

薄膜热扩散率及耦合层厚度的光声检测

钱梦驩 章 罕 魏墨鑫

(同济大学声学研究所)

从一维四层媒质模型出发,在只考虑试样吸收光的假设下,得出传声器检测时空气中的光声信号的相位响应。由此对厚度为 $20\mu\text{m}$ 的铝膜和 $4\mu\text{m}$ 的镍膜的热扩散率进行了测定,并对薄膜与背衬之间的油耦合层作了估算。实验结果表明光声技术不仅可用来检测分层媒质表面层材料的热物性,而且还有可能估测内层媒质的厚度或热扩散率。

1 引言

光声检测是测定材料热物性,尤其是薄膜材料热扩散率的非常有效的新技术^[1,2]。为了消除薄膜自身的热弹振动对检测的干扰,通常用油或水把薄膜耦合到一热厚背衬上,来阻尼受迫振动。然而,实验结果表明,随薄膜厚度的减小,耦合层的影响逐渐增大,而使薄膜热扩散率的测量值发生系统的偏差^[3]。因此,必须从理论上把耦合层的影响考虑在内,以保证对薄膜热物性光声检测的可靠性。为此,本文将从一维的四层媒质模型理论出发,导出包括有热薄耦合层时的传声器光声检测系统中的光声信号及其相位响应,并以此对薄膜材料进行热扩散率的测定,同时对耦合层的厚度进行了估测。

2 原理

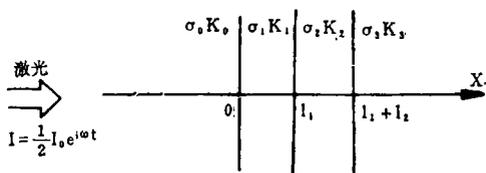


图 1 四层媒质的理论模型

当一交变光强为 $I = \frac{1}{2} I_0 e^{i\omega t}$, 波长为 λ 的

激光经空气入射到试样—耦合层—热厚背衬组成的分层媒质时,试样内任意一点 x 上,因吸收光能而形成的热功率密度为:

$$G(x, t) = \frac{1}{2} \beta I_0 e^{i\omega t - x} \quad (1)$$

式中: β 为试样对波长 λ 的光的吸收系数, ω 为调制频率。于是,各层媒质的热扩散方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{\partial T_i}{\partial t}, (i = 0, 2, 3) \\ \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} - \frac{1}{k_1} G(x, t) \end{cases} \quad (2)$$

相应的边界条件为:

$$\begin{aligned} T_0(0, t) &= T_1(0, t), \quad T_1(l_1, t) = T_2(l_1, t), \\ T_2(l_1 + l_2, t) &= T_3(l_1 + l_2, t), \\ k_0 \frac{\partial T_0(0, t)}{\partial x} &= k_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x}, \\ k_1 \frac{\partial T_1(l_1, t)}{\partial x} &= k_2 \frac{\partial T_2(l_1, t)}{\partial x}, \\ k_2 \frac{\partial T_2(l_1 + l_2, t)}{\partial x} &= k_3 \frac{\partial T_3(l_1 + l_2, t)}{\partial x} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, T_i 为 i 层媒质内的交变温度, α_i 和 K_i 分别为热扩散率和热导率。

由式(2)和(3)可得到各层媒质内的 $T_1(x, t)$ 。在区域0空气中的交变温度为:

$$T_0(x, t) = E e^{i\omega t + \sigma_0 x} \quad (4)$$

* 本工作得到国家教委博士点基金的资助

式中: $\sigma_1 = i\omega/\alpha_1$, $E = R(A - B + 1) / H$,
 $R = \beta I_0 / K_1 (\sigma_1^2 - \beta^2)$

