

## 前 言

本标准是参照国际标准 ISO 6721-3:1994《塑料——动态力学特性测量——第 3 部分:弯曲振动-共振曲线法》,美国材料与试验学会标准 ASTM E756—83《测量材料振动阻尼性能的标准方法》制定的。声学材料的弯曲共振测试方法已在我国工业和科研部门中广泛使用多年,为及时将国际标准转化为我国标准,又便于独立使用和适合我国国情,本标准编制时,将均匀试样和复合试样两类测试样品的悬臂梁和自由梁两种测试方法,同时编入本标准内。从而兼顾材料测试和阻尼效果评价的需要。

本标准的附录 A 和附录 B 是提示的附录。

本标准由全国声学标准化技术委员会提出及归口。

本标准起草单位:中国科学院声学研究所、中国船舶工业总公司第七一五研究所、天津橡胶工业研究所、中国船舶工业总公司第七〇一研究所。

本标准主要起草人:张同根、陆锦煜、陈耀辉、邵汉林。

# 中华人民共和国国家标准

## 声学 声学材料阻尼性能的弯曲共振测试方法

GB/T 16406—1996

Acoustics—Flexural resonance testing method  
for damping properties of acoustical materials

### 1 范围

本标准规定了测定声学材料阻尼性能的弯曲共振方法。

本标准适用于均匀和分层均匀的声学材料,其测量结果可为声学结构设计和噪声振动控制设计提供依据,也可用于评价各种复合结构试样的振动阻尼效果。

本标准规定的试验方法,在 10 Hz 至 1 000 Hz 频率范围内,储能模量的测量范围下限可达 0.5 MPa,损耗因数的测量范围为  $10^{-2}$  至  $10^{-1}$  量级。

### 2 引用标准

下列标准所包含的条文,通过在本标准中引用而构成为本标准的条文。本标准出版时,所示版本均为有效,所有标准都会被修订,使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB/T 3974—1996 声学名词术语

GB 4472—84 化工产品密度、相对密度测定通则

GB 9870—88 弹性体动态试验的一般要求

ISO 10112—1991 阻尼材料——复模量的图示法

### 3 定义和符号

本标准采用下列定义,这些定义适用于线性简谐形变条件。

本标准所用的声学术语均遵循 GB/T 3947 的规定。

#### 3.1 复(数)弯曲模量( $E_t^*$ ) flexural complex modulus

弯曲应力与弯曲应变之间的复数比,单位:帕,Pa。

$$E_t^* = E_t' + iE_t''$$

注:复弯曲模量和复拉伸模量也常被称为复杨氏模量,但弯曲试验和拉伸试验的结果,只有在应力应变关系线性和试样结构均匀的条件下,才具有可比性。

#### 3.2 储能弯曲模量( $E_t'$ ) flexural storage modulus

复数弯曲模量的实数部分,单位:帕,Pa。

#### 3.3 损耗弯曲模量( $E_t''$ ) flexural loss modulus

复数弯曲模量的虚数部分,单位:帕,Pa。

#### 3.4 (材料)损耗因数( $\tan\delta_t$ ) loss factor(of a material)

损耗模量与储能模量之比。

$$\tan\delta_t = E_t''/E_t'$$

### 3.5 复合(试样)损耗因数( $\eta_c$ ) composite loss factor

复合试样耗散能量的能力的量度。其值正比于试样阻尼能与应变能之比。

## 4 原理

本标准规定采用矩形条状试样,测量原理框图见图 1。测试方法分为两种,方法 A 是将试样垂直安装,上端刚性夹定,下端自由,简称悬臂梁方法;方法 B 是将试样水平安装,用两条细线在试样振动节点位置上悬挂,简称自由梁方法。悬臂梁法适用于大多数类型的材料,包括较软的材料。自由梁法适用于测试刚硬挺直的试样,对于较软的材料,应贴在金属板上做成复合试样进行测试。

