

铝-镁合金中的反常位错内耗峰

潘正良 王中光 孔庆虎 葛庭燧

(中国科学院金属研究所)

1980 年 1 月 16 日收到

提 要

Al-0.03at% Mg 合金在倒扭摆上-65℃在原位进行拉伸,形变量为 0.5%,然后在升温过程中测量内耗,于-30℃及 60℃附近观测到内耗峰,随后从 80℃的降温过程中仍在相同温度观测到内耗峰.研究了不同温度下的内耗-振幅曲线,在降温过程中出现内耗峰的温度范围内观测到了振幅内耗峰,并由此计算得到等效激活能分别为 0.32 及 0.22eV.初步认为,当低温冷加产生的位错弯结在外力作用下作沿边往复运动时,“镁原子-空位”对和镁原子被拖曳运动是分别引起-30℃峰和 60℃峰的可能的原因.

一、前 言

近年来,对于与振幅有关的位错内耗的研究已成为一个较活跃的领域.众所周知,传统的滞弹性内耗只出现温度内耗峰和频率内耗峰,而与振幅无关.静滞后型的内耗表现出显著的振幅依赖关系而与频率无关.1949 年葛庭燧^[1]在铝-铜合金中首次观测到振幅内耗峰.六十年代又进一步研究了这种内耗的反常振幅效应^[2-4].我们观测铝合金在特定的条件下将有温度内耗峰与振幅内耗峰同时存在的反常现象,并且系统地研究了这两类性质不同的内耗峰之间的有机联系^[5,6].作者之一最近在欧洲第三届“固体中的内耗与超声衰减”会议上应邀作的讲演中^[5]报道了我们关于反常内耗现象的观测结果,引起了普遍的重视.如果这种反常内耗现象能够在更广泛的材料中观察到,就有可能开拓对滞弹性 (Anelasticity) 概念的认识和发展出一些新的内耗理论.

国外在氧化镁单晶体^[7]、铅多晶体^[8]及铝-锌合金^[9]等材料中都曾观察到振幅内耗峰,但没有研究与温度内耗峰的联系.

本文报道最近在铝-镁合金中观测到的新的温度内耗峰,它也是同时具有振幅峰的反常内耗现象.它表明作者在前文^[6]中报道的铝-铜合金的观测结果有一定的普遍性.

二、实 验 方 法

内耗是在倒扭摆上用自由衰减法测量的,每个内耗测量值的相对误差不大于±2%.低温是用干冰酒精溶液通过冷却套获得的,套的内腔为密封的样品室,充有常压干燥

氮气进行保护。在测量内耗过程中,温度维持恒定。对于整个试样而言,低于室温的温度均匀度与稳定度均在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内;室温以上用无感应的电阻丝炉,温度的均匀度和稳定度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

倒扭摆上设有对试样在原位进行拉伸的装置,用电磁铁施加拉力,调节通过感应线圈的电流可以连续改变拉力大小,试样的绝对伸长量用读数望远镜测量。

铝-镁合金是抚顺铝厂提供的。用 99.9999% Al 与 99.999% Mg 在真空炉内熔炼,经轧制和捻丝而成试样。成分分析结果表明镁含量为 0.027Wt%, 即 0.03at%, 其余杂质总含量约为 10ppm。试样直径 0.8mm, 计算长度 200mm, 最后一次退火 (400°C , 一小时) 前的截面缩减量为 95%。试样装入倒扭摆以后,在原位再进行一次退火 (400°C , 十分钟) 以消除操作带来的影响。上摆杆零件与平衡锤重量相等,试样在测量过程中不承受拉压力。

测量用的频率为 0.9Hz, 开始测量的应变振幅为 1.60×10^{-5} 。每次测量内耗, 激发扭转振动达到的试样表面最大应变振幅严格控制在 1.62 至 1.72×10^{-5} 之间。

