

用于平板智能复合材料的拟温度载荷法

石家庄铁道学院 杜彦良*
北京航空航天大学 聂景旭

【摘要】 针对探测和控制裂纹扩展的平板智能复合材料结构特点, 提出和建立了一新的应力分析方法——拟温度载荷法, 并且利用此方法对所设计的几种不同的结构模型进行了理论分析。通过试验证明了该计算方法的正确性, 该计算方法的提出和建立, 为进行控制裂纹扩展的智能材料结构研究和应用奠定了重要的理论分析基础。

主题词: 复合构件 拟温度载荷法 裂纹扩展

分类号: V257 O346.1

1 引言

用高新技术把传感器和执行元件与结构材料结合成一体, 形成一种能感知自身状况的材料结构, 如果再与微处理器相配合, 便成为具有一定功能的智能材料结构。该材料结构除可以进行振动、噪声、转子临界转速的主动控制外^[1-4], 还可以进行构件裂纹的自动探测和主动控制^[5, 6]。因而该材料结构被认为是最近几年刚刚出现、当前正在迅速发展的结构设计方面的新技术和方法, 可以广泛应用于航空航天、交通运输、桥梁、管道、医学等部门用于解决用现有技术和方法难于解决的问题。关于探测裂纹和控制裂纹扩展的智能材料结构的研究, 主要包括结构设计、复合工艺、试验测试和计算分析等方面的内容。在上述问题中, 作者已对结构设计、复合工艺和试验测试进行了研究, 证明该结构方案合理, 控制效果显著。但是由于该材料结构的特殊性, 则不能直接用常规计算方法进行计算分析, 成为该材料结构设计分析的难点。本文根据探测和控制裂纹扩展的智能材料结构特点, 提出和建立了一种新的应力分析方法——拟温度载荷法。

2 拟温度载荷法

本文选用有限元法对所设计的 NiTi 合金智能复合构件进行计算分析, 用下列计算式,

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

式中: K 为总刚度矩阵; $\{\delta\}$ 为位移矢量; $\{F\}$ 为载荷矩阵, 可表示为:

$$\{F\} = \{F_w^e\} + \{F_p^e\} + \{F_\theta^e\} \quad (2)$$

式中: $\{F_w^e\}$ 表示为体积力引起的节点力; $\{F_p^e\}$ 为表面力引起的节点力; $\{F_\theta^e\}$ 为温度引起的节点力。在计算中, 不论是 NiTi 合金复合构件, 还是无 NiTi 合金构件, 其主要区别是作用于裂纹表面上的载荷不同。例如, 无 NiTi 合金构件对裂纹表面的影响仅为外载荷的作用, 而 NiTi 合金复合构件对裂纹表面除了外载荷的作用外, 还有 NiTi 合金对裂纹张开的阻止力 σ_{r1} 所引起的

桥接作用和 NiTi 合金被加热以后所产生的回复力 σ_{F2} 对裂纹的闭合作用, 在 σ_{F1} 和 σ_{F2} 联合作用下, 使裂纹扩展得到阻止。由此可知, 如果 σ_{F1} 和 σ_{F2} 能被确定, 则利用有限元程序和计算方法便可计算裂纹尖端附近的应力场和裂纹张开位移。但是 σ_{F1} 和 σ_{F2} 与 NiTi 合金的性能、外加载荷的大小、位于裂纹处 NiTi 合金的变形量和加热温度等因素有关, 计算中如何将 σ_{F1} 和 σ_{F2} 正确的反映出来, 使其更加逼近实际构件的受力情况, 正是计算的难点。

由热应力分析可知^[7], 当某一金属构件由温度 T_1 变化到 T_2 时, 材料在 $\Delta T = (T_2 - T_1)$ 的温差下要收缩 ΔL^T 距离, 此收缩量可表示为:

$$\Delta L^T = \alpha \Delta T L \quad (3)$$

式中 α 为构件的线胀系数; L 为构件的长度。如果构件两端被完全约束, 则相当于对构件两端施加了一作用力 P , 在此力作用下, 使材料伸长 $\Delta L^P = \Delta L^T$ 的距离, ΔL^P 可表示为:

$$\Delta L^P = - PL/EA \quad (4)$$

式中 E 为材料弹性模量; A 为构件横截面积, 由 $\Delta L^T + \Delta L^P = 0$ 便可计算出材料的内应力为

$$\sigma_P = - \alpha E \Delta T \quad (5)$$

在 σ_P 作用下, 来阻止材料由于受 ΔT 温度影响所产生的收缩。如果用此方法来模拟当 NiTi 合金丝受到 $(-t_P)$ 的温度作用时, 材料收缩所产生的应变 $\epsilon = \alpha(t_P)$ 与 NiTi 合金实际受热收缩时所产生的变形量相等, 从而便可得到 NiTi 合金受热后不同应变条件下的回复力的大小。在上述假设条件下, (2) 式中由温度引起的节点力 $\{F_{\epsilon}^e\}$ 可表示为下述形式:

$$\{F_{\epsilon}^e\} = \{F_{\epsilon 0}^e\}_R + \{F_{\epsilon}^e\}_s \quad (6)$$

上式右端第一项表示试件计算状态的实际热载荷引起的节点力; 右端第二项表示为假想的热载荷所引起的节点力, 其大小应与 NiTi 合金在一定变形量下所产生的回复力等价, 这就是拟温度载荷法的基本思想。

含 NiTi 形状记忆合金丝的智能复合构件在受载时, 裂纹部位的 NiTi 丝将发生较大的变形, 对其加热(通电), NiTi 合金要恢复原状态, 但是由于受构件本体材料阻止, 因而相互产生作用力, 如图 1 所示。当对被变形的 NiTi 合金加热后, 其材料力图收缩 l 距离, 由于 NiTi 合金与本体材料粘接在一起, NiTi 合金的收缩力相应作用于本体材料上, 使本体材料产生一压缩力而收缩 x 距离, 对于 NiTi 合金而言, 由于本体材料阻止 NiTi 合金的回复, 相当于对 NiTi 合金上作用一拉力, 使其伸长 $l_1 = l - x$; 假设 NiTi 合金材料与本体材料的应力、应变分别用 $\sigma_f, \sigma_m, \epsilon_f, \epsilon_m$ 表示, 则应力-应变的关系分别为

$$\epsilon_f = \sigma_f / E_f + \alpha_f \Delta T_f \quad \epsilon_m = \sigma_m / E_m + \alpha_m \Delta T_m \quad (7)$$

式中 $E_f, E_m, \alpha_f, \alpha_m$ 分别表示 NiTi 合金和本体材料的弹性模量和线胀系数。根据平衡条件, NiTi 合金与本体材料间的作用力应大小相等, 方向相反, 则平衡式为:

$$\sigma_f A_f + \sigma_m A_m = 0 \quad (8)$$

式中 A_f, A_m 表示 NiTi 合金与本体材料的横截面积, 而 NiTi 合金与本体材料的约束条件为:

$$\epsilon_f = \epsilon_m \quad (9)$$

则由(7)、(8)和(9)式的关系, NiTi 合金的内应力为:

$$\sigma_f = [(\alpha_f \Delta T_f - \alpha_m \Delta T_m) / (E_f(T) A_f + E_m A_m)] E_f(T) E_m A \quad (10)$$

假设对 NiTi 合金施加一温度 $(- \Delta t_P)$, 即 $\Delta T_f = (- \Delta t_P)$, 而基体的 $\Delta T_m = 0$, 则(10)式变为:

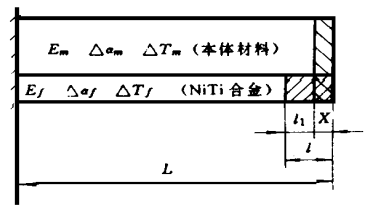


图 1 NiTi 合金与本体材料的相互作用

$$\sigma_f = - [(\alpha \Delta t_p) / (E_f(T) A_f + E_m A_m)] E_f(T) E_m A \quad (11)$$

