关系。在所研究的1—13MHz频段内, n 值在0.96—1.39之间。六种软组织的超声速度均表现出微量但颇为明显的频散现象,在5—13MHz频段内平均频散量为0.11—0.38m/s MHz。在7—37°C温度范围内对脑组织超声衰减和传播速度的研究表明:声速(1MHz)随温度单调上升,变化趋势与水中声速类似。声衰减(1、3、5MHz)则随温度上升而下降,但对较低频率,下降的速度变缓。6种软组织的声速值(5MHz, 37°C)近似地与它们各自的总蛋白含量成正比,蛋白含量每增加1%约使声速升高2.9m/s。

ULTRASONIC ATTENUATION AND VELOCITY IN FRESH SOFT TISSUES OF PIG IN VITRO

Abstract Ultrasonic attenuation and velocity were measured for six fresh pig tissues: blood vessel, brain, heart, liver, spleen and kidney by using pulse insertion method.

Frequency dependence of attenuation has been found to be nearly linear, with the power falling in the range from 0.96 to 1.39 over the 1—13 MHz at 37°C.

Velocity dispersion has been observed for all of the six tissues studied and their average values were 0.11—0.38 m/s. MHz for frequency range from 5 to 13 MHz at 37°C.

Temperature effect over the 7—37°C range for brain was also studied: velocity at 1 MHz has positive temperature coefficient with average value 1.3 m/s/°C and attenuation at 1, 3, 5 MHz decreases with temperature.

Velocity for six tissues studied was an approximately linear function of their whole protein content. Every unit protein % concentration raises velocity by about 2.9 m/s at 5 MHz, 37°C.

一、引 言

在超声医学和超声生物物理学迅速发展的要求与推动下^[1,2],近一、二十年来使用多种科学实验方法对哺乳动物软组织的超声性质进行着大量研究^[3]。所谓超声性质,主要是指超声的

* 中国科学院科学基金资助的课题

传播速度、衰减、吸收、反射、散射及非线性参量等。对动物组织的声速与声衰减研究已积累了不少资料^[4-6]，但所获数据不够系统且离散度较大。对动物组织的超声衰减谱和吸收谱的研究，对衰减、速度与组织组份之间关系的研究，都只是在最近才总结出很初步的实验规律^[7,8]。对组织的声速频散研究十分重要，但是由于缺乏精确而适用的测试方法，长期以来很少取得进展。在不久前 Клемин^[9] 和 Kremkau^[10] 才给出一些结果。其它如对组织的老化时间、固定液种类以及温度变化等因素对超声性质的影响都不很明确，正在研究之中^[10-12]。

这种状况的存在严重地阻碍着定量超声诊断技术的发展和超声在活体组织中传播机理的认识。因此，系统而深入的研究生物组织的超声性质依然是生物声学工作者所面临的一项迫切而艰巨的任务。

本文将报道我们利用水浸式脉冲插入取代法^[10]，在 1—13MHz 频段内，对若干猪的新鲜离体软组织的超声衰减和速度的研究结果，其中包括对组织的种类和组份、频率、温度等因素对其超声性质影响的研究。

二、测试方法和测试样品

本文在测量组织的超声衰减和速度时采用了水浸式脉冲插入取代法。通过分析和实验证明，在现有的各种超声测试方法中，水浸式脉冲插入取代法具有简单、方便、精确且需要样品数量少等优点。对此我们已另有详细讨论。

水浸式脉冲插入取代法的工作原理是：当在浸没于水中的发射与接收换能器 T_1 与 T_2 之间声程上插入厚度为 D 的组织样品时， T_2 接收到的声脉冲幅值及在时域中的位置均较样品插入之前发生变化。设样品和水中的声速分别示以 c_s 与 c_w ，置入样品引起的脉冲时移为 Δt ，则有：

$$c_s = \frac{D c_w}{D - \Delta t c_w} \quad (1)$$

式中 Δt 可从接收脉冲中间部分某载波与示波器基线交点的位移直接读取。一定温度下的 c_w 值可从文献[13]中的经验公式算出。可以认为 c_s 的误差只决定于 D 与 Δt 的测量误差。由式(1)有

$$\frac{dc_s}{c_s} = \frac{c_s - c_w}{c_w} \left(\frac{\partial \Delta t}{\Delta t} + \frac{\partial D}{D} \right) \quad (2)$$

