

分子动力学探究内耗讲授方法

王 兵¹ 乔吉超²

(西北工业大学¹物理科学技术学院;²力学与土木建筑学院,陕西 西安 710072)

摘 要 固体内耗是固体材料在振动中所引起的能量损耗,与其阻尼性能密切相关,在微观上是原子弛豫及原子结构演化的反映,能够加深对固体材料缺陷弛豫动力学的理解。分子动力学是研究固体材料的重要方法,可在微观上直观观测结构及动力学演化,具有目前实验不可企及的优势。本文从理论推导固体内耗参数,并应用分子动力学方法给予表征,结合上机实验加深同学们对固体内耗的理解,进一步概述固体内耗研究前沿,这对于固体力学粘弹性教学具有重要启发价值。本文结合固体内耗理论知识及作者多年的内耗研究成果,从教学方法改革、教学内涵及教学过程设计等多方面探讨该课程教学,讲授了固体内耗本质及分子动力学在内耗方向的应用,深化了固体内耗教学效果。

关键词 固体内耗;分子动力学方法;教学方法;非晶合金

TEACHING METHODS OF INTERNAL FRICTION VIA MOLECULAR DYNAMICS

WANG Bing¹ QIAO Jichao²

(¹ School of Physics Science & Technology;

² School of Mechanics and Civil. & Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072)

Abstract Internal friction, as a kind of energy dissipation caused by vibration in solid materials, is closely related with the property of damping and can reflect atomic dynamics and structural information in microscopic view, that plays a critical role in understanding in relaxation dynamics of defects in materials. Molecular dynamics is an important approach of investigating properties of solid materials, having an unattainable advantage in observing the evolution of atomic dynamics and structure. Based on the theory of solid, the concept and parameters of internal friction were introduced in the current work. Combined with molecular dynamics method, the internal friction was characterized by a kind of quantitative parameter and the evolution of direct structure and dynamics were observed. What is more, the frontier progress of internal friction in dynamics relaxation and structure is summarized, which has an important enlightening value for the teaching process of viscoelastic mechanics. Based on the theory and research results of internal friction for recent years, this paper investigates the innovation of teaching methods, teaching connotation, and teaching links, which is applied to the mechanism of internal friction and molecular dynamics, further enhances the teaching effect in internal friction.

Key words internal friction; molecular dynamic method; teaching methods; metallic glasses

收稿日期: 2023-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(52101201);重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0369)。

作者简介: 王兵,女,讲师,主要从事物理教学科研工作,研究方向分子动力学非晶合金弛豫动力学;乔吉超,男,教授,主要从事力学教学科研工作,研究方向为非晶合金的粘弹性力学行为, wangbing0614@nwpu.edu.cn; qjczy@nwpu.edu.cn。

引文格式: 王兵,乔吉超. 分子动力学探究内耗讲授方法[J]. 物理与工程, 2023, 33(5): 75-80, 113.

Cite this article: WANG B, QIAO J C. Teaching methods of internal friction via molecular dynamics[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(5): 75-80, 113. (in Chinese)

早期《国家教育事业第十二个五年规划》明确提出了要加强创新意识和能力培养,这也是科学研究所具备的必要条件^[1]。这对本科生教学提出了新的要求,本科课堂也面临教学方法改革。深入反思几年前钱学森先生提出的“钱学森之问”,以及社会对大学生能力不足的负面评价,均侧面反映出大学课堂创新性能力培养的不足^[2-5]。近年,教育部高瞻远瞩地制定了“双万计划”及“四新专业”等教育质量提升工程,强调打造具备“两性一度”的“金课”,淘汰“水课”。高阶性、创新性、挑战度的要求提升了课程难度,拓展了课程深度^[3,6]。专业课程作为提高学生专业能力,培养学生创新能力的土壤,其教学方法创新尤其重要^[7,8]。在固体力学粘弹性教学中,如何深入理解固体内耗的物理含义,将其与固体材料实际应用链接,在教与学中均存在较大难度,分子动力学可为物理内涵和直观图像之间搭建一个桥梁,在教与学过程中充分理解内耗本征物理机制及其与微观结构特征的关联。

