

# 保持时间对定向合金 DZ125 热/机械疲劳断裂行为的影响

The Effect of Hold Time on Life and Behavior of Thermal-mechanical Fatigue in DS Superalloy DZ125

张国栋<sup>1</sup>, 刘绍伦<sup>1</sup>, 何玉怀<sup>1</sup>, 周柏卓<sup>2</sup> (1 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2 沈阳航空发动机研究所, 沈阳 110015)

ZHANG Guo-dong<sup>1</sup>, LIU Shao-lun<sup>1</sup>, HE Yu-huai<sup>1</sup>, ZHOU Bo-zhuo<sup>2</sup> (1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2 Shenyang Institute of Aeronautical Engine, Shenyang 110015, China)

**摘要:**对 DZ125 定向凝固铸造镍基高温合金进行了应变比为  $-1.0$  的同相位三角波和同相位梯形波,  $550^{\circ}\text{C} \rightleftharpoons 1000^{\circ}\text{C}$  热/机械疲劳实验研究。实验结果表明:在相同应变幅下,同相位三角波载荷情况下的热/机械疲劳寿命比同相位梯形波载荷情况下的热/机械疲劳寿命长。研究了在两种载荷情况下材料的热/机械疲劳循环应力响应行为。试样断口的微观分析表明:在热/机械疲劳过程中,同时存在疲劳、蠕变和氧化损伤;在同相位三角波载荷下,穿晶+沿晶断裂为疲劳断裂的主要特征;在同相位梯形波载荷下,裂纹主要为沿晶萌生与扩展。这是导致在同相位梯形波载荷下疲劳寿命缩短的主要原因。

**关键词:**热/机械疲劳;蠕变;氧化;损伤

中图分类号: TG113.25<sup>+</sup>5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)06-0049-05

**Abstract:** The thermal-mechanical fatigue behavior of DS superalloy DZ125 was studied. A basic cycle has been used without hold time and with hold time at high temperature to simulate only the transient behavior of critical part of a blade. Both triangular and trapezoidal wave shape signals with in-phase cycle and at maximum and minimum temperature of  $550^{\circ}\text{C}$  and  $1000^{\circ}\text{C}$  respectively. The ratio  $R_{\varepsilon}$  of minimum to maximum strain is  $-1.0$ . At the same strain amplitude, it was found from test that the TMF life of in-phase cycle with triangular wave shape is longer than that of in-phase cycle with trapezoidal wave shape. Also the effect of hold time on cyclic stress response under conditions of triangular and trapezoidal wave shape was studied. The thermal-mechanical fatigue damage was discussed. The results show that fatigue, creep and oxidation damage always developed during TMF. Fracture is mainly intergranular and transgranular under conditions of triangular wave shape. The path of crack initiation and growth is transgranular under conditions of trapezoidal wave shape.

**Key words:** thermal-mechanical fatigue; creep; oxidation; damage

航空发动机以及燃气轮机的涡轮盘和涡轮叶片,在其服役期间由于环境温度的不断变化,导致这些零件不仅承受着循环载荷所产生的机械应力,而且还承受着由于温度变化或温度梯度而引起的热循环应力。等温疲劳实验,由于不能模拟构件的实际工况,对工程构件的寿命分析和预测带来较大的误差。通过对热/机械疲劳实验和等温低循环疲劳实验的研究发现:一些材料的热/机械疲劳寿命要比上限温度的等温低循环疲劳寿命短<sup>[1,2]</sup>。而模拟材料在实际工况条

件下受载情况十分困难,只能通过一些比较接近实际工况的实验来近似模拟材料在实际工况条件下受载情况。热/机械疲劳实验就是用来模拟材料在不同的应变-温度历程下的损伤。研究结果表明,金属材料在热机械循环条件下其疲劳特性比在单纯恒定高温条件下更复杂,特别是对发动机涡轮盘和涡轮叶片的使用寿命具有重要的影响<sup>[2~4]</sup>。近20年来,国内外学者就热机械疲劳特性、损伤特性、疲劳寿命预测<sup>[5~7]</sup>以及疲劳裂纹扩展性能<sup>[8]</sup>等进行了深入的研究。目前,国

内对热/机械疲劳损伤机理研究尚处于初级阶段,热机械疲劳损伤机理的研究将为热机械疲劳寿命预测模型的选择提供依据。DZ125 定向凝固铸造镍基高温合金是为某航空发动机研制的高压涡轮工作叶片材料,对该合金进行热/机械疲劳实验,以期望对该材料的热/机械疲劳损伤机理有所认识,为该材料的工程应用提供一定的数据支持。

