

与位错和点缺陷的交互作用有关的 低温内耗峰*

方 前 锋

河海大学机械学院公共课部, 常州 213002

葛 庭 燧

中国科学院固体物理研究所, 合肥 230031

1992年3月24日收到

系统研究了出现在经冷加工处理的 Al-Mg 固溶体中的低温内耗峰。当测量频率约为 1Hz 时, 分别在 -70°C (P_{L_2} 峰) 和 -50°C (P_{L_1} 峰) 观察到了两个内耗峰。详细研究了镁 (Mg) 含量, 冷加工量, 冷加工模式, 不同合金元素 (Ga, Zn), 退火等诸因素对这两个内耗峰的出现及特性的影响。得出了 P_{L_2} 峰与位错和 “Mg 原子-双空位” 对的交互作用有关以及 P_{L_1} 峰与位错和 “Mg 原子-单空位” 对的交互作用有关的结论。

PACC: 6240; 6170Y; 6155H

一、引 言

早在 1950 年, 葛庭燧就在冷加工的 Al-Cu 试样中在室温附近观察到了一个内耗峰 (测量频率为 1Hz)。这个内耗峰解释为位错与点缺陷 (Cu 原子) 交互作用的结果^[1]。后来, 一个类似的内耗峰又在 Al-0.1wt% Mg 试样中被观察到^[2]。这个现象排除了将此内耗峰解释为沉淀过程的可能性, 因为沉淀过程在室温附近是不可能发生于 Al-0.1wt% Mg 合金中的。

为了解释 Al-Mg 合金中这种内耗现象, 提出了两种不同类型的位错气团: 一种是 “Mg 原子-单空位” 对偏聚于位错; 另一种是 Mg 原子偏聚于位错。如果两种气团的假设是正确的话, 则在适当条件下, 在 Al-Mg 合金中将可以观察到两个分立的内耗峰。后来的实验证实了这一点。确实在轻度冷加工的 Al-0.03wt% Mg 试样和 Al-0.36wt% Mg 试样中分别在 60 和 -40°C 左右观察到了两个分立的内耗峰^[3]。

后来对室温内耗峰的出现条件进行了系统的研究^[4-7], 并且将此峰标识为 P_1 峰。更详细的研究表明 P_1 峰是由两个峰组成的: 一个是位于较低温度的 P'_1 峰; 另一个是位于较高温度的 P''_1 峰^[6]。最近, 在冷加工的 Al-Mg 试样中观察到了一个位于 P'_1 峰低温侧的新的内耗峰, 称为 P_0 峰^[8]。这样在室温附近就有一系列内耗峰 (P''_1, P'_1, P_0)。这些内

* 国家自然科学基金资助的课题。

耗峰都对应于位错与溶质原子的交互作用,但它们有各自的弛豫机制。

本文要报道的是有关出现于 Al-Mg 合金中的低温内耗峰以及它们与室温内耗峰联系的研究结果。

二、试样处理

原始的 Al-Mg 合金试样是由抚顺铝厂提供的含有不同镁含量 (0.02, 0.05, 0.12, 0.55 wt%) 的棒材(直径为 3mm)。原始的试样经过 550℃退火 5h 的均匀化处理后,在室温冷拔至不同直径的细丝,此细丝完全退火后,作为试样的初始状态。完全退火的不同直径的细丝可以在室温或液氮温度下冷拔至直径为 1mm 的细丝,从而得到不同冷加工量的试样。此 1mm 的 Al-Mg 合金细丝被用来进行内耗和弹性模量的测量。单晶试样是由动态退化法制备的。