可见， $|c_s - c_w|$ 小， D 大 (Δt 亦相应大些) 时，声速的相对误差 dc_s/c_s 减小。

对于我们所研究的几种软组织，有 $(c_s - c_w)/c_w \leq 0.05$ ， $|\partial \Delta t / \Delta t| \leq 0.01$ ， $|\partial D / D| \leq 0.03$ ，这表明由于时移和厚度的测量误差，对声速误差产生的影响分别小于 0.8m/s 及 2.3 m/s。当我们研究某一样品（厚度一定）的声速频散时，其误差只产生于对时移 Δt 的测量误差。

在屠宰场从刚刚杀死的猪体上取下研究样品所属的器官，并立即浸放在生理食盐水中带回实验室。测试样品盒为一黄铜(或有机玻璃)管，内径 30mm，长 15mm。为避免样品内夹附气泡并保证样品盒内良好的声耦合，样品的切割及封装入样品盒内均需在生理食盐水中按如下次序进行：把样品盒的一端口张紧封闭厚度为 $30\mu\text{m}$ 的聚乙烯透声薄膜，用刀片将样品切

割成适于装满样品盒的圆柱体(尽量避免结构很不均匀的部分),使其刚好充满样品盒(为此常需做仔细修整),最后再把样品盒的另端开口用同样的透声膜张紧封闭。

因此为测定声速确定式(1)中的 Δt 时,需对二个薄膜窗口的影响予以校正,为此只需把样品盒内充水,进行插入取代即可测量出 Δt 的校正值。在我们的实验中 Δt 的校正值为 12 ns。

测量装置(不包括电路部分)的示意图如图 1 所示。样品盒 C 横置于容器 B_2 内的 T_1 与 T_2 之间的支架 G 上。 T_1 与 T_2 均为基频 1MHz 的 x 切割石英换能器,其有效工作面直径为 16 mm,它们的方位和相对距离均可调节,以保证相互平行。 G 亦可使 C 的取向绕两个相互垂直的轴进行调节,以使声束垂直通过样品。 B_2 内为除气蒸馏水,作为参考液体和声耦合媒质。 B_2 再置于恒温水浴 B_1 中。在测试过程中 B_2 的水温变化控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 之内。

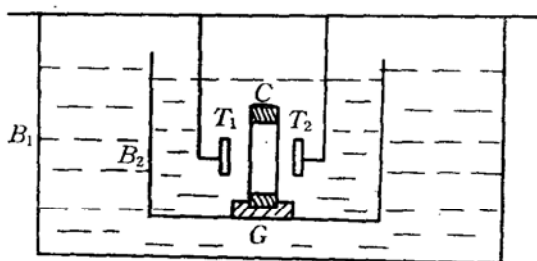


图 1 测量装置的示意图

The block diagram of experimental arrangement

- C 样品盒 (sample holder)
- T_1, T_2 发射与接收换能器 (transmitter and receiver transducers)
- G 支架 (guide)
- B_2 除气蒸馏水容器 (gas-free distilled water bath)
- B_1 恒温水浴容器 (temperature controlled water bath)

在本工作中利用 UAC-77 型射频脉冲发射与接收设备; HP-1715 型示波器作为显示部分。样品的声衰减由接收电路中的 SHK-15 型衰减器测得。设样品插入时引起的总衰减为 IL_H , 则样品的声衰减系数 α_s 可表示为:

$$\alpha_s = \frac{1}{D} (IL_H - IL_R - IL_A) + \alpha_w \quad (3)$$

式中 IL_R 为在样品与水界面处由于声阻抗不连续引起的反射损耗; IL_A 为两侧透声薄膜引入的附加损耗; α_w 为水的声衰减(吸收)系数。

分析表明,在我们的实验情况下, IL_R 与 α_w 的影响可以忽略不计。 IL_A 的贡献亦不大,具体数值可由实验确定。

为了对本工作系统测量声速的精度进行鉴定,我们在 18.6°C 测量了典型弛豫媒质

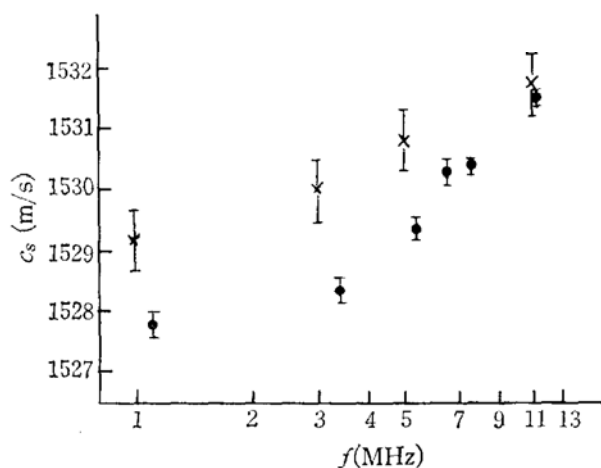


图 2 $0.5\text{M}\cdot\text{MnSO}_4$ 水溶液声速与频率的关系(18.6°C)