## 1 实验方法

### 1.1 材料与试样

本研究所用材料为 DZ125 定向凝固铸造镍基高温合金,其主要化学成分和常规力学性能见文献[9]。本工作采用  $\phi 8\text{mm}$  热/机械疲劳试样进行研究。

### 1.2 实验

本实验是在 MTS810 热/机械疲劳实验机上进行的。对温度的控制精度可达 0.5%, 对应变的控制精度可达 0.05%。本研究进行了应变比  $R_\epsilon = -1$  的同相位三角波和同相位梯形波,  $550^\circ\text{C} \leftrightarrow 1000^\circ\text{C}$  热/机械疲劳实验,载荷波形如图 1、2 所示。对试样的断口进行了电镜扫描观察。

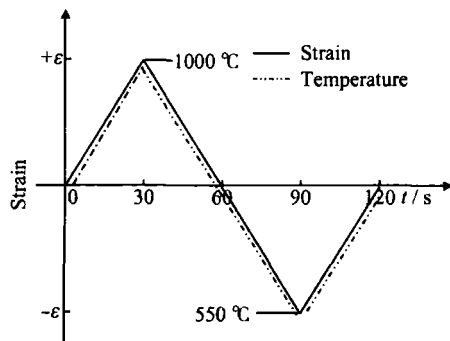


图 1 同相位三角波

Fig 1 In-phase without hold time

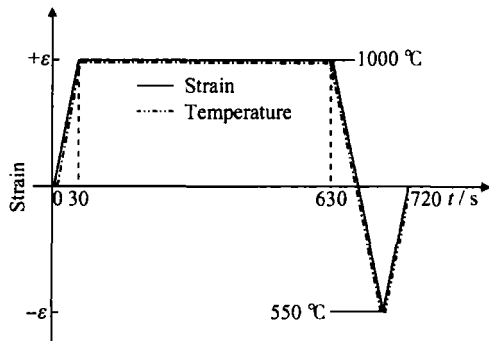


图 2 同相位梯形波

Fig 2 In-phase with hold time

## 2 实验结果与分析

### 2.1 保持时间对热/机械疲劳循环应力响应行为的影响

通过对 DZ125 合金的热/机械疲劳循环应力响应行为的研究发现,该合金的循环应力响应行为与热/机械载荷的形式相关<sup>[4]</sup>。在同相位三角波热/机械疲劳实验中,循环软化可一直持续到试样断裂,如图 3 所示。在带有保持时间的热/机械疲劳中, DZ125 合金表现为初始循环软化,继而出现循环稳定,随后又呈现出循环硬化,如图 4 所示。这与同相位不带保持时间热/机械疲劳的循环应力响应行为不同的是循环硬化发生在疲劳的中间过程而不是发生在疲劳的初始阶段。

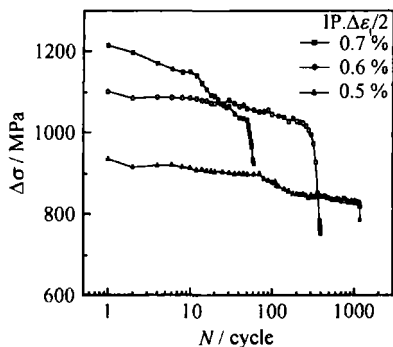


图 3 同相位三角波循环应力响应

Fig 3 Cyclic stress response of IP TMF without hold time

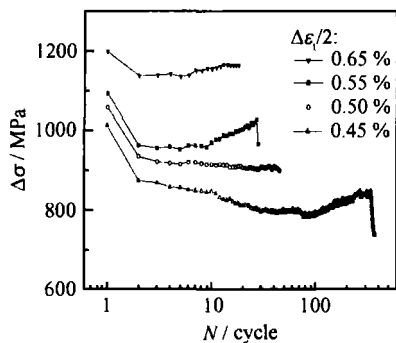


图 4 同相位梯形波循环应力响应

Fig 4 Cyclic stress response of IP TMF with hold time

### 2.2 保持时间对热/机械疲劳寿命的影响

为了研究保持时间对热/机械疲劳寿命的影响,本研究进行了同相位带保持时间的热/机械疲劳实验(在最大拉应变处保持时间为 8min,应变比为 -1.0,周期为 10min)和同相位不带保持时间的热/机械疲劳实验(周期为 2min)。实验结果如图 5 所示。通过实验结果的对比发现:带保持时间热/机械疲劳寿命小于无保持时间的同相位热/机械疲劳寿命。