三、冷加工试样的实验结果

1. 两个低温内耗峰 (P_{L1} 和 P_{L2}) 同时出现

将一根 Al-0.12wt% Mg 试样在液氮温度下冷拔 17.4% RA(面积减缩率),室温时效 30min 后,降温至液氮温度,然后升温测量内耗和弹性模量。结果在 -70 和 -50℃ 左右观察到了两个明显的内耗峰 ($f = 1.5\text{Hz}$), 如图 1 中曲线 1 所示。弹性模量曲线(曲线 1')随温度的升高而降低,属正常变化。将这两个峰分别称为 P_{L2} (-70℃) 和 P_{L1} (-50℃) 峰。 P_{L1} 峰可能与以前观察到的低温内耗峰是相同的,但 P_{L2} 峰却是第一次观察到。

图 1 中的曲线 2 和 2' 表示另一根 Al-0.12wt% Mg 试样在室温冷拔 30.5% RA 和时效 5 天后从液氮温度升温测量所得到的内耗和模量曲线。可见,它们与曲线 1 和 1' 是类似的,只是在 -10℃ 左右出现了一个较小的 P'_1 峰。

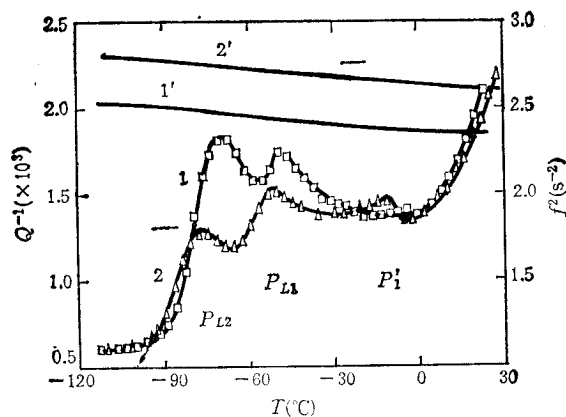


图 1 Al-0.12wt% Mg 试样中内耗和模量随温度的变化曲线 曲线 1, 1' 为液氮温度下冷拔 17.4% RA; 曲线 2, 2' 为室温冷拔 30.5% RA

对在液氮温度下冷拔 19% RA 的 Al-0.02wt% Mg 试样也进行了测量,对应的结果

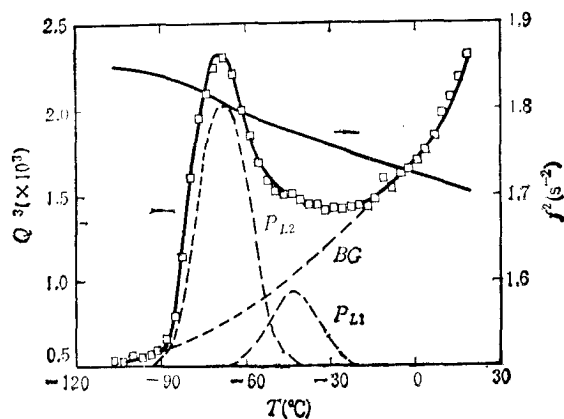


图 2 液氮温度下冷拔19%RA 的 Al-0.02wt%Mg 试样中的内耗和模量温度曲线
实线为实验曲线;虚线为分解后的 P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰

示于图 2 中。可见,曲线上只出现了一个明显的内耗峰。但是,仔细的分析表明这是一个复合峰,在扣除背景内耗后它可以分解为两个分立的内耗峰(P_{L2} 峰和 P_{L1} 峰)。

2. 镁含量的影响

图 3 表示在室温下冷拔 26.5% RA 的不同镁含量的 Al-Mg 试样的内耗和模量温度曲线。图 3 中的曲线 1 和 1' 对应于未添加镁的 99.999% 的纯铝试样,曲线 2(2'), 3(3') 和 4(4') 分别对应于镁含量为 0.02, 0.05 和 0.55 wt%。可见,只出现一个与图 2 所示类似的很宽的低温内耗峰(P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰的叠加)。随着镁含量的增加, P_{L2} 峰(包含了位于高温侧的 P_{L1} 峰)的峰高也增加。这个结果表明 P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰与试样中的 Mg 原子有关。另外,值得注意的是 P'_1 峰出现在 Al-0.55wt% 试样中。

