



中华人民共和国国家标准

GB/T 17809—1999
idt ISO 10112:1991

阻尼材料 复模量图示法

Damping materials—Graphical
presentation of the complex modulus



1999-08-11 发布



C200010334

2000-03-01 实施

国家质量技术监督局 发布

前 言

本标准等同采用国际标准 ISO 10112:1991《阻尼材料 复模量图示法》。

国际标准 ISO 10112:1991 原文本存在着若干技术性错误,这些错误在本标准中得到纠正,参见本标准文本中的脚注。原国际标准的唯一起草人 Lynn Rogers 博士完全同意本标准对这些错误所进行的改正。

本标准的附录 A 为提示的附录。

本标准由航天工业总公司提出。

本标准由全国机械振动与冲击标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:航天工业总公司七〇七所、航天工业总公司七〇三所、北京航空航天大学。

本标准主要起草人:潘坚、雷治大、过梅丽。



ISO 前言

ISO(国际标准化组织)是由各国标准化团体(ISO 成员)组成的世界性的联合会。制定国际标准的工作通常由 ISO 的技术委员会完成,各成员团体若对某技术委员会已确立的标准项目感兴趣,均有权参加该委员会的工作。与 ISO 保持联系的各国际组织(官方的或非官方的)也可参加有关工作。在电工技术标准化方面 ISO 与国际电工委员会(IEC)保持密切合作关系。

由技术委员会正式通过的国际标准草案提交各成员团体表决,国际标准需取得至少 75%参加表决的成员团体的同意才能正式通过并出版。

国际标准 ISO 10112 是由 ISO/TC 108 机械振动与冲击技术委员会制定的。本标准的附录 A 仅供参考。



引言

阻尼处理是一种降低结构系统振动量级的途径,它可将振动能转变为热能而耗散掉,这与振动能传递到系统的其他部位是有区别的。当阻尼源于材料内部的能量耗散,且大到具有工程应用价值时,该材料就称之为振动阻尼材料。这种能量耗散是由于分子间或晶格间的相互作用而引起的,并可用振动阻尼材料的应力-应变迟滞环来测量。其他类型的阻尼,如接头处的塑性变形、接头处的相对滑移、接头处的气泵效应、能量的声辐射和涡流损耗等等,不包括在本标准中。

大多数阻尼材料的(动态)力学性能取决于频率、温度和大应变下的应变幅值,由于本国际标准只限于线性行为,所以它不包括应变幅值的效应。

中华人民共和国国家标准

阻尼材料 复模量图示法

GB/T 17809—1999
idt ISO 10112:1991

Damping materials—Graphical
presentation of the complex modulus

1 范围

本标准规定了黏弹阻尼材料复模量的图形表示方法。该方法适用于宏观均质、线性和热流变性简单的黏弹阻尼材料。其复模量可以是切变模量、杨氏模量、体积模量，也可以是纵向波传播模量或拉梅模量。本图示法适用于大多数黏弹阻尼材料，而且具有足够的精度。

本标准同时给出了推荐术语，包括：参数、符号和定义。

本标准的主要目的是为了改善涉及黏弹阻尼材料的各种技术领域间的交流。

2 定义

2.1 复模量

具有线性、等温、各向同性、宏观均质、热流变性简单(见式 7)的黏弹材料在受到剪切变形时，由算子构成的应力应变本构方程定义为：

$$P(p_R)\tau(t) = Q(p_R)\gamma(t) \quad (1)$$

式中： $\tau(t)$ ——切应力；

$\gamma(t)$ ——切应变；

$P(p_R)$ 、 $Q(p_R)$ —— p_R 的多项式。

算子 p_R 定义为：

$$p_R = d/dt_R \quad (2)$$

折算时间微分 dt_R 定义为：

$$dt_R = dt/a_T(T) \quad (3)$$

式中： t ——时间，s；

T ——温度，K；

$a_T(T)$ ——温度平移函数，是温度 T 的函数，无量纲。

对式(1)进行傅利叶变换可推导出复切变模量 G 的定义。对于稳态正弦应力和正弦应变来说， G 可表示为：

$$G(j\omega_R) = \tau^*(j\omega_R)/\gamma^*(j\omega_R) = Q(j\omega_R)/P(j\omega_R) \quad (4)$$

