

冷轧 TiNi 合金的阻尼行为研究

高智勇¹, 李 民², 鲁玺丽¹, 蔡 伟¹

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 驻沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043)

摘 要: 研究了冷轧变形对 TiNi 合金阻尼行为的影响, 探讨了冷轧变形影响阻尼特性的微观机制。结果表明, 当应变振幅较低时, 形变马氏体的阻尼值随频率的增加先急剧下降至一定值后趋于稳定; 当应变振幅较高时, 频率对阻尼值的影响较小; 当振动频率一定时, 形变马氏体的阻尼值随应变振幅的增加而下降至一定值, 随振幅的继续增大其阻尼值趋于稳定。形变马氏体的高阻尼特性主要归因于外力作用下马氏体孪晶界面及位错的往复运动。

关键词: TiNi 合金; 冷轧; 阻尼行为; 马氏体

中图分类号: TG 174.4; TB381

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)05-0799-04

随着工业化和社会的发展, 振动和噪声的危害越来越引起了人们的重视, 材料的阻尼行为已经成为评价材料性能的一项重要指标。TiNi 合金除了具有良好的形状记忆效应、超弹性外, 还由于其可逆相变而具有较高的阻尼性能^[1~4]。将形状记忆合金应用到结构中, 能够获得较好的振动和噪声控制, 延长结构件的使用寿命。同时, 用形状记忆合金做成的阻尼装置维修容易且比常用的人工动态系统装置简单, 不会象其它阻尼合金那样在几次循环之后就被加工硬化, 也不会随环境条件的变化而变化。因此, 形状记忆合金阻尼行为有着非常好的应用前景, 引起世界各国学者和工程技术人员的极大兴趣^[5~7]。

迄今为止, 对于 TiNi 合金阻尼行为的研究主要集中在发生马氏体相变时的阻尼行为^[3~8], 然而从应用的角度考虑, TiNi 合金马氏体本身的阻尼行为也非常重要, 目前, 在这方面尚缺乏深入系统的研究, 对于马氏体高阻尼行为的微观机制还存在争议。本工作通过研究不同冷轧变形后 TiNi 合金马氏体的阻尼行为, 探讨冷轧变形对 TiNi 合金马氏体阻尼行为的影响规律及微观机制, 为 TiNi 合金在减振方面的应用奠定基础。

1 实 验

实验合金以纯度为 99.95% 的海绵钛和 99.97% 的电解镍为原料, 采用水冷铜坩埚自耗真空感应炉熔炼, 直接浇入金属铸模, 铸锭的名义化学成分为 Ti₅₀Ni₅₀(at%)。铸锭经 850 °C, 2 h 扩散退火后在 850 °C

热轧成 2 mm 厚的板材, 再冷轧至 1 mm, 控制最后冷轧变形量分别为 8%、15%、21%。用线切割的方法分别沿轧制方向切成尺寸为 48 mm×6 mm×1 mm 的试样。

合金的相变温度在 TA2920 差示扫描量热计上测定, 试样质量约 20 mg, 加热/冷却速度为 10 °C/min, 表 1 列出了实验合金在不同冷轧变形后的相变温度。

表 1 Ti₅₀Ni₅₀ 不同冷轧变形后的相变温度

Table 1 Transformation temperatures of cold-rolled Ti₅₀Ni₅₀ alloys(°C)

Transformation temperatures	Unrolled	Performation degree		
		8%	15%	21%
M_s	68	62	53	50
M_f	21	16	11	2
A_s	47	49	54	58
A_f	79	93	96	99

实验合金的阻尼行为在 DMTA IV 型动态机械分析仪上测量。测定阻尼值与频率的关系时, 试验所选的频率范围为 0.1~10 Hz, 应变振幅为 10^{-5} 、 3×10^{-5} 和 10^{-4} ; 研究应变振幅对阻尼特性影响规律时, 振幅范围为 $5 \times (10^{-6} \sim 10^{-4})$, 振动频率为 0.1 Hz。