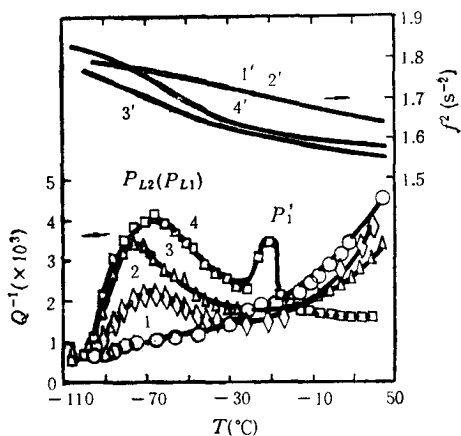


图 3 包含不同镁含量的 Al-Mg 试样中的内耗和模量曲线 曲线 1(1'), 2(2'), 3(3') 和 4(4') 分别对应于 99.999% Al, Al-0.02, 0.05 和 0.55wt%Mg 试样

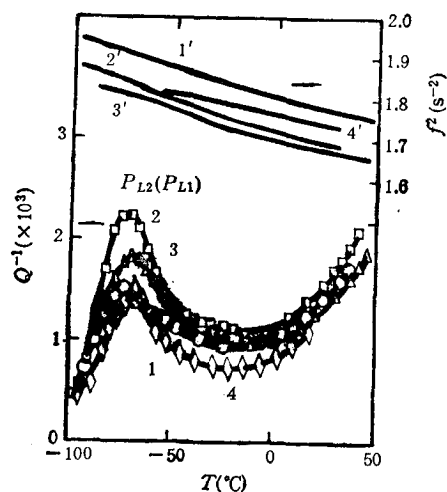


图 4 不同室温冷加工量的 Al-0.12wt%Mg 试样中的内耗和模量曲线 曲线 1(1'), 2(2'), 3(3') 和 4(4') 分别对应于冷拔量 14.8, 26.5, 43.7 和 75%RA

3. 冷加工量的影响

在图 4 的曲线 1(1'), 2(2'), 3(3') 和 4(4') 中表示 4 根 Al-0.12wt% Mg 试样经过室温冷拔 14.8, 26.5, 43.7, 75% RA 后升温测量的内耗和模量温度曲线. 由图可见, 内耗峰的位置对所有不同冷加工量的试样而言都位于 -70°C 左右, 而内耗峰高随冷加工量的增加先是增加, 然后减少.

4. 冷加工方式的影响

除了对试样进行冷拔处理然后测量内耗外, 还对试样进行了弯曲和扭转加工的处理. 图 5 所示为两根 Al-0.02wt% Mg 试样完全退火后, 分别在室温下扭转 $\pm 4\%$ (曲线 1) 和弯曲 $\pm 11.2\%$ (曲线 2) 后升温测量的内耗曲线. 曲线 1' 和 2' 分别为对应的模量温度曲线. 由 5 图可见, 采用扭转和弯曲这两种冷加工方式不能观察到 P_{L2} 峰, 而只出现 P_{L1} 峰 (-60 — -30°C) 和 P_1' 峰 (5°C).

5. 不同合金元素的影响

除了 Al-Mg 合金试样外, 还对冷拔的 Al-Ga 和 Al-Zn 合金试样进行了内耗和模量测量. 图 6 中曲线 1, 1' 所示是一根 Al-0.55wt% Ga 试样在室温下冷拔 17.4% RA 后升温测量的结果, 而曲线 2, 2' 是 Al-0.48wt% Zn 试样在室温冷拔 17.4% RA 后升温测量的内耗和模量曲线. 由图 6 可见, 在冷拔的 Al-Ga 和 Al-Zn 试样中, 也观察到了 P_{L2} 和 P_{L1} 峰, 但是峰高比 Al-Mg 合金试样中的峰高要小得多. 另外, 在 Al-Ga 试样中还出现了明显的 P_1' 峰.

