

中华人民共和国国家标准

金属材料高温弹性模量测量方法 圆盘振子法

GB/T 14453—93

Metallic material—Standard test method for the elastic
modulus at high temperature—The method of disc—Vibrator

1 主题内容与适用范围

本标准规定了金属材料高温弹性模量测量方法圆盘振子法的术语、定义、符号、测量原理与公式、测量器具与装置、试样、测量条件与操作要求、数据处理、精度与偏差以及试验报告等。

本标准适用于室温至+2 000℃间材质均匀的金属材料圆盘状试样共振频率的测量,由此可确定试样的动态杨氏模量、动态切变模量及动态泊松比。也适用于玻璃、陶瓷等材质均匀、各向同性的其他固体材料的检测。

2 引用标准

GB/T 2105 金属材料杨氏模量、切变模量及泊松比测量方法(动力学法)

GB 1423 贵金属及其合金密度测量方法

GB 8170 数值修约规则

3 术语、定义及符号

3.1 节圆

圆板在振动中位移为零的同心圆。

3.2 节径

圆板在振动中位移为零的直径。

3.3 共振频率

引致试样产生共振的强迫振动频率,用符号 f_{mn} 表示,单位为 Hz;下标 m 为节圆数 n 为节径数。

3.4 挠曲振动

板基元振动方向与板的中性面垂直的振动称为“挠曲振动”,与周边自由板挠曲振动基频频率 f_{02} 相应的节径分布如图 1(a)所示,与次低频率 f_{10} 相应的节圆分布与振形如图 1(b)所示。

3.5 杨氏模量、切变模量、泊松比、弹性模量的定义、符号及单位按 GB/T 2105 标准规定执行。

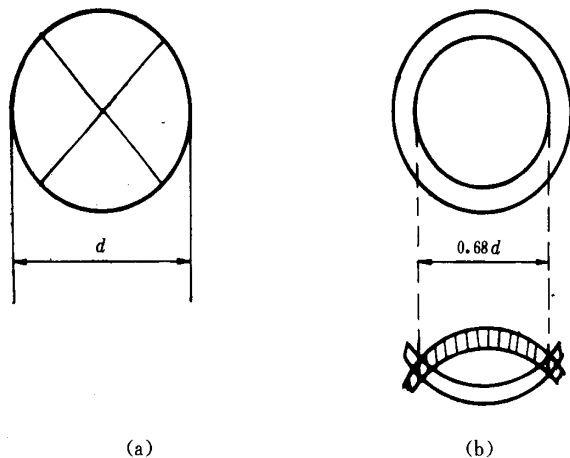


图 1 自由圆板基频与次低频的挠曲振动 d ——试样直径

4 测量原理与公式

4.1 测量原理

试样的机械共振频率由材料的杨氏模量、密度和试样的直径及其与厚度的比值确定。因此，试样的几何尺寸、密度和机械共振频率被测定后，相应的动态杨氏模量和泊松比即可求出；试样的切变模量可用杨氏模量和泊松比计算。

以强迫共振法测量试样的共振频率时，试样被激励产生的振动是由一个换能器提供的，该换能器将来自频率连续可变的振荡器的电信号转换成机械振动；用另一个换能器来拾取试样的机械振动，并将它转换成可在仪表上显示的电信号，根据电信号的特征来检测试样的共振频率。

4.2 基本公式

圆板做挠曲共振时，其杨氏模量与共振频率，密度和几何尺寸间有下述关系：

$$E = 1.00 \times 10^{-12} \rho d^2 f_{mn}^2 / K_{mn}^2 \dots\dots\dots (1)$$

- 式中： E ——动态杨氏模量，GPa；
- ρ ——密度，g/cm³；
- d ——直径，mm；
- f_{mn} ——节圆数为 m ，节径数为 n 时的共振频率，Hz；
- K_{mn} ——与厚度直径比 h/d 、泊松比 μ 及 m, n 值有关的频率常数，无量纲。