2 结果与分析

2.1 频率对 TiNi 合金阻尼行为的影响

图 1 示出固溶处理后 Ti₅₀Ni₅₀ 合金 $\tan\delta$ 随频率的变化关系曲线, 试验温度为 20 °C。由 DSC 试验结果

可知，此温度下试样完全为马氏体。可见，在同一应变振幅下，当频率从 0.1 Hz 增加到 10 Hz 时， $\tan\delta$ 随频率的增加呈下降趋势，在不同振幅下 $\tan\delta$ 随频率的变化趋势基本相同。对应于不同振幅，当频率从 0.1 Hz 增加到 10 Hz 时， $\tan\delta$ 下降的幅度不同，在振幅为 10^{-5} 时阻尼值下降的幅度最大。

图 2 为试验合金经 8% 冷轧变形后 $\tan\delta$ 随频率的变化关系曲线。可以看出，应变振幅对合金的阻尼行为有显著影响。当应变振幅较高时，振动频率对 $\tan\delta$ 几乎没有影响；当应变振幅为 3×10^{-5} 时， $\tan\delta$ 随振动频率的增加先急剧下降，随着振动频率继续增加 $\tan\delta$ 趋于稳定；当应变振幅为 10^{-5} 时，阻尼值 $\tan\delta$ 随频率的变化规律与应变振幅为 3×10^{-5} 时的相似。

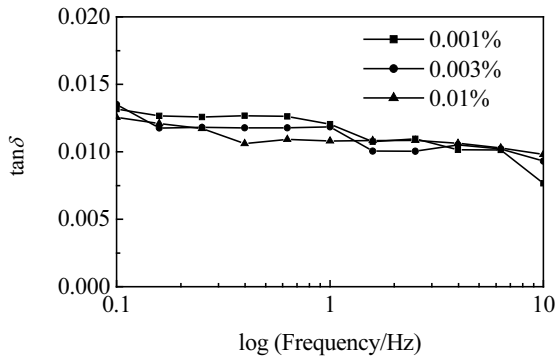


图 1 固溶 $Ti_{50}Ni_{50}$ 合金不同振幅下 $\tan\delta$ 随频率的变化关系
Fig.1 $\tan\delta$ vs frequency of soluted $Ti_{50}Ni_{50}$ alloy under various strain amplitude

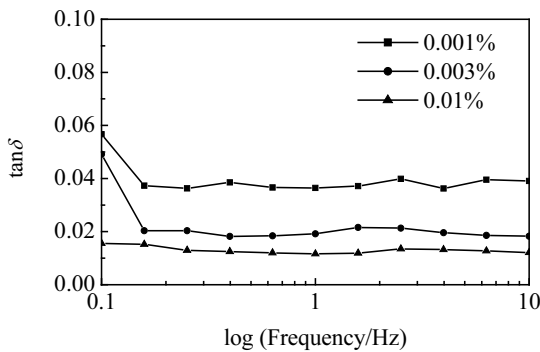


图 2 冷轧 8% $Ti_{50}Ni_{50}$ 合金不同振幅下 $\tan\delta$ 随频率的变化关系
Fig.2 $\tan\delta$ vs frequency of $Ti_{50}Ni_{50}$ alloy with 8% cold rolling deformation degree at various strain amplitudes

图 3 为冷轧变形 15% $Ti_{50}Ni_{50}$ 合金 $\tan\delta$ 随频率的变化关系曲线。可见，在不同的应变振幅下， $\tan\delta$ 随频率增加呈现不同的变化趋势。当应变振幅为 0.01%

时，频率对 $\tan\delta$ 的影响较小，在所测的频率范围内， $\tan\delta$ 随频率的增加略有下降。在应变振幅为 0.003% 和 0.001% 时，频率对阻尼值的影响较为明显， $\tan\delta$ 随着频率的增加先急剧下降，而后随着频率的增加阻尼值逐渐趋于平稳。与冷轧变形量 8% 的试样相比，在不同应变振幅下，频率对阻尼值的影响规律相似，表明冷轧变形后 $TiNi$ 合金马氏体的阻尼行为来自于同一机制。