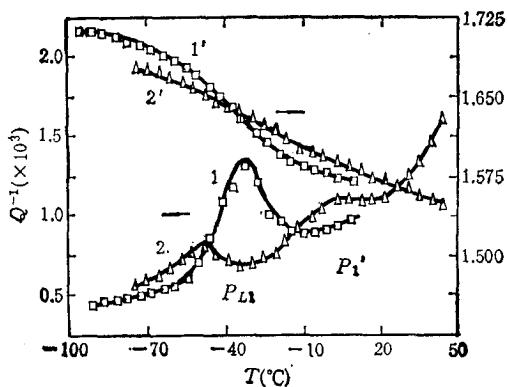


图 5 不同方式处理的两根 Al-0.02wt%Mg 试样的内耗和模量温度曲线. 曲线 1, 1' 为室温下扭转 $\pm 4\%$; 曲线 2, 2' 为室温下弯曲 $\pm 11.2\%$

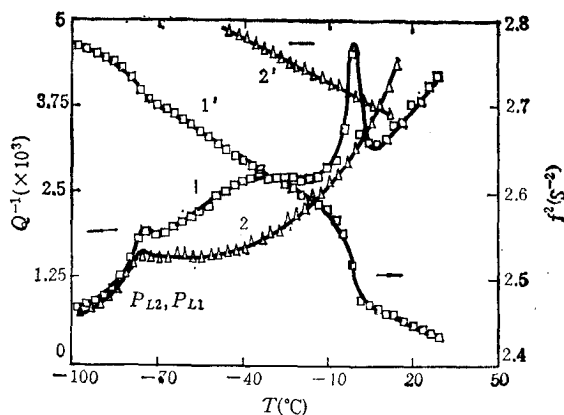


图 6 Al-Ga 和 Al-Zn 试样在室温下冷拔 17.4% RA 后升温测量的内耗和模量温度曲线. 曲线 1, 1' 为 Al-0.55wt%Ga 试样; 曲线 2, 2' 为 Al-0.48wt%Zn 试样

6. 退火的影响

Al-0.02wt% Mg 单晶试样, 在液氮温度下冷拔 19% RA, 在室温停留后由 -110°C 升温测量. 测量结果示于图 7(a), 图 7(b), (c), (d), (e) 分别为试样在 80, 150, 230 和 300°C 退

火 1h 后升温测量的结果。由图 7 可见, 80℃ 退火后, P_{L2} 峰大大降低, 而 P_{L1} 峰却有所增加, 同时还在 0℃ 左右出现了 P'_1 峰。

150℃ 退火后, P_{L2} 峰完全消失, P_{L1} 峰和 P'_1 峰基本不变。300℃ 退火后, P_{L1} 峰也基本上消失。

Al-0.02wt% Mg 多晶试样, 在液氮温度下冷拔 19%RA, 室温时效 24h 后升温测量内耗, 结果在 -70, -50 和 -5℃ 左右分别出现 P_{L2} , P_{L1} 和 P'_1 峰 (如图 8 中的曲线 1, 1' 所示)。当试样在 100℃ 退火 1h 后,

