

固体内耗的概况和新近发展(下)

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)

四、内耗和超声衰减研究的新近发展

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。三十多年以来,内耗研究由于低频扭摆(torsion pendulum)的普遍应用和逐渐采用了自动化和微机程序而得到迅速发展。现在,内耗的研究对象已由晶体扩充到高分子聚合物和非晶物质(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阻尼。这些年来,超声衰减测量的技术也日益得到发展,从而内耗研究渗入了低温物理和量子声学的领域,层次更为深入。

国际固体内耗与超声衰减学术会议每四年举行一次,欧洲的固体内耗与超声衰减会议也是每四年举行一次,与国际会议交替举行。根据1985年7月在美国 Urbana 的 Illinois 大学举行的第八届国际内耗与超声衰减学术会议的決定,第九届国际会议将于1989年7月在我国合肥或北京举行。

从1981年7月在瑞士洛桑召开的第七届国际会议上所报告的论文来看,最活跃的研究领域是位错内耗和界面内耗(包括高温内耗),已经能够联系和深入阐明一些范性形变和强度的基本问题。在高阻尼材料的内耗、马氏体相变的内耗和金属玻璃的内耗方面有了一些进展,在内耗测量仪器的自动化和程序控制方面有了一些创新,特别在宽频扭摆(强迫振动扭摆)和疲劳超声内耗仪方面进展较快。

1985年召开的第八届国际会议的参加者有来自18个国家的154人,我国有13人参加,名列第三(美国东道主75人,日本22人,法国

12人)。会议接纳的论文224篇,编入此次会议出版的论文集里的有175篇,其中有我国的30篇^[1]。在这些论文里有关于点缺陷(包括氢效应)的31篇,位错内耗(包括高温效应16篇)58篇,高阻尼材料5篇,非晶材料15篇,非金属材料18篇,相变23篇,超导体6篇,磁性材料5篇,新仪器新技术20篇(包括声显微镜4篇,新技术14篇,无损评价2篇)。大会的邀请报告有15篇,其题目和报告人如下:

1. bcc 金属中的内禀缺陷与填隙式外来原子及其复合物的滞弹性弛豫 (M. Weller, Stuttgart).

2. 金属合金(晶体和非晶体)中的指向有序和短程有序动力学 (J. Hillairret, Grenoble).

3. 铌中的俘获氢的量子隧道效应 (E. Drescher-Krasicka 和 A. V. Granato, Urbana).

4. 固体氢的超声衰减 (J. Beamish, Delaware).

5. 合金中的应变时效的内耗研究 (R. B. Schwarz, Argonne, Los Alamos).

6. 作为应变振幅的函数的反常内耗峰 (葛庭燧, 合肥).

7. 用偏压试验研究位错的新近进展 (G. Gremaud, Lausanne).

8. 玻璃在 T_g 附近的内耗和流变行为 (J. Perez, Villeurbanne).

9. 在 polyethylene 中的内耗过程的缺陷扩散模型 (D. H. Reneker 和 J. Mazur, NBS, Maryland).

10. 马氏体相变和弹性常数 (T. Suzuki, Tsukuba).

11. 经过马氏体相变的 A 15 化合物的内耗

壁运动所引起的内耗 (C. L. Snead 和 D. O. Welch, Brookhaven).

12. 超导膜的表面声波研究 (M. Levy, Milwaukee).

13. 具有微微秒时间分辨率的超声实验 (C. Thomsen, H. T. Grahn, H. J. Maris 和 J. Tauc, Providence).

14. 用超声衰减来进行材料的无损鉴定 (R. E. Green, Jr., Johns Hopkins).

15. 定量的超声波无损评价的发展 (D. O. Thompson 和 R. B. Thompson, Ames).

另外,大会邀请 C. Zener 作了宴会后的讲演,叙述了他进行内耗研究的经过 (从 1937 年开始),并介绍了四十年代同他一起工作过的 T. S. Kê (葛庭燧), C. Wert 和 A. S. Nowick 等的工作情况。最后,大会请 C. Elbaum, J. S. Koehler 和 A. S. Nowick 做了总结评论。

大会的 15 个邀请报告反映了内耗和超声衰减的几个重要领域的新近发展情况。根据三位总评人的意见,这次国际会议的内容是很丰富的,特别值得提出的有下列几个方面:

