

# 镍碳固溶体在范性形变过程中的位错内耗\* 1)

葛庭燧 張肇源

(中国科学院)

## 提 要

在小型拉力试验机上测量了含有不同碳量的镍在范性形变过程中的低频内耗,观察到当含碳量在某一适当范围以内时,内耗-应变曲线上出现了一系列的峰值。研究了不同热处理条件、预先冷加工以及测量温度对于这种内耗现象的影响。初步认为这一系列峰值是由于位错气团在形变过程中的更迭形成和解脱所引起的。

## 一、引 言

测量金属在范性形变过程中的内耗可以了解位错的运动、塞积和增殖,在合金的情形下还可以研究溶质原子与位错的交互作用。已有人对于金属在范性形变过程中的超声衰减进行过若干研究<sup>[1,2]</sup>,关于低频扭摆方面,也得到了一些初步的结果<sup>[3,4]</sup>。在体心立方点阵的铁碳固溶体的工作中,曾经观察到,在有明显屈服点出现的情况下,范性形变内耗呈现极敏锐的变化,在屈服阶段有极大值出现,这种内耗变化很可能和溶质原子与位错的交互作用有关。本文报导了在面心立方点阵的镍碳固溶体中所观察到的范性形变内耗的变化情况,并试图用位错气团的模型对于所观察到的结果进行分析。

## 二、实验的装置和试样

拉伸实验是在苏联制的 PMM-250 A 小型拉力试验机上进行的,在拉伸过程中测量内耗的扭摆装置是自己设计的<sup>[4]</sup>。振动频率约为 2 周/秒,应变速率约为 0.0014/分。试样的长度约为 25 厘米。

把 99.8% 的电解镍板经过熔炼、热锻和冷挤,最后制成直径 1.0—1.5 毫米的丝状试样。化学分析结果指出,冷挤后的试样中含有微量的 Co, Mn, P, Mg 和 Zn。

把上述试样在 1300°C 的湿氢炉中处理 5 小时,以去除试样中所含的碳和某些杂质,再把试样分别放在 1300°C 的炉中,通入含有苯蒸汽的氢气,经过不同的时间,然后淬入水中,以得到一系列含有不同碳量的试样。最后的含碳量是用燃烧分析法测定的。

为了使丝状试样不易在拉伸过程中松脱,用银铈片(银铜合金作铈剂)在煤气灯上在试样的两端分别铈一个小圆球。进行比较试验的结果指出,这种操作虽然对于试样的

\* 1963 年 8 月 27 日收到。

1) 这项工作的实验部分是在 1958 年完成的。

两端起了局部退火作用,但是却并不影响应力-应变曲线的数值。

### 三、实验的结果和分析

用不含碳的纯镍(在 720°C 真空处理 2 小时缓冷)在室温进行试验时,所得的应力-应变曲线( $\sigma-\epsilon$ )和内耗-应变曲线( $Q^{-1}-\epsilon$ )如图 1 所示。内耗的变化与以前对于 Fe, Cu, Al 等试样所观察到的相似<sup>[4]</sup>,即当应变很低时,内耗保持不变,随后缓缓增高,而当试样发生屈服后,内耗急剧升高达到最高值 0.06,在继续发生范性形变的过程中保持不变,但是一旦应变保持不变(即停止加载)或撤载时,便急剧降低到约 0.002。

