

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.02.002

形状记忆合金混杂复合材料层合板变刚度调控机制

王雁雪,柯俊,吴震宇,杨寅泽

(浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018)

摘要:形状记忆合金混杂复合材料(SMAHC)是一种能够主动变化刚度的智能复合材料。为了研究形状记忆合金(SMA)对SMAHC层合板刚度调控的影响,对分布式、模块化地植入SMA的层合板进行三点压弯实验。以SMA数量、单层中SMA排布位置与SMA预应变作为3个独立变量进行正交实验设计,测试了不同试样在不同温度下的刚度值,以研究如何有效地实现刚度调控。采用等效热膨胀法建立SMAHC层合板的有限元模型与实验结果进行对比,总结了SMAHC层合板的变刚度调控机制。分析结果表明,SMA非对称排布的层合板比SMA对称排布的层合板平均刚度提升16.67%;植入8段SMA的层合板比植入4段SMA的层合板平均刚度提升15.26%;通过调整SMA的温度,可以精准地实现SMAHC层合板的刚度调控;模块化、分布式的植入方式能够改变SMAHC层合板整体的应力分布,提升层合板刚度调控精度、降低SMA纤维用量,而且能保证个别SMA失效后层合板整体仍然有一定的变刚度能力。

关键词:形状记忆合金;复合材料;变刚度;调控机制;层合板;有限元

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)02-0008-08

Variable Stiffness Control Mechanism of Shape Memory Alloy Hybrid Composite Laminates

Wang Yanxue, Ke Jun, Wu Zhenyu, Yang Yinze

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract : Shape memory alloy hybrid composite (SMAHC) is an intelligent composite material that can actively change stiffness. In order to study the effect of shape memory alloy (SMA) on the stiffness regulation of SMAHC laminated plates, three-point bending experiments were carried out on the laminated plates with distributed and modular SMA implants. The orthogonal experimental design was carried out with the number of SMA, the arrangement position of SMA in the single layer and the pre-strain of SMA as three independent variables. The stiffness values of different samples at different temperatures were tested to study how to effectively realize the stiffness control. The finite element model of SMAHC laminates was established by equivalent thermal expansion method and compared with the experimental results. The variable stiffness control mechanism of SMAHC laminates was summarized. The analysis results show that the average stiffness of the laminated plate with asymmetric SMA arrangement is 16.67 % higher than that of the laminated plate with symmetrical SMA arrangement. The average stiffness of the laminates implanted with 8 SMA segments is 15.26 % higher than that of the laminates implanted with 4 SMA segments. By adjusting the temperature of SMA, the stiffness control of SMAHC laminates can be accurately realized. The modular and distributed implantation method can change the overall stress distribution of SMAHC laminate, improve the stiffness control accuracy of the laminate, reduce the amount of SMA fiber, and ensure that the laminate still has a certain variable stiffness after individual SMA failure.

Keywords : shape memory alloy ; composite materials ; variable stiffness ; control mechanism ; laminated plate ; finite element

1988年,Rogers等^[1]首次提出了形状记忆合金(SMA)增强树脂基复合材料的概念。SMA增强复

合材料是一种新型的智能复合材料,也被称作形状记忆合金混杂复合材料(SMAHC)。它既具有纤维

基金项目: 国家自然科学基金项目(52102430),浙江省自然科学基金项目(LQ20E050001)

通信作者: 柯俊,博士,副教授,主要从事复合材料结构设计、汽车轻量化相关研究

收稿日期: 2022-12-01

引用格式: 王雁雪,柯俊,吴震宇,等.形状记忆合金混杂复合材料层合板变刚度调控机制[J].工程塑料应用,2023,51(2):8-15,28.

Wang Yanxue, Ke Jun, Wu Zhenyu, et al. Variable stiffness control mechanism of shape memory alloy hybrid composite laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2): 8-15, 28.