试样的动态切变模量用下述公式求出：

$$G = E/2(1 + \mu) \dots\dots\dots (2)$$

- 式中： G ——动态切变模量，GPa；
- μ ——泊松比，无量纲。

试样的泊松比由次低频率 f_{10} 与基频频率 f_{02} 的比值 f_{10}/f_{02} 和厚度 h 与直径 d 的比值 h/d 确定，见表 1。

5 测量器具与装置

5.1 量具

- 游标卡尺：测量试样直径，最小分度不大于 0.02 mm；
- 千分尺：测量试样厚度，最小分度不大于 0.002 mm；

天平:称量试样质量,感量不大于 0.001 g;

热电偶:在变温试验中用来测量试样温度;温度不高于 1 200℃时,测量精度应达±2℃;1 200℃以上应达±5℃。

5.2 测量装置

可在不同温度下完成弹性模量检测的共振测试装置示意图如图 2 所示。

用数字频率计来完成引致试样共振的振荡器输出频率的精确测定。依功能的不同,换能器分为激励器与拾振器两种;以选频放大器内附的交流电压表检测共振信号。在变温测量中,需要以李沙育图形来判断虚假共振,此时应将振荡器与放大器的输出分别供给示波器的水平与垂直偏转板。

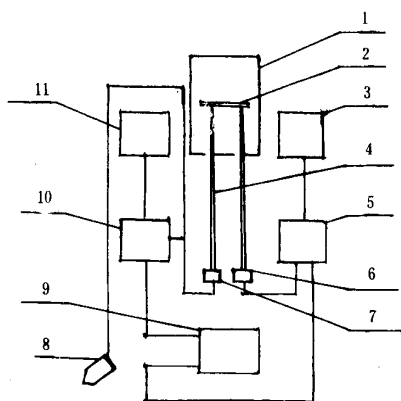


图 2 挠曲共振测试装置

- 1—加热炉;2—试样;3—频率计;4—耦合杆;5—振荡器;
6—激励换能器;7—拾振换能器;8—探针;9—示波器;
10—放大器;11—毫伏计

5.2.1 振荡器

在 20~100 Hz 范围内有连续可变的频率输出,在任一确定位置上频率漂移应好于 0.1 Hz/min;其输出功率应保证所用激励换能器能够激发几何尺寸在规定范围内的任何试样。

5.2.2 数字频率计

可用于振动周期测量的计数式频率计;测量误差不大于±0.1 Hz,晶体稳定度应不低于 $10^{-8}/d$ 量级。

5.2.3 换能器

5.2.3.1 在所检测的试样频率变化范围内,激励器的输出功率损失应不大于 3 dB,拾振器应具有尽可能好的频率响应。

5.2.3.2 一般可用压电式换能器;建议利用附有屏蔽罩的钛酸钡或锆钛酸铅压电陶瓷。压电陶瓷与耦合杆间充填锡等介质以尽可能消除能量损耗。

5.2.3.3 室温下作为共振模式与级次鉴别用的探针可利用改装后的晶体唱头。

5.2.4 耦合杆

在测试温度范围内应有足够的刚性,支撑试样的耦合杆及支杆端部可具有叉形、圆形等形状;若将换能器及其耦合杆置于试样上方,应注意消除附加质量对试样共振的影响。

5.2.5 放大器

其输入阻抗应与拾振换能器的阻抗匹配,频率响应范围应满足测试要求,对共振信号的测试灵敏度不低于 $1\mu\text{V}$ 。推荐以锁定放大器来完成拾振信号的选频放大与测量。

5.2.6 示波器

频率响应范围及灵敏度应满足测试要求的通用示波器。

5.2.7 加热炉

加热炉温度的升、降应是可控制的；在检测温度范围内，均温区横、纵向尺寸应不小于 40 mm，温度偏差应好于 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

6 试样

试样为圆盘状，试样的最小质量由拾振系统检测灵敏度决定。试样的直径基本上由加热炉允许的空间决定；推荐试样直径为 18~24 mm，厚度 1.5~3 mm，试样直径间的差值应不大于 0.02 mm，上下两个表面的不平行度小于 0.02 mm，表面粗糙度 R_a 值为 $1.6\ \mu\text{m}$ 。

