



# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

## 机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能 的表征 第3部分：悬臂剪切梁法

Mechanical vibration and shock -- Characterization of dynamic mechanical properties  
of visco-elastic materials --

Part 3: Cantilever shear beam method

(ISO 18437-3:2005, IDT)

(征求意见稿)

(本稿完成时间：2020年05月20日)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 ..... II

引言 ..... III

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 2

4 测试设备 ..... 3

    4.1 电动激振器 ..... 3

    4.2 加速度计 ..... 3

    4.3 位移传感器 ..... 4

    4.4 夹持系统 ..... 4

    4.5 环境箱 ..... 5

    4.6 计算机 ..... 5

5 操作步骤 ..... 5

    5.1 试样准备和安装 ..... 5

    5.2 试样调理 ..... 5

    5.3 悬臂剪切梁理论分析 ..... 6

    5.4 标定和测量 ..... 7

    5.5 试样数量 ..... 7

    5.6 温度循环 ..... 7

6 结果分析 ..... 7

    6.1 时温叠加 ..... 7

    6.2 数据表示 ..... 9

    6.3 测试报告 ..... 9

附 录 A （资料性附录） 回弹性材料的线性特性 ..... 10

附 录 B （资料性附录） 时温叠加 ..... 11

参考文献 ..... 13

## 前 言

GB/T XXXXX 《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学特性的表征》分为6个部分：

- 第1部分：原理和指南；
- 第2部分：共振法；
- 第3部分：悬臂剪切梁法；
- 第4部分：动刚度法；
- 第5部分：基于测量和有限元分析比较的泊松比；
- 第6部分：时温叠加。

本部分为GB/T XXXXX 的第3部分。

本部分按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用国际标准ISO 18437-3:2005《机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能的表征 第3部分：悬臂剪切梁法》(英文版)，在技术内容上与国际标准完全相同。

为便于使用，本部分做了下列编辑性修改：

- “ISO 18437 的本部分”改为“本部分”；
- 删除了国际标准的前言，增加了国家标准的前言；
- 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”；
- 把标准中涉及到的ISO标准改为相应的国家标准；
- 纳入了ISO 18437-3:2005 /Amd 1:2010的修正内容，这些修正内容涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直双线(II)进行了标示。
- 纳入了ISO 18437-6:2017的相关内容。

本部分的附录A和附录B为资料性附录。

本部分由全国机械振动、冲击与状态监测标准化技术委员会(SAC/TC53)提出并归口。

本部分起草单位：上海材料研究所，上海市质量监督检验技术研究院，上海交通大学等。

本部分主要起草人：XXX

## 引 言

黏弹性材料可实现能量耗散（阻尼）或组件隔振，因而被广泛应用于降低结构系统的振动幅值，还可通过改变声能量的反射、透射和吸收而被应用于声学领域。为达到最优工作状态，结构系统通常需要材料具有特定的动态力学性能参数。黏弹性材料的能量耗散系基于分子之间的摩擦作用，可通过测量应力与应变之间的迟滞特性来衡量。大多数材料的黏弹性能（模量和损耗因子）依赖于频率、温度、应变幅值。为某一给定的设计应用选择特定的材料，是决定系统工作性能的关键所在。本部分的目的是给出采用端部固定避免常见夹持误差的悬臂剪切梁法的操作原理、测量设备、测量及数据分析等内容；另一个目的为该方法的使用用户提供统一的规定。本部分适用于小应变幅值范围的线性力学行为。

# 机械振动与冲击 黏弹性材料动态力学性能表征

## 第3部分：悬臂剪切梁法

### 1 范围

本部分定义了一种悬臂剪切梁法，用于实验室测量隔振器及弹性材料的动态力学性能。通过端部固定防止试样梁端转动，以避免试样固定不良导致的常见夹持误差。本部分适用于从零点几Hz至20kHz频率范围的冲击和振动系统。

本部分适用于隔振器设计中常见的回弹性材料，以减少：

- a) 设备、结构或车辆的有害振动传递，及辐射噪声（流体辐射声、空气噪声、结构辐射声等）；
- b) 低频振动传递对人体的作用，或低频剧烈振动传递导致的结构、敏感设备损坏。

