

强迫振动变频扭摆内耗仪的研制和应用

文亦汀 王力田 杜家驹

(中国科学院固体物理研究所)

长期以来,低频扭摆被广泛地应用于内耗研究^[1]. 在这种装置中,测量振动系统在自由衰减时的振幅和频率. 这种方法有一定的局限性:在内耗很大($Q^{-1} > 0.1$)时,误差很大;在扭摆的工作频率范围内,某些弛豫过程的温度可能很高,而在这样的温度下,试样的组态将会发生变化. 早在四十年代,就已经研制出强迫振动扭摆^[2],用于极高内耗的测量. 由于检测微小相角差的困难,直到七十年代中期强迫振动扭摆才得到进一步的发展^[3]. 这种方法直接测量应变落后于应力的相角差. 本文介绍的频率扭摆能够在超低频(10^{-3} Hz)和较宽的频率范围(10^{-3} —5Hz)测量内耗和弹性模量.

一、测量原理

扭摆振动系统可以用图1所示的模型来表示. m 是附加在试样上的大质量刚性体. 试样的复弹性常数 K^* 与复模量成正比,而 $K^* = K_1(1 + i \tan \phi)$, K_1 是实数模量, ϕ 是试样中应力与应变的相角差. Nowick^[4]

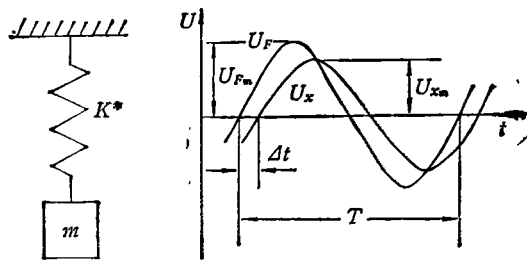


图1 振动系统模型和应力(U_F)应变(U_x)曲线

根据此模型算出,当系统进行强迫振动时,位移振幅 x_0 和外加力与位移的相角差 θ 分别为

$$x_0^2 = \frac{(F_0/K_1)^2}{(1 - \omega^2/\omega_1^2)^2 + \tan^2 \phi},$$

$$\tan \theta = \frac{\tan \phi}{1 - \omega^2/\omega_1^2}, \quad (1)$$

式中 F_0 是外加力的幅值, $\omega_1^2 = K_1/m$ 是系统本征频率, ω 为振动频率. 当 $\omega \ll \omega_1$, $\tan \phi \ll 1$ 时,有

$$x_0 = F_0/K_1, \quad \tan \theta = \tan \phi (\equiv Q^{-1}). \quad (2)$$

实验中,外加力和位移都被转换为电压信号. 如

图1,外加力 U_F 和位移 U_x 为同频率的正弦波. 检测出两信号的过零时间差 Δt 和周期 T , 则相角差为 $\theta = 360 \frac{\Delta t}{T}$ (度). 检测幅值 U_{Fm} 和 U_{xm} . 这样,就可由(2)式得到试样的内耗和模量值.

二、装置及实验曲线

主体结构类似倒扭摆. 配 JK-100 高真空机组,真空度可达 10^{-2} Torr. 用液氮冷却,温度可由 100—700K. 应变振幅 A_s 由 1×10^{-6} — 1×10^{-4} .

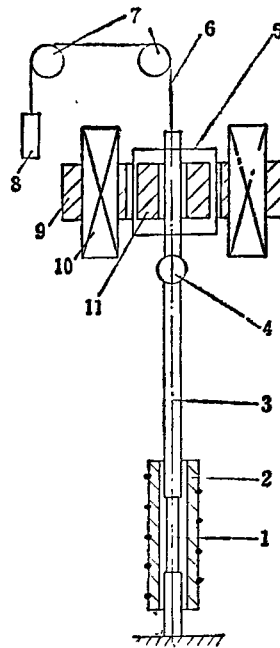


图2 主体结构示意图

1. 试样; 2. 加热炉; 3. 摆杆; 4. 反射镜; 5. 驱动线圈; 6. 悬丝; 7. 滑轮; 8. 平衡重; 9. 软铁; 10. 励磁线圈; 11. 软铁芯

图2是主体结构示意图. 与自由衰减扭摆不同,没有调节自由振动频率的横摆杆,但增加了强迫振动的驱动部分. 给线圈10提供励磁电流,使9和11间的气隙中产生恒定磁场. 超低频正弦信号送至驱动线圈5. 这样摆杆在力矩作用下按正弦规律进行扭转振动.

