

# 固体的超声研究

胡建恺

(中国科学技术大学内耗与固体缺陷开放实验室,合肥 230026)

张谦琳

(中国科学技术大学无线电电子学系,合肥 230026)

简述固体物理研究中的超声方法、超声衰减和声速变化的机制及其与有关物理性质和微结构的关系,综述超声研究新进展。

超声波作为研究固体材料物理性质的一种方法可追溯到本世纪30年代。自从40年代葛庭燧教授用扭摆研究固体物理性质并得到成功后至今近50年的历史中,超声方法和内耗方法一直是研究固体能耗和固体缺陷的两个重要的手段。超声研究的工作频率一般在兆赫至几千兆赫的范围,研究微观结构的尺度为分子、声子和原子量级。

超声波在固态材料中传播时,两个最重要的物理参量是超声衰减和声速。超声衰减是指超声波在介质中传播时由于各种原因所导致的超声能量耗散的总和,其中包括由于介质本身的固有特征所产生的散射和吸收,也包括衍射和耦合引起的损耗。对同一样品同时测量其超声衰减和声速变化是研究材料的散射和吸收机制的有效途径,同时会得到有关物理性质和微结构方面的重要信息。

固体中超声衰减和声速的实验测量已发展成超声波谱学。与电磁波谱不同之处是超声波谱有纵波和横波两个模式,其高频段频谱已接近晶格振动频率。这时,振动的量子化即声子与超声波相联系,超声波与声子或与微观缺陷的相互作用理论与热传导理论类似。超声波与导电电子之间的相互作用可导致声子的发射和吸收;在足够低的温度下,存在超声波向导电电子的能量传递。因此,超声方法可用来研究固体的电子性质。在较低的兆赫频段,超声能量

的耗散直接与固体的力学性质相联系。例如,位错阻尼与变形、蠕变和应力循环有关。事实上,超声测量可为固体材料的力学特性提供丰富的信息。

超声研究在固体物理中的重要贡献体现在传统超导机制的研究和非晶态物理的研究方面。是 Bömmel, Morse 和 Bohm 等人的超声实验成功地证实了 BCS 理论<sup>[1-3]</sup>,是 Heinicke 的超声实验和 Zeller 等人的热力学实验共同开辟了现代非晶态物理的新篇章<sup>[4,5]</sup>。

## 一、固体中的超声衰减和声速变化机制

超声波在固态介质中传播时产生能量衰减和声速变化的原因很多,主要有散射、阻尼,超声波与声子、电子、载流子的相互作用以及超声波与核自旋、电子自旋的相互作用等。

超声能量在介质中的散射是由于介质中空间各点的密度和弹性性质的差异,这些差异小至晶体缺陷的不同,大至晶界的不同和组分不均匀。一般说来,任何反映在密度和弹性方面的不均匀都会产生声波能量的散射。固体中的弹性阻尼依赖于温度、频率和超声波模式,它起因于多种机制。在室温下,大多可归因于粘滞阻尼。对于大多数单晶,粘滞阻尼产生于热弹效应和阿克瑟机制(Akhieser mechanism)。热弹效应是超声纵波在介质中传播时,从压缩区

向疏松区出现的热传导,它是一种不可逆过程。在很宽的温区内,固体材料中存在着热声子的平衡分布,超声波在介质中传播扰动了这种平衡分布,从而导致声能的吸收或阻尼,这就是声子阻尼或阿克瑟机制。在金属中,位错可引起超声衰减和声速的变化。在交变应力场中,位错线段类似受驱动的有阻尼的振动弦。

在 10K 以下的低温,当超声频率足够高,以致超声波长与电子平均自由程可比时,超声波与导电电子的相互作用引起的超声衰减在金属中占主要地位。Bömmel 等人在研究传统超导体的超声衰减特性时发现,在超导转变以上的温区,随温度的降低其超声衰减明显增加,其原因归结为超声波与导电电子的相互作用。当通过超导转变温度时,超声衰减骤然下降<sup>[1,6,7]</sup>。为了解释这一现象,Bardeen, Cooper 和 Schrieffer 提出了在超导转变温度附近存在电子分布能隙的理论预见,即著名的 BCS 理论<sup>[8,9]</sup>。随后, Morse 和 Bohm 用超声衰减实验在锡和铟中成功地证实了他们的预见<sup>[2,3]</sup>。

