

固体内耗与超声衰减

葛庭燧

(中国科学院固体物理研究所, 合肥)

一、弹性体的特征

对于一个弹性体, 应力 σ 和应变 ε 遵从胡克定律: $\sigma = M\varepsilon$, M 是弹性模量; 或 $\varepsilon = J\sigma$, J 是顺度. 在一般情况下, 对于任意的形变来说, 应力和应变应该用二级张量来表示. 上述的胡克定律是标量的形式, 只适用于简单的形变模式, 例如纯切变, 单轴拉伸或流体静压力形变. 这时 M 是切变模量 G 、杨氏模量 E 或体积模量.

理想的弹性行为要满足四个条件: (1) 应力对于每个应力水平的响应是线性的; (2) 上述的响应是可以完全回复的; (3) 上述的响应是瞬时达到的 (对于一个无限小的试样单元来说, 因为声速是有限的); (4) 应变和应力互为单值函数. 由此可见, 完全弹性固体里的应变是外加应力的唯一函数, 应变对于时间的依赖关系完全决定于应力对于时间的依赖关系, 即应变总是与应力同位相, 因而在试样里就没有能量损耗(内耗).

二、内耗(包括超声衰减)及其测量原理

振动着的固体, 即使与外界完全隔绝, 其机械振动也会逐渐衰减下去. 这种使机械振动能量不可逆地耗散为热能的现象, 称为内耗, 即由于内部原因而引起能量损耗. 对于高频振动, 这种能量损耗有时称为超声衰减, 它与内耗有一个换算因数.

引起能量损耗的原因是出现了非弹性形变, 在机械振动中产生非弹性形变的根本原因是应变落后于应力. 现在讨论一种较简单的情况, 即加到系统上的力是周期性的,

$$\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t}, \quad (1)$$

其中 σ_0 是应力振幅, $\omega = 2\pi f$, f 是振动频率. 在强迫振动的情况下, 假定所引起的应变是具有同样频率的周期性变化, 则

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)}, \quad (2)$$

其中 ε_0 是应变振幅, ϕ 是应变落后于应力的角度. 如果 $\phi \neq 0$, 则 ε/σ 是一个复数量, 可称之为复顺度 J^* , 它一般是 ω 的函数

$$J^*(\omega) \equiv \varepsilon/\sigma = |J|(\omega) e^{-i\phi(\omega)}. \quad (3)$$

可以把(2)式写成

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 - i\varepsilon_2) e^{i\omega t}, \quad (4)$$

其中 ε_1 是 ε 的与应力同位相的分量, ε_2 是 ε 的与应力的位相差为 90° 的分量. 用 σ 除, 得

$$\begin{aligned} \varepsilon/\sigma &= \varepsilon_1/\sigma_0 - i(\varepsilon_2/\sigma_0) \\ &= J_1(\omega) - iJ_2(\omega). \end{aligned} \quad (5)$$

由此可见

$$\tan\phi = \varepsilon_2/\varepsilon_1 = J_2/J_1. \quad (6)$$

同样, 可以假定 ϕ 是应力领先应变的角度, 即

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{i\omega t}, \quad (7)$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{i(\omega t + \phi)}. \quad (8)$$

这时的复数量 σ/ε 称为复模量 $M^*(\omega)$, 而

$$M^*(\omega) \equiv \sigma/\varepsilon = |M|(\omega) e^{i\phi(\omega)} \quad (9)$$

$$= M_1(\omega) + iM_2(\omega), \quad (10)$$

因而得到

$$\tan\phi = M_2/M_1 = J_2/J_1. \quad (11)$$

上述这种在机械振动中应变落后于应力的现象, 在其它物理振动过程中也有相对应情况. 可以把应力叫做强度量, 应变叫做广延量. 在电效应中的强度量是电场强度, 广延量是电极化强度, 比例系数是电极化率; 在磁效应中的强度量是磁场强度, 广延量是磁化强度, 比例系数是磁化率. 在广延量落后于强度量的情况下

都会出现滞后回线,回线所包含的面积就是在各种振动过程中每振动一周在单位体积的试样中所耗损的能量 ΔW ,而

$$\Delta W = \phi \sigma d\varepsilon = \pi J_2 \sigma_0^2. \quad (12)$$

在振动周期的任一位相时,每个单位体积内所具有的能量是 $\int \sigma d\varepsilon$,是从振动开始一直积分到所论及的位相。因此,单位体积所储存的最大能量是

$$W = \int_{\omega t=0}^{\pi/2} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} J_1 \sigma_0^2. \quad (13)$$