原理部分指出,提高本征频率 ω_0 可以使装置的使用上限频率提高.我们采用片状试样,同时适当减小摆杆系统的转动惯量.对于一般的金属材料,本装置的本征频率为50—100Hz.片状试样的应力分布与丝状试样不同.根据理论计算^[1],两种形状试样的最大应变分别为 $A_s = (D/2l) \cdot \theta$ (丝状) 和 $A_p = (\alpha b/\beta l)\theta$ (片状). l 为试样长度, θ 为扭转角, α 和 β 是与形状有关的量.

驱动系统的非对称性会使摆杆在扭转振动时产生垂直于摆杆的横向振动,影响测量.经过多种方案试验,我们采用减短悬丝有效长度的方法消除了摆杆的横向振动.

角位移检测如图3所示.用光电法检测角位移.测量光电池的短路电流,使得光电位检测器具有良好的线性和强的输出(可达几伏).用B57超低频相位计测量两信号 U_F 和 U_x 的过零时间差和周期以及进行运算,得出相角差 θ .测量出的周期 T 和相角差 θ 以五位数字显示.相位计的分辨率为 0.02° ,因而内耗 θ^{-1} 的最好分辨率约为 4×10^{-4} .对大内耗测量,原则上没有限制,可以测到 $\theta = 45^\circ$ ($\theta^{-1} = 1$).同时用PZ8数字电压表测量两信号的峰峰值 U_{Fpp} 和 U_{xpp} ,由(2)式算出弹性模量的相对值.

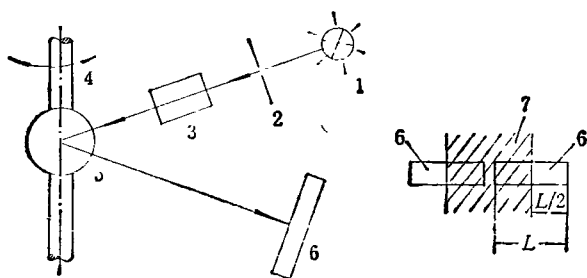


图3 光电检测角位移示意图

1.光源; 2.狭缝; 3.长焦距镜头; 4.摆杆;
5.反射镜; 6.光电池; 7.光斑

用本装置对纯铝(99.999%)晶粒间界内耗峰进行了测量,其温度谱如图4所示.试样先由冷轧制成 $60 \times 4.5 \times 1 \text{mm}^3$ 的片状,然后在 450°C 退火2小时.把试样装入扭摆后,升温到约 420°C ,保温0.5小时.降温进行测量,得到内耗 Q^{-1} 在不同频率下作为温度函数的曲线.频率以1Hz降低到0.1Hz时,内耗峰的峰

温从 325°C 降至 300°C .在固定的温度下测量内耗作为频率的函数,得到内耗的频率谱.温度升高后晶粒间界内耗峰向高频方向移动.即内耗的温度谱和频率谱都显示出晶粒间界峰的弛豫特性.

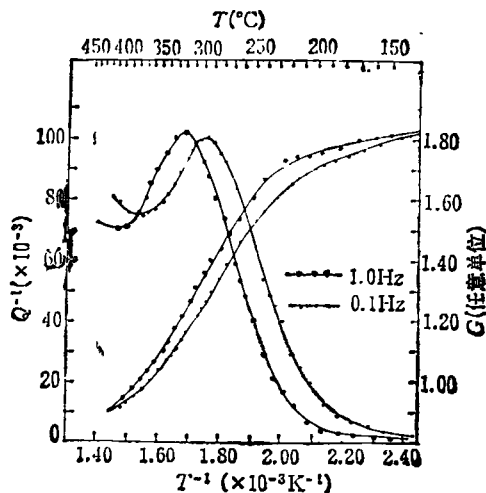


图4 晶粒间界内耗峰的温度谱

由温度谱测得的峰温 $T_p = 325^\circ\text{C}$ ($f = 1\text{Hz}$)比丝状试样的高^[1],这可能与试样的加工过程及预冷加工度的不同有关^[6].

这项工作是在葛庭燧教授的指导下进行的.在本装置研制过程中,谢存毅、陈晖二同志参加了部分实验工作,顾春晖同志和内耗课题组的同志们给予了许多帮助,谨此致谢.

参 考 文 献

- [1] T. S. Kê (葛庭燧), *Phys. Rev.*, **71**(1947), 533.
- [2] T. S. Kê, M. Ross, *Rev. Sci. Instrum.*, **20**(1949), 795.
- [3] J. Woïgard, Y. Sarrazin, H. Chaumet, *Rev. Sci. Instrum.*, **48**(1977), 1322.
- [4] A. S. Nowick, B. S. Berry, *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*, Academic Press, (1972), 15.
- [5] 孙训方、方孝淑、陆耀洪, *材料力学(上册)*人民教育出版社, (1964), 102.
- [6] T. S. Kê, *J. Appl. Phys.*, **20**(1949), 274.