测试系统仪器由激励和检测两部分组成。由信号发生器激励电磁换能器对试样施加简谐激励力。由检测换能器检测试样的振动信号,经放大送入指示与记录仪器。保持恒定的激励力,连续改变频率,测出试样的速度弯曲共振曲线。根据弯曲共振频率和共振峰宽度,即可计算出储能弯曲模量和损耗因数。

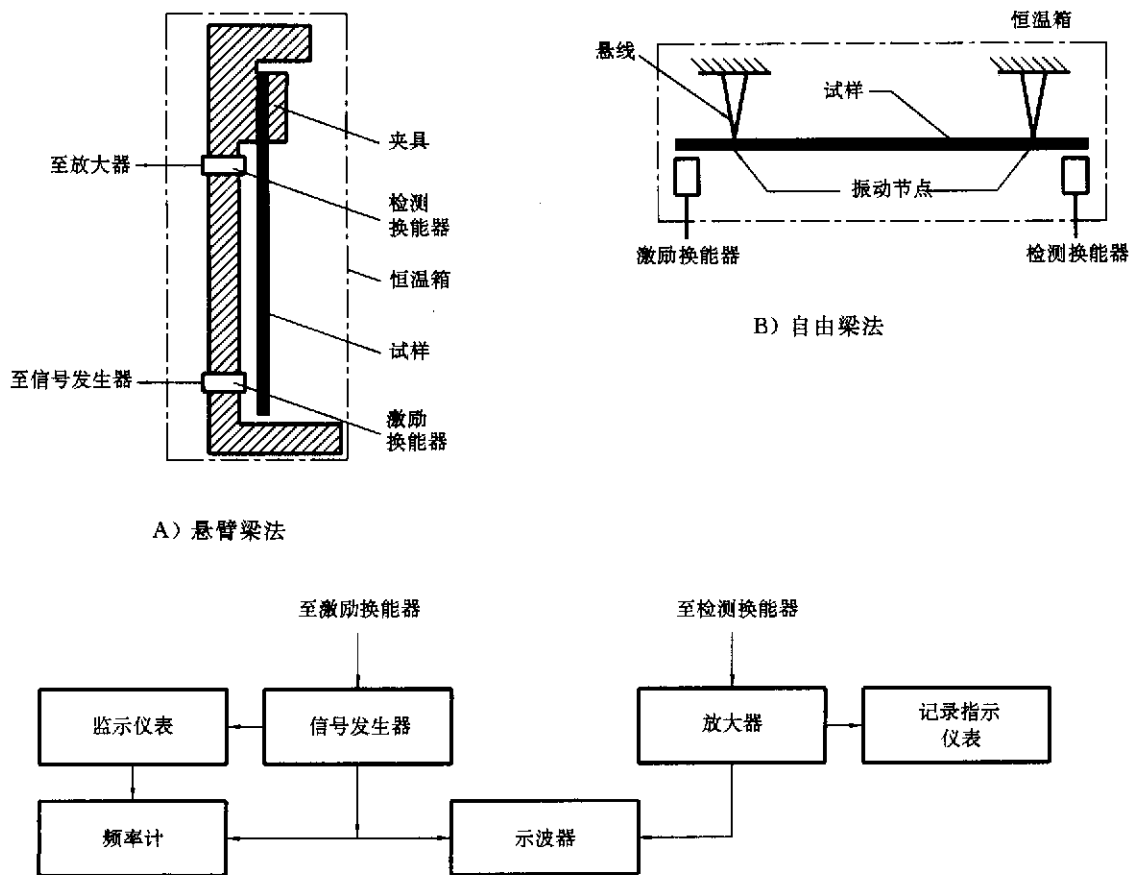


图 1 测量原理图

本标准规定,共振峰宽度是指在共振频率两边,振幅为共振振幅的 0.707 倍(即下降 3 dB)处的频率差。由于能量与振幅的平方成正比,所以共振峰宽度也常称为半功率带宽或 -3 dB 带宽。