增强复合材料的各向异性、轻量化、比强度和比模量高等优良特性,又具有SMA的集感知和驱动为一体的智能化特性,可用于实现提升耐冲击性^[2-3],驱动结构变形^[4],调控结构刚度^[5]、频率^[6-7]和阻尼^[8]等功能,在航空航天、轨道客车与新能源汽车等领域具有广泛的应用前景。

继Rogers等^[1]提出了SMAHC的概念后,学者对SMAHC的性能研究一直持续至今。与传统的纤维增强树脂基复合材料相比,SMAHC吸收冲击能量的能力更强^[2-3],可抑制损伤,具有自愈性能^[9],具备更佳的耐冲击性^[10]。Gandhi等^[4]对SMAHC驱动结构变形进行了研究,发现SMAHC的驱动变形能力使结构具备自适应性。Han等^[11]基于SMAHC驱动结构变形特性研制的“柔性机翼”能够根据不同的飞行速度自动调整翼型,最终提高飞行效率,并自行抑制危险振动。Akbari等^[12]的研究表明SMAHC可调控屈曲温度,降低屈曲挠度,具备更好的耐屈曲性能。Dahnke等^[10]发现与普通纤维增强树脂基复合材料相比,SMAHC具备较高的拉伸强度和断裂应变。Salim等^[13]指出SMAHC可调控结构的刚度、阻尼和固有频率,具备可控的振动特性。此外,多位专家学者将SMA贯穿植入纤维增强复合材料中研究结构刚度变化^[14-16],发现SMA温度升高产生的拉伸回复力能提高结构总刚度,且随着SMA体积分数的增加,复合材料的总刚度增加。

如上所述,虽然国内外学者已对SMAHC的力学性能进行了深入研究,其中不乏SMAHC层合板结构刚度变化的研究,但这些研究主要针对SMA贯穿排布在SMAHC中的情况,如何通过SMA对SMAHC层合板进行可靠、高效的变刚度驱动及精准的刚度调控,仍然是当前研究面临的最大挑战。

笔者提出模块化、分布式的植入方式,设置SMA数量、单层中SMA位置排布与SMA预应变三个自变量,制备了全试验的8组试样,测试不同试样在不同温度下的刚度变化规律,采用等效热膨胀法建立SMAHC层合板的有限元模型,通过试验数据和Abaqus有限元仿真结果分析得出该植入方式能够改变SMAHC层合板整体的应力分布,提升层合板刚度调控精度、降低SMA纤维用量,而且能保证个别SMA失效后层合板整体仍然有一定的变刚度能力。研究结果可用于实现板式结构可靠、高效的变刚度驱动及精准的刚度调控。

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂:AM-8960A,环氧当量145-155 g/eq,密度1.1 g/cm³,弯曲/拉伸弹性模量2 800 MPa,玻璃化转变温度120~130 °C,惠柏新材料科技(上海)股份有限公司;

胺类环氧树脂固化剂:AM-8960B,惠柏新材料科技(上海)股份有限公司;

玻璃纤维单向布:E玻璃纤维单向布,密度为2.6 g/cm³,拉伸弹性模量为72 GPa,中国巨石股份有限公司;

SMA丝:NiTi-SMA丝,直径1 mm,北京记一科贸有限责任公司。

1.2 主要仪器及设备

微机控制电子万能试验机:WDW-5型,济南天辰试验机制造有限公司;

真空泵:FY-1H型,浙江飞越机电有限公司;

可调直流稳压电源:IT6722型,艾德克斯电子(南京)有限公司;

温度传感器:LU-GUSR11K7AY1NN型,厦门安东电子有限公司;

采集卡:NI USB-6002型,美国国家仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:Q100型,美国TA公司。

1.3 试样制备

(1)合金丝预成型体制备。

为了检测NiTi-SMA丝的相变温度,对NiTi-SMA丝进行了DSC测试,结果表明NiTi-SMA丝的马氏体结束相变温度 $M_f=33.58$ °C,马氏体初始相变温度 $M_s=39.78$ °C,奥氏体初始相变温度 $A_s=36.56$ °C,奥氏体结束相变温度 $A_f=42.44$ °C。

SMA可以在低温马氏体和高温奥氏体中自由切换,其奥氏体的拉伸弹性模量是马氏体的2~3倍。王明义^[17]指出通过温度驱动实现结构刚度主动控制的方式有两种:①主动性能调整(APT),该控制不对SMA进行预拉伸,不产生或产生很小的回复应力;②主动应变能调整(ASET),该控制将SMA进行预拉伸,使SMA内部具有残余应变,SMA受约束相变时会产生很大的回复应力。ASET的效率更高,需要合金丝的数量相对较少。笔者使用微机控制电子万能试验机对直径1 mm的SMA丝进行测试,发

