

文章编号: 100026893(2003)022013403

# 含 SMA 纤维的复合材料层合板的应力集中实验与分析

吴 声<sup>1</sup>, 张晓莉<sup>1</sup>, 麦汉超<sup>1</sup>, 唐金标<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 固体力学所, 北京 100083)

(2. 北京有色金属研究总院 形状记忆合金研发中心, 北京 100088)

Analysis of Stress Concentration of Laminated Composite Plates  
Embedded with Shape Memory Alloy Fibers

WU Sheng<sup>1</sup>, ZHANG XiaoLi<sup>1</sup>, MAI Han2chao<sup>1</sup>, TANG Jin2biao<sup>2</sup>

(1. Research Center of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. General Research Institute for Nonferrous Metals, Research Center of SMA, Beijing 100088, China)

**摘 要:** 由于具有形状记忆效应, 埋入复合材料层合板中的形状记忆合金纤维, 相变后将产生很大的回复应力, 不仅改善了整个承载结构的机械性能, 而且改变了危险区域的应力分布, 降低了应力集中程度。针对带孔的复合材料层合板, 通过拉伸实验及测定应力集中因子, 说明形状记忆合金纤维对于承载复合材料构件孔边附近区域的应力集中有很好的抑制作用, 孔边应力集中因子最大可降低 9%。

**关键词:** 形状记忆合金; 形状记忆效应; 应力集中; 马氏体相变; 智能复合材料

中图分类号: V258; V2141.8 文献标识码: A

**Abstract:** Due to the shape memory effect, shape memory alloy fibers, embedded in laminated composite plates, will generate large recovery stresses after phase transformation, not only to improve mechanical properties of the loaded structure, but also to change the stress distribution in the dangerous area and reduce stress concentration. In the case of a laminated composite plate with a circular hole, by conducting stretching tests and measuring the stress concentration factor, this paper demonstrates that shape memory alloy fibers have an effect of control over the stress concentration in the nearby area of the circular hole of the loaded composite component, where the stress concentration factor was reduced by 9% at the most.

**Key words:** shape memory alloy (SMA); shape memory effect (SME); stress concentration; Martensitic transformation; smart composites

针对航空航天技术发展中急需研究的抑制应力集中这一技术问题, 考虑到形状记忆合金所具有的特殊的形状记忆效应, 将其作为智能材料组元而埋入复合材料层合板中, 利用形状记忆合金的受限回复力来改变损伤危险邻近区域的应力分布, 降低应力集中程度, 从而使结构具有了抑制应力集中的自适应控制能力。文献[1]针对无限大的 SMA 带孔板进行了理论分析; 文献[2, 3]针对各向同性带孔板这一情况进行了理论分析与实验研究; 而文献[4]说明将 SMA 框架粘贴在构件表面可以抑制应力集中。本文以含形状记忆合金纤维的带孔的复合材料层合板作为研究对象, 由实验结果说明埋入形状记忆合金后, 不仅承载结构的机械性能得到了提高, 而且复合材料层合板孔边附近危险区域的应力集中也得到了有效的抑制。

## 1 热力学实验

实验是在安装了恒温箱的、型号为 MTS880 拉伸机上完成的。复合材料层合板试件由玻璃纤维/不饱和聚酯树脂构成, 板长 250mm, 宽 35mm, 总厚度 115mm。形状记忆合金纤维的直径分别为 0.13mm, 0.15mm, 预拉伸量分别为 3%, 5%。对于带孔的复合材料板试件, 在中性层沿着圆孔(其直径为 4mm)的两侧, 均匀、对称的分布着 4 根经过预处理的、有一定预拉伸量的 TiNi 形状记忆合金纤维丝, 形成了一块具有应力集中控制能力的承载试件。如图 1 所示。

分别在 25e, 50e, 60e, 70e, 80e 时对不同 SMA 体积百分含量、不同预拉伸量的复合材料板试件进行轴向拉伸实验, 可以得到不同温度下的轴向拉伸的平均应力) 应变曲线, 进而计算得出不同温度下各种型号复合材料板试件的弹性模量 E, 如表 1 所示。