注:试样在本标准规定的两种试验方法中,均处于受迫振动状态,其位移、速度和加速度响应具有不同的共振频率,其中速度共振频率与试样的固有频率重合,位移和加速度共振频率均偏离固有频率,试样阻尼越大,差别越大。虽然在  $\tan \delta_i < 0.1$  的情况下,这种差别可以忽略不计,也能用测量位移响应的方法来进行试验,然而,在高阻尼时,位移共振曲线的共振峰宽度与损耗因数之间的关系变得相当复杂,因此,本标准推荐使用非接触式速度型换能器的试验装置。

## 5 试验装置

### 5.1 量具

5.1.1 游标卡尺:用于测量试样长度,最小分度应不大于 0.05 mm。

5.1.2 螺旋测微器:用于测量试样的宽度和厚度,最小分度应不大于 0.002 mm。

5.1.3 天平:感量应不大于 0.001 g。

5.1.4 温度计:分辨率应达到 0.1℃。

### 5.2 测量支架

悬臂梁或自由梁测量支架应注意避免外界机械振动干扰并符合下述要求。

5.2.1 测量装置的固有频率应远离测试频率范围。测量支架应有重的基座。

5.2.2 悬臂梁测量支架的夹具应有足够的夹持力,防止产生附加的摩擦阻尼(见附录 A)。

5.2.3 自由梁测量支架的悬线应柔细,长度不宜短于 30 cm,推荐悬线使用丝线或棉线。

### 5.3 机电换能器

激励换能器应采用电磁型换能器。检测换能器推荐采用非接触式速度型换能器(例如电磁换能器)。在  $\tan\delta_i < 0.1$  的情况下,也可使用位移型换能器(例如电容型换能器)检测。在每一阶共振模式测试频率范围内,换能器的灵敏度起伏应不大于 0.05 dB。

### 5.4 测量仪器

在测试频率范围内,测量仪器应符合下述要求。

5.4.1 信号发生器的频率稳定度应不低于  $1 \times 10^{-4}/h$ ,输出功率应保证检测时,共振频率上信噪比大于 30 dB,输出幅度稳定度应不低于  $1 \times 10^{-3}/h$ 。

5.4.2 频率计的时基稳定度应不低于  $\pm 2 \times 10^{-7}/d$ ,分辨力等于或优于 0.1 Hz。

5.4.3 放大器频率响应起伏应小于 0.1 dB。

5.4.4 指示仪表和记录仪的非线性应不大于 1%。

5.4.5 本标准推荐使用数字存储示波器,可以兼顾作为显示和记录仪器。

5.4.6 恒温箱内沿试样长度方向的温度不均匀性应不超过  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,在每次测量过程中,温度应保持恒定,其变化不超过  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。恒温箱内气体可为空气或惰性气体。变温测量时,升温速率应平稳可控。升温速率不大于  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

5.4.7 在检测系统中,如选用滤波器,在测量共振曲线时,应采用跟踪滤波器,滤波器增益变化应不大于 0.1 dB。在用衰减法测量时,不宜使用三分之一倍频程或倍频程滤波器,推荐使用高通低通组合滤波器,通带宽度应远大于试样共振曲线的带宽。

## 6 试样

### 6.1 试样制备

6.1.1 试样的物理特性应该均匀,可参照 GB 9870 中 7.1 和 8.1 的要求进行。如该材料另有标准规定,可按相应标准的要求制样。

6.1.2 复合试样应是厚度方向上的复合,通常由金属层和阻尼层构成的复合试样,建议做成不同厚度比进行试验。在使用粘合剂时,粘合剂固化后的模量应高于阻尼材料的模量,粘合层厚度应不大于 0.05 mm。

6.1.3 在对比试验不同材料,评价其阻尼效果时,应优先采用阻尼材料(包括自由阻尼、约束阻尼)和金属底层的质量比为 1:5 的复合方式。在不计重量因素时,可以用厚度比为 2:1 的复合形式,制样工艺应按该产品实际应用时的技术要求进行。

6.1.4 对于非磁性试样,可在试样两端各粘一片铁磁性薄片,其附加质量应小于试样质量的 1%,为了避免引入附加劲度,粘贴位置与端点的距离应不超过试样长度的 2%。