由此得到

$$\Delta W/W = 2\pi(J_2/J_1) = 2\pi \tan\phi. \quad (14)$$

我们把 $\Delta W/W$ (表示为百分比)叫做阻尼本领,它是内耗的最基本的测量方法。我们用 $\tan\phi$ 作为内耗的通用的量度,两者的关系是

$$\tan\phi = 1/2\pi(\Delta W/W). \quad (15)$$

对于具有完全弹性的试样, $\phi = 0$,因而内耗是零。

测量内耗的方法有许多种,概括起来有五种类型:

(1) 在内耗较小时,可用共振法,从共振曲线的半宽度求得内耗;在自由衰减的情形下,可从对数减缩量算出内耗

(2) 在内耗较大时,可用强迫振动法直接测量应变落后于应力的相角 ϕ ,这适用于振动频率远小于系统的共振频率的情形。

(3) 在外加应力(或应变振幅)较大时,可直接由滞后回线测定 $\Delta W/W$ 。

(4) 对于频率较高的振动(1MHz以上),可从应力波在试样中传播时的衰减系数求得内耗(超声衰减)。

(5) 在有的情况下,例如线性内耗或滞弹性内耗,在静力试验中所得的数据可以与动态试验中所得的数据相互换算,因而可用静力试验的方法求得内耗。关于非线性内耗与静力试验数据的相互换算问题,还有待进一步研究。

三、内耗的物理本质及其类型

内耗的产生是由于试样内部存在着一些内

部变量,它仍可以与短程或长程序参量有关,或者与描述试样中的原子状态、电子分布或磁畴排列的状态有关。在交变应力的作用下,这些内部变量由一个平衡值过渡到另一平衡值的过程以及引起应变落后于应力的情况,决定于应力或应变状态,并且遵循着一定的方程。出现在这些方程中的参量与应力-应变方程中的有关参量的关系就把内耗的唯象理论与物理本质联系起来。因而可以应用内耗测量来探测物质内部的分子、原子、声子、电子等的存在状态及其运动变化。另外,内耗对结构非常敏感,它能很灵敏地反映固体内部(或表面)的各种缺陷的结构、组态及其相互作用的微观过程。物体中存在着大量的内耗源,每个内耗源都可以产生一条机械振动能量吸收谱线,各谱线总起来可以叫做机械振动吸收能谱(声吸收谱),这是广义的固体能谱的一个分支。

内耗这个研究领域是在四十年代发展成为一个专门学科的。四十几年来,内耗的研究由于低频扭摆的广泛应用和逐步采用了自动化和微机程序控制而得到了迅速的发展。现在,内耗的研究对象已由晶体(金属、半导体、绝缘体)扩充到高分子和非晶物质(玻璃态),研究的范围由试样的内部扩充到试样的表面,研究的层次由原子迁动扩充到电子和声子散射。近几年来,由于超声衰减测量技术的发展,内耗的研究已经渗入到低温物理和量子声学的领域,研究的层次更为深入。

测量内耗的两个主要变数是振动频率和振动振幅,因而可以测量内耗作为频率或振幅的函数。在纯粹的热激活过程中,内耗与频率和温度有关,因而也可以测量内耗作为温度的函数,得到温度内耗峰。在线性内耗的情况下,内耗与振幅无关,这种内耗称为滞弹性内耗,这是迄今研究得最多并且有了系统的定量理论的内耗。对于非线性内耗来说,内耗可以随着振幅的增加而增加(正常振幅效应),也可以随着振幅的增加而减小(反常振幅效应),因而可以出现一个振幅内耗峰。振幅内耗峰的发现是内耗研究领域的一个重要的推进,它的实验工作有