获得内耗作为应变振幅的函数的方法是: 将一次自由衰减过程的全部振幅读数 (不少于 30 个数据) 输入计算机, 用最小二乘法计算得一个很小振幅范围内的平均内耗数值, 把它作为这个振幅范围的最大振幅值对应的内耗值, 于是得到内耗-振幅的一一对应关系, 再画成曲线。内耗-温度曲线是从不同温度测得的内耗-振幅曲线中选取对应某一相同振幅值的内耗数值绘出的。

三、实验结果

将 Al-0.03at% Mg 合金试样充分退火后, 降温到 -65°C 进行拉伸形变, 相对伸长量达到 0.5%, 即刚刚超过屈服以后, 立即卸载, 测量升温过程中的内耗, 升温速度控制在 $0.3^\circ\text{C}/\text{min}$ 左右。上述条件下的升温的内耗-温度曲线 (见图 1(a)), 升温过程中几个有代

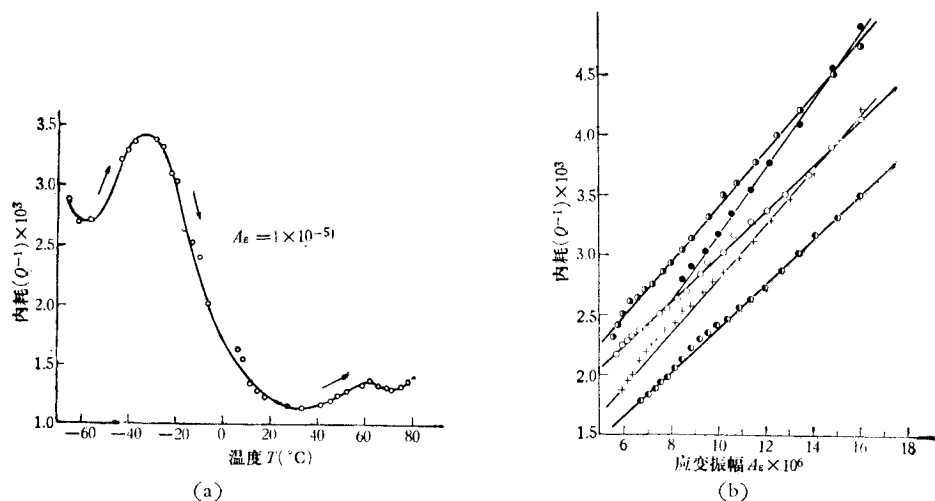


图 1

○ 为 -65°C ; + 为 -50°C ;

● 为 -34°C ; ○ 为 -28°C ; ● 为 -10°C

表性的内耗-振幅曲线(见图 1(b)). 试样温度达到 80°C , 停止升温, 随即降温测内耗, 降温速度亦为大约 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 上述条件下的降温过程中的内耗-温度曲线(见图 2(a)), 图 2(b) 是几个有代表性的内耗-振幅曲线. 由图 2 可得观测结果如下:

(1) 在升温 and 降温过程中, -30°C 和 60°C 附近同时存在两个温度内耗峰, 且位置大体相近. 升温过程中的 -30°C 内耗峰是叠加在随温度的升高而逐步减小的背景内耗之上的. 60°C 内耗峰的背景内耗是随温度的升高而渐渐增加的.

(2) 降温过程中只在内耗峰所处的温度范围内才观测到振幅内耗峰, 它对应的应变振幅 $(A_{\varepsilon})_{Q^{-1}=\max}$ 随温度的降低而逐步移向较大振幅. 在温度内耗峰以外的温度 (如图

