

材料复切变模量的测量方法

盛 胜 我

(同济大学声学研究所 上海 200092)

1993年7月27日收到

本文介绍材料切变模量及损耗因子的测量方法,着重讨论了测量中的一些技术问题.

Abstract

Method for measuring the complex shear modulus and the loss factor is herein described with emphasis on some technical aspects.

一、引 言

在测定材料的阻尼性质时,通常只测量材料的杨氏模量与损耗因子.实际上,测量的结果仅反映材料受到拉伸与压缩时,物体的弹性性质以及损耗振动能量的强弱.换言之,这适用于自由阻尼层结构.在工程减振设计中,往往采用一种约束阻尼层结构.这时,材料层产生的形变主要是剪切,因此,材料的切变模量与损耗因子是主要参数,在结构弯曲振动时,使振动能量不断损耗的原因主要是切变应力的作用.以往,关于材料切变模量与损耗因子的测量方法介绍甚少.本文将根据振动理论,参照国外标准^[1],阐明测量原理与方法,并结合具体测试,讨论一些测量中的技术问题,同时给出一些典型的测试结果.

二、测量原理与方法

测量的试件如图1.它是将待测材料作为夹芯粘合在二块基板之间,基板通常用铝或钢制成,其弹性模量要求远大于材料层的弹性模量.当试件采用一端固定,一端自由的边界条件,并采用激励信号使试件作弯曲振动时,二层基板弯曲保持平行.如果下层基板向下凹,那么材料层下部将受到拉伸,而上部将受到压缩,这相当于二层基板发生滑移运动,结果使材料层产生剪切形变.随着基板的弯曲振动,材料层受剪切应力的作用,使振动能量不断损耗.根据细棒弯曲振动的理论可知,只要测量出试件及基板的共振频率以及半功率频带宽度,就可以得出材料的复切变模量.

设试件长为 l ,基板的密度为 ρ ,厚度为 H ,材料层的密度为 ρ_1 ,厚度为 H_2 ,并记 $T = H_2/H, D = \rho_1/\rho$.试件的复弯曲刚度为 B^* ,它

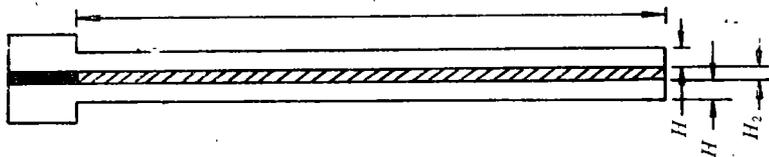


图1 试件示意图

由下式决定^[2]

$$B^* = B_1(1 + j\eta_1) = 2B_1 \left(1 + \frac{X^*Y}{1 + X^*} \right) \quad (1)$$

式中 B_1 为试件弯曲劲度的实部, η_1 为试件的有效损耗因子。 B_1 为基板的弯曲劲度, Y 为试件的劲度参数, X^* 为其复切变参数, 分别由下式决定

$$Y = 3(1 + T)^2 \quad (2)$$

$$X^* = \frac{G^*}{k_b^2 H_2} = \frac{G^* l^2}{\pi C_n E H H_2} \quad (3)$$

式中 k_b 为弯曲波波数, C_n 为对应于边界条件的各阶模式的系数, 分别为 $C_1 = 0.55959$; $C_2 = 3.5069$; $C_3 = 9.8194$; $C_4 = 19.242$; $C_5 = 31.809$; $C_n = (\pi/2)(n - 0.5)^2, (n > 3)$ 。 E 为基板的杨氏模量, G^* 即为材料的复切变模量。

当分别测得基板的各阶共振频率 f_n 以及试件的各阶共振频率 f_s 与半功率带宽 Δf_s 后, 可以得到下列关系式

$$\frac{B_s}{B_1} = \left(\frac{f_s}{f_n} \right)^2 (2 + DT) \quad (4)$$

$$\eta_1 = \frac{\Delta f_s}{f_s} \quad (5)$$

由(1)式可以得到 X^* , 代入(3)式, 经简单运算, 可以得到 G^* 。

引入参数

$$B = 1/2Y = \frac{1}{6(1 + T)^2} \quad (6)$$

$$A = \frac{B_s}{B_1} \cdot \frac{B}{2} = \left(\frac{f_s}{f_n} \right)^2 (2 + DT) \cdot \frac{B}{2} \quad (7)$$

并记 $G^* = G(1 + j\eta_2)$, 最后可得切变模量 G 与切变损耗因子 η_2 分别为

$$G = \frac{[A - B - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_1)^2]}{[(1 - 2A + 2B)^2 + 4(A\eta_1)^2]} \cdot 2\pi C_n E H H_2 / l^2 \quad (8)$$

$$\eta_2 = A\eta_1 / [A - B - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_1)^2] \quad (9)$$