Frequency dependence of sound velocity in aqueous solution of 0.5M MnSO_4 at 18.6°C

- 本文数据 (data from this investigation)
- × 自引文[10] (data from Ref. [10])

0.5M · MnSO₄ 水溶液声速随频率的变化关系。结果示于图 2。我们在每个测试频率上都进行了十次重复测量，图中每个数据点上的竖直线段标明了标准误差的范围。同时图中还给出了 Kremkau^[10] 的数据。可见，在高频段我们与 Kremkau 的结果基本一致，在 5MHz 以下相差小于 0.1%。

三、测量结果与讨论

我们在 37°C 下，用 1—13MHz 频段内的超声波对新鲜的猪脑、心、肝、脾、肾和血管等组织样品的声衰减系数与传播速度进行了测量。此外，还对脑组织的超声衰减和传播速度在 6.9—37.1°C 范围内研究了它们随温度的变化关系。

1. 超声衰减系数与频率的关系

超声衰减系数随频率变化的测量结果列于表 1。血管及脑各测一个样品；肾测了三个样品；心测四个样品，脾测六个样品；肝测七个样品。每个样品皆取自不同的动物个体，且它们又是

随机地从各个相应的脏器上取下，即不存在它们在各个相应脏器上位置的重复性。在这样条件下，测量表明：同类组织的不同样品的声衰减值表现出明显的离散性。表中给出了声衰减系数的平均值及相应的标准离散范围。

分析表明，对六种软组织测得的超声衰减系数 α_s 与频率 f 之间的关系可以很好地用幂函数拟合方程 $\alpha_s = Bf^n$ 予以描述。为此我们在表 1 的最后三栏中给出了由回归分析得到的 n 与 B 值，以及对应的相关系数 R 值。作为例子我们还在双对数坐标纸上给出了三种组织样品的实验结果与拟合曲线（见图 3）。曲线的斜率为 n ，在 1MHz 时的截距为 B 。

2. 超声速度频散现象的研究

用于测量声速频散的样品和条件完全与上述测量声衰减时相同。图 4 给出了对六种组织样品测得的声速频散的平均结果。

由图可见，对所研究的六种组织样品均表现出微量但颇为明显的声速频散现象。对各种组织测得的平均频散量在 0.11—0.38m/s·MHz 范围内。

如同测声衰减时一样，对同类组织的不同样品测得的声速值亦表现出一定的离散性。对于肝与心更为明显些。在文末附录的表 1 中给出了各数据的离散范围。

O'Donnell 等人^[11] 曾对超声衰减系数与声速频散量给出如下近似的定域关系式，该式与产生频散的具体机制无关：

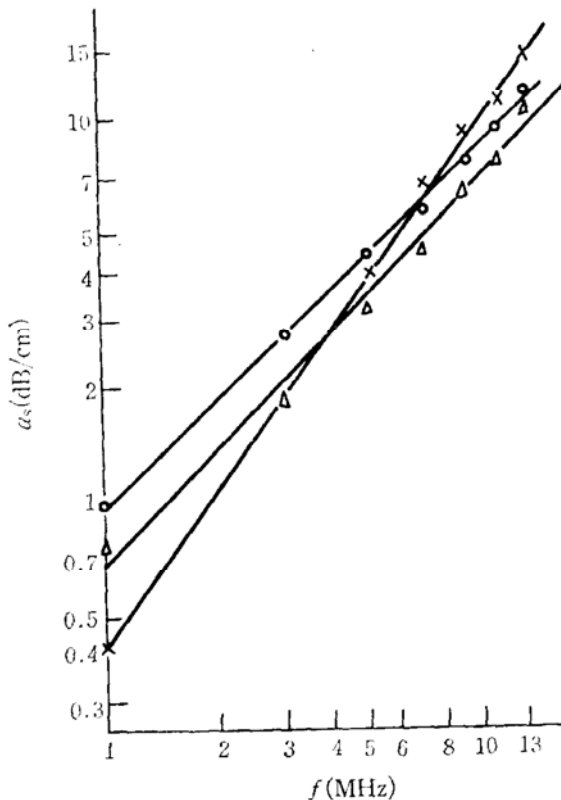


图 3 超声衰减系数随频率的变化关系, 37°C
Frequency dependence of ultrasonic
attenuation coefficient at 37°C