式中 $\tau^*(j\omega_R)$ 代表 $\tau(t)$ 的傅利叶变换。折算角频率 ω_R 定义为角频率 ω 与温度平移函数的乘积：

$$\omega_R = \omega a_T(T) = 2\pi f_R = 2\pi f a_T(T) \quad (5)$$

式中： ω_R ——折算角频率，rad/s；

ω ——角频率，rad/s；

f_R ——折算频率，Hz；

f ——频率，Hz。

国家质量技术监督局 1999-08-11 批准

2000-03-01 实施

复切变模量为频率和温度的函数：

$$G = G(\omega, T) \quad \dots\dots\dots (6)$$

当且仅当上述关系可表达为：

$$G = G(j\omega_R) = G[j\omega\alpha_T(T)] \quad \dots\dots\dots (7)$$

时，黏弹材料才能称之为热流变性简单材料(TRS)。而且，只能在线性条件下应用式(1)至(7)。

另外，假设一个黏弹材料单元受到如下正弦切应变之作用时：

$$\gamma = \gamma_A \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (8)$$

滞后于正弦切应力一个相位角 δ_G ：

$$\tau = \tau_A \sin(\omega t + \delta_G) \quad \dots\dots\dots (9)$$

正弦应变和正弦应力在复数域中可表示为：

$$\gamma^* = \gamma_A e^{j\omega t} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\tau^* = \tau_A e^{j(\omega t + \delta_G)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

复切变模量 G 也可等同定义为：

$$\begin{aligned} G &= \tau^* / \gamma^* = \tau_A e^{j\delta_G} / \gamma_A = G_M e^{j\delta_G} \\ &= G_M \cos \delta_G (1 + j \tan \delta_G) = G_R + jG_I \\ &= G' + jG'' = G_R (1 + j\eta_G) \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

式中： G_M ——切变模量的幅值，Pa；

$G_R = G'$ ——实(储能)切变模量，Pa；

$G_I = G'' = G_R \eta_G$ ——虚(损耗)切变模量，Pa；

$\eta_G = \tan \delta_G$ ——材料(切变形下的)损耗因子，无量纲。

上述本构方程及其推导适用于一维、二维和三维的应力-应变状态^{2]}，也适用于杨氏模量 E 、体积模量 K 、拉梅模量 λ 和纵向波传播模量 $W (W = \lambda + 2G)$ 。

热流变性简单材料是指复模量可表示成某一单变量之复函数值的材料。这个单变量即为折算频率，它是随频率和温度而变化的。

注：有时材料的实模量和损耗因子被处理成折算频率的独立函数，虽然很容易获得满意的应用结果，但这是一个概念性错误。

在给定温度和给定频率下求得的复模量值包含了正弦应力和正弦应变间的幅值关系及相位关系。

2.2 数据检查

在本标准中，假定已经从某个良好的测试试验中获得一组正确的复模量数据(如表 2 所示)^{1]}。建议应对每组数据仔细地进行常规检查，并至少以 $\lg \eta_G$ 对 $\lg G_M$ 作曲线图(如图 1 所示)。理论上，若这组数据代表着热流变性简单材料，且这组数据不分散，则画出该组数据的带宽将趋近于零^{2]}。

这条曲线上的每一点都对应着一个特定的折算频率值(参见式 6)，只不过这里并不涉及。材料的损耗因子和模量幅值都在图中正交地画出，而折算频率、温度和频率等参数值则没有在图中显现。任何分散性数据都不是由于温度平移函数的不完善造成的。

损耗因子与模量幅值的对数作图能揭示出有关实验数据分散性的有用信息。图上数据带的宽度以

采用说明：

- 1] 原国际标准 2.2 节第一段中有这样一句话“例子参见文献 4”，而例子则“如表 1 和表 2 所示”。这里存在两个错误，即表 1 不含复模量的原始数据，而表 2 的原始数据也不是根据文献 4 来测定的。故将“例子参见文献 4”删去，将“如表 1 和表 2 所示”改为“如表 2 所示”。同时将附录中的文献 4 删去。
- 2] 原国际标准 2.2 节第一段在“且这组数据不分散，”之后有一句话：“if an adjustment of modulus for temperature and density is not appropriate...”，这句话显然是针对垂直位移而言的，然而在缺乏上下文配合的情况下，很显突兀，而且容易给读者造成误解。在不影响到标准的意义、连贯性及理解的情况下，本标准予以删除。