1. 新技术

用光学方法在薄膜里产生表面声波是一种很重要的创新技术。虽然细节还不完全清楚,但是显然用这种方法可以产生埃赫 (Terahertz, 即 10^{12} Hz) 频率范围的共格声子,并且最少可用于从室温到液氮的广阔的温度范围。

最近已能产生具有高重复率 (例如 100 MHz) 的期间 (duration) 小于 0.1 ps 的特短光脉冲。把这光束射向材料的表面,它就在一个特定深度的表面层内被吸收,被吸收的能量使表面层的温度增高,从而产生不均匀的应力,引起一个弹性应变脉冲向材料内部传播。在典型的情况下,如果吸收深度为 300 \AA ,声速为 $3 \times 10^5 \text{ cm/s}$,则声脉冲的有效期间是 2 ps。另外,如果每个光脉冲的能量典型来说是 0.1 nJ,光束面积是 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$,则应变脉冲的振幅是 $10^{-4} - 10^{-3}$ 。这种脉冲应该具有高达 100 GHz 以上的 Fourier 分量,从而就能够在这些频率下进行超声测量。

作实验时,把厚度为 2400 \AA 的 As_2Te_3 薄膜淀积在 sapphire 基底上。用一束驱动光脉冲 (pump pulse) 通过基底射到薄膜上,在界面处被吸收后,所产生的应力脉冲就在 As_2Te_3 薄膜里来回反射,并使薄膜的光学常数 (折射率 n , 吸收系数 α) 发生变化。从驱动光脉冲里分出约 10% 作为探测脉冲 (probe pulse),并使它在经过一个额外的光程以后,即迟后一个时间 t 进入薄膜,然后测量这个延迟了的脉冲的反射 $\Delta R(t)$ 的变化。在定量测定超声衰减时,我们取 $\Delta R(t)$ 的第一和第二回波的 Fourier 变换 $A_1(\omega)$ 和 $A_2(\omega)$, $A_1(\omega)$ 的峰值约在 25 GHz。在应变脉冲中的频率为 ω 的 Fourier 分量的每单位距离的衰减 (即超声衰减) 是

$$\alpha(\omega) = \frac{\ln \{ |A_1(\omega)| / |A_2(\omega)| \}}{2d}, \quad (11)$$

其中 d 是薄膜的厚度。

这种具有微微秒时间分辨率 ($10\text{ps} = 10^{-10}\text{s}$) 的超声测量新方法,可用于声程很短 ($\leq 1000 \text{ \AA}$)、衰减很大 ($10^{-4} \text{ dBcm}^{-1}$) 的试样。现在已经用于非晶和单晶 As_2Te_3 , 非晶 Ge, polyacetylene, GaAs, InGa, AsP 试样,测量超声衰减、声速变化及其与温度的依赖关系,同时还可以根据声速的变化来测定氧化膜和氮化膜的厚度。

另一种重要的新技术是扫描声学显微镜。这种新技术自 1979 年问世后,几年来发展得很迅速。它的优点是能够把声波与试样的弹性性质之间的交互作用直接摄像,并得出定量的结果,从而能够测定试样表面下几个 μm 的表面波的声速和衰减。把试样放在两个共焦点的声学透镜之间,一个是发射透镜,一个是接收透镜。移动试样在这两个透镜之间的位置以得到一个像。一般来讲,高阻尼区在像里表现为暗区。在反射型的声学显微镜里只用一个透镜,用水作耦合介质 (声速是 1500 m/s)。当声波频率为 3 GHz 时,声波的波长就与光的波长相当,从而可以得到与较好的光学显微镜相当的声像分辨率。用 ZnO 换能器把脉冲声波传入兰宝石盘的一个表面,它的另一个表面磨成凹球面,使声波聚焦在这个透镜的轴线上。在这种情形

下的折射率是极高的,从而像差很小(一般小于波长的十分之一)。这声波被试样反射回来,经过透镜到达换能器。用一个时间选通电路把反射波与发射波分开。令透镜沿着与试样表面垂直的方向移动,便得到扫描像。像的衬度是由于试样的各部分的弹性性质的差异所引起的。但是,对于所观察到的衬度的解释必须谨慎,要根据这衬度随着散焦程度而变化的情况来作解释。散焦就是试样不坐落在焦平面上。负散焦指的是试样坐落在焦平面与透镜之间。设散焦距离为 z , 则由于散焦而引起的像的亮度的变化以及传感器电压 V 的变化是 z 的函数。在负散焦时,试样中的表面声波(Rayleigh波)对于 $V(z)$ 的行为起着支配的作用。声学显微镜对于任何影响表面声波的传播的因素都很敏感,这包括对于声速有影响或者足以散射声波的各种因素,例如材料性质的变化或者有表面裂纹或涂层以及足以引起声波衰减的各种缺陷的出现。