固体内耗研究最初源自对高或低阻尼材料的调控。20世纪50年代,我国科学家葛庭燧先生在C. Zener的《金属的弹性和滞弹性》基础上,依据自主研发的扭摆内耗仪(葛氏测量)测得内耗行为,提出晶体材料内耗行为机制的独到见解,奠定了固体材料内耗的实验及理论基础^[9-11]。振动着的物体,即使与外界完全隔绝,其机械振动也会逐渐衰减下来,这种机械能量耗散转化为热能的现象,叫做内耗^[11]。在弹性形变范围内,应力与应变的关系遵循胡克定律,即应力与应变呈线性关系。表现为,材料受到应力作用时,立即产生对应的应变,而一旦撤去应力,应变也立即变为零值^[12]。这种变化与固体的微观结构密切相关。固体材料在存在缺陷的情况下,在原子尺度上,由于应力的作用,原子会从原来的平衡位置移动到新的平衡位置,在此弛豫过程中引起的微观位移导致应变落后于应力,从而导致能量损耗^[11]。内耗可用来探测材料缺陷、内部结构变化及弛豫动力学过程,可应用于晶态固体材料以及非晶态固体材料等,比如新型陶瓷材料、金属间化合物材料、复合材料、纳米材料及非晶态合金材料等^[13,14],具有广泛的应用前景及重大科学研究价值。目前,内耗在晶态材料中的结构起源已经比较明朗^[11],但非晶态材料中内耗的起源问题仍值得进一步探究^[15-17]。然而内耗与其他主干课程相关知识联系较少,属于科学前沿问题之一,学生对

此部分背景知识掌握匮乏,这对本部分内容的教学带来一定困难。而分子动力学可直观观测材料微观结构及其动力学的变化,利用分子动力学上机实验直观测量内耗行为,观测结构及动力学的变化,可帮助同学们加深对内耗本质的理解。

从能量角度定义内耗,公式简单,看似比较容易掌握,以至于同学们容易轻视本部分内容。经过作者多年的内耗弛豫研究,发现内耗行为实则包含深刻的物理内涵。根据观察,部分同学在讲解结束之际,仍不能深刻理解内耗与微观结构的本征关联以及内耗测量时频率与弛豫峰的依赖关系等。如何加深本部分内容的理解,更加有逻辑性地对本部分内容加以阐述,仍有较大思考实践空间。意识到这个问题之后,根据作者多年的教学经验,改进教学模式:首先,从与生活相关的实例引入内耗概念,从能量角度对内耗给予定量表征。其次,推导实验可测量的几种内耗定量表征参数。然后,分析内耗行为在材料结构缺陷及其动力学弛豫演化方面的应用。最后讲授并带领同学们上机实验如何利用分子动力学实现内耗测量,及其直观观测内耗行为、结构及动力学的关联。授课思路如图1所示。

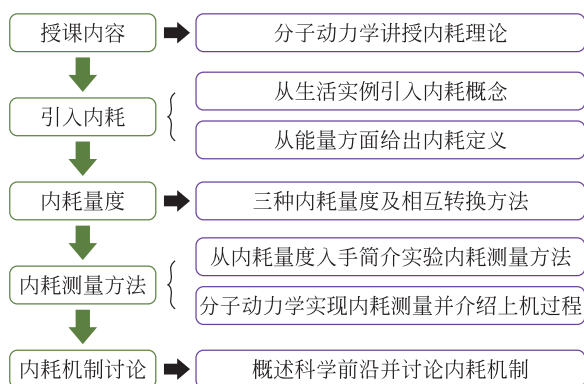


图1 授课思路示意图

1 讲授方法

1.1 从生活实例引入内耗

内耗定义看似与生活实际相去甚远,实则生活中普遍存在内耗现象。教学中可从生活紧密相关的事例讲述内耗现象,从而引出内耗的物理内涵,可引发学生主动思考并激发学生学习的兴趣。“钟声绕梁,三日不绝”,钟声停止得快慢与内耗相关,内耗则为材料内部的原因所引起的能量损耗。铸造钟的合金材料内耗小,能量损耗小,从而钟振