及个别数据点相对于带中心的离散度都可作为实验数据的分散指标。能够接受的数据分散指标取决于应用目的。不过这种作图方法不能反映出温度及频率的测量精度,也不能反映任何系统误差。

2.3 温度平移函数

假设温度及频率实验范围的选择合适,则一组复模量数据本身就以隐含方式给出了温度平移函数 $\alpha_T(T)$ 。本标准假定仅用一种温度平移函数。

推荐画出下列三个在实测温度范围内的函数图形(如图 2),因为:

- 温度平移函数 $\alpha_T(T)$, 历来具有主要作用;
- 温度平移函数的斜率 $-d(\lg \alpha_T)/dT$, 具有使数据正确平移的重要特征^{3]};
- 表观活化能 ΔH_A 有重要意义, 由下式给出^{2]}:

$$\Delta H_A = -2.303RT^2 d(\lg \alpha_T)/dT \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中: R ——气体常数, $R=0.008\,28\text{ N}\cdot\text{km}/(\text{g}\cdot\text{mol}\cdot\text{K})$ 。^{4]}

3 图示法

3.1 折算频率图

图 3 给出了一组复模量数据, 其中纵轴的对数坐标分别为实模量、虚模量(单位为 MPa)以及损耗因子; 横轴的对数坐标为折算频率 f_R 。第 i 个实测点的折算频率 f_{Ri} 为:

$$f_{Ri} = f_i \alpha_T(T_i) \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中: f_i ——实测频率, Hz;

T_i ——实测温度, K。

3.1.1 Jones 温度线

图 3 右边纵轴的对数坐标代表频率。非均匀分布的定温度斜线段和折算频率横轴及频率纵轴共同组成一个温度-频率-折算频率的诺模图。

式(5)的对数形式为:

$$\lg f_R = \lg f + \lg \alpha_T(T) \quad \dots\dots\dots (15)$$

这就是图 3 中直线的方程。

热力学温度值以适当的温度间隔选取, 每组给定温度线的间隔取决于所用的温度平移函数。所选温度斜线段的范围应与数据的实测温度范围一致, 以避免任意进行外推取值, 否则可能产生很大误差。等温斜线段在实测频率范围内的应表示成实线, 在此范围外的表示成虚线。另外, 折算频率的坐标范围应包括从右边的最低温度线和最高频率到左边的最高温度线和最低频率。

诺模图的使用如下: 在图 3 中, 从右边的频率轴上找出 200 Hz 的坐标点, 沿水平方向延伸至 295 K 斜线段相交处, 该交点对应于 100 Hz 的折算频率, 其垂线和数据曲线相交, 在左边的坐标轴上可读出各个交点的坐标值分别为: 实模量 53 MPa, 虚模量 34 MPa, 而损耗因子为 0.8^{5]}。

3.1.2 倒 U 形图

图 4 显示同样的一组复模量数据: 左边的对数纵坐标为损耗因子, 右边对数纵坐标为频率, 而对数横坐标为实模量。该图还包括了基于式 14 的诺模图。

倒 U 形图的使用如下: 在图中, 从右坐标轴上 200 Hz 处作一水平直线与 295 K 温度曲线相交, 由

采用说明:

3] 温度平移函数的斜率原国际标准遗漏一负号, 本标准予以更正。

4] 式 13 右侧原国际标准遗漏一负号, 本标准予以更正。

5] 原国际标准图 3 绘制有误, 导致图解说明中的交点数据错误。本标准根据修改后的图 3 修订了交点数据。

交点引垂线向下交于横坐标轴上,即可读出实模量为 50 MPa;然后这条垂线又向上延伸至数据线,从交点的左坐标轴上可读出损耗因子为 0.8^{6]}。

3.2 解析表达式

手工处理和数据解释适用于某些用途,计算机处理数据则具有更高的效率,而温度平移函数和复模量的解析表达式却能使设计研究的效率进一步增加。故可能时应给出上述函数的解析表达式(如表 3 和表 4)。