7 测试条件与操作要求

7.1 几何尺寸的测量

试样清洗后进行测量，试样直径以均分角度取 5 次测量的平均值，厚度沿板不同部位随机选取 5 点进行测量后取平均值。

7.2 密度的测量

密度的测量按照 GB 1423 规定执行。

7.3 试样安装

将试样水平放置在两根耦合杆顶端上，使试样边缘与杆的 3~4 个接触点间距离相等；接触点与试样对称轴心的距离应尽可能接近 $0.68r$ ， r 为试样的半径。

7.4 共振调谐

首先借被测试样模量的估算值和测得的静态参数，据 4.2 条所述的基本公式完成共振频率的估算。试样装设好，启动装置，将适于激励试样的、尽可能低的功率输给激励换能器。选择放大器的频率范围和增益，使之足以检测试样共振。调节示波器，使在试样共振时，能得到清晰的李沙育图形。在预定的频率范围内进行扫描得到稳定的共振显示。

7.5 鉴频方法

可用粉纹法、探针法或阻尼法分别完成对室温下振动模式和级次的鉴别，这种鉴别主要是据对振动节点位置的观测。在利用粉纹法时，将矽胶粉末均匀地撒在试样的表面上，在疑为试样共振的频率位置，增加振荡器的输出功率，试样共振时会看到这些粉末聚集到试样的节点（线）处。在利用探针法或阻尼法时，沿着与试样中心等距的位置或其垂直方向移动探针，轻轻触及不同部位；试样共振时，会发现共振示值有明显的不同反应；在波节处无反应，在波腹处有明显的响应或衰减；与共振频率 f_{02} 和 f_{10} 相应的波节分布如图 1 所示。

7.6 共振频率测量

7.6.1 室温下的测量

在振荡器频率逐步增加的过程中，为防止试样氧化并减少其共振阻尼，将炉内空气抽出，当真空度达到预定指标后，加热升温。温度升到指定温度时，需保温 10~20 min 方可进行测量。

在测量过程中应密切跟踪共振频率随温度的变化，并据拾振信号特征或李沙育图形进行判别，保证测量结果的可靠性。尚有疑问时，可据 f_{02} 和 f_{10} 分别完成高温弹性模量的计算，据结果的一致性完成鉴别。

8 数据处理

8.1 室温杨氏模量与泊松比

据圆盘试样的密度、直径和厚度，以及基频和次低频挠曲共振频率 f_{02} 和 f_{10} 值，分别求出 h/d 和 f_{10}/f_{02} 的比值，从表 1 中查出试样的泊松比 μ ，再利用表 2 查得 K_{10} 值代入公式 (3) 即可求出杨氏模量：

$$E = 1.00 \times 10^{-12} \rho d^2 f_{10}^2 / K_{10}^2 \dots\dots\dots (3)$$

式中： f_{10} ——圆盘状试样挠曲共振次低频频率，Hz；

K_{10} ——由试样厚度与直径比和泊松比决定的频率常数，无量纲，见表2。

为了校核，可以基频频率 f_{02} 代替 f_{10} ，以频率常数 K_{02} 代替 K_{10} 后，据公式(3)完成 E 值计算； K_{02} 值见表3。

表1 泊松比 μ 与频率比 f_{10}/f_{02} 和厚度直径比 h/d 关系表

h/d	f_{10}/f_{02}									
	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75	1.80	1.85	1.90
0.04	0.112	0.152	0.192	0.231	0.270	0.308	0.346	0.378	0.404	0.435
0.06	0.114	0.157	0.200	0.241	0.279	0.315	0.349	0.380	0.409	0.437
0.08	0.116	0.162	0.205	0.245	0.283	0.318	0.353	0.386	0.418	0.450
0.10	0.122	0.166	0.209	0.250	0.289	0.325	0.360	0.394	0.426	0.456
0.12	0.126	0.174	0.217	0.257	0.295	0.332	0.368	0.401	0.433	0.460
0.14	0.134	0.182	0.225	0.265	0.304	0.341	0.376	0.408	0.437	0.462
0.16	0.141	0.191	0.236	0.278	0.315	0.350	0.383	0.416	0.443	0.467
0.18	0.150	0.198	0.243	0.286	0.326	0.363	0.396	0.427	0.453	0.476
0.20	0.159	0.206	0.252	0.295	0.336	0.374	0.408	0.440	0.467	0.491
0.22	0.166	0.212	0.259	0.306	0.352	0.394	0.430	0.458	0.476	0.498