○ 肝 (livers) △ 心 (hearts) × 血管 (blood vessel)
— 拟合回归曲线 (the fitted regression curves)

表 1 超声衰减系数随频率变化的实验数据, 37°C
Ultrasonic attenuation coefficient as function of frequency at 37°C

样品 samples	频 率 $f(\text{MHz})$							n	B (dB/cm)	R
	1	3	5	7	9	11	13			
	α_s (dB/cm)									
血管(blood vessel)	0.41		4.0	6.7	9.1	11.0	14.7	1.39	0.41	0.999
脑 (brain)	0.32	1.8	3.3	4.7	7.2	8.9	11.9	1.38	0.34	0.998
肾 (kidneys)	0.41±0.08	1.3±0.14	2.3±0.3	3.5±0.3	4.7±0.4	6.1±0.6	7.9±1.0	1.14	0.39	0.998
心 (hearts)	0.77±0.14	1.8	3.1±0.2	4.5±0.4	6.3±0.8	7.8±0.9	10.9±1.1	1.02	0.68	0.990
脾 (spleens)	0.40±0.07	1.5±0.1	3.1±0.2	4.2±0.3	6.9±0.6	8.5±1.1	11.0±1.8	1.29	0.38	0.998
肝 (livers)	0.97±0.03	2.7±0.6	4.3±0.7	5.7±1.0	7.7±1.2	9.3±0.9	11.7±0.9	0.96	0.95	0.999

1 n is the exponent on frequency upon which the attenuation coefficient depends.

2 B corresponds to the attenuation coefficient value at 1 MHz.

3 R is correlation coefficient.

4 Amount of samples measured: 1 blood vessel, 1 brain, 3 kidneys, 4 hearts, 6 spleens and 7 livers.

$$\alpha_s = \frac{\pi\omega^2}{2c_{s0}} \frac{dc_s(\omega)}{d\omega} \quad (4)$$

式中 c_{s0} 为初始频率下样品的声速; ω 为超声的圆频率。O'Donnell 等人曾把式 (4) 在 1—9MHz 频段内用于血红蛋白溶液, 后来 Клемин^[9] 又在 2.8MHz 及 8.9MHz 频率下分别用于鼠的肝和心肌组织, 都得到了与实验值相近的结果。

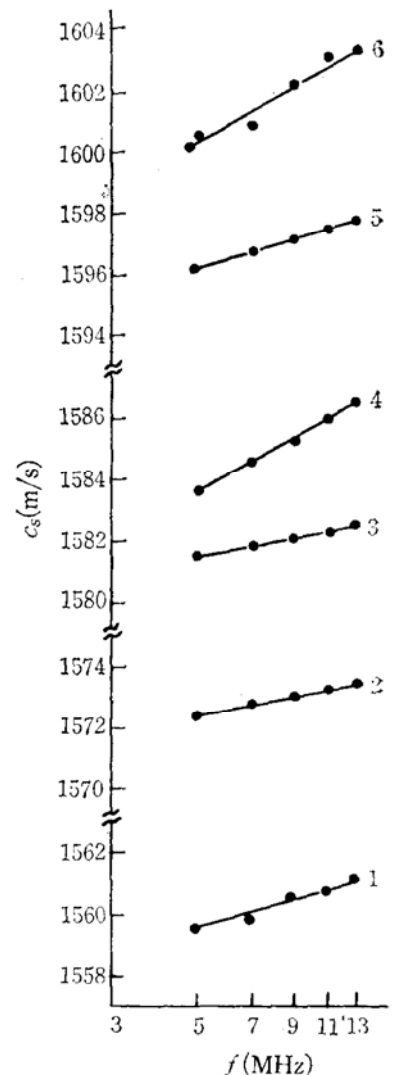
我们利用 5—13MHz 频段内的平均频散值, 根据式(4) 计算出衰减系数并与 9MHz 下的声衰减系数的实验值进行比较。结果表明, 对血管、脑、肾及肝 4 种样品 α_s 的理论值与实验值相差小于 15%。特别是血管与脑, 理论值与实验值相差小于 4%。例如在 9MHz 下血管的 α_s , 计算值为 9.2dB/cm, 实测值为 9.1dB/cm。但对心与脾 α_s 的计算值与实测值相比却相差几乎一倍。可见为严格验证式 (4) 对动物软组织的适用性, 对声速频散的研究必须取得更为详细而准确的数据。

