

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、蒋方忻, *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。

腱呈乳白色,半透明,质软.月龄大的透明度低,质硬.一根完好的肌腱,恰好可作为一根扭摆试样,尺寸约为 $1 \times 2 \times 50\text{mm}$.内耗实验用倒扭摆,频率约 1Hz ,气氛是 $\sim 100\text{Pa}$ 的氦气.

二、结果和分析

新鲜试样装入扭摆后先降温,然后缓慢升温.图1是首次升温过程的测量结果.曲线1,2和3分别是2月、5月和14月月龄试样的测量结果.可见月龄对内耗的温度谱有显著影响.月龄越小,背景越高,且随温度增加越

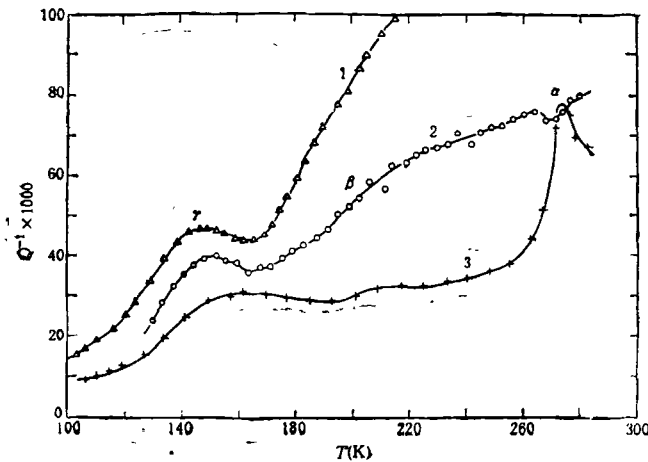


图1 不同月龄鸡肌腱试样首次升温时的内耗

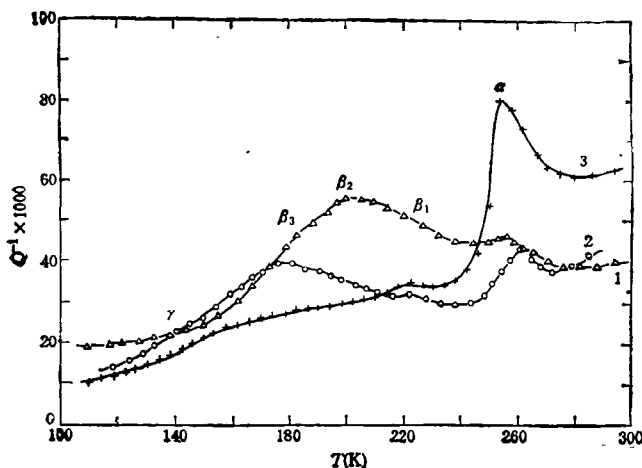


图2 不同月龄鸡肌腱试样经 $\sim 360\text{K}$ 原位退火后的测量结果

快,以致在高于 200K 后测量都无法进行.在 $100\text{--}300\text{K}$ 范围内有三个峰,按温度降低次序分别称为 α 峰、 β 峰和 γ 峰.但在首次升温时,虽然各月龄试样都有 γ 峰,但 β 峰和 α 峰在月龄小的试样中却难以看到.

在扭摆中存放或在 $< 370\text{K}$ 原位退火后,内耗的温度曲线发生变化.月龄越小,变化越大.主要是 γ 峰消失,背景降低且随温度的变化趋于平缓.因此,小月龄试样的 α 峰和 β 峰逐渐变得明显.图2是图1试样经 $\sim 360\text{K}$ 原位退火后的测量结果.经过这种处理,试样在 $100\text{--}300\text{K}$ 范围的内耗谱稳定,重复性较好.月龄对内耗峰的影响是,随月龄增大, α 峰增高, β 峰降低, β 峰的情况较复杂些.综观各月龄试样结果,可以认为它是由靠得很近的几个峰组成的.图2中至少可区分出 β_1 , β_2 和 β_3 三个峰,它们的相对高度与试样月龄和退火处理有关.例如,14月月龄试样,在 β 峰温区,内耗就较平坦.

α 峰是静滞型的,具有相变内耗峰的特点. β 峰是热激活弛豫内耗峰.对不同月龄试样的测量结果表明, β 峰的几个子峰,即 β_1 , β_2 和 β_3 , 其弛豫参数相差不多,激活能在 $0.4\text{--}0.6\text{eV}$,弛豫时间指数前因子为 $4 \times 10^{-15}\text{--}1.5 \times 10^{-14}$. γ 峰很不稳定,其属性尚未确定.

三、讨论

肌腱主要由胶原纤维构成,纤维间有少量间质(其主要成分是氨基多糖).肌腱里的细胞很少.胶原蛋白分子结构,尤其是鸡胶原蛋白分子结构,现在已比较清楚,其中有相当数量的赖氨酸、羟赖氨酸和羟脯氨酸残基.在这些残基中包含有弛豫实验时感兴趣的侧基和链段,如羟基(OH)和烃基链段(CH_2)_n.在肌腱中还存在着其他的侧基或功能团,如羧基(COOH),它们也可能参与弛豫过程.