本部分及 GB/T XXXXX 的第3至第6部分详细说明了测量方法和数据采集分析方法，可用于：

- 高效隔振器的设计；
- 为设计选取最优回弹性材料；
- 隔振器振动传递率的理论计算；
- 产品研发过程中所需信息；
- 生产厂商和供应商提供的产品信息；
- 产品质量控制。

该测量方法的有效性条件是隔振器的振动特性为线性行为。该条件也包括虽然随静态载荷变化表现为非线性特征，但在特定的静态载荷条件下其动态特性表现为近似线性的隔振元件。

该测量方法在四十赫兹（常见频率范围是0.3Hz至30Hz）以内的不同测试温度下进行。利用时温叠加原理，可将所测得的多条数据曲线平移生成一条动态力学性能曲线，该曲线与平移前在某一给定温度下测得的原始曲线相比，具有更宽的频率范围（在某一基准温度下，典型曲线的频率范围一般为 $10^{-3}$ Hz至 $10^9$ Hz）。

注：就本部分而言，术语“动态力学性能”系指基本弹性特性，比如随温度和频率变化的复数杨氏模量，如适用，还包括随静态预载荷的变化特性。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2035-2008 塑料 术语及其定义（GB/T 2035-2008, ISO 472:1999, IDT）

GB/T 2298-2010 机械振动、冲击与状态监测 词汇（GB/T 2298—2010, ISO 2041:2009, IDT）

GB/T 9870.1-2006 硫化橡胶或热塑性橡胶动态性能的测定 第1部分：通则（GB/T 9870.1-2006, ISO 4664-1:2005, IDT）

GB/T 33061.1-2016 塑料 动态力学性能的测定 第1部分：通则（GB/T 33061.1-2016, ISO 6721-1:2011, MOD）

GB/T 17809-1999 阻尼材料 复模量图示法（GB/T 17809-1999, ISO 10112:1991, IDT）

GB/T 22159.1-2012 声学 弹性元件振动 声传递特性实验室测量方法 第1部分：原理与指南  
(GB/T 22159.1—2012, ISO 10846-1:2008, IDT)

GB/T 2941-2006 橡胶-物理试验方法试样制备和调节通用程序 (GB/T 2941-2006, ISO 23529:2004, IDT)

### 3 术语和定义

GB/T 2035、GB/T 2298、GB/T 9870.1、GB/T 33061.1、GB/T 17809、GB/T 22159.1、GB/T 2941界定的以及下列术语和定义适用于本部分。

#### 3.1

**杨氏模量** Young's modulus

$E^*$

法向应力（拉伸或压缩）与法向应变或长度变化率的商数。

注1：单位为帕斯卡（Pa）。

注2：黏弹性材料的杨氏模量是一个复数，实部是  $E'$ ，虚部是  $E''$ 。

注3：物理上，杨氏模量的实部代表弹性储能能力，虚部是能量损失的度量，见 3.2。

#### 3.2

**损耗因子** loss factor

杨氏模量的虚部与实部之比（复数杨氏模量自变量的正切）。

注：当材料中发生能量损失时，应变与应力存在相位差  $\delta$ ，损耗因子等于  $\tan \delta$ 。

#### 3.3

**时温叠加** time-temperature superposition

依据时温叠加原理，黏弹性材料在某一参考温度下的模量（或损耗因子）主曲线可通过一系列不同温度下测得的模量（或损耗因子）曲线沿频率轴平移得到，即时间和温度具有等效性。

#### 3.4

**移位因子** shift factor

在某一温度下测得的模量（或损耗因子）曲线沿频率的对数（10为底）坐标轴向另一温度下测得的曲线平移并叠加时，平移量的量度。

#### 3.5

**玻璃化转变温度** glass transition temperature

$T_g$

黏弹性材料从玻璃态转变为橡胶态时的温度，对应于材料比容-温度曲线斜率的拐点。

注1：单位为摄氏度（℃）。

注2：玻璃化转变温度通常由比热-温度曲线的拐点确定，是黏弹性材料的固有属性。

注3:  $T_g$  不是黏弹性材料频域损耗因子的峰值, 该峰值通常出现在高于  $T_g$  的温度下, 且随着激励频率发生变化。因此, 损耗因子的峰值并非黏弹性材料的固有属性。

