



# 内耗与固体缺陷研究



葛庭燧

耗。在振动中产生非弹性应变的原因是应变落后于应力，即应变对于应力有一个位相差。这个位相差越大，

“内耗”这两个字对大家来说并不陌生，但在物理上它的科学涵义是什么，却鲜为人知。让我们先说一说什么叫“内耗”和为什么要进行内耗研究。

物体作机械振动时，即使这物体与外界完全隔绝，它的振动也会渐渐停止，这种由于内部原因而使物体的振动能量逐渐耗散的现象称为内耗。对于高频振动，这种能量耗散也称为超声衰减。

在日常生活中，人们经常会碰到内耗现象。钟声悠扬，余音绕梁三日不绝，说明这铸钟所用的合金材料的内耗是很低的。但是一旦钟上出现裂纹，钟声很快就停止，这说明内耗大大增加。人的脊椎骨的内耗很大，不然的话，脚的振动就很容易传到大脑引起脑振荡。近代技术的发展迫切需要能在各种振动频率和各种温度下使用高阻尼也就是高内耗的材料和低阻尼也就是低内耗的弹性器件和材料。另外，为了消除噪音的污染，必须采取各种措施和选择适当的材料来减小机械部件的振动。这些都需要了解材料中的内耗是怎样产生的，从而研究采取怎样的措施才能得到具有大内耗或小内耗的材料。

我们已经知道，引起振动能量耗散的根本原因是材料在应力的作用下出现了非弹性应变。对于一个完全弹性体，应变对于每个应力水平的响应是线性的，瞬时的，并且应变和应力互为单值函数。在振动当中，应变总是与应力同位相。在这种情形下就不会产生内

内耗越大。

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的情况。可以把应力叫做强度量，应变叫做广延量，应力与应变之间的比例系数是弹性模量。在电效应中的强度量是电场强度，广延量是电极化率；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力的、电的或磁的振动或周期性变化过程中每振动或变化一周在单位体积的试样内所耗散的能量。这个能量与单位体积的试样内所储存的最大能量之比，就是内耗的最基本量度。我们可以根据所用的振动频率的高低，外加应力的多少，试样的尺度和形状以及内耗的大小来选择测量内耗所用的方法，而各种方法所测得的内耗值，一般是可以互相换算的。

上面说过，在机械振动中产生内耗的原因是应变落后于应力，这是从现象上来说的。从本质上讲，内耗的产生是由于试样内部存在着一些与试样中的短程序或长程序参量有关的内部变量，这些变量与试样中的原子状态、电子分布或磁畴、电畴排列的状态有关。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个平衡值时就引起了应变，但是这个过渡的过程需要一定的时间即弛豫时间来完成，并且需要越过一定的位垒，即需要一定的激活能。这就导致了应变

被实验家和理论家进行研究，其中包括弹性散射过程( $K^-$ ,  $K^-$ )和( $K^+$ ,  $K^+$ )、非弹性散射过程( $K^-$ ,  $K^-$ )和( $K^+$ ,  $K^+$ )、单奇异性交换反应( $K^-, \pi^-$ )和( $K^-, \pi^+$ )、双奇异性交换反应( $K^-, K^+$ )和( $K^-, K^0$ )以及 $\kappa$ 介子与超子关联产生过程，后者如( $\pi^+$ ,  $K^+$ )、( $\gamma$ ,  $K^+$ )、( $e, e^+K^+$ )和( $p, p^+K^+$ )等。前述国际上 $\kappa$ 介子工厂的发展对这些过程的实验和理论研究给予有力的推动。从对这些过程的研究中人们正在和即将得到更多的知识。 $K$ 核物理的进一步研究有助于解决以下问题：

1. 产生新的超核及其能谱，研究各种核结构理论模型的有效性；
2. 研究各种超子与核子相互作用的性质；
3. 研究目前 $\Sigma$ 超核能谱宽度的实验值和理论值存在的种种矛盾；