另一种新近得到迅速发展的内耗实验技术,是在进行内耗实验时另外施加一种应力。有人把这种应力叫做偏应力(bias stress)。这是一种动态内耗或过程内耗。早在1957年,我国的科学工作者就在小型拉伸试验机上用“中间扭摆”进行了在范性形变过程中的低频内耗实验。1971和1974年,Aachen和Lyon的科学工作者先后进行了在循环加载过程中的超声内耗实验,所用的“偏应力”是拉卸的方式。1981年,Lausanne的科学工作者在压卸方式循环偏应力的加载过程中进行超声内耗实验。1982年法国Lyon的科学工作者与中国科学院固体物理研究所合作,设计并逐步完成了在拉压的交变载荷过程中测量超声衰减和声速变化的“疲劳超声内耗仪”。由于采用了特殊的钢膜加载方式,可以得到小达 7×10^{-6} 的交变应变,这就有可能把用传统的疲劳试验机所得的数据与用内耗测量所得的数据联系起来。近年来的实验结果指出,这种新技术对于研究位错的动性(特别是位错与点缺陷的交互作用)非常灵敏,是研究疲劳损伤的早期过程的有力工具。

2. 新物理、新领域、新材料

这次会议更多地强调了实验结果的微观解释。关于这方面的一个有兴趣的例子是已经把二能级隧道系统模型(models of two-level tunneling systems)用到更广泛的问题上。

1974年,Birnbaum等根据对含H或H²的Nb的比热测量结果,指出了Nb中的H形成一个量子隧道系统。1978年,Wipf等的实验指出这个隧道系统是由被氧或氮所俘获的H这个复合体所构成的。他们随后的(1984年)非弹性中子散射实验结果指出,这个隧道效应可用一个量子两能级系统(quantum two level system, TLS)进行解释。1979年,Granato等测量了含O和H的Nb的超声衰减和声速作为温度、频率、浓度和同位素的函数,在2.3K(10MHz, C₄₄波模)处观察到一个弛豫峰,激活能是1.8MeV,频率因子是 3.9×10^{10} 。峰的弛豫强度并不遵从经典的1/T温度依赖关系,而是在最低温度时开始减小,这表示在低温下弛豫跃迁态出现了量子效应。另外,还发现大的同位素效应,并且观察到在弛豫峰以下的温度时的声速减小。已经肯定,引起这个弛豫峰的是氧填隙子所俘获的H。新近的结果还指出,Nb的TLS隙在正常态时较之在超导态时约小25%、最近用含100ppm的O和700ppm的H的缓冷的Nb所作的超声实验指出,所观察到的超声效应可以用TLS的形式加以说明,其中包含着电子散射大大增强了在正常态的跃迁率。

1972年,Jackle等人提出了非晶系统的超声衰减和弹性模量变化的TLS理论。对于晶体来说,这理论基本上是相同的,但是简单些。因为,非晶系统不但有应变分布的问题,还有隧道隙分布的问题,可以一直小到零。晶体中的TLS隙有一个最小值 Δ_0 ,在超声测量中如果 $\hbar/\omega < \Delta_0$,就没有直接共振吸收。1985年,Granato等人以另一种方式指导出晶体的TLS理论,把共振和弛豫区别开来,并且指出,在足够小的静应变时只有共振没有弛豫,在足够大的静应变时则相反。对于TLS来说,弛豫是由一种直接过程发生的,其速率随温度的变

化是线性的。这提示一种 Debye 响应,但是速率对温度的依赖关系却与通常的较快的弛豫速率的情形倒转(inverted)。在足够低的温度下,弛豫强度与经典的 $1/T$ 行为歧离,当具有较高能级的粒子减小时,弛豫强度变为零,而共振强度达到饱和值。在高温下,二者之和接近经典值。可以把两能级系统和四能级系统的弛豫强度和共振强度表示为温度和应变的函数。