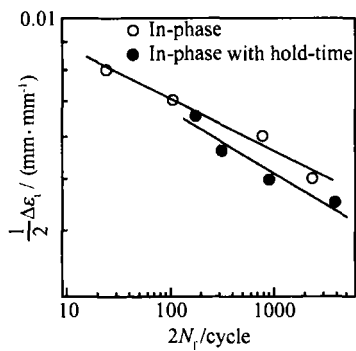


图 5 热/机械疲劳寿命曲线

Fig 5 Life curves of TMF

2 3 断口特征

通过扫描电镜分析了不同热/机械载荷条件下的断口特征。断口观察发现,在同相位热/机械载荷情况下,当应变水平较大时,试样断口没有明显的疲劳裂纹扩展区,只有疲劳裂纹萌生区和瞬断区,这表明疲劳裂纹萌生寿命占试样疲劳的大部分时间,如图 6 所示。当总应变范围为 1.2% 时,断口的疲劳裂纹扩

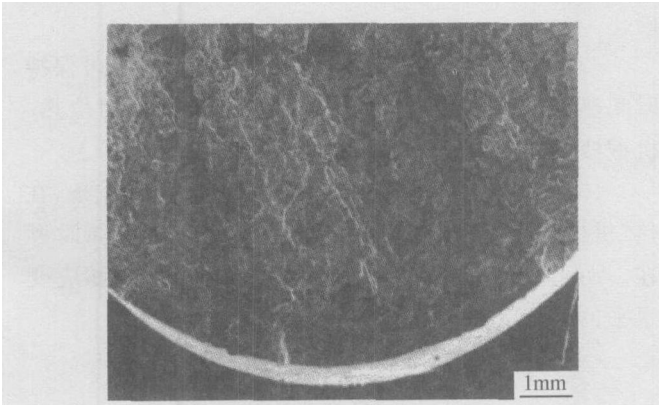


图 6 断口疲劳源形貌

Fig 6 Fractography exhibiting initiation of fatigue

展区出现明显的疲劳条带和沿晶特征,如图 7 和图 8 所示;穿晶+沿晶是试样断裂的主要形式,随着应变水平的降低,试样断裂的形式从穿晶断裂向沿晶断裂转变。在同相位带保持时间热/机械载荷情况下,当总应变范围为 1.3% 时,断口的疲劳裂纹扩展区出现明显的疲劳条带,如图 9 所示;当总应变范围为 1.1% 时,试样的断口被厚氧化物所覆盖,如图 10 所示;而当总应变范围为 0.9% 时,断口氧化非常厉害,通过扫描电镜已无法观察,只能对断口进行低倍拍照,结果如图 11 所示。从图可以看到试样是沿两个结晶面断裂的,这说明随着应变水平的降低,试样的沿晶断裂特征愈明显。