由于智能复合构件所选取的 NiTi 合金丝直径小于 0.5 mm, 而且根据其材料结构的复合特点在构件中主要将 NiTi 合金分布于易产生裂纹的区域, 所以, NiTi 合金在整个结构中所占体积含量很小, 则 $E_f(T) A_f \ll E_m A_m$, 于是 (11) 式可近似为

$$\sigma_f \approx - E_f(T) \alpha \Delta t_p \quad (12)$$

由 (12) 式, 便可根据不同的 $-(\Delta t_p)$ 来模拟 NiTi 合金被加热时的回复力, 使 σ_f 随温度 $-(\Delta t_p)$ 的变化正好与 NiTi 合金被加热时随温度的变化所产生的回复力相吻合, 这样便可绘制 $\sigma_f(-\Delta t_p)$ 曲线, 来模拟实际载荷的变化情况, 由于在计算中使用的 $-(\Delta t_p)$ 为虚拟的温度, 因而叫做拟温度载荷法。用拟温度载荷法来模拟计算具有预变形的 NiTi 合金复合构件, 可使较复杂的问题变成简单化, 从而在此基础上可在现有有限元程基础上进行计算分析。

3 NiTi 合金智能复合构件的计算^[6]

计算模型的形状和尺寸设计如图 2 所示, 本体材料为 ZL-105 铝合金板, 计算模型分 a、b 两大类。为了进一步验证增加 NiTi 合金的复合量或将位于构件裂纹区域内的 NiTi 合金进行预变形处理以后对裂纹扩展的控制效果(该复合构件称为预变形 NiTi 合金智能复合构件), 在模型 a 的基础上, 将 NiTi 合金在构件内的复合量加大一倍, 组成模型 b, 而模型 b 根据对位于构件裂纹处 NiTi 合金事先预变形处理情况, 分为有预变形和无预变形的 NiTi 合金智能复合构件^[6]。

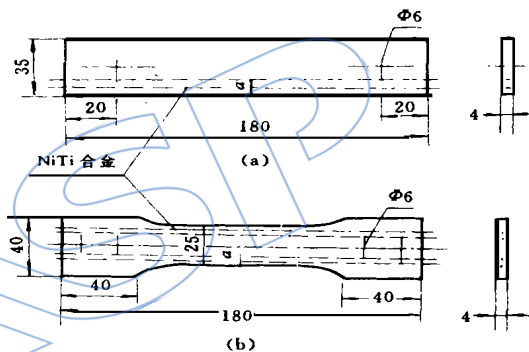
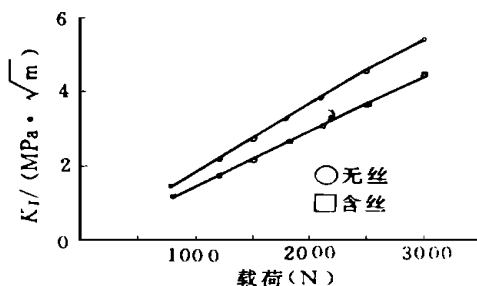
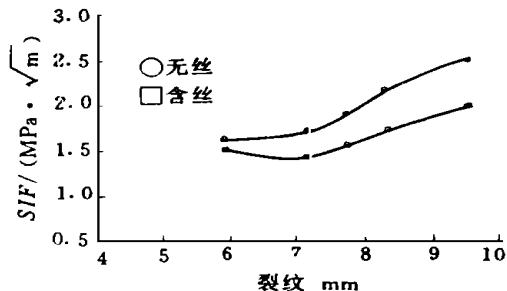


图 2 构件图

计算结果如图 3、4 所示。由图 3((a) K_I 随外载荷的变化, (b) K_I 随裂纹长度的变化) 看出对位于构件裂纹处的 NiTi 合金加热后所产生的回复力作用于裂纹表面, 从而使裂纹尖端受力状态得到改善。另外由图 4(图 4 中: $\circ$ AD41, $\square$ AD11, $\triangle$ AD21, $\diamond$ AD12, $*$ AD22) 看出, 具有预变形的 NiTi 合金智能复合构件与无预变形的复合构件相比, 在相同 NiTi 合金复合量情况下, 由于变形量增大, 则当 NiTi 合金被加热后所产生的回复力将比无预变形的 NiTi 合金所产生的回复力要大, 因而其控制效果将优于无预变形的 NiTi 合金智能复合构件((a) 当裂纹长