4. 通过双奇异性交换反应研究双奇异性超核能谱，进而了解超子-超子相互作用性质；

5. 通过 $K^+$ 核弹性散射研究核内部物质分布，特别是中子密度分布；

6. 利用 $K^+$ 核弹性散射研究核子在核内的“发胖”现象；

7. 利用奇异性交换反应产生超核来研究夸克色禁闭是在重子内部还是在整个核内；

8. 通过 $K^-$ 反应谱检验强子的夸克模型波函数；

9. 利用各种 $K^-$ 反应寻找带奇数数的多夸克态；

10. 研究 $K$ 核过程是否是揭示核内夸克-胶子自由度的另一手段。

我们期待 $\kappa$ 介子工厂提供更多的实验数据，我们期待 $K$ 核物理研究提供更多的理论成果。

落后于应力。用内耗方法研究电的和磁的现象时,外加应力可以通过“磁致伸缩”或“压电现象”而与电的或磁的内部变量发生耦合,引起应变落后于应力的情况,从而引起内耗。上述这种应变落后于应力的具体情况决定于应力或应变状态,并且遵循着一定的数学方程。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方法来探测物质内部的分子、原子、声子等的存在状态及其运动变化。上述这些存在状态及其运动情况与物体结构的特点、结构缺陷的类型和组态以及各种缺陷之间的相互作用密切相关。所以内耗测量方法提供了一种极其灵敏的探测物体内部微观结构的手段。它的另外一种优越性是在测量过程中并不需要破坏试样的原始状态并且可以进行重复的动态测量。

物理中存在着大量的内耗源,每个内耗源都有各自的弛豫时间和弛豫强度。在改变振动频率进行测量时,每个内耗源都会在某一振动频率下引起最大的内耗值。因此,把内耗画成测量频率的函数时,就得到一条表现峰值的内耗曲线,这就是所谓的内耗峰。内耗峰的位置和高度分别与弛豫强度有关。每一个内耗峰相当于一机械振动能量吸收谱线,就如同光谱学的吸收谱线一样。因此,就机械振动来说,各种内耗源所引起的许许多多吸收谱线总起来说可以叫做机械振动吸收能谱或者声吸收谱,它是广义的固体能谱的一个分支。另外,按照把内耗表示为测量频率或作为测量温度的函数来分,有频率内耗峰和温度内耗峰的区别。在一般与速率有关的物理和化学过程中,这两种内耗峰可以互相换算。由于测量上的方便,内耗研究大多由改变测量温度来进行。把内耗测量技术与其它传统的微观观察和分析手段互相结合,可以更深入地阐明固体的内部结构与宏观的物理和化学性质的关系。因此,内耗的研究具有重要的学术意义和实际意义。

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。四十多年来,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包括金属、半导体和绝缘体扩展到高分子、非晶物质和复合材料,研究的范围由试样的内部扩展到试样的表面和薄膜,研究的层次由原子迁动扩充到电子和声子散射。近年来,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、量子声学的领域,研究的层次更为深入。

我国于1985年8月在原有的内耗实验室的基础上建立内耗与固体缺陷开放研究实验室,向国内外开放。这个开放实验室的主要方向是研究在能够得到的全部频率范围(从低频到高频)和广阔的温度区域内的内耗谱(机械振动吸收能谱),从而了解各种类型的固

体结构和结构缺陷的组态、运动变化及其相互作用与固体的物理和化学性质之间的关系,为发展具有特定性质的新型材料提供理论基础和技术线索。主要研究内容有五个方面:(1)研究各种固体缺陷及其相互作用所引起的内耗谱(包括超声衰减)的微观机理。(2)研究各种固态物质中的内耗现象的微观机理。(3)研究内耗学对于一些与材料科学和生产实际有密切联系的关键问题的应用。(4)研究和发新的实验技术,创制新的内耗实验设备。(5)探索内耗(包括超声衰减)测量技术与传统的微观观察和结构成分分析手段联合作战研究固体物理重要问题的新路子。