## 6.2 试样尺寸

6.2.1 试样的长度与需要测量的频率高低有关,试样的厚度要选择适当,以保证挺直,具有一定的弯曲劲度为宜。一般情况下,试样的长度与厚度的比应不小于 50,试样的宽度应小于半波长。试样尺寸在实验室温度下测量,不考虑热胀冷缩的影响。根据以上原则,试样尺寸可在以下范围选择:

长度:150 mm~300 mm

宽度:10 mm~20 mm

厚度:1 mm~3 mm

对于均匀性好的材料,为了统一比较,推荐试样尺寸为

——悬臂梁试样自由长度 180 mm,宽度 10 mm;

——自由梁试样长度 150 mm,宽度 10 mm。

6.2.2 用复合试样方式测量时,金属基板可选用钢板或铝板,推荐使用 1 mm 厚的冷轧钢板条。悬臂梁方式的复合试样,应该保留 20 mm 到 25 mm 的根部没有待测材料,以便夹紧。也可加工成加厚的金属根部,根部厚度应不小于复合层的厚度。

## 6.3 试样数量

仅在一个温度下测试时,材料和尺寸相同的试样应不少于 3 条,需要变温测量时,可抽取其中一条进行。

## 6.4 试样环境调节

试样的保存及试验前的温度、湿度调节可参照 GB 9870 中第 8 章的要求进行。

## 7 试验程序

### 7.1 测量材料密度

按照 GB 4472 的规定执行,密度测量准确度应不低于 0.5%。

### 7.2 测量试样横截面尺寸

试样的宽度与厚度的测量准确度应不低于 0.5%。在沿试样长度方向上测量试样厚度时,应测量五点求平均值,如任一测点的厚度超过平均值的  $\pm 3\%$ ,该试样不能用于准确测量储能模量值,但可用于测量损耗因数。

### 7.3 安装试样

#### 7.3.1 悬臂梁方式

用悬臂梁测量支架的夹具夹紧试样后,测量试样的自由长度,准确度应不低于 0.5%。

#### 7.3.2 自由梁方式

应按下列步骤进行:

a) 测量试样长度,准确度应不低于 0.2%。

b) 画节点位置标记线。可按下列公式计算各阶节点到试样末端的距离  $L_i$ :

$$L_i/l = 0.224 \quad (i = 1) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$L_i/l = 0.660/(2i + 1) \quad (i > 1) \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:  $l$ ——试样长度,mm;

$i$ ——共振阶数。

c) 悬挂试样,要注意在不同阶的共振方式上测试时,应水平悬挂在对应阶数的节点位置上。

### 7.4 换能器位置调节

调节换能器到试样的距离应足够远,使静态磁吸引力不影响测试结果。一般情况下,在测量一阶振动时,推荐距离大于 3 mm,测量高阶振动时,间距可减小到 1 mm。

### 7.5 温度调节

按试验目的要求调节恒温箱内的温度,一般情况下,应该从低到高按升温序列测量。推荐升温速率为 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 到 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,温度增量为 $10^{\circ}\text{C}$ 。在转变区域,温度增量可减小为 $2^{\circ}\text{C}$ 到 $5^{\circ}\text{C}$ 。在每个温度点上,应保温 $10\text{ min}$ 后才能测量。

## 7.6 测量和记录

调节信号发生器和测量放大器,测出试样共振频率和共振峰宽度位置。

设定信号发生器扫频范围,用记录仪记录共振曲线。测量记录共振曲线时,振幅测量准确度应不低于 $0.5\%$ ,共振频率测量准确度应不低于 $1\%$ ,共振峰宽度的测量分辨率至少应达到共振峰宽度的 $1\%$ 。

## 7.7 注意事项

7.7.1 在悬臂梁测试方式时,通常采用二至四阶振动方式进行测试。在自由梁测试方式时,通常采用前三阶振动方式进行测试。在用复合试样进行振动阻尼效果评价时,在试样结构相同的情况下,悬臂梁二阶振动方式和自由梁一阶振动方式的测试结果等效。