相变临界点附近的超声异常可用与相变指数有关的公式来表达。

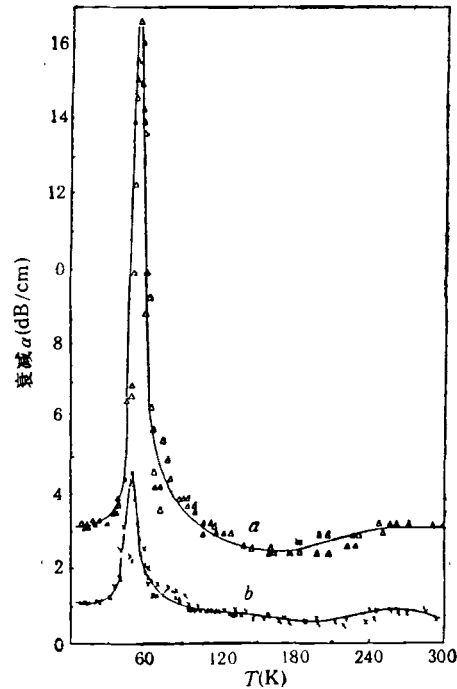


图1 在  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  单晶中, [111]晶向纵波超声衰减与温度的关系

(曲线 a:  $f = 150\text{MHz}$ ,  $T_{\text{max}} = 51.74\text{K}$ ,  $\alpha_{\text{max}} = 16.61\text{dB/cm}$ ;  
曲线 b:  $f = 50\text{MHz}$ ,  $T_{\text{max}} = 48.53\text{K}$ ,  $\alpha_{\text{max}} = 4.60\text{dB/cm}$ )

## 二、固体超声特性研究进展

自本世纪 70 年代以来,固体的超声研究在晶态和非晶态材料方面都取得了很大进展。

### 1. 晶态固体的超声研究

晶态固体的超声研究主要是各类新晶体的压电性质、弹性性质、超声衰减和声速特性以及相变研究。其中铈酸锂、硫酸锂、碘酸锂、KDP、锗酸铋、钛酸锶、亚硝酸钠等晶体的研究成果具有重要意义。图1为锗酸铋单晶沿[111]晶向传播的纵波超声衰减随温度的变化,50K 附近出现的超声衰减峰解释为热激活弛豫过程<sup>[10]</sup>。

超声是研究相变的灵敏探针,在相变临界温度附近,超声衰减和声速发生急剧的变化。对于钛酸锶等钙钛矿结构的单晶和对亚硝酸钠单晶的相变临界行为的研究,使得晶体相变的唯象理论和相变临界动力学得到发展<sup>[11-13]</sup>。图2为亚硝酸钠单晶中超声纵波实验结果,其中在相变点  $T_c$  附近,超声衰减和声速都发生突变。

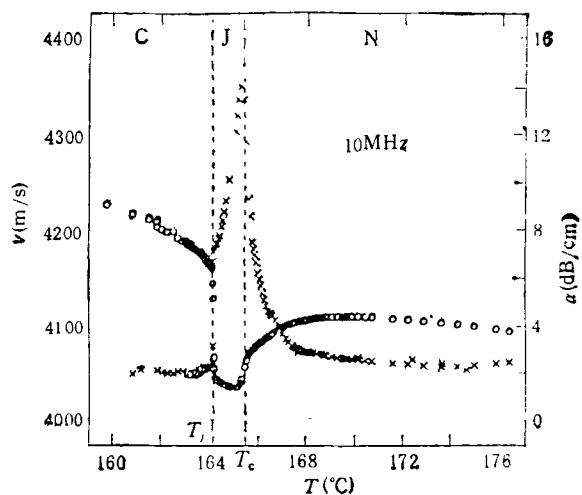


图2 在  $\text{NaNO}_2$  单晶中, [010]晶向纵波超声衰减和声速与温度的关系

## 2. 非晶态固体的超声研究

由于非晶态固体的短程无序,使得定量的理论研究长期无从下手,直到1971年Heinicke的超声实验和 Zeller, Pohl 的热力学实验发现非晶态固体的异常性质<sup>[4,5]</sup>后,这个领域的实验和理论研究才迅速活跃起来。