### 3.6

#### 回弹性材料 resilient material

旨在减少振动、冲击或噪声传递的黏弹性材料。

注1: 有时亦被称为弹性支承、隔振器、减振架、吸振器或解耦器。

注2: 可通过拉伸、压缩、扭转、剪切或上述组合变形来实现振动、冲击和噪声的衰减。

### 3.7

#### 线性 linearity

满足叠加原理的回弹性材料动态行为特性。

注1: 叠加原理可表述为: 当输入  $x_1(t)$  的输出为  $y_1(t)$ , 输入  $x_2(t)$  的输出为  $y_2(t)$  时, 叠加原理使输入  $\alpha x_1(t) + \beta x_2(t)$  的输出满足  $\alpha y_1(t) + \beta y_2(t)$ 。叠加原理对任意  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$  均成立, 其中  $\alpha$ 、 $\beta$  为任意常数。

注2: 采用上述方法进行系统线性特性的检验实际上是难以实现的。在一定输入量级范围内, 测量动态模量的方法仅是一种有限的线性特性检验方法。对一给定的预载荷, 如果动态模量基本不变, 则可认为该系统是线性的。该方法实际检验的是系统响应与激励之间的比例关系。

## 4 测试设备 (见图 1)

### 4.1 电动激振器

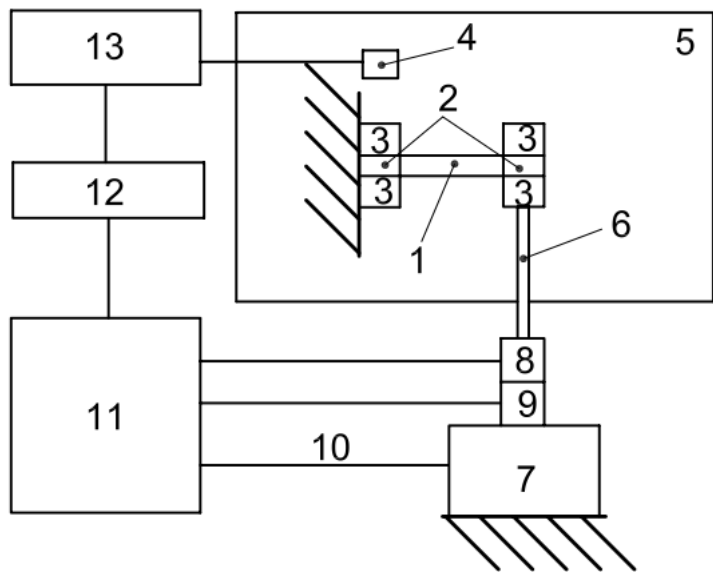
激振器以特定频率向悬臂梁试样一端施加正弦波交变振荡激励, 使试样产生剪切应变。在该测量方法中, 电动激振器需满足以下技术参数要求:

- 频率范围: 0.3Hz ~ 30Hz;
- 额定力: > 10N;
- 振幅:  $\approx 100\mu\text{m}$ 。

### 4.2 载荷测量

通常, 载荷值是通过测量驱动电动激振器所需电流的幅值和相位值得到的。该载荷值需要通过已知质量进行校准。具体的技术参数要求:

- 频率范围: 0.3Hz ~ 30Hz;
- 不确定度: < 0.5%。



- 1——悬臂梁试样；
- 2——试样端部固定块；
- 3——试样夹具；
- 4——温度传感器；
- 5——环境箱；
- 6——驱动杆；
- 7——电动激振器；
- 8——力传感器；
- 9——位移传感器；
- 10——驱动力输入；
- 11——载荷、位移和驱动装置控制器；
- 12——计算机；
- 13——温控装置。

