

- [ 2 ] I. Cornelis and C. M. Wayman, *Acta Metall.*, 22 (1974), 301.
- [ 3 ] G. W. Lorimer et al., *Scripta Metall.*, (1975), 271.
- [ 4 ] K. Takezawa and S. Sato, *Metall. Trans., A*, 21 (1990), 1541.
- [ 5 ] A. C. Damask and A. S. Nowick, *J. Appl. Phys.*, 26 (1955), 1165.
- [ 6 ] K. L. Ngai, *Comments Solid State Phys.*, 9(1979), 127.
- [ 7 ] A. Ghilarducci and M. Ahlers, *J. Phys. F.*, 13(1983), 1757.
- [ 8 ] 杨大智等,材料科学进展,2(1988),29.
- [ 9 ] 韩明等,金属学报,26(1990), A81.

## 内耗方法在研究蠕变和蠕变断裂中的应用

孔庆平

(中国科学院固体物理研究所,合肥 230031)

综述了我们近年来用内耗方法研究蠕变和蠕变断裂过程的结果。文中指出,内耗作为一种无损检测方法,在研究材料蠕变和蠕变断裂的微观机制方面,有其独特的优点,并提供了一些新的知识。

材料在恒定载荷(或恒定应力)的持续作用下,形变量随着时间的延长而逐渐增加的现象称为蠕变。由蠕变引起的断裂,称为蠕变断裂。固体材料(尤其是金属材料)的蠕变随着温度的升高而愈来愈显著,因而蠕变和蠕变断裂便成为材料特别是金属高温材料的重要性能指标。对其微观过程的研究在材料科学中占有重要的地位。

关于蠕变和蠕变断裂的微观过程,人们用金相、电子显微镜和X射线衍射等方法进行了大量的研究,积累了丰富的知识。但这些研究一般要在中途停止试验,并使试样受到损坏,因而有一定的局限性。

内耗是物体作机械振动时由于内部原因所引起的振动能量的损耗。内耗测量作为一种无损检测方法,可以灵敏地反映材料内部的原子、电子和各种微观缺陷(点、线、面缺陷)的运动变化。把内耗测量与其他微观观察方法结合起来,可以更深入地阐明材料内部的各种微观过程。

葛庭燧教授一贯倡导用内耗方法研究材料力学性质的微观过程。我们在他的倡导下,用内耗方法(并配合其他方法)对蠕变断裂和蠕变变形的微观过程进行了一系列研究。本文扼要综述近年来这方面的研究结果,详细报道见文

献[1—12]。

### 一、实验方法

通常的蠕变和内耗实验是分别在不同的装置上进行的。为了便于用内耗方法研究蠕变和蠕变断裂过程,我们建立了“真空蠕变内耗仪”(简称蠕变内耗仪)<sup>[1,6]</sup>。它将葛氏扭摆和拉伸蠕变仪结合为一体,可以在真空中或大气中和在蠕变过程中不卸载的情况下连续测量内耗,

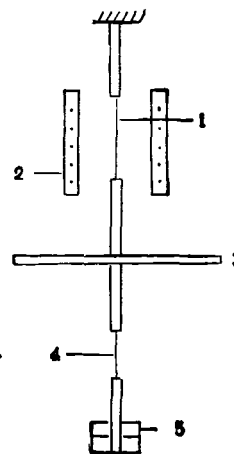


图1 蠕变内耗仪示意图

1. 试样; 2. 加热炉; 3. 扭摆; 4. 柔性悬挂; 5. 蠕变载荷

也可以在蠕变不同时期卸载后立即在同一装置上测量内耗。

图1是蠕变内耗仪的示意图。内耗测量用微机控制,并自动记录。蠕变伸长用读数显微镜跟踪测量。图中柔性悬丝4的作用很重要,它使蠕变载荷5传递到试样上,同时又使载荷在内耗测量时不随扭摆振动,从而降低了内耗背景,并便于改变测量频率。

