

预应变对铝基体中复合的 TiNi 合金丝马氏体逆相变的影响

Effect of Prestrain on the Reverse Martensitic Transformation of TiNi Fibers Embedded in Al Matrix

高万夫

(中国石油大学 材料科学与工程系, 北京 102249)

GAO Wan-fu (Department of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

摘要: 采用示差扫描热分析(DSC)、X 射线衍射(XRD)和扫描电子显微分析(SEM)等方法,研究了预应变对铝基体中复合的 TiNi 形状记忆合金丝的马氏体逆相变的影响。结果表明,预应变的 TiNi 丝发生两种逆相变,一种是热致马氏体(TIM)的逆相变,另一种是应力诱发马氏体(SIM)的逆相变。预应变样品的 TIM 逆相变的起始温度与未预应变样品的基本相同。SIM 逆相变的起始温度随预应变的增大而升高。TIM 和 SIM 逆相变的分数随预应变的增大而减少。

关键词: 预应变; 马氏体相变; TiNi 合金; 铝基复合材料

中图分类号: TB381 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)06-0003-02

Abstract: The effect of prestrain on the reverse martensitic transformation of TiNi shape memory alloy fibers embedded in an Al matrix has been studied by differential scanning calorimeter (DSC), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) methods. The results showed that two kinds of reverse transformation occurred in the TiNi fibers after prestrain. One was the reverse transformation of the thermal-induced martensite (TIM), and the other was that of the stress-induced martensite (SIM). The reverse transformation starting temperature of TIM in the prestrained specimen was identical to that in the unprestrained specimen. The reverse transformation starting temperature of SIM increased with increasing prestrain. The fractions of TIM and SIM that participated in the reverse transformation decreased with increasing prestrain.

Key words: prestrain; reverse martensitic transformation; TiNi alloy; Al matrix composite

以形状记忆合金(SMAs)作为增强组元的智能复合材料已经得到了广泛的关注。在智能复合材料中 SMAs 起到驱动器的作用来控制形状、稳定性、振动频率和抑制微裂纹扩展^[1,2]。Furuya 等^[3-5]提出了 TiNi 形状记忆合金纤维增强铝基复合材料的概念。将 TiNi 纤维/铝基复合材料在低温下预应变(低于马氏体开始转变温度 M_s),当加热到马氏体逆相变的起始温度以上时,由于在铝基复合材料中产生残余压应力而提高其屈服强度和断裂韧性。Furuya 等^[3-5]以及 Cui 等^[6]通过实验研究了 TiNi 合金纤维(粒子)增强铝基复合材料的屈服强度、断裂韧性和阻尼能力。Yamada 等^[7]建立了 TiNi 粒子增强铝基复合材料模型,并利用等效夹杂理论证明了增强作用。

形状记忆合金的主要特性(即形状记忆效应和超弹性)来源于热致马氏体或应力诱发马氏体的逆相变。

由于复合材料基体的存在,形状记忆合金在逆相变过程中会产生回复力,而这必然会影响 TiNi 形状记忆合金的逆相变。Wei 等^[8]研究了未经过预先变形的复合于铝基体中的 TiNi 粒子的马氏体相变特性。然而,到目前为止并没有见到关于复合于铝基体中 TiNi 纤维经过预应变后的马氏体相变特性的报导。本工作研究了预应变对马氏体逆相变的影响。

1 实验方法

采用中国有色金属研究总院提供的 $\phi 280\mu\text{m}$ 的 TiNi50 2(原子分数/%)合金丝和尺寸为 $80\text{mm} \times 10\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的纯铝板。二者经过酸洗($\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:4:5$)后,将 TiNi 丝以 2mm 或 0.1mm 的间隔纵向缠绕在铝片上。将上述复合材料在 873K 的

真空热压炉中热压 40min, 然后在室温下冷轧到不同的变形量。用于 DSC 分析的样品制备如下: 从 TiNi 丝间隔为 2mm 的冷轧复合板上用电火花切割 5 mm × 5mm 的方片, 然后磨制成 4mm × 2mm × 0.8mm 的试样, 使样品仅保留一根 TiNi 丝。采用 TA INST 2910 示差扫描量热仪进行 DSC 实验, 温度变化范围为 253 ~ 373K, 加热/冷却速率为 10K/min。用于 XRD 分析的样品是从 TiNi 丝间隔为 0.1mm 的冷轧复合板上用电火花切割制备, 然后仔细磨光直至 TiNi 丝出现为止。

2 实验结果及讨论

DSC 实验结果表明, 未预应变样品在加热和冷却过程中都存在马氏体逆相变。正相变和逆相变的开始与结束温度分别为 $M_s = 298\text{K}$, $M_f = 276\text{K}$, $A_s = 324\text{K}$ 和 $A_f = 341\text{K}$ 。图 1 给出了不同预应变样品加热 DSC 曲线, 在曲线上有两个吸热峰。随预应变的增大, 低温峰的起始温度几乎不变化, 然而高温峰的起始温度随预应变的增大而升高, 高温峰的面积随预应变的增大而减少。预应变与低温峰起始温度以及预应变与高温峰起始温度的关系分别用 A_s^1 和 A_s^2 表示在图 2 中。

