

SM A 智能复合构件控制裂纹 的数值与试验研究

北京航空航天大学
石家庄铁道学院

张学仁*
杜彦良

聂景旭

【摘要】 将 TiNi 形状记忆合金(SMA)薄带复合于基体材料内部,利用形状记忆合金的特性,可以控制构件裂纹的扩展。本文介绍了智能复合构件控制裂纹的机理,并利用拟温度载荷法,直接应用现有有限元程序对控制裂纹的 SMA 智能复合构件进行了计算与分析,同时还进行了激光云纹干涉法试验测试。计算和试验结果表明智能复合构件中的记忆合金薄带对构件裂纹有显著的控制效果,同时计算和试验结果的一致性也表明本文的分析方法是可行的。

主题词: 形状记忆合金 主动 控制 裂纹
分类号: V231.95

1 概 述

构件中损伤(或裂纹)的控制是航空航天器发展中的关键技术问题,利用正在迅速发展的智能材料结构新技术,采用形状记忆合金作为智能材料组元,将其复合在铝合金和层板复合材料中,利用 SMA 的伪弹性特性和形状记忆效应,可以使构件成为具有主动控制裂纹的智能材料构件。本文将对这种形状记忆合金智能复合构件控制裂纹的特性进行数值与试验研究。

2 主动控制裂纹构件的原理

构件示意图如图 1 所示,采用铝合金 LY12CZ 板材为基体材料,TiNi 形状记忆合金经预变形(预应变 $\epsilon_{\infty} = 0.025$)处理后埋入两片铝板之间,通过粘接剂粘接在一起。考虑到 SMA 与基体的粘接强度及传递载荷的效率,SMA 采用薄带的形式。构件中,两条薄带并行布置于构件裂纹处,薄带中心距裂纹开口边缘分别为 3.5 mm 和 7.5 mm(示意图只画出了一条薄带)。裂纹长度 $a = 9.4$ mm。

主动控制裂纹的原理就是利用传感系统监测到裂纹出现后,通过激励埋入基体中的作动元件(即形状记忆合金)来改变裂纹尖端处的应力和应变场、减小裂纹尖端应力强度因子,从而阻止裂纹的张开和扩展,如图 1 所示。

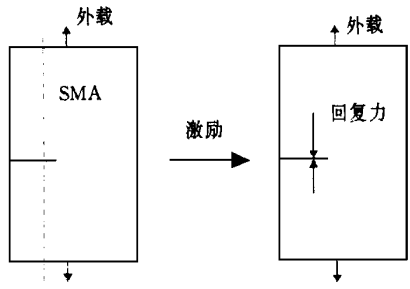


图 1 SMA 控制裂纹原理示意图

3 智能复合构件的有限元分析

由于这种智能材料构件本身结构比较复杂,应用普通的解析方法很难对其进行准确的分析,一般均采用数值方法即有限元法来分析其应力、应变和位移场。同时,由于形状记忆合金的本构关系十分复杂,是应力、应变和温度三者的非线性耦合方程,现有的有限元程序均不能直接处理这种本构关系,本文从形状记忆合金的本构关系出发,利用泰勒级数展开进行线性化处理,来获得线性化的 SMA 的本构关系式,利用该式就可直接应用有限元程序按温度载荷来处理形状记忆效应。

3.1 SMA 复合于基体材料中的本构关系

Tanaka 和 Liang 模型是目前常用的一种 SMA 内变量模型,所采用的内变量 ξ 是马氏体体积百分含量,它表示了马氏体相变或其逆相变的程度。

由 Tanaka 和 Liang 模型得出的 SMA 形状记忆合金本构关系式为^[1]:

$$\sigma - \sigma_0 = D(\epsilon - \epsilon_0) + \theta(T - T_0) + \Omega\xi - \xi_0 \quad (1)$$

式中: σ 为回复应力, ϵ 为应变, T 为温度, D 为杨氏模量, θ 为热弹性张量, Ω 为相变张量, ξ 为马氏体体积百分含量,下标 '0' 表示初始条件。马氏体的初始含量 ξ_0 与初始预应变 ϵ_{es} 有如下关系: $\xi_0 - \xi_M = \epsilon_{es}/\theta$, 式中: $\theta = -\Omega/D$ 为最大可回复应变。

