第 16 卷 第 2 期 复 合 材 料 学 报 Vol 16 No. 2
1999 年 5 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA May 1999

主动控制裂纹智能复合构件的有限元分析

张学仁 聂景旭 杜彦良*
(北京航空航天大学动力系, 北京 100083) (* 石家庄铁道学院机械系, 石家庄 050043)

摘 要 从形状记忆合金(SMA)的本构关系出发, 利用 Taylor 展开进行线性化处理, 获得了线性化的 SMA 本构关系式, 在此基础上提出了拟温度载荷法, 并利用这种方法直接应用现有的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。通过计算和实验对比分析, 说明了应用本文中提出的拟温度载荷法模拟 SMA 的回复效应是可行的; 同时也表明 TiNi 薄带对构件裂纹有很好的控制作用。

关键词 形状记忆合金, 本构关系, 智能结构, 主动控制裂纹
中图分类号 O342; TB301

智能材料结构是正在迅速发展的一种新技术, 其特点是使结构本身具有传统的承载功能外, 还同时具有控制、自适应功能[1]。现阶段的智能材料结构研究, 大多采用材料复合的方法, 即把某些具有特殊功能的材料(例如光纤、压电、磁(电)流变体、形状记忆合金等), 作为智能材料的组元, 复合到基体材料中, 使构件的材料本身具有感知和驱动的功能。

针对航空航天器发展中急需研究的主动控制构件裂纹这一关键技术问题, 采用形状记忆合金(SMA)作为智能材料组元, 将其复合在铝合金层合板复合材料中, 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。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分析, 一般均采用有限元法来分析其应力、应变和位移场。有限元素法是固体力学分析中的重要工具, 在智能材料结构研究中也是不可缺少的工具。有限元素法目前在智能材料结构研究中开始得到应用, 但大多数都应用于压电复合材料研究中, 一些大型商业有限元软件(如ANSYS 和ABAQUS)甚至已有了专用的压电分析模块, 但是能直接用来分析 SMA 智能复合材料的有限元软件还未见报道, 这是由于形状记忆合金的本构关系是应力、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。

本文作者从形状记忆合金的本构关系出发, 利用 Taylor 展开进行线性化处理, 来获得线性化的 SMA 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。

1 SMA 复合于基体材料中的本构关系

Tanaka 和 Liang 模型是一种内变量模型, 所采用的内变量 ξ 是马氏体体积百分含量, 它

收修改稿、初稿日期: 1998-06-04, 1998-03-12。国家自然科学基金资助项目 (59475031)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表示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[2]

$$\sigma^r - \sigma_0^r = D(\epsilon - \epsilon_0) + \theta(T - T_0) + \Omega(\xi - \xi_0) \tag{1}$$

式中: σ^r—回复应力, ϵ—应变, T—温度, D—杨氏模量, θ—热弹性张量, Ω—相变张量, ξ—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_{res} 有如下关系: $\xi_0 - \xi_M = \frac{\epsilon_{res}}{\epsilon_{max}}$, 式中 $\epsilon_{max} = -\Omega/D$ 为最大可回复应变。

对于马氏体相变过程, 有

$$\xi = \frac{1 - \xi_A}{2}\cos[a_M(T - M_f) + b_M\sigma] + \frac{1 + \xi_A}{2} \tag{2}$$

对于逆相变有

$$\xi = \frac{\xi_M}{2}\{\cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] + 1\} \tag{3}$$

式中:

$$\begin{cases} a_A = \pi/(A_f - A_s) \\ a_M = \pi/(M_s - M_f) \end{cases}, \quad \begin{cases} b_A = -a_A/C_A \\ b_M = -a_M/C_M \end{cases}$$

对于给定的温度 T, (2) 和 (3) 式中相变的应力范围分别对应于 (4) 和 (5) 式

$$C_M(T - M_s) \le \sigma \le C_M(T - M_f) \tag{4}$$

$$C_A(T - A_f) \le \sigma \le C_A(T - A_s) \tag{5}$$

M_s、M_f 和 A_s、A_f 分别表示马氏体相转变开始、转变结束和奥氏体相转变开始、转变结束时的相变温度值, 称为相变特征温度。

对于 SMA 为完全约束回复情况, 即 $\epsilon = \epsilon_0 = \epsilon_{res}$, (1) 式中不出现 ϵ 项, 对于给定残余应变 ϵ_{res}, 总能求解出回复应力 σ^r 与温度 T 的对应值(需迭代), 或通过实验也可测出相应的 σ^r-T 曲线。因此, 对于完全约束回复, $\sigma^r = f(T)$ 是已知的, 记为 σ_r^*。

