

扭摆的故事

——简单的仪器与重要的成果

葛庭燧

(中国科学院固体物理研究所内耗与固体缺陷开放研究实验室,合肥 230031)

本文从扭摆内耗仪的发明和应用这一侧面来说明用简单的仪器设备也能够得到重要的成果。文中详细介绍了作者根据实验室通用的古典扭摆的启发来创制扭摆内耗仪的经过,以及作者应用这项简单仪器所获得的大量成果。作者创制扭摆内耗仪的指导思想是辩证唯物主义的认识论,即根据事物的普遍联系的法则把在一个领域里熟悉的道理有针对性地转用到另一领域。作者还谈到了由低到高不断发展的过程,举出了创制更精密的各种类型的扭摆的几个例子。

在实验固体物理学的发展史中,新的研究工具和实验方法的发明和应用,往往能够极大地深化人们对于各种物理性质及其规律性的认识。光学显微镜的发明和应用提供了物质的组织形态和物相分布等方面的信息。电子显微镜的出现进一步扩大了微观观察的精细度,甚至于可以看到晶格象和大的原子。X射线衍射术的发明使人们能够揭示物质内部的原子和分子的几何排列情况。核物理方法以及各种巨型设备的发明为得到更深层次的物质结构信息创造了有利的条件。

固体的各种物理性质(力、热、磁、电、光)的观察和测量一方面可以提供技术上的应用,另一方面可以揭示固体中原子和电子的微观状态和运动的信息。最有效的方法是在固体上施加一种“刺激”并观察其响应。施加“刺激”的最常用方法是送进一种具有不同能量(频率)的电磁波或粒子,使它与固体发生相互作用,并观测其频谱响应,由此分析固体内部的微观状态及其运动变化。

40年代以来,另外一种有效的“刺激”方法得到了迅速发展,这就是机械振动。利用这种方法来揭示固体内部的微观状态及其运动变化已经发展为一个专门学科,即固体内耗与超声衰减。关于这个新研究领域的内容的新近情况已经作过介绍^[1-3]。

本文的目的是介绍目前广泛用于低频内耗

测量的“扭摆内耗仪”或“扭摆”,它既可以用来测定技术上的阻尼(内耗)及其有关数据,又可以提供固体内部的微观状态及其运动变化的信息。它用来施加“刺激”的方法是机械扭转振动。1947年,扭摆开始使用于内耗研究^[4],这大大促进了固体内耗这个学科的发展。1981年在瑞士洛桑召开的第七届国际固体内耗与超声衰减学术会议上,维也纳大学的舒克教授(G. Schoeck)把扭摆的发明和应用与回旋加速器的发明和应用作了对比,他说制备一台扭摆只需要几个美元。

一、古典扭摆的启迪和扭摆内耗仪的问世

在普通物理学教科书里,对于单摆、复摆、扭摆及其振动定律有详细的叙述。所谓扭摆,即在垂直线的下端悬一物体,而另一端则固定不动(图1)。把物体以悬线为轴而扭转,然后放开,则物体由于得到了动能,便开始作扭转振动。当扭角不太大时,这种扭转振动遵从简谐运动的规律。而振动的频率 f 是