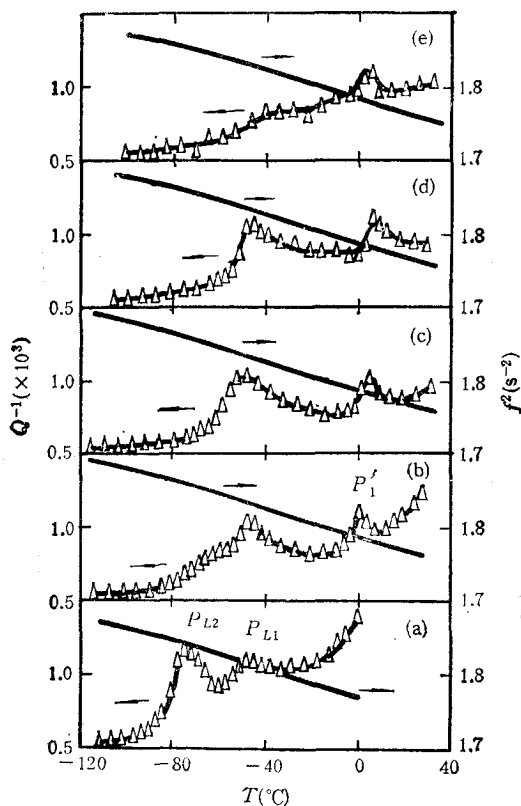


图 7 在液氮温度下冷拔 19%RA 的 Al-0.02wt% Mg 单晶试样在不同退火条件下的内耗和模量温度曲线 (a) 为未退火 (b) 为 80℃ 1h (c) 为 150℃ 1h (d) 为 230℃ 1h; (e) 为 300℃ 1h

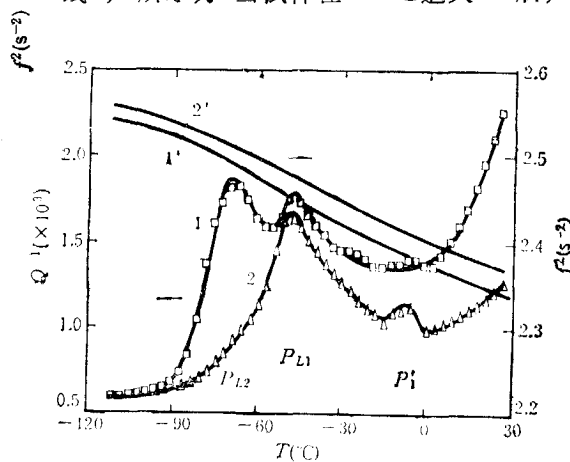


图 8 在液氮温度下冷拔 19%RA 的 Al-0.02wt% Mg 多晶试样在不同退火条件下的内耗和模量温度曲线 曲线 1, 1' 为未退火; 曲线 2, 2' 为 100℃ 退火 1h

P_{L2} 峰完全消失, P_{L1} 峰和 P'_1 峰却升高 (图 8 中曲线 2, 2')。这与图 7 的结果相似。可见, P_{L2} 峰在 100℃ 左右退火 1h 后就完全消失。

四、讨论与结论

从前面的结果可以看出, P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰是两个不同的峰, 而且不是 P'_1 峰, 因为这三个内耗峰可以在同一个升温过程中出现。 P_{L1} 和 P_{L2} 峰也不是 P''_1 峰, 因为 P''_1 峰的模量随温度的升高而增大, 属反常变化^[6], 而 P_{L1} 和 P_{L2} 峰的模量随温度的升高而减小。另外, P_{L1} 和 P_{L2} 峰也不可能是 P_0 峰, 这是因为 P_0 峰要在 P'_1 峰出现后经过时效和退火后才出现^[8], 而 P_{L1} 和 P_{L2} 峰却总是先于 P'_1 峰出现或同时出现。所以, P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰是两个不同于室温内耗峰 (P_0, P'_1, P''_1) 的新内耗峰。

P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰在不同的 Al 基固溶体中都可以出现, 但为什么它们在 Al-Mg 固溶体中比其它 Al 基固溶体 (Al-Ga, Al-Zn) 中更为显著呢? 这是由 Al-Mg 固溶体的特殊性

所决定的。根据 Perryman^[9] 和 Sperry^[10] 的总结, Al-Mg 固溶体的特殊性在于固溶 Mg 原子很容易俘获空位而形成 Mg 原子-空位集团。所以, P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰在 Al-Mg 试样中最显著这一事实说明 P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰与 Mg 原子和空位的复合体有关。另外, P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰在低温退火过程中的消长规律也说明它们与 Mg 原子和空位的复合体有关, 这是因为冷加工试样在低温退火回复过程中, 主要是空位及其集团的运动^[11,12]。所以, 从 P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰的出现条件及特性来看, 它们应该与位错和 Mg 原子与空位的复合体有关。