$$\begin{aligned}
 A &= (r_1 + g)e^{-\sigma_1 l_1} [(b_1 + 1)(b_2 - 1)e^{-\sigma_2 l_2} + (b_1 - 1)(b_2 + 1)e^{\sigma_2 l_2}] - (1 + g)e^{-\sigma_1 l_1} \\
 &\quad [(b_1 + r_1)(b_2 - 1)e^{-\sigma_2 l_2} + (b_1 - r_1)(b_2 + 1)e^{\sigma_2 l_2}], \\
 B &= (r_1 + g)e^{\sigma_1 l_1} [(b_1 - 1)(b_2 - 1)e^{-\sigma_2 l_2} + (b_1 + 1)(b_2 + 1)e^{\sigma_2 l_2}] + (1 - g)e^{-\beta l_1} \\
 &\quad [(b_1 + r_1)(b_2 - 1)e^{-\sigma_2 l_2} + (b_1 - r_1)(b_2 + 1)e^{\sigma_2 l_2}], \\
 H &= (1 + g)e^{\sigma_1 l_1} [(b_1 - 1)(b_2 - 1)e^{-\sigma_2 l_2} + (b_1 + 1)(b_2 + 1)e^{\sigma_2 l_2}] + (1 - g)e^{-\sigma_1 l_1} \\
 &\quad [(b_1 + 1)(b_2 - 1)e^{-\sigma_2 l_2} + (b_1 - 1)(b_2 + 1)e^{\sigma_2 l_2}],
 \end{aligned} \quad (5)$$

以及:

$$g = \frac{k_0 \sigma_0}{k_1 \sigma_1}, \quad b_1 = \frac{k_2 \sigma_2}{k_1 \sigma_1}, \quad b_2 = \frac{k_3 \sigma_3}{k_2 \sigma_2},$$

$$r = \beta / \sigma_1.$$

由R-G理论^[4]可得到空气内的声压:

$$p(t) = \frac{-\gamma P_0 E \mu_0}{\sqrt{2} l_0 T_0^*} e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})} \quad (6)$$

其中: γ 为空气的比热比, P_0 及 T_0^* 为空气的平均气压及温度, $\mu_1 = (2\alpha_1/\omega)^{1/2}$ 为热扩散长度, 而 $a_i = 1/\mu_i (i = 0, 1, 2, 3)$ 。

如果是强吸收试样, 而耦合层又是薄层时, 由 $e^{-\sigma_1 l_1} \approx 0$, $e^{\pm \sigma_2 l_2} \approx 1 \pm a_2 l_2$, 及 $g \approx 0$, 可得到如图1所示的前表面激发时试样的光声信号 $p(t)$ 的相位为:

$$\varphi = \arctg \left[\frac{(b' + 1)e^x + (b' - 1)e^{-x}}{(b' + 1)e^x - (b' - 1)e^{-x}} \operatorname{tg} x \right] - \arctg \left[\frac{(b' + 1)e^x - (b' - 1)e^{-x}}{(b' + 1)e^x + (b' - 1)e^{-x}} \operatorname{tg} x \right] \quad (7)$$

式中: $b' = (b_1 b_2 + a_2 l_2 b_1) / (1 + a_2 l_2 b_1)$,
 $(7a)$

$x = 1/\mu_1 = [\pi f / f_c]^{1/2}$, $f_c = \alpha_1 / l_1^2$, 为试样的特征频率。

这样, 由实验测得的试样相位响应 φ , 用式(7)的理论结果作 b' 和 f_c 的双参数拟合, 由 $\alpha_1 = f_c l_1^2$ 及 b' 与 b_1, b_2 的关系, 在已知试样厚度及耦合层热扩散率的情况下, 就可以同时确定试样的热扩散率 α_1 及耦合层厚度 l_2 了。

3 实验结果

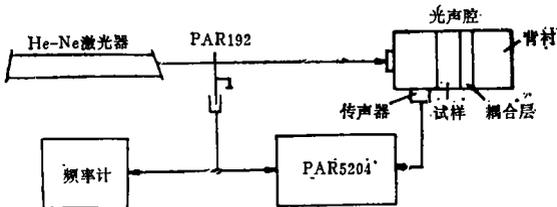


图2 测定热扩散率的传声器光声检测系统

薄膜材料热扩散率光声检测的实验装置如图2所示。功率为15mW的He-Ne激光束, 经斩波器PAR192调制后入射到光声腔内的试样上。传声器检测到的光声信号输到锁相分析仪PAR5204进行相位和幅值的测定。用 $l = 2.903\text{mm}$ 的纯铁来确定检测系统在60 ~ 840Hz范围的系统相位响应 φ_0 ^[11]。结果如图3所示。

