

铁在范性形变过程中的低频内耗^{* 1)}

张进修 区广连** 胡胤珣**

(中山大学物理系)

提 要

在改装了的拉力试验机上测量了纯铁在范性形变过程中的内耗。研究了拉伸速率(在 $0.73 \times 10^{-6} - 50 \times 10^{-6}$ /秒范围内)、测量频率(在0.3—3.6/秒范围内)、应变退火及含碳量等对纯铁范性形变过程中内耗的影响。所得结果表明,在屈服平台上,范性形变过程中内耗基本不变,且其值随范性形变速率的增加和测量频率倒数的增加而线性增加。将实验结果与范性形变过程内耗的位错动力学模型所得出的定量关系式进行了对比,得到了满意的符合。求得了退火纯铁在屈服平台上的位错动力学指数为10.8—12.3。

还讨论了形变过程内耗的位错动力学模型的适用范围。

一、引 言

测量金属及合金在范性形变过程中的内耗,可以提供许多形变过程位错运动以及它与溶质原子、其他晶体缺陷交互作用的有用知识^[1,2],在文献中已有过若干关于 Mo^[3], Fe^[4], Al^[5,6], Cu^[7], Ni^[8]等在形变过程中内耗测量的报道,后来提出的金属在范性形变过程中低频内耗的位错动力学模型^[9],已能从位错理论及内耗理论的基本图象出发,推导出一个能表达金属范性形变过程内耗与形变速率、流变应力以及测量内耗所用的圆频率等因素的定量关系式。本文报道我们对 Armco 铁在范性形变过程中内耗的一些测量结果。结果表明,Armco 纯铁在屈服平台上的内耗值在所测的形变速率和测量频率的范围内都能用位错动力学模型作出满意的解释。

二、实验装置和试样

实验是在改装了的北京 1-5 型金属材料拉力试验机上进行的。为了能测量出微小负荷(原拉力试验机的最大负荷为 5000 公斤),在上夹头上加了一个弹簧钢制成的测力系统,并且用光三角系统来记录应力-应变曲线,记录负荷的灵敏度为 0.1 公斤。为了能改变拉伸速率,另外装配了一套马达和减速系统,以使拉伸速率能在 10^{-7} /秒— 5×10^{-3} /秒的范围内变化(当试样长度为 250 毫米时)。所有测量都是在室温(25—32℃)下进行的。

用中间扭摆测量内耗,其背景内耗值很低(测得的最小内耗值为 4×10^{-4})。用光点照相法所得的衰减振动曲线表明(可参见图 13(b)的照片),这种装置不会由于没有阻尼

* 1979 年 2 月 19 日收到。

** 金属物理专业 1965 年毕业生,参加了本文的大部份实验工作。

1) 本文初稿完成于 1966 年 2 月,修改稿完成于 1978 年 4 月。

油而抖动。在测量过程中, 屈服前期的扭摆零点略有漂移, 屈服后期则基本上没有漂移; 当有零点漂移时, 我们采用动态调零和两边读数相结合的方法来减少误差。由于漂移不大且内耗值较小, 这种误差约为通常测量扭摆内耗时的两倍。

试样材料是 Armco 铁, 经热锻、冷挤(打丝)制成直径为 4.5 毫米的小棒。第一批试样在 720℃ 湿氢处理八小时, 然后经几次中间真空退火拔成直径为 1 毫米的细丝, 再滚直并剪断成 270 毫米长的试样(使用长度为 250 毫米)和进行最后的真空退火。第二批试样则未经湿氢处理, 其他均与第一批相同。含碳量经微量法化学分析, 第一批为 0.005%, 第二批为 0.0078%。

三、实验结果

1. 拉伸速率的影响

用七种拉伸速率 (50×10^{-6} /秒, 25.3×10^{-6} /秒, 12.1×10^{-6} /秒, 6.35×10^{-6} /秒, 2.94×10^{-6} /秒, 1.53×10^{-6} /秒以及 0.73×10^{-6} /秒) 对湿氢处理试样(代号 A, 含碳量为 0.005%) 进行了边拉伸和边测内耗的实验, 测量内耗所用的频率都是 1.25/秒。所得

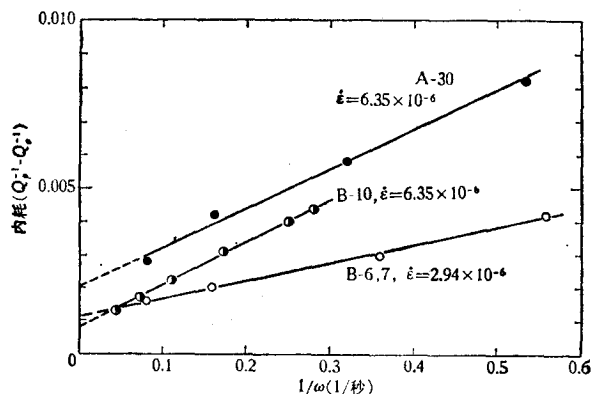


图1 A-28 试样的范性形变过程内耗-应变曲线和应力-应变曲线
拉伸速率 $\dot{\epsilon} = 50 \times 10^{-6}$ /秒; 测量频率 $f = 1.25$ /秒