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I}},$$

其中 I 是物体的转动惯量, K 是悬线的扭转常数。当悬线为丝状时,

$$K = \frac{\pi G}{2} \times \frac{r^4}{L},$$



图1 扭摆

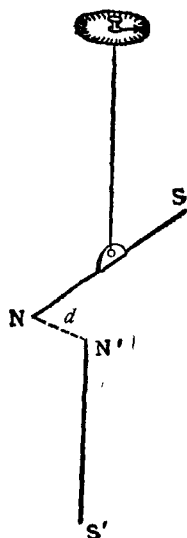


图2 库仑扭秤

其中 G 是悬线的切变模量, r 和 L 分别是悬线的半径和长度. 因此, 用扭摆可以测定悬线的切变模量 G 。

扭摆和扭动装置的来源很古老. 早在 1785 年, 法国物理学家和工程师库仑 (Coulomb) 使用扭秤 (torsion balance) 来测定磁极间的力, 从而建立了磁力定律 (见图 2). 1797—1798 年, 卡文迪什 (Henry Cavendish) 用扭动装置来测定万有引力常数 (见图 3). 为了根据扭角的大小来推知大球和小球之间的吸引力, 他用图 1 的方法求出悬丝的扭转常数 K . 1835 年, 韦伯 (W. Weber) 把试样作为一个冲击电流计的悬丝, 由测定振动振幅的衰减来计算对数减缩量. 90 年代以来, 菲普 (O. Föppl, 1923) 和诺顿 (J Norton, 1939) 先后用标准的拉伸试样来作为“悬棒”或支撑棒, 用电磁的方法来驱动试样. 这样所得到的扭转振动频率较高 (声频), 只能采用照相或其它的非目测的记录方法. 随后, 声频测量的方法得到了广泛的应用。

笔者 1945 年开始用内耗方法研究金属晶粒间界的力学性质, 当时关于这方面的研究都采用声频测量的方法. 所遇到的困难是, 由于声频的频率较高, 晶粒间界的弛豫就出现在很高的温度, 因而无法探知晶界弛豫的全貌. 要使晶

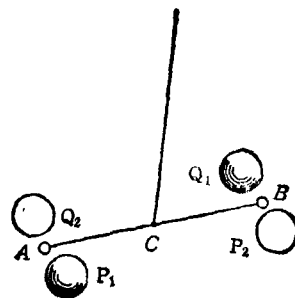


图3 卡文迪什扭转装置

界弛豫的信息出现在较低的温度, 应该用较低的振动频率进行测量. 唯物辩证法所提示的物质世界的普遍联系的原则以及鲁班发明“锯”的故事使笔者受到启发, 就想到可以把在大学里做物理实验时所得到的测量杆状金属试样的切变模量所用的扭转振动装置的原理应用到内耗测量上. 当时一位进行内耗研究多年的教授认为这种想法是不能实现的. 他的意见是, 用内耗方法研究金属晶粒间界的力学性质需要有极其准确的测量数据, 用传统的扭动装置来测量内耗只能得到定性的信息, 因为这种简单装置的外耗 (即由于外部环境而不是由于试样内部原因所引起的能量耗散) 一定很大. 笔者认为,

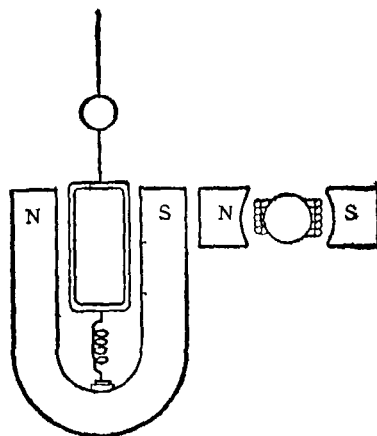


图4 圈转电流计

实践是检验真理的唯一标准, 我们应当通过实践来解决这个问题. 当时笔者的工作单位芝加哥大学金属研究所正在筹建初期, 只能暂借该校化学系的一间实验室进行工作, 各种条件都

不具备, 又是笔者一个人单独工作。但是在克服了种种困难以后, 终于设计和研制出能够满足要求的低频扭摆内耗仪。同时, 笔者还根据在大学里做物理实验时所用的转动线圈电流计的原理(见图4), 发明了可以很方便地用测量内耗和切变模量的同一根试样来测量在恒应力下的蠕变和在恒变下的应力弛豫。这一多功能的装置不但可以很方便地测量低频内耗和动态弹性模量作为温度的函数, 从而能够很方便地测出众多的物理化学过程所联系的激活能, 使内耗和动态弹性模量的宏观测量能够提供试样内部结构的信息, 还能够很方便地进行准静态测量, 就是测量在恒应力作用下的微蠕变和撤去应力后的弹性后效, 以及在保持恒应变的情况下所发生的应力弛豫, 即测定蠕变量和应力作为时间的函数并且可在各种温度下进行测量。这就能够同时测量上述各种与试样的滞弹性(anelasticity, 即在弹性范围内所发生的时间滞后现象) 有关的宏观响应, 并把它们作定量的比较。这在内耗的测量技术上是一个重要的创新, 因而这种装置的细节在 1947 年发表以后, 不胫而走, 全世界纷纷按照这个设计建立了这种装置, 大大促进了内耗研究领域的发展。1957 年, 英国的麦克伦教授 (D. McLean) 在他的名著“金属的晶粒间界”中特辟一章来介绍笔者所提出的测量方法, 并说笔者是把扭摆和扭动装置融为一体的第一人, 因而从历史的角度把这个装置命名为葛氏扭摆装置是公正的^[9]。随后, 在国际文献中都把扭摆装置称为葛氏扭摆。R. 祖贝主编的《英德法俄汉物理学词典》(王同亿等译, 原子能出版社出版, 1981 年 9 月) 第 796 页列入 “Kè pendulum” (葛庭燧扭摆) 这一词条, 这是该书列入的以中国人命名的仅有的几个词条之一。