注：驱动杆两端分别与试样夹具和激振器刚性连接，确保试样发生剪切变形。

图1 测试装置的原理图

4.3 位移传感器

为了消除惯性效应，采用满足下列技术参数要求的非接触式传感器（通常为经校准的涡流传感器或光学编码器）对试样复数位移、振幅和相位值进行测量：

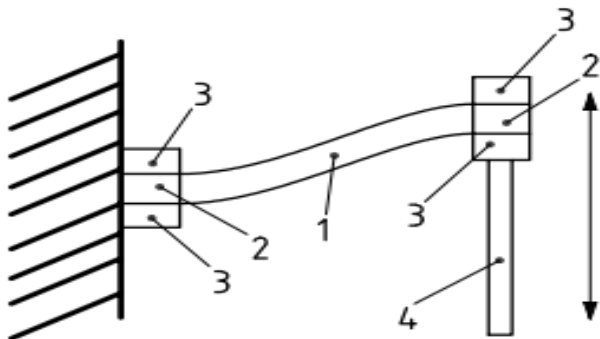
- 频率范围：0.3Hz ～ 30Hz；
- 不确定度：< 0.5%。

4.4 夹持系统

首先将试样的一端粘接在固定块上，并通过夹具刚性夹紧在固定结构上（详见5.1）。试样另外一端（驱动端）同理粘接在一固定块上并用夹具夹紧，电动激振器通过刚性驱动杆对这一端施加激励。驱动杆和夹持装置的刚性应达到试样抗弯刚度的几十倍到数百倍，以确保试验测得的位移来自于试样本身的变形。该夹持系统可确保试样运动仅限于悬臂剪切梁模式。图2给出了预期的变形模式。



虽然过去一般不使用固定块，目前科学实践认为其使用是必要的<sup>[1]</sup>，以便获得可重复且可靠的测量结果。



- 1——悬臂梁试样；
- 2——试样端部固定块；
- 3——试样夹具；
- 4——驱动杆。

图2 试样变形示意图

4.5 环境箱

环境箱用于将试样冷却至低于室温的温度。保持该温度直至试样达到温度均匀状态，然后以5℃的温度增量递增。环境箱应可在-60℃至70℃的温度范围内工作，可控温距在0.5℃以内。温度传感器应合理校准。

- 注1：所需温度范围应满足玻璃化转变温度高于-45℃的黏弹性材料的测试要求。玻璃化转变温度较低的材料应采用更低的起始温度。
- 注2：对湿度较敏感的材料，宜对环境室内的湿度进行控制或记录。

4.6 计算机

计算机用于自动校准、数据采集和处理。

5 操作步骤

5.1 试样准备和安装

5.1.1 一般原则

首先根据所需厚度制作模压板或浇铸板，再用小带锯或剃刀将试样从板上切割得到。根据经验，当试样较厚时，通常会影响测试材料的力学性能。试样应沿各轴均匀分布，两端应为正方形，使试样稳固粘接在两端的固定块上。试样的尺寸取决于具体的测试设备和试样刚度。典型的试样尺寸为15mm×10mm×3mm。

在将样品粘接至固定块之前需测定试样的三个特征值，用于后续分析。根据GB/T 2941，试样长度、宽度和厚度（单位为米）取四位有效数字。上述尺寸均应沿不同轴量取三个位置，取平均值。

5.1.2 试样固定块

试验中，将试样端部粘接在钢制或铝制固定块上，便于夹紧试样。固定块的实际尺寸因夹持装置的尺寸而异，但对于5.1.1中所述试样的典型固定块尺寸宜为20mm×15mm×5mm。

### 5.1.3 试样准备

使用刚性粘合剂将试样粘接在固定块上。粘合剂的弹性模量应大于试样的弹性模量，并能够在所有测试温度下保持稳定。环氧树脂、聚氨酯和氰基丙烯酸酯等均可作为粘合剂使用。在粘接之前，应使用工业酒精或其他脱脂剂清洁固定块以提高粘接强度。粘合剂固化后，应小心清除掉多余的粘合剂，注意避免切割到试样或破坏固定块与试样的粘接面。

### 5.1.4 试样安装

试样应如图1所示安装在夹持装置中。对夹持装置而言，仅需保证其具有足够的刚性，以使试样在试验过程中产生预期的变形，此外无其他具体要求。试样在安装过程中，需保证夹具仅与固定块发生接触。夹具应充分拧紧以消除其与固定块之间的相互滑动。

## 5.2 试样调理

### 5.2.1 存放

试样成型或硫化、测试与预调理之间的时间间隔应符合GB/T 2941的规定。

### 5.2.2 温度

试样应在每组测试之前进行温度调节。每一个测试温度下，试样需经过足够长时间的温度调节才能达到热平衡，这一点至关重要，但为了避免老化，特别是在较高测试温度下，温度调节时间不宜过长。温度调节时间取决于试样的尺寸和测试温度。GB/T 2941给出了指导性说明。