动停止得很慢。因此我们可由能量角度给予内耗以定量表征。

提取主要因素,忽略次要因素,可建立一简单物理模型。在无风阻、弹性地面情况下,一小球自由落体后被弹起。如图2所示,可观测到,小球弹起的高度小于小球初始高度。从能量角度认识此过程,根据能量守恒定律,小球的初始重力势能可认为由两部分组成:恢复的能量,即最大弹性储能,可用小球弹起的高度表示;由于小球内部结构单元运动而引起耗散的能量,可由小球初始高度与被弹起高度之差表示。在此过程中,内耗为损耗能量与最大弹性储能之间的比值。

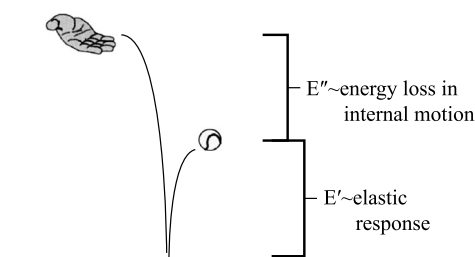


图2 从能量方面认识内耗。当小球落到地上被弹起,其初始能量被分为两部分:恢复的能量(被记为 E'),由于摩擦与原子内部运动而损耗的能量(被记为 E'')^[18]

弹性理论认为,在弹性形变范围内,施加在材料的应力与引起的应变的关系遵循胡克定律,即应力与应变呈现线性关系。表现为,材料受到应力时,立即产生对应的应变,而一旦撤去应力,应变也立即变为零值^[11]。这仅对弹性材料适用。而有些材料有一些特异的性质,当被施加应力时,并不能立即产生根据胡克定律应当达到的应变,而会随着时间的推移缓慢达到所对应的应变。实际上,材料对载荷所产生的效应,包括与时间无关的弹性应变,和滞后于所加载荷和时间有关的应变^[11]。而内耗的产生也正是由于应变落后于应力产生,也称为材料的滞弹性或迟滞现象。由于材料的滞弹性,当施加荷载大于一定值时,在卸载过程中由于材料内部残余变形导致荷载为零而形变不为零。经过一个载荷循环后,载荷形变曲线会形成一个环线,称之为滞回环,如图3为施加载荷为周期性应力或应变时的周期性滞回环,称为材料的迟滞性^[18]。滞回环曲线加载部分所包围面积对应材料吸收能量的大小;而滞回环内加载曲线与卸载曲线所包围的面积则对应了材料所耗散的能量,这是由于结构上的特点或结构的缺陷在材料承受应力时微观结构演变所致。两者能量

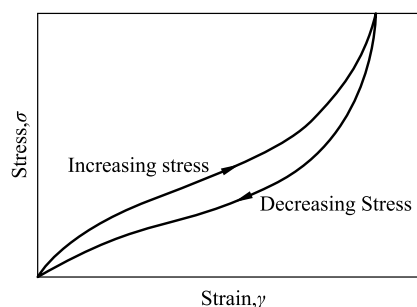


图3 聚合物中的迟滞现象^[18]

之差为材料最大弹性储能。而内耗则可表示为损耗的能量 ΔW 与最大弹性储能 W_s 之间的比值

$$\psi = \frac{\Delta W}{W_s} \quad (1)$$

1.2 内耗的测量方法

材料周期性振动中,自由振动的振幅会不断衰减,衰减得越快,内耗越大。这里的自由振动是指对材料施加外力后,材料偏离它原来的平衡位置后不再施加外力。因此可用对数缩减量 δ 来表征内耗的大小^[11]

$$\delta = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right) \quad (2)$$