若作图法是为了确定公式或解释中所用的参数值,就应该给出所作的图。例如,用虚模量对实模量作线性图以确定数据曲线和实模量坐标轴的截距夹角。

当解析表达式用于设计时,应避免进行不适当的外推取值。

表 1 复模量数据

α_T 模型													
NALF	NA	A(1)	A(2)		A(3)		A(4)		A(5)		A(6)		
0	0												
复模量模型													
NVEM	NB	B(1)	B(2)	B(3)	B(4)	B(5)	B(6)	B(7)	B(8)	B(9)	B(10)	B(11)	B(12)
11	9	5.70	212	176	0.662	4.510×10^{-2}	3.000×10^{-2}	0.410	0.257	3.65			

表 2 作为温度、频率函数的复模量数据^{7]}

温度/K	频率/Hz	G_R /MPa	η_0	G_I /MPa	α_T/T
254.2	7.800	244.0	0.130 0	31.72	$2.795\ 6 \times 10^4$
254.2	15.60	252.0	0.114 0	28.73	$2.795\ 6 \times 10^4$
254.2	31.20	260.0	$9.970\ 0 \times 10^{-2}$	25.92	$2.795\ 6 \times 10^4$
254.2	62.50	266.0	$9.410\ 0 \times 10^{-2}$	25.03	$2.795\ 6 \times 10^4$
254.2	125.0	275.0	$9.470\ 0 \times 10^{-2}$	26.04	$2.795\ 6 \times 10^4$
254.2	250.0	281.0	$7.210\ 0 \times 10^{-2}$	20.26	$2.795\ 6 \times 10^4$
254.2	500.0	292.0	$8.160\ 0 \times 10^{-2}$	23.83	$2.795\ 6 \times 10^4$
254.2	1 000	337.0	$7.030\ 0 \times 10^{-2}$	23.69	$2.795\ 6 \times 10^4$
273.2	7.800	77.30	0.623 0	48.16	33.94
273.2	15.60	96.50	0.541 0	52.21	33.94
273.2	31.20	119.0	0.456 0	54.26	33.94
273.2	62.50	140.0	0.385 0	53.90	33.94
273.2	125.0	162.0	0.333 0	53.95	33.94
273.2	250.0	185.0	0.259 0	47.92	33.94
273.2	500.0	206.0	0.232 0	47.79	33.94
273.2	1 000	242.0	0.202 0	48.88	33.94
283.2	7.800	22.90	0.892 0	20.43	2.825
283.2	15.60	30.70	0.869 0	26.68	2.825
283.2	31.20	42.10	0.813 0	34.23	2.825
283.2	62.50	57.90	0.731 0	42.32	2.825

采用说明:

- 6] 原国际标准图 4 绘制有误,导致图解说明中的交点数据错误。本标准根据修改后的图 4 修订了交点数据。
- 7] 表 2 中前五个温度的 α_T 值与表 3 $\lg \alpha_T$ 解析表达式的计算结果(用反对数)不一致,而后三个温度的 α_T 值与 $\lg \alpha_T$ 解析表达式的计算结果一致。这是由于解析表达式的计算结果并不能代表真正的 α_T 值,还需要用原始数据进行逼近计算才可获得正确结果。

表 2(完)