对于 TLS 来说,当应变 $\varepsilon = 0$ 时,由缺陷形成的偶极子有两个等效取向,而基态发生隧道分裂。施加应变后,一个取向变为在能量上的有利状态,形成能隙 $2\Delta_0$, 而

$$\Delta_{1,2} = \mp (\Delta_0^2 + \alpha^2 \varepsilon^2)^{1/2}, \quad (12)$$

其中 $2\Delta_0$ 是隧道裂距, $2\alpha\varepsilon$ 是应变感生的不对称能, α 是应变耦合系数。如时间许可,则将发生跃迁使系统回到热平衡状态。根据定义,热平衡弹性常数变化

$$\delta C = \delta^2 F / \delta \varepsilon^2, \quad (13)$$

F 是单位体积的缺陷的自由能,

$$F = -fkT \ln Z, \quad (14)$$

而配分函数 $Z = \sum_i \exp(-E_i/kT), \quad (15)$

其中 f 是缺陷数, $E_i(\varepsilon)$ 是系统的能态。对于 TLS,

$$Z = 2 \cosh \Delta / kT. \quad (16)$$

把(12),(14)和(15)式代入(13)式,得出

$$\Delta C / C = \Delta_R + \Delta_S, \quad (17)$$

其中弛豫强度

$$\Delta_R = \left[\frac{f\alpha}{CkT} \left(\frac{\alpha\varepsilon}{\Delta} \right)^2 \right] \operatorname{sech}^2 \left(\frac{\Delta}{kT} \right), \quad (18)$$

共振强度

$$\Delta_S = \left[\frac{f\alpha}{C\Delta_0} \left(\frac{\Delta_0}{\Delta} \right)^3 \right] \tanh \left(\frac{\Delta}{kT} \right). \quad (19)$$

(18)式中的 $f\alpha/CkT$ 是经典的 Snoek 效应中我们所熟悉的结果,这时的 $E_{1,2} = \mp \alpha\varepsilon$ 。当温度低得足以使具有较高能态的粒子数减小时,因子 $\operatorname{sech}^2 \left(\frac{\Delta}{kT} \right)$ 就使 Δ_R 变为零。对于一个量子系统的新的东西是(18)式中的 $(\alpha\varepsilon/\Delta)^2$ 和(16)式中的 $(f\alpha^2/C\Delta_0)(\Delta_0/\Delta)^3$ 。(18)式中的 $(\alpha\varepsilon/\Delta)^2$ 显明地指出对称的位能不会产

生弛豫,因为一个小的微扰超声应变不会引起能量移位。对于大应变, $\alpha\varepsilon/\Delta$ 接近于 1。新项 Δ_S 是共振响应。纵然当 $\hbar\omega \ll \Delta_0$ 时没有共振吸收,但仍然有一个与外加应变同位相的响应。在温度为零时只有基态被占据, Δ_S 就等于 $(f\alpha^2/C\Delta_0)(\Delta_0/\Delta)^3$, 这可以用 $F = +fE_1$ 直接计算出来。从(13)式可知, Δ_S 是作为应变的函数的基态的曲率。对于大的应变, E_1 变得与应变成线性关系,从而这个曲率是零。在一定的温度下, E_1 有一些粒子布居,而曲率是反向的,这使效应的大小减小 $\tanh \Delta/kT$ 倍。

应该指出,Elbaum 及其合作者以前曾经提出在应力作用下的半导体的电子能级的分裂问题。因而,用两能级和四能级量子系统来描述缺陷对和缺陷团在试样作机械振动中的行为,是有广泛的应用前景的。

关于超声方法(衰减和声速测量)的应用方面的突出例子,有氦的表面张力的研究和薄膜的超导性质的研究。应该注意,在后一个例子里,超声方法能够提供这个领域的传统测量方法(例如电导率和磁化率测量)所得不到的新信息。

Nowick 在他的综述性评论中指出了内耗研究已经应用到较以前更为广泛的材料上去。会议上有许多论文报道了关于陶瓷氧化物、氧化物玻璃、金属玻璃、快离子导体、超导体和高分子聚合物等的内耗。也有人讨论了象煤和琥珀这种不平常的材料的内耗。这些都说明内耗方法可以用到极为广阔的领域。但是应当提醒,目前已经清楚,如果检查任何复杂的材料,特别是如果它含有第二相或者是它发生了马氏体型相变,那肯定会观察到一些内耗峰。不过,只在一个已经很拥挤的内耗峰园地里再加上一个内耗峰,其意义是不大的。当内耗方法能够应用到基本问题上时,它才是最成功的。要任何一个内耗峰有用的话,必须了解它的详细机理。因此,如果这材料非常复杂,从而很难理解,那么这种研究或许是并没有多大意义的。要希望揭示出内耗的机理,,达到目的的最好机会只能是同时应用一种以上的实验技术。例如,