式(8)与式(9)正是国外标准^[1]中给出的关系式。

测量可按照下述步骤进行:

应用声学

1. 测量基板的共振频率 f_n , 并由下式计算相应的杨氏模量 E

$$E = 12\rho l^2 f_n^2 / H^2 C_n^2 \quad (10)$$

2 测量复合试件的共振频率 f_s 以及半功率带宽 Δf_s 。

3 给定 l, D, T 等值, 并计算参数 A, B 值。

4 由式(8)与式(9)计算材料的切变模量 G 以及相应的损耗因子 η_2 。

三、测量中的一些技术问题

根据我们的测试实践, 发现在测量中尚有一些技术问题值得注意, 主要有下面几个方面:

1 试件的制作是获得有意义的数据的关键之一。由于必须保证测试中材料层主要是受剪切的作用, 因此这种测量方法一般适用于模量小于 10^9Pa 的材料, 而基板应选取弹性模量大的金属材料, 在厚度上也必须选择适当, 较理想的情况是基板厚度 10 倍于材料层厚度, 即材料层厚度相应较小。此时, 材料层的切变振动将提供充分的耦合作用。(切变参数 X 较大, 它反映材料层与基板弯曲振动的耦合程度。)我们采用基板厚度为 2mm, 材料层厚度为 0.4mm。

材料与基板的粘合非常重要。我们采用 501 粘合剂。因为这类粘合剂比较稀薄, 而模量也较高。因此在粘合时通过加压固定, 可以使其厚度尽量小。这样, 测量结果将不会受粘结层太大的影响。在粘合时必须将材料与基板间的气泡全部挤出, 否则将引起脱落或耦合不紧密而影响结果。试件的根部结构是采用同样材料粘合在基板上。在基板之间的根部部位, 采用与材料层同厚度的隔离片加以垫实。这种根部结构主要是模拟试件夹持端的边界条件。

试件的基板外侧粘贴二块薄片磁性材料。传感器通过磁性薄片激励试件, 并由此测得响应。通常情况下, 磁片位置一片放在底部, 另一片在接近根部处。必须注意位置的选取要避开各阶模式的波谷处, 否则将接收不到较强的响应。试件的长度选取主要根据所感兴趣的频率。

因为测得的共振频率与试件长度成反比, 如果只需要第一、二阶模式, 那么试件长度一般选取在 18—25cm。当需要测量的频率较高, 即高阶模式时, 试件长度必须相应缩短。我们采用试件自由长度 9.5cm, 测得的频率可在 6K 左右 (第四阶模式)。典型的频响谱如图 2。

2 传感器。为了尽量减少外界干扰影响, 采用非接触式传感器。一个用来激励作用力, 另一个测量试件的响应。传感器装置在支架上, 支架可用螺丝调节, 传感器距离试件应尽量小, 以获得较高的灵敏度, 但也不能太靠拢, 否则当试件振动时将被传感器的磁性吸住。通常间距在 1mm 左右。一般情况下, 底部的传感器作为激励, 上部 (接近固定端) 的传感器作为拾振。我们在测量中曾交换过上下位置, 结果表明两者几乎没有差别。测量时采用的传感器为 BK 公司 MM0002 磁芯换能器。

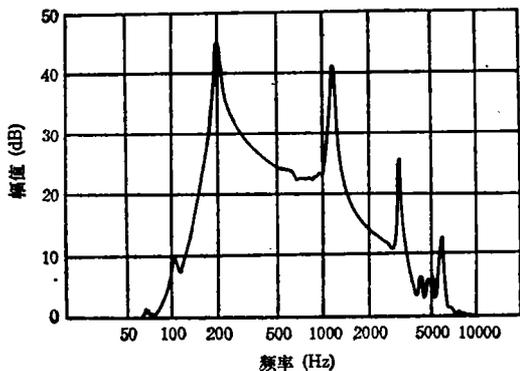


图 2 典型的频响谱

3 关于模式间的干扰。当激发频率给定时, 在共振频率附近, 有时会受到其他模式振动的干扰。这主要有二种来源, 一是激发频率的谐频 (非线性激发) 与试件某一模式的共振频率相接近时, 该模式振动也被激发。适当的解决方法是引入低通滤波器, 将激发频率的高频谐波成分滤去。二是当激发频率较高时, 低于激发频率的低阶模式振动仍具有一定的量级, 它将形成背景干扰信号。适当的解决方法是引入高通滤波器, 将低频成分滤去。

4 材料切变模量与损耗因子随温度变化

的测试。这必须将装置试件的支架安置在一恒温箱内, 然后进行加温或降温。加温或致冷的办法可以采用多种, 但需要在恒温箱内达到均匀温度, 并且保持一定的时间。图 3 是一种高分子聚合物的切变模量与损耗因子与温度的关系, 图中示出的是各阶模式随温度的变化。