2 4 分析和讨论

在热/机械疲劳过程中,疲劳裂纹的形成往往都表

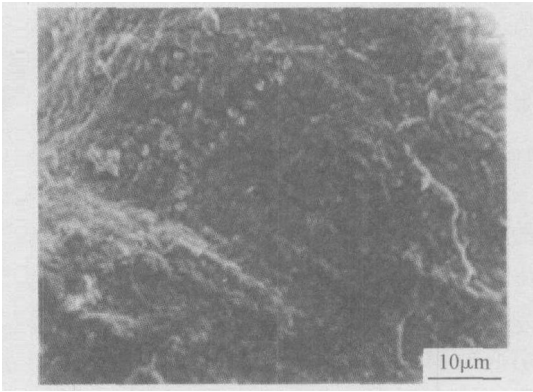


图 7 表现为氧化和疲劳的微观断口

Fig 7 Fractography exhibiting oxidation and fatigue for TMF without hold-time

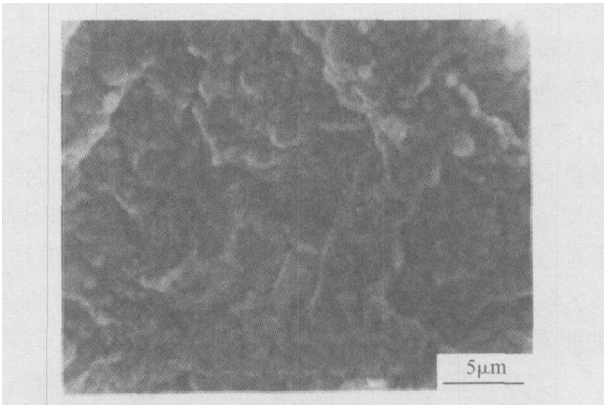


图 8 表现为氧化和蠕变的微观断口

Fig 8 Fractography exhibiting oxidation and creep for TMF without hold-time

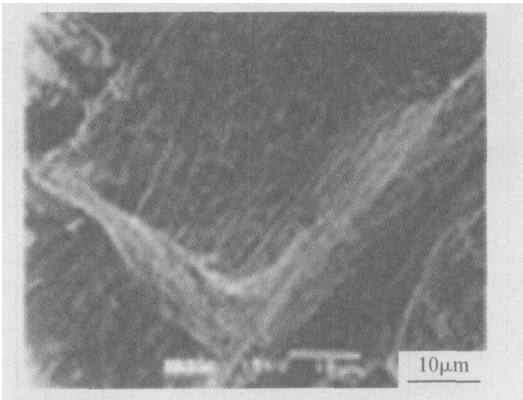


图 9 表现为氧化和疲劳的微观断口

Fig 9 Fractography exhibiting oxidation and fatigue for TMF with hold-time

现为多源起裂,这与等温低周疲劳相似,疲劳、蠕变和氧化损伤同时存在。对于不同的应变水平和热/机械载荷形式,疲劳损伤、蠕变损伤和氧化损伤各自在总损伤中的比重有所不同。一般地,对于多晶体镍基高温合金而言,氧化既可以加速穿晶裂纹的萌生和扩展,又可以促进合金发生沿晶断裂,因此氧化降低了合金的低周疲劳寿命。氧化损伤的程度又受外加应

力幅值的影响, 外加应力幅值较低时, 氧化损伤的程度相对较小。拉伸氧化有助于裂纹的萌生和扩展, 重复的氧化损伤导致裂纹向基体扩展。在高温加载期间, 高温合金往往也会发生一定量的蠕变变形, 这种蠕变变形有助于穿晶裂纹扩展方式向沿晶裂纹扩展方式的转化, 加速疲劳裂纹的扩展过程, 因此, 蠕变引起高温疲劳寿命下降。蠕变损伤的作用效果与塑性应变分量的大小有关, 一般地, 塑性应变分量越大, 则蠕变引起的损伤越显著。图 12 给出了不同热/机械载荷下塑性应变占总应变的比重, 从图 12 可以看出, 在相同总应变下同相位时的塑性应变大于同相位带保持时间时的塑性应变。在同相位热/机械载荷下, 疲劳裂纹主要以穿晶萌生和扩展, 疲劳是损伤的主要控制机理。在同相位带保持时间热/机械载荷下, 试样长期处于高温拉伸保持状态, 加速了试样表面的氧化, 裂纹主要以沿晶萌生和扩展。应变水平愈小, 寿命愈长, 高温保持时间愈长, 循环次数愈多, 沿晶特征愈明显。疲劳裂纹的沿晶萌生需要的能量比穿晶萌生小<sup>[10]</sup>, 因此, 在相同的应变水平下, 同相位带保持时间的热/机械疲劳寿命比同相位不带保持时间的热/机械疲劳寿命短。

