

Al-0.5%Cu 合金中表现反常振幅 效应的低频位错内耗*

葛庭燧 張進修†

(中国科学院)

提 要

用低频扭摆的方法,系统地研究了能够较有把握地观测到在 Al-0.5%Cu 合金中所出现的反常位错内耗的实验程序。结果指出,把试样在拉力试验机上预先拉伸到某一适当的形变量后,立即测量它在某一适当温度下时效的过程中的内耗,可以在内耗-时效时间曲线上观察到一个表现反常振幅效应(即内耗-振幅曲线上出现一个峰值)的时效内耗峰。用经过充分时效而内耗已经达到稳定值的试样,逐渐增加振幅,测量内耗,也可以观察到一个应变振幅内耗峰(当内耗表示为应变振幅的函数时)。此外,用一定的应变振幅在较高温度下,测量经过充分时效的试样的内耗时,也可以观察到一个表现反常振幅效应的温度内耗峰(当内耗表示为温度的函数时)。这些实验结果肯定地指出,在一定测量温度下的振幅内耗峰和表现反常振幅效应的温度内耗峰是存在的。

为了找出以前在 Al-0.5%Cu 中所观察到的反常内耗现象重复性不好的原因,系统地研究了测量内耗所用的应变振幅对于出现振幅内耗峰的影响以及预形变量对于出现时效内耗峰和温度内耗峰的影响。对于出现反常内耗现象的实验条件进行了分析。

所观察到的关于反常内耗现象的实验结果,都可用位错拖着溶质原子气团运动的模型来作定性的解释。具体的模型和理论分析将另行报导。

一、引 言

1949年,作者之一曾在高度冷加工经过部分退火后的含铜0.5%的铝合金试样中,观察到一种反常内耗^[1]。试验的程序是:将上述试样冷拔到95%面积减缩后,在300℃退火半小时(在扭摆炉中),并在降温过程中测量内耗,当温度降至约100℃以下时,观察到反常内耗现象,即把在一定应变振幅下测出的内耗值表示为测量温度的函数时,在曲线上出现一个峰(以下称为温度峰);在出现内耗峰的温度下,将内耗值表示为应变振幅的函数时,在曲线上也出现一个峰(以下称为振幅峰)^[2]。将上述高度冷加工试样充分退火后,就不再出现这种反常内耗。用高纯铝试样在同样的处理条件下进行内耗测量,也不出现这种反常内耗^[3]。因此,这种内耗与试样的冷加工状态和含有溶质原子(铜)有关。初步认为它是由于铝中位错拖着铜溶质原子气团运动所引起的。1954年,在含钨的低铬合金

* 1964年2月20日收到;1964年11月2日收到修改稿。

† 中山大学物理系助教,在中国科学院金属研究所研究实习(1962—1964)。

钢(38XM10A)试样中,也观察到同样表现的內耗峯^[4]。但是,随后的实验指出,出现这种反常內耗的条件是不容易控制的^[5]。为了有效地利用这种反常內耗现象来研究位错与溶质原子的交互作用及固溶强化现象,必须找出能够有把握地观察到这种內耗的实验程序。

根据文献上的介绍,充分退火后的替代式固溶体材料,在室温下第一次拉伸时,较难出现明显屈服点,但是经过預形变并在室温时效后,则能在低温下进行第二次拉伸时观察到明显屈服点^[6]。由于明显屈服点的出现是与溶质原子气团的形成有关的,所以上述的与溶质原子气团有关的反常內耗现象可能较易在出现明显屈服点的实验程序中出现。以这种设想为基础来进行探索,我们把试样在拉力试验机上預先拉伸到屈服后,立即用扭摆测量在时效过程中的內耗,结果表明,用这种操作方法可以较有把握地观察到上述的反常內耗现象。我们还用这种方法系统地研究了出现反常內耗(振幅峯和温度峯)的条件,下面是关于这些观测结果的报导。

二、实验装置和试样

在进行室温拉伸和內耗测量时,最初所用的仪器与以前测量范性形变过程中的內耗时所用的相似^[7],也是在 PMM-250A 小型拉力试验机上用夹头将线状试样两端夹住,并将一普通扭摆杆固定在线状试样的中间部位来测量內耗(中间扭摆),因而可以同时测量试样的应力-应变曲线和內耗-应变曲线,并且能够在拉伸后,立即测量时效过程中的內耗变化(卸载或不卸载)。

为了在改变温度测量时的方便,我们把装着试样的普通扭摆杆夹在拉力试验机的上、下夹头内,把试样拉伸到所欲的形变度后,将拉力试验机的下夹头拧松并向下移开,同时把扭摆杆下端浸入阻尼油内,然后测量內耗。有时为了得到较为精确的內耗数据,我们在拉力试验机上把试样进行拉伸以后,立即把试样装入普通的扭摆进行测量。

测量內耗的方法是自由衰减法,测量的频率约为每秒 0.5 周。每次都把试样严格激发到一定的最大应变振幅,然后测量约在 2.5 米外标尺上每衰减一定次数后的偏转读数,画出偏转读数的衰减曲线,从曲线上各点的斜率求出对应于该振幅的內耗值^[1]。为了提高测量的准确度,我们用极细的照射灯叉丝,使叉丝在标尺上所成的象细于标尺上的刻度线,并且用一个放大目镜来帮助读数。采用了这些措施之后,在內耗约为 1×10^{-3} 的数量级时,所能分辨出的內耗值约为 0.5×10^{-4} 。

所有试样在拉伸形变时所用的拉伸应变速率都约为 0.002/分。

所用的铝合金试样有两种,它们的含铜量都是 0.5%。一种是作者之一在 1949 年用的由 99.991% 高纯铝配制成的铝合金棒材(直径为 19 毫米)经过冷打和冷拔以及几次中间退火最后制成直径为 0.8 毫米的细丝。试样在最后一次中间退火后所受到的冷加工量是面积减缩 55%。另一种试样是用 99.9% 纯铝配成的直径为 4.5 毫米的铝合金棒材(刘民治同志供给的),经几次冷拔和中间退火后,制成直径为 1.2 毫米的细丝。最后一次中间退火后所受到的冷加工量也是 55% 面积减缩。把这两种细丝剪成线状试样,放在马弗炉中(450℃)退火 20 分钟,取出后在空气中冷却并滚直,再放入炉中(450℃)保温 1 小时炉冷。