其中, A_n 为第 n 次振幅大小, A_{n+1} 为第 $n+1$ 次振幅大小。利用此量度测量内耗的方法叫做自由衰减法。

如果采用周期性应力来激发材料,而产生周期性振动,之后仍继续施加周期性运动,则材料进行受迫振动^[18]。假设周期性应力为

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin \omega t \quad (3)$$

对于理想弹性材料,引发的应变响应为瞬时的,且遵循胡克定律,为

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin \omega t \quad (4)$$

而对于理想粘性材料而言,其服从牛顿粘性定律,应力与应变速率成正比,应变响应为

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

而对于一般性粘弹性材料,其应变响应介于理想弹性材料与理想粘性材料之间,应变响应可表示为

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

其中, φ 即为应变相位落后于应力的相位。落后角度越大,内耗越大,因此 φ 为内耗的量度之一。利用此方法测量内耗的方法称之为强迫振动法^[13]。

另外一种测量内耗的方法是采用不同频率激发材料,当外加频率 ω 与材料自有共振频率 ω_0 相

等时,振动振幅最大。在同种情况下,材料内耗越大,共振振幅越低,共振峰越宽。则可用共振峰宽度对应的频率范围与 ω_0 的比值作为内耗的量度之一^[11]。这与振荡电路的品质因数 Q 的倒数相对应,可用 Q^{-1} 表示内耗的量度。利用此方法量度内耗的方法称之为共振峰半宽法^[13]。

这三种表征内耗的量度可以互相换算,之间只相差一个常数,均可通过能量推导而来。由于振动的能量与振动振幅的平方成正比,所以

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{A_n^2 - A_{n+1}^2}{A_{n+1}^2} = \frac{(A_n - A_{n+1})(A_n + A_{n+1})}{A_{n+1}^2} \approx 2 \ln \left(\frac{A_n}{A_{n+1}} \right) \quad (7)$$

与以上提到的相似,对材料施加正弦周期性应力,粘弹性材料由于自身结构变化产生应变滞后现象,在应力应变曲线中形成滞回环。应力表示为式(3),应变表示为式(6),应变可展开为

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 (\cos \varphi \sin \omega t - \sin \varphi \cos \omega t) \quad (8)$$

为了方便计算材料的模量,将应力应变函数化为复数形式,可改写为

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp(i\omega t) \quad (9)$$

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \exp[i(\omega t - \varphi)] \quad (10)$$

材料复模量可表示为

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\epsilon(t)} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} e^{i\varphi} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} (\cos \varphi + i \sin \varphi) \quad (11)$$

储能模量可表示为

$$E' = |E^*| \cos \varphi = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \varphi \quad (12)$$

损耗模量可表示为

$$E'' = |E^*| \sin \varphi = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \varphi \quad (13)$$

其中,储能模量为材料变形过程中由于弹性形变而储存的部分,损耗模量则表示粘性变形过程中以热能形式耗散的部分^[18]。因此

$$\frac{E''}{E'} = \tan \varphi, \text{ 且 } |E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \quad (14)$$

而从能量方面考虑,加载曲线及卸载曲线形成的滞回环面积为材料损耗能量 ΔW ,可计算得到

$$\Delta W = \oint \sigma(t) d\epsilon(t) = \int_0^{2\pi} \sigma(t) \frac{d\epsilon(t)}{dt} dt = \frac{1}{4} \pi \epsilon_0^2 E'' \quad (15)$$

而材料在加载过程中(1/4 周期)所存储的弹性能量 W

$$\int_0^{2\pi} \sigma(t) \frac{d\epsilon(t)}{dt} dt = \frac{\epsilon_0^2 E'}{2} + \frac{1}{4} \pi \epsilon_0^2 E'' \quad (16)$$

其中, $W_s = \frac{\epsilon_0^2 E'}{2}$ 为最大弹性储能, $\frac{1}{4} \pi \epsilon_0^2 E''$ 为 1/4 周期内损耗的能量。在一个加载周期中,内耗为损耗能量与最大弹性储能的比值,一般用 ψ 表示。

$$\psi = \frac{\Delta W}{W_s} = 2\pi \frac{E''}{E'} = 2\pi \tan \varphi \quad (17)$$

内耗正切值 $\tan \delta$ 一般表示为品质因数 Q^{-1} 。

$$Q^{-1} = \tan \varphi = \frac{E''}{E'} \approx \varphi \quad (18)$$

可以看出,内耗量度的三种表达形式在本质上是相同的,可相互换算,均可从能量方面推导而来。

1.3 分子动力学实现内耗的测量

分子动力学计算工具采用 LAMMPS 软件。本次以计算非晶合金的弛豫行为为例来直观观察内耗与原子运动及结构的关联。首先采用快速冷却方法制备非晶合金。非晶合金液体在高温下弛豫到平衡态,之后快速冷却至低温状态,为计算某温度的内耗行为,过程中保存相对应温度的构型,可将冷却速率设置极快,比如 10^{13} K/s 以快速获得非晶合金样品。在模拟过程中设置 NPT 系综,采用周期性边界条件消除表面影响,制备和实际相似的非晶合金样品^[16]。