对于点缺陷的研究,在金属系统可用电阻测量,在绝缘体可用介电弛豫测量与内耗方法一起进行。从另一方面讲,在研究位错、界面现象或相变时,电子显微镜观察是对于内耗的极有价值的辅助手段。

3. 旧问题的更新

对于一些“众所周知”的现象,我们有时有“向后退了”的感觉。例如,关于 bcc 金属中的填隙原子的工作,二十多年前根据 Powers 和 Doyle(1956) 以及 Gibala 和 Wert (1966) 的工作,在 Snoek 峰的高温侧及其附近,还有分立的内耗峰,其峰高与填隙原子含量的平方或立方成比例,从而可以解释为分别由于间隙原子对和间隙原子三连体。现在,这个说法受到 Stuttgart 的挑战,是根据中国科学工作者葛庭燧、张进修、李广义等在 1980 年与西德马普金属所的 Weller 等的合作研究结果而提出来的。尽管有争论,但实际上是真正得到进展的。对于久经公认的一些概念指出疑问,部分地是由于用了较纯的试样,消除了易于造成混淆的杂质的结果。1980 年用超高纯的 Ta-O 和 Nb-O 固溶体进行内耗实验结果指出, Snoek 峰是对称地变宽的,并且随着 O 浓度的增加而移向较高的温度。这说明内耗峰包含着一种连续分布的弛豫时间,这与填隙原子的长程交互作用(排斥力)相联系。实验指出, Snoek 峰的变宽并不是反对称的,并不出现不连续的分立的内耗峰,如成对或成团模型 (clustering model) 所认为的那样。1983 年, J. R. Cost 应用一种新的程序对早期的关于 Nb-O 的弹性后效实验结果进行分析,推导出几个与填隙原子对或原子团相联系的分立的弛豫时间。同年, M. A. Obamoto 也进行了类似的分析。我们认为,得出上述的结论,是由于他们用来进行分析的 Nb-O 试样中含有微量的氮。在这次会议上, Cost 又提出了确定温度内耗峰的弛豫时间谱的去折合分析法 (deconvolution analysis), 并认为这是一种直接弛豫谱分析法 (direct spectrum analysis, DSA) 从而能够提供弛豫时间分布的一种准确估计。他用这种方法对于 Powers 和

Doyle 的结果及我们和 Weller 的新近实验结果进行了分析,结果是支持成对模型 (bound-pair model)。

成对模型和反成对(排斥力)模型对于我们关于填隙式固溶体的概念是十分重要的,所以上述的争论还需要继续澄清。Nowick 指出,引起困扰的来源可以追踪到从给定的响应函数来得到弛豫谱的问题。这在原理上可以独一无二地做到,但是实际上并不容易。这困难可以追踪到 Debye 峰的固有宽度,在区别分立谱和连续谱时这会引起问题。计算机和 Cost 的去折合分析内耗数据的方法的合理应用会大有帮助,但是困难仍旧存在。应当明确指出,当缺陷深度大于 1% 原子比时,即使分立峰也会由于缺陷之间的交互作用而变宽,从而峰的位置就可能随着浓度而变化。另外,期望有一个作为浓度的函数的简单的幂数定律或许是太天真了。在处理这种问题时,从理论上寻求指导总会有帮助的。在这种情形下就是计算缺陷之间的交互作用。另一个令人感到“旧问题新争论”的例子是 T. S. Ké(葛庭燧)在 1947 年首先发现的晶粒间界内耗峰。Nowick 在总结评论中说,新近有人提出,这个内耗峰可能不是由于晶粒间界过程。要说明这个问题,需要回顾一下关于晶界内耗峰研究的历史。