三、关于反常内耗现象的观测

1. 表现反常振幅效应的时效内耗峰

将上述由 99.991 高纯铝配制的合金试样(长度 300 毫米)拉伸到应变为 0.8% (如图

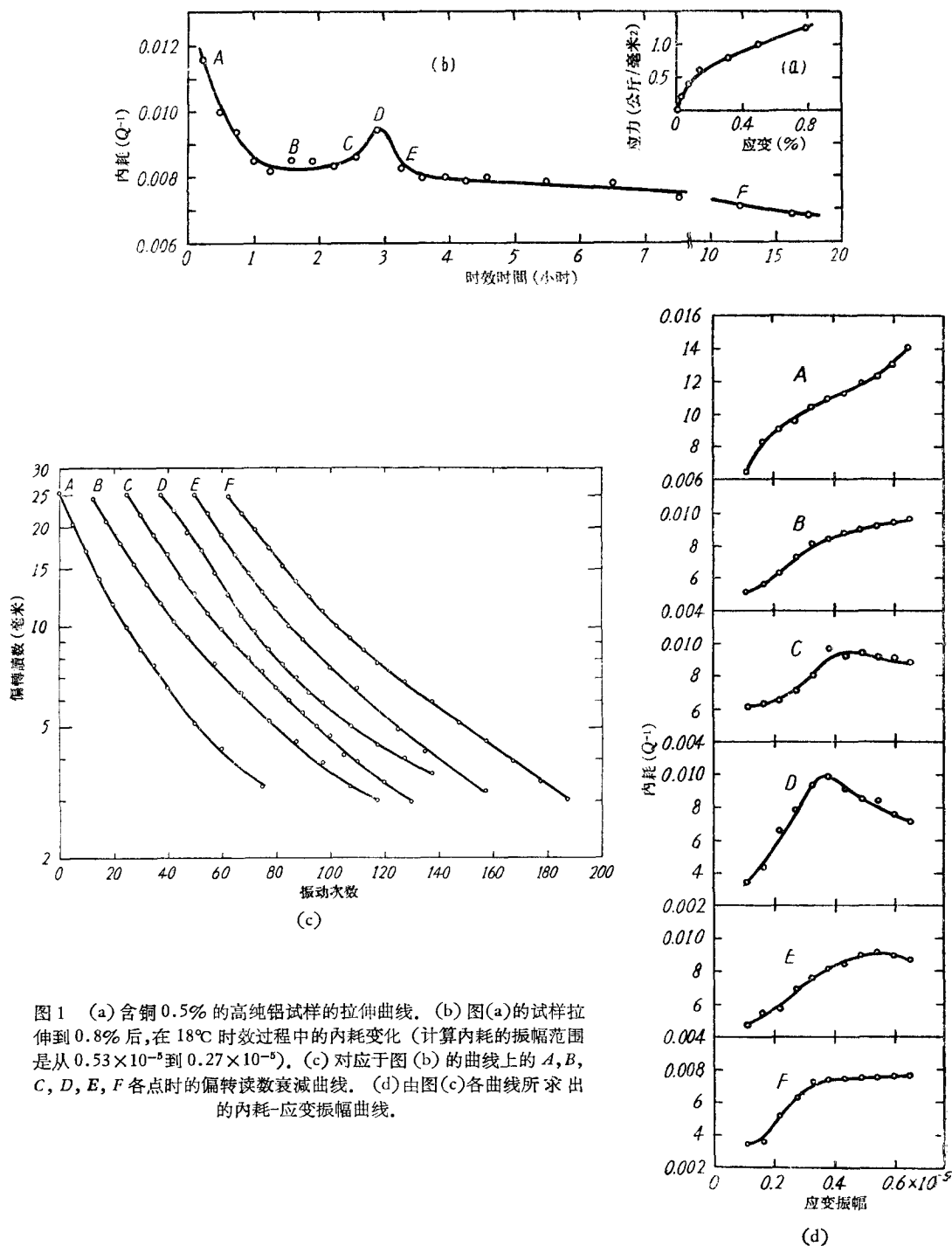


图1 (a)含铜0.5%的高纯铝试样的拉伸曲线。(b)图(a)的试样拉伸到0.8%后,在18°C时效过程中的内耗变化(计算内耗的振幅范围是从 0.53×10^{-5} 到 0.27×10^{-6})。(c)对应于图(b)的曲线上的A,B,C,D,E,F各点时的偏转读数衰减曲线。(d)由图(c)各曲线所求出的内耗-应变振幅曲线。

1(a)), 卸载后装入扭摆炉中, 于室温(18°C)进行时效, 并在时效过程中每隔一定时间 (15 分钟) 测量一次内耗和内耗的振幅效应。每次测量内耗时所激发到的最大应变振幅 (试样表面的最大扭应变) 是 0.69×10^{-5} (相当于在 2.5 米处的标尺上的偏转读数约为 26 毫米), 然后从 0.66×10^{-5} (相当于标尺上的偏转读数 25 毫米) 开始读出每衰减 5 次或 10 次后的偏转数, 并求出内耗; 内耗随时效时间的变化情况如图 1(b) 所示, 图中所取的内耗值是振幅从 0.53×10^{-5} (相当于标尺上的偏转读数 20 毫米) 衰减到振幅为 0.27×10^{-5} (相当于标尺上的偏转读数 10 毫米) 的平均值。由图可见, 开始时效时, 内耗随时效时间的增加而逐渐下降, 时效到约 1 小时半后, 内耗降到一极小值 (曲线 1(b) 上由 A 到 B), 但是随后内耗又升高, 在 2.5 到 3 小时形成一个峰后又继续降低 (曲线上由 B $\rightarrow$ C $\rightarrow$ D $\rightarrow$ E 的部分), 一直达到几乎是稳定的内耗值 (曲线上的 F 点以后)。图 1(c) 表明对应于图 1(b) 的曲线上的 A, B, C, D, E, F 各点时所测得的偏转读数的对数值的衰减曲线。图 1(d) 是由图 1(c) 中各曲线所求出的内耗随着振幅而变化的情况。由图可见, 在刚刚形变后 (A 点), 内耗表现出正常振幅效应, 即内耗随应变振幅的增加而增加, 在时效峰出现的期间 (C, D, E 点), 内耗成为反常的, 即出现应变振幅峰, 到“充分”时效后 (F 点), 内耗又只表现出正常的振幅效应。

我们用含 0.5% 铜的 99.9 纯铝试样进行了同样的试验, 得到了类似的结果。此外, 还把这种试样在拉力试验机上进行拉伸后在应力下时效 (不卸载), 并且用中间扭摆测量内耗, 也得到了同样的结果。

用含铜约 0.1% 的工业纯铝试样进行试验时, 也曾观察到表现反常振幅效应的时效内耗峰。

2. 表现反常振幅效应的温度内耗峰

上述的含铜 0.5% 的高纯铝试样经过拉伸和充分时效以后 [见图 1(b)], 用较慢的速度升高温度 (升温速率约为 $20^{\circ}\text{C}/\text{小时}$), 并且测量内耗及其振幅效应。图 2(a) 的曲线(I) 所示的是第一次升、降温测得的内耗-温度曲线。(计算内耗的偏转读数范围约为从 20 到 10 毫米。) 在第一次升温时并不出现温度内耗峰。在 100°C 以前, 内耗随着温度的上升而单调下降, 超过 100°C 后开始上升。达到 130°C 后降温测量, 在 50°C 以上时, 内耗随着温度的降低而单调下降, 随后又开始上升, 在约 26°C 处出现峰值。由图 2(a) 的曲线(II) 可见, 第二次升温时仍在约 26°C 处观察到内耗峰, 升温到 116°C 后降温测量, 在约 25°C 处观察到一更高的内耗峰。图 2(a) 的曲线(III) 指出, 第三次升温时仍有内耗峰出现, 但峰高较第二次降温时为低。上升到 135°C 后降温, 在低于 60°C 后, 内耗随着温度的降低而单调上升, 直到室温都没有下降。从曲线的趋势看来, 内耗峰可能已移至室温以下。