一般情况下, (1) 式是 σ , ϵ 和 T 之间的非线性耦合方程, 直接应用很困难。若把具有初始预应变 ϵ_{es} 的 SMA 复合于高刚度基体中(如金属基体, 纤维增强复合材料复体等), 一般而言, 基体应变较小, 从而 SMA 的回复应变也很小, 是 ϵ_{es} 的高阶小量(ϵ_{es} 通常大于 2%)。在这一前提下, 应用泰勒级数展开方法, 可以得到这种情况下的 SMA 的本构关系简化式^[2]:

$$\sigma = D^* \epsilon + \sigma^* \quad (2)$$

$$\text{其中: } D^* = \begin{cases} D_M & (T \leq A_s^g) \\ D / \{1 + (\Omega/2)\xi_M b_A \sin[a_A(T - A_s) + b_A \sigma^*]\} & (A_s^g \leq T \leq A_f^g) \\ D_A & (A_f^g \leq T) \end{cases}$$

$D = D_A + \xi(D_M - D_A)$, $a_A = \pi(A_f - A_s)$, $b_A = -a_A/C_A$, C_A 为应力对相变温度影响的材料常数, D_M 为 D_A 分别表示马氏体相和母相的杨氏模量, A_s 和 A_f 分别表示马氏体逆相变开始、结束时的相变特征温度, σ^* 为完全约束时的回复应力。

把(2)式改写成:

$$\sigma_f = E_f(T)\epsilon + E_f(T)\alpha\Delta T_f \quad (3)$$

式中: $E_f(T) = D^*$, $\Delta T_f = \sigma^*/E_f(T)\alpha$ 为当量温度, α 为热膨胀系数, 下标 'f' 表示 NiTi 丝(带)。

这样, 用普通热弹性材料按当量温度来模拟 SMA 的回复效应, 就可以采用现有有限元法程序对 SMA 复合材料构件进行分析, 这种方法叫拟温度载荷法。

3.2 计算模型及结果

对于所采用的构件, 铝合金板用八节点实体元, TiNi 薄带按二节点桁架元来模拟, 薄带与铝合金基体之间的连接为理想粘接。由于对称性, 只取构件的 1/2 来进行分析。TiNi 薄带参数: $M_f = -125^\circ\text{C}$, $M_s = -67^\circ\text{C}$, $A_s = 0^\circ\text{C}$, $A_f = 38^\circ\text{C}$, $D_M = 23 \text{ GPa}$, $D_A = 55 \text{ GPa}$, $\theta = 0.55 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$, $C_M = 8.4 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$, $C_A = 8.4 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$, $\epsilon = 7\%$ 。

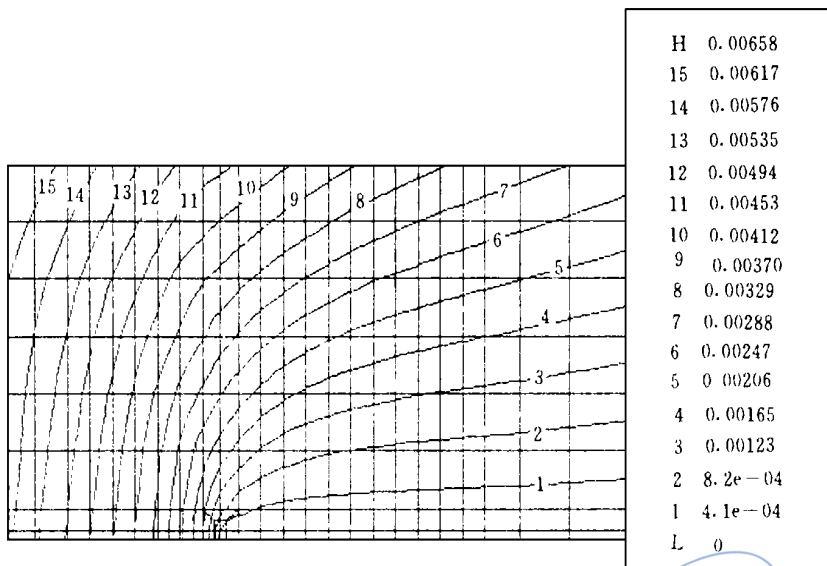


图2 $\sigma_{\infty} = 12.7$ MPa 时的外载方向位移场计算结果

如图2是外载 $\sigma_{\infty} = 12.7$ MPa 时, 计算得到的外载方向的位移场。

4 主动控制裂纹的云纹干涉法试验

云纹干涉法利用与试样受力有关的变形光栅(试样栅)和不变形的基准栅(参考栅)相重叠, 产生干涉条纹, 利用所获得的干涉条纹来计算被测物体的变形。本试验的光栅频率为 1200 线/mm。