之后,与实验测量弛豫动力学类似,在计算模拟中对材料施加交变应变

$$\epsilon(t) = \epsilon_A \sin\left(\frac{2\pi t}{t_p}\right) \quad (19)$$

其中, ϵ 代表应变, ϵ_A 代表应变振幅, t_p 为加载周期。观察应力响应,通过公式

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_A \sin\left(\frac{2\pi t}{t_p} + \varphi\right) \quad (20)$$

拟合得到应力与应变之间的相位差 φ , 其中, σ 为响应应力, σ_A 为应力振幅, σ_0 为拟合常数。如图 4(a) 为施加在非晶合金材料的正弦周期性应变与应力响应。然后可根据式(12)和式(13)计算得到非晶合金的存储模量 E' 和损耗模量 E'' 。如图 4(b) 为测得的应力振幅及计算所得的非晶合金样品的内耗量度 φ 。

1.4 内耗的应用及内耗的机制

材料内部结构变化及结构缺陷会引起内耗,材料内耗参数同样反映材料内部结构的特点及缺陷信息,可获得材料缺陷种类、运动规律及动力学信息等。

1.4.1 晶体材料的内耗模式及其机制

晶体的结构特点为长程有序,在实际材料中,

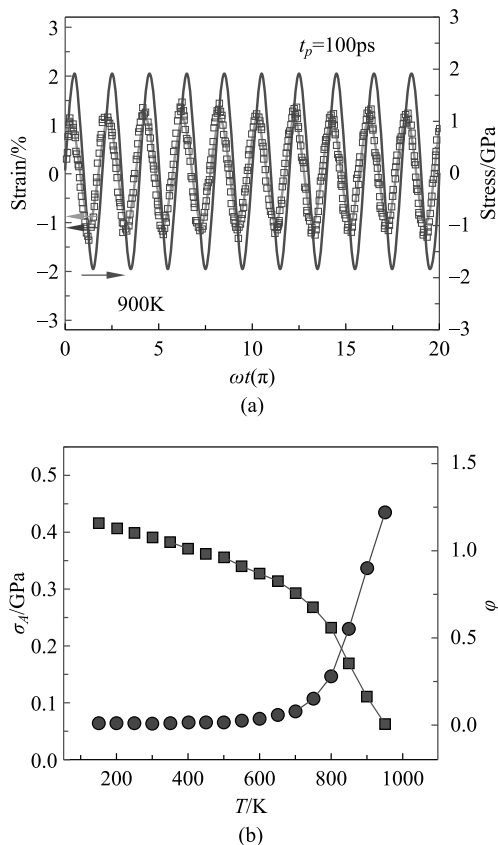


图4 采用分子动力学方法测量内耗
(a) 对非晶材料施加周期性应变(深色曲线),而后响应的应力(深色线曲线);(b) 计算得到的最大应力幅值及内耗角度 φ 随温度的变化曲线^[16]

完美的晶体一般不存在,因此晶体缺陷是普遍存在的。目前已知的晶体缺陷有点缺陷、线缺陷、面缺陷及体缺陷。与此对应的晶体的内耗模式为点缺陷内耗、线缺陷内耗、面缺陷内耗及相变内耗^[13]。

点缺陷是晶体中晶格的局部错乱,主要包含肖脱基缺陷(空缺一个原子的正常阵点)、填隙原子及夫伦克耳缺陷(一对相距较近的空位及填隙原子)。其内耗机制明确,一般认为是由于应力会导致点缺陷势阱能级分裂,从而使点缺陷调整到另一种平衡分布组态,产生非弹性应变,而导致应变滞后于应力,产生内耗^[13]。Snoek 峰及 Zener 峰即为典型的点缺陷内耗峰。对于体心立方晶体,填隙原子引起单轴形变,而由一种间隙位置跳入另一种间隙位置引起单向轴的变化,称为 Snoek 效应。面心立方晶体中替代式固溶原子对所引起的内耗峰为 Zener 峰。不同的点缺陷引起的内耗弛豫时间不同,从而对应不同的内耗峰。