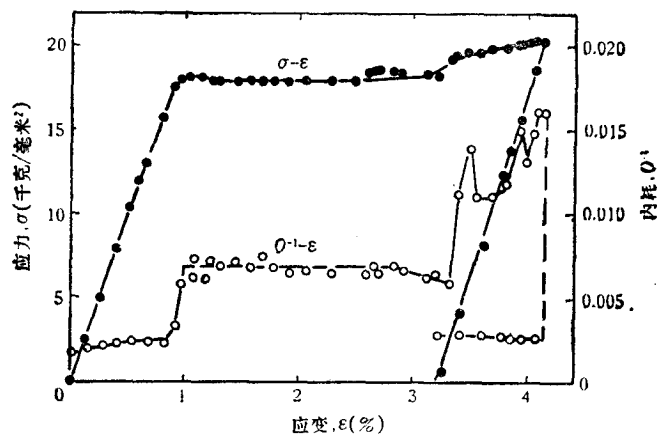


图2 A-7 试样的范性形变过程内耗-应变曲线和应力-应变曲线
拉伸速率 $\dot{\epsilon} = 12.1 \times 10^{-6}$ /秒; 测量频率 $f = 1.25$ /秒

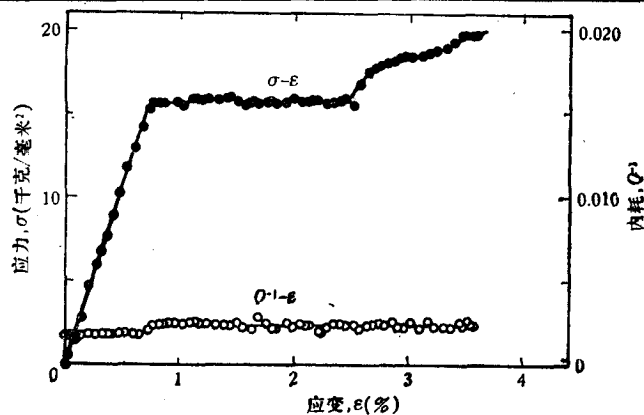


图3 A-12 试样的范性形变过程内耗-应变曲线和应力-应变曲线

拉伸速率 $\dot{\epsilon} = 0.73 \times 10^{-6}$ /秒; 测量频率 $f = 1.25$ /秒

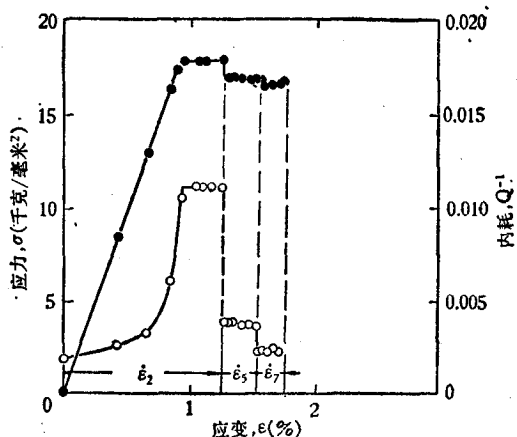


图4 A-25 试样作定频变速拉伸时,屈服平台上的形变过程内耗随形变速率的变化

拉伸速率 $\dot{\epsilon}_2 = 25.3 \times 10^{-6}$ /秒; 拉伸速率 $\dot{\epsilon}_3 = 2.94 \times 10^{-6}$ /秒;

拉伸速率 $\dot{\epsilon}_7 = 0.73 \times 10^{-6}$ /秒; 所有的测量频率 f 均为 1.25/秒

的部分结果如图1至图3所示。由图可见,在大形变速率时,其一般规律与文献[1]所报道的相同。在屈服期间(屈服平台),内耗值基本不变,且其值随形变速率的降低而单调下降。为了证实这一结果和消除试样不同所引起的效应,我们对同一试样在屈服平台的范围内进行了改变拉伸速率的测量,所得结果示于图4。由图4可见,单试样的结果与多试样的结果完全一样,随着形变速率的降低,屈服应力和范性形变过程内耗单调下降。

2. 测量频率的影响

为了测量频率的效应,我们用在屈服平台上改变测量频率的方法(不停止拉伸)来测量内耗。在改变频率时,由于要在形变过程中移动中间扭摆上摆锤的位置或是增减摆锤的数量,因此会使试样经受程度不大的冷加工。为了弄清这种操作效应的影响,我们曾对一条试样在屈服平台的形变过程中反复进行这种操作(操作的程度有时比在实际测量中的操作还要严重),但结果表明,只要操作后试样的拉伸应力-应变曲线回复到了原有曲线

的外延值,屈服平台上的形变过程内耗值仍然不变(即回复到操作前的内耗值)。对不同试样的对比试验也表明,操作后的内耗值仍然有很好的重复性。这可能是由于形变过程的内耗远大于其他冷加工引起的内耗所致。

图 5 表示了对湿氢处理试样在屈服平台上改变频率时所测得的结果。在该试样的测量中用了四种频率(0.3/秒, 0.5/秒, 1.0/秒, 2.0/秒)来测量屈服平台上的内耗值,所用的拉伸速率均为 6.35×10^{-6} /秒。由图可见,随着频率的增大,形变过程的内耗值单调下降。