实验和理论已经证明,聚合物中的线性烃基链(CH_2)_n,当 $n \geq 4$ 时,在交变应力作用下,它可以象曲柄一样摆动,产生弛豫型内耗

峰,其激活能是 0.52—0.65eV. 鸡肌腱中赖氨酸残基中的线性烃基链段 $(CH_2)_n$,刚好满足曲柄运动条件,并且 β 峰的激活能也与上述激活能相符. 因此可以设想, β 峰的一个成分就是来源于这种机制. 月龄对 β 峰的影响似乎也支持这种设想. 我们知道,胶原分子是由三条多肽链绞合而成,肽链间的结合靠共价键. 随着个体年龄的增长,共价键增多,因而肌腱变得强硬. 共价键的生成是通过一种叫做肽赖氨酸氧化酶的催化反应,结果使赖氨酸中的 $(CH_2)_n$ 变成 $(CH_2)_m$. 既然 $(CH_2)_m$ 不再能满足曲柄运动条件,那么由此种机制产生的内耗峰将降低.

在聚合物中,羟基和羧基的应力诱导运动也是弛豫内耗峰的重要起因,激活能大约也在 0.5eV 左右. 因此,肌腱中 β 峰的其他成分可能就是这些侧基运动引起的. 由于这些原子团带有永久电偶极矩,在介电弛豫实验中将会引起与内耗实验相对应的介电弛豫峰,而不具有电偶极性的烃基链则只能引起内耗峰. 因此,可以用内耗和介电弛豫实验对不同的机制加以鉴别.

由于在生物大分子中含有多种侧基或功能团,它们都可能通过其构象的改变参与弛豫过

程,又由于各个弛豫过程的激活焓彼此靠得比较近,弛豫时间又可能有一个宽的分布(与各侧基的周围环境有关). 因此,使弛豫谱的分立特征变得不够明显,在某些情况下,如14月月龄试样,在一个较宽温度范围内,内耗实际上成为一个平台,难以区别出不同的弛豫过程,倒象一个弛豫时间在很宽范围内连续分布的过程.

关于 α 峰,我们可以设想它与肌腱中某种物质的玻璃化转变有关. 通常试样整体玻璃化转变引起的模量变化是非常大的. 然而 α 峰伴随的模量变化虽然很大(与通常弛豫过程的模量亏损比较),但比整体试样玻璃化转变的情况要小得多. 这说明肌腱中进行玻璃化转变的物质仅是肌腱组成的很小一部分. 因此我们进一步假设,这种物质是间质中的氨基多糖,这样就可以解释 α 峰随月龄的变化. 肌腱中的氨基多糖含量随月龄增长而增加,因此 α 峰也就随月龄而增高.

- [1] Li Guangyi and Wang Litian, Proc. of the 9th ICIFAUS, Edited by T. S. K \ddot{e} , International Academic Publisher, Pergamon Press, (1989), 301.
 [2] 冯元祯,生物力学,科学出版社,(1983).
 [3] N. G. McGrum et al., Anelastic and Dielectric Effects in Polymeric Solids, Wiley, New York, (1967).
 [4] T. F. Schatzki, J. Polym. Sci., 57(1962), 496.

(上接第 247 页)

新的生长点.

- [1] 林为干,百科知识, No. 3 (1991), 35; 1991年全国微波会议大会报告集,空军导弹学院,(1991),1.
 [2] 王积勤,1991年全国微波会议大会报告集,空军导弹学院,(1991),40.
 [3] D. Atlas, Proc. 7th Weather Radar Conf., San Diego, (1958), C1-8.
 [4] 沈浩明,电磁理论工作会议文集,南京(1985),20.
 [5] W. van Eck, Computer & Security, 4 (1985), 269.
 [6] 廖道期,计算机世界报,1992年11月25日,第143期.
 [7] 汪一军,安全与电磁兼容, No. 4(1990), 38.
 [8] 王素英,安全与电磁兼容, No. 3(1990), 30; No. 4 (1990), 32.
 汪一军,安全与电磁兼容, No. 1 (1992), 40.
 [9] GJB 151-86, 军用设备和分系统电磁发射及敏感度要求,国防科工委, (1986); GJB 152-86, 军用设备和分系统电磁发射及敏感度测量,国防科工委, (1986).
 [10] GB 9254-88, 信息技术设备的无线电干扰极限值和测量方法,国家标准局,(1988).

- [11] 石长生、沈宏明,第三届全国电磁兼容学术会议论文集,北京邮电学院,(1990),530.
 [12] H. R. Witt and E. L. Price, Proc. IRE, 115 (1986), 94.
 [13] P. H. Pathak and A. Altintas, North America Radio Science Meeting Dig., Ottawa, (1985), 216.
 [14] S. W. Lee, et al., Semiannual Rep. NASA Lewis Research Center, NASA, (1985), 1.
 [15] R. C. Chou and S. W. Lee, Trans. IEEE, MTT-36 (1988), 1167.
 [16] 黄志洵、曾诚, 光纤与电缆, No. 5 (1989), 12; 计量学报, 11 (1990), 228; 中国科学技术大学学报, 21 (1991), 70; 1991年全国微波会议论文集(I), 空军导弹学院,(1991),477.
 [17] 黄志洵, 光纤与电缆, No. 4 (1991), 6.
 [18] 黄志洵, 计量学报, 10(1989), 151; 宇航计测技术, No. 3 (1990), 16; 宇航计测技术, No. 5 (1991), 17.
 [19] 黄志洵、贺涛, 宇航计测技术, No. 5 (1992), 29.
 [20] 黄卡玛、林为干, 电子学报, 20-6(1992), 82.
 [21] T. T. Wu, Jour. Appl. Phys., 59 (1985), 2370.
 [22] 文舸一等, 电子学报, 20-6(1992), 28.