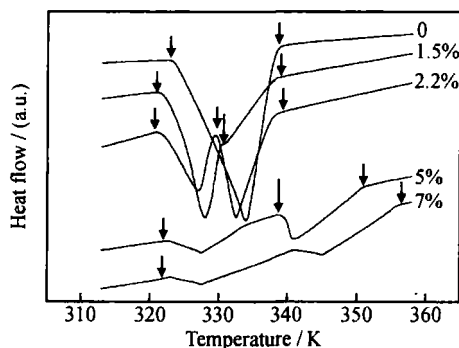


图 1 不同预应变后的 TiNi/ 铝基复合材料的加热 DSC 曲线

Fig. 1 Heating DSC curves of the TiNi fiber/Al matrix composites with different prestrains

为了深入研究在加热 DSC 曲线上的双峰, 对不同预应变的样品进行了 X 射线衍射分析, 实验结果如图 3 所示。可以看出未预应变的 TiNi 丝组织中只有母相 (B2) 存在, 而预应变的 TiNi 丝由马氏体 (B19') 和母相 (B2) 组成。在本研究中将应力诱发马氏体 (SIM) 定义为 M^d 。从图 3 中可知, 预应变的 TiNi 丝在室温下马氏体和母相共存, 而且随预应变的增大, 应力诱发马氏体 (SIM) 的分数增加, 母相的分数减少。

图 4 给出了预应变为 2.2% 的 TiNi 纤维/铝基复合材料从 323K (低于 A_s 温度) 开始冷却的 DSC 曲线。放热峰表明在冷却过程中发生了马氏体相变。冷却过

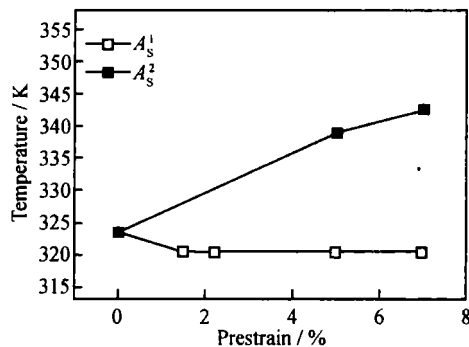


图 2 TiNi/Al 复合材料的 DSC 曲线上低温峰 (A_s^1) 和高温峰 (A_s^2) 的相变开始温度和预应变之间的关系

Fig. 2 Relationship between prestrain and the reverse transformation starting temperatures of the lower temperature peak (A_s^1) and higher temperature peak (A_s^2) of the TiNi/Al composite

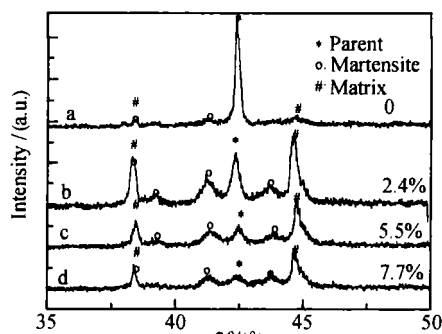


图 3 不同预应变的 TiNi/Al 复合材料的 XRD 结果

Fig. 3 The X-ray diffraction patterns of the specimens with different prestrains

程形成的马氏体相被称之为热致马氏体 (TIM), 将其定义为 M^T 。从图 3, 4 可以看出, 如果将预应变的样品冷却到 253K, 则试样由 SIM 和 TIM 共同组成。

从 253K 开始加热, 随温度的升高, SIM 和 TIM 转变成母相。TIM 的显微组织和应力状态与未预应变样品的基本相同, 因此 TIM 逆相变的开始温度与未预应变样品的相同。因而图 1 所示的低温峰相当于 TIM 逆相变。从图 3 的 XRD 谱线中可看出室温下母相的分数随预应变的增大而减少, 因此转变成母相的 TIM 分数随预应变的增大而减少, 图 1 可说明这一点。

到目前为止, 关于预应变对 TiNi 合金马氏体逆相变影响的报导很少。Piao 等^[9] 和 Lin 等^[10, 11] 采用电阻和阻尼测量研究了大变形 (5% ~ 40%) 对 TiNi 形状记忆合金自由态马氏体逆相变的影响。结果表明 A_s 随预变形的增大而升高, Piao 等^[9] 认为这是由于储存在马氏体相中弹性应变能 (变形产生) 释放引起的。

(下转第 53 页)

模型评估[J]. 航空动力学报, 2004, 19(1): 17-22

- [8] 何玉怀, 刘绍伦, 赵希宏. Ni_3Al 合金热/机械疲劳裂纹扩展速率实验及其寿命预测研究[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 93-96
- [9] 韩希鹏, 刘绍伦. DZ125 合金力学性能研究工作技术总结[R]. 北京: 北京航空材料研究院, 1996
- [10] 方键儒, 姜启川. 热作模具钢在高温热机械应力循环下的疲劳断裂行为[J]. 材料工程, 2002, (10): 11-14