待进一步深入, 它的理论工作有待进一步发展。

四、内耗和超声衰减研究的新近发展

国际固体内耗与超声衰减学术会议每四年举行一次。第七届、第八届国际固体内耗与超声衰减学术会议已分别于1981年和1985年在瑞士洛桑和美国厄尔班纳举行, 第九届国际固体内耗与超声衰减学术会议将于1989年在我国举行。我国的内耗研究工作自建国以来逐步得到发展, 有的研究课题特别是低频内耗方面, 处于国际领先地位。1980年在北京举行了一次全国内耗工作会议, 1981年在北京举办过一次内耗学习班, 1984年在合肥举行了第一次全国内耗学术会议, 出版了论文摘要集, 收入了34个单位提出的论文摘要101篇。论文内容: 点缺陷(10篇), 位错(8篇), 晶界(9篇), 相变(15篇), 非晶态(10篇), 高聚物(5篇), 其它类型的内耗(12篇), 应用(17篇), 仪器(16篇)。这基本上包括了内耗研究领域的各个主要方面。一种可喜的现象是内耗研究用于生产实际问题受到重视, 这包括高阻尼材料, 稀土的应用和合金强度等方面。国内自制各种类型的内耗测量仪器的工作得到迅速发展, 这包括自动倒扭摆内耗仪、强迫振动变频扭摆内耗仪、微机控制红外辐射加热内耗仪、静电激发声频内耗测量装置和疲劳内耗仪等的研制和应用, 有的内耗仪已达到国际先进水平。

1984年的全国固体内耗学术会议为我国参加1985年6月在美国举行的第八届国际固体内耗与超声衰减学术会议做了准备。我国被选入这届国际学术会议的论文集里的论文共有28篇(包括邀请报告一篇)。在28篇论文中, 有中国科学院固体物理研究所(合肥)七篇(位错、晶界、高阻尼合金、金属玻璃), 中山大学四篇(界面动力学, 包括相变过程界面、有公度-无公度相变界面和非晶态界面), 中国科学院金属研究所(沈阳)三篇(d HCP-FCC转变、位错、疲劳), 武汉大学三篇(马氏体相变、金属玻璃、

物理

磁后效), 南京大学二篇(铁电畴壁、正常和无公度转变), 北京钢铁学院物理系二篇(点缺陷、稀土), 东北工学院二篇(晶界、稀土), 中国科学院上海冶金研究所(点缺陷), 中国科学院物理研究所(非金属超声), 冶金工业部包头冶金研究所(位错), 哈尔滨工业大学(马氏体相变), 苏州大学(金属玻璃)各一篇。

1986年10月, 中国物理学会内耗与超声衰减专业委员会与1985年7月新成立的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联合在合肥举办了内耗讲习班, 参加听讲的约90余人, 他们大多数是研究生和从事内耗工作有一定经验的专业人员。学习班讲课共48学时, 安排了各种内耗仪的实验操作, 并印有较详细的讲义。

国内目前开展内耗研究和应用以及进行内耗仪器研制的单位约有三十几个, 经常进行内耗研究工作的约有以下几个单位:

1. 中国科学院固体物理研究所(合肥)内耗研究情况

这个所的内耗研究人员较多, 内耗研究设备也比较齐全。几年来在晶界内耗、点缺陷与位错的交互作用所引起的非线性反常内耗方面得到一些新结果, 在Mn-Cu, 高阻尼合金和自动倒扭摆、疲劳内耗仪和多功能扭摆仪的研制方面做了一些工作。1987年重点研究课题有: 晶界偏析动力学的研究(Al-Cu, Al-Mg, Fe-P, Fe-稀土), 界面内耗机理的研究(竹节晶界峰、多边化间界峰、纯铝单晶峰), 疲劳内耗的研究(Al, Al-Cu, Al-Mg), 非线性内耗的研究(Al-Cu, Al-Mg), 高阻尼合金材料的研究(Mn-Cu, Al-Zn, Al-Si), 高阻尼高分子材料的研究, 新仪器设备的研制和应用(多功能扭摆、微机控制静电激发声频内耗仪)。另外, 该所还有三个课题组用内耗作为辅助手段进行金属玻璃的结构弛豫、金属的高温蠕变和金属中的氢的研究。在金属玻璃方面, 发现了在 T_g 和 T_x 温度附近有一个或多个内耗峰(过程内耗), 研究了内耗峰与结构弛豫和晶化的关系; 1986年又发现了主要与 T_g 有关的可逆性内耗

峰并研究了它的特征和出现条件,这对于玻璃转变提供了重要信息.在金属高温蠕变内耗方面,完成了真空蠕变内耗仪的研制,研究了纯铝在高温蠕变过程中的内耗,并用内耗方法研究了铜的蠕变断裂过程.在金属含氢内耗方面,研究了铁中含碳或钛对于铁的冷加工内耗峰(S-K弛豫)的影响.