现最大可回复应变为6.8%,并使用万能试验机分别测量了0%,2%,4%预应变下SMA丝的回弹力-温度关系,结果显示当预应变为0%时,回弹力几乎为零,随着预应变的增加,最大回弹力逐步增大。将APT和ASET设置为对照组,相应SMA的预应变分别取0%,4%。裁剪SMA丝,每段长度为500 mm。对于0%预应变的SMA丝,对长段SMA两端进行通电加热以消除SMA丝原有的预应变。对于4%预应变的SMA丝,先对长段SMA两端进行通电加热消除SMA丝原有的预应变,再用微机控制电子万能试验机拉伸至4%预应变。将两种合金丝处理好后,裁剪成试样规定长度,并对其进行折弯成型,如图1所示。

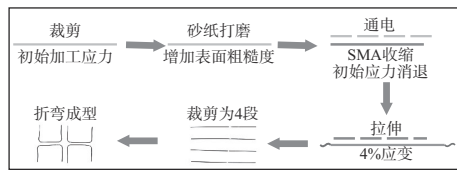


图1 4%预应变SMA丝处理过程

(2) SMAHC层合板制备。

相关研究也指出合金丝的数量、预应变和复合材料的结构对SMAHC的模量影响较大^[15]。笔者研究的是模块化、分布式植入SMA的复合材料层合板,模块化SMA的分布方式是一个重要的影响因素,设置典型的对称分布与非对称分布为一组变量。因此,共设置3组变量:SMA丝数量、SMA丝分布方式和SMA丝预应变。为了探究各试验变量对SMAHC刚度的影响规律,准确地估计各试验变量的主效应的大小,进行了三因素两水平的全试验,试验方案见表1。

表1 变刚度复合材料层合板试验方案

试样编号	合金丝数量	排布方式	预应变/%
1	4段	对称	0
2	4段	对称	4
3	4段	非对称	0
4	4段	非对称	4
5	8段	对称	0
6	8段	对称	4
7	8段	非对称	0
8	8段	非对称	4

其中,对称分布方式、非对称分布方式以及试样与SMA丝规格如图2所示。为了方便对SMA丝通电加热,需要将SMA丝引出层合板。

根据试验方案的尺寸规格裁剪玻纤单向布,每层玻纤固化后的平均厚度为0.16 mm,每个试样铺

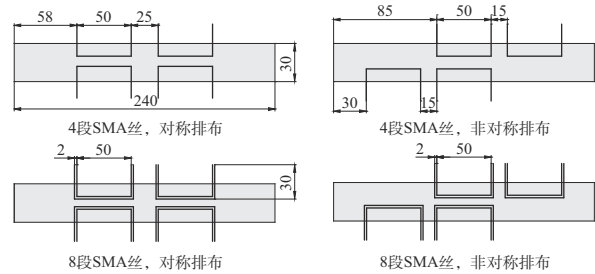


图2 试样尺寸规格及SMA丝位置

10层玻纤单向布,处理好的SMA丝铺在第2层中,试样厚度为1.6 mm左右。采用真空辅助成型工艺制备试样:将准备好的材料按对应的尺寸摆放并固定好后进行固化;先将玻璃板清洗干净,四周固定好黑胶,然后在玻璃板中间涂抹脱模剂;待脱模剂干后,按照一定的间隔放置一层玻纤单向布,在每一层玻纤上按试验方案摆好模块化的SMA丝,用纸胶带固定好位置,然后,依次固定导流管、脱模布、导流网,用密封黑胶和真空薄膜对试样进行密封;最后打开真空泵抽树脂。图3所示为真空辅助成型工艺示意图。