但一般情况下, (1) 式是 σ^r、ϵ、T 之间的非线性耦合方程, 直接应用很困难。若把经过预拉伸的 SMA 复合于高刚度基体中(如金属基体, 纤维增强复合材料基体等), 一般而言, 基体应变较小, SMA 的回复应变也很小, 是 ϵ_{res} 的高阶小量(ϵ_{res} 通常大于 2%)。在这一前提下, 应用泰勒级数展开方法, 我们可以对这种情况下的 SMA 的本构关系进行简化处理, 从而能更好地应用于智能材料结构中。

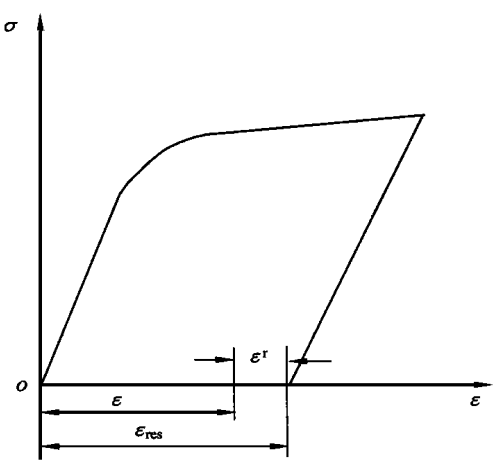

图1 SMA 变形示意图

Fig. 1 Deformation of SMA

由回复应变 $\epsilon^r = \epsilon - \epsilon_{res}$ (注意: 此处 ϵ 是 SMA 在回复时总应变, 而 ϵ^r 是总应变与残余初始应变 ϵ_{res} 之差, 如图1所示) 为 ϵ_{res} 的高阶小量可知, $\sigma^r - \sigma_r^*$ 也是 σ_r^* 的高阶小量。高阶小量意义如下: $f(\sigma^r) \doteq f(\sigma_r^*) + f'(\sigma_r^*)(\sigma^r - \sigma_r^*)$, 这样, 经过处理, 得到下面的简化式[3]:

$$\sigma^r = D^*\epsilon^r + \sigma_r^* \tag{6}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中

$$D^{*}=\begin{cases} D_{M} & (T\le A_{s}^{\sigma}) \\ D/\{1+\frac{\Omega}{2}\xi_{M}b_{A}\sin[a_{A}(T-A_{s})+b_{A}\sigma_{r}^{*}]\} & (A_{s}^{\sigma}\le T\le A_{f}^{\sigma}) \\ D_{A} & (A_{f}^{\sigma}\le T) \end{cases}$$

$D=D_{A}+\xi(D_{M}-D_{A})$, $a_{A}=\pi/(A_{f}-A_{s})$, $b_{A}=-a_{A}/C_{A}$, C_{A} ——应力对相变温度影响的材料常数, σ_{r}^{*} ——完全约束时的回复应力。

为了能用现有的有限元素法程序对 SMA 复合材料构件进行分析, 本文中提出如下的拟温度载荷法, 即把(6)式改写成

$$\sigma_{f}^{r}=E_{f}(T)\varepsilon_{f}^{r}+E_{f}(T)\alpha_{f}\Delta T_{f} \tag{7}$$

式中: $E_{f}(T)=D^{*}$, $\Delta T_{f}=\frac{\sigma_{r}^{*}}{E_{f}(T)\alpha_{f}}$即为拟温度, 下标“f”表示 NiTi 丝(带), α_{f}—热膨胀系数。

这样, 可以直接用现有的有限元素法程序对 SMA 复合材料构件进行分析。

2　主动控制裂纹构件的原理及计算模型

本文中采用铝合金 LY12CZ 板材为基体材, TiNi 形状记忆合金经预变形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(a= 9.4 mm)处, 薄带中心距裂纹开口边缘分别为3.5 mm 和7.5 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、减小裂尖应力强度因子, 从而阻止裂纹的张开和扩展。其受力状态示意图如图2所示。