表2 频率常数 K_{10} 与泊松比 μ 、厚度直径比 h/d 关系表

h/d	泊 松 比 μ						
	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.04	0.064 4	0.065 2	0.067 8	0.069 6	0.071 3	0.074 1	0.077 4
0.06	0.094 6	0.096 8	0.099 3	0.101 9	0.105 0	0.108 5	0.112 3
0.08	0.124 2	0.127 3	0.130 3	0.133 8	0.137 7	0.142 1	0.146 2
0.10	0.152 7	0.156 3	0.160 0	0.164 0	0.168 8	0.174 3	0.178 6
0.12	0.179 6	0.183 8	0.188 1	0.192 7	0.197 8	0.203 9	0.210 1
0.14	0.208 2	0.212 6	0.214 1	0.219 4	0.225 2	0.232 0	0.239 6
0.16	0.228 4	0.232 9	0.237 9	0.243 4	0.249 7	0.257 0	0.265 4
0.18	0.250 4	0.255 5	0.261 0	0.266 3	0.271 9	0.278 6	0.287 3
0.20	0.270 9	0.276 1	0.281 8	0.287 7	0.294 7	0.302 8	0.312 3
0.22	0.289 8	0.295 3	0.301 6	0.307 6	0.310 4	0.314 2	0.323 1

表 3 频率常数 K_{02} 与泊松比 μ 、厚度直径比 h/d 关系表

h/d	泊 松 比 μ						
	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.04	0.042 8	0.042 1	0.041 8	0.041 0	0.040 5	0.040 3	0.038 9
0.06	0.063 4	0.062 5	0.061 6	0.060 7	0.059 9	0.059 2	0.058 4
0.08	0.083 6	0.082 4	0.081 1	0.080 0	0.078 9	0.077 9	0.077 0
0.10	0.103 1	0.101 5	0.100 0	0.098 6	0.097 3	0.096 0	0.094 8
0.12	0.121 9	0.120 0	0.118 2	0.116 5	0.114 8	0.113 3	0.111 9
0.14	0.142 1	0.139 7	0.135 4	0.133 5	0.131 6	0.129 8	0.128 1
0.16	0.156 7	0.154 2	0.151 8	0.149 6	0.147 0	0.144 4	0.142 2
0.18	0.172 8	0.170 0	0.167 4	0.164 9	0.161 7	0.158 5	0.155 9
0.20	0.188 0	0.184 9	0.182 0	0.179 3	0.176 7	0.174 2	0.171 8
0.22	0.202 2	0.198 9	0.195 8	0.192 8	0.188 4	0.184 2	0.181 1

8.2 切变模量

将杨氏模量、泊松比值代入公式(2)即可求出。

8.3 高温弹性模量

高温弹性模量由下式计算：

$$M_t = M_0(f_t/f_0)^2 [1/(1 + \alpha\Delta t)] \dots\dots\dots(4)$$

- 式中： M_0 ——室温下的弹性模量，GPa；
 M_t ——温度 t 下的弹性模量，GPa；
 f_0 ——室温下试样的基频共振频率，Hz；
 f_t ——温度 t 下试样同一振动级次的共振频率，Hz；
 α ——室温与温度 t 间试样的平均线膨胀系数， $(^\circ\text{C})^{-1}$ ；
 Δt ——温度 t 与室温间的温度差， $^\circ\text{C}$ 。

8.4 数值修约

对算出的杨氏模量、切变模量取三位有效数字，泊松比取两位有效数字，数值修约执行 GB 8170 有关规定。

9 精度和偏差

按本标准规定，测得的动态杨氏模量与泊松比不确定度小于 5% 量级，切变模量小于 10%。

10 报告

实验报告一般包括下述内容：

- a. 对材料的描述：牌号、化学成分、加工条件等；
- b. 对试样的描述：制备方法、几何尺寸、密度或重量；
- c. 测量方法的描述：采用的试验方法，所用的主要测量器具；
- d. 对环境的描述：包括温度、介质、测试过程中的干扰情况等；
- e. 测试结果；
- f. 误差估算；
- g. 送样单位、测试人、校对人、审核人的签名和测试日期。

附加说明：

本标准由中华人民共和国冶金工业部提出。

本标准由中国核动力研究设计院和首钢总公司冶金所共同起草。

本标准主要起草人高占武、李昕。