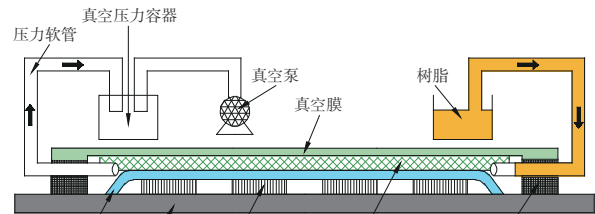


图3 真空辅助成型工艺示意图

真空辅助成型完成后,根据AM-8960A环氧树脂固化标准,将带玻璃板的真空包放入烤箱进行固化,固化条件为60℃×2 h+120℃×2 h。固化完成后,待试样冷却,脱模取出试样,并对试样边缘进行打磨。根据试验方案共制备了8个试样,如图4所示。

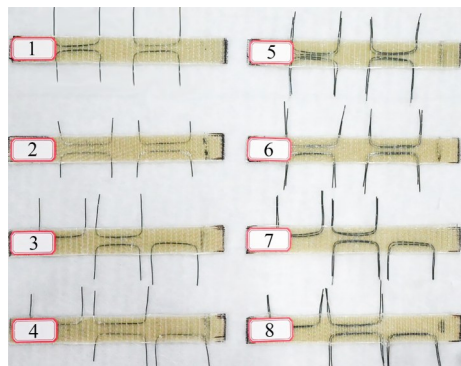


图4 模块化合金丝植入层合板试样

1.4 测试与表征

弯曲性能参照 ASTM-D790-2010 测试,试样尺寸为 240 mm×30 mm×2 mm,跨距为 200 mm,压头速度为 2 mm/min。使用微机控制电子万能试验机测试 SMAHC 层合板在不同温度下的三点压弯刚度,如图 5 所示,合金丝的引出部分按串联的方式接入直流稳压电源;温度传感器探头贴在合金丝的表面,合金丝表面的温度通过采集卡和数据采集 (DAQ) 软件呈现出来;合金丝的温度通过电源电流来控制;在测试过程中使用手持红外测温仪以确保每个模块的合金丝都能正常通电。

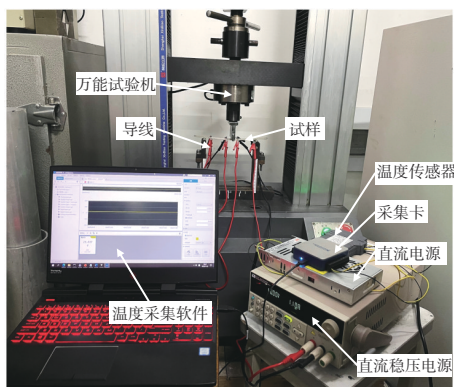


图5 三点压弯试验图

2 仿真

2.1 参数设置

相关材料参数见表 2。玻纤体积分数为 53.6%, 试样平均厚度为 1.5~1.8 mm。

表2 环氧树脂与玻纤的参数

参数	环氧树脂	玻纤
密度/(g·cm ⁻³)	1.10	2.60
拉伸弹性模量/GPa	2.80	72
泊松比	0.35	0.26

在 Abaqus 有限元软件中使用微观力学插件建立纤维束的单胞模型,如图 6 所示,输入表 2 中的参数后,提交计算,最后得出玻纤和树脂组成的纤维束的工程常数见表 3。

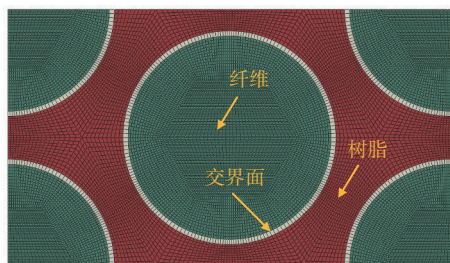


图6 纤维束单胞模型

表3 纤维束参数

参数	值
密度/(g·cm ⁻³)	2.079
纵向弹性模量 E_{11} /GPa	42
横向弹性模量 (E_{22}/E_{33})/GPa	14.69
泊松比 μ_{12}/μ_{13}	0.31
泊松比 μ_{23}	0.31
剪切弹性模量 (G_{12}/G_{13})/GPa	4.3
剪切弹性模量 G_{23} /GPa	3