如图 2(a) 的曲线(IV—VI) 所示, 把冷加工试样升温到 200°C 以上时再降温测量, 在所测的温度范围内, 内耗只是单调地下降, 并不呈现反常振幅效应。试样在 200°C 以上保温后所发生的变化只能是预先冷加工效应的消除, 因而所观察到的反常内耗现象是与试样的预先冷加工状态有关的。

图 2(b) 和 2(c) 分别表示在不同温度下测出的偏转读数衰减曲线及由衰减曲线所求出的内耗-振幅曲线。由图可见, 在出现内耗峰的温度范围内, 内耗是反常的, 而在其它温度下, 内耗只表现正常的振幅效应。

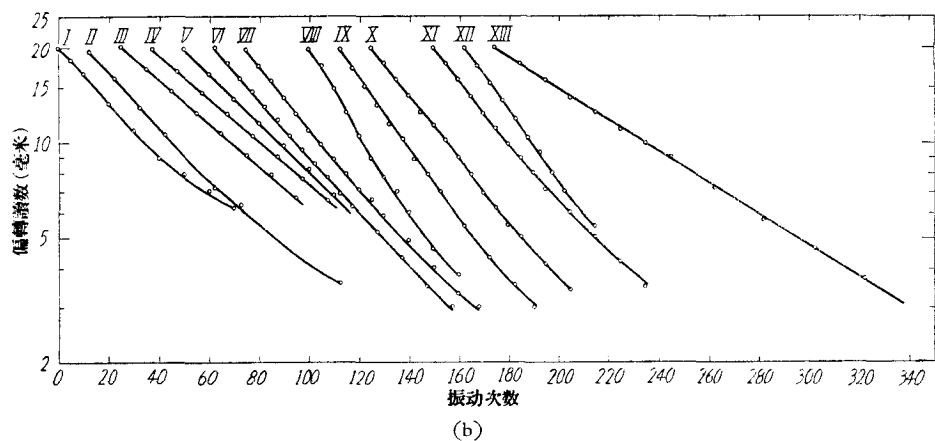
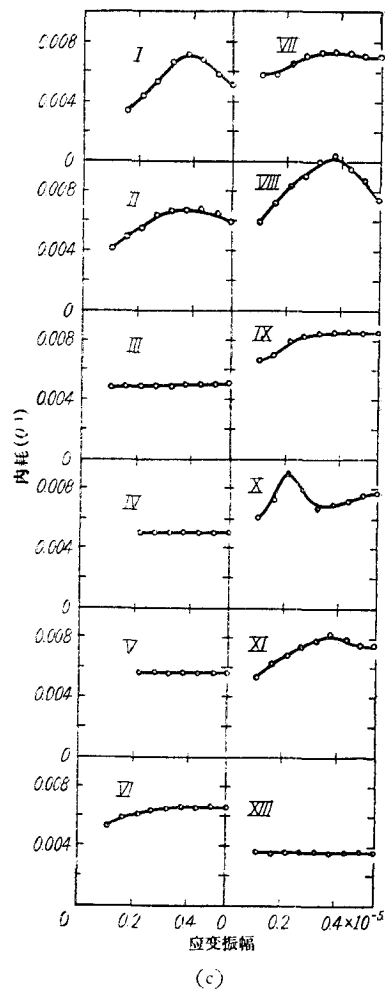
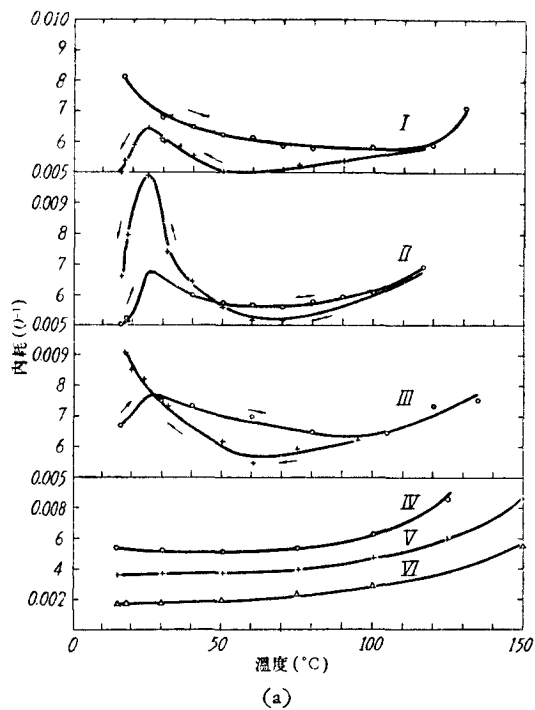


图2 (a) 含铜0.5%的高纯铝试样经过拉伸和充分时效以后,再升温 and 降温测量时的内耗变化。I, II, III 是第一、二、三次升降温曲线。IV, V, VI 是升温至200℃, 300℃, 450℃后再降温测量的曲线。计算内耗的偏转读数范围约为从20到10毫米。(b) 在不同升、降温循环和不同温度下测量的偏转读数衰减曲线。I. 第一次降温, 25℃; II. 第二次升温, 30℃; III—X. 第二次降温: 70℃, 60℃, 50℃, 40℃, 31℃, 25℃, 18℃, 16℃; XI. 第三次升温, 30℃; XII. 第三次降温, 24℃; XIII. 300℃退火后, 16℃。(c) 由图2(b)所求出的内耗-振幅曲线, I—XI, XIII. 说明与图2(b)的相同。

曾用含铜约 0.5% 的 99.9 铝试样进行试验, 也观察到表现反常振幅效应的温度内耗峰。

3. 用高纯铝试样进行的试验

把充分退火后的 99.991% 高纯铝试样(直径 0.8 毫米, 长度 220 毫米)拉伸到 0.5% 的应变以后, 装入测量内耗的炉内, 在 16°C 进行时效, 时效过程中的内耗变化如图 3(a) 所示。由图可见, 内耗随着时效时间的增加而单调下降, 最后变平, 并不出现时效峰。图 3(b) 和 3(c) 分别是对应于图 3(a) 的时效曲线上各点的偏转读数衰减曲线和内耗-应变振幅曲线。由图可见, 除在拉伸后立即开始测量的两点呈现正常的振幅效应以外, 在时效约 1 小时后, 内耗完全与振幅无关。