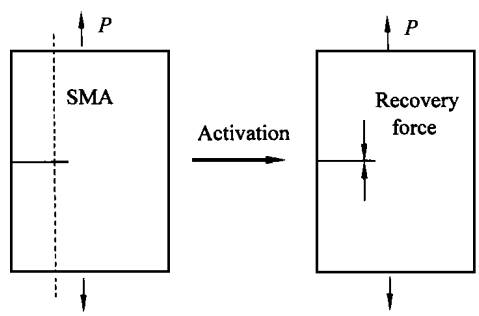

图2　SMA 控制裂纹原理示意图

Fig. 2　Schematic diagram of crack control by SMA

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。基体材料 LY12CZ 的数据可查手册获得, TiNi 薄带参数取自文献[3], 如表1所示。由于对称性, 只取构件的1/4来进行分析。

表1　TiNi 薄带的材料参数

Table 1　Material parameters of TiNi belts

M_{f}/℃	M_{s}/℃	A_{s}/℃	A_{f}/℃	D_{M}/GPa	D_{A}/GPa	θ/MPa℃$^{-1}$	C_{M}/MPa℃$^{-1}$	C_{A}/MPa℃$^{-1}$	ε_{max}/%
-125	-67	0	38	23	55	0.55	8.4	8.4	7.0

3　计算结果及分析

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。本文中首先利用有限元素法求出带裂纹物体的位移场和应力场, 然后再根据断裂力学的能量法, 求出裂纹尖端的应力强度因子。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

首先计算了不对试件加温时，试件两端应力 σ_∞ 为不同值时的应力强度因子 K_I，如图3所示。然后计算 $\sigma_\infty = 9.5$ MPa 和 $\sigma_\infty = 12.7$ MPa 两种状态下，改变薄带 的温度及回复应力值，求得相应的 K_I 随温度及回复应力的变化关系，如图4 和 图5所示。计算中取裂纹长度 $a = 9.4$ mm。所得结果与文献 [4] 激光Moire 云纹干涉法实验测试结果进行了比较。

图3比较了实验和计算所得到的 $K_I \sim \sigma_\infty$ 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 薄带的试件裂纹尖端应力强度因子比纯LY12基体的应力强度因子有较大的减小，如 $\sigma_\infty = 12.72$ MPa，K_I 减小约20%。

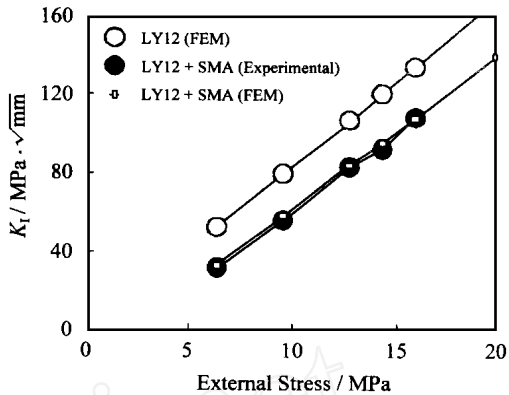

图3 $K_I \sim \sigma_\infty$ 曲线

Fig. 3 Relationship between K_I and σ_∞

图4和图5分别比较了 $\sigma_\infty =$ 常数时，实验和计算的 $K_I \sim T$ 曲线和 $K_I \sim \sigma_r$ 曲线。由图可见，随着温度的升高(即回复应力的增加)，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，只是随着温度的升高(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，详细分析参见文献[4]。

