

声吸收对空气中声速的影响

舒 锋

(邵阳工专, 湖南邵阳, 422004)

本文分析了空气吸收声能而引起的声速的变化。结果表明, 由于空气对声能的吸收系数小, 这种变化可以忽略不计。

我们知道, 空气中, 声速公式可写成:

$$c = \sqrt{\gamma RT/\mu} \quad (1)$$

式中 γ 为空气的定压比热与定容比热之比, μ 为空气的摩尔质量, R 为气体常数, T 为热力学温度。(1)式说明, 空气中的声速与温度有关, 在常温下, 可将(1)式在273°K附近展开为泰勒级数, 略去高次项而得到:

$$\begin{aligned} c &= \sqrt{\frac{\gamma R}{\mu}(273+u)} \\ &\approx \sqrt{\frac{273\gamma R}{\mu}} \left(1 + \frac{u}{2 \times 273} \right) \\ &= c_0 + 0.61u \end{aligned} \quad (2)$$

此处 $c_0 = 331\text{m/s}$, 为0°C时空气中的声速, u 为以摄氏度表示的温度。

空气并非理想媒质, 由于内摩擦等原因, 空气将吸收一部分声能而使其内能增加, 从而提高媒质的温度, 因而影响声速, 本文以下将讨论这种影响。

对于平面行波, 空气对声能的吸收使声强按指数规律衰减^[1]:

$$I = I_0 e^{-\beta x}$$

I_0 为 $x=0$ 处的声强, I 为 x 处的声强, β 为空气对声能的吸收系数, 其值与频率有关, 可表为: $\beta = 4.0 \times 10^{-11} f^2 (1/\text{m})$ f 为声波的频率(Hz), 小振幅下, β 与声强无关, 将上式微分得:

收稿日期: 1992-11-12; 92-12-16

$$dI = -\beta I_0 e^{-\beta x} dx = -\beta I dx \quad (3)$$

可知当声波通过厚为 dx 的一层空气后, 减少的强度与 I 成正比, 与 dx 成正比。

取一小体积元 $dv = ds \cdot dx$, ds 为与波线垂直的小面元, 由(3)式, 则在 dt 时间内, 通过 dv 后, 波能的损失为 $dE = -dI ds dt$ ($dE > 0$), 设该能量全部转化为 dv 内空气的热能增量, 使温度升高 dT , 按能量守恒定律:

$dE = (\rho dv) C_p dT$, ρ 为空气密度, C_p 为空气的定压比热, 于是有:

$$dT/dt = (\beta I_0 / \rho C_p) e^{-\beta x} = K_0 e^{-\beta x} \quad (4)$$

其中: $K_0 = \beta I_0 / \rho C_p$

下面分析一下当空气中存在热源时的一维热传导问题, 即下列定解问题:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_0 e^{-\beta x} \quad (5)$$

$$u|_{t=0} = 0$$

$a^2 = k/\rho C_p$, k 为空气的导热率, 这是一个初始条件温度 u 的值为零时(即定为0°C)的非齐次泛定方程, 其解为^[2]:

$$u(x, t) = \int_0^t d\tau \int_{-\infty}^{\infty} K_0 e^{-\beta \xi} \cdot \left[\frac{1}{2a\sqrt{\pi(t-\tau)}} e^{-(x-\xi)^2/4a^2(t-\tau)} \right] d\xi \quad (6)$$

现对(6)式进行积分和化简, 为方便起见, 可令: $\alpha = 1/4a^2(t-\tau)$, $\lambda = 2\alpha x - \beta$, 则

$$u(x, t) = \int_0^t K_0 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} e^{-\alpha x^2} d\tau$$

$$\cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha \xi^2} e^{\lambda \xi} d\xi$$

$$\text{其中: } \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha \xi^2} e^{\lambda \xi} d\xi = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{\lambda^2/4\alpha},$$

将 α 、 λ 值代回得:

$$u(x, t) = \int_0^t K_0 e^{-\beta x} e^{a^2 \beta^2 (t-\tau)} d\tau$$

$$= (K_0/a^2 \beta^2) e^{-\beta x} (e^{a^2 \beta^2 t} - 1)$$

将 K_0 、 a^2 再代入可得:

$$u(x, t) = (I_0/k\beta) e^{-\beta x} (e^{k\beta^2 t/\rho c_p} - 1) \quad (7)$$

因为 β 和 k 都很小, 当 $k\beta^2 t/\rho c_p \ll 1$ 时, (7)式可近似为: $u(x, t) \approx (I_0/k\beta) e^{-\beta x} (k\beta^2 t/\rho c_p)$

$$u(x, t) \approx (I_0 \beta / \rho c_p) t e^{-\beta x} \quad (7')$$

(7')式中不包含导热率 k , 是忽略空气的热传导的结果, 可由(4)式直接得出。

(7)和(7')式描述的就是因空气吸收声能而在波的传播方向上任意位置($x \geq 0$), 任意时刻($t \geq 0$)的温升值。

为了估计温升, 现将(7')式中影响温升的参数取大数值: $I_0 = 2.0 \text{ w/m}^2$ (声强级为123dB), $f = 10^4 \text{ Hz}$, $\beta = 4.0 \times 10^{-3} \text{ (1/m)}$, $t = 10^5$ 秒(约一天时间), 此外, 对于空气 $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 1.003 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。这样, 当 $x = 0$ 时, $u = 0.62 \text{ (}^\circ\text{C)}$, 代入(2)式后可得: $\Delta c = c - c_0 = 0.61u = 0.378 = 1.14 \times 10^{-3} c_0$;

当 $x = 100 \text{ m}$ 时, $u = 0.42 \text{ (}^\circ\text{C)}$, $\Delta c = 7.7 \times 10^{-4} c_0$;

当 $x = 250 \text{ m}$ 时, $u = 0.23 \text{ (}^\circ\text{C)}$, $\Delta c = 4.2 \times 10^{-4} c_0$ 。

当 $x = 250 \text{ m}$ 时, $I/I_0 = 1/e \approx 37\%$, 可以认为声能已基本被空气所吸收。

由上可知, 尽管某些影响温升的参数取大数值, 但由于空气对声能的吸收系数小, 空气温升不显著, 因此声吸收对空气中声速的影响可以忽略不计。

参考文献

- [1] 曹萱龄等 物理学(上册), 人民教育出版社, 1979, 208
- [2] 梁昆森 数学物理方法, 人民教育出版社, 1978, 269~270。

(书 讯)

《医学超声》出版发行

由中国声学学会理事、浙江省超声医学工程学会会长金树武副教授编著的《医学超声》一书已于92年9月由浙江大学出版社出版发行全国。已获得应崇福、赵恒元、冯若、程敬之诸教授的佳评和推荐指导, 是我国医学超声领域中的一本新力作。全书采用理工医三结合方法编写, 博采国内外专家新近发表的大量的论文和著作的精华, 并结合作者近十余年来从事医学超声教学和科研所发表的许多论著。全书54.9万字, 共分8章。由浅入深而又系统地介绍了医学超声学的形成和发展, 医学超声物理

基础, A、B、M、D型显示原理、仪器结构和图像处理技术, 以及临床应用。书中有图332幅, 表61张, 为医学超声基础研究、临床诊断、仪器工程设计提供大量参考数据和资料。本书备有思考题, 可以作为高校生物医学工程及医学临床工程专业教材。对于从事医学超声教学、科研和工程设计人员以及研究生和进修医师都将是一本很有价值的参考书。浙江超声医学工程学会办公室(地址: 杭州浙大光学系, 邮编310027)竭诚为读者服务, 邮汇7.2元即可挂邮本书一册。