### 5.2.3 力学处理

当黏弹性材料只发生单一的微小应变时，力学处理可忽略，如自由振动情况。当发生大应变时，大多数回弹性材料的动态黏弹性能对应变幅度和温度历程具有较强的依赖性。对此类材料，为保证测量结果的一致性和可重现性，建议对试样进行力学预处理，预处理可消除测量前材料的不可逆结构。处理过程应在测试温度下进行，并使被测试样达到最大应变，一般不少于6个循环周期。为使可逆结构达到平衡状态，力学处理和正式测量之间的静置时间不少于12小时。

### 5.2.4 湿度调节

湿度会对诸多弹性材料的物理性能产生影响，尤其是聚氨酯材料。为确保测试能够在可重复的测试条件下进行，测试前试样应在湿度可控的环境下存放一周。湿度调节可通过将试样存放于相对湿度控制在50%至55%的密闭容器中实现，容器内温度控制在20℃至25℃。详见ISO 483<sup>[10]</sup>中的指导性说明。

## 5.3 悬臂剪切梁理论分析

悬臂剪切梁法测试设备（图2）的工作原理是，确定试样产生可测位移所需的载荷大小。由于位移幅值取决于试样的模量，因此该值可通过以下载荷与位移关系式求解获得：

$$F \sin(\omega \cdot t) = M \frac{d^2 x}{dt^2} + \left( \gamma + \frac{S''}{\omega} + \frac{\kappa E''}{\omega} \right) \frac{dx}{dt} + (S' + \kappa E') x \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$F$  是施加在试样上的力幅值 (  $N$  );

$x(t)$  是驱动杆的轴向位移 (  $Pa$  );

$\omega = 2\pi f$  是角频率 (  $rad/s$  );

$M$  是振动系统的质量 (  $kg$  );

$E'$  和  $E''$  是试样复数杨氏模量的实部和虚部 (  $Pa$  );

$S'$  和  $S''$  是经标定的系统刚度实部和虚部 (  $Pa$  );

$\gamma$  是经标定的系统粘滞阻尼系数, 主要来自于空气阻力;

$\kappa = w(t/l)^3/[1 + 2(1 + \sigma)(t/l)^2]$  是试样的几何因子 (  $m$  )

式中:

$w$  是试样宽度 (  $m$  );

$t$  是试样厚度 (  $m$  );

$l$  是试样长度 (  $m$  );

$\sigma$  是试样的泊松比 (对弹性体而言, 一般为0.45至0.49)。

将复数杨氏模量定义为

$$E^* = E' + iE'' = E'(1 + i\eta) \dots\dots\dots (2)$$

解方程 (1) 可得弹性模量  $E'$  和损耗模量  $E''$

$$\kappa E' = K \cos \beta + M\omega^2 - S' \dots\dots\dots (3)$$

$$\kappa E'' = K \sin \beta - S'' - w\gamma \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$\beta$  是应力和应变的相位滞后角, 是由材料本身和设备组件共同引起的;

$K = F/x$  是通过力幅值和轴向位移幅值计算得到的试样有效刚度;

$\eta = E''/E'$  是试样的损耗因子。

注1: 损耗因子  $\eta$  有时也写作  $\tan \delta$ 。

注2: 当试样厚度和长度之比  $t/l$  较小时, 由泊松比引起的几何因子  $k$  误差较小。

#### 5.4 标定和测量

测量过程的第一步是在不安装试样的情况下测量**激振器悬浮支架**的复数刚度和粘滞阻尼系数, 即  $E' = E'' = 0$ 。测量分别在有和没有固定块 (固定块作为一附加质量)、低频和高频 (一般采用1Hz和30Hz) 激励下进行。对四种工况进行测量, 通过方程 (1) 确定系统刚度的实部和虚部以及粘滞阻尼系数。测量应在每种工况下重复进行十次, 然后取平均值。该平均值用于装置标定。试验期间对系统的复数刚度和粘滞阻尼系数应每日进行标定。

每次测量前, 应使用天平称量振动系统的质量 (以 $kg$ 为单位), 保留四位有效数字。

装置标定后, 按照5.1节中的相关规定安装试样并进行测量。对试样施加载荷使其发生特定的形变或位移, 一般为64  $\mu m$ 。以不同的激励频率 (通常为0.3Hz、1Hz、3Hz、10Hz和30Hz)、不同的测试温度下, 重复上述测试步骤。应用试样的几何因子  $\kappa$ , 根据公式 (1) 确定不同频率和测试温度下的材料复数杨氏模量。