## 二、蠕变断裂的研究

多晶金属材料在较高温度下一般发生晶间断裂,在较低温度下一般发生穿晶型断裂。我们在不同断裂类型的蠕变过程中,研究了晶界内耗峰(葛氏峰)的变化,获得了关于蠕变断裂的一些新知识。

晶界内耗峰在不加载荷(这里指能引起范性形变的大载荷)时才明显出现。故这项研究的实验程序为:在蠕变加载前,先测量原始试样的晶界内耗峰;加载后在不同蠕变时间卸载,再测量晶界内耗峰,然后重新加载继续蠕变实验。内耗和蠕变实验可多次交替进行,直至断裂。这样,就在同一装置上(蠕变内耗仪)用一根试样,测出了晶界内耗峰在蠕变过程中的变化。改变蠕变实验的温度和应力,可使试样发生不同类型的断裂。在我们早期的工作中,所用的试样为多晶纯Al,在近期较系统的工作中为多晶纯Cu。

我们研究了晶界内耗峰四种弛豫参量的变化。这四种弛豫参量是:(a)峰高;(b)峰温;(c)激活能;(d)模量弛豫强度。实验结果表明,在晶间断裂的蠕变过程中,这四种参量与蠕变前的相比,变化都不大;而在穿晶断裂的蠕变过程中,峰高和模量弛豫强度显著降低,峰温和激活能显著增高;混合型断裂的情况介于上述二者之间。

根据晶界内耗峰是由晶界滑动引起的理论<sup>[3,4]</sup>,峰高和模量弛豫强度的降低,表示晶界滑动所能产生的应变减小;峰温和激活能的增高,则从原子尺度上表示晶界滑动比较困难。

因而由内耗结果可以推知,在晶间型、混合型和穿晶型断裂的蠕变过程中,晶界强度的变化可分别用图2中的曲线1,2,3表示。

我们在不同断裂类型的蠕变过程中,测量了晶界附近区域显微硬度的变化。显微硬度的测量结果与图2相符,证实了我们由内耗方法所作的推论。

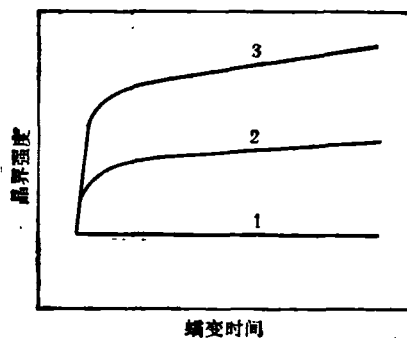


图2 蠕变过程中晶界强度的变化  
(1.晶间断裂; 2.混合型断裂; 3.穿晶断裂)

传统的“等强温度”概念认为,在较高温度下发生晶间断裂是由于高温下的晶界强度低于晶粒内部,在较低温度下发生穿晶断裂是由于低温下的晶界强度高于晶粒内部,在等强温度下晶界与晶粒内部的强度相等则发生混合型断裂。这种观点只考虑了实验温度对晶界强度的影响,而没有考虑在力学试验过程中晶界强度的可能变化,以及这种变化对断裂类型的影响。

从我们的研究结果看来,蠕变过程中晶界强度的不同变化与不同的断裂类型有对应关系。即在晶界强度显著增高时发生穿晶断裂,而在晶界强度不发生明显变化时发生晶间断裂。因而我们认为,蠕变过程中晶界强度的不同变化,是导致发生不同类型断裂的一个附加原因。这对于传统的等强温度概念,是一个修正和补充。

## 三、蠕变机制的研究

为了研究蠕变变形的微观机制,我们用蠕变内耗仪测量了拉伸蠕变过程中动态的低频扭

摆内耗。这种内耗是在产生范性蠕变的拉伸应力上叠加一个微小的交变扭转应力时所产生的内耗。它不同于一般的滞弹性内耗。以往的工作指出，多晶试样蠕变过程中内耗随时间变化的规律是：内耗在加载后的瞬间突然升高，在蠕变第一阶段连续下降，在蠕变第二阶段渐趋于稳定值。由于多晶试样中晶界的存在，使产生内耗的因素比较复杂。