线缺陷的集中表现形式为位错,它是由晶体原子平面的错动引起。位错在运动过程中,会受到各种阻力的作用,如声子电子阻力,辐射阻力及位错与点缺陷相互作用所产生的阻力等,从而引起能量耗散,产生内耗^[19]。在面心立方金属中发现的 Bordoni 峰即为位错的内耗现象,同时与点缺陷、晶界以及它们之间的相互作用有关。

面缺陷的主要表现形式为界面,包括晶粒间界、共格相界及孪晶晶界等^[11]。面缺陷弛豫主要由于界面在微滑移过程中的粘滞性运动引起。晶界内耗峰则是一种典型的面缺陷弛豫,这是由我国科学家葛庭燧先生最早发现并研究的。

根据原子运动形式,相变可分为扩散型及非扩散型相变,相变现象也会引起内耗。朗道理论认为,扩散型相变内耗一般与过度沉淀有关,而非扩散型相变一般指马氏体相变。

1.4.2 非晶态材料的内耗模式及其机制

非晶态材料的结构特点为短程有序、长程无序,因此缺陷类型界定具有挑战性^[20]。大量研究表明,相较于对应晶态材料而言,非晶态材料呈现更明显的内耗行为,并且内耗行为模式更加复杂^[21]。

研究发现,对于高温非晶液体,其黏度 η 和扩散系数 D 之间符合 Stokes-Einstein 关系

$$D = k_B T / c \pi d \eta \quad (21)$$

其中, k_B 代表玻耳兹曼常数, T 为温度, c 为常数, d 为维度, η 为粘度系数。这时高温液体只存在一种弛豫模式—— α 弛豫^[22]。而在 $1.2 T_g$ (玻璃转变温度)附近, Stokes-Einstein 关系发生退耦,而弛豫则从一种弛豫模式劈裂为两种弛豫模式—— α 弛豫和 β 弛豫^[23]。 α 弛豫被认为与大规模原子的运动相关,而 β 弛豫与原子的局域运动相关。研究发现 β 弛豫内耗与原子运动快慢密切相关,但目前其与非晶结构之间的观察尚需进一步研究^[24]。如图 5 所示,在上机实验时可观察这一现象。

2 结语

本文从生活实例与实验中的应力应变曲线引入内耗概念,其次具体介绍了内耗的量度,从内耗量度入手讨论了测量内耗的具体方法,进而利用分子动力学方法实现内耗的测量,直观且真实地为同学们展示内耗行为的来源及其本质,最后概

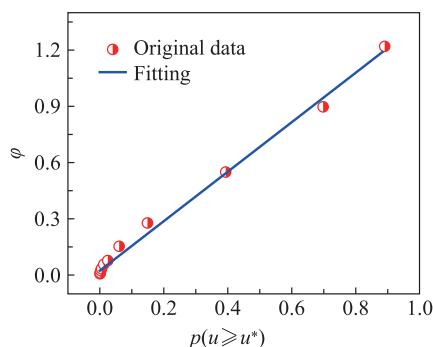


图5 非晶态合金内耗与快原子概率之间的线性关联。

这表明非晶态合金中内耗主要由快原子贡献

述了在晶态和非晶态中内耗不同的表现形式,进一步引发同学们对科研的探索兴趣。授课过程力争由浅入深,从原理到应用进而由分子动力学直观展现,再到目前该领域中的科研前沿。主要结论如下:

(1) 内耗与能量息息相关,本征是能量耗散的过程。内耗量度均可从能量推导而来。

(2) 内耗可反映材料结构演化及材料缺陷信息,本质对应原子缺陷随时间的运动,即原子的重排问题。

(3) 利用计算模拟中分子动力学可直观观测内耗行为,可给出原子具体结构及动力学信息,从而进一步研究内耗机制问题。目前对于晶体材料内耗机制渐渐明朗,其与晶体缺陷(点缺陷、线缺陷、面缺陷及体缺陷)密切相关。而目前非晶体材料的内耗机制问题虽有进展,但由于非晶结构缺陷难以界定,所以内耗机制问题仍需进一步探索。