在液氮以上的温区,各种玻璃的超声衰减异常主要是在液氮温度附近有一大衰减峰  $P_1$ , 在10K以下呈现一肩。此特征与玻璃的种类和杂质的存在无关。对于四面体结构的玻璃,在  $P_1$  峰温稍高点的温度,声速出现极小值。在液氮以下温区,超声衰减与声功率的关系出现饱和现象,即在很高或很低的声强下,超声衰减与声功率无关。声速变化在1.5K以上与频率有关,在1.5K以下与频率无关,并随温度的下降而单调减少。为了解释这些超声异常,Anderson 和 Phillips 提出了唯象解释,他们认为在玻璃中普遍存在着两能级系统(TLS)<sup>[14,15]</sup>。声子和 TLS 之间的相互作用发生了共振吸收,同时超声波通过大量的 TLS 时,扰动了它们的平衡而导致弛豫吸收。在4K以下的声速异常也可用共振吸收和弛豫吸收来解释。

对非晶态快离子导体的研究表明,在液氮至室温的温区,存在着宽而强的超声衰减峰和明显的声速变化异常。超声衰减峰已证实为热激活弛豫过程,声速异常可用非简谐的共振吸

收和弛豫吸收说明<sup>[16-18]</sup>。

## 3. 高温氧化物超导材料的超声研究

自高  $T_c$  超导材料问世以来,人们试图找出超导转变与超声特性之间的关系,如同对传统超导体 BCS 理论那样。至今所得到的主要结果是在 Y 系和 Bi 系超导体材中,在240K附近发现结构相变,实验证实此相变与超导转变无关<sup>[19]</sup>。

- [1] H. E. Bömmel, *Phys. Rev.*, **98**(1954), 220.
- [2] R. W. Morse and H. V. Bohm, *Phys. Rev.*, **108**(1958), 1094.
- [3] R. W. Morse et al., *Phys. Rev. Lett.*, **3**(1959), 15.
- [4] W. Heinicke et al., *J. Acoust. Soc. Am.*, **48**(1971), 954.
- [5] R. C. Zeller and R. O. Pohl, *Phys. Rev. B*, **4**(1971), 2029.
- [6] L. Mackinnon, *Phys. Rev.*, **98**(1955), 1181.
- [7] L. Mackinnon, *Phys. Rev.*, **98**(1955), 1210.
- [8] J. Bardeen et al., *Phys. Rev.*, **108**(1957), 1175.
- [9] L. N. Cooper, *Phys. Rev. Lett.*, **3**(1959), 17.
- [10] 张谦琳, *声学学报*, **14**(1989), 220.
- [11] J. O. Fossum and K. F. Fosheim, *J. Phys. C*, **18**(1985), 5549.
- [12] J. O. Fossum, *J. Phys. C*, **18**(1985), 5531.
- [13] J. Hu et al., *Phys. Rev. B*, **39**(1986), 6331.
- [14] P. W. Anderson et al., *Philos. Mag.*, **25**(1972), 1.
- [15] W. A. Phillips, *J. Low. Temp. Phys.*, **7**(1972), 351.
- [16] G. Carini et al., *Phys. Rev. B*, **30**(1984), 7219.
- [17] G. Carini et al., *Phys. Rev. B*, **32**(1985), 8264.
- [18] J. Hu et al., *The 14th ICA Proceeding A10-2*, (1992).
- [19] J. Hu et al., *Physica C*, **162-164**(1989), 444.

# 固体内耗新模型和分形、混沌

王养璞 金其淑

(苏州大学物理系, 苏州 215006)

在介绍固体内耗新模型及其应用的基础上,分析了弛豫慢化来源于相空间中运输的“粘连性”或分形上的自相似结构,阐述了新模型的物理基础基于非线性动力学的研究。

自1985年第八届国际固体内耗和超声衰减会议召开以来,内耗的研究在我国已取得许多进展<sup>[1]</sup>,对内耗机理的研究正在深入。80年

代,金属玻璃中的内耗实验峰的研究逐渐增多。典型的如钽硅非晶合金中氢引起的增宽的不对称的内耗峰,它们不能用德拜理论解释。当时