试验得到了不同载荷下试件裂纹尖端附近的云纹图, 以及 $\sigma_{\infty} = 9.5$ MPa 和 $\sigma_{\infty} = 12.7$ MPa 两种静载状态下, 对 TiNi 带加上不同的电压(即带为不同的温度)时的云纹图。

图3是 $\sigma_{\infty} = 12.7$ MPa 时的云纹图。云纹图记录的均是外载方向的面内位移, 即 v 场。

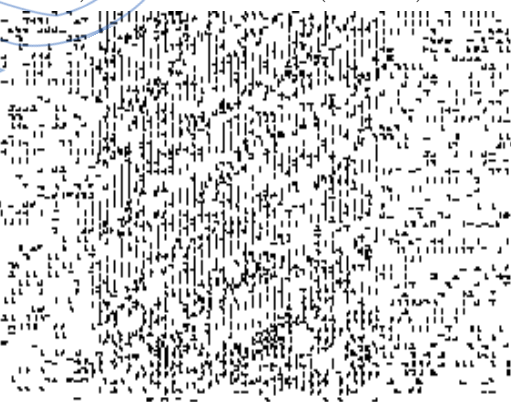


图3 $\sigma_{\infty} = 12.7$ MPa 时的云纹图

5 计算及试验结果比较及分析

比较图2和图3所得的位移场, 可见计算和试验测试结果是相当接近的(试验测试结果应消除初始零场条纹的影响, 详见文献[3])。

形状记忆合金对带裂纹构件的主动控制表现在使裂纹尖端应力强度因子发生变化。根据上述用有限元素法计算及云纹干涉法测试所得的位移场, 利用断裂力学的位移法或能量法^[4], 就可求出裂纹尖端的应力强度因子。

图4示出了不对复合试件加温时试验和计算所得到的应力强度因子 K_I 与试件外加应力 σ_{∞} 的关系曲线, 可见在不加温时, 计算与实验结果是十分接近的, 此时 SMA 薄带只有伪弹性效应。由图可见, 埋入 SMA 薄带的试件的裂纹尖端应力强度因子要比纯 LY12 基体(无