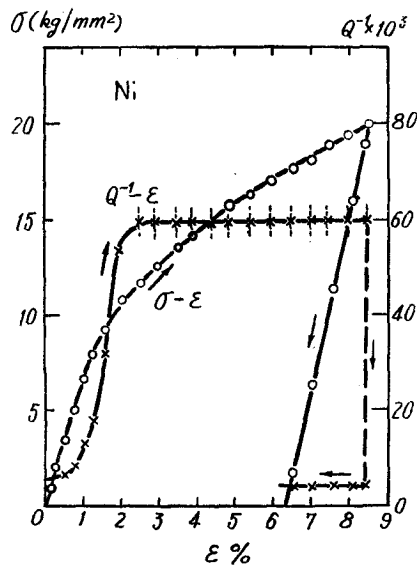


图 1 不含碳的退火纯镍在室温的应力-应变曲线和内耗-应变曲线。应变速率 = 0.0014/分, 振动频率 = 2 周/秒

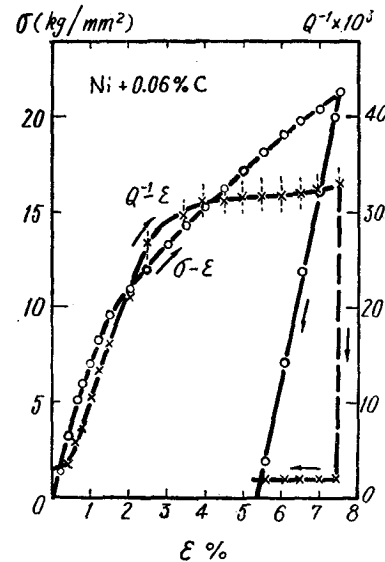


图 2 含碳 0.06% 的退火镍试样在室温的应力-应变曲线和内耗-应变曲线

#### 1. 不同含碳量的影响

下面用含碳量不同的试样进行试验。试样加碳后,在 720°C 真空处理 2 小时,缓冷。

当含碳量为 0.06% 时,所测得的应力-应变曲线和内耗-应变曲线如图 2 所示。由图可见,试样含碳后的加工硬化率有所提高,而范性形变内耗则大大降低,所达到的最高值只有 0.03,不过内耗-应变曲线的一般概貌与不含碳时相同。

当含碳量增加到 0.24% 时,由应力-应变曲线所表现出来的加工硬化率进一步提高,而内耗-应变曲线则呈现极其不同的变化,如图 3(a) 所示。在应变起始增加时,内耗不是保持不变,而是略有降低,当试样发生屈服后,内耗急剧升高达到最高值后骤然下降,类似于出现明显屈服点的 Fe-C 试样所表现的情况<sup>[4]</sup>,不过在应力-应变曲线上却没有表现出明显的不连续变化情况。

值得注意的是,由图 3(a) 的内耗-应变曲线可以看出,内耗在呈现一个峰值而下降后,在继续发生范性形变的过程中又开始增加,达到另一个最大值后又开始下降形成另一

个峰, 这种变化重复下去, 在內耗-应变曲线上形成一系列的峰值. 內耗波动的周期相当于 0.007 到 0.010 的应变范围. 应该指出, 在起始试验时內耗渐渐降低的应变范围也约为 0.010.