如果金属中各个晶粒基本上是等轴的,并且晶粒大小的分布是均匀的,那么预期只有外加应力的一部分能够由于晶界粘滞性滑动而得到弛豫。跨过一个单独晶界所产生的能量消耗可以写成: 能量消耗 \sim 相对位移 \times 切应力。在温度很低时,第一个因子是可忽略的,因为这时的粘滞系数很高,从而在振动半周内相邻晶粒的相对滑动是难以查知的;在温度很高时,第二个因子是可以忽略的,因为这时的粘滞系数很低,从而跨过晶界的切应力在所有时间都已经完全得到弛豫。只有在中间的温度范围,跨过晶界有一些相对位移,也有一些切应力,能量损耗才达到它的最大值。葛庭燧在 1947 年用他自己所设计和创制的扭摆,用 99.991% 纯铝所作的实验里,首次观察到一个内耗峰,当振动频

率为 0.8 Hz 时, 峰的颠值出现在 285℃。这个峰在“单晶”(大竹节晶)里不出现, 因而所观察到的内耗峰是由于晶粒间界过程所引起的。

葛庭燧用内耗、模量、恒应力下的微蠕变和恒应变下的应力弛豫等四种实验方法所测得的与晶界弛豫相联系的激活能是 34,500cal/mol (1.5eV), 这与铝的自扩散和蠕变激活能基本上一致, 因而认为晶界滑动过程是一种受扩散控制的弛豫过程。

他还证明了 Zener 根据作为滞弹性内耗的基础的 Boltzmann 叠加原理所推导出来的上述四种测量方法之间的换算公式是正确的。用这四种方法所测出来的与晶粒间界粘滞滑动相联系的弛豫量(已弛豫切变模量 G_R 与未弛豫切变模量 G_U 之比)为 0.67, 与理论值(0.64)相近。证实了晶界具有粘滞性质并不表示晶界就是由粘滞性物质组成的。关于晶界粘滞性的最有说服力的定量证明是葛庭燧根据他的实验结果推导出晶界在各个温度下的粘滞系数, 并把它外推到铝的熔点温度, 所得的数值是 0.14 P, 而别人测得的熔态铝的实验值是 0.065P。

多年以来, 上述的实验结果一直被国际上公认为晶界弛豫的确凿证明。1976 年, 意大利的 Gondi 及其合作者用铝单晶(99.6%)进行了内耗测量, 试样在经过轻微的冷加工以后出现了一个内耗峰。他们认为这个内耗峰的位置与作者 1947 年用纯铝多晶试样(99.991%)所观察到的内耗峰位置一致。因此他们认为所谓的晶粒间界峰并不是来源于晶粒间界过程, 而是由于晶粒内部的位错所引起的。实际上, 99.6% 多晶铝的晶粒间界内耗峰是出现在 225℃ (1Hz), 并不与 Gondi 等所观察到的铝单晶(99.6%)内耗峰的位置相同。

在约略相同的时期, 法国的 Woirgard 等也报道在单晶铝(99.99%)试样中出现微弱的内耗峰, 峰的位置与晶粒间界内耗峰相近, 从而也就认为 1947 年所观察到晶粒间界内耗峰不是由于晶粒间界过程所引起的。我们仔细分析了 Woirgard 等的实验结果, 认为他们所用的单晶体试样中可能仍含有少量的细晶粒, 而且

试样曾受到一定的冷加工。

为了澄清上述的问题, 中国科学院固体物理研究所(1984)用同样纯度并且未经过冷加工的铝单晶和铝多晶试样进行比较, 同时确知所用的铝单晶试样中不含有细晶粒和竹节状晶粒。在一系列的实验过程中, 确证了用三种不同方法所制成的铝单晶(未加工或微量加工)中并不出现与晶粒间界峰位置相同的内耗峰。同时, 还在冷加工经过适当退火的单晶体中, 在含有较多竹节晶粒的单晶体中, 观察到出现在较之晶粒间界内耗峰更高或更低温度的内耗峰, 这些内耗峰不是晶粒间界内耗峰, 而是另外类型的内耗峰。这就有力地说明了国外一些工作者得出错误结论的原因。因此, 我们认为, 在 1947 年所观察到的晶粒间界内耗峰(现已被称为葛氏峰, 是出现在细晶粒试样中的晶粒间界内耗峰)是确凿无疑地由于晶粒间界弛豫过程所引起的。