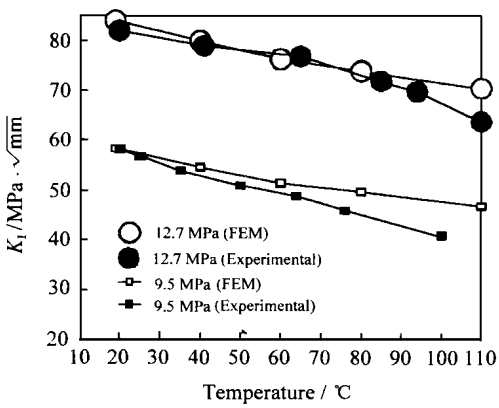

图4 $K_I \sim T$ 曲线

Fig. 4 Relationship between K_I and Temperature

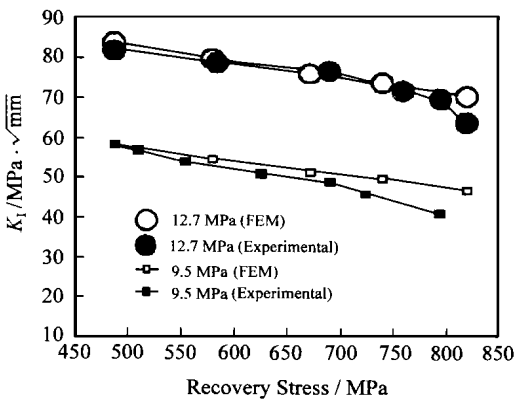

图5 $K_I \sim \sigma_r$ 曲线

Fig. 5 Relationship between K_I and σ_r

4 结 论

本文从形状记忆合金的本构关系出发，利用 Taylor 展开进行线性化处理，获得了线性化的 SMA 本构关系式，并利用该式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。通过计算和实验对比分析，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，说明了应用本文提出的拟温度载荷法来模拟 SMA 的回复效应是可行的。

(2) 计算结果表明 TiNi 薄带对裂纹有很好的控制作用。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参 考 文 献

1 Crawley E F. Intelligent structures for aerospace. *AIAA* Journal, 1994, 32(8): 1689

2 Liang C, Rogers C A. One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials. *J IntMat Sys Struct*, 1990, 1(1): 207

3 张学仁. 主动控制裂纹的形状记忆合金智能材料结构研究: [博士学位论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1995

4 张学仁. 形状记忆合金智能复合构件控制裂纹的数值与试验研究. 航空动力学报, 1998, 13(4): 357

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SMART STRUCTURES FOR ACTIVE CRACK CONTROL

Zhang Xueren　　Nie Jingxu　　Du Yanliang*

(Dept. of Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

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

Abstract　Based on Tanaka and Liang's constitutive model of shape memory alloys, the linearized constitutive relation of SMA, embedded in matrix, was derived. Such a constitutive relation can easily be used in commercial finite element programs to treat the shape memory effect as the thermal effect of conventional materials. An intelligent structure, made up with TiNi belts embedded in the metal matrix to actively control the crack in the matrix, was analyzed using the method. Comparison of the calculated and test results shows that the method is practicable.

Key words　shape memory alloy, constitutive model, smart structure, crack control

1998年日本的环氧树脂需要量比前一年减少10%

最近, 日本环氧树脂工业会发表了1998年1～12月全年按用途区分的环氧树脂实际需要量, 总计为168 951t, 是1997年实际需要量186 807t 的90%, 该数字反映出1998年景气低迷的影响。

不同用途环氧树脂的实际需要量　(单位: t)

用　途	1997年1～12月	1998年1～12月	对前一年同期比 /%
涂　料	85 265	47 343	86
电　气	60 669	55 751	92
建筑 胶接等	43 014	37 599	87
内需合计	158 948	140 693	89
出　口	27 859	28 258	101
总　计	186 807	168 951	90

在所有领域, 由于景气低迷, 需要量大幅度减少, 仅140 693t, 为前一年的89%。与此相反, 由于第三、四季度情况较好, 达28 258t, 为前一年的101%。

从不同用途看, 罐用涂料, 由于冷夏而需要量减少, 再加上转向 PET (聚对苯二甲酸乙二醇酯) 瓶和覆层罐的影响而大幅度减少。由于生产台数减少, 也影响到汽车用涂料的用量。虽然新船用涂料情况较好, 但防腐蚀用涂料需求较差, 所以在船舶和防腐蚀用途方面总体上微减。由于景气低迷, 无疑一般用途方面涂料用量也大幅度减少。

在电气方面的应用, 由于叠层板用量减少, 以及高密度化和薄型化的进步, 叠层板产量下降。由于半导体业不景气和芯片的小型化, 灌封材料的用量大幅度减少。

由于住宅开工数大幅度减少和公共投资受限制, 环氧树脂在土木建筑、胶接及其他方面的用量都大幅度降低。

申 摘自1999年3月15日第683号 EPJ

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net