温度/K	频率/Hz	G_R /MPa	η_G	G_I /MPa	α_T/T
283.2	125.0	77.30	0.645 0	49.86	2.825
283.2	250.0	101.0	0.532 0	53.73	2.825
283.2	500.0	126.0	0.461 0	58.09	2.825
283.2	1 000	161.0	0.388 0	62.47	2.825
292.2	7.800	11.10	0.745 0	8.270	0.644 6
292.2	15.60	14.00	0.818 0	11.45	0.644 6
292.2	31.20	18.30	0.889 0	15.90	0.644 6
292.2	62.50	24.80	0.889 0	22.05	0.644 6
292.2	125.0	34.60	0.875 0	30.27	0.644 6
292.2	250.0	48.90	0.786 0	38.44	0.644 6
292.2	500.0	68.00	0.703 0	47.80	0.644 6
292.2	1 000	94.80	0.611 0	57.92	0.644 6
303.2	7.800	7.800	0.552 0	4.306	0.194 1
303.2	15.60	9.560	0.661 0	6.319	0.194 1
303.2	31.20	12.10	0.762 0	9.220	0.194 1
303.2	62.50	16.10	0.856 0	13.78	0.194 1
303.2	125.0	22.30	0.912 0	20.34	0.194 1
303.2	250.0	30.70	0.874 0	26.83	0.194 1
303.2	500.0	45.60	0.824 0	37.57	0.194 1
303.2	1 000	65.40	0.747 0	48.85	0.194 1
313.2	7.800	6.000	0.351 0	2.106	$4.308\ 8\times 10^{-2}$
313.2	15.60	6.800	0.448 0	3.046	$4.308\ 8\times 10^{-2}$
313.2	31.20	7.940	0.553 0	4.391	$4.308\ 8\times 10^{-2}$
313.2	62.50	9.520	0.661 0	6.293	$4.308\ 8\times 10^{-2}$
313.2	125.0	11.80	0.775 0	9.145	$4.308\ 8\times 10^{-2}$
313.2	250.0	15.30	0.845 0	12.93	$4.308\ 8\times 10^{-2}$
313.2	500.0	20.80	0.897 0	18.66	$4.308\ 8\times 10^{-2}$
313.2	1 000	30.20	0.894 0	27.00	$4.308\ 8\times 10^{-2}$
333.2	7.800	5.000	0.110 0	0.550 0	$5.083\ 1\times 10^{-3}$
333.2	15.60	5.200	0.152 0	0.790 4	$5.083\ 1\times 10^{-3}$
333.2	31.20	5.480	0.214 0	1.173	$5.083\ 1\times 10^{-3}$
333.2	62.50	5.890	0.289 0	1.702	$5.083\ 1\times 10^{-3}$
333.2	125.0	6.450	0.394 0	2.541	$5.083\ 1\times 10^{-3}$
333.2	250.0	7.280	0.506 0	3.684	$5.083\ 1\times 10^{-3}$
333.2	500.0	8.690	0.601 0	5.223	$5.083\ 1\times 10^{-3}$
333.2	1 000	11.00	0.657 0	7.227	$5.083\ 1\times 10^{-3}$
353.2	7.800	4.950	3.220×10^{-2}	0.159 4	$7.650\ 0\times 10^{-4}$
353.2	15.60	5.010	4.510×10^{-2}	0.226 0	$7.650\ 0\times 10^{-4}$
353.2	31.20	5.090	7.000×10^{-2}	0.356 3	$7.650\ 0\times 10^{-4}$
353.2	62.50	5.210	0.101 0	0.526 2	$7.650\ 0\times 10^{-4}$
353.2	125.0	5.340	0.158 0	0.843 7	$7.650\ 0\times 10^{-4}$
353.2	250.0	5.620	0.236 0	1.326	$7.650\ 0\times 10^{-4}$
353.2	500.0	6.070	0.317 0	1.924	$7.650\ 0\times 10^{-4}$
353.2	1 000	7.240	0.288 0	2.085	$7.650\ 0\times 10^{-4}$

表 3 温度平移函数解析表达式之例⁸⁾

$\lg \alpha_T = a(1/T - 1/T_Z) + 2.303(2a/T_Z - b) \lg(T/T_Z) + (b/T_Z - a/T_Z^2 - S_{AZ})(T - T_Z)$
$-d(\lg \alpha_T)/dT = a(1/T - 1/T_Z)^2 + b(1/T - 1/T_Z) + S_{AZ}$
通过三个点的斜率:
$T_Z = A(1) = 290; S_{AZ} = A(4) = 0.069$
$T_L = A(2) = 230; S_{AL} = A(5) = 0.2$
$T_H = A(3) = 360; S_{AH} = A(6) = 0.04$
$C_A = (1/T_L - 1/T_Z)^2$
$C_B = 1/T_L - 1/T_Z$
$C_C = S_{AL} - S_{AZ}$
$D_A = (1/T_H - 1/T_Z)^2$
$D_B = 1/T_H - 1/T_Z$
$D_C = S_{AH} - S_{AZ}$
$D_E = D_B C_A - C_B D_A$
$a = (D_B C_C - C_B D_C)/D_E$
$b = (C_A D_C - D_A C_C)/D_E$