(a) K_I 随外载荷的变化



(b) K_I 随裂纹长度的变化

图 3 模型 a 的 K_I 随外载荷和裂纹长度的变化情况

度为 4.75 mm 时, 裂纹张开位移随外载荷变化, (b) 裂纹张开位移随裂纹长度的变化情况)。

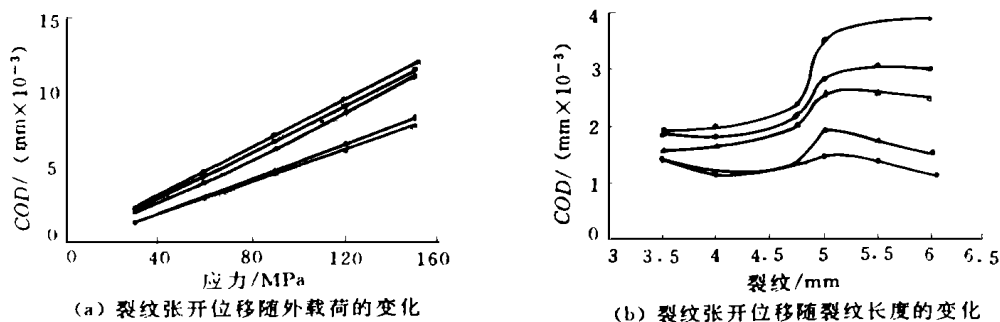


图 4 模型 b 的 K_I 随外载荷和裂纹长度的变化情况

K_{I1} 和 K_{I2} 分别表示无 NiTi 合金丝构件和含 NiTi 丝构件 (NiTi 合金丝) 被加热时所测出的裂纹尖端应力强度因子, 试验结果表明, 含 NiTi 合金丝复合构件与无 NiTi 合金丝构件相比其裂尖应力强度因子减少量为 15.74%~20.6%, 平均减小量为 18.44%。采用拟温度载荷法利用上述所建立的计算模型(a)所计算出的 NiTi 合金丝智能复合构件与无丝构件相比, 其应力强度因子相对减小量为 16.84%~20.64%, 平均减小量为 18.71%, 计算与试验结果非常接近, 证明根据 NiTi 合金智能复合构件的结构特点所建立的拟温度载荷法是正确的。

4 结 论

本文根据探测和控制裂纹扩展的 NiTi 合金智能复合构件的结构特点, 提出和建立了一种新的应力分析方法——拟温度载荷法, 并利用该方法对所设计制作的几种复合构件进行了计算分析, 其结果与试验值相吻合, 证明所建立的计算方法是正确的。该计算方法可模拟各种不同应变条件下 NiTi 合金的形状记忆效应和拟弹性性能对裂纹扩展的控制作用。研究结果表明, 对位于构件裂纹处的 NiTi 合金事先进行一定量的预变形处理后可提高其控制效果。

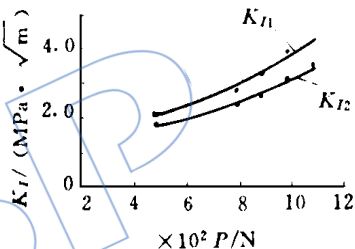


图 5 K_I 随外载荷的变化

参 考 文 献

- 1 Rogers C A., Barker D K and Jaeger C A. Introduction to Smart Materials and Structures. U. S. Army Research Office Workshop on Smart Materials Structures and Mathematical Issues, Sept, 1988.
- 2 Rogers C A and Robertshaw H H. Development of a Novel Smart Material. ASME Paper 88-WA/DE-9. 1988
- 3 Yanliang Du, Jingxu Nie and Changzhan Zhao. Study For Crack-Detecting and Active Control. APCS-91: 1500- 1506
- 4 杜彦良, 聂景旭. 主动控制裂纹扩展的一新型复合材料构件的研究. 复合材料学报, 1992, 19(3)
- 5 [日] 竹内详一郎著, 郭延玮, 李安定译. 热应力, 北京: 科学出版社, 1977: 1- 103
- 6 杜彦良. 主动探测和控制裂纹扩展的智能材料结构研究: [博士论文]. 北京航空航天大学, 1993, 61- 91

flowed through five holes on the plate into the chordwise wedged passage with three pin– fin rows and exhausted to the atmosphere. The experimental results of the pressure distribution, the flow resistance under heating and without heating, and the distribution of the local heat transfer coefficient in the cooling passages of a gas turbine blade are presented. Therefrom an empiric formula is obtained.