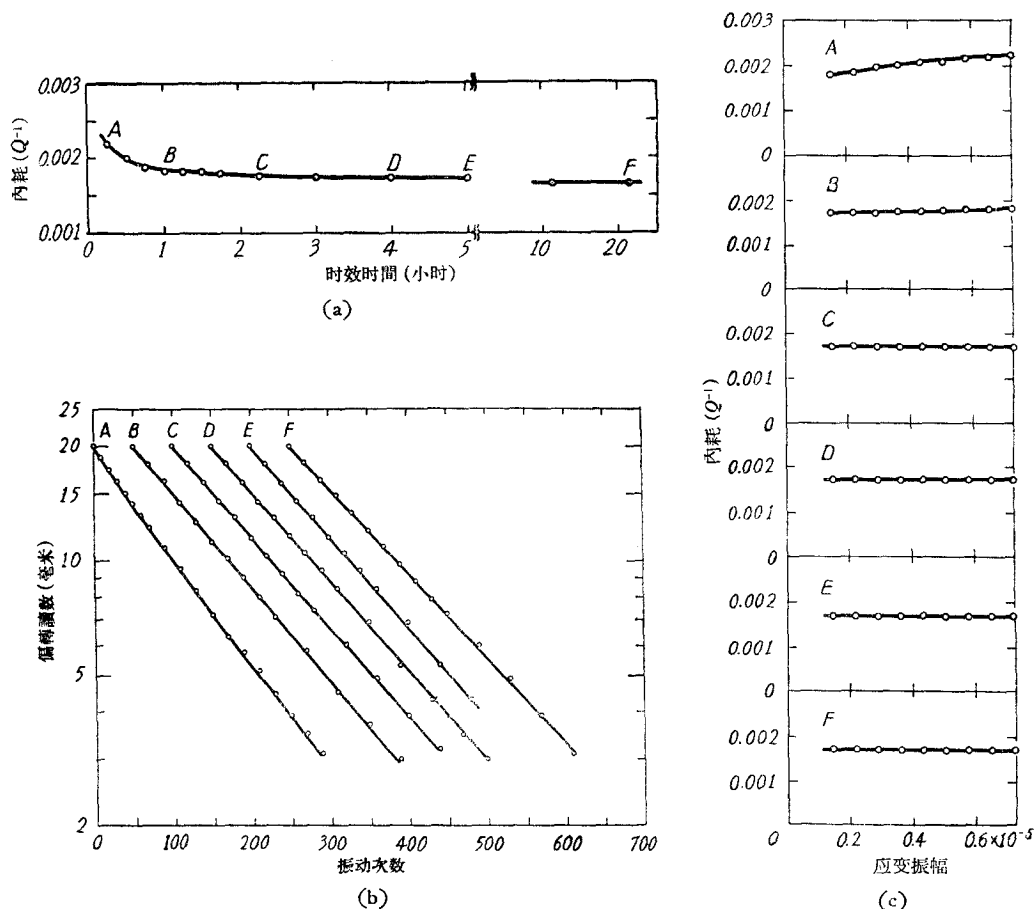


图 3 (a) 未加铜的高纯铝试样拉伸到 0.5% 后, 在 16°C 时效过程中的内耗变化。(b) 对应于图 3(a) 的曲线上 A、B、C、D、E、F 各点时的偏转读数衰减曲线。(c) 由图 3(b) 各曲线所求出的内耗-振幅曲线。

图 4(a) 表示当拉伸后的高纯铝试样在“充分”时效后, 再改变测量温度时所测得的内耗-温度曲线。由图可见, 升温时内耗-温度曲线上有一个小平台, 到 150°C 降温测量, 则得到一条单调下降的曲线。升温 and 降温曲线的差别显然是由于冷加工所引起的。图 4(b) 和 4(c) 分别表示在升温 and 降温过程中的偏转读数衰减曲线和内耗-振幅曲线。由图可见, 不论是在升温或在降温过程中, 内耗都不呈现任何的振幅效应。这与以前关于高纯铝