7.7.2 在测试过程中,如发现异常现象(例如共振曲线不对称),除检查节点位置及换能器安装位置是否合适外,可进一步进行非线性检验(见附录A)。

## 7.8 复合试样试验

7.8.1 用复合试样方式测量阻尼材料的复弯曲模量,应分两步进行:

a) 测量金属基板的共振频率和储能弯曲模量(因为金属梁的损耗因数约为 $0.001$ 或更低一些,计算时假设为零);

b) 制成复合试样后再测共振频率和共振峰宽度。

由二次测量的数据,按公式(7)~(23)即可计算出阻尼材料的复数弯曲模量。

7.8.2 为避免转动惯量和剪切形变的影响,复合试样的厚度比应不大于 $4$ ,并满足下式要求:

$$(f_{ci}/f_{oi})^2(1+DT) \geq 1.1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:  $f_{ci}$ ——复合试样第 $i$ 阶共振频率,Hz;

$f_{oi}$ ——金属基板第 $i$ 阶共振频率,Hz;

$D$ ——阻尼材料密度和金属材料密度之比;

$T$ ——阻尼层厚度和金属层厚度之比。

这种方式适合于测量模量较高的阻尼材料,即在玻璃态和玻璃态至橡胶态的转变区中, $E_i > 100\text{ MPa}$ 的材料。

## 7.9 代替方式

对于阻尼很小的材料,共振峰宽度非常小,本标准允许改用衰减法测量。在试样共振时,断开激励信号,试样进入自由衰减振动状态,测量振动随时间衰减的波形,由对数减缩率 $\Delta$ 计算损耗因数 $\tan\delta_i$ 。

$$\Delta = \ln(X_q/X_{q+1}) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\tan\delta_i = \Delta/\pi \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中 $X_q$ 和 $X_{q+1}$ 是振动速度或振动位移在同一方向上相邻的二个振幅值。为了提高测量准确度,可测量第 $q$ 次振幅和第 $q+k$ 次振幅,然后按下式计算:

$$\tan\delta_i = \frac{1}{\pi k} \ln(X_q/X_{q+k}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中振幅比 $X_q/X_{q+k}$ 取值不大于 $3$ 。

## 8 结果计算

### 8.1 均匀试样

均匀试样的弯曲模量和损耗因数由下列公式计算:

$$E_i = [4\pi(3\rho)^{1/2}l^2/h]^2(f_i/k_i^2) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\tan\delta_i = \Delta f_i / f_i \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$E_i^* = E_i' \tan\delta_i \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中:  $E_i'$ ——储能弯曲模量, Pa;

$E_i^*$ ——损耗弯曲模量, Pa;

$\tan\delta_i$ ——弯曲损耗因数;

$\rho$ ——试样材料密度, kg/m<sup>3</sup>;

$l$ ——在自由梁方式时为试样长度, 在悬臂梁方式时, 则为试样自由长度, m;

$h$ ——试样厚度, m;

$i$ ——共振阶数;

$f_i$ ——第  $i$  阶共振频率, Hz;

$\Delta f_i$ ——第  $i$  阶共振峰宽度, Hz;

$k_i^2$ ——第  $i$  阶共振时的数值计算因子, 由下列各式确定:

对悬臂梁方式:

$$k_i^2 = 3.52 \quad (i = 1) \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$k_i^2 = 22.0 \quad (i = 2) \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$k_i^2 = (i - 0.5)^2 \pi^2 \quad (i > 2) \quad \dots\dots\dots(12)$$

对自由梁方式:

$$k_i^2 = 22.4 \quad (i = 1) \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$k_i^2 = 61.7 \quad (i = 2) \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$k_i^2 = (i + 0.5)^2 \pi^2 \quad (i > 2) \quad \dots\dots\dots(15)$$