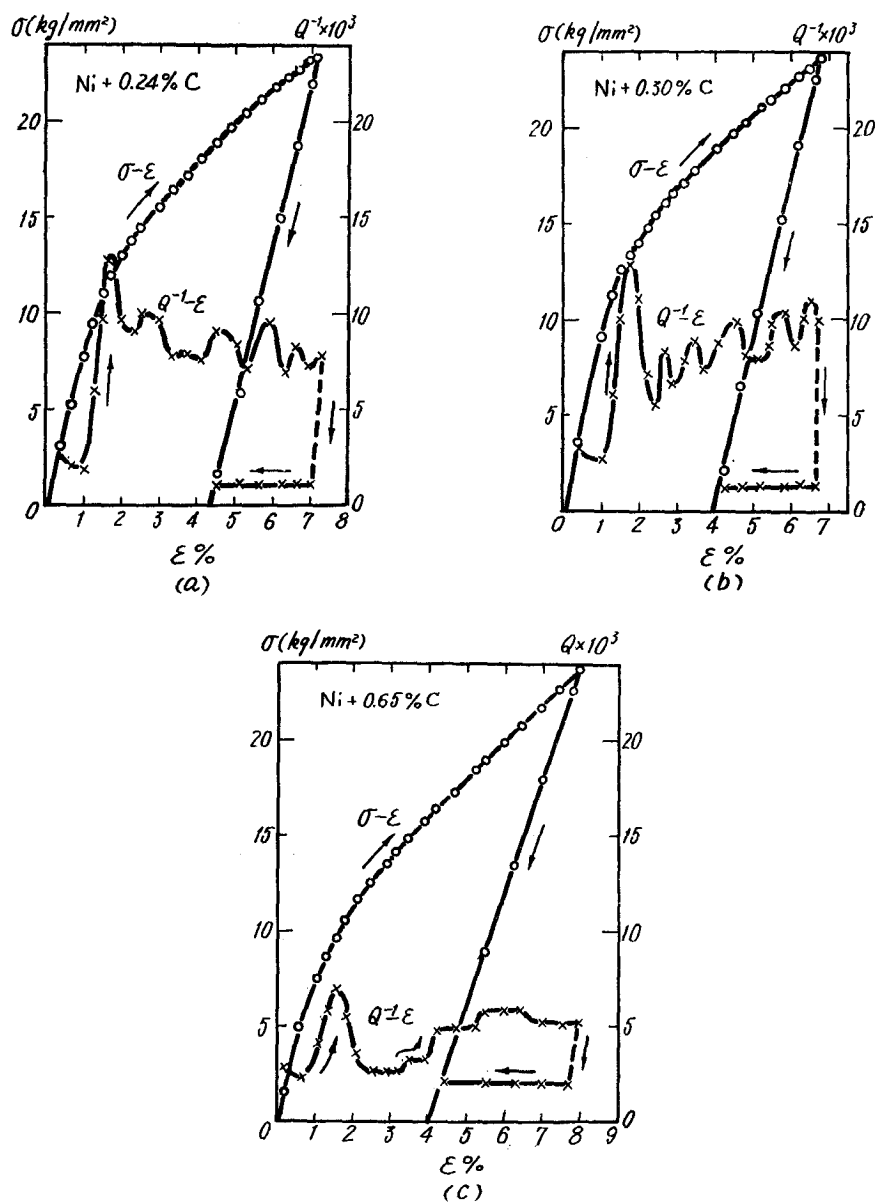


图 3 不同含碳量的退火镍试样在室温的应力-应变曲线和內耗-应变曲线. 含碳量:  
(a) 0.24%; (b) 0.30%; (c) 0.65%

当含碳量增加到 0.30% 时, 应力-应变曲线并没有显著的变化, 而內耗-应变曲线上的一系列峰值则更为明显, 如图 3(b) 所示.

图 3(c) 所示的是试样中的含碳量为 0.65% 的情形. 试样在加碳淬火后, 再在 550°C

真空处理 1.5 小时后缓冷。这时，应力-应变曲线大为降低，在内耗-应变曲线上出现第一个峰值以后不再出现另外的峰值，随后内耗的变化不大，平均数值约为 0.005。根据金相观测的结果，含碳 0.65% 的试样在 550°C 退火后有大量的石墨析出<sup>[5]</sup>。

## 2. 不同热处理条件的影响

从上述的实验结果可以看出，内耗-应变曲线上所出现的一系列峰值是由于镍中含有适量的碳的结果。不含碳或含碳量过低或过高时并不出现这种现象。为了判明引起这种现象的碳在镍中的存在状态，下面进行了不同热处理条件的试验。

把两根试样放在炉中同时加碳后淬火，根据分析的结果，含碳量都是 0.40%。把一根试样在 550°C 真空处理 1.5 小时后缓冷，在室温进行拉伸测量，所得的结果如图 4(a)，在内耗-应变曲线上有锯齿状的变化出现，但是在第一个峰值以后，变化并不明显。图 4(b)