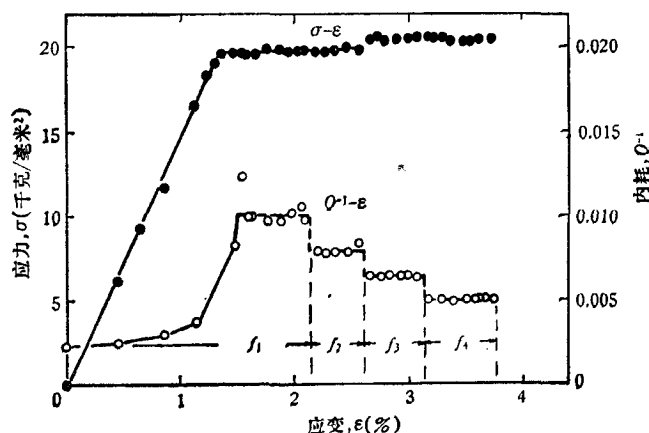


图 5 A-30 试样作定速变频拉伸时,屈服平台上的内耗值随测量频率的变化

我们对未经湿氢处理的 Armco 铁试样(代号 B, 含碳量为 0.0078%)进行了定频变速和定速变频的拉伸实验。为了进一步了解范性形变过程内耗值和测量频率的关系,我们特地在两个拉伸速率(6.35×10^{-6} /秒及 2.94×10^{-6} /秒)下进行了改变频率的测量,其部分实验结果如图 6 和图 7 所示。由图可见,未经湿氢处理试样的测量结果与湿氢处理试样的完全相同。在测量频率不变时,屈服平台上的内耗随着拉伸速率的减小而单调下降(见图 6);在拉伸速率一定时,屈服平台上的内耗值则随测

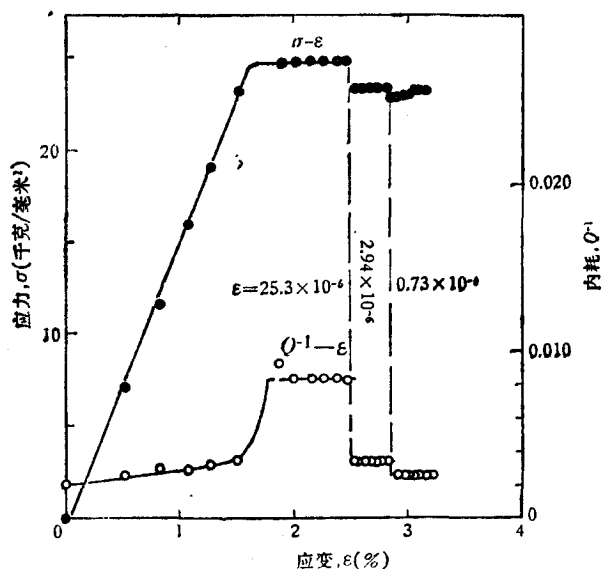


图 6 B-9 试样作定频(测量频率 $f = 1.33$ /秒)变速拉伸时,屈服平台上的内耗值随形变速率的变化
拉伸速率 $\dot{\epsilon}_1 = 25.3 \times 10^{-6}$ /秒; 拉伸速率 $\dot{\epsilon}_2 = 2.94 \times 10^{-6}$ /秒; 拉伸速率 $\dot{\epsilon}_3 = 0.73 \times 10^{-6}$ /秒

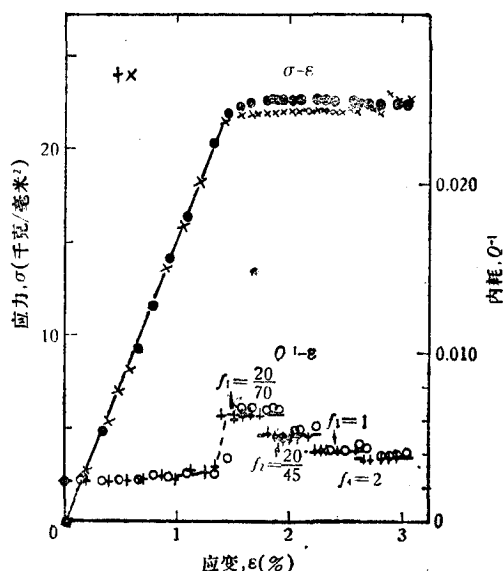


图7 B-6, B-7 试样作定速(拉伸速率 $\dot{\epsilon} = 2.94 \times 10^{-4}$ /秒)变频拉伸时,屈服平台上的内耗值随测量频率的变化
测量频率 $f_1 = 20/70$ 秒; 测量频率 $f_2 = 20/45$ 秒;
测量频率 $f_3 = 1$ /秒; 测量频率 $f_4 = 2$ /秒; 图中
+ × 为试样 B-6; ○ ● 为试样 B-7