这个所的内耗与固体缺陷开放研究实验室还接受了所外申请的15个内耗研究课题,其中一部分是合作项目,包括两个国际合作项目.

2. 南京大学物理系内耗研究情况

1982年以来该校主要研究了马氏体相变内耗和界面内耗,提出了与可动界面及软模有关的内耗理论.还建立了在测量内耗的同时能够实时观察界面变化的设备,从而发现了二级相变过程的低频内耗峰和畴界引起的非相变过程的静滞内耗峰,并在三维合金中观察到无公度相变产生的公度错,成功地解释了无公度相变引起内耗的机制.最近还开展了高分子共聚物网络(castor oil/TDI+HEMA)的 α 弛豫及阻尼机制研究.

3. 中山大学物理系(广州)内耗研究情况

两年多以来该校主要研究了相变过程中运动界面引起的内耗,包括NiTi合金中应力诱导无公度-公度转变,超弹性NiTi合金中应力诱导相变引起的反常应力弛豫以及FeNiPB变温晶化转变,提出了相变过程中内耗的界面动力学模型.还研究了磁畴壁运动引起的内耗及Cu在形变过程中的内耗.

4. 中国科学院上海冶金研究所内耗研究情况

1982年以来该所主要从事铁基合金的点缺陷内耗研究,先后在Fe-Ti-N, Fe-V-N, Fe-Al-N, Fe-Ni-C等合金中发现了一些新的s-i交互作用内耗峰,并对内耗峰机制提出看法,认为Fe-V-N合金的87°C内耗峰是沉淀相引起的,而不是过去公认的由于s-i交互作用引起的.还用内耗方法研究了汽车薄钢板的深冲性能,得到含磷能改善深冲性能的信息.发展了Fe-11型高阻尼合金钢及铸铁和铝合金的高阻尼材料,并应用到实际中去.

5. 北京钢铁学院物理系内耗研究情况

用不同稀土含量的纯铁和铁合金进行内耗测量,在700°C发现一个内耗峰,认为这可能是溶质晶界内耗峰.研究了稀土元素对于16Mn钢、铝和铁磷合金,以及磷和钒对于铁的晶界内耗的影响.研究了氢在钼箔中的扩散,测出了钼中被氧或氮所俘获的氢的俘获焓(0.13eV).研究了稀土元素对铁中的氢致冷加工内耗峰的影响.研究了应力对于NiTi合金在相变过程中的内耗和形状变化的影响.

6. 中国科学院金属研究所(沈阳)内耗研究情况

测量了钨丝在80—700K的内耗和相对切变模量及其变化规律,提出了钨由FCC到double d HCP的相变机理.研究了范性形变对于Ta-H合金的内耗的影响.认为在加工后的钼试样中充氢所出现的内耗峰是由于氢化物淀集在位错上所引起的.在疲劳过程中测量几种合金钢的超声衰减的变化时发现它与疲劳裂纹长度的变化之间有联系,提出了用位错弯结脱钉模型去进行解释.

7. 武汉大学物理系(武昌)内耗研究情况

该校研究了形状记忆Ni-Ti和CuZnAl合金的马氏体相变的稳定化效应及预马氏体转变.测量了金属玻璃FeNiSiB和FeNiMoSiB在结构弛豫和晶化过程中的低频内耗.认为含微量氮的铁试样在350—480K所出现的磁弛豫谱是由于亚稳的Fe₃N相变所引起的,在冷加工试样中在430K附近观察到一个磁冷加工峰.