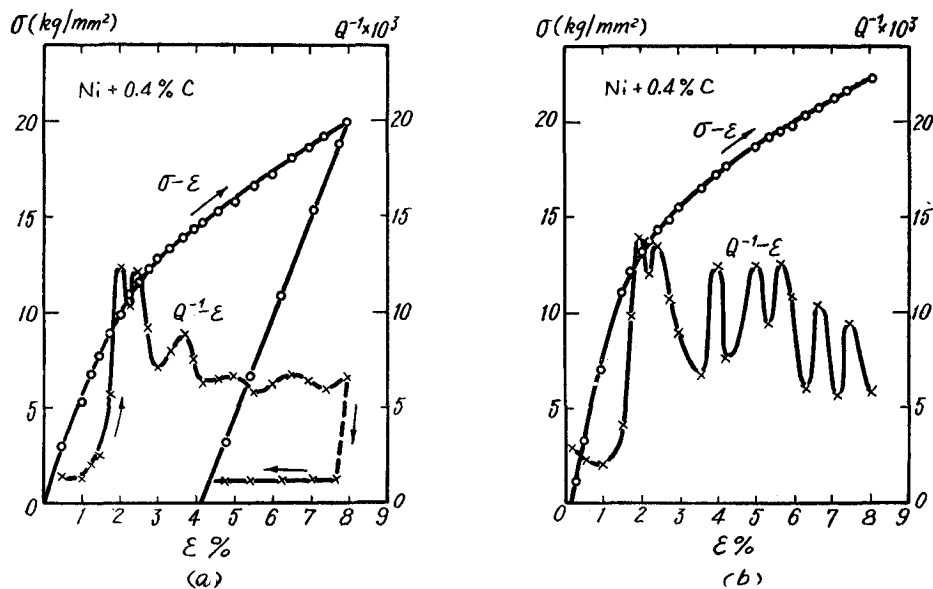


图 4 含碳 0.40% 的镍经过不同的热处理后在室温的应力-应变曲线和内耗-应变曲线。(a) 1200°C 加碳淬火后在 550°C 真空处理 1.5 小时缓冷；(b) 1200°C 加碳淬火后立即在室温测量

所示的是加碳淬火后立即在室温进行测量所得的结果，这时的内耗-应变曲线上的一系列峰值十分明显，峰巅与峰谷的差值也较大。可以认为，在淬火的试样中，碳是处于过饱和的固溶状态，而在退火的试样中，有一部分碳已成为石墨而析出来。因此，处于固溶状态的碳可能是引起一系列内耗峰值的主要因素。

## 3. 预先冷加工的影响

为了进一步研究碳在试样中的存在状态对于范性形变内耗的影响，我们把加碳淬火后得到含碳量 0.65% 的试样进行了预先冷加工，达到 2% 伸长。这样可以使处于过饱和状态的碳加速沉淀，其作用正如同退火一样。用这个试样在室温进行试验，所得的结果如图 5(a) 所示。这时在各个应变下的内耗值都很低，类似于图 3(c) 在应变大于 2% 以后的情况。