我们制备了几种取向的大块 Al 单晶，在大块单晶上切取出成批试样，系统地研究了 Al 单晶蠕变过程中的动态内耗。结果表明，在适当的蠕变温度和应力下，Al 单晶的蠕变时间与内耗的关系曲线上，都在蠕变第一阶段到第二阶段的过渡期间，出现了一个很显著的内耗峰，如图 3 所示。这种蠕变内耗峰有高度的重复性和规律性。而多晶 Al 试样在同样试验条件下不出现这样的内耗峰。

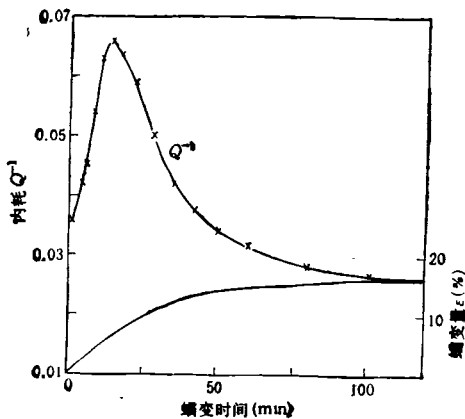


图 3 Al 单晶的蠕变内耗峰

配合内耗测量，我们在蠕变内耗峰的峰前、峰顶和峰后处，对 Al 单晶进行了透射电镜观察。结果表明，蠕变内耗峰的出现与位错亚结构的形成和发展有密切关系。这样，我们就可以通过内耗的测量，在不中断蠕变实验的情况下，追踪蠕变过程中位错亚结构的形成和发展，

研究它们的动力学行为。蠕变内耗峰为我们深入研究蠕变的微观机制，提供了一个新的有力工具。这方面的进一步工作正在进行中。

由上述研究结果可见，用内耗方法研究材料蠕变和蠕变断裂过程，已获得了一些新的有用知识。从工作实践中我们认识到，采用内耗方法研究材料力学性质的微观过程，有以下优点：(1)内耗是一种无损检测方法，测量内耗可与力学试验同步进行；(2)内耗能够灵敏地反映微观缺陷的运动变化，而这种运动变化是一般微观观察方法难以察觉的。把内耗方法与其他微观观察方法结合起来，将使材料力学性质微观机制的研究，取得愈来愈多的新成果。

本文中的工作是在葛庭燧教授的支持和鼓励下进行的。谨以此文向葛庭燧教授 80 寿辰表示祝贺。参加本文工作的有：戴勇、山冰、周浩、刘少民、李小毛等。

- [1] 孔庆平、戴勇, 物理学报, **36**(1987), 855.
- [2] 山冰等, 物理学报, **38**(1989), 1290.
- [3] 孔庆平、山冰, 物理学报, **38**(1989), 1299.
- [4] 孔庆平、戴勇, 材料科学进展, **2-2**(1988), 1.
- [5] 戴勇等, 材料科学进展, **5-1**(1991), 1.
- [6] 戴勇等, 物理, **16**(1987), 293.
- [7] Q. P. Kong and Y. Dai, *Phys. stat. sol. (a)*, **118**(1990), 431.
- [8] Y. Dai et al., *Phys. stat. sol. (a)*, **118**(1990), K21.
- [9] Q. P. Kong and Y. Dai, *Proceedings 5th Intern. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials*, Ed. M. G. Yan, Pergamon Press, Vol. 2, (1987), 923.
- [10] Y. Dai and Q. P. Kong, *Proceedings 8th Intern. Conf. on Strength of Metals and Alloys*, Ed. H. Kettunen, Pergamon Press, Vol. 2, (1988), 959.
- [11] Q. P. Kong and B. Shan, *Proceedings 9th Intern. Conf. on Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids*, Ed. T. S. Ke, International Academic Publisher, (1989), 419.
- [12] Q. P. Kong, *Proceedings 6th Intern. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials*, Ed. M. Jono et al., Pergamon Press, Vol. 4, (1991), 545.
- [13] T. S. Ke, *Phys. Rev.*, **71**(1947), 533.
- [14] T. S. Ke, *Scripta Metall. Mater.*, **24**(1990), 347.