的内耗测量结果一致^[3]。

我们还把充分退火的 99.991 高纯铝试样拉伸到约 0.8% 的应变以后进行试验, 所得的结果与上述的相同。

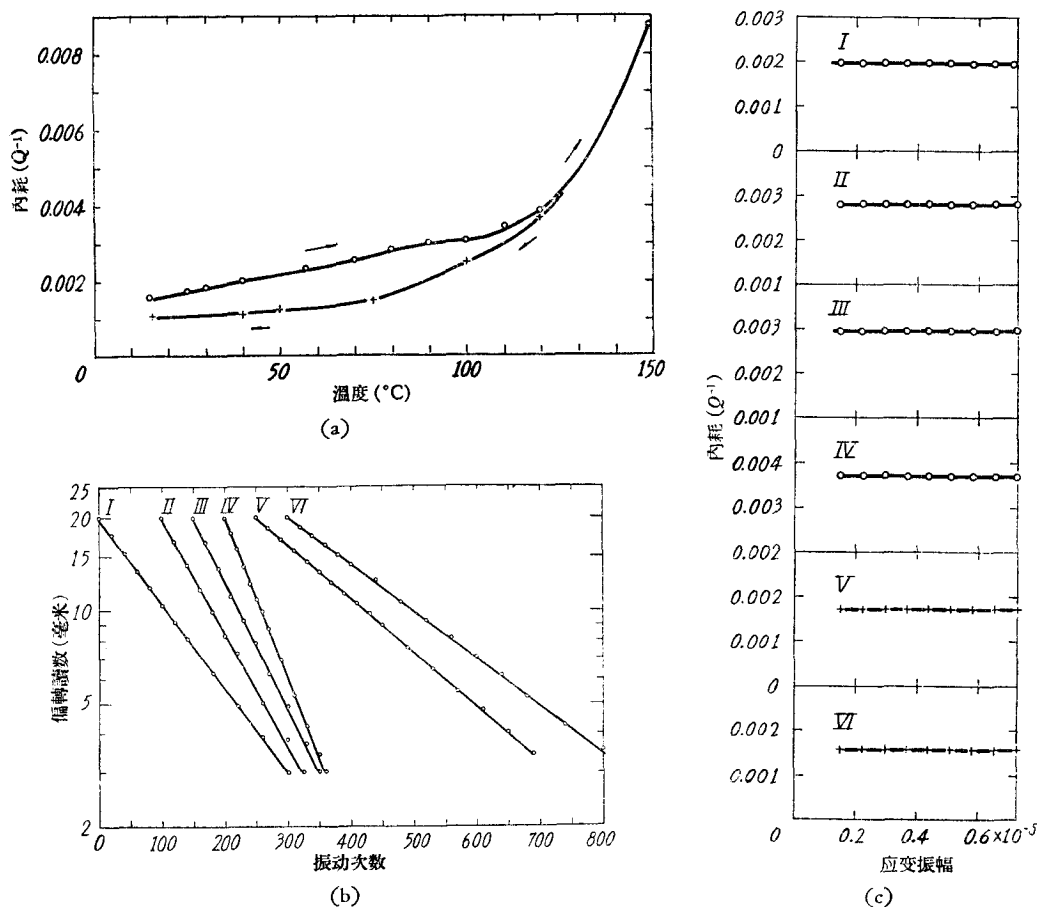


图 4 (a) 未加铜的高纯铝试样经过拉伸和“充分”时效以后,再升温 and 降温测量时的内耗变化。(b) 上述试样在升温 and 降温测量时的偏转读数衰减曲线。I—IV. 升温测量: 40 $^{\circ}\text{C}$, 80 $^{\circ}\text{C}$, 90 $^{\circ}\text{C}$, 120 $^{\circ}\text{C}$; V—VI. 降温测量: 50 $^{\circ}\text{C}$, 16 $^{\circ}\text{C}$ 。(c) 由图 4(b) 所求出的内耗-振幅曲线。I—IV, V, VI. 同 4(b)。

四、关于反常内耗的出现条件的进一步观测和分析

前节关于反常内耗的实验观测结果指出: (1) 这种反常内耗与铝中所含的铜溶质原子有关, 因为它在高纯铝中不出现; (2) 这种内耗也与铝的冷加工状态有关, 因为试样在较高的温度下退火后, 除非再经过冷加工, 便不再出现这种内耗; (3) 这种内耗与一般的冷加工内耗不同, 因为后者在降温测量时总是单调下降, 而这种内耗则在降温测量时升高或出现峰值。这些实验全部证实了过去的结果^[1,2]。下面对于出现这种反常内耗的条件再作进一步的观测和分析。

1. 测量内耗所用的应变振幅对于出现振幅峰的影响

我们把预先拉伸到 1.0% 并在 26 $^{\circ}\text{C}$ 时效一天后的 99.9 纯 Al-0.5% Cu 合金试样, 依次

由小振幅增加振幅来测量内耗 (在时效过程中曾观察到表现反常振幅效应的时效内耗

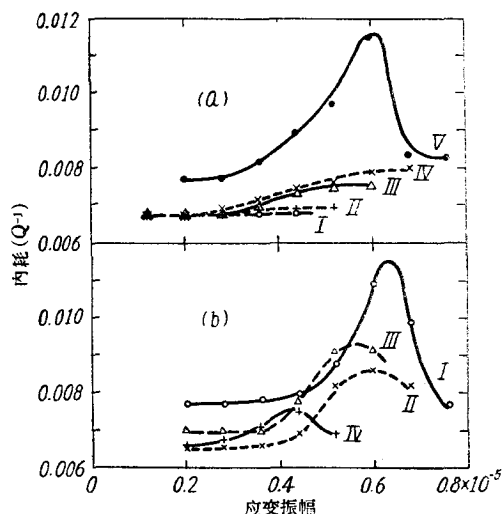


图5 (a) 含铜0.5%的99.9纯铝试样经过拉伸并“充分”时效后,再逐次增加振幅测量内耗时所得的结果。最大振幅: I. 0.45×10^{-5} ; II. 0.56×10^{-5} ; III. 0.64×10^{-5} ; IV. 0.72×10^{-5} ; V. 0.80×10^{-5} 。(b) 在进行过图5(a)的实验并时效一天以后,再从大振幅依次减少振幅测量内耗时所得的结果。最大振幅: I. 0.80×10^{-5} ; II. 0.72×10^{-5} ; III. 0.64×10^{-5} ; IV. 0.56×10^{-5} 。

峰), 所得的结果如图5(a)所示。在应变振幅为 0.45×10^{-5} 时, 内耗没有振幅效应(I), 当振幅增加到小于 0.72×10^{-5} 时, 内耗只有正常振幅效应(II—IV), 而一旦应变振幅增加到 0.8×10^{-5} 时, 即出现明显的反常振幅效应(V)。试样经过图5(a)的测量并在室温时效一天后, 已基本上回复到“充分”时效的状态, 当测量内耗的振幅为 0.45×10^{-5} 时, 内耗与振幅无关, 再由小振幅到大振幅测量所得的曲线的形状仍与图5(a)相似。此后, 再从大振幅依次减小振幅测量内耗, 则在较小的振幅下开始测量时, 亦可观察到反常振幅效应, 如图5(b)所示。但是, 在以前从小振幅增加振幅测量时, 在此振幅下并不出现反常内耗。这表示, 经过应变振幅为 0.80×10^{-5} 的激发和内耗测量以后, 试样的内部状态有了改变, 所以用较小的应变振幅仍能出现内耗

振幅峰。

2. 预形变量对于出现时效峰和温度峰的影响

(1) 高纯 Al-0.5% Cu 合金试样

我们把几根高纯铝铜合金试样分别拉伸到形变量 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.8% 和 1%, 装入测量内耗的炉内, 测量在室温时效过程中的内耗, 待达到“充分”时效后再改变温度进行内耗测量。其中除拉伸形变量为 0.8% 时的测量结果已见于图 1 和图 2 以外, 对于其它形变量所得的结果分述于下。

形变量 = 0.2% 试样在 17°C 时效的过程中, 所测得的内耗曲线上并没有出现明显的峰值, 然而一直到时效后期, 内耗都表现出反常振幅效应。“充分”时效后升温测量时, 在约 40°C 处出现一个小平台, 如图 6 所示, 但是这个范围内的内耗并不呈现明显的反常

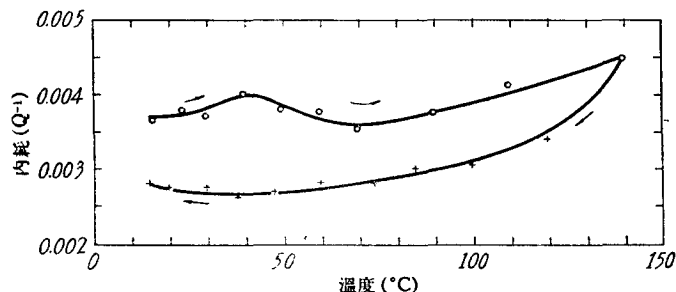


图6 含铜0.5%的高纯铝试样在拉伸0.2%以后, 在17°C时效达到“充分”时效后升温 and 降温测量时的内耗曲线。

振幅效应,因而这个升温平台可能是由于别的原因所引起的。升温至 140℃ 再降温测量时,内耗起始时是单调下降,升温时的小平台消失,不过降温到 30℃ 以下时,内耗又有上升的趋势,这表示降温内耗峰或许出现在室温以下。