把上述试样拉伸达到 8% 的应变以后撤去载荷，然后重新进行拉伸试验，所得的结果

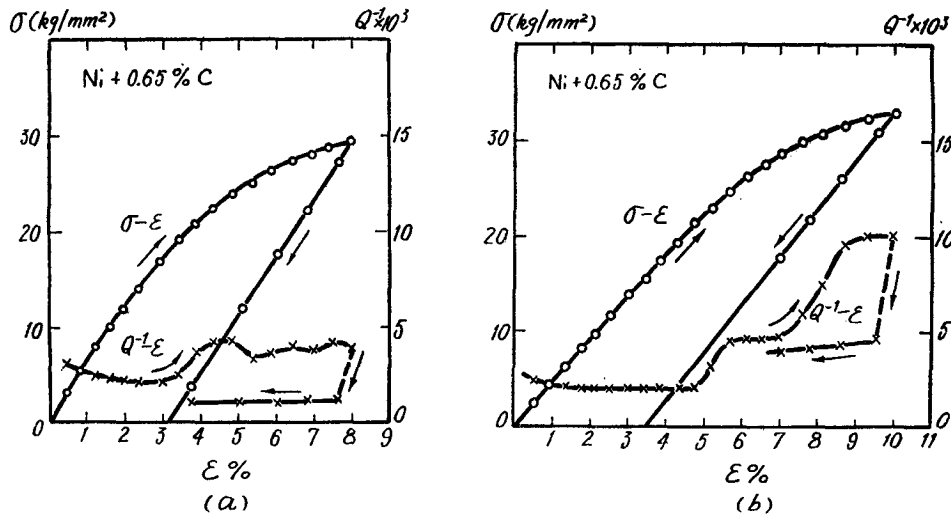


图5 预先冷加工对于含碳0.65%的淬火镍试样的室温应力-应变曲线和内耗-应变曲线的影响。  
(a)预先冷加工:2%;(b)前述试样经过拉伸达到了8%的应变以后重新测量

如图5(b)所示,这时的内耗值变得更低,在应变低于5%时只有0.0020。当应变再增加超过5%时,内耗突然增加,这可能是由于所析出的石墨发生了碎裂。当应变大于7%时,又出现了内耗再一次地显著增加。

上面的实验清楚地指出了内耗的周期性跳动不是由于沉淀状态的碳所引起的。

#### 4. 测量温度的影响

上述的各次测量都是在室温进行的。对于实验结果所进行的分析指出,在范性形变过程中所观察到的内耗的周期性变化是由于固溶状态的碳所引起的。如果内耗的这种变化与位错气团的作用相联系,则由于在较高温度下并不形成位错气团,所以在较高温度下也不应该出现内耗的这种变化。把含碳0.40%的试样,在加碳淬火后立即在165°C进行拉伸测量,所得到的结果如图6所示。这时的应力-应变曲线和内耗-应变曲线都与图2所示的含碳0.06%的试样相似,内耗所达到的最高值也是约为0.003,

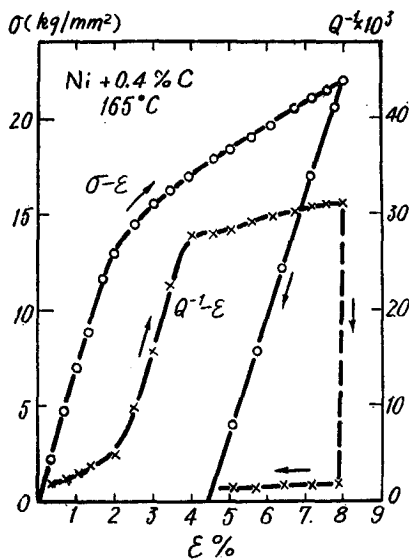


图6 含碳0.4%的淬火镍试样在165°C的应力-应变曲线和内耗-应变曲线

并不出现周期性的峰值变化。这个结果有力地说明了所观察到的内耗周期性变化与位错气团的作用有关系。

## 四、讨 论

### 1. 在范性形变过程中发生应变时效的问题

如果认为所观察到的内耗周期性变化是与位错气团的作用有关系的,则首先必须说

明一旦位错脱开气团以后，是否能够在范性形变过程中重新形成气团的问题。根据宏观扩散测量数据外推到室温，则镍中的碳原子在室温扩散得太慢，从而不能在室温引起显著的应变时效。在替代式固溶体例如含铜的铝合金的情形，科垂耳认为，在范性形变过程中的空位可以使合金元素在室温的扩散率加速  $10^7$  倍之多，因而能够在室温形成气团<sup>[6]</sup>，但是对于间隙式原子的扩散实际上却没有影响。