几年以来,开放研究实验室取得了一些可喜的研究成果。在铝镁和铝铜合金里发现了由于溶质原子与位错交互作用所引起的十个温度内耗峰。从低温到高温排列,它们分别被命名为 $PL_2, PL_1, P, R_2, R_1, P_0, P_1', P_1'', P_2, P_3$ 峰。这就把溶质原子双空位对、溶质原子单空位对、溶质原子本身与位错的短程交互作用(通过位错弯结)以及长程交互作用(通过Cottrell气团)所引起的内耗弛豫谱的完整框架勾画了出来,并且提出了各个弛豫谱线的微观机制。这一系列的工作大大拓宽了非线性反常内耗研究的突破口。在晶界内耗的研究方面,澄清了关于晶粒间界内耗峰(葛峰)的来源的争论,肯定了葛峰是由于晶粒间界的弛豫过程所引起起来的。我们还通过我们以前提出来的“无序原子群的晶界模型”以及新近发现的晶界弛豫强度随着测量温度的降低而减小,并且最后变为零的实验事实,把晶界弛豫的微观过程与晶界原子结构的计算机模拟所得的结果联系起来,这孕育着关于晶界结构与晶界性质的研究的一个重要突破的苗头。另外,我们还首先发现竹节晶粒间界所引起的一个低于葛峰温度的新内耗峰以及单晶体经过扭转形变和高温稳定化退火所出现的高于葛峰温度的新内耗峰。一系列的深入研究阐明了这两个新内耗峰的出现条件、弛豫特性和微观机制。这进一步确切证明葛峰与晶粒内部的位错无关。

这些年来,开放研究实验室的同志们在党和各级领导同志的鼓舞和支持下,获得了一些为祖国争得了荣誉的研究成果。这个开放研究实验室的负责同志在1989年4月获得了日本金属学会的荣誉员的称号,在1989年7月获得了固体内耗与超声衰减国际奖。这些充分显示了我国实行改革开放政策在科学事业上所开辟的广阔前景。

我们在1990年中科院数理学部全体委员会上报告了我们的工作和设想,并建议联合开放研究实验室在近期内集中力量进行下述的研究课题:

(1)固体缺陷的机械振动吸收能谱(声吸收谱)的实验和理论研究。

(下转第14页)

学上自洽的理论。它也有无穷大，但他们铺上了一块地毯把它盖上了。最后的结果已经证明在数学上是自洽的。

问：流行的观点认为只有把各种力统一起来，无穷大问题才能真正解决。对此，您怎么看？

答：是的，由于色动力学提供了一种吸引人的解决方式，而且电动力学又已证明不能令人满意，使电动力学也变成与色动力学类似的形式是可行的。这导致人们把对称性扩充，以容纳下各种类型的力，发展了一种统一理论。这是一个强有力的建议。应当承认，过去我一直认为单单企图消除无穷大不会是发现正确的物理规律的好办法，在这一点上我是错了。在猜测什么是着手研究的最好办法上，我常常犯错误。至于超弦，我的谨慎态度是由我的经验产生的，我不相信它。

问：谈到无穷大，据说真正难解决的是引力。我觉得奇怪的是，在原子尺度上引力是极弱的，为什么在统一描述粒子物理中的作用力时，还必须把引力包括进去呢？在粒子物理中如果不考虑引力，无穷大问题不就好解决了吗？

答：你居然认为引力不重要，这使我很惊讶。我们需要引力，因为引力无处不在。它是物理学的一个最基本的规律。如果一个物理理论不能描写引力，它绝不会是一个正确的理论。其次，引力理论还必须是一个量子理论。我们不可能用一部分是经典的而另一部分是量子的来描写整个的世界。在量子力学中我们知道，在同一个时刻，我们不可能以任意的精度既观测坐标又观测动量。这个事实也同样应当适用于引力。在企图修改引力理论，使它成为量子理论时，也遇到了无穷大。这是和在电动力学中的情况是一样的。但这种无穷大更严重，更难消除。我不知道如何解决这个问题，但它必须解决。