每个数据子集应包含单一测试温度下的多个激励频率**覆盖两个对数分度**的测试结果。一种弹性材料动态力学性能的完整表征, 需要包含覆盖材料由橡胶态向玻璃态转变的温度范围的不同测试温度下的多个测试数据子集。

注: 系统刚度和上述给出的激励频率因试样尺寸和被测材料的弹性模量量级而异。建议杨氏模量范围: 0.1  $Pa$  至3  $GPa$ ; 系统刚度范围: 90  $N/m$  至15  $MN/m$ ; 频率范围: 0.3  $Hz$  至30  $Hz$ 。

## 5.5 试样数量

为了获得材料的一致性特征，建议至少测量三个试样。

## 5.6 温度循环

使用以下热循环，在-60℃至70℃的温度范围内进行测量：

- 将安装在试验装置上的试样冷却至-60℃；
- 达到平衡状态以后，将试样保持在此温度下（温度波动在±0.1℃范围内）至少 15 分钟，方可进行测量；
- 每完成一组测试，升高温度一次，每次不大于 5℃；
- 每达到一个新的测试温度，应至少保持 6min（温度波动在±0.1℃范围内）再进行测量。

## 6 结果分析

### 6.1 时温叠加

模量和损耗因子数据的折算频谱图绘制方法如下：

- a) 绘制每个测试温度下复数模量的实部频谱图，以频率的对数坐标（10 为底）为横坐标。
- b) 选择  $T_0$  作为参考温度， $T_0$  选取模量实部-频率曲线斜率最大时的温度。
- c) 保持  $T_0$  温度下曲线不动，将其他温度下的模量实部曲线依次沿对数频率坐标轴平移，直到每条曲线的端部与目标曲线重叠。不同温度下曲线的重叠部分采用最小二乘法获得最佳重叠状态。每个温度的曲线平移量称为移位因子  $a_T$ 。

注1：首先平移模量实部曲线，而非损耗因子，因为模量的测量值相对更准确，而且离散性也比损耗因子更小。

- d) 平移损耗因子曲线时，采用与模量实部曲线相同的移位因子。

注2：满足上述时温叠加原理的材料称为热流变简单材料。而由于多态转变或结晶等原因导致不满足时温叠加原理的材料称为热流变复杂材料。

- e) 复数模量实部和损耗因子通过沿对数频率坐标平移，生成参考温度  $T_0$  下的曲线称为主曲线，该条曲线与试验测得的曲线相比频率范围被有效扩展。

注3：对于典型的黏弹性材料，平移频率范围约为  $10^{-3}$  Hz 至  $10^9$  Hz。

- f) 绘制自然对数下的移位因子  $a_T$  与温度的函数关系曲线。利用 Williams、Landel 和 Ferry (WLF) 方程<sup>[3]</sup>拟合上述曲线：

$$\ln a_T = \frac{-c_{10}(T - T_0)}{c_{20} + T - T_0} \dots\dots\dots (5)$$

式中， $c_{10}$ 和 $c_{20}$ 是已知聚合物的性能常数， $T_0$ 的下标是指参考温度，在该温度下求解方程。

- g) 参考温度  $T_0$  下的主曲线可按如下方法变换得到其他参考温度  $T_{ref}$  下的主曲线。利用温度  $T_{ref}$  下的评估方程（5），确定从  $T_0$  到  $T_{ref}$  温度变化对应的频率对数变化值。从参考温度  $T_0$  每个数据点的对数频率值中减去该对数变化值，得到新频率范围的曲线即为参考温度  $T_{ref}$  下的主曲线。

注4：其他参考温度的取值，不得低于玻璃化转变温度  $T_g$ ，且不得高于  $T_g+100$ ℃。其他参考温度的上限取值因材料而异。之所以对其他参考温度有限制要求，是因为 WLF 方程仅在玻璃化转变区间适用。

### 6.2 数据表示

采用本部分的测试方法获得的数据应以三种曲线图的形式表达：

- a) 10 为底双对数坐标系下的损耗因子-模量实部曲线；

- b) 移位因子-温度曲线;
- c) 在指定参考温度  $T_{ref}$  下, 10 为底双对数坐标系下的频率-模量实部主曲线和频率-损耗因子主曲线。室温可选做参考温度。