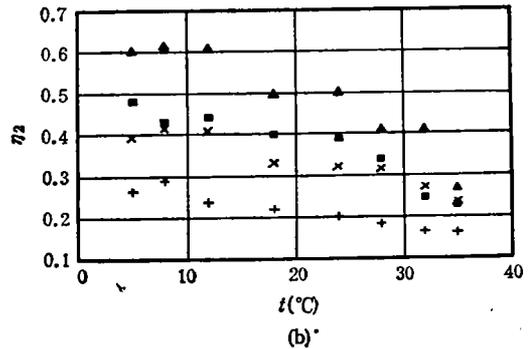
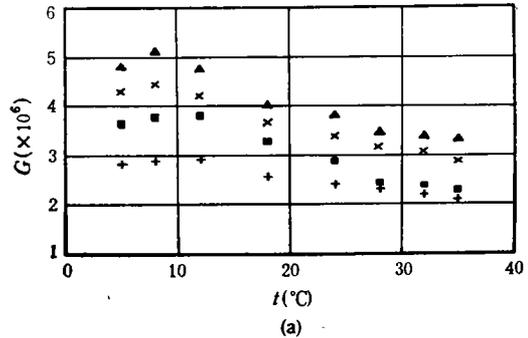


图 3 材料复切变模量随温度的变化

(a) G (b) η_2

+ 模式 2 ■ 模式 3 × 模式 4 ▲ 模式 5

四、测量方法的局限

上述测量材料复切变模量的方法存在着以下的局限:

1 测量方法的基础是共振法, 因此只能测得有限几个频率点的模量及损耗因子。

2 由于计算公式是基于细棒弯曲振动理论, 并满足一端固定一端自由的边界条件, 因此在实际测量中, 试件的尺寸应满足长度 \gg 宽度 \gg 厚度的条件。考虑到约束阻尼的条件, 对于模量大的材料的测定, 必须采用其他的方法,

以形成材料层切变振动的状态。

3 测量结果与试件的夹持密切相关,因此测试的重复性并不很好。另外,由于在高阶模式振动时,测得的信号比较弱,容易受到其他噪声的干扰,这些都将影响测试的精度以及数据的偏离。

参 考 文 献

- [1] ASTM E756-83, Standard Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials
- [2] 赵松龄, 噪声的降低与隔离(下册), 同济大学出版社, 1985.

扭振阶梯形变幅杆频率方程的一般表示

贺西平 程存弟

(陕西师范大学应用声学研究所 西安 710062)

1993年7月13日收到

利用变截面杆扭振方程和边界条件,导出的扭振阶梯形变幅杆的频率方程,在 $S_1 = S_2$, 或 $l_1 = l_2$ 时,并不适于实际情况。本文首先导出了扭振声传输线方程,并用之对阶梯形变幅杆的频率方程作了一般表示。

Abstract

The frequency equation for a torsional vibration step transformer, deduced from the equation for a variable cross-section transformer, is not fit for the case $S_1 = S_2$, or $l_1 = l_2$. In this paper, the equation of acoustic transmission line for torsional vibration is first derived and then applied to formulate the frequency equation of a step transformer.

一、问题的提出

如图1所示,这是一由同种材料做成的阶梯形扭振杆。对截面积为圆形的扭振杆,描述其变截面的扭振方程为^[1]:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{4}{D} \frac{dD}{dx} \cdot \frac{d\theta}{dx} + k^2\theta = 0 \quad (1)$$

式中, θ 为扭转角, D 为杆中任意某点的直径, k 为扭转波波数,其值为 ω/C_s , C_s 是杆中扭振波波速。

由方程(1),可得其解为:

$$\begin{aligned} \theta_I &= A_1 \cos kx + B_1 \sin kx \quad (-L_1 < x < 0) \\ \theta_{II} &= A_2 \cos kx + B_2 \sin kx \quad (0 < x < l_2) \end{aligned} \quad (2)$$

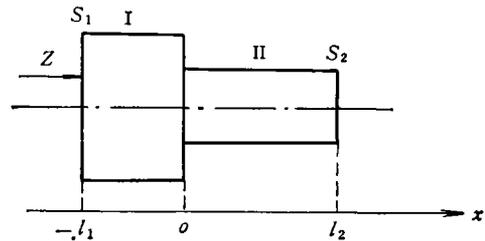


图1 阶梯形扭振杆

边界条件为:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_I|_{x=-l_1} &= \dot{\theta}_1, \quad \frac{\partial \theta_I}{\partial x} \Big|_{x=-l_1} = 0 \\ \dot{\theta}_{II}|_{x=l_2} &= \dot{\theta}_2, \quad \frac{\partial \theta_{II}}{\partial x} \Big|_{x=l_2} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_I|_{x=0} = \dot{\theta}_{II}|_{x=0}, \quad M_I|_{x=0} = M_{II}|_{x=0}$$

代(2)入(3)式中,经化简得出其满足的频