SMA 的本构模型较为复杂,目前现有的 SMA 本构模型分为:微观力学模型、介观模型和宏观唯象模型 3 类^[18]。其中,宏观唯象模型是基于试验数据拟合的近似描述材料宏观力学行为的模型^[19],易于用数值方法实现,与有限元软件的兼容性高。宏观唯象模型中的 Brinson 模型应用广泛,它将马氏体体积分数分为应力诱发与温度诱发两部分^[20-21],其马氏体相变动力学方程在不同的温度区间有正反两个演化方程。综合考虑精度、计算速率和模型复杂程度,最终选择使用 Brinson 模型,如式(1)所示。

$$\sigma - \sigma_0 = E(\varepsilon - \varepsilon_0) + \Omega_s(\xi_s - \xi_{s0}) + \Omega_T(\xi_T - \xi_{T0}) + \Theta(T - T_0) \quad (1)$$

式(1)中, E 为 SMA 拉伸弹性模量, Ω_s 和 Ω_T 分别为应力诱发和温度诱发马氏体的相变张量, Θ 为热弹性张量, ξ_s 和 ξ_T 分别为应力诱发和温度诱发马氏体体积分数, σ, ε, T 分别为应力、应变和温度,下标 0 代表相变的初始阶段。

实现 SMA 的仿真有 3 种方式:使用商业有限元软件自带的超弹性本构模型;根据理论模型编写有限元二次开发程序,再将其导入商业有限元软件中;使用等效热膨胀系数模型 (ECTE)。ECTE 是 Turner 等^[22]基于非线性热弹性和热膨胀有效系数概念发展的面向 SMA 的工程模型。ECTE 将 SMA 的形状记忆效应等效为热膨胀效应,如式(2)所示。

$$\frac{\Delta\sigma(\varepsilon, \xi, T)}{\bar{E}(\varepsilon, \xi, T)} = \alpha(T)(T - T_{ref}) - \alpha(T_i)(T_i - T_{ref}) \quad (2)$$

式(2)中, $\Delta\sigma(\varepsilon, \xi, T)$ 为时间帧内回复力增量, $\bar{E}(\varepsilon, \xi, T)$ 为时间帧内 SMA 的平均模量, $\alpha(T)$ 为等效热膨胀系数,下标 i 和 ref 分别表示初始量和参考量。

基于 Brinson 模型建立 ECTE,编写 MATLAB 计算程序,计算得出不同预应变对应的热膨胀系数。表 4 为 SMA 的性能参数,其中马氏体与奥氏体的拉伸弹性模量由拉伸试验测得,相变温度由 DSC 测试测得,其余参数参考文献[15]。

表 4 SMA 性能参数

参数	值
奥氏体拉伸弹性模量/GPa	31.58
马氏体拉伸弹性模量/GPa	14.34
泊松比	0.33
热膨胀模量 $\Theta/(\text{MPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	0.55
马氏体开始温度 $M_s/^\circ\text{C}$	39.78
马氏体结束温度 $M_f/^\circ\text{C}$	33.58
奥氏体开始温度 $A_s/^\circ\text{C}$	36.56
奥氏体结束温度 $A_f/^\circ\text{C}$	42.44
最大可回复应变 ε_L	0.06
奥氏体应力影响系数 $C_M/(\text{MPa}\cdot\text{K}^{-1})$	8
马氏体影响系数 $C_A/(\text{MPa}\cdot\text{K}^{-1})$	8

2.2 有限元模型

根据试验方案,建立了植入模块化 SMA 丝的层合板的宏观模型,采用 Abaqus 软件进行有限元分析,模拟 SMA 在热激励下对层合板的刚度调控作用。首先,为了降低计算成本,可对模型进行适当简化。将直径为 1 mm 的合金丝按照横截面面积相等的原则简化为边长为 0.89 mm 的正方形。根据试验方案中的设计尺寸,在 Solidworks 中建立层合板与 SMA 丝的三维模型,然后将其导入 Abaqus 有限元软件中,进行装配。共建立了四个几何模型,如图 7 所示。