参 考 文 献

- [1] 张俊文,李玉琳,宋志伟,等. 基于培养能力的大学课堂教学改革策略[J]. 煤炭高等教育, 2015, 33(1): 98-101.
ZHANG J W, LI Y L, SONG Z W, et al. Research on the teaching mode reform strategy based on capacity building[J]. Meitan Higher Education, 2015, 33(1): 98-101. (in Chinese)
- [2] 赵作斌,牛换霞. 开发·内化·创新——高校课堂教学模式新探[J]. 中国高等教育, 2019, 631(Z2): 37-39.
ZHAO Z B, NIU H X. Development, internalization and innovation: a new exploration of the classroom teaching mode of colleges and universities[J]. China Higher Education, 2019, 631(Z2): 37-39. (in Chinese)
- [3] 郑祥江,张强,谢鸿全,等. 以学生为中心的大学课堂教学改革策略研究[J]. 西南科技大学学报(哲学社会科学版), 2021, 38(2): 89-95.
ZHENG X J, ZHANG Q, XIE H Q, et al. Research on “student-centered”(SC)classroom teaching reform strategies [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology (Philosophy and Social Science Edition), 2021, 38(2): 89-95. (in Chinese)
- [4] 朱卫利. 新形势下大学物理教学现状的调查分析及教改探讨[J]. 科技风, 2021, 450(10): 46-48.
ZHU W L. Investigation and analysis of the current situation of university physics teaching under the new situation and discussion on teaching reform[J]. Tech Style, 2021, 450(10): 46-48 (in Chinese)
- [5] 卫建国. 大学课堂教学改革的理念与策略[J]. 高等教育研究, 2018, 39(4): 66-70.
WEI J G. On the Idea and Strategy of the University Classroom Teaching Reform[J]. Journal of Higher Education, 2018, 39(4): 66-70. (in Chinese)
- [6] 邓忠波. 大学课程中“水课”现象审视与“金课”建设进路[J]. 中国电化教育, 2020, 399(4): 68-74.
ZHENG Z B. A study on the inspection and approach to course construction based on eliminating “Valueless Courses” and building “Valuable Courses”[J]. China Educational Technology, 2020, 399(4): 68-74. (in Chinese)
- [7] 王海鹏,赵炯飞. 分子动力学计算液态金属性质的启发式教学方法[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 64-70.
WANG H P, ZHAO J F. Heuristic teaching methods for molecular dynamics calculation of liquid alloy properties[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 64-70. (in Chinese)
- [8] 杨兵初,徐富新,周聪华. 课堂教学方法改革是创新教育的关键[J]. 物理与工程, 2020, 30(4): 42-47.
YANG B C, XU F X, ZHOU C H. Performing the classroom instruction method is the key of the innovation education[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(4): 42-47. (in Chinese)
- [9] 李义发. 德高望重的著名爱国科学家葛庭燧[J]. 自然杂志, 1993, 05.
LI Y F. The famous patriotic scientist Ge Tingxiao is highly respected[J]. Chinese Journal of Nature, 1993, 05. (in Chinese)
- [10] 葛庭燧. 非线性滞弹性内耗的实验和理论研究[J]. 金属学报, 1997, 33(1): 9-21.
GE T S. Experimental and theoretical study on non-linear anelastic internal friction [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(1): 9-21(in Chinese)
- [11] 葛庭燧. 固体内耗理论基础: 晶界弛豫与晶界结构[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.
- [12] 周正存,杨洪,顾苏怡,等. 内耗技术在金属晶体原子缺陷方面的应用研究[J]. 苏州市职业大学学报, 2010, 21(2): 1-5.
ZHOU Z C, YANG H, GU S Y, et al. Application of internal friction technique in investigation atomic defects of metallic crystalline [J]. Journal of Suzhou Vocational University, 2010, 21(2): 1-5. (in Chinese)

(下转第 113 页)

轮子已经摆到右侧,如图右侧部分所示。若把该点在三个时刻的位置用光滑的曲线连起来,将得到一条往上凸起的曲线。由此可见,当点位于顶点时,它离转轴 O 最近,也就是说,它的位移是指向 O 的,而此处的轴向力是背离 O 的。可见,力与位移的方向的确相反。

实际上,考虑到这些点一方面在随轮子自转,现在又在进动,综合来看,这些点在作曲线运动,那么曲线运动必然受到向心力的作用,而向心力总是指向曲线的曲率中心的,既然最高点处的轴向力指向远离 O 的方向,它作为向心力所决定的曲线运动的曲率中心当然也在远离 O 的那一侧了。