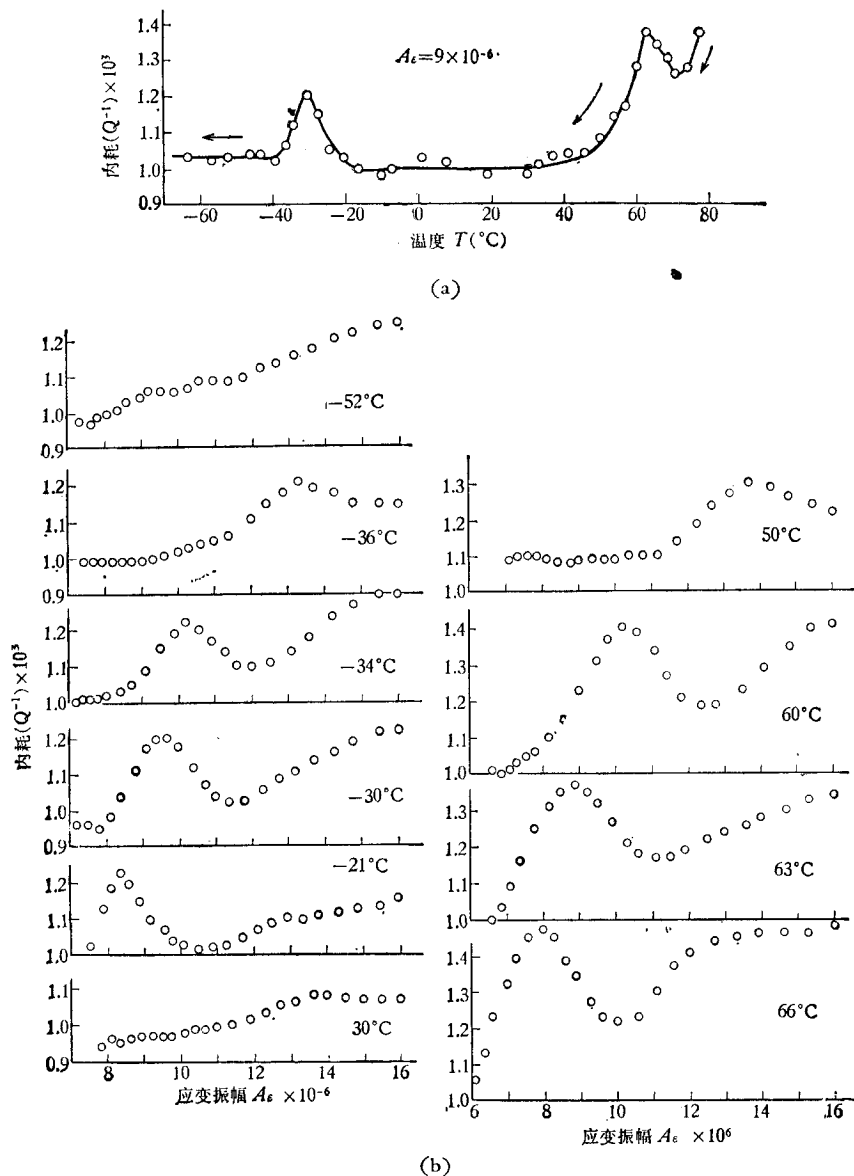


图 2

2(b)中的 -52°C 和 30°C)不曾观测到振幅内耗峰,表明这两个温度内耗峰与振幅内耗峰是互为依存的。根据振幅内耗峰随温度的移动可以作 $\ln(A_s)_{Q^{-1}=\max}-1/T$ 图,如图3所示。由此可以计算出与此过程有关的“等效激活能”,对于 -30°C 峰为 0.32eV ,对于 60°C 峰为 0.22eV 。