二、创制扭摆内耗仪的指导思想是 普遍联系、广征博引、从实际出发、 为我所用

应当指出, 内耗只是滞弹性效应的各种宏
物理

观响应当中之一。这种宏观响应通常有四种: 内耗、动态弹性模量随着温度的变化、在恒应力下的蠕变(包括弹性后效)和在恒变下的应力弛豫。在滞弹性测量中, 外加的应力必须很小, 从而能够满足以下的条件: (1) 在应力撤除后必须没有永久形变, 所有的效应在一个足够长的时间内必须能够回复; (2) 所观察到的滞弹性效应对于外加应力或所引起的应变具有线性关系。因此, 内耗和动态模量必须与振动振幅无关; 每个单位的弹性应变(或瞬时应变)所引起的蠕变必须与弹性应变的大小无关; 每个单位的起始应力所引起的应力弛豫必须与起始应力的大小无关。这就是说, 滞弹性效应是一种线性效应。满足了上述的线性条件, 才能够对于所观察到的滞弹性效应做确切的解释。(关于非线性效应的情况待以后再作说明)。

笔者选用扭转的方法有以下理由: (1) 扭转方法可以很方便地用来测量全部的上述滞弹性效应, 这就易于把各种效应进行比较和相互联系; (2) 当所测量的应变或应力很小时, 扭转法在实验上较之其它方法简单得多。在所有的下述测量中, 我们调节实验条件, 并核对线性的程度, 如果有偏离的话, 也只在实验误差的范围以内。

1. 内耗和切变模量的测量

令一根装着扭转杆的金属丝状试样作自由扭转振动, 分别测量它在振动中的对数减缩量 and 振动频率就可以测出它的内耗和切变模量。所采用的内耗量度 Q^{-1} 是对数减缩量的 π 分之一。当对数减缩量很小时, 假定丝状试样的长度和半径不变, 则它的切变模量 G 就与振动频率 f 的平方成正比。

图 5(a) 是测量装置的示意图。

在图 5(a) 里, W 是直径 0.084 cm、长度 30.48 cm 的丝状试样。 P_1 和 P_2 是把试样两端紧紧夹住的两个钢制小夹头。上夹头 P_1 的把柄很紧地插入一个钢制筒管 C 里, 而 C 的顶端则插入一个硬石棉棒里并且用水泥粘附剂牢固地粘住。这石棉棒可以把试样向外传导的热量减至最少, 石棉棒的顶端扩大为圆盘状, 可把

