

渗理论是处理强无序和具有随机几何结构的系统的理论方法之一,非晶态固体的拓扑无序便成为应用逾渗理论的一个富有成果的领域。逾渗概念应用于非晶态固体的两个突出例子是玻璃化转变和安德孙转变。从逾渗固体的滞弹性的应变弛豫实验,求得了符合(4)式的非德拜的应变弛豫曲线^[7]。我们认为,由实验可以独立地求得了耦合参量 n (对内耗峰曲线的拟合),而由理论也可从反常扩散中求得耦合参量 n 与无规行走的分维数(行走分维) d_w 的关系为 $n = 1 - \frac{2}{d_w}$ 。快离子导体中的超声吸收也可用分形概念进行研究。可以说,在一些非晶态固体中,分形结构上的自相似性是造成反常运输的根源。

由于聚合物链节间的相互作用,缠结聚合物的哈密顿量为不可积问题,系统相空间中有规则 and 混沌的两个区域的混合,而且有散置于混沌区域内的小岛的无限谱系(或分层)^[8]。起初在某个混沌区域的一个粒子能够长时间地逗留在有规区域边界的邻域,因此运输减慢。有规区域的这种“粘连性”,是系统运输的基本方

面。Ngai 等的研究指出,复杂相互作用(相关)系统中弛豫过程可用混沌动力学来阐述,可给出耦合参量 n 的力学解释, $n = \delta - 1$, δ 为动力学指数,它可由两个近似的标度常数 a_0 和 b_0 决定。 a_0 和 b_0 分别表示 Bethe tree 相继两个有序态的通量比和“体积”比^[9]。

分形、混沌已经构成现代非线性科学中具有共性的基本概念。只有利用这些概念才可能把耦合参量 n 的理论和实验研究深入下去,新模型的物理基础正是基于非线性动力学的研究。

- [1] 葛庭燧,物理,16(1987),547.
- [2] Wang Yangpu and Gao Guoru, *J. de Physique*, C10 (1985), 465.
- [3] 王养璞、金其淑,物理学报,37(1988),1083.
- [4] 王养璞、金其淑,物理学报,37(1988),1401.
- [5] 王养璞、金其淑, Proceeding of the 9th International Conference on Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids, International Academic Publishers, (1990), 199.
- [6] 王养璞、金其淑,第三届全国固体内耗会议论文集,原子能出版社,(1992).
- [7] M. Ghosh et al., *Phys Rev. B*, 41 (1990), 731.
- [8] K. L. Ngai et al., *J. Non-Crystalline Solids*, 131 (1991), 233.

位错晶界与点缺陷交互作用引起的非线性、非稳定和 非德拜型弛豫的理论方向

孙宗琦

(中国科学院金属研究所,沈阳 110015)

位错的滑移和晶界的滑动有相似之处,例如它们的元过程都是产生弹性位移偶极,都需克服一定位垒。本文用对比的方法分析了它们的微观机理。

当葛庭燧在 40 年代内耗开创时期研究晶界和位错的滑动引起的内耗时^[1-3],晶界内耗是作为典型的德拜型(标准线性固体)弛豫现象来处理,而位错滑移内耗的非线性、非稳定即非德

拜型特征格外受到葛的垂青。50 年代,GL 位错弦钉扎模型大获全胜,曾一度摆脱了德拜型弛豫的框框。以后,由于点缺陷弛豫弹性偶极理论,特别是 Nowick 专著^[4]的影响,人们已习惯于用德拜型弛豫的观点来讨论一切内耗现象。因此,这里也从德拜弛豫开始。

位错是线缺陷,晶界是面缺陷。描述它们的运动的规律应该分别采用一和二维的积分微

分方程。但从本质上都可以引入某种平均位移 X ，而化简作零维方程来处理。设 f 是相应的由测量内耗外应力引起的等效力， m 、 B 和 K 分别代表有效质量、阻尼系数和刚度，则 X 满足