8. 东北工学院(沈阳)内耗研究情况

该校在冷加工Ti-O和Ti-2.5Cu-O合金中,观察到出现在170°C和180°C的两个内耗峰.研究了稀土元素在纯铝中的分布状态对于晶界内耗的影响,认为当RE(稀土)<0.01%时,稀土元素作为溶质原子而偏析到晶界上使晶界内耗降低,但当RE含量达到0.05%时,RE就形成共晶化合物,从而使晶界峰高不再变化.建立了一个能表示晶界内耗的方程,其中包含着各种微观参量,用这个方程经过计算机去拟合晶界内耗的实验曲线,可以从一根曲

线得出晶界激活能及其分布宽度和 τ_0 及其分布宽度等九个参量。

9. 上海交通大学材料科学系内耗研究情况

该校已研制成功微机控制红外辐射聚焦加热可以快速变温的倒扭摆(待鉴定)。研究了 Hg-Cd 合金和 18CrNiWA 钢的贝氏体相变内耗和 CuZnAl 合金的贝氏体预相变内耗,用成核理论对实验结果进行了解释。

10. 中国科学院物理研究所(北京)内耗研究情况

该所用 10—250MHz 的超声测量了 α -LiIO₃ 晶体在静电场作用下的超声衰减。实验发现,沿着 α -LiIO₃ 的 c 方向的纵波超声衰减随着沿同方向的外加静电场的提高而增加,整个过程表现出一种弛豫行为,而对于切变波的衰减则与外加静电场无关。这些结果可以根据纵波与迁移离子的交互作用进行解释。

11. 四川大学物理系(成都)内耗研究情况

该校认为在钨铌合金中观察到的 170℃ 内耗峰是氧原子在铌原子邻近的扩散所引起的,而在扭转变形后在低温观察到的两个内耗峰则分别是由于刃型位错弯结对的形成和点缺陷与位错的交互作用引起的。研究了超高强度弹性合金 Ni₁₆Co₉Mo₃TiAl 马氏体时效钢的低频和声频内耗。研究了金属玻璃 Fe₄Co₂₂V₂Si₈B₂₀ 在结构弛豫和晶化过程中的低频内耗,并分别用局域单元切变变换模型以及晶核界面的运动机制进行解释。

12. 中国科学院化学研究所(北京)内耗研究情况

该所研究了环氧树脂的化学结构、形态学及其复合材料界面结构与 T_g 转变内耗峰位置和形状的关系,提出了环氧/玻璃纤维复合材料界面弛豫内耗峰各向异性的唯象理论。研究了聚氨酯热塑弹性的化学结构、形态学及填充复合材料界面与内耗的关系,为制备宽频谱高阻尼材料打下了基础。研究了力学弛豫与介电弛豫的相关性,以及热释电流(thermal stimulated current)与内耗谱的相关性,为进一步研究聚合物弛豫机理打下了基础。

物理

13. 中国科学院长春应用化学研究所内耗研究情况

该所完成了“50 万伏锦海江送电线路阻尼间隔棒用橡胶材料的研究”,已在全国推广应用。完成了“1511 型包覆式节能塑料皮结的研究”已在各地推广应用并向泰国大批供货。所研制的两种阻尼胶已在火箭上试用,减振和隔振性能良好。最近尝试研究了非晶态金属玻璃的内耗与转变,并正在进行高聚物摩擦点内耗模型和高聚物多组分体系的互溶性与阻尼性能的研究,以及高分子多孔材料吸声机理的研究。

14. 哈尔滨工业大学金属材料及热处理教研室内耗研究情况

该校发现了各种状态的 30CrMnSi 钢的高温回火脆性的出现总是伴随着 Köster 内耗峰高的下降,说明这种脆性的产生与在回火后慢冷过程中,从 α 相在时效过程中析出的 Fe₃C(或 N) 质点对位错的钉扎作用有关,并认为 McMahan 等人的晶界偏聚理论只适用于解释在高温下长时间暴露所获得的脆性。研究了 18-8 型不锈钢中形变奥氏体内耗峰的分解和渗氮与形变渗氮对工业纯铁力学性能和内耗的影响。

15. 其它单位内耗研究情况

中国科学技术大学声学教研室在超声仪器研制方面做了一些工作,并用超声衰减进行了快离子导体的研究。冶金工业部包头冶金研究所通过对 Fe-P 合金的 Snoek-Kê-Köster 内耗峰的研究指出, P 对于内耗峰有显著的影响。云南大学对于生物滞弹性开展了一些工作。还有一些单位在内耗仪器研制和内耗技术的应用方面做了一定的工作。

五、展 望

综上所述,可见我国在内耗与超声衰减方面已经有一支具有相当水平的队伍和较为齐全的实验设备,做出了一些较高水平的实验结果。从 1978 年以来,我国关于这个领域的国际交往逐渐增多,参加了在联邦德国、法国、日本、瑞

(下转第 530 页)