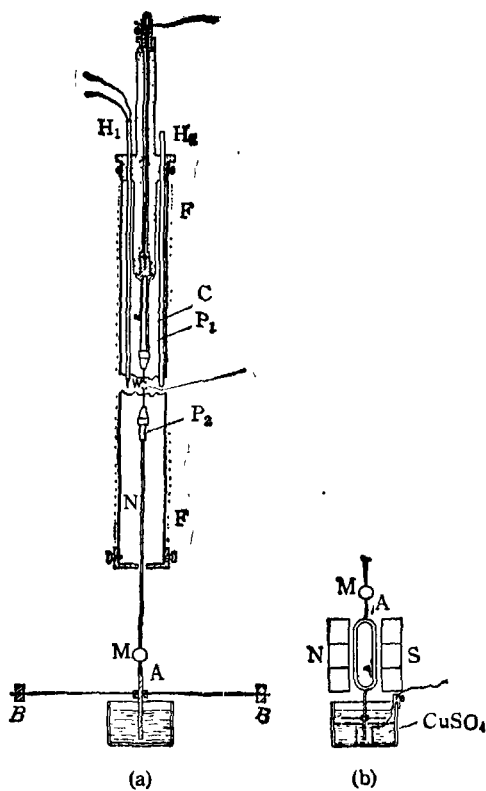


图5 (a) 扭转内耗仪; (b) 扭转线圈装置

圆盘底面的沟槽嵌入作为电炉用的钢管 FF 的顶端并从外面用螺钉固定在炉管壁上,使它不能转动。

下夹头 P_2 的把柄焊在一根粗的镍铬合金杆 N(B&S 12 号)上,杆的导热性很低,但是它的刚度在各种温度下都远高于试样的刚度。M 是附着在合金杆上的一个凹面反光镜。由狭缝透出一束光线经过反光镜而在离镜 3 m 远处的半透明标度尺上形成狭缝的清晰的像, BB 是约 20 cm 长的套在镍铬杆上的扭动杆臂,它的两端分别担着一块圆柱状软铁作为摆锤。加到试样上的总的纵向载重,包括下夹头,镍铬合金杆,反光镜以及扭动杆臂和摆锤,约为 30 g。在两个软铁摆锤的附近分别放着一块电磁铁,可以轻轻地敲打一个电键来激发试样的扭转振动。把电键放在透明标度尺的附近,观测者就能够在注视光缝在标度尺上的偏转的同时来敲打电键。镍铬杆 N 的下端嵌入一个较粗的黄铜管,而这黄铜管则浸入稠密的机器油里。调节

浸入的深度使整个悬挂系统的横振动处于临界阻尼的状态。用这个办法,在开始扭转振动以后马上就可以进行内耗和切变模量的测量。

FF 是一个电阻炉,它的构成是把 B&S 18 号镍铬丝绕在直径 3.8 cm、长度 71 cm 的无缝薄钢管上。为了使沿着炉管纵向的温度均匀,炉管两端的镍铬丝绕得密些。在 350°C 时,沿着炉管的 38 cm 长的区域里的温度变化不大于 2°C。试样就是放在这个均匀温度区以内。另外,由于试样的两端已经有效地与外界隔热,所以整个试样的温度是均匀的。炉管的下端用隔热板封住,板的中部留着一个圆孔,刚好使合金杆 N 伸出炉外而不与隔热板接触。

把一副铬-铝热电偶从 H_1 孔引入炉内以测量温度,从 H_2 孔把盛着许多与试样相同的短段试样的硬玻璃管引入炉内。在测试当中,可以在一定的时间取出短段试样进行金相观察或其他对比实验。也有时把氮气或惰性气体从 H_2 孔射入炉内,以避免试样在高温下发生过度的氧化。

可用通常计时的方法来测量振动周期。在放上摆锤 BB 以后,试样的振动周期约为 1.2 s,因而很容易用目测的方法来测定光缝在标度尺上的偏转。测定对数减缩量时是在一段适当的时间里测出连续的振动振幅的数值。在所有温度下进行的所有测量中,所用的最大的振动振幅(在距反光镜 3 m 远的标度尺上)小于 4 cm。如试样的直径为 0.084 cm,长度为 30.48 cm,则这个振幅相当于在试样表面上的最大切应变为 1×10^{-5} 。把连续的振幅值画在半对数纸上作为振动序数的函数,得到一根直线。这表示,在所采用的实验条件下,对数减缩量与振动振幅无关。

2. 在恒应力下的蠕变和在恒应变下的应力弛豫的测量

设计了一种利用圈转电流计的原理的简单技巧来进行这两种测量[参看图 4 和图 5(b)]。测试的试样作为圈转电流计的悬丝。由于实验只是在低应力水平下进行的,所以可把通过“电流计”的电流作为加到试样上的切应力的量度,