形变量 = 0.3% 试样在 28℃ 时效过程中所测的内耗曲线上也沒有出现明显的峰值,但在曲线达到“充分”时效后,观察到反常振幅效应的迹象。待内耗达到稳定值后升温测量,内耗不断下降,到 120℃ 才开始上升,如图 7I 所示。升温到 140℃ 后降温,起初内耗随着温度的下降而下降,到温度低于 75℃ 后内耗又开始上升,到室温时升得最高。在室温停留时,内耗继续上升,如图 7I 中的虚线所示。第二次升温 and 降温时内耗的变化趋势与第一次相仿。当温度再降至室温时,我们用液态氮把测量温度降到室温以下,在约 3℃ 处观测到一个内耗峰。在图 7II 所示的曲线达到“充分”时效后以及在 3℃ 的温度峰处,观察到反常振幅效应的迹象。

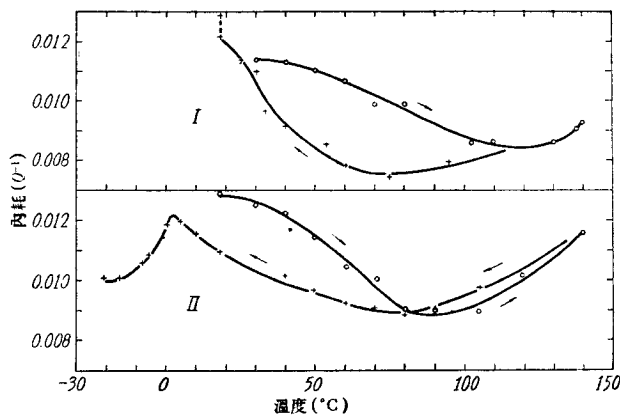
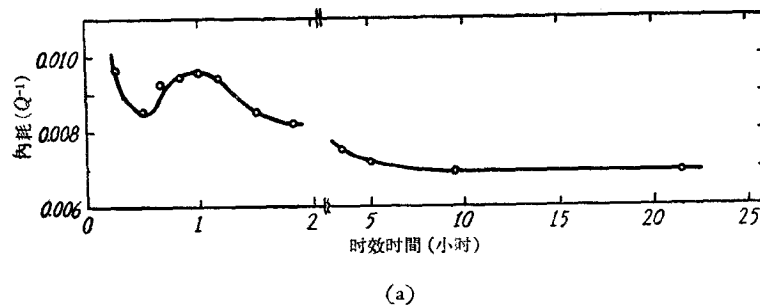


图 7 含铜 0.5% 的高纯铝试样在拉伸 0.3% 以后,在 28℃ 时效达到“充分”时效后升温 and 降温测量时的内耗曲线。I. 第一次升降温; II. 第二次升降温。

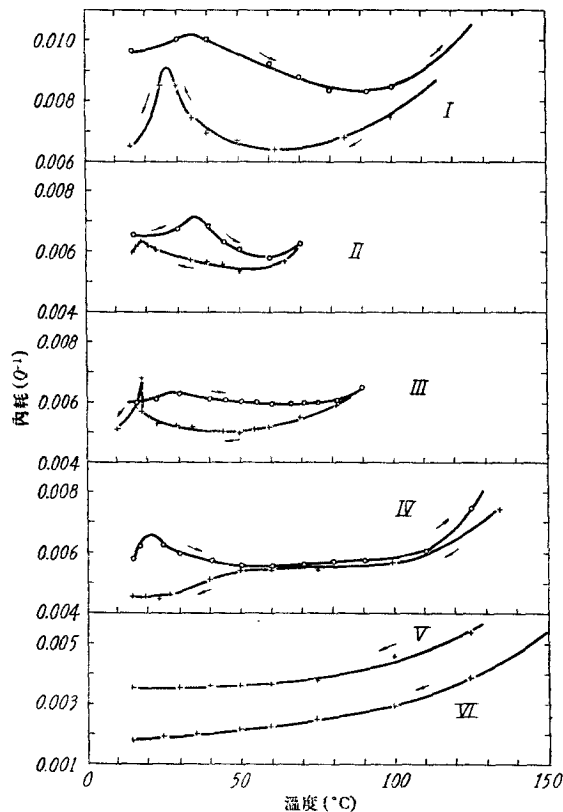
由上述两种预形变量的实验结果可知,在试样经过拉伸后,如果不出现时效峰,然而在达到“充分”时效后仍然呈现反常的振幅效应时,则在低于时效的温度下才能观测到呈现反常振幅效应的温度内耗峰。图 2(a) 中曲线 III 在降温时的情况可能也是如此。

形变量 = 0.4% 试样经过拉伸在 33℃ 时效约 1 小时后即出现一个明显的时效内耗峰,如图 8(a) 所示。在时效峰的范围內呈现反常振幅效应。在内耗达到稳定值后,连续进行了四次升温 and 降温测量(第一次所达到的最高温度是 150℃,第四次是 200℃)。升温 and 降温都出现内耗峰,在第一次升温时,在 35℃ 处出现峰值(见图 8(b))。在温度峰处出现明显的振幅效应。当升温达到 300℃ 后再降温测量,则温度峰不出现。随后再把试样经 450℃ 充分退火,在降温测量时,也没有观察到温度内耗峰。

形变量 = 1% 形变后在 30℃ 时效,约 2 小时后出现时效内耗峰。随后进行了三次升降温测量,温度峰都出现在 40—60℃ 之间,在时效峰和温度峰处都呈现明显的反常振幅效应。把试样经过 450℃ 充分退火后,即不出现温度峰(图从略)。此外,我们还作了形变量约为 1.6% 的实验,观察到类似的现象。



(a)



(b)

图8 (a)含铜0.5%的高纯铝试样在拉伸0.4%以后在33°C时效过程中的内耗变化。(b)上述试样在“充分”时效后升温 and 降温测量时的内耗曲线。I, II, III, IV——第一、二、三、四次升降温测量; V, VI——由300°C和450°C(半小时)降温测量时的内耗曲线。

(2) 99.9 純 Al-0.5% Cu 合金试样

我们对于这种试样进行了连续多次拉伸、在应力下时效和再拉伸的实验。拉伸曲线如图9所示。在拉伸曲线上的 b (0.7%), c (1%), d (1.95%), e (3%)各点分别在室温(26°C)在应力下进行时效,在时效过程中观察到时效内耗峰,其中大部分呈现反常振幅效应。在每次时效后再拉伸试样时,屈服应力都比原来的应力高。最后一点 f 是在拉伸到应力为2.9公斤/毫米²后卸载到一小应力(为使试样保持笔直)进行测量的,同样也观察到呈现反常振幅效应的时效内耗峰,可见在拉伸应力下时效并不是出现这种时效内耗峰

的本质因素。但是在拉伸到 1 (1.26%)、2 (1.96%)、3 (2.1%)、4 (2.22%)、5 (2.8%)、6 (3.5%) 各点再分别在室温进行时效时,我们观察到,在拉伸到各该点后立即测量内耗,则内耗值有时反而低于在拉伸前的“充分”时效内耗值,在这种情况下,都没有观察到时效内耗峰。