## 8.2 复合试样

将阻尼材料粘贴在金属板的一面, 是工程上常用的自由阻尼结构形式, 复合试样的损耗因数和阻尼材料的复弯曲模量由下列公式计算:

$$\eta_c = \frac{\Delta f_{ci}}{f_{ci}} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$E_i' = E_{i0}' \frac{(u - v) + \sqrt{(u - v)^2 - 4T^2(1 - u)}}{2T^3} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\tan\delta_i = \eta_c \frac{1 + MT}{MT} \times \frac{1 + 4MT + 6MT^2 + 4MT^3 + M^2T^4}{3 + 6T + 4T^2 + 2MT^3 + M^2T^4} \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$u = (1 + DT)(f_{ci}/f_i)^2 \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$v = 4 + 6T + 4T^2 \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$M = E_i'/E_{i0}' \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$D = \rho/\rho_0 \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$T = h/h_0 \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中,  $\eta_c$ ——复合试样损耗因数;

$f_{ci}$ ——复合试样第  $i$  阶共振频率, Hz;

$f_i$ ——金属基板第  $i$  阶共振频率, Hz;

$\Delta f_{ci}$ ——复合试样第  $i$  阶共振峰宽度, Hz;

$E'_i$ ——阻尼材料的储能弯曲模量, Pa;

$E'_{i0}$ ——金属基板的储能弯曲模量, Pa;

$\tan\delta_i$ ——阻尼材料的损耗因数;

$D$ ——密度比;

$T$ ——厚度比;

$\rho$ ——阻尼材料的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_0$ ——金属材料的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$h$ ——阻尼层厚度, m;

$h_0$ ——金属板厚度, m。

## 9 绘图

绘制复合试样损耗因数或材料复弯曲模量随温度变化的曲线图可以有两种形式:

a) 固定共振方式的变温曲线图, 由于共振频率、复合试样损耗因数或复弯曲模量均随温度变化, 绘图时应列出数据表或在图上标出;

b) 固定频率的变温曲线图, 这种形式的图应进行不同共振阶数的变温测试, 然后用插值的方法绘图。绘制方法可参照 ISO 10112。

## 10 测量不确定度

### 10.1 均匀试样

#### 10.1.1 储能弯曲模量

按本标准规定的要求进行试验, 在不大于四阶振动模式的范围内, 储能模量的测量不确定度不大于 5%, 在四阶以上共振方式测试时, 如不考虑剪切变形的影响, 误差将会加大。对于分层均匀的试样,  $E'_i$  则代表多层系统的等效模量。

#### 10.1.2 损耗因数

损耗因数的测量不确定度, 与损耗因数本身数值大小和测量记录系统的频率稳定性和分辨率密切相关。在损耗较小时, 对分辨率的要求比测储能弯曲模量时要高得多。损耗因数的测量不确定度  $u(\delta)$  和频率测量不确定度  $u(f)$  的关系为:

$$u(\delta) = \sqrt{2} u(f) / \tan\delta_i \quad \dots\dots\dots (24)$$

例如, 在  $u(f) = 0.1\%$  情况下, 当  $\tan\delta_i = 0.1$  时, 损耗因数的测量不确定度为 1.4%; 而当  $\tan\delta_i = 0.01$  时, 则损耗因数的测量不确定度增大为 14%。

### 10.2 复合试样

在用复合试样测量阻尼材料复数弯曲模量时, 复合试样的损耗因数测量不确定度不大于 5%, 阻尼材料的储能弯曲模量测量不确定度不大于 20%, 阻尼材料的损耗因数测量不确定度不大于 25%。



## 11 试验报告

试验报告应包括下列内容:

- a) 材料名称;
- b) 生产单位、制样单位及送检单位;
- c) 本标准号码及测试方法种类;
- d) 试样编号、试样尺寸、制备工艺、阻尼结构型式及存放条件;
- e) 测试设备;
- f) 试验性质,分为三种:

——型式试验(定型或鉴定)

——常规试验

——抽样试验

- g) 测试结果;

h) 说明是否按本标准要求的条件进行试验,对高阻尼试样的数据处理方法,是否进行了非线性检验,采用了何种类型修正公式处理数据等(见附录 A,附录 B);