量频率的增加而单调下降(见图7)。

4. 应变退火的影响及拉伸过程内耗的振幅效应

将已拉伸至形变量约为4%的A-21试样于650℃退火一小时后再作定频(测量频率 $f = 1.25$ /秒)和反复变速的拉伸实验,所得结果如图8所示。其中图8(a)是屈服平台上形变过程内耗随拉伸速率变化的结果,图中的A, B, C, D, E, F, G, H, I九个点的内耗值是通过光点相照法所得的振幅衰减曲线照片[见图8(b)]算得的;由该图可见,形变过程内耗与拉伸速率的关系具有很好的重复性。我们在屈服平台上先用 $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_3, \dot{\epsilon}_7$ 进行拉伸和测量内耗后,再用 $\dot{\epsilon}_3$ 进行拉伸时,形变过程内耗立即恢复到原来用 $\dot{\epsilon}_3$ 拉伸时的内耗值(屈服应力也恢复到第一次用 $\dot{\epsilon}_3$ 拉伸时的水平);然后再用 $\dot{\epsilon}_1$ 进行拉伸时,内耗值和屈服应力也都恢复到第一次用 $\dot{\epsilon}_1$ 拉伸时的值,直到屈服平台结束时为止(此时 $\epsilon \sim 3.5\%$);此后的加工硬化过程,其内耗值的变化也与图1至图7的结果相同。图8(b)给出了对应于图8(a)中A, B, C($\dot{\epsilon}_1$), D, E($\dot{\epsilon}_3$), F, G($\dot{\epsilon}_7$)及H, I($\dot{\epsilon}_3$)各点的振幅衰减曲线的光点记录照片。图8(c)则示出了A, B, C三点的对数振幅-振动次数曲线,它们基本上是一条直线,因此形变过程内耗是与振幅无关的(所用的最大振幅对应于试样表面的切变幅值为 3×10^{-5})。

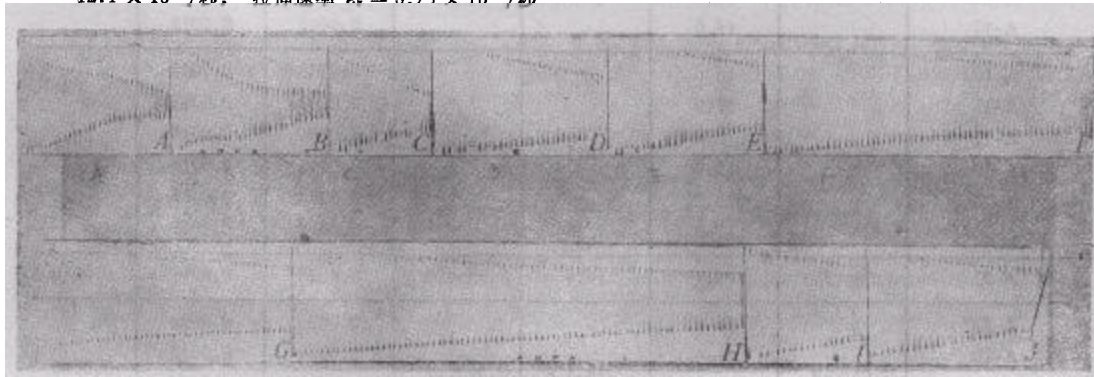
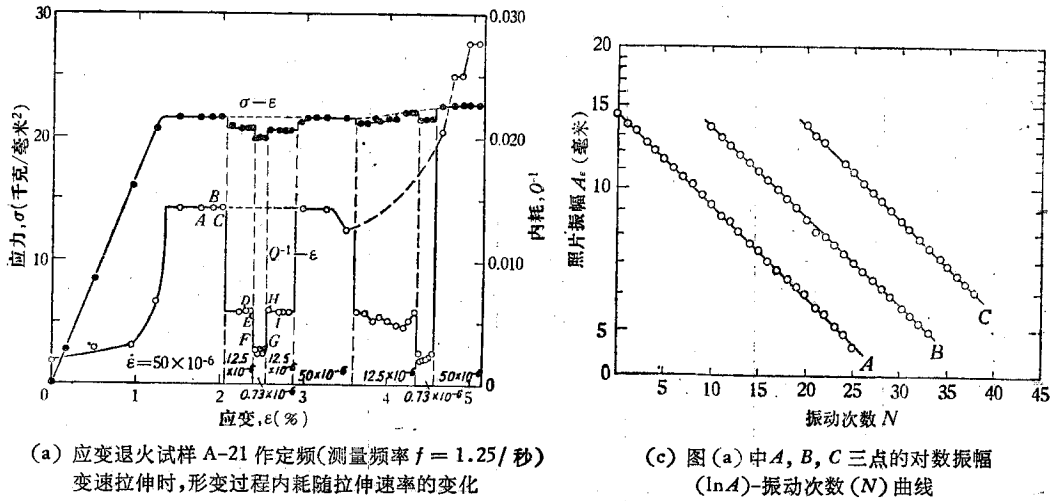
四、对实验结果的分析

文献[1]已经指出: 形变过程中的大内耗是形变过程所特有的。因为一当形变停止,内耗立即下降到其背景值。我们得到一个形变过程内耗的关系式

$$Q_p^{-1} = \frac{\bar{n}_t^2}{\bar{n}_p^2} \frac{mG}{\omega\sigma} \dot{\epsilon}_p, \quad (1)$$

其中 $\bar{n}_t, \bar{n}_p$ 分别为测量内耗时所用的扭切应力和拉伸应力对于形变过程中各滑移系统的平均取向因子, m 为位错动力学指数, G 是材料的切变模量, ω 是测量内耗时所用的圆频率, σ 是拉伸应力, $\dot{\epsilon}_p$ 是范性形变速率。对于体心立方金属来说, $(\bar{n}_t^2/\bar{n}_p^2)$ 约为0.5[推导见附录],由于在屈服平台上的 $\dot{\epsilon}_{拉} = \dot{\epsilon}_p$; 因此,铁在屈服平台上的形变过程内耗可表示为

$$Q_p^{-1} = 0.5 \frac{mG}{\omega\sigma_y} \dot{\epsilon}_{拉} + Q_0^{-1}, \quad (2)$$