(3) 关于预形变量的影响的初步分析

关于预形变量对于出现具有反常振幅效应的时效峰和温度峰的影响,我们认为可以根据形变过程中和形变后的应变时效过程来解释。

我们用含铜 0.5% 的铝合金试样进行了边拉伸边测扭摆内耗的工作,观测到,形变过程中的内耗出现一系列的峰值和谷值(跳跃现象)。这种情况与以前在镍碳固溶体中所观察到的相似^[8]。我们认为,这种现象是由于在形变过程中,在试样里进行的应变时效过程所产生的。峰值对应着位错处于挣脱了气团以后的状态,因而在范性形变过程中的内耗最大,但是形变过程中产生的空位将帮助铜原子扩散到位错周围形成气团,重新将位错钉扎得很牢固,所以内耗最小。这样的过程不断地重复下去,因而在形变过程内耗-形变量曲线上出现一系列的峰和谷。

如果在形变到内耗达到峰值后停止加载,用试样进行时效试验,由于这时试样中的位错已挣脱了气团,所以会发生铜原子的重新聚集和形成气团的过程,因此在适当的温度下时效,将可以观察到表现反常振幅效应的时效峰;如果拉伸到峰值和谷值之间以后再进行时效试验,则仍可看到较小的(而且出现得较快的如图 8(a) 所示)时效峰,并且“充分”时效后的内耗值反倒可能高于再拉伸一次后的内耗值;但如果拉伸到谷值后再进行时效试验,则由于在形变过程中已经发生了“充分”时效,所以可能看不到时效峰。这种看法可以定性地解释图 9 中所看到的各种情况。某些预形变量之所以能够观察到时效峰,可能是由于此时所对应的是峰值或峰值与谷值之间的状态,而某些预形变量之所以不出现时效峰,则可能是由于此时所对应的是谷值的状态,时效过程已在形变过程中完成。

在用高纯铝配制的含铜 0.5% 的试样中,拉伸和时效后的温度峰出现的位置与预形变量之间似乎并没有很明显的对应关系,但是一般来说,如果形变后出现表现反常振幅效应的时效内耗峰,则必然出现表现反常振幅效应的温度内耗峰(见图 1, 2, 8);如果时效过程中没有峰,则改变温度时仍然可能出现温度峰,后者可以有两种情况:一种是试样已拉伸到上述的形变过程中内耗为谷值的状态,因此时效过程中内耗的变化不大,只是随时效时间作很小的单调下降,亦即由于在形变过程中已经完成了大部分时效,所以在停止形变后的时效过程中,只观察到时效的后期[图 1(b) 的 E—F 部分],因此,如果条件控制得好,还可能在时效开始时观察到反常振幅效应。在这种情况下,随后的升温和降温都可以看到表现反常振幅效应的温度内耗峰。另一种情况是,在时效过程中没有明显的内耗峰,而是单调地下降和变平,并且在变平后出现反常振幅效应,此时在升温过程看不到温度内耗峰,而只有降低温度到时效温度以下时,才能看到表现反常振幅效应的温度内耗峰(见

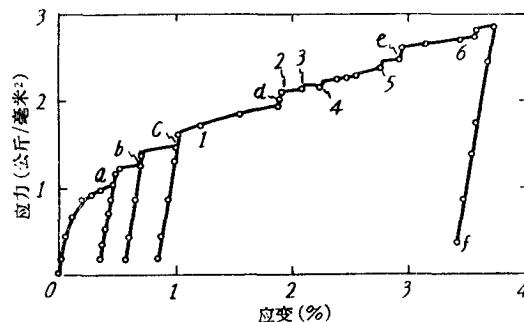


图9 含铜 0.5% 的 99.9 纯铝试样的连续多次拉伸试验曲线。

图 6(b) 和 7(b)), 亦即时效温度已高于内耗峰颠温度, 所以时效后期只能出现反常振幅效应, 而达不到“充分”时效的状态, 因此就不可能看到时效内耗峰。

五、結 語

从上面的结果和讨论来看, 在实验上可以较肯定地说, 表现反常振幅效应的时效内耗峰和温度内耗峰是存在的。但是, 目前的实验结果还只是停留在半定量的阶段, 因此对于结果的解释还只能是定性的。

在有气团存在的固溶体中, 当气团有足够的可动性时, 在测量内耗的应力的作用下, 位错可以拖着气团运动, 因而产生反常内耗。这种现象可以通过下列的方式表现出来。

1. 把退火试样拉伸到超过屈服后, 在室温时效过程中用一定的应变振幅测量内耗时, 在内耗-时效时间曲线上出现一个表现反常振幅效应的时效内耗峰。

2. 将上述拉伸并时效到内耗达到稳定值的“充分”时效试样, 在一定温度下逐渐增加应变振幅测量内耗, 当应变振幅达到某一临界值时, 在内耗-振幅曲线上, 出现一个应变振幅内耗峰。

3. 用一定的应变振幅在较高温度下测量“充分”时效试样的内耗时, 在内耗-温度曲线上出现一个表现反常振幅效应的温度内耗峰。在反复多次的升温 and 降温时, 这个内耗峰都出现, 并且在降温时往往比升温时显著。

4. 把经过适当地拉伸形变或冷加工的试样进行适当的部分退火 (退火温度低于完全再结晶温度), 然后用一定的应变振幅从退火温度降温测量, 在内耗-温度曲线上出现一个表现反常振幅效应的温度内耗峰^[1]。

这些实验事实都可以用位错拖着溶质原子气团移动的模型来解释。关于这个问题的进一步实验结果、具体模型和理论分析将随后报导。

应诗浩同志参加过部分试验工作, 许多同志对于本文的实验条件和实验结果提出过宝贵的意见, 谨此表示衷心的感谢。

附录 关于用扭摆法测量内耗的振幅效应的商榷

利用扭摆来测量内耗是基于扭转振动的衰减, 但是对于一个圆柱形的丝状试样来说, 各同心圆管壁处的应变不同, 如果内耗与应变振幅有关, 则各处的内耗并不相同, 因而所测得的试样内耗 (Q_s^{-1}) 是试样各处的材料内耗 (Q_M^{-1}) 的权重平均值, 所以测得的试样内耗对于扭转振动的最大振幅 (表面处) 的依赖关系 $Q_s^{-1}(A_e)$ 并不能严格地代表材料内耗对于振幅的依赖关系 $Q_M^{-1}(A_e)$ 。但是, 下面的计算表明, 二者之间有很好的近似关系。