把“电流计”的偏转作为切应变的量度。这个装置的大部分与用来测量内耗和切变模量的扭摆相同，只是在A处把扭转杆臂和摆锤移去，换上一个具有适当阻尼装置的可动线圈。其示意图如图5(b)所示。可动线圈的绕制是把B&S 38号铜线在尺度为 1.9×6.0 cm的一个卵形铜框架上绕约700圈，线圈的总电阻约为150 Ω ，所用的永久磁铁是把三个马蹄铁架在一起而成。在可动线圈的下端引出一根铜杆，这铜杆成为电解电池的一个电极，另一个电极是围在铜杆外面的铜圆筒。电解电池的电解液是饱和的硫酸铜溶液，这个电解电池提供了一个可动的电流接头。硫酸铜溶液对于试样的扭转振动所引起的阻尼是可以忽略的。由于试样在高温下的膨胀而使铜杆伸入硫酸铜溶液里增多，所引起的电解电池的内阻的变化与整个线路中的总电阻相比也是可忽略的。因此，我们在比较不同温度下的测量结果时不必顾虑由于试样的胀或缩所引起的效应。在硫酸铜溶液上浮着一层重机油，铜杆上套着的横向板就浸在重机油里，横板的取向与标度尺的平面垂直。这个装置可使试样的扭转振动以及与标度尺平面平行的横向移动都达到临界阻尼状态。加到试样上的总的纵向载重，包括可动线圈和阻尼装置，约为30 g。

测量恒应力下的蠕变时，施加一个恒扭力矩（即通过“电流计”线圈的恒电流）到试样上。用目测来测定蠕变，在施加扭力矩一秒钟后就能够开始测量。测量在恒应变下的应力弛豫时，为了保持标度尺上的偏转不变，用增加电阻的方法来减小通过“电流计”线圈的电流。

三、实践出真知

笔者用上述这种十分简单的仪器装置进行了99.991铝的晶粒间界的力学性质的研究。选定了铝作为研究的主要工作试料的主要理由如下：(1) 铝的再结晶温度较低，因而在较低温度下就能够得到可控制的晶粒大小；(2) 铝具有高度的弹性各向同性，因而即便晶体取向在测

量中发生变化，力学行为也不至于发生显著的变化。笔者从1945年开始创制扭摆内耗仪和扭动装置，在1946年9月就发现了多晶铝的晶粒间界内耗峰（作为温度的函数）。这个内耗峰只在多晶体中出现而在单晶体中不出现。它不但在多晶铝中，也在多晶镁中出现，因而它是一种普遍的现象，一系列的实验结果肯定地证明了晶粒间界具有粘滞性质，并且算出了晶界粘滞系数随着温度而变化的数学表达式。把算出的粘滞系数外推到铝的熔点温度时与关于铝晶体在熔点温度的实验值相合。另外，把用扭摆和扭动装置对于99.991多晶铝进行四种滞弹性效应的结果进行换算，发现它们可以用一根综合曲线来表示，由四种方法所得到的晶粒间界粘滞滑动弛豫强度之值相同，并且与理论上所得到的计算值相合。这正是内耗权威甄纳教授（C. Zener）关于滞弹性的假说所要求的，因而对于滞弹性假说是一种极强烈的支持。甄纳在笔者的工作于1947年4月15日出版的《物理评论》（*Physical Review*）上发表以后，立即提出了滞弹性的理论，并于1948年出版了他的经典名著《金属的弹性和滞弹性》^[6]。从这种意义上来说，关于铝的晶粒间界的工作可以说是奠定了滞弹性内耗理论的基础。

1949年，琴和查尔莫（R. King, B. Chalmers）在《金属物理的进展》一书中所写的关于晶粒间界的评述性论文中，用极大的篇幅介绍了笔者关于铝的晶粒间界内耗的研究工作，认为这是研究在小形变下晶粒间界的粘滞性质的最完整的系列实验（文献[7]第146页），对于晶粒间界具有粘滞性质提出了肯定的结论（文献[7]第148页）。他们详细介绍了这些实验观测，认为这些实验是唯一的能够把晶界本身的性质与晶界对于试样所发生的影响二者截然分开的定量工作，因而是一个重要的进展。1947年以后，国际上众多的实验室都纷纷重复这项实验和开展进一步的工作。著名的金属物理大师莫特教授（N. F. Mott）亲自写信祝贺，并且根据笔者的实验结果，在1948年提出了晶粒间界“小岛模型”^[6]，根据笔者的数据算出每次