图 4 为冷轧变形 21% 的 $Ti_{50}Ni_{50}$ 合金 $\tan\delta$ 随频率的变化曲线。可见，在不同的应变振幅下， $\tan\delta$ 随频率的变化规律基本相似。即在所测的频率范围内，随着频率的增加， $\tan\delta$ 整体呈现下降趋势。与前 2 个冷变形量相比，对应于不同的应变振幅下，频率对阻尼值的影响相类似。

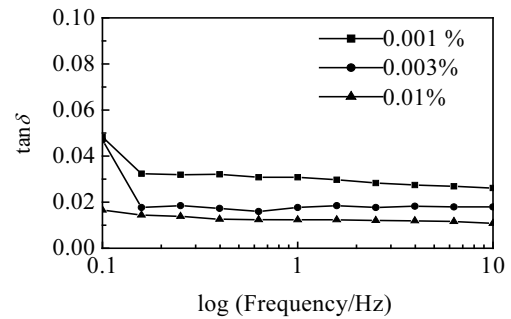


图 3 冷轧 15% $Ti_{50}Ni_{50}$ 合金不同振幅下 $\tan\delta$ 随频率的变化关系
Fig.3 $\tan\delta$ vs frequency of $Ti_{50}Ni_{50}$ alloy with 15% cold rolling deformation degree at various strain amplitudes

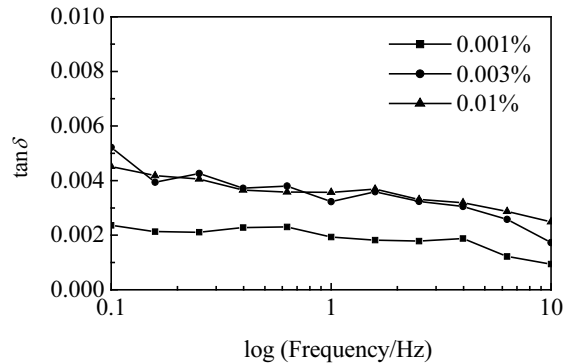


图 4 冷轧 21% $Ti_{50}Ni_{50}$ 合金不同振幅下 $\tan\delta$ 随频率的变化关系
Fig.4 $\tan\delta$ vs. frequency of $Ti_{50}Ni_{50}$ alloy with 21% cold rolling deformation degree at various strain amplitudes

2.2 应变振幅对 $TiNi$ 合金阻尼行为的影响

图 5 为固溶处理 $Ti_{50}Ni_{50}$ 合金试样阻尼值 $\tan\delta$ 随应变振幅的变化关系曲线。可见，当应变振幅在 0.0005%~0.001% 范围内，阻尼值 $\tan\delta$ 随着应变振幅的增加而升高，当应变振幅在 0.001%~0.01% 范围内时，

随着应变振幅的增加，阻尼值 $\tan\delta$ 呈现出先减后增的趋势，这表明在此应变振幅范围内存在一个临界应变振幅值，即马氏体内界面开始运动所需的临界值，从图中可以确定出这一临界应变振幅值约为 0.0025%。

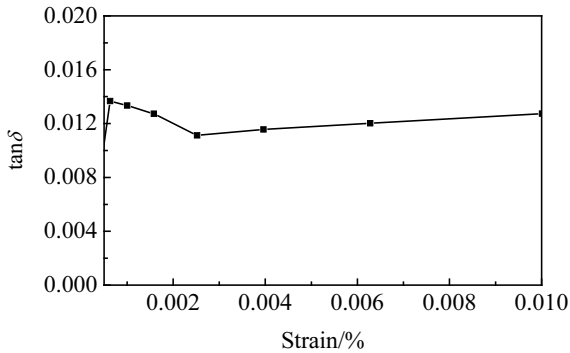


图 5 固溶 Ti₅₀Ni₅₀ 合金 $\tan\delta$ 随应变振幅的变化曲线($f=0.1$ Hz)
Fig.5 $\tan\delta$ vs strain amplitude of solution-treated Ti₅₀Ni₅₀ alloy