3. 超声速度与衰减的温度关系

图 5 给出新鲜猪脑组织声速 (1MHz) 随温度的变化实验结果。可见, 在所研究的温度范围内声速随温度单调上升, 具有正的温度系数。而且变化趋势与水中的声速相似。我们知道, 脑的含水量约为 77%, 这意味着水在脑组织声速随温度变化的过程中起着决定性的作用。

图 4 超声速度随频率的变化关系(37°C)
Frequency dependence of ultrasonic velocity at 37°C

1 脑 (brain) 2 肾 (kidneys) 3 心 (hearts)
4 脾 (spleens) 5 肝 (livers) 6 血管 (blood vessel)



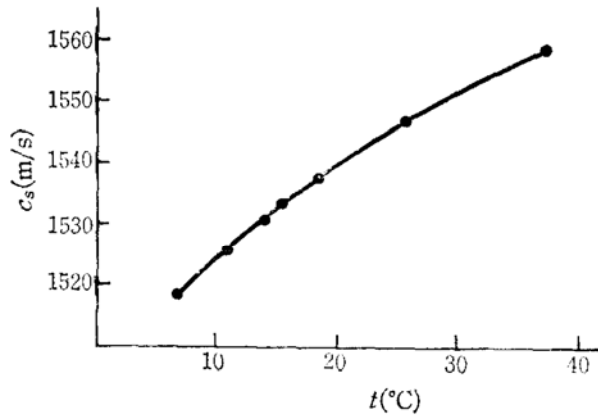


图 5 鲜猪脑声速随温度的变化 (1MHz)

Temperature dependence of ultrasonic velocity for fresh pig brain at 1 MHz

据 Kremkau 报道^[10],他们在使用 1MHz 超声对人脑 (Corna radiata 及 Island Riel) 声速随温度变化的研究中,发现在 15°C 附近呈现一极小值。

我们曾对取自不同个体的猪脑样品在此温区附近进行反复仔细测量,未观察到这一异常现象。

在图 6 中,我们给出了脑组织在 1、3、5MHz 频率下超声衰减系数 α_s 随温度 t 变化的实验结果。温度升高时衰减下降,频率较高时尤为明显。分析表明, α_s 对 t 的依赖关系可以较好地用 t 的幂函数关系来描述(如图中实线)。对于 1、3、5MHz 不同频率的超声,幂次分别为 -0.18, -0.57 及 -0.67。这个结果与 Kremkau 对人脑 (Corna radiata) 的研究结果非常相似(见文献[10]中图 8)。

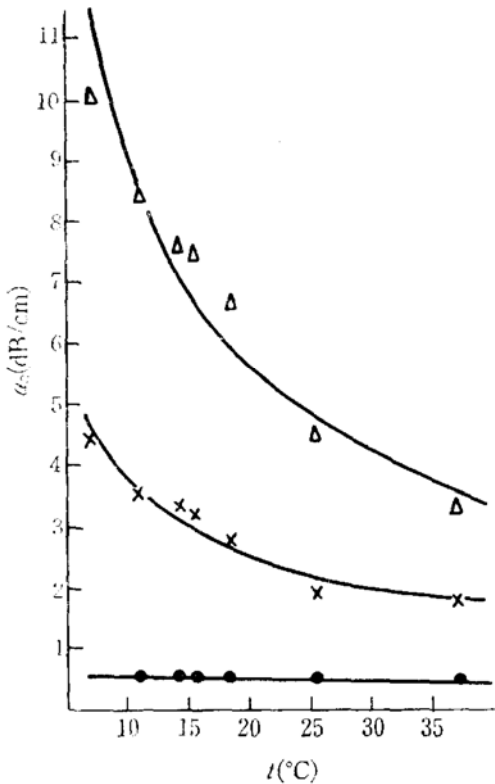


图 6 鲜猪脑的超声衰减系数随温度变化关系

Ultrasonic attenuation coefficient versus temperature for fresh pig brain

● × Δ 分别为 1, 3, 5MHz 实验数据 (experimental data at 1, 3, 5MHz respectively)