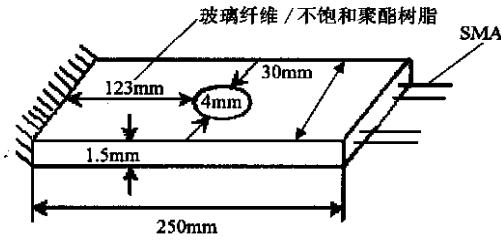


图 1 带孔的复合材料层合板试件

Fig1 Laminated composite plate with a hole

表 1 各种情况下带孔的复合材料层合板的弹性模量

Table 1 Elastic modulus of laminated composite plate with a hole

弹性模量 E / GPa	25e	50e	60e	70e	80e
无丝	121.76	111.04	91.96	91.27	81.6
01.5mm/3%	121.89	111.99	101.72	101.32	101.24
01.4mm/5%	131.35	121.39	111.21	101.84	101.75
01.5mm/5%	141.10	131.02	111.59	111.11	101.96

利用 Origin 软件对以上每组数据进行数值拟合, 便可以得到每个试件的弹性模量 E 随温度变化的曲线, 如图 2 所示。

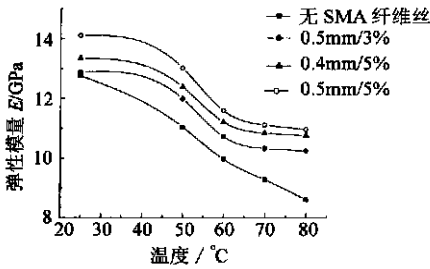


图 2 带孔板的弹性模量) 温度图

Fig2 Elastic modulus versus temperature

由实验数据及其数值拟合曲线可以看出, 形状记忆合金纤维丝可以有效的提高带孔的复合材料层合板试件的整体刚度。

对于体积百分含量相同, 预拉伸量不同的试件来说( 01.3mm/3% 的试件和 01.3mm/5% 的试件, 01.5mm/3% 的试件和 01.5mm/5% 的试件), 同一温度下, 预拉伸量大的复合材料板试件, 其弹性模量也较高, 同时, 结构的弹性模量随温度的变化量较小。

对于预拉伸量相同, 百分含量不同的试件来说( 01.3mm/5% 的试件和 01.5mm/5% 的试件, 01.4mm/5% 的试件和 01.5mm/5% 的试件), 同一温度下, 百分含量大的试件, 其弹性模量也较高, 同时, 结构的弹性模量随温度的变化量较小。相比之下, 预拉伸量要比 SMA 纤维丝体积百分含量对结构的弹性模量的影响要大些。

对于无 SMA 纤维的复合材料层合板构件来说, 其整体结构的弹性模量是随着温度的增加而近似呈线性减小的; 但是对于含有 SMA 纤维的复合材料层合板构件来说, 其整体结构的弹性模量在 60 e (奥氏体相变的起始温度) 左右以后随着温度的变化比较平缓、稳定。

### 2 测定应力集中因子的实验

利用型号为 YJK4500 的电阻应变仪, 在孔边对称垂直粘贴型号为 BX2015、灵敏系数为 210 应变片来测量应变值。然后利用所测得的应变值来计算应力集中因子 K, 所利用公式如下

$$K = E_{max} / E_0$$

其中:  $E_{max}$  为最大应变, 计算时利用实验所测得的孔边应变值来代替  $E_{max}$ ;  $E_0$  为平均应变, 计算时利用轴向拉伸的平均应力) 应变曲线取得的值。其计算结果如表 2 所示。