过去关于镍中含碳所引起的内耗峰的研究指出，内耗峰的高度与镍中含碳量的平方成正比，这说明在应力感生扩散过程中直接参加元跳动的是两个碳原子<sup>[7]</sup>。对于碳在含少量锰（1.7%）的  $\gamma$ -Fe 中所引起的内耗峰的研究，也指出内耗峰高度与含碳量的平方成正比<sup>[8]</sup>。因此，在有些情况下，面心立方金属中的碳可能是以原子对的形式而存在的。这样的一对碳原子很可能占据着一个点阵空位的位置，从而一对碳原子便成为一个替代式原子。因而范性形变过程中所产生的空位便能够促进这种碳原子对的扩散，正如同能够促进替代式原子的扩散一样。这种看法还可以说明为什么出现内耗的周期性变化所需要的含碳量较高（0.24% 以上）。从位错晶体学的角度来看，由于面心立方点阵的镍中的刃型位错具有两个额外原子面，所以在额外原子面的正下方所形成的空隙较大，需要一对碳原子才能形成有效的钉扎。

## 2. 引起内耗周期性变化的基本过程

如果承认 Ni-C 系在范性形变过程中能够形成气团，则对于引起内耗的周期性变化的基本过程可以说明如下。过去关于 Fe-C 系的工作曾经指出<sup>[4]</sup>，当应力-应变曲线上有明显屈服点出现时，在内耗-应变曲线的相对应部分上有峰值出现，但只是出现一次。可以认为，峰巅相当于位错脱开了气团的情况。这时的内耗值很高，与纯金属在范性形变过程中具有高值内耗一样。这种内耗可能与位错在拉伸外力作用下的运动速度具有正变的关系。在继续进行范性形变时，气团又渐渐形成，使位错运动的速度减慢，从而使内耗降低，最低内耗值相当于位错被气团钉扎得最牢固的情况，这使位错的速度大大减慢。这种情况在效果上类似于停止加载，实验指出，一旦停止加载或卸载，则内耗立即降低至极低的背景值。但是由于拉伸应变速率在拉伸试验当中是保持恒定的，所以外加的拉伸应力马上又迫使速度被减慢的位错跟上来，从而有一种力使位错从它的气团解脱出来，使位错的速度增大，所以内耗又急剧升高，又达到峰的巅值。如此重复下去，便出现所观察到的周期性变化情况。

校后注：最近我们在小型拉力试验机上测量了 Al-0.5% Cu 和 Al-1.1% Mg 合金试样的低频内耗，也观测到在内耗-应变曲线上出现一系列的跳跃，这说明，在替代式固溶体中也能发生类似于本文中所叙述的现象。

## 参 考 文 献

- [1] Alers, G. A., *Phys. Rev.*, **97** (1955), 863.
- [2] Hikata, A., Truell, R., Granato, A., Chick, B., and Lücke, K., *J. Appl. Phys.*, **27** (1956), 396.
- [3] Maringer, R. B., *J. Appl. Phys.*, **24** (1953), 1525.
- [4] 葛庭燧、容保粹、张肇源, 科学记录, 新辑 **1** (1957), 213.
- [5] 葛庭燧、钱知强、卡列尔·密歇克, 物理学报, **11** (1955), 403.
- [6] Cottrell, A. H., *Phil. Mag.*, **44** (1953), 829.
- [7] 钱知强, 金属学报, **4** (1959), 69.
- [8] 葛庭燧、杨本燧, 物理学报, **13** (1957), 409.

## DISLOCATION DAMPING IN NICKEL-CARBON SOLID SOLUTION IN THE PROCESS OF PLASTIC DEFORMATION

T. S. KÊ    C. Y. CHANG

*(Academia Sinica)*

### ABSTRACT

Low frequency damping in the process of plastic deformation of nickel containing various amount of carbon was measured on a small tensile testing machine. A series of internal friction peaks was observed on the internal friction-strain curve when the specimen contained a suitable amount of carbon. A study was made on the effect of heat treatment, previous cold-working, and temperature of measurement on this internal friction. It is suggested that the series of internal friction peaks is associated with the alternate anchoring of dislocations by atmospheres of solute atoms and their subsequent escaping in the course of plastic deformation.