$$m\ddot{X} + B\dot{X} + KX = f = f_0 \exp(i\omega t). \quad (1)$$

$m\omega \ll B$ ，这几乎没有例外，因此，(1)式的解相当简单

$$X = X_0 \sin(\omega t);$$

$$X_0 = (1 - i\omega\tau) / [1 + (\omega\tau)^2] f_0 / K, \quad (2)$$

由此得到内耗 Q 、模量亏损 $\delta M/M$ 分别为

$$Q = \Delta\omega\tau / [1 + (\omega\tau)^2],$$

$$\delta M/M = \Delta / [1 + (\omega\tau)^2], \quad (3)$$

其中 $\tau = B/K$ ， Δ 为弛豫强度，它正比于缺陷密度，反比于刚度 K 。

理论计算 K 比较成功。对于位错，无论用常张力近似的弦模型^[5] 或考虑到晶体的离散结构的弯结模型^[6] 都得出相符的结果。甚至于弹性各向异性的效应也可以用电镜观察加以证实。对于球形晶界和一维或二维平直晶界，Zener^[7] 和作者^[8,9] 分别获得了可用的结果。比较困难的问题是对阻尼系数 B 的理解的分歧和估算。首先想到的是能否从其他方法来测定 B 。对于晶界，葛庭燧把 B 和液态金属的黏度联系起来获得成功。可是进一步的比较却遇到困难：例如，在高温金相显微镜下测得的晶界切变黏度比内耗 B 算出的要高几个数量级，而从纯金属晶界自扩散系数推得的 B 又偏低。对于位错，理论估算 B 主要来源于声子，它也和兆周位错内耗结果相符。关于千周频率以下的位错阻尼主要来源于位错热激活和对可动点缺陷的拖曳。关于后者，已有很多的计算结果发表，其中 Schoeck^[5] 的计算被引用最多。无论哪种计算，结果都得到正比于点缺陷浓度反比于它的扩散系数的位错阻尼系数。Schoeck 理论主要用于解释 bcc 点阵中的 SKK 内耗峰。但是退火 bcc 晶体或冷加工 fcc 点阵中没有或缺少类似的内耗峰的实验事实却很难从 (3) 式得到解释。

既然用简单解析的方法不能完全揭示这里的奥秘，作者在跟随葛庭燧求学的 60 年代起就

物理

尝试用各种方法来处理这类理论。关于位错弯结的等效拖曳阻尼，一维连续模型结果表明^[10]， B_i 是频率及振幅的单调递减函数，高于特征频率后，它迅速下降到零。而当时普遍认为 B_i 是与频率无关的常数。另一个被人忽视的结果是：可动点缺陷还作用到位错上一等效刚度 K_i 。它在低频为零，高频为常数，也随振幅增大而减小。把 $B + B_i$ 和 $K + K_i$ 代入 (3) 式，作者曾用它来解释 fcc 金属中低频位错内耗中被观察到的振幅峰、温度峰和时效峰等。在这里我们要强调的是， $K_i > K$ ， K_i 正比于点缺陷浓度，因此弛豫强度 Δ 反比于点缺陷浓度。也就是说，材料越纯，位错内耗现象越明显。而 SKK 峰的现有理论都把 K_i 当作零，因而弛豫强度和点缺陷浓度无关。而实验 SKK 峰高至少在低浓度下却正比于浓度！以后，作者^[11,12] 和 Ögurtani 等^[13-16] 更仔细的计算结果也没有解释上述疑团。

新近作者对简化了的一维和二维模型，直接数字求解振动位错的应力场中点缺陷的不均匀扩散表明^[16,17]， K_i 和 B_i 主要取决于分布在位错芯附近的点缺陷，并且处在交互作用能极大位置的点缺陷只对刚度起作用，而在交互作用力极大位置的点缺陷只对 B_i 有贡献。总刚度随内应力增大而减小。由此可见，在充分退火的 bcc 点阵中，点缺陷基本上分布在与直线位错的交互作用能极大值位置。 K_i 很大而 B_i 极小，因而观察不到 SKK 峰。经过冷加工， K_i 降低内耗背景和 Snoek 峰升高。当点缺陷逐渐扩散到由于内应力而弯曲的位错芯附近时，部分间隙原子处在交互作用力极大位置，由它们产生了 SKK 峰。当这种有利位置都被占据时，SKK 峰达到饱和。现在我们也不难理解 fcc 中替代原子与 bcc 中间隙原子的差别。原来，替代原子本身不能扩散，当它最近邻不存在空位时，它对内耗的作用是消极的，即增大 K_i 而压低内耗。只有位错芯附近有利（交互作用力最大）位置的空位替代原子对才是影响内耗的“主角”。