表 2 70 e 时不同带孔板的孔边应力集中因子 K

Table 2 Stress concentration factor K at 70 e

	无丝	01.5mm/3%	01.4mm/5%	01.5mm/5%
应力集中因子 K	21.57	21.5	21.41	21.33

由表中所得的数据可以看出: 含 SMA 纤维的复合材料层合带孔板相比无 SMA 纤维的复合材料层合带孔板而言, 同温度下前者的应力集中因子 K 值比后者的应力集中因子 K 值最大可以降低 9% 左右。也就是说, 复合材料层合板的孔边应力集中, 由于形状记忆合金纤维的加入而得到了有效的抑制。

### 3 有限元数值解

为了进行分析比较, 利用 NASTRAN/PA2 TRAN 有限元软件对含形状记忆合金纤维的带孔的复合材料层合板试件的应力、应变进行计算, 从而得出其在不同温度条件下应力、应变的分布, 进而模拟带孔板的平均应力) 应变曲线。进行有限元计算时, 对所计算力学模型的边界条件和初始条件等进行了如下假设: 所选材料为正交各向异性材料, 其主弹性模量  $E_1$  利用热力学拉伸实验所测得的弹性模量 E 的拟合函数; 所建立的力学模型边界条件为: 一端固支, 另一端自由, 并可承受轴向的拉伸载荷。最终有限元计算所得结果与实验结果之间存在的误差较小, 最高误差达到 10%, 说明实验结果是比较可靠的。

## 4 结论

(1) 利用 SMA, 通过适当的处理, 埋入复合材料中, 对于构件孔边附近区域的应力集中有很好的抑制作用。对于圆孔的附近危险区域, 其应力集中因子  $K$  的值最大可以降低 9% 左右。

(2) 对于体积百分含量相同, 预拉伸量不同的两个试件来说, 同一温度下, 预拉伸量大的试件, 其弹性模量也较高, 同时, 结构弹性模量随温度的变化量较小。

(3) 对于预拉伸量相同, 体积百分含量不同的两个试件来说, 同一温度下, 体积百分含量大的试件, 其弹性模量也较高, 同时, 结构弹性模量随温度的变化量较小。

实验时需注意到的是:

(1) 应变片的粘贴位置是否与孔边或是裂纹尖端保持垂直;

(2) 粘贴应变片时所用的粘贴剂是否随着温度而发生性能改变;

(3) 应变片本身灵敏系数随着温度的改变;

(4) 基体复合材料中的不饱和聚酯树脂随温度的软化程度。

以上诸因素都会影响测量结果, 造成很难估计的误差。在本实验中所计算的应力集中因子  $K$  值偏小, 就是以上因素综合作用所带来的结果。

## 参 考 文 献

- [1] Birman V. Stress distribution in an infinite shape memory alloy plate with a circular hole subjected to biaxial tension [A]. SPIE[C]. 1999, 3039: 498- 506.
- [2] Senshama P K, Kadirvar M H, Haftka R T. Stress reduction in an isotropic plate with a hole by applied induced strains [J]. AIAA J, 1992, 2525: 905- 913.
- [3] 王征, 吴建生, 熊可, 等. 利用形状记忆合金降低结构的应力集中研究[J]. 实验力学, 1997, 12(1): 66- 69.  
(Wang Z, Wu J S, Xiong K, etc. Shape memory alloy for stress concentration reduction in adaptive structures [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(1): 66- 69.)
- [4] 王征, 陶宝祺, 梁大开, 等. 用形状记忆合金的强度自适应智能复合材料初探[J]. 实验力学, 1994, 9(4): 134- 145.  
(Wang Z, Tao B Q, Liang D K, etc. Study of shape memory alloy for smart composite of self- adaptive strength [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1994, 9(1): 134- 135.)

作者简介:



吴 声(1977- ) 男, 北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系硕士研究生, 主要从事智能材料与结构方面的研究工作。

张晓莉(1978- ) 女, 北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系硕士研究生, 主要从事智能材料与结构方面的研究工作。

麦汉超(1940- ) 男, 北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系教授, 博士生导师。主要研究领域为: 智能材料与结构, 生物力学等。

(责任编辑: 李铁柏)