图 6 示出冷轧变形量为 8%的 Ti₅₀Ni₅₀ 合金平行冷变形方向的阻尼值 $\tan\delta$ 随应变振幅的变化关系曲线。可见，随应变振幅的增加，阻尼值 $\tan\delta$ 急剧下降，当应变振幅超过 0.002%时， $\tan\delta$ 随着应变振幅的增加下降趋势变缓。

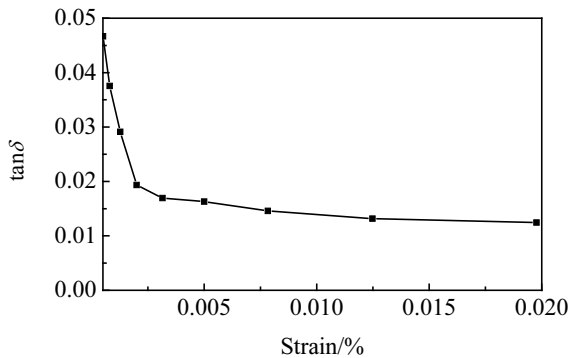


图 6 冷轧 8%Ti₅₀Ni₅₀ 合金 $\tan\delta$ 随应变振幅的变化曲线 ($f=0.1$ Hz)
Fig.6 $\tan\delta$ vs. strain amplitude of Ti₅₀Ni₅₀ alloy with 8% cold rolling deformation degree

图 7 示出冷轧变形量 15%的 Ti₅₀Ni₅₀ 合金阻尼值 $\tan\delta$ 随应变振幅的变化关系。可见，随着应变振幅的增加，阻尼值 $\tan\delta$ 急剧下降，当振幅超过一定值，即约 0.005%时， $\tan\delta$ 随着振幅的增加趋于稳定。

图 8 为冷轧变形量 21%的 Ti₅₀Ni₅₀ 合金阻尼值 $\tan\delta$ 随应变振幅的变化关系。从图中可以看出，阻尼值随着应变振幅的增加先升高，当应变振幅超过 0.0025%时，随应变振幅的继续增加阻尼值趋于稳定。

大量研究表明，固溶处理后的 Ti₅₀Ni₅₀ 合金室温为 B_{19'} 马氏体，马氏体变体呈自协作状态，变体间界面平直清晰。随着冷轧变形量的增加，马氏体变体粗化，相应的马氏体变体界面数量减少。随着变形量的继续增加，马氏体变体发生交叉，马氏体内部孪晶界面遭到破坏，界面发生扭曲，在界面处出现台阶和畸变层。因此冷变形量的增加使得界面的可动性明显下降。而界面数量的减少及界面可动性的下降，将引起阻尼值的下降，而根据冷轧变形量对马氏体阻尼行为的影响可知，对试样施加适当的变形有利于提高合金的阻尼行为。由此可见，单纯的界面运动机制不能很好地解释冷轧变形后的 TiNi 合金马氏体阻尼行为。

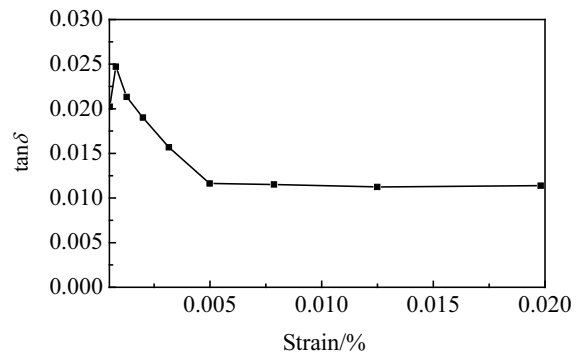


图 7 冷轧 15%Ti₅₀Ni₅₀ 合金 $\tan\delta$ 随应变振幅的变化曲线 ($f=0.1$ Hz)
Fig.7 $\tan\delta$ vs. strain amplitude of Ti₅₀Ni₅₀ alloy with 15% cold rolling deformation degree