关于带偏聚杂质原子的晶界的切应力感生

不均匀滑动,作者采用了一维和二维的位错连续分布理论的唯一模型^[9,10],初步揭示了极微量杂质甚至单个原子动性差别对内耗的深远影响。微量动性小的杂质沿晶界的分布可以导致晶界溶质和溶剂峰的同时出现。对于无杂质的理想晶界,原子尺度的台阶也显著降低它的动性。高分辨电镜观察结果表明,高纯平直晶界上分布有不同尺度的台阶,有些和自相似分形类似。它们与晶界高温背景内耗有关。

为了加深对晶界、位错和点缺陷交互作用引起的非德拜型弛豫的微观机制的认识,对位错芯和晶界层进行离散的原子计算是完全必要的。放弃界面或位错上点缺陷平均浓度、平均位移、平均阻尼和平均刚度等不精确的概念,引入原子间的多体势函数,计算缺陷在滑动过程中平衡和鞍点能量,用 Monte carlo 方法计算缺陷热激活元过程中能量的转变过程,对远离位错芯和晶界的区域,仍保留用连续弹性的方法,使两种方法的有机结合。我们期望能发展成一种分析缺陷内耗元过程有效的、有别于分子动力学^[11]的缺陷动力学的方法。

- [1] T. S. Kê, *Phys. Rev.*, **71**(1947), 533.
- [2] T. S. Kê, *Phys. Rev.*, **78**(1950), 420.
- [3] T. S. Kê, *Advances in Science of China*, eds. Zhu Hongyuan, Zhou Guangzhao, Science Press, Vol. 3, (1989).
- [4] A. S. Nowick and B. S. Berry, *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids*, Academic Press, (1972).
- [5] G. Schoeck, *Acta Met.*, **11**(1962), 617.
- [6] A. Seeger and P. Schillier, in *Physical Acoustics*, ed. W. P. Mason, Academic Press, Vol. 3A, (1966), Chap. 8.
- [7] C. Zener, *Phys. Rev.*, **60**(1941), 906.
- [8] Z. Q. Sun and T. S. Kê, *J de Phys.* **42**(1981), C5—51.
- [9] Z. Q. Sun, *Internal Friction and Ultrasonic Attenuation*, (ed. T. S. Kê), International Academic Publishers, (1989), 121.
- [10] 孙宗琦, *物理学报*, **31**(1982), 561.
- [11] Z. Q. Sun, *Scientia Sinica A*, **15**(1982), 1279.
- [12] 孙宗琦, *物理学报*, **33**(1984), 989.
- [13] T. Ögurtani and A. Seeger, *Phys. Rev. B*, **31**(1985), 5044.
- [14] T. Ögurtani and A. Seeger, *J. appl. Phys.*, **62**(1987), 852.
- [15] T. Ögurtani and A. Seeger, *J. appl. Phys.*, **65**(1989), 4679.
- [16] 孙宗琦、蒋方析, *物理学报*, **38**(1989), 1679.
- [17] Z. Q. Sun et al., *Internal Friction and Ultrasonic Attenuation*, ed. T. S. Kê, International Academic Publishers, (1989), 65.
- [18] U. Landman, in *Computer Simulation Studies in Condensed Matter Physics*, eds. D. P. Landau et al., Springer-Verlag, (1988), 108.

月龄对鸡肌腱内耗的影响¹⁾

李广义

(中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室,沈阳 110025)

测量了鸡肌腱的低温区低频内耗,发现鸡的月龄对内耗谱有明显影响。随月龄增大,内耗背景减小,且随温度变化平缓,α峰增高,β峰降低。对实验结果进行了讨论,提出了内耗峰的可能机制。

在文献[1]中,我们报道了鸡肌腱的低频内耗,在 100—300 K 范围内,背景值随温度升高而增加,并出现一系列的峰。这与以往对生物组织内耗的认识不同^[2],却与某些聚合物的内耗谱相象^[3]。这可能是由于两类物质都是由大分子构成,在结构上有某些相似之处。这表明,内耗不仅是生物组织力学响应的一种表征,而且有可能成为研究生物组织结构的一个有效方

法。本文报道这方面的进一步实验结果。

一、试样和实验方法

试样选自宝星 1 号父母代种鸡的肌腱。鸡的月龄是 2 月、5 月、10 月和 14 月。月龄小的肌

1) 国家自然科学基金资助项目。