Key words Blades Cooling Flow resistance Thermal– convection coefficient

AN INVESTIGATION ON LOCAL HEAT TRANSFER PERFORMANCE FOR RIM HEATED ROTATING DISK WITH CENTRAL AIR INFLOW

Xu Guoqiang, Ding Shuiting, Qiu Xuguang, Cao yuzhang
(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics 100083)

ABSTRACT An actual Gas– Turbine disk was simplified to a rim heated rotating disk with central air inflow. The effects of rotational Reynolds number, Re , Mass flow coefficient C_w , gap ratio G and shrouded clearance ratio G_s upon local heat transfer were experimentally studied. The disk diameter was 360mm and the maximum rotational speed was 3600 r/min. It was found that the distribution of the local heat flux on the disk surface was U – Shaped. The heat transfer could be enhanced by increasing mass flow coefficient and rotational Reynolds number. The effects of gap ratio and shrouded clearance ratio were small.

Key words Discs Cooling Convective heat transfer

A METHOD FOR CALCULATION OF CONTACT HEAT RESISTANCE BETWEEN TWO CONTACTING SURFACES

Gu Weilan

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT A method is provided for calculation of contact heat resistance between two contacting surfaces. The contact heat conductance was derived for a single contact spot of a simplified disk contact model. The distribution function of contact spots can be solved by using the method of counting functionals. As a result, an empiric formula of the contact heat resistance with the fluctuations of extruding stress is derived.

Key words Thermal contact resistance Bearing stress Computational methods

A PSEUDOTHERMAL-LOAD ANALYTICAL METHOD FOR CONTROLLING CRACK GROWTH IN AN INTELLIGENT COMPOSITE COMPONENT

Du Yanliang and Nie Jingxu

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

ABSTRACT A new method to analyze the stress fields of the intelligent composite components, namely the pseudothermal-load method, is proposed for active control of crack growth according to their structural characteristics. This method has been applied to computing and analyzing several intelligent composite components. The results are in good agreement with experimental data. So this is the theoretical basis for research and application of the intelligent composite material with the aim of the crack growth active control.

Key words Composite material Load calculation Crack propagation

DEFORMATION AND STRESS ANALYSIS OF RUBBER O- RING

Ren Quanbin, Chen Ruxun, Yang Weiguo
(*Shaanxi Power Machinery Institute, Xi'an 710000*)

ABSTRACT

A model of multilateral frictional contact problem of two objects with far different stiffness was established. In addition, a stress relax model of rubber- like material was developed according to the poly- dimension stress creep theory. On the basis of the above models, the deformation and contact stress of the rubber O- ring was calculated by using a finite element method approaching large strain in ref. [1]. Some useful conclusions can serve as trustworthy principles for rubber O- ring design.

Key words Contact problems Stress relaxation Seal elements

APPLICATION OF ULTRASONIC FATIGUE TESTING TECHNIQUE

Ni Jingang

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

ABSTRACT

This paper deals with the application of ultrasonic fatigue testing technique to the study of fatigue life and fatigue crack growth behavior of metals and alloys under vibrational excitation at high frequency (20kHz). The mechanical damage and fracture mechanism of materials were investigated in the case of ultrasonic fatigue cycles. This testing technique has remarkable advantages in time- saving, economy and noiselessness and capability for investigating mechanical damage models of aeroengine and rocket structures in real service.

Key words Ultrasonic vibration systems Mechanism of fracture Fatigue strength

DYNAMIC PROCESS MODELLING IN ROCKET ENGINE WITH NEURAL NETWORKS

Cui Dingjun, Yang Erfu, Zhang Zhengpeng, Liu Guoqiu

(*College of Space Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083*)

ABSTRACT

According to principles of neural networks and BP algorithm, the relationship between the neural networks and nonlinear modelling is analyzed. A general idea and a basic method for modelling with neural networks are put forward on the basis of the study of dynamic process in liquid rocket engine was formulated. Then a new modelling approach to researching the parameters of the engine was formulated. An example given in this paper shows that the application of the neural networks to the investigation of the dynamic process in the liquid rocket engine is a great success.

Key words Neural networks Nonlinear Liquid rocket engines