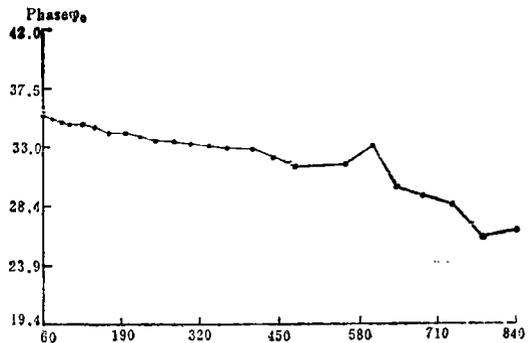


图3 用厚度为2.903mm纯铁测得的系统相位响应。

表 1 热扩散率实验结果

	铝(l=20μm)			镍(l=4μm)		
	f _c (Hz)	b'	α(cm ² /s)	f _c (Hz)	b'	α(cm ² /s)
实验拟合	130808	0.08	0.523	1.86×10 ⁶	0.02	0.298
拟合误差(%)	15	6		4	1	
参照值			0.542*			0.23**

*激光导热仪对同种材料测定值, **文献[5]给出值。

然后对厚度为20μm的铝膜及4μm的镍膜进行测定。用硅油把试样与光学玻璃背衬粘合,而后测定相位响应φ_s'。由(φ_s'-φ₀)得到试样的相位响应φ_s,其结果如图4和5中的实线所示。由式(7)作f_c和b'双参数拟合的理论曲线如图4和5中虚线所示。而f_c、b'及热扩散率值如表1所示。显然,实测值与激光导热仪及文献[5]给出值是一致的。

由文献[5]给出的试样铝和镍,油及玻璃的密度,比热及热导率如表2所示。由这些理论数据,可以直接计算出相应的b₁及b₂,它们分别为:

$$\text{试样Al}(20\mu\text{m}): b_1 = (\rho_2 c_2 k_2 / \rho_1 c_1 k_1)^{\frac{1}{2}} = 0.027, b_2 = (\rho_3 c_3 k_3 / \rho_2 c_2 k_2)^{\frac{1}{2}} = 2.94.$$

$$\text{试样Ni}(4\mu\text{m}): b_1 = 0.02, b_2 = 2.94.$$

如果忽略耦合层时,由l₂=0,得b'₁=b₁b₂,比较拟合值b'与计算值b₁b₂,可发现,对于厚度为20μm的铝膜,这时的b'₁=0.08与b₁b₂=0.0794很接近,这表明耦合层对检测的影响不大。而在4μm厚的镍膜の場合,b₁=0.02,而b₁b₂=0.06,这表明耦合层已对检测有相当的影响。