注: 对数坐标下的损耗因子-模量实部曲线图包括温度和频率以外的全部数据信息。该图用于表示数据的一致性。

曲线以外的点为异常值, 可忽略。该曲线表现为倒U形, 因此该曲线图有时也被称为倒U形图。

为便于对参考温度以外的不同测试温度下的测试数据进行统一描述和解释, 建议根据GB/T 17809 绘制出模量实部、虚部和损耗因子的主曲线, 形成诺模图。

### 6.3 测试报告

测试报告应包括以下信息:

- a) 本部分的引用;
- b) 详细介绍有关被测材料的所有必要信息, 包括型号、来源、生产商编号、形式和预处理历史等所有已知信息;
- c) 试样任意的不均匀特性方向 (如有);
- d) 测试日期;
- e) 试样的形状和尺寸;
- f) 试样的制备方法;
- g) 试样的调理细节;
- h) 试样数量;
- i) 包括湿度在内的测试环境细节;
- j) 测试装置的描述;
- k) 测试温度序列, 包括初始温度、最终温度、温度的线性变化率或温阶大小及持续时间;
- l) 测试结果表, 包括每个测试温度下试验获取的模量实部、虚部和损耗因子以及对应的频率数据;
- m) 根据第 6.2 节的规定, 绘制模量和损耗因子随频率和温度的变化曲线图。

附 录 A  
(资料性附录)  
回弹性材料的线性特性

一般而言, 振动-声隔离器的动态特性取决于静态预载荷、振幅、频率和温度。

线性假设意味着材料特性符合叠加原理, 且在给定频率下其动刚度与振幅无关。对于大多数隔振器而言, 因动态变形振幅小于静态预载荷作用下的静态变形幅值, 通常这个假设是近似成立的。但是值得注意的是, 线性假设是否成立取决于隔振器所用材料的力学属性, 应通过简单测试检验一定荷载范围内动刚度的变化特性。若动刚度基本不变, 则线性假设成立。

对于丁基橡胶(IIR), 文献<sup>[4]</sup>数据表明动态剪切模量的同相分量和相位角是应变幅值和炭黑含量的函数。当动态应变幅值小于约1.0mm/m时, 同相分量和相位角几乎不随振幅变化。然而, 当动态应变幅度大于约2.0mm/m时, 动刚度会随动态应变幅值的增加显著下降, 对炭黑填充量较大的橡胶材料尤其如此。

因此, 结合材料在实际工作状态下的动态应变振幅, 提前确定适合该类橡胶隔振元件的测试条件是十分重要的。当动态应变幅值小于1.0mm/m时, 线性假设(即动刚度实部和虚部均不随动态幅值变化)可视为成立。

液压悬架的应用日益广泛, 特别是在汽车工程领域。该类隔振器一般会表现出强非线性特性, 即动刚度强烈依赖于动态变形幅度。由于此类隔振器具有双重功用(对路面不平顺引起的引擎低频振动的衰减作用, 以及对引擎振动诱发的较高频率结构辐射噪声的隔离作用), 因此应在所关注的全频范围内选取适当的动态变形幅值进行测试<sup>[5-8]</sup>。

有时即使不满足线性假设, 仍然宜采用ISO 10846-1的相关条款。通常, 对于预载荷、信号幅值和测量量等, 应制定特殊的测试规则。

## 附录 B

### (规范性附录)

### 时温叠加

假设已由规定操作步骤较好地获得了一组有效的复数模量数据。要检查数据的一致性和离散性,应绘制所有频率和温度下的双对数损耗因子——模量关系曲线。该图通常被称为倒 U 型图。如果数据表现为热流变简单材料,且无离散特征,则数据可绘制出一条平滑曲线。由于在倒 U 型图中绘制的是平移前的数据点,因此该图中任何离散部分都不能归因于平移过程。

虽然数据曲线不必一定采用倒 U 型图的绘制方法,但该方法可用作试验数据离散性的定性验证。数据带宽以及各个数据点与中心点的偏离程度可表示离散性。但该方法不能用于揭示温度和频率变化时测量结果的准确性或系统误差。时温叠加原理是基于折算频率的概念给出的。