五、展 望

根据目前的情况来看, 国内开展内耗研究和应用以及进行内耗仪器研制的单位约有 30 几个。经常进行内耗工作的约有十几个单位。总体来说, 我国在内耗与超声衰减方面已经有了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研究成果。由于中国物理学会内耗与超声衰减专业委员会多年来的积极工作和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)的建立, 最近可以说已经基本上把国内从事内耗与超声衰减工作的科技工作者和单位组织了起来。从 1978 年以来, 我国关于这个领域的国际交往也逐渐增多。内耗分支学科的一个特点是国内各单位之间重复工作较少, 各单位有所分工侧重, 并且在基础研究、应用研究和开发工作上保持着一定的比例, 体现了理论联系实际, 微观与宏观相结合。为了把研究工作做得更细致和深入, 必须开展广泛的学术交流。专业委员会现在计划在 1987 年与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作, 召开几次中

小型的学术座谈会,组织和支 持各个单位之间的研究合作,集体攻坚。座谈会的主题可以包括晶界和界面的结构和优化设计、疲劳损伤的微观机理、高阻尼材料与相变机理、非线性内耗与非线性力学的联系等等,这些都是与内耗这个分支学科有紧密联系而又具有重大的实际意义的课题。

在加强和发展现有的内耗研究课题,并使若干个有特色的基础研究项目做得更为深入以取得突破性的成果以外(例如关于位错、界面和相变的基础研究),还应当加强高频和低温内耗

的装备建设和研究工作,使内耗研究的对象深入到声子和电子的层次。另外,还应当注意开展非晶态(金属玻璃)、固态高聚物、半导体、绝缘体(陶瓷、光学晶体)等特殊功能材料方面的内耗研究工作,使内耗和超声衰减研究能够为发展新材料贡献力量。

[1] Proceedings the 8th International Symposium on Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids, Urbana (USA), June 3-6,(1985),Ed. by A. V. Granato, G. Mozurkewich and C. A. Wert. *Journal de Physique*, 40-12(1985), Colloque C10, 1-851.

地 球 磁 极 的 反 转

1957年至1958年,人们第一次观测到了太阳普遍磁场的极性变换,当时曾引起轰动。现在,人们普遍认为:太阳普遍磁场极性反转可能是经常发生的现象,也许每逢活动峰年,太阳普遍地磁都要发生一次极性的变化,但是并不是那么有规律。例如,曾经观测到太阳南北两极的极性同时都是N极,这是一个很奇怪的现象。目前,在天王星上也许正在经历着磁极反转,这使得磁极反转的现象再次引人注目。对岩石磁性的研究表明,在地球上的整个地质年代里,地球的磁极也一直在变化。地球外核的流体中的“发电机”如何会使得地球磁极发生反转呢?这个课题正成为地球物理研究的热门。由于发现了大量的关于星际事件的过程的古地磁记录,近来对于磁极反转现象有了一些相当新的见解。

新的观点认为,磁极反转的确是在地核中发生的过程。这个过程既不简单,也不是连续的,但是这种过程有时却又令人吃惊地重现。例如,最近有一个报道讲到,在熔岩中记录到磁场方向按年代变化的“快照”。这个记录表明,磁极的反转是非常不规则的。在磁极经历迅速变化的过程中,磁通基本上冻结在高电导率的地核流体中,而磁极的反转就是通过一个一直携带着磁通的交错的过程来完成的。

在这个记录中还可以看到地球“发电机”促

成磁极反转的最初的不成功的尝试。在这期间,磁场的方向处于磁极反转没有最终完成的中介态的方向上。从南半球得到的数据还进一步说明,在磁极实现成功的反转之前,地球发电机可能经历一次又一次的尝试。有趣的是,每一次尝试似乎都涉及到同样位形的中介场。希腊克里特岛的沉积物还表明,反转过程的空间特征在若干个磁极转变的时间间隔内都保持不变。在这段时间内,用地核中的磁流体力学机制似乎不能识别反转场最初的方向。

古地磁记录的证据一致支持变换场的位形不是简单的偶极场,而是相当复杂的场的假说。这些记录和如上的研究表明,可能在某一任意给定的时间内,仅仅是地核的某一部分在经历磁场方向的反转。每一次这样的局域的反转与整个地球磁极反转所需的时间相比要短得多。对于磁场反转速率的长期行为的统计研究,倾向于支持这种意见。分析表明,实际上反转过程是由地核中某种与驱动地球“发电机”无关的能源相联系的物理现象所触发的。有一种观点认为,地球“发电机”是由冻结在流体核心的化学对流驱动的。那么什么是磁极反转的触发源呢?当然总是某种不稳定性使得局部对流花样不稳定,从而诱发了磁极反转。

(夏晓阳根据“Physics Today”

1987年第1期 s 38页编译)