涨落当中所“熔化”的原子的数目。随后，笔者最先提出晶界滑动是一种扩散过程，测出了有关的激活能，并且提出了晶粒间界“无序原子群模型”^[9]。1957年，麦克伦教授强调指出(文献[6]第17—18页)，在关于晶粒间界的概念的发展史中，莫特的“小岛模型”和笔者的“无序原子群模型”占有重要位置，因为它们能够解释一两层原子厚度的间界怎么能够在高温下发生相对滑动的最早的理论。

四、不断前进，不断发展

一个很值得令人深思的问题是，为什么扭摆和扭动线圈装置这样众所周知的简单设备经过1947年的工作以后会如此普遍地被全世界所采用？据初步了解，用扭摆作为主要仪器所发表的论文已经是千篇以上。固然这些年来扭摆经过了各种改进，特别是由目测的方法改进为照相、描绘、光电记录以及其它的方法，近年来还发展成为自动记录和自动控制的正扭摆和倒扭摆(见图6)，但是它们的基本形式还保持

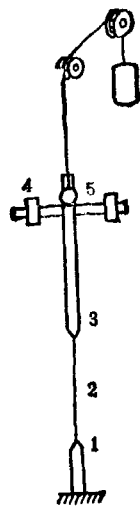


图6 倒扭摆

了1947年的设计。我们认为，一个基本原因是通过1947年的实践，已经令人信服地证明了用扭摆可以非常灵敏地得出定量的结果。例如，有人认为用扭摆测内耗时的背景内耗一定很

高，但是我们证明了即便不抽真空也可以得到 10^{-5} 数量级的内耗值，这对于绝大多数的内耗现象来说已经是足够低的。也有人怀疑扭摆的下摆杆以及摆锤的纵向拉力将影响内耗的测量结果，但是我们用实验指出，即便把现用的纵向载重增大七倍，仍然得到相同的结果。1947年关于铝的晶粒间界所得到的高度重复的定量结果说明用扭摆测量内耗是可靠的。扭摆固然是一个古老的装置，但是一旦被认真地应用到内耗研究上，并且证明是行之有效的；又因为它构造简单，易于操作，所以一旦被广大的科学工作者所掌握，便在各个方面发挥了巨大的威力。1947年以来，扭摆内耗仪和扭动装置不但被大量地用于晶粒间界的研究，也广泛地用来研究点缺陷弛豫、位错阻尼、相变和扩散以及非晶态物质和高分子的研究，大大促进了低频内耗研究的发展。

在扭摆内耗仪的应用中遇到的一个重要问题是不容易测量极高的内耗。用扭摆测量内耗的方法一般是自由衰减法，即把试样激发作扭转振动以后测量试样在自由振动中的对数减缩

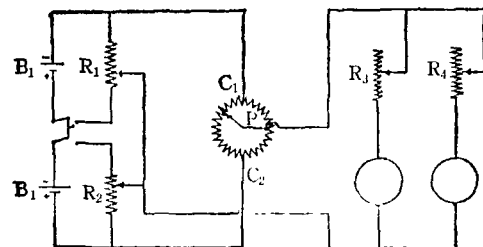


图7 强迫振动法测定内耗的装置

量。如果内耗过大(例如大于0.1)，则自由振动的次数太少，不容易进行准确的测量。为解决这一问题，笔者在1949年与一位实验员一起^[10]研制了用强迫振动法测量内耗的简单装置，即测量周期性外加应力与周期性应变之间的相角差。由于当时的微电子技术还不发达，用电学方法测量这种相角差还是很困难的。笔者根据“普遍联系”的原则，又把扭转线圈装置[见图5(b)]的简单装置用到这个问题上来