通常,黏弹性材料的复数杨氏模量是频率和温度的函数:

$$E^* = E^*(f, T) \dots\dots\dots (B.1)$$

对于热流变简单材料,自变量仅以频率和一个温度的函数乘积的形式出现,该温度函数称为松弛时间:

$$E^* = E^*[f\tau(T)] \dots\dots\dots (B.2)$$

从而频率的变化相当于温度的变化。移位因子可表示为温度  $T$  下的松弛时间与参考温度  $T_0$  下的松弛时间之比:

$$\alpha_T(T) = \tau(T)/\tau(T_0) \dots\dots\dots (B.3)$$

复数模量可表示为:

$$E^* = E^*[fa_T(T)\tau(T_0)] \dots\dots\dots (B.4)$$

折算频率定义为:

$$f_R = fa_T(T) \dots\dots\dots (B.5)$$

复数模量可以用两种相互等价的方式表示:

$$E^* = E^*[fa_T(T)\tau(T_0)] = E^*[f_R\tau(T_0)] \dots\dots\dots (B.6)$$

可见,在频率  $f$  和温度  $T$  下测量的模量值与在折算频率  $f_R$  和温度  $T$  下测得的模量值是等价的。折算频率可远大于实际测量频率的  $a_T$  倍,因此测量值作为温度的函数与测量值作为频率(远大于实际测量频率)的函数是等价的。

移位因子始终以函数形式呈现。移位因子函数的意义及其定义可用图形描述。双对数坐标系下,将试验获取的  $E'$  和频率绘制成一系列不同温度下(相同频率范围)的曲线。选择一条曲线温度作为参考温度。相邻更高等温线的曲线可以沿对数频率坐标轴平移,直到该曲线与参考温度曲线首尾重叠。依次对所有等温线(高于和低于参考温度)下的曲线进行平移。最终结果即为  $\log E'$  在宽频范围内的对数折算频率下的曲线,称为主曲线。通过曲线平移获得主曲线时,所需平移量是温度的函数,而该过程是通过平移不同温度下的试验曲线实现的,因此被称为移位因子函数。移位因子函数曲线可与 Williams-Landel-Ferry 方程<sup>[3,8]</sup>做比较分析。

读者若不熟悉如何通过时温叠加原理扩展测量频率范围，可参考文献ANSI S2.24<sup>[9]</sup>。该文献详细介绍了相关理论、平移方法、移位因子函数值、解析表达式以及图形形式表达的标准材料测试结果频率-温度诺模图等。



## 参 考 文 献

- [1]DLUBAC, J. J., LEE, G. F., DUFFY, J. V., DEIGAN, R. J. and LEE, J. D. Sound and Vibration Damping with Polymers. Edited by R. D. Corsatro and L. H. Sperling, ACS Symposium Series No. 424, 1990, pp. 49-62
- [2]ROARK, R. J. Formulas for Stress and Strain. 3rd ed. New York, McGraw-Hill 1954
- [3]FERRY, J. D. Visco-elastic Properties of Polymers. 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1980
- [4]FREAKLEY, P. K. and PAYNE, A. R. Theory and practice of engineering with rubber: Applied Science Publishers, London, 1978
- [5]HARTEL, V. and HOFMANN, M. Latest design for engine mountings. VDI-Berichte 499. Dusseldorf: VDI- Verlag, 1983 (in German)
- [6]FLOWER, W. C. Understanding hydraulic mounts for improved vehicle noise, vibration and ride qualities.  
SAE paper 8509075. Soc. Autom. Eng., Inc., Warrendale, PA 15096, May 1985 [7].... CREDE, C. E. Vibration and Shock Isolation. John Wiley & Sons, New York, 1951
- [8]Shock and Vibration Handbook. 5th edition. Edited by C. M. Harris and A. G. Piersol. McGraw Hill, 2002
- [9]ANSI S2.24-2001, American National Standard Graphical Presentation of the Complex Modulus of Visco- elastic Materials
- [10] ISO 483:1988, Plastics — Small enclosures for conditioning and testing using aqueous solutions to maintain relative humidity at constant value
- [11] ISO 18437-2:2005, Mechanical vibration and shock — Characterization of the dynamic mechanical properties of visco-elastic materials — Part 2: Resonance method