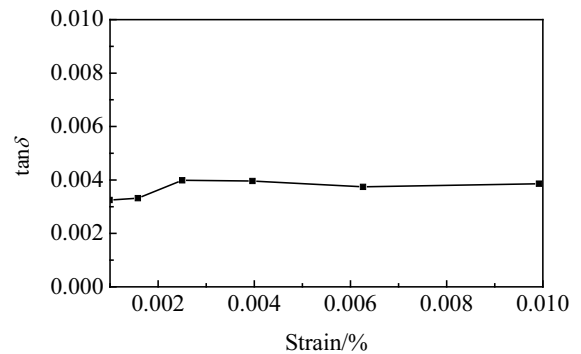


图 8 冷轧 21%Ti₅₀Ni₅₀ 合金 $\tan\delta$ 随应变振幅的变化曲线 ($f=0.1$ Hz)
Fig.8 $\tan\delta$ vs. strain amplitude of Ti₅₀Ni₅₀ alloy with 21% cold rolling deformation degree

一般来说，经过冷轧变形后的金属，会引入一定的晶格缺陷(位错、点缺陷)和内应力。在少量塑性变

形时,随着变形量的增大,位错的密度增加,由位错往复运动所消耗的能量增大,导致所产生的阻尼明显提高,这正由低频段冷轧变形量为 8%和 15%马氏体的阻尼值明显高于热马氏体的阻尼值,且对频率尤为敏感的试验结果所证实。当冷轧变形量超过一定值后,随着冷轧变形量进一步增大,位错密度进一步加大,由于位错之间的交互作用而使位错发生聚集,形成位错缠结,导致可动界面和位错的数量降低,阻尼减小,因而随着冷轧变形量的增加,存在一个冷变形量对应于阻尼的最大值。

由上述分析可知, TiNi 合金马氏体的阻尼行为主要取决于外应力作用界面运动与位错运动的复合作用,阻尼值的高低不仅取决于界面的多少和位错密度的大小,而且与界面及位错的可动性也有紧密联系。

3 结 论

1) 随冷轧变形量的增加,马氏体的阻尼值先增大而后减小。

2) 当应变振幅较低时,形变马氏体的阻尼值随频率的增加先急剧下降至一定值后趋于稳定;当应变振

幅较高时,频率对阻尼值的影响较小。

3) 随振幅的增加形变马氏体的阻尼值先下降到一定值后,随振幅的继续增大趋于稳定。

4) 形变马氏体的高阻尼特性主要归因于外力作用下马氏体孪晶界面及位错的往复运动。

参考文献 References

- [1] Otsuka K, Ren X. *MaterSci and Eng A*[J], 1999, (273~275): 89
- [2] Miyazaki S, Otsuka K. *ISIJ International*[J], 1989, 5: 353
- [3] Yoshida I, Ono T, Asai M. *J Alloy Compd*[J], 2000, 310: 339
- [4] Graesser E J. *Mater Metall Trans A*[J], 1995, 26A: 2791
- [5] Lin H C, Wu S K, Yeh M T. *Mater Metall Trans*[J], 1993, 24A: 2189
- [6] Liu Y, Van Humbeeck J, Stalmans R *et al.* *J Alloy Compd*[J], 1997, 247: 115
- [7] Humbeeck Van J, Stoibeer J, Delaey L *et al.* *Z Metallkd*[J], 1995, 86: 176
- [8] Dolce M, Cardone D. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2001, 43: 2631

Damping Behavior of a Cold-Rolled TiNi Alloy

Gao Zhiyong¹, Li Min², Lu Xili¹, Cai Wei¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. Military Representative Office of Liming Aero-engine Cooperation, Shenyang 110043, China)

Abstract: The effects of cold rolling deformation on the damping behavior of Ti₅₀Ni₅₀ alloy were investigated systematically, and the micro-mechanism was discussed. The experiment results show that the damping capacity of deformed Martensite first decreases sharply and then keep constant with the increase of frequency at the low strain amplitude; while it is almost not affected by frequency when strain amplitude is at high level. The damping capacity of deformed martensite decreases with the increase of strain amplitude, and then almost keeps unchanged. When frequency is constant. The high damping property of deformed martensite is attributed to the movements of twin interfaces and dislocations

Key words: TiNi alloy; cold rolling; damping behavior; martensite

Biography: Gao Zhiyong, Ph. D., Materials Physics and Chemistry Department, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86418745, E-mail: sma@hit.edu.cn