表 4 复模量解析表达式之例

$G^* = [G_e(jf_R/10^{-\alpha_R} f_{RO})^{\beta_R} + G_g(jf_R/f_{RO})^{\beta_T}]/[1 + (jf_R/10^{-\alpha_F} f_{RO})^{\alpha_B \beta_T} + (jf_R/f_{RO})^{\beta_T - \beta_G}]$
$G_e = B(1) = 5.0$
$G_g = B(2) = 320$
$f_{RO} = B(3) = 410$
$\beta_T = B(4) = 0.66$
$\beta_G = B(5) = 0.01$
$\beta_R = B(6) = 0.005$
$\alpha_F = B(7) = 0.52$
$\alpha_B = B(8) = 0.58$
$\alpha_R = B(9) = 3$

采用说明:

8] $\lg \alpha_T$ 公式等号右边第三项代数式前的“+”号,原国际标准误为“-”号,本标准予以更正。

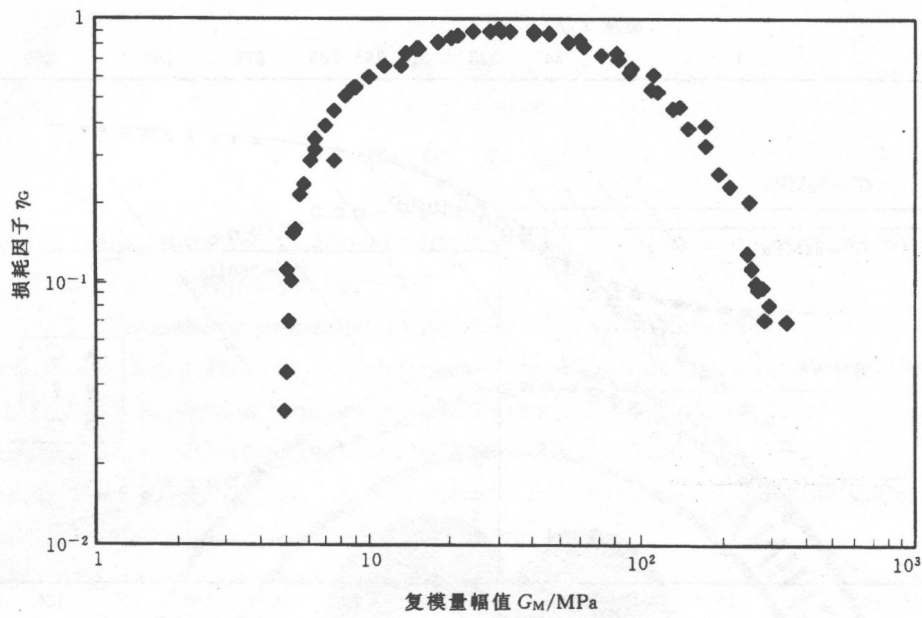


图 1 数据质量检查

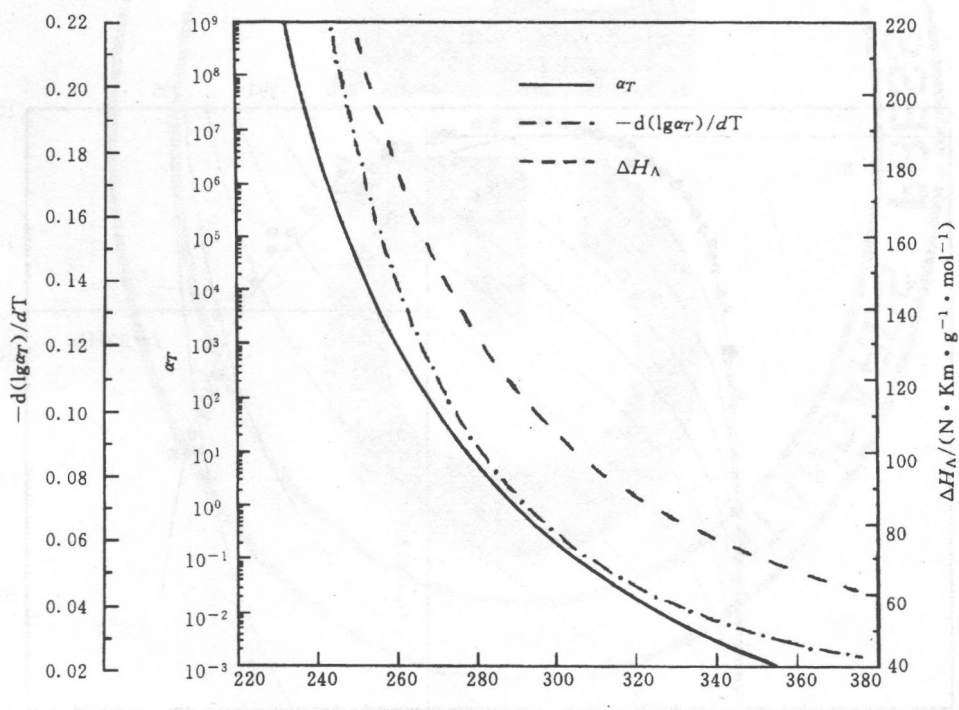


图 2 温度平移函数及其性能^{9]}

采用说明：

9] 国际标准原文本的图 2 斜率纵坐标标题漏一“—”号，本标准予以更正；另外原图绘制有误，本标准根据表 2 数据重新绘制出图 2。

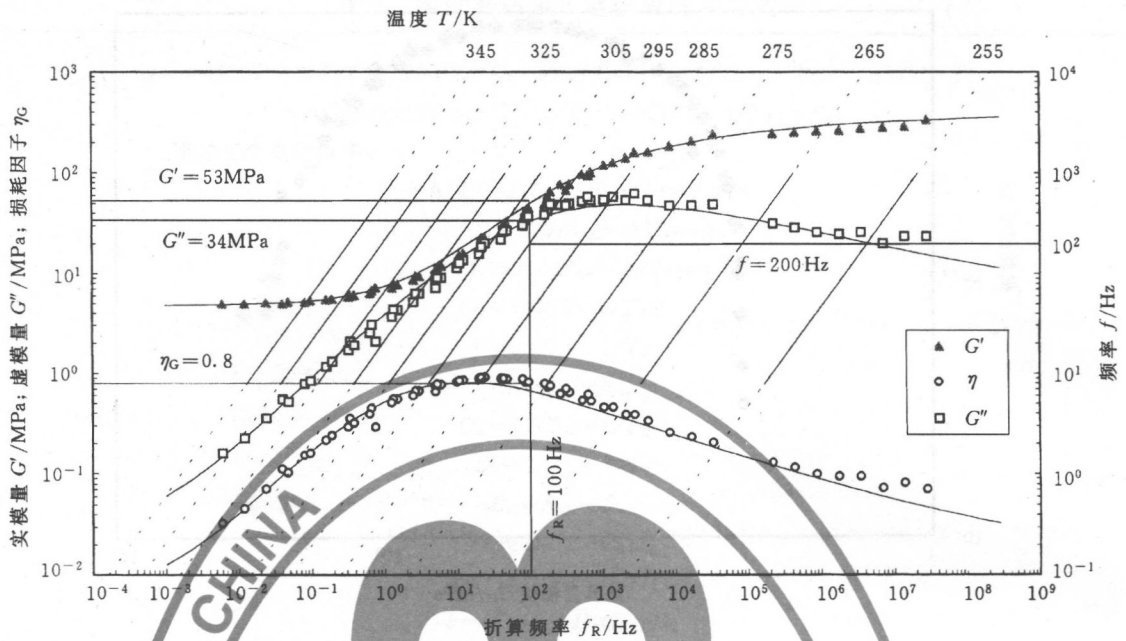


图 3 复模量折算频率图^{10]}