(b) 图(a)中 A-I 各点的振幅衰减曲线的光点记录照片
(底片离试样的距离为 1 米)

图 8

式中 Q_p^{-1} 是在形变过程中所测得的内耗, σ_y 是屈服应力, Q_0^{-1} 为停止拉伸时的背景内耗值. 由于不可能逐点去测量 Q_0^{-1} , 所以在以下的实验数据分析中, 取拉伸前的静态内耗值作为 Q_0^{-1} ; 并取 $(Q_p^{-1} - Q_0^{-1})$ 作为真正的范性形变过程中的内耗值. 由 (1) 式和 (2) 式可知, $(Q_p^{-1} - Q_0^{-1})$ 反比于 ω 和正比于 $\dot{\epsilon}_{\text{范}}$, 所以范性形变过程内耗和在测量内耗的一个振动周期中所发生的范性形变量, 亦即和振动的一个周期中每单位体积试样中位错所扫过的总面积成正比, 因此这是一种粘滞性磨损机制.

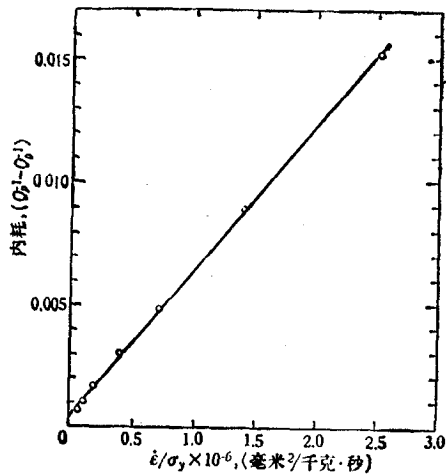
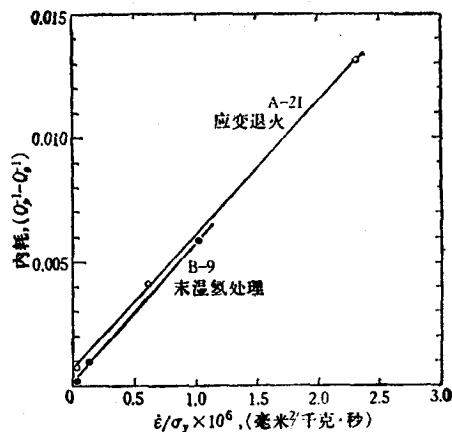
从 (2) 式可知, 在定频变速拉伸时, 范性形变过程内耗 $(Q_p^{-1} - Q_0^{-1})$ 应与 $(\dot{\epsilon}_{\text{范}}/\sigma_y)$ 有线性关系; 而在定速变频拉伸时, $(Q_p^{-1} - Q_0^{-1})$ 应与 $(1/\omega)$ 有线性关系, 从二直线的斜率均可求得位错动力学指数 m , 下面是两种方法测得的结果.

表 1 所示的是在不同拉伸速率下, 二十三条湿氢处理 Armco 铁试样在屈服平台上的形变过程内耗数据. 图 9 是用表 1 的数据做成的 $(Q_p^{-1} - Q_0^{-1}) - (\dot{\epsilon}_{\text{范}}/\sigma_y)$ 图. 由图 9 可见, 七个拉伸速率下所得的平均数据 $(Q_p^{-1} - Q_0^{-1})$ 与 $(\dot{\epsilon}_{\text{范}}/\sigma_y)$ 在实验误差的范围内有很好的线性关系, 由直线求得的斜率 $K_1 = 5.8 \times 10^{-3}$, 对应的位错动力学指数为 $m_i =$

表 1 形变速率对湿氢处理 Armco 铁在屈服平台上的形变过程内耗的影响(拉伸速率 $f = 1.25/\text{秒}$)

试样编号	拉伸速率 (1/秒)	σ_y (千克/毫米 ²)	$\bar{\sigma}_y$ (千克/毫米 ²)	$\dot{\epsilon}/\bar{\sigma}_y$ 毫米 ² /千克·秒	Q_p^{-1}	Q_s^{-1}	$Q_p^{-1} - Q_s^{-1}$
A-26	50×10^{-6}	19.6	19.9	25.2×10^{-7}	0.0170	0.0018	0.0152
A-27		19.6			0.0170	0.0018	
A-28*		20.4			0.0170	0.0018	
A-9	25.3×10^{-6}	17.0	18.2	14.0×10^{-7}	0.0100	0.0018	0.0089
A-11		—			0.0107	0.0018	
A-21		18.6			0.0100	0.0016	
A-24		19.5			0.0105	0.0017	
A-25*		17.5			0.0120	0.0017	
A-5	12.1×10^{-6}	17.0	17.2	7.1×10^{-7}	0.0070	0.0021	0.0048
A-7*		18.0			0.0068	0.0018	
A-8		16.6			0.0063	0.0018	
A-13	6.35×10^{-6}	17.6	16.5	3.9×10^{-7}	0.0051	0.0018	0.0030
A-14		16.4			0.0048	0.0019	
A-15		16.0			0.0046	0.0018	
A-16	2.94×10^{-6}	15.6	16.5	1.78×10^{-7}	0.0033	0.0018	0.0017
A-17		17.0			0.0031	0.0019	
A-18		16.0			0.0036	0.0018	
A-19		15.0			0.0036	0.0018	
A-24		18.2			0.0038	0.0017	
A-25*		17.0			0.0038	0.0020	
A-22	1.53×10^{-6}	16.4	16.4	0.93×10^{-7}	0.0028	0.0018	0.0010
A-12*	0.73×10^{-6}	15.6	16.1	0.46×10^{-7}	0.0024	0.0018	0.0006
A-20		—			0.0024	0.0018	
A-24		—			0.0024	0.0018	
A-25*		16.6			0.0024	0.0017	