那么, P_{L1} 峰和 P_{L2} 峰各自对应于怎么样的 Mg 原子空位集团呢? 我们知道, 在退火过程中, P_{L2} 峰总是先于 P_{L1} 峰消失, 所以 P_{L2} 峰应该对应一种较易运动和较不稳定的 Mg 原子空位集团。因此我们设想 P_{L2} 峰对应于 “Mg 原子-双空位” 对而 P_{L1} 峰对应于 “Mg 原子-单空位” 对。 “Mg 原子-双空位” 对由于多出一个空位, 所以较之 “Mg 原子-单空位” 对更易扩散运动。在 P_{L2} 峰消失时, “Mg 原子-双空位” 对分解为 “Mg 原子-单空位” 对和 Mg 原子, 引起 P_{L1} 峰和 P' 峰增加, 这也与实验事实相符。此外, P_{L2} 峰只在冷拔试样中出现而不在弯曲和扭转加工的试样中出现这一事实也间接地支持上述假设。因为冷拔的加工可以产生大量的过饱和空位, 足以形成 “Mg 原子-双空位” 对甚至 Mg 原子多空位集团, 而弯曲和扭转的加工由于其较低的加工硬化率却不能产生足量的过饱和空位来形成 “Mg 原子-双空位” 对。

因此, 我们认为可能的机制是 P_{L2} 峰对应于位错与 “Mg 原子-双空位” 对的交互作用所产生的弛豫而 P_{L1} 峰对应于位错与 “Mg 原子-单空位” 对的交互作用所产生的弛豫。

- [1] T. S. Kê, *Phys. Rev.*, 78(1950), 420.
- [2] 葛庭燧、张志舜、张进修, 物理学报, 22(1966), 270
- [3] Z. L. Pan, Z. G. Wang, Q. H. Kong, and T. S. Kê, *Mater. Sci. Engng.*, 49(1980), 101.
- [4] Q. F. Fang and T. S. Ke, *J. Physique*, 46(1985), c10—227.
- [5] T. S. Kê, *J. Physique*, 46(1985), c10—267.
- [6] T. S. Kê, Q. Tan, and Q. F. Fang, *Physica Status Solidi (a)*, 103(1987), 42.
- [7] Q. Tan and T. S. Kê, *Physica Status Solidi (a)*, 104(1988), 723.
- [8] Q. F. Fang and T. S. Kê, Proc. ICIFUAS-9, p. 37 Intern. Acad. Pub. Beijing, China. (1989); *Physica Status Solidi (a)*, 121(1990), 139.
- [9] E. C. W. Perryman, *Acta Metall.*, 3(1955), 412, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Engrs.*, 206(1956), 1247.
- [10] P. R. Sperry, *Acta Metall.*, 11(1963), 153.
- [11] J. Molenaar and W. H. Aarts, *Nature, Lond.*, 166(1950), 690.
- [12] C. Panseri, F. Gatto and T. Fedrighi, *Acta. Metall.*, 6(1958), 178.

LOW TEMPERATURE INTERNAL FRICTION PEAKS ASSOCIATED WITH THE INTERACTION BETWEEN DISLOCATIONS AND POINT DEFECTS

FANG QIAN-FENG

Department of Basic Courses Mechanical Institute of Hehai University, Changzhou 213002

GE TING-SUI (T. S. KÉ)

Institute of Solid State Physics, Hefei 230031

(Received 24 March 1992)

ABSTRACT

Low temperature internal friction peaks in cold-worked Al-Mg solid solutions were systematically studied. Two internal friction peaks were observed around -70°C (P_{L2} peak) and -50°C (P_{L1} peak) when measured with a frequency of about 1Hz. Effect of magnesium content, amount and mode of cold-working, type of solute atoms, and annealing on the appearance and behavior of these two peaks were examined. Conclusions were reached that P_{L2} peaks is associated with the interaction of dislocations with 'Mg atom-divacancy' pairs and P_{L1} peak is associated with the interaction of dislocations with 'Mg atom-vacancy' pairs.

PACC: 6240; 6170Y; 6155H