为了简化计算, 我们只考虑在多晶圆柱形各向同性的材料 (多晶铝试样很接近这种情况) 的试样中因扭转切应力所引起的能量损耗, 在位错内耗的情况下只需要考虑切应力。考虑一如图 A 所示的单位长度的圆柱试样中的一个半径为 r 到 $r + dr$ 的薄的同心圆管状的体积元。当试样扭转时, 该处的振幅 $A_e = Kr$, K 是比例常数。该小体积中材料的内耗是

$$Q_M^{-1}(A_\epsilon) = \frac{\delta(\Delta W)}{2\pi\delta W}, \quad (1)$$

$\delta(\Delta W)$ 是该小体积元在振动一周内所消耗的能量, δW 是该小体积在振动一周内的最大弹性能。由于 W 正比于振幅的平方, 所以也正比于半径 r 的平方。因而

$$\delta W = Br^2 dV, \quad (2)$$

其中 B 是比例常数, dV 是圆管的体积, 它等于 $2\pi r dr$ 。另外, 由式(1)可得

$$\delta(\Delta W) = 2\pi\delta W \cdot Q_M^{-1}(A_\epsilon), \quad (3)$$

所以试样在单位长度体积内, 在振动一周时所消耗的能量是

$$\begin{aligned} \Delta W &= \int_0^R Q_M^{-1}(A_\epsilon) \cdot 2\pi\delta W \\ &= (2\pi)^2 \int_0^R Q_M^{-1}(Kr) Br^3 dr, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 R 是试样的半径。试样的内耗是

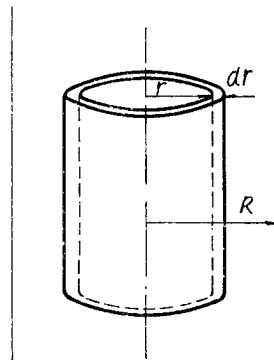
$$Q_s^{-1}(A_\epsilon) = \frac{\Delta W}{2\pi W} = \frac{(2\pi)^2 \int_0^R Q_M^{-1}(Kr) Br^3 dr}{2\pi \int_0^R Br^2 2\pi r dr}.$$

因而,

$$Q_s^{-1}(Kr) = \frac{\int_0^R Q_M^{-1}(Kr) r^3 dr}{\frac{1}{4} R^4}. \quad (5)$$

由此可见, 如果从实验中求出了试样的内耗对于应变振幅的依赖关系 $Q_s^{-1}(A_\epsilon)$, 即可用式(5)严格地求得材料的内耗对于应变振幅的依赖关系 $Q_M^{-1}(Kr)$ 。但是由式(5)可知, 对 $Q_s^{-1}(A_\epsilon)$ 贡献的绝大部分来自试样的表面层 (在沒有振幅效应时是正比于半径的四次方¹⁾), 因此, 所测得的 $Q_s^{-1}(KR)$ 基本上表征了试样表面层材料的内耗对应变振幅的依赖关系 $Q_M^{-1}(KR)$, 所不同的是使依赖的程度减弱并使依赖关系的曲线移向低振幅。对于我们所用的试样来说, 半径是 0.4 毫米, 表面层 0.1 毫米深的材料所产生的内耗就约占全部内耗的 70% 以上。因此, 所观测到的 $Q_s^{-1}(KR)$ 基本上是表面一层材料的贡献。

利用其它的振动方式来研究内耗的振幅效应时, 也都要遇到应变幅不均匀的问题。例如, 在通常的共振型声频和超声频纵振动中, 波节处的纵向应变最大, 而波腹处的应变为零, 由实验得到的试样的内耗也不同于材料的内耗, 二者间关系的数学处理也比上述处理扭摆的方法复杂²⁾。横振动时所牵涉到的不均匀性比纵振动还要复杂, 因为除了在试样的轴线上应变有不均匀外, 在同一横截面上的应变也是不均匀的。



附录图 A 半径为 R 的圆柱试样中的一个薄圆筒状体积元

1) Fast 和 Meijering 在处理 Snoek 内耗时也得到了类似的关系, 见 *Philips Res. Rep.*, **8** (1953), 1.

2) 参考 Харитонов, А. В., *Акуст. Журн.*, **4** (1963), 80.

参 考 文 献

- [1] Kê, T. S. (葛庭燧), *Phys. Rev.*, **78** (1950), 420.
- [2] 葛庭燧, 科学记录, **3** (1950), 61.
- [3] Kê, T. S. (葛庭燧), *Trans. AIME*, **188** (1950), 575.
- [4] 葛庭燧, 容保粹, 物理学报, **10** (1954), 155.
- [5] 例如, 见: Nowick, A. S., *Prog. Met. Phys.*, **4** (1954), pp. 1—70 (见 p. 66 中关于文献[1]的叙述).
- [6] 例如, 见: Smallman, R. E., Williamson, G. K., Andley, G., *Acta Met.*, **1** (1953), 126; Thomas, A. T., *Nature*, **181** (1958), 1728; Bolling, G. F., *Phil. Mag.*, **4** (1959), 537.
- [7] 葛庭燧, 容保粹, 张肇源, 科学记录, 新辑 **1** (1957), 213.
- [8] 葛庭燧, 张肇源, 物理学报, **21** (1965), 154.

LOW FREQUENCY DISLOCATION INTERNAL FRICTION PEAKS WITH ANOMALOUS AMPLITUDE EFFECT IN Al-0.5% Cu ALLOY

Kê T. S. CHANG Z. S.

(Academia Sinica)

ABSTRACT

The experimental procedure for observing the low frequency anomalous internal friction peaks in Al-0.5% Cu alloy was systematically investigated in order to be able to obtain reproducible results. It is shown that, when the specimen is plastically deformed on a tensile testing machine to a suitable extent and then the internal friction measured in the course of aging at a suitable temperature, an aging internal friction peak exhibiting an anomalous amplitude effect may be observed. After the specimen has been "sufficiently" aged and its internal friction has reached a steady value, an amplitude internal friction peak at a given temperature can be observed when the strain amplitude for measuring internal friction is successively increased. Furthermore, when the internal friction of the "sufficiently" aged specimen is measured at higher temperatures with a given strain amplitude, a temperature internal friction peak exhibiting an anomalous amplitude effect may be observed. These experimental results demonstrated conclusively the existence of the previously observed amplitude internal friction peak at a given temperature and of the temperature internal friction peak exhibiting an anomalous amplitude effect.

In order to find out why the anomalous internal friction peaks previously observed in Al-0.5% Cu alloy have a poor reproducibility, the effect of strain amplitude upon the appearance of the amplitude internal friction peak, as well as the effect of the amount of the previous plastic deformation upon the appearance of the aging internal friction peak and the temperature internal friction peak was systematically studied. An analysis was made on the experimental conditions for the appearance of these anomalous internal friction peaks.

The observed experimental results concerning the anomalous internal friction peaks can be explained in a qualitative manner with a model in which the solute atom "atmosphere" was assumed to be dragged along with the dislocation. The concrete model and its theoretical analysis will be reported in a later paper.