* 表示其数据已在图中详细给出。

图 9 湿氢处理 Armco 铁试样在屈服平台上的 $(Q_p^{-1} - Q_s^{-1}) - (\dot{\epsilon}/\sigma_y)$ 关系图 (测量频率 $f = 1.25/\text{秒}$)图 10 未经湿氢处理 Armco 铁试样 B-9 (测量频率 $f = 1.33/\text{秒}$) 和应变退火的湿氢处理 Armco 铁试样 A-21 (测量频率 $f = 1.25/\text{秒}$) 在屈服平台上的 $(Q_p^{-1} - Q_s^{-1}) - (\dot{\epsilon}/\sigma_y)$ 关系图

11.8. 将未经湿氢处理的 Armco 铁的数据(见图 6)及应变退火的湿氢处理 Armco 铁的数据(见图 8)作成的 $(Q_p^{-1} - Q_0^{-1}) - (\dot{\epsilon}_H/\sigma_y)$ 图亦为线性关系(见图 10), 由此求得的位错动力学指数 m_i 分别为 12.6 (未经湿氢处理的 Armco 铁) 和 10.9 (应变退火的湿氢处理 Armco 铁). 上述计算中均取铁的切变模量 G 为 7700 千克/毫米².

图 11 是将图 5 (湿氢处理试样) 及图 7 及另一条 B-10 未经湿氢处理试样中测量频率对 Armco 铁屈服平台上形变过程内耗的影响的数据作成的

$$(Q_p^{-1} - Q_0^{-1}) - (1/\omega)$$

关系图. 该图表明, $(Q_p^{-1} - Q_0^{-1})$ 与 $(1/\omega)$ 亦有很好的直线关系(其中湿氢处理 Armco 铁的数据略有分散), 由此求得的位错动力学指数 m_ω 分别为 9.7 (湿氢处理试样 A-30), 11.1 (未经湿氢处理试样 B-6, B-7) 以及 12.8 (未经湿氢处理试样 B-10). 这些由定速变频法测得的位错动力学指数 m_ω 与由定频变速法测得的位错动力学指数 m_i 大体相符.

此外, 值得提一下的是本实验中, 当拉伸速率 $\dot{\epsilon}$ 低于 25.3×10^{-6} /秒时, 屈服平台后的形变过程内耗出现跳跃现象. 文献 [2] 中指出形变过程内耗跳跃现象与应变时效有关, 文献 [5] 对此现象进行了解释. 文献 [6] 指出纯铁在室温附近在形变速率很低时有应变时效现象. 因此上述的跳跃现象可能是形变过程中动态应变时效引起的.

五、讨 论

1. 与范性形变过程内耗的位错动力学模型的比较

由图 9—图 11 所示的结果来看, 在所用的拉伸速率及测量频率范围内, 对 Armco 铁所测得的结果(包括屈服平台上和屈服平台以后的形变过程内耗值以及形变过程内耗的与振幅无关性)均可用范性形变过程的位错动力学模型作出满意的解释. 表 2 总结了由这几个图所求得的位错动力学指数 m . 由表 2 可见, 由定频变速法和定速变频法测得的 m 值大体上相符. 由于湿氢处理的定速变频实验只作了一条试样(A-30), 由定速变频法测得的 m_ω 值要比定频变速法测得的 m_i 值偏低较多, 未湿氢处理的 Armco 铁试样 B-6, B-7 也有类似的 m_ω 偏低现象. 这种差别的部分原因可能是由于所用的测量程序所引起的¹⁾.

1) 从图 11 的数据来看, 在每一测量频率时, 后期的数据大都有一点上升, 而所用的频率是在测量第一点内耗时同时测定的. 所以, 这种内耗的升高可能是由于在拉伸过程中试样的伸长导致共振频率的稍有降低所致(大约为 0.5—1.0%). 当采用先低频后高频的测量程序时(如 A-30, B-6, B-7), 就会导致低频时内耗值偏低而使所得的 m_ω 值偏低; 而采用先高频后低频的测量程序时(如 B-10), 就会导致低频时的内耗值偏高从而使所得的 m_ω 值偏高.

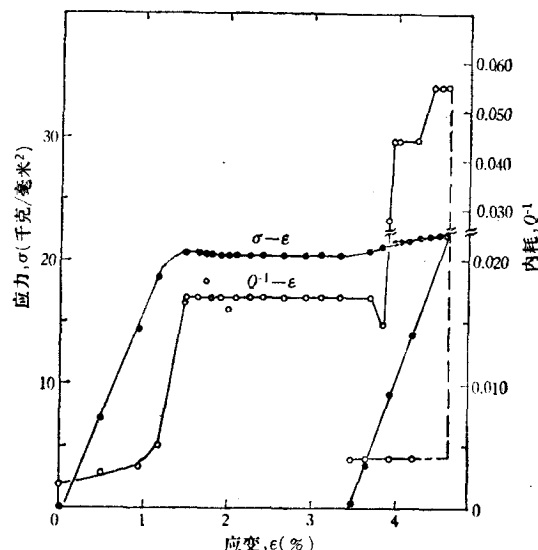


图 11 湿氢处理 Armco 铁试样 A-30 (拉伸速率 $\dot{\epsilon} = 6.35 \times 10^{-6}$ /秒) 和未经湿氢处理 Armco 铁试样 B-6, B-7 (拉伸速率 $\dot{\epsilon} = 2.94 \times 10^{-6}$ /秒), B-10 (拉伸速率 $\dot{\epsilon} = 6.35 \times 10^{-6}$ /秒) 在屈服平台上的 $(Q_p^{-1} - Q_0^{-1}) - (1/\omega)$ 图