3 结语

本文通过将刚体的运动与质点运动的类比,将进动理解为刚体惯性的所导致的结果,在此基础上,我们构建了一个思想实验来理解进动现象。当转动的刚体受垂直于角动量的外力矩作用时,其作用效果相当于一个未自转的刚体在垂直的方

向受到一个力偶作用,这导致了回转力矩。进一步地,我们基于力和运动的简单计算,深入理解回转力矩的本质,通过分析陀螺上各点的速度和位移的分布情况,直观地解释了陀螺进动的物理机制。

参 考 文 献

- [1] 江先国. 对称陀螺运动的简明分析方法[J]. 大学物理, 1988(10): 5-8.
JIANG X G. A concise analysis method of symmetric gyro motion[J]. College Physics, 1988(10): 5-8. (in Chinese)
- [2] 梁昆森. 令人困惑的定点转动[J]. 大学物理, 2010, 29(9): 55-58.
LIANG K M. Confusing fixed-point rotation[J]. College Physics, 2010, 29(9): 55-58. (in Chinese)
- [3] 梁昆森. 力学上册[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [4] 刘斌. 力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2013.
- [5] 梁昆森. 旋转的陀螺为什么不倒[J]. 物理教学, 1980(3): 12-13.
LIANG K M. Why does the spinning top not fall down[J]. Physics Teaching, 1980(3): 12-13. (in Chinese)
- [19] 方前锋. Ta-O 固溶体中的 Snoek-Köster 弛豫[J]. 金属学报, 1996, 06: 565-572.
FANG Q F. Snoek-Köster relaxation in Ta-O solid solutions[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1996, 06: 565-572. (in Chinese)
- [20] 汪卫华. 非晶态物质的本质和特性[J]. 物理学进展, 2013, 33(5): 177-351.
WANG W H. The nature and properties of amorphous matter[J]. Progress in Physics, 2013, 33(5): 177-351. (in Chinese)
- [21] 乔吉超, 张浪淳, 童钰, 等. 基于微观结构非均匀性的非晶合金力学行为[J]. 力学进展, 2022, 52(1): 117-152.
QIAO J C, ZHANG L T, TONG Y, et al. Mechanical properties of amorphous alloys: In the framework of the microstructure heterogeneity[J]. Advances in Mechanics, 2022, 52(1): 117-152. (in Chinese)
- [22] CHENG Y Q, MA E, SHENG H W. Alloying strongly influences the structure, dynamics, and glass forming ability of metallic supercooled liquids[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(11): 111913.
- [23] DEBENEDETTI P G. Supercooled liquids and the glass transition[J]. Nature, 2001, 410(6825): 259-267.
- [24] YU H B, SAMWER K. Atomic mechanism of internal friction in a model metallic glass[J]. Physics Review B, 2014, 90(14): 144201.
- [13] 许巧平, 郝刚领, 刘巧平. 内耗技术的研究进展与应用[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 53-59.
XU Q P, HAO G L, LIU Q P. Research progress and application of the internal friction technology[J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition), 2010, 29(2): 53-59. (in Chinese)
- [14] 吴学邦, 刘长松, 朱震刚. 内耗技术在软物质研究中的一些应用[J]. 物理, 2016, 45(11): 720-728.
WU X B, LIU C S, ZHU Z G. Applications of internal friction technology in the study of soft matter[J]. Physics, 2016, 45(11): 720-728. (in Chinese)
- [15] YU H B, WANG W H, BAI H Y, et al. The β -relaxation in metallic glasses[J]. National Science Review, 2014, 1(3): 429-461.
- [16] WANG B, SHANG B S, GAO X Q, et al. Understanding atomic-scale features of low temperature-relaxation dynamics in metallic glasses[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2016, 7(23): 4945-4950.
- [17] YU H B, RICHTER R, SAMWER K. Correlation between viscoelastic moduli and atomic rearrangements in metallic glasses[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2016, 7(19): 3747-3751.
- [18] MENARD K P. Dynamic_Mechanical_Analysis-A Practical Introduction[M]. biopolymers, 1999.