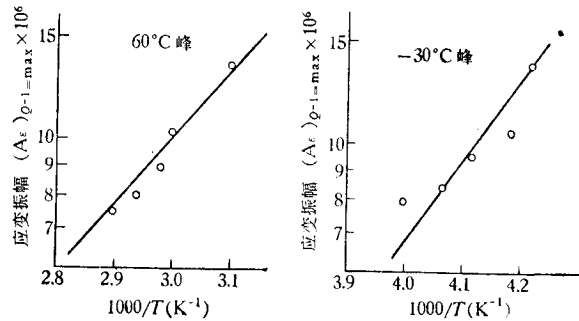


图3 Al-0.03at% Mg 合金降温过程中 -30°C 峰和 60°C 峰的等效激活能

(3) 升温过程中在本次实验所采用的振幅范围内没有观测到振幅内耗峰,但观测到内耗随振幅的减小而线性下降的显著的振幅依赖关系,只在很小振幅范围内偶尔观测到一小段与振幅无关的现象。这就表明升温过程中的温度内耗峰也是与振幅有关的。从升温过程中每个温度下的内耗-振幅直线可求得斜率 $\partial Q^{-1}/\partial A_s$ 。有趣的是,此斜率是随温度变化的,图4是 $\partial Q^{-1}/\partial A_s-T$ 曲线。在 -30°C 和 60°C 附近,斜率呈现极大值。从图1(b)的五条直线中亦可看到: -34°C 的斜率最大, -50°C 与 -28°C 次之, -65°C 与 -10°C 最小。

(4) 关于降温过程中的温度内耗峰还曾进行过许多实验,具有如下特点:

1) 用99.9999%高纯铝试样进行测量,未曾观测到温度内耗峰和振幅内耗峰。由此证明这种峰的出现与替代式溶质原子(镁原子)的存在有关。

2) 用Al-0.03at% Mg合金试样充分退火后不经范性形变,直接测量内耗的温度关系,亦未曾观测到温度内耗峰与振幅内耗峰。由此证明这种峰的出现与低温下范性形变产生的新鲜位错有关。

3) 这两个温度内耗峰的出现不受降温前的升温速度的制约。经 -65°C 拉伸形变0.5%,充分时效(约十小时)以后,以 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温到 80°C (升温过程中不测内耗),再从 80°C 降温测内耗, -30°C 与 60°C 的内耗峰依然重复出现。

4) 这两个温度内耗峰的出现受升温达到的最高温度限制。曾经升温到 90°C 再降温测内耗,观测到的温度峰与振幅峰都明显减低。还进行过分别升温到 120°C 与 150°C 的降温测量,却没有观测到温度峰与振幅峰。这表明引起 -30°C 与 60°C 温度峰的微观机制

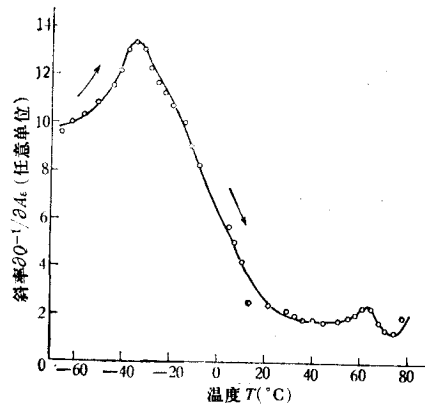


图4 Al-0.03at% Mg 合金,在 -65°C 拉伸0.5%以后,升温过程中内耗-振幅曲线的斜率随温度的变化

在 90℃ 以上温度退火就容易被消除掉。众所周知,这个温度远低于铝合金的充分退火温度。当温度升到 90℃ 时,试样内的位错密度尚不会有太大变化,但冷加工产生的新鲜位错上的弯结却较容易在远低于退火温度下烟灭。因而不难设想,低温范性形变产生的新鲜位错上的大量弯结可能与这种内耗峰有关。

(5) 关于时效内耗峰,对 Al-0.03at% Mg 合金也进行过实验。在某一温度下,试样被拉伸超过屈服点,卸载后维持温度不变,测量内耗随时间的改变,得到内耗-时效时间曲线。实验结果与前文^[6]报道的 Al-0.6wt% Cu 合金的结果十分相似,在室温附近的一定温度范围内,呈现时效内耗峰,在出现时效内耗峰期间测得的内耗-振幅曲线呈现极大值(振幅内耗峰),在其余的时间只观测到单调变化。