表 2 用形变过程内耗法求得的 Armco 铁的位错动力学指数 m 值

试样类型	含碳量 (%)	测量方法	m 值	平均 m 值
湿氢处理	0.005	定频变速	11.8	10.75
		定速变频	9.7	
未湿氢处理	0.0078	定频变速	12.6	12.3
		定速变频	11.1, 12.8	
应变退火	0.005	定频变速	10.9	10.9

部分可能是由于在测量频率为 0.3/秒至 1/秒时, α -Fe 在 29—40°C 有一个 Snoek 峰, 这就会使 Q_0^{-1} 不同, 引起误差。

Stein 用变速拉伸法 (拉伸速率改变 100 倍) 测量了室温时铁单晶的位错动力学指数 $m^{[7]}$, 对含碳量为 0.0044% 的试样测得的 m 值约为 12.8, 这我们的结果相近。但是, 由变速拉伸法从不同拉伸速率时得到的流变应力增量 $\Delta\sigma_f$ 来计算位错动力学指数 $m^{[8]}$, 其误差要大得多; 这一点从表 1 的数据就可以清楚看出: 当拉伸速率 $\dot{\epsilon}$ 由 50×10^{-6} /秒改变到 0.73×10^{-6} /秒 (接近于 Stein 所用的改变一百倍) 时, 应力的变化幅度只有 18%, 而形变过程的内耗值则改变了 25 倍之多。因此, 用定频变速法由内耗数据所得的位错动力学指数要准确得多。

2. 关于形变过程内耗的位错动力学模型的适用范围

从 (1) 式可以明显看出, 动力学模型不能用于十分低频和较大拉伸速率的测量, 因为此时的 Q_p^{-1} 会太大而使该模型失效 (亦即实际上建立不起振动状态而是过阻尼状态)^[9]。由于形变过程内耗的位错动力学模型的物理实质是 Q_p^{-1} 与测量内耗的每一振动周期中单位体积内位错扫过的总面积 ($\dot{\epsilon}_\pi/\omega$) 成正比, 因此该模型的适用范围应该与 ($\dot{\epsilon}_\pi/\omega$) 有关。当 ($\dot{\epsilon}_\pi/\omega$) 太大, 以致振动的每一周期时间内损耗的能量大于某一临界值 (相当于振动的总能量) 时, 就会出现过阻尼现象而使得试样不能建立起振动状态, 此时该模型就会失效。如取该模型的适用上限为 $Q_p^{-1} \sim 0.15$, 则由 (1) 式可算出该模型对铁试样可用范围的上限 ($\dot{\epsilon}_\pi/\omega$) 值约为 5×10^{-3} (计算时取铁的切变模量 G 为 7700 千克/毫米², 流变应力 σ_f 为 18 千克/毫米², m 为 12)。当测量频率 ω 增大时, 可适用的拉伸速率范围移向高拉伸速率; 而当测量频率 ω 减小时, 该模型的适用范围移向低拉伸速率。对于不同的金属, 由于其 (mG/σ_f) 值不同, 即使在相同的测量频率下其适用的 $\dot{\epsilon}_\pi$ 范围也不一样。

从图 9 的数据来看, 当 Armco 铁的测量范围处在 ($\dot{\epsilon}_\pi/\omega$) 值为 1×10^{-7} — 64×10^{-7} 时, ($Q_p^{-1} - Q_0^{-1}$)-($\dot{\epsilon}/\sigma_f$) 图有很好的线性关系, 这与上面的理论分析是相一致的, 而且再增大 ($\dot{\epsilon}_\pi/\omega$) 约一个数量级也可能仍处在该模型的适用范围内。但对高纯铝来说, 由于它的流变应力很低, 该模型适用范围的 ($\dot{\epsilon}_\pi/\omega$) 上限值为 10^{-6} 的数量级, 这一点已得到了实验的证实^[10]。

六、结 论

1. 纯铁在屈服平台上和屈服平台以后的形变过程内耗均可用位错动力学模型作出满

意的解释: 形变过程内耗与振幅无关, 形变过程内耗值的大小在定频变速测量时和 ($\dot{\epsilon}_m/\sigma_y$)、在定速变频测量时与 ($1/\omega$) 均有线性关系。

2. 用定频变速法和定速变频法测得的位错动力学指数基本一致。

3. 对含碳量为 0.005% 的纯铁, 其屈服平台上的位错动力学指数为 11.8, 应变退火后则屈服平台上的 m 值为 10.9; 对含碳量为 0.0078% 的纯铁, 其屈服平台上的 m 值为 12.6。