(图 7)。笔者用了两个并联的扭转线圈装置，一个叫做应力计，它的悬丝的刚性很大，阻尼极低，因而把周期性电流输入它的线圈后，标度尺上的偏转就反映着外加应力的周期性变化；另一个叫做应变计，它用试样作悬丝，因而标度尺上的偏转就反映试样的应变的周期性变化。用一个马达驱动的圆形电位计来产生锯齿状的周期性电流，把这电流分别输入应力计和应变计的线圈。这样，观测应力计和应变计在标度尺上的偏转之差值就能够算出应力与应变的相角差。用这个简单装置可测得的最低内耗约为 10^{-3} ，已经测定的最高内耗是 0.55。这种装置很适用于高阻尼材料、高分子和非晶态材料的测量。

最近，我们在合肥已经研制了用电子计算机控制的多功能内耗仪，可用自由衰减法、强迫振动法以及准静态方法进行测量，它的基本原理还是扭摆和扭动线圈装置。

扭摆内耗仪的另一个重要发展方向是测量在动态过程中的内耗，例如在范性形变、高温蠕变和疲劳载荷过程中以及在相变过程中的内

耗。1957 年，笔者与几位青年学者一起^[11]改进了早期用实际拉伸试样进行阻尼试验的方法，研制了可用于测量线状试样在范性形变过程中的内耗的“中间扭摆”(图 8)。

内耗实验是在一架小型拉力试验机上进行的。内耗测量装置与普通扭摆装置不同之处是试样 W 的中间部分套着一个弹性很高的夹头 P_0 ，并且在这夹头上焊着一个不锈钢的横杆。横杆的两端向下弯曲从而扭摆杆和摆锤 BB 是坐落在电炉的外边，如图 8 所示。这样就可以在试样周围套上电炉 FF 或者致冷装置，以便于进行高温或低温测量。

图 8(b) 是扭摆的侧面图，由图可见反光镜 M 并没有坐落在试样的轴线上。但是，从反光镜 M 到读数标度尺的距离远大于 M 到试样轴线的距离，所以，由此所引入的误差是可忽略的。另外，在拉伸过程中，试样的截面变小，但由于夹头 P_0 的弹力作用，它仍然能够把试样紧紧夹住。我们用这台仪器进行了许多金属和合金的实验，并且根据位错动力学的观点对所得的结果进行解释。新近，我们还在合肥研制了高温蠕变内耗仪和疲劳超声内耗仪。

如上所述，扭摆和扭动线圈装置的应用对于滞弹性内耗(线性内耗)研究的发展起了关键性的作用，这已经是历史的定论。1949 年，笔者用扭摆在经过冷加工和部分退火的铝铜替代式固溶体中发现了反常振幅效应(即内耗随着振动振幅的增加而减小)的非线性内耗^[12]。这是突破经典的滞弹性内耗(线性内耗)的框架的一个很重要的开拓性发现。有人提出，用扭摆研究非线性内耗是否适宜的问题，因为用丝状试样进行测量时，试样的应变振幅随着到试样轴线的距离的减小而减小，最后变为零。由于内耗是一种体积效应，测得的内耗只是各种应变振幅的平均值，所以它对于扭转振动的最大振幅(试样表面的振幅)的依赖关系并不能严格地代表材料内耗对于振幅的依赖关系。但是我们计算的结果，如果试样半径是 0.4 mm，则表面层 0.1 mm 深的材料所产生的内耗就约占全部内耗的 70% 以上^[13]。因此，所观测到的试