显然,如果试样、耦合层及背衬的热物

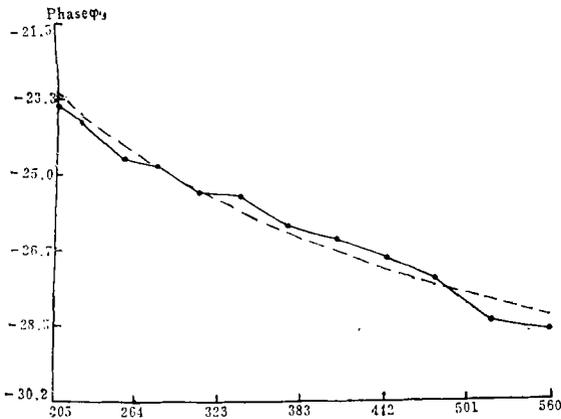


图 4 20μm铝膜的相位响应及拟合曲线

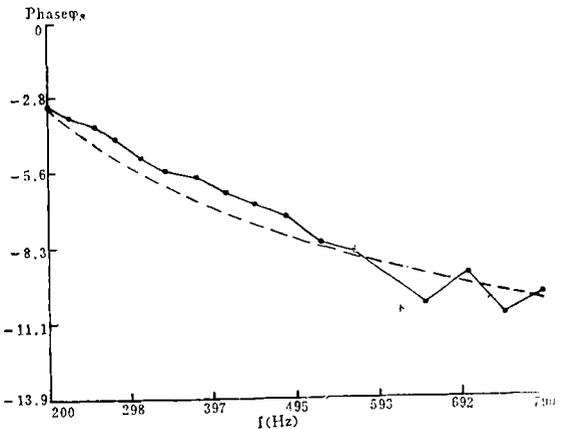


图 5 4μm镍膜的相位响应及拟合曲线

表 2 试样、油膜及背衬的物理参数

	铝	镍	油	玻璃
ρ(g/cm ³)	2.7	8.9	0.88	2.5
c(J/g·°k)	0.903	0.444	1.87	0.84
k(W/m·°k)	127*	90	0.133	0.9

*为实测值。

流空化噪声的谱特性

武延祥

(西安,西北工业大学航海工程学院)

根据流空化噪声的功率谱结构对空化现象进行判别是人们关注的问题之一。本文采用了一种流空化噪声的模型并对功率谱进行了计算和分析。采用三种不同的几何模型,实测了空化状态下的功率谱特征,所得结果表明流空化噪声具有连续的功率谱结构,谱包络具有近似单调上升和单调下降的趋势,以此判断空化的发生,为工程设计提供了可靠数据。

我们把物体在液体中的运动或液体流过静止物体的运动所产生的空化现象称为流空化,它区别于螺旋桨空化,一般发生在结构界面有突变的区域。

流空化噪声的发生是由于液体中存在着空化气泡(简称空泡),空泡破裂产生瞬时压力,并向周围辐射声波,称之为空化噪声。空泡完全溃灭时间可表示为^[1]。

$$T_c = 0.915 R_{max} \sqrt{\rho/P} \quad (1)$$

其中 P —静压力, R_{max} —空泡破裂前最大半径, ρ —流体密度。从而看出,完全溃灭时间正比于空泡最大半径 R_{max} 。

一般说来,溃灭时间极短,可以看作是一个非常尖的声压脉冲,脉冲宽度 T_0 和幅度均与空泡的最大半径成正比^[2]

$$T_0 = KT_c \quad (2)$$

性已知时,由式(7a),利用拟合得到的 b' 及已知的 b_1 和 b_2 ,就可以估算出耦合层的大致厚度。对于镍膜的情况,拟合得 $b' = 0.02$,由(7a)可以解得:

$$l_2 \approx \mu_2 = (2k_2/\rho_2 c_2 \omega)^{1/2}$$

由表2的油的参数及图5中实验与理论曲线误差最小的中间频率 $f = 500\text{Hz}$,得出耦合层厚度约为 $22\mu\text{m}$ 。

如果要精确得到耦合层的厚度,可由式(7)和(7a)直接对参数 f 和 l_2 作双参数拟合来确定。反之,如果已知耦合层的厚度 l_2 及第一层媒质的热扩散率 α_1 ,利用双参数拟合就可以同时确定第一层媒质的厚度 l_1 和第二层媒质的 α_2 。

4 结论

利用一维四层媒质模型及双参数非线性拟合方法,应用传声器光声检测技术已成功地检测了厚度仅 $4\mu\text{m}$ 的金属膜的热扩散率,

并粗略地估测了耦合层的厚度。如果采用直接对 f_c 和 l_2 (或 f_c 和 α_2)作双参数拟合,将有可能对第二层媒质的特性作更精确的测定。由于传声器光声检测技术只能有效地工作在 1kHz 以下的频率范围,因而对有更高特征频率 f_c 的薄膜特性检测存在着固有困难。利用宽带的光声检测技术,将能更充分发挥光声技术能对材料亚表面特性检测的优越性。

参考文献

1. 钱梦瑛 吴大同 魏墨奎. 应用声学, 1988, 7(4): 7
2. R. J. Swimm. Appl. Phys. Lett., 1983, 42: 955
3. 吴大同. 线性调频光声技术检测材料热扩散率. 同济大学声学研究所硕士学位论文, 1989
4. Rosenswaig, A. and Gersho, A., J. Appl. Phys., 1976, 47: 64
5. Physics Handbook, Tl. 1, Ed. by C. Nordling and J. Österman, Chentwell-Bratt Ltd., England, 1980.