- i) 测试人员、测试日期。

## 附录 A

### (提示的附录)

#### 偏离线性粘弹态行为的检验

图 A1 以单对数图的形式给出了振幅  $X$  随时间自由衰减的曲线。曲线 1 为典型的线性粘弹态, 由于振幅随时间按指数形式衰减, 所以在单对数图上为一条直线; 曲线 2 为非线性粘弹态, 振幅随时间按高阶指数规律衰减, 所以在图上表现出曲线的起始部分弯曲; 曲线 3 为摩擦阻尼状态, 振幅随时间按线性关系衰减, 所以在图上表现为曲率与上述相反的曲线。夹具和试样间的松动、悬线不在试样振动节点位置上、振动着的试样和空气介质的摩擦, 均会产生这种形式的附加阻尼。在试样的阻尼非常小时, 摩擦阻尼的影响就明显增大。

由于在本标准涉及的范围内, 试样受迫振动, 仅产生极微弱的非简谐形变, 如果观察振动波形, 则难以看出来, 只能用振动自由衰减法来检验。

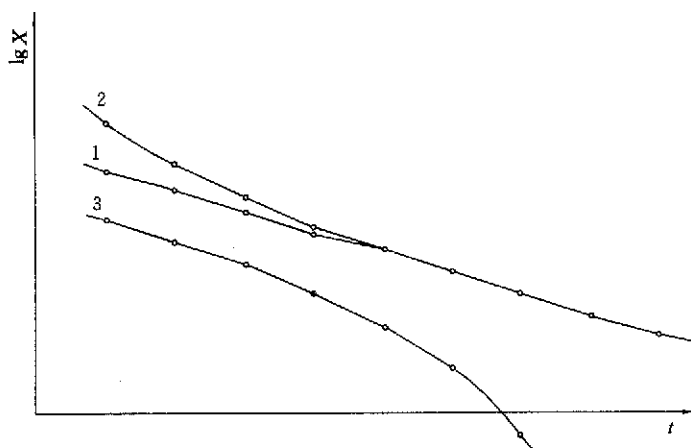


图 A1 振幅随时间自由衰减的曲线

## 附录 B

### (提示的附录)

#### 大阻尼数据处理方法

共振曲线法测试原理是建立在线性小阻尼的理论基础上的。当  $\tan \delta_i > 0.1$  时, 损耗因数高阶项的影响不能忽略。可用下列修正公式计算损耗因数:

$$\tan \delta_i = \frac{\Delta f_i}{f_i} \left( 1 - \frac{11}{32} \frac{\Delta f_i}{f_i} \right) \quad \text{..... (B1)}$$

在测量共振曲线时, 只有当共振峰的相对高度不小于 10 dB 时 (即在共振曲线上, 共振峰处振幅值比远离共振频率处的振幅值高 10 dB 以上), 测量结果才可靠。在阻尼大的情况下, 共振峰相对高度可能小于 10 dB, 有时甚至小于 3 dB, 共振曲线还会出现左右不对称的现象, 此时, 应首先注意消除干扰, 如有可能, 最好降低厚度比, 重新制作试样, 进行测试。如不能另做试样, 可用下列公式计算:

- a) 共振峰宽度  $\Delta f_i$  取为共振振幅下降 2 dB 时的频率宽度, 则损耗因数为:

$$\tan \delta_i = 1.308 \Delta f_i / f_i \quad \text{..... (B2)}$$

- b) 共振峰宽度  $\Delta f_i$  取为共振振幅下降 1 dB 时的频率宽度, 则损耗因数为:

$$\tan \delta_i = 1.965 \Delta f_i / f_i \quad \text{..... (B3)}$$

c) 共振曲线不对称时,取共振峰半宽度窄的一边下降 3 dB 时的频率宽度进行计算,则损耗因数为:

$$\tan\delta_i = \frac{2\Delta f_i}{f_i} \dots\dots\dots (B4)$$

应用上述一种或几种近似公式处理数据时,应在试验报告中说明。

---