感谢中国科学院金属研究所葛庭燧教授及本教研室李燮均副教授对本文的关心和讨论, 感谢金属研究所分析室用微量法分析了本文铁试样的含碳量。

附 录

关于取向因子比 $\bar{n}_i^2/\bar{n}_p^2$ 的推导

对于附录图中所示的多晶体圆柱形试样, n 为某晶粒 A 的一个滑移面法向, G 为滑移方向, σ 为拉伸应力方向, $O'G'$ 为滑移方向在横截面上的投影。晶粒 A 处于与 $O'G'$ 成 θ 角的径向 $O'R$ 上。令 σ 与 n 的夹角为 φ , σ 与 G 的夹角为 λ , A 晶粒处扭切应力 τ' 与 G 的夹角为 λ' , 则

$$n_p = \cos \varphi \cos \lambda, \quad n_i = \cos \varphi \cos \lambda',$$

其中

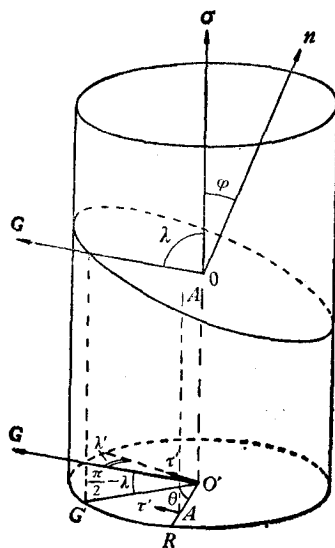
$$\cos \lambda' = \cos \left(-\frac{\pi}{2} - \theta \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \lambda \right) = \sin \theta \sin \lambda.$$

由于晶粒 A 的位置与 λ 无关, 所以

$$\overline{\cos \lambda'} = \overline{\sin \theta} \cdot \overline{\sin \lambda},$$

$$\overline{\sin \theta} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta = \frac{2}{\pi}.$$

对于体心立方金属, 由于其滑移系统多, 所以多晶试样拉伸应力的取向因子与 Sachs 的理论值 2.24 相符¹⁾, 即



附录图

1) D. Dehlinger, A Symposium on the Plastic Deformation of Crystalline Solids, Pittsburgh, 1950, p. 108—109.

$$\bar{n}_p = \overline{\cos \varphi \cos \lambda} = 1/2.24.$$

由于 $\cos \lambda$ 与 $\cos \varphi$ 均属统计分布,故可假定 λ 与 φ 有大体上相同的分布,即

$$\overline{\cos \lambda} \approx \overline{\cos \varphi},$$

故

$$\overline{\cos^2 \varphi} \approx 1/2.24$$

$$\frac{\bar{n}_i^2}{\bar{n}_p^2} = \frac{\left(\frac{2}{\pi} \overline{\cos \varphi \sin \lambda}\right)^2}{(\overline{\cos \varphi \cos \lambda})^2} = \frac{\left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \overline{\cos \varphi^2} (1 - \overline{\cos \lambda^2})}{(1/2.24)^2}$$

$$= \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 (2.24 - 1) \approx 0.5.$$

对于面心立方金属,由于 $\bar{n}_p = 1/3.1^{12)}$, 在上述条件下可以得出

$$\frac{\bar{n}_i^2}{\bar{n}_p^2} = \frac{4}{\pi^2} (3.1 - 1) \approx 0.85.$$

参 考 文 献

- [1] 葛庭燧、容保粹、张肇源,科学记录,新辑 1(1957),213.
- [2] 葛庭燧、张肇源,物理学报,21(1965),154.
- [3] R. E. Maringer, *J. Appl. Phys.*, 24(1953), 1525.
- [4] A. Hikata et al., *J. Appl. Phys.*, 27(1956), 236.
- [5] 葛庭燧、张进修,物理学报,24(1975),87.
- [6] R. E. Smallman, *Modern Physical Metallurgy*, (Butterworths, 1962) p. 242—243.
- [7] D. F. Stein, *Acta Met.*, 14(1966), 99.
- [8] G. T. Hahn, *Acta Met.*, 10(1962), 727.
- [9] Л. Л. 朗道, E. M. 栗弗席兹,力学,高等教育出版社,97 页(1959).
- [10] 张进修,高纯铝在范性形变过程中的位错内耗(待发表).

LOW FREQUENCY INTERNAL FRICTION OF IRON IN THE PROCESS OF PLASTIC DEFORMATION

ZHANG JIN-XIU OU GUANG-LIAN HU YIN-XUN

(Department of Physics, Zhongshan University)

ABSTRACT

The internal friction of Armco-iron in the process of plastic deformation was measured by a middle torsion pendulum on a modified tensile testing machine. The effects of strain rate (in the range of $0.73 \times 10^{-6}/\text{sec}$ to $50 \times 10^{-6}/\text{sec}$), frequency (0.30/sec to 3.6/sec), annealing and carbon content on the internal friction were studied. The results showed that on the yielding plateau, the internal friction did not change with the strain, but increased linearly with the increase of strain rate and varied inversely with frequency. In comparing the data with the theoretical expression derived from the dislocation dynamic model of internal friction in the process of plastic deformation, it is shown that the dynamic model is in good agreement with the experimental results. The dislocation dynamic exponent m of Armco-Fe derived from this model is 10.8—12.3, which is reasonable.

The range within which the dislocation dynamic model holds is also discussed.

1) A. H. Cottrell, 晶体中的位错和范性流变, 科学出版社, 126—131 页 (1960).