— 为幂函数回归拟合曲线

(the fitted power regression curves)

1, 3, 5MHz 的回归拟合方程式分别为

(the fitted regression equations for 1, 3, 5MHz):

$\alpha_s = 0.74t^{-0.18}$ (dB/cm), $\alpha_s = 13.71t^{-0.57}$

(dB/cm), $\alpha_s = 41.65t^{-0.67}$ (dB/cm); t (°C)

各对应的相关系数为 (corresponding correlation coefficients): -0.961, -0.970, -0.964

4. 超声速度与组织中总蛋白含量的关系

图 7 为所研究的六种组织的声速 (5MHz, 37°C) 与其总蛋白含量^[7]的关系。图中圆点为实验测得的数据,实线是线性回归拟合曲线。得到的回归方程为

$$c_s = 1532.9 + 2.87c \quad (\text{m/s}) \quad (5)$$

($R = 0.859$)

c_s 为样品的声速; c 为样品的总蛋白含量,示为百分比湿重量。对应的相关系数为 0.859。当 $c = 0$ 时,由 (5) 式知, $c_s = 1532.9\text{m/s}$, 这几乎刚好是 37°C 时生理食盐水中的声速。

可见,动物软组织的声速近似地正比于其总的蛋白含量。稍有例外的是心与肝,它们的总蛋白含量分别略低于肾与脾,而它们的声速值却反略高于

后者。类似情况曾有过报道^[9]。文献[9]的作者认为,这是由于组织中其它非蛋白组份起作用的结果,如核酸和糖原等。

四、结 论

1. 脉冲插入取代法用于测量动物软组织的超声性质,具有简单、方便、精确及需要样品数量少等优点。

2. 对所研究的六种猪的新鲜软组织(血管、脑、心、肝、脾、肾),在 37°C 下,超声衰减系数 α_s 与频率 f 均满足幂函数 α_s-f^n 关系。在所研究的 1—13MHz 频段内 n 值在 0.96—1.39 之间。

3. 对所研究的六种软组织,在 5—13MHz 频段内均观测到微量但颇为明显的声速频散现象。平均频散量为 0.11—0.38m/s · MHz。

4. 在 7—37°C 温度范围内,对新鲜猪脑的研究表明:声速 (1MHz)随温度单调上升,趋势与水类似;声衰减 (1、3、5MHz) 则随温升而下降。频率较低时(如 1MHz),下降速度变缓。

5. 所研究的六种软组织的声速近似地与它们各自的总蛋白含量成正比。蛋白含量每增加 1%可使声速值 (5MHz, 37°C) 约增大 2.9m/s。

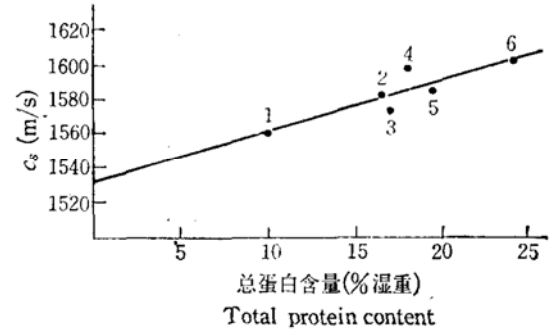


图 7 超声传播速度与组织总蛋白含量的关系
Dependence of ultrasonic velocity on total protein content for several tissues

● 实验数据 (experimental data) 5MHz, 37°C
— 线性回归拟合曲线 (linear regression fit curve)
相关系数 (correlation coefficient) $R = 0.859$
1 脑 (brain), 2 心 (hearts), 3 肾 (kidneys),
4 肝 (livers), 5 脾 (splens) 6 血管 (blood vessel)

附录 (Appendix)

表 1 超声速度随频率的变化关系, 37°C
Ultrasonic velocity as a function of frequency at 37°C

样品* Samples	f (MHz)					平均 (average) $\frac{\Delta c_s}{\Delta f}$ m/s · MHz
	5	7	9	11	13	
	c_s (m/s)					
血管 (blood vessel)	1600.6	1600.9	1602.2	1603.1	1603.3	0.34
脑 (brains)	1559.6	1559.9	1560.6	1560.8	1561.2	0.24
肾 (kidneys)	1572.3±1.2	1572.8±1.2	1573.0±1.3	1573.2±1.4	1573.4±1.3	0.14
心 (hearts)	1581.6±2.0	1581.9±2.2	1582.1±2.3	1582.2±2.3	1582.5±2.5	0.11
脾 (splens)	1583.6±0.9	1584.6±1.0	1585.3±1.2	1586.2±1.4	1586.6±1.6	0.38
肝 (livers)	1596.2±3.6	1596.7±3.1	1597.2±2.8	1597.4±3.0	1597.8±3.0	0.20

* 测试样品与正文表 1 中同。

The measured samples are the same as in table 1 of this paper.