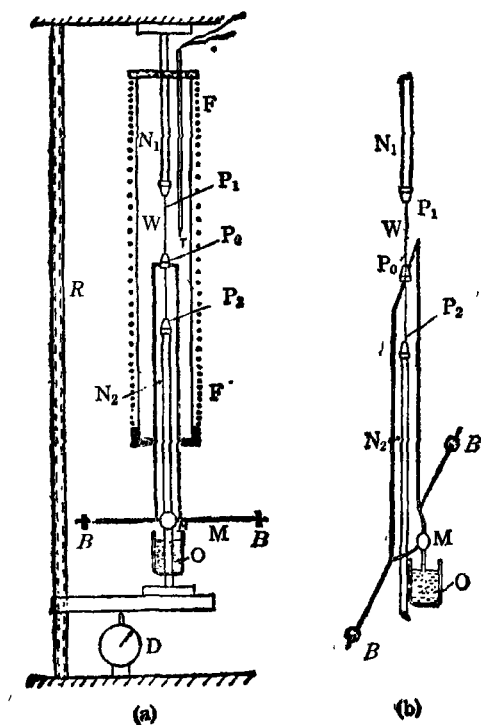


图 8 中间扭摆

样的内耗基本上是试样表面一层材料的贡献。为了把内耗测量所得的内部信息与电子显微镜的观察结果作比较,我们最近也用片状试样进行扭摆测量,这样就可以在进行内耗测量以后把试样减薄,进行电镜观察。应该指出,在片状试样进行扭转振动时,试样各部分的应变振幅是很不均匀的,这种情况较之线状试样更为复杂,从而只能得到定性的或半定量的结果。

在80年代,我们在新建的中国科学院固体物理研究所(合肥)与青年同志们一起,用简单的扭摆装置对于晶粒间界内耗和反常振幅效应的位错内耗进行了深入的系统研究,得到了大量的新成果^[14],体现了我国内耗与固体缺陷研究的拼搏、奋发和腾飞^[14]。这说明用简单的仪器设备也能够得到重要的成果。在我国目前的情况下,用尽可能的简单仪器设备来促进出成果、出人才以及加速对青年同志的培养,是尤其重要的。关键的问题是要运用辩证唯物主义的科学方法来指导科研题目的选择、技术路线的制订以及实验仪器装备的创制。这也是要立足于国内,建设有中国特色的社会主义和振兴我

国科学事业的一项重要措施。撰写本文的目的就是从扭摆内耗仪的发明和应用这一侧面来说明这个问题。

- [1] 葛庭燧,物理, 16(1987), 547, 536.
- [2] 葛庭燧,物理, 17(1988), 65.
- [3] 沈惠敏、朱劲松,固体物理实验方法,王华霞、吴自动主编,高等教育出版社,(1990), 146.
- [4] T. S. Kê, *Physical Review*, 71 (1947), 533.
- [5] D. McLean, *Grain Boundaries in Metals*, The Clarendon Press, (1957).
[中译本: D. 麦克伦著,杨顺华译,金属中的晶粒间界,科学出版社,(1965).]
- [6] C. Zener, *Elasticity and Anelasticity of Metals*, University of Chicago Press, (1948).
[中译本: C. 甄纳著,孔庆平、周本濂、马应良译,金属的弹性和滞弹性,科学出版社,(1965).]
- [7] R. King and B. Chalmers, in: *Progress in Metal Physics*, Interscience Publishers, (1949), 127.
- [8] N. F. Mott, *Proc. Phys. Soc.*, 60(1948), 391.
- [9] T. S. Kê, *J. Appl. Physics*, 20(1949), 274.
- [10] T. S. Kê and M. Ross, *Rev. Scientific Instruments*, 20(1949), 795.
- [11] T. S. Kê et al. *Science Record*, New Series, 1 (1957), 37.
- [12] T. S. Kê, *Physical Review*, 78(1950), 420.
- [13] 葛庭燧、张进修,物理学报, 21(1966), 1711.
- [14] 葛庭燧,物理通报, No. 7 (1990), 1.

Story of the Torsion Pendulum—a Simple Device with Important Uses

Ge Tingsui (T. S. Kê)

(Laboratory of Internal Friction and Defects in Solids, Institute of Solid State Physics, Academia Sinica, Hefei 230031)

Abstract

The argument that important results can be obtained by using simple equipment is put forward from the aspect of the discovery and application of the torsion pendulum for internal friction measurement. The development of the torsion pendulum for internal friction measurement, inspired by the orthodox torsion pendulum commonly used in physical laboratories is described in great detail as well as numerous important results obtained by using this simple apparatus. The fundamental idea in developing the torsion pendulum for internal friction measurement is the theory of dialectical materialism, i. e. to convert well-known knowledge in one field to another field according to the universal rule of drawing inferences about other cases from an instance. Furthermore, following the viewpoint of continuous development from a low to a high level, the author describes examples of various versatile apparatus derive from different versions of the torsion pendulum of high precision.