SMA) 的应力强度因子有较大的减小, 如 $\sigma_{\infty} = 12.72 \text{ MPa}$, K_I 减小约 20%。

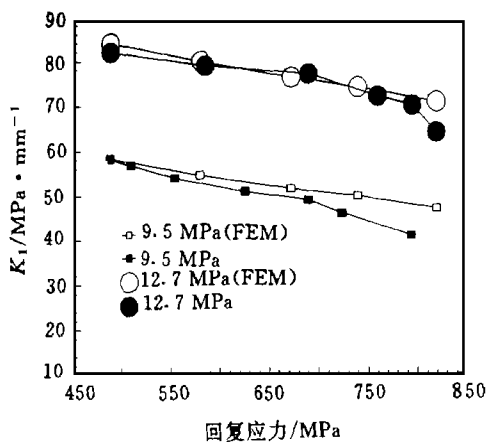


图 4 $K_I \sim \sigma_{\infty}$ 曲线

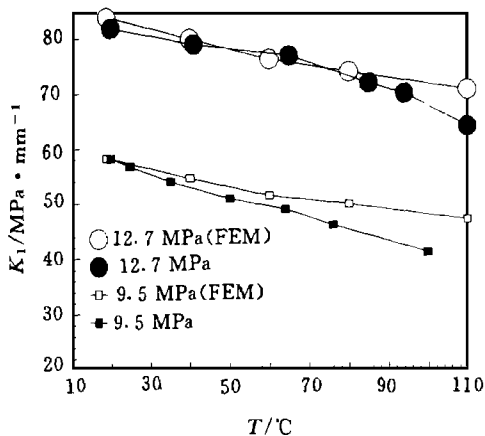


图 5 $K_I \sim T$ 曲线

图 5 比较了复合试件在 $\sigma_{\infty} = 9.5$ 和 $\sigma_{\infty} = 12.7 \text{ MPa}$ 两种载荷状态下, 试验和计算的 K_I 与激励温度 T 的关系曲线。由图可见, 随着温度的增加, K_I 逐渐减小, 即 TiNi 薄带对裂纹的控制作用逐渐增大; 另外, 比较计算与实验结果可见, 二者也是很相近的, 只是随着温度的增加 (即回复应力的增加), 两者之间误差逐渐加大, 引起这一现象的原因是基体的温度场发生了变化, 从而引起了位移场的变化, 详细分析参见文献[3]。

6 结 论

本文利用拟温度载荷法, 直接应用现有有限元程序对控制裂纹的 SMA 智能复合构件进行了理论计算与分析, 同时还进行了激光云纹干涉法试验测试。通过计算和试验对比分析, 可以得到以下结论:

(1) 有限元素法的计算结果与云纹干涉法测试结果符合很好, 说明了所提出的拟温度载荷法来模拟 SMA 的回复效应是可行的;

(2) 不加热时, SMA 薄带具有伪弹性效应, 埋入 SMA 薄带的试件的裂纹尖端应力强度因子要比纯 LY12 基体 (无 SMA) 的应力强度因子有较大的减小; 对智能复合构件中的 SMA 加热激励后, 裂纹尖端的应力强度因子比不加热时又有明显的减小, 说明 TiNi 记忆合金薄带对构件裂纹有显著的控制效果。

参 考 文 献

- 1 Liang C. The Constitutive Modeling of Shape Memory Alloys. PH. D. Thesis, VPI&SU, 1990
- 2 张学仁. 主动控制裂纹的智能复合构件的有限元分析. 复合材料学报 (已录取), 1998
- 3 张学仁等. 主动控制裂纹的 SMA 智能结构云纹干涉法试验研究. 第八届发动机结构强度振动学术会议论文集, 1996
- 4 Aliabadi M. H. Numerical Fracture Mechanics. Kluwer Academic Publishers, 1991

(责任编辑 王震华)

CELEBRATION COLUMN

FOR 80TH ANNIVERSARY OF THE BIRTH OF PROFESSOR YAN LITANG (STRUCTURE , STRENGTH, VIBRATION)

VIBRATION CONTROL OF A NEW MOVABLE OUTER- RING SQUEEZE FILM DAMPER

Zhao Jie, Yan Litang, Zhu Zigen, Deng Jianbo

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

A high efficient oil film damper, namely Movable outer Ring Squeeze Film Damper (MRSFD) is developed to meet the demands of modern gas turbine engines and other high speed rotating machinery on vibration control. By adding a flexible support outside, the outer ring of conventional Squeeze Film Damper (SFD) could be pushed under high oil forces caused by the squeezing motion of the journal. The vibration controllabilities of MRSFD and SFD are investigated and compared both theoretically and experimentally. It is proved that the nonlinear vibration characteristics such as jump phenomenon of SFD systems could be avoided under much greater unbalance level with MRSFD systems. As a novel oil film damper, MRSFD provides more effective vibration control for rotor systems and improves the unbalance loading ability of the damped supports.

Key Words Damper Rotors Dynamics Vibration reduction

STUDY ON SMA INTELLIGENT STRUCTURES FOR CRACK CONTROL

Zhang Xueren and Nie Jingxu

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Du Yanliang

(Mechanical Engineering Dept. Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043)

ABSTRACT

The shape memory effect of Shape Memory Alloy (SMA) was used for crack active control in an intelligent component, which was made up with TiNi belts embedded in metal matrix. A linearized constitutive relation of SMA embedded in the matrix has been derived. Such a constitutive relation can be used easily in commercial finite element programs to treat the shape memory effect as the thermal effect of conventional materials. This method was applied to the numerical analysis of the intelligent component. Moire Interferometric tests were carried out on the component. Comparison of the calculated with test re-