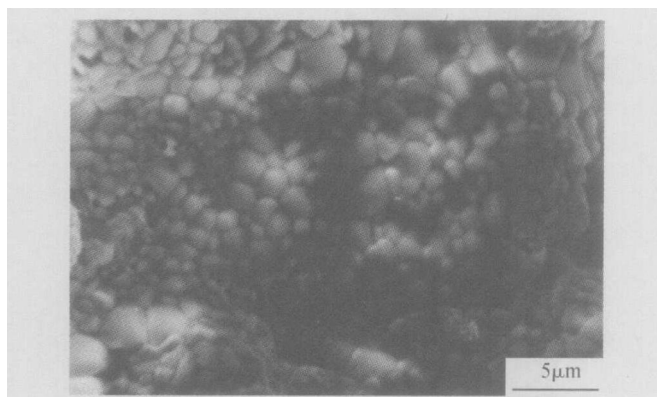


图 10 试样表面的氧化物

Fig 10 Fractography exhibiting oxidation for TMF with hold-time

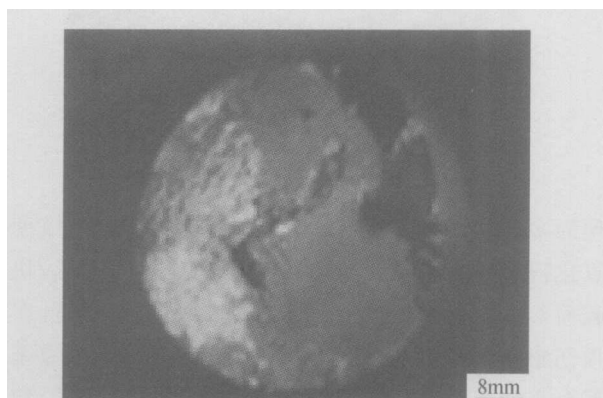


图 11 试样的结晶学断裂

Fig 11 Fractography of IP TMF with hold time

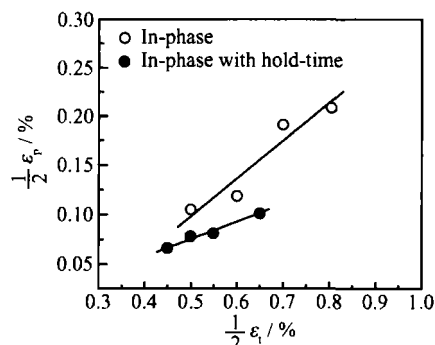


图 12 不同热/机械载荷下的塑性应变

Fig 12 Plastic strain under TMF loadings

### 3 结论

(1) 通过对 DZ125 合金的热/机械疲劳循环应力响应行为的研究发现, 该合金的循环应力响应行为与热/机械载荷的形式相关。在同相位三角波热/机械疲劳实验中, 循环软化可一直持续到试样断裂; 在带有保持时间的热/机械疲劳中, DZ125 合金表现为初始循环软化, 继而出现循环稳定, 随后又呈现出循环硬化。

(2) 通过对热/机械疲劳寿命的研究发现, 带保持时间热/机械疲劳寿命小于无保持时间的同相位热/机械疲劳寿命。

(3) 通过对热/机械疲劳损伤机理的研究发现, 在热/机械载荷情况下, 疲劳、蠕变和氧化损伤同时存在。而起主导地位的损伤形式则与载荷形式和应变水平的大小有关。

### 参考文献

- [1] BECK T, PITZ G. Thermal-mechanical and isothermal fatigue of IN792CC[J]. Materials Science and Engineering A, 1997, 234-236: 719-722
- [2] 张国栋, 刘绍伦, 何玉怀, 等. FGH95 粉末盘材料热/机械疲劳和等温低周疲劳断裂行为研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 73-77
- [3] 王建国, 王连庆, 王红缨, 等. 保持时间对涡轮盘材料 GH4133 合金热机械疲劳性能的影响[J]. 航空材料学报, 2000, 20(4): 20-25
- [4] 张国栋, 刘绍伦, 何玉怀, 等. 相位角对定向合金 DZ125 热/机械疲劳行为与寿命的实验研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 383-387
- [5] STRANGMAN T E. Thermal-mechanical fatigue life model for coated superalloy turbine components[A]. Superalloys 1992[C]. The Minerals Metals & Materials Society, 1992: 795-804
- [6] REMY L. Fatigue life prediction under thermal-mechanical loading in a nickel-base superalloy[A]. In: Thermal-mechanical fatigue behavior of materials, ASTM committee E9 on fatigue[C]. ASTM STP, 1993: 1186: 3-16
- [7] 张国栋, 刘绍伦, 何玉怀, 等. 定向合金 DZ125 热/机械疲劳寿命预测

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.  $\text{Ni}_3\text{Al}$  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)

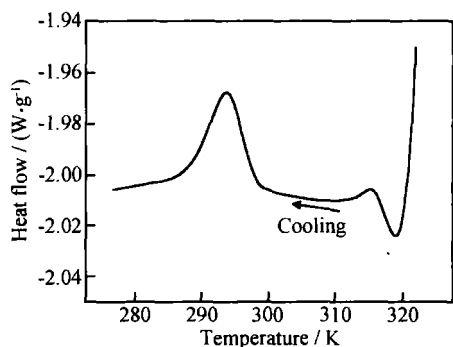


图 4 预应变 2.2% 的 TiNi/Al 复合材料的 DSC 冷却曲线

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

Lin 等<sup>[10, 11]</sup>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<sup>[9-11]</sup>, 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)。