收稿日期: 2005-05-13; 修订日期: 2005-10-20

作者简介: 张国栋(1977-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为高温疲劳与断裂, 联系地址: 北京 81 信箱 23 分箱(100095)。

(上接第 4 页)

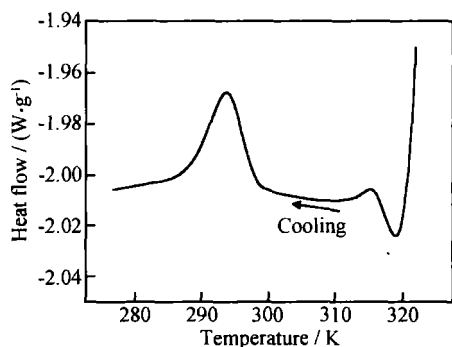


图 4 预应变 2.2% 的 TiNi/Al 复合材料的 DSC 冷却曲线

Fig. 4 The cooling DSC curve of the specimen with 2.2% prestrain

Lin 等^[10, 11]认为变形产生缺陷, 缺陷阻止马氏体逆相变。尽管目前对预变形使 A_s 升高的机理认识尚不统一, 但是基于他人的工作^[9-11], 可以得出的结论是: 图 1 中的高温峰与 SIM 的逆相变 ($M^d \rightarrow P$) 有关。在参考文献[9-11]中, 只能观察到一种马氏体逆相变。本研究与文献[9-11]存在差别的原因有两点, 其一是样品的冷变形度不同, 从图 1 中可看出, 当预应变超过 5% 后低温峰非常小, 当预应变超过 8% 后几乎没有低温峰存在。另一个原因是冷轧后 TiNi 丝存在的相结构不同, 在本研究中, TiNi 丝中有两种马氏体存在, 既 TIM 和 SIM, 因此 DSC 曲线上出现两个峰。

3 结论

(1) 镶入铝基体中的 TiNi 合金纤维经预应变后, 在加热时存在两种马氏体逆相变, 即 TIM 和 SIM 的逆相变。

(2) 预应变样品的 TIM 逆相变开始温度与未预

应变样品的相同, 而 SIM 逆相变的开始温度随预应变的增大而升高。

(3) TIM 和 SIM 转变成母相的分数随预应变的增大而减少。

参考文献

- [1] WEI Z G, SANDSTROM R, MIYAZAKI S. Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems-part shape-memory materials [J]. J Mater Sci, 1998, 33(15): 3743-3762.
- [2] WEI Z G, SANDSTROM R, MIYAZAKI S. Shape memory materials and hybrid composites for smart systems-part shape-memory hybrid composites [J]. J Mater Sci, 1998, 33(15): 3763-3783.
- [3] FURUYA Y. Design and material evaluation of shape memory composites [J]. J Int Mater Syst Struct, 1996, 7(3): 321-330.
- [4] FURUYA Y, SASAKI A, TAYA M. Enhanced mechanical properties of TiNi shape-memory fiber/Al matrix composite [J]. Mater Trans JIM, 1993, 34(3): 224-227.
- [5] FURUYA Y, TAYA M. Enhancement of high temperature mechanical strength of TiNi fiber/Al composite induced by shape memory effect [J]. J Jpn Inst Metals, 1996, 60(12): 1163-1172.
- [6] CUI L S, QI M, SHI P, YANG D Z. Study on $\text{Ni}_{25}\text{Ti}_{50}\text{Cu}_{25}$ shape memory particle/Al matrix composite [J]. Acta Metall Sinica, 1996, 9(6): 589-594.
- [7] YAMADA Y, TAYA M, WATANABE R. Strengthening of metal-matrix composite by shape-memory effect [J]. Mater Trans JIM, 1993, 34(3): 254-260.
- [8] WEI Z G, TANG C Y, LEE W B, et al. Preparation of a smart composite material with TiNiCu shape memory particulates in an aluminium matrix [J]. Mater Lett, 1997, 32(5): 313-317.
- [9] PIAO M, OTSUKA K, MIYAZAKI S, et al. Mechanism of the A_s temperature increase by pre-deformation in thermoelastic alloys [J]. Mater Trans JIM, 1993, 34(10): 919-929.
- [10] PIAO M, OTSUKA K, MIYAZAKI S, et al. Origin of A_s temperature increase by predeformation in TiNi alloys [J]. Trans Mater Res Soc Jpn, 1993, 18B: 1085-1088.
- [11] LIN H C, WU S K. The tensile behavior of a cold-rolled and reverse-transformed equiatomic TiNi alloy [J]. Acta Metall Mater, 1994, 42(5): 1623-1630.
- [12] MADANGOPAL K, KRISHNAN GR, BANERJEE S. Reverse stresses in NiTi shape memory alloys [J]. Script Metall, 1988, 22: 1593-1598.

收稿日期: 2006-02-20; 修订日期: 2006-03-11

作者简介: 高万夫(1956-), 男, 工学硕士, 石油大学材料与科学工程系副教授, 主要从事石油用钢和马氏体相变方面的研究, 联系地址: 北京昌平石油大学材料系(102249)。