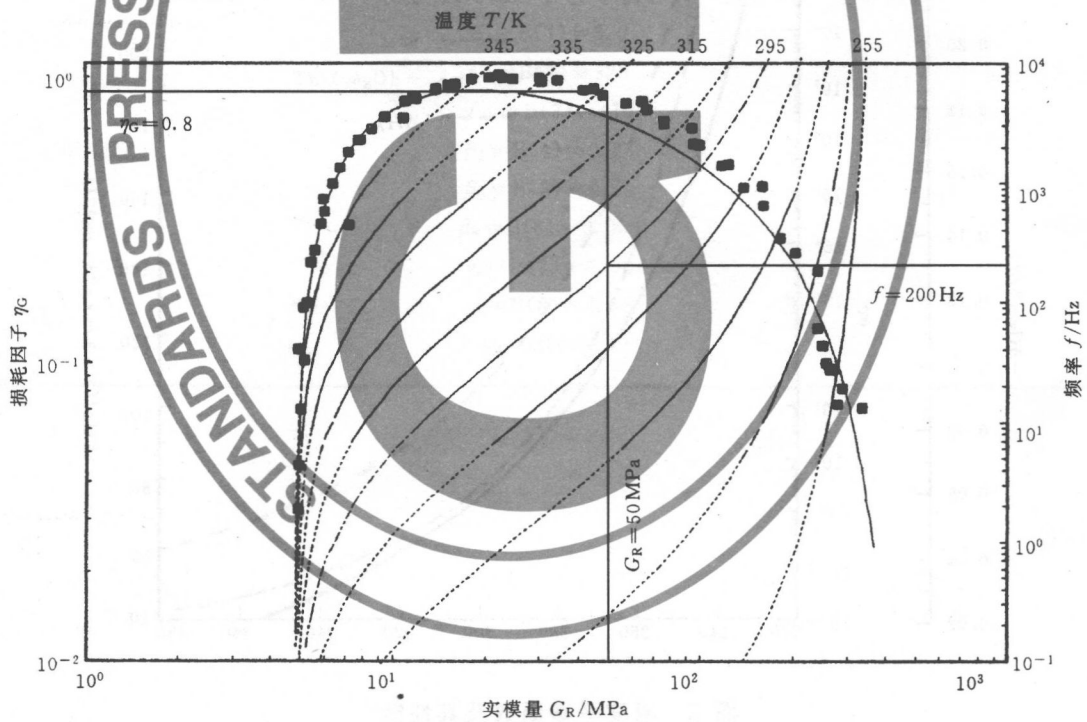


图 4 复模量倒 U 形图^{10]}

采用说明：

10] 国际标准原文本图 3 及图 4 中的 Jones 温度线绘制有误，导致图解说明的交点数据错误。本标准根据表 2 数据重新绘制出图 3 及图 4，订正了图解说明数据，并与 3.1 的正文说明保持一致。

附录 A

(提示的附录)

参考文献^{11]}

1. Rogers, L. , Operators and fractional derivatives for viscoelastic constitutive equations, J. Rheology, 1983, Vol. 27, No. 4, pp. 351~372.
 2. Ferry, J. D. , Viscoelastic properties of polymers, 3rd ed, Wiley, 1980.
 3. Nashif, A. D. , Jones, D. I. G. , & Henderson, J. P. , Vibration damping, Wiley, 1985.
 4. Jones, D. I. G. , A reduced temperature nomogram for characterization of damping material behavior, Shock and Vibration Bulletin, 1978, Vol. 48, No. 2, pp. 13~22.
 5. Jones, D. I. G. , & Rao, D. K. , A new method for representing damping material properties, ASME Vibration Conference, Boston, MA, Sept. 1987.
 6. ISO 31-7:1978, Quantities and units of acoustics.
 7. ISO 472:1988, Plastics—Vocabulary.
 8. ISO 2041:1990, Vibration and shock—Vocabulary.
 9. ISO 2856:1981, Elastomers—General requirements for dynamic testing.
 10. ISO/TR 4137:1978, Plastics—Determination of modulus of elasticity by alternating flexure.
-

采用说明:

11] 原附录中的文献 4 删去(参见脚注 1),其余文献顺排。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
阻尼材料 复模量图示法

GB/T 17809—1999

*

中国标准出版社出版
北京复兴门外三里河北街16号

邮政编码:100045

电 话:68522112

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 21 千字
2000年3月第一版 2000年3月第一次印刷
印数 1—800

*

书号: 155066·1-16459 定价 10.00 元

*

标 目 401—43