表 2 鲜猪脑的超声衰减系数和速度随温度的变化关系, 37°C

Ultrasonic attenuation coefficient and velocity as a function of temperature for fresh pig brain at 37°C

$t/^\circ\text{C}$	$c_s(\text{m/s})$		$\alpha_s(\text{dB/cm})$		
	1 MHz		1MHz	3MHz	5MHz
6.9	1518.9			4.4	10.0
10.8	1525.4		0.49	3.5	8.4
14.0	1530.7		0.47	3.3	7.6
15.3	1533.8		0.46	3.2	7.5
18.3	1537.1		0.43	2.7	6.7
25.5	1546.3		0.41	1.9	4.5
37.1	1558.3		0.40	1.8	3.3

表 3 组织的超声速度与其总蛋白含量之间的关系

Dependence of ultrasonic velocity on total protein content for several tissues. 5MHz, 37°C

组织 (tissues)	$c_s(\text{m/s})$	总蛋白含量(total protein content)(%)
脑 (brain)	1559.6	10(8—12)
心 (hearts)	1582.3	16.5(14—19)
肾 (kidneys)	1572.3	17(14.7—19.3)
肝 (livers)	1598.0	18(16—22)
脾 (splens)	1583.8	19.5(18.8—20.2)
血管(blood vessel)	1600.6	24(23—27)

参 考 文 献

- [1] 冯 若, “超声与超声医学”, 自然杂志 6(1983), No.2, 119—123.
- [2] 冯 若, “超声生物物理学”, 物理, 13(1984), 65—69.
- [3] 冯 若, “哺乳动物软组织超声性质的实验研究方法”, 声学进展, 3(1983), 12—17.
- [4] 冯 若, “哺乳动物组织超声性质的研究进展”, 应用声学, 1(1984), 1—7.
- [5] Goss S. A., Johnston, R. L. and Dunn, F., “Comprehensive compilation of empirical ultrasonic properties of mammalian tissues”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 64(1978) No. 2, 423—457.
- [6] Goss, S. A., Johnston, R. L. and Dunn F., “Compilation of empirical ultrasonic properties of mammalian tissues”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 68(1980), No. 1, 93—108.
- [7] Goss, S. A., Frizzell, L. A. and Dunn, F., “Ultrasonic absorption and attenuation in mammalian tissues”, *Ultrasound in Med. and Biol.*, 5 (1979), 181—186.
- [8] Goss, S. A., Frizzell, L. A. and Dunn, F., “Dependence of the ultrasonic properties of biological tissue on constituent proteins”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 67 (1980), No. 3, 1041—1044.
- [9] Klemin, V. A. et al., “Study on frequency dependence of Acoustical Character of Biological Tissues by Using Resonance Method”, *Akust. Zhurnal*, 27(1981), No. 6, 895—900, (in Russian).
- [10] Kremkau, F. W., Bernes, R. W. and McGraw, C. P., “Ultrasonic attenuation and propagation speed in normal human brain”, *J. A. S. A.*, 70 (1981) No. 1, 29—38.
- [11] Bamber, J. C., Hill, C. R., King, J. A. and Dunn, F., “Ultrasonic propagation through fixed and unfixed tissues”, *Ultrasound in Med. and Biol.*, 5(1979), 159—165.
- [12] Sarvzan, A. P. and Airapetyan, G. A., “Acoustical Characters of Experimental Animal Soft Tissues”, *Mechanics of Composite Materials*, 3(1980), 514—518, (in Russian).
- [13] Bergman, L., “*Ultrasound*”, (Moscow, 1956), 234, (in Russian).
- [14] O'Donnell, M., Jaynes, E. T. and Miller, J. G., “General relationships between ultrasonic attenuation and dispersion”, *J. Acoust. Soc. Am.*, 63 (1978), No. 6, 1935—1937.