四、讨 论

上述实验结果表明,在 Al-0.03at% Mg 合金中观测到的这两个温度内耗峰以及与之相联系的振幅内耗峰与替代式溶质原子(镁原子)的存在有关,同时与低温范性形变产生的新鲜位错有关,众所周知,这种位错的一个特点是存在许多弯结。还应注意,冷加工将产生大量空位,在铝镁合金中镁原子与空位有较大结合能,容易形成“镁原子-空位”对^[10],它与位错交互作用,被吸引到位错线上,它对位错的钉扎比镁原子单独对位错的钉扎更牢固。然而,当温度升高时,“镁原子-空位”对较易离解。因此不难设想,60℃ 峰是由于位错与替代式溶质原子(镁原子)交互作用产生的,−30℃ 峰是由于位错与“镁原子-空位”对交互作用产生的。本文测得的 60℃ 峰的等效激活能(0.22eV)和镁原子与位错的结合能颇为相近^[9,11]。−30℃ 峰的等效激活能略大一点正好和“镁原子-空位”对与位错的结合能应该大些相一致。

当位错弯结在测量内耗的外加交变应力作用下作沿边往复振动时,位错线上的镁原子或“镁原子-空位”对也被拖曳着在两个相邻的 Peierls 位垒之间来回运动,从而产生内耗^[5]。可以用这种位错弯结气团模型来解释本文的实验结果。关于这种物理模型的详细分析将另作报道。但可以认为,本文观测到的实验现象: 温度内耗峰与振幅内耗峰彼此互相联系地同时出现是与传统的滞弹性现象不同的,也不属于通常的静滞后型的内耗,因而是一种反常内耗现象。

参加实验工作的还有王晓伟、肖金泉同志。

参 考 文 献

- [1] Kê, T. S. (葛庭燧), *Phys. Rev.*, **78**(1950), 420.
- [2] 葛庭燧、张进修, *物理学报*, **21**(1965), 1711.
- [3] 葛庭燧、张进修, *物理学报*, **22**(1966), 71.
- [4] 葛庭燧、张志舜、张进修, *物理学报*, **22**(1966), 270.
- [5] 葛庭燧, *金属学报*, 待发表.
- [6] 潘正良、王中光、孔庆虎、葛庭燧, *科学通报*, 待发表.
- [7] I. G. Ritchie, “Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Crystalline Solids”, ed. D. Lenz & K. Lücke (Spring-Verlag, 1975), p. 459.
- [8] I. G. Ritchie *et al.*, “Internal Friction and Ultrasonic Attenuation in Solids”, ed. R. R. Hasiguti & N. Mikashiba, (University Tokyo Press, 1978), p. 639.

- [9] J. Perez, P. Peguin et P. Gobin, *Revue de Physique Appliquée*, Supplement au "Journal de Physique", 4(1969), 437.
- [10] P. R. Sperry, *Acta Met.*, 11(1963), 153.
- [11] N. F. Fiore et C. L. Bauer, "The Binding of Solute Atoms to Dislocations", Pergamon Press, (1968), p. 97—118.

DISLOCATION INTERNAL FRICTION PEAKS WITH ANOMALOUS AMPLITUDE EFFECT IN Al-Mg ALLOY

PAN ZHENG-LIANG WANG ZHONG-GUANG (C. K. Wang)

KONG QING-HU GE TING-SUI (T. S. Kê)

(*Institute of Metal Research, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Two low frequency internal friction peaks have been observed at 243 K and 333 K respectively in Al-0.03 at% Mg alloy during the process of temperature going up after the specimen was stretched in situ with a tensile strain of 0.5% at 208 K. Such two peaks appeared also at the same temperatures when the measurement was made in the subsequent cooling from 353 K. The dependence of internal friction on the amplitude was determined and the amplitude internal friction peaks were observed in the temperature range of the peaks. The relationship between these two kinds of peaks was analysed and the effective activation energies of the temperature internal friction peaks were found to be about 0.32 eV for the 243 K peak and 0.22 eV for the 333 K peak. It was suggested that the two peaks at 333 K and 243 K may be respectively associated with the dragging of the solute atoms and the "Mg atom-vacancy" pairs, which may be produced through the sidewise motion of the kinks on the dislocations formed during the low temperature cold working.