此外，按照量子场论，真空的能量不是零。它是一切系统都处在最低能量的状态。而引力是与各种形式的能量都有相互作用的，因此也应当与真空的能量相互作用。于是真空也会有重量，也会产生引力场。事实又如何呢？以电磁场为例，它的真空产生的引力场应该是非常巨大的，但事实上却是零，或者是极小。这当然与从场论和引力理论得到的预言完全不符。这个问题有时称为宇宙常数问题。它意味着在我们的引力理论中丢了一些东西。由此带来的麻烦就是引力与真空能量相互作用会产生无穷大。显然，引力与真空能量有相互作用的这种想法是错的。我认为我们首先需要的就是如何表述引力理论，使引力不与真空能量相互作用。或者重新建立场论，使真空没有任何能量。

问：据我所知，现在有些人抱乐观态度，认为用不了几年就可以证明超弦的思想是正确的，您所提到的那些困难将会得到解决。我们会有一个理论，它似乎能解释宇宙中发生的一切。您相信吗？您认为一个能

够解释自然界基本要素的理论能够解决一切问题吗？甚至连生命的起源和知觉起源的问题也能解决吗？

答：你提的是一个非常大的问题。让我们先从物理学的问题开始吧。完全可能有那么一天，或许就是用超弦，我们得到了一个能够解释所有的实验现象的理论。通过这个理论的精确的数学分析，我们将证明 $\mu$ 子与电子质量之比确是观察到的数值，其它与此类似的数据也都得到了完满的解释。这个理论正确地预言了自然界的各个方面的性质，或许也包括了关于宇宙起源的完美的解释。可是这仍属于基础理论的各个部分。在实际的世界中，还有冲垮海岸的波浪，还有暴雨、闪电、狂风以及噪声等，即使你真的知道了所有的物理规律，也不可能对它们进行直接的分析。事实上我们今天知道的物理规律已经足够多了，但由于这些相互作用细节实在太复杂了，我们仍然显得无能为力。以天气现象为例，有了量子力学以及原子理论就应该足够了，连原子核的知识都用不到。但由于它太复杂，我们仍然解释不了。这好比像下象棋，即使你学会了所有的规则，你也不一定能玩得好。人们可以学会所有的物理规律，而且也可以达到充分的精确，但这并不意味着我们能分析一切问题。生命的起源当然更是一个复杂的现象。就物理学现在的状态而言，要解释这些现象，如果仍拿下棋来比喻，应该说有许多规则还不知道。无论哲学上取得多大的进展，也代替不了物理学家必须填补对基本规律了解的不足需要进行的工作。

## 结 束 语

“著名物理学家谈超弦”至此告一段落。从选编的这几篇谈话，读者不难看到对超弦理论的看法存在着明显的分歧。从物理学史可以看到，这种类似的大争论历来都是使物理学大发展的强大推动力量。希望这场争论也不例外。超弦理论在经过了几十年末末的热潮之后，确实已经转入了深入、细致的研究阶段。争论的焦点正成为他们努力奋斗的方向。我们愿和热心的读者一起期待着新的进展。

(上接第6页)

(2) 高 $T_c$ 氧化物超导体的内耗、超声衰减和磁通钉扎的研究。

(3) 晶界偏析动力学、晶界设计和界面物理的研究(包括大块毫微晶固体的制备和研究)。

(4) 高分子聚合物的弛豫和阻尼性能的研究。

(5) 超声物理、量子声学 and 声发射机制的研究。

(6) 内耗与超声衰减新仪器设备的研制。

(7) 同步辐射对于研究固体缺陷的应用。