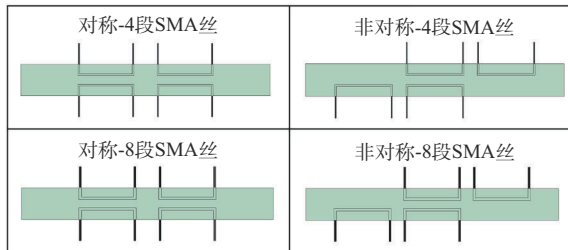


图 7 层合板几何模型图

复合材料层合板被视为两部分组成,即:SMA 丝与复合材料基体(环氧树脂+玻纤)。将 ECTE 计算得到的热膨胀系数赋予到 SMA 的材料属性中。相互作用及边界条件的定义:SMA 与复合材料基体之间的相互作用被定义为“Tie Constraint”。通过多点耦合约束建立层合板端部的边界约束。三点压弯的支柱和压头设为刚体,刚体压头的耦合点加向下的位移 5 mm,采用 C3D8R 单元类型进行网格划分。通过静态求解器分析层合板的准静态弯曲。

2.3 仿真结果

图 8 为层合板的仿真结果图。层合板的载荷-位移曲线可由 Abaqus 后处理得到,从而计算得出层合板的弯曲刚度。依据这种方式计算的 16 组层合板仿真刚度见表 5。

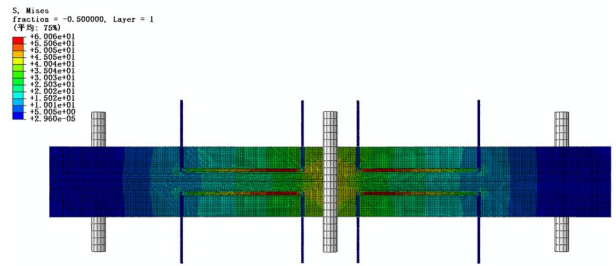


图 8 仿真应力分布图

表 5 层合板仿真刚度 N/mm

试样编号	温度/ $^\circ\text{C}$	
	30	70
1	2.748 1	2.775 7
2	2.765 3	2.779 2
3	2.934 4	2.956 9
4	2.874 1	2.876 3
5	3.471 8	3.502 5
6	3.389 7	3.564 0
7	3.506 3	3.631 2
8	3.501 6	3.616 5

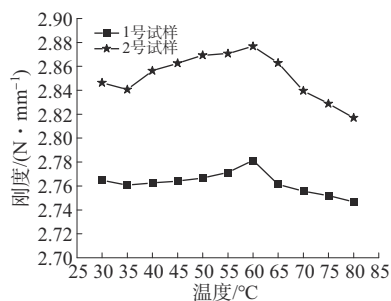
3 结果与讨论

3.1 复合材料层合板变刚度效果

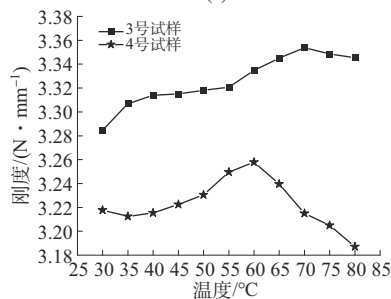
AM-8960A 环氧树脂的模量会随温度升高而降低。在此之前笔者采用双悬臂梁动态机械分析法(DMA)测试 AM-8960A 环氧树脂/玄武岩纤维正交织物复合材料储能模量与温度之间的变化关系,结果表明,温度在 80°C 以下储能模量下降速率较低,且下降量不超过 10%。因此笔者测试 $30\sim 80^\circ\text{C}$ 范围内的层合板的三点弯曲刚度,测试的温度间隔为 5°C 。对 8 组试样进行三点压弯测试,求其不同温度下每组刚度变化,测试结果如图 9 所示。

图 9 显示了不同试样温度与刚度之间的关系。在 30°C 时,测试层合板的刚度,并给 SMA 通电逐次升高温度至 80°C ,每次升温测三次层合板刚度,取其平均值以保证数据准确性。从图 9 中可看出,总体上通电后层合板弯曲刚度略微下降,其原因为通电后 SMA 丝因回复力收缩,导致刚度下降,随着温度的升高,层合板的刚度逐渐增大,试样在 $60\sim 70^\circ\text{C}$ 刚度达到最大值,随后又逐步降低。最大值出现的温度是由 SMA 与环氧树脂共同决定的,环氧树脂的玻璃化转变温度为 $120\sim 130^\circ\text{C}$,SMA 的奥氏体相变初始温度是 36.56°C 。这一现象与 DMA 测试的储能模量与温度的变化关系相同,且具备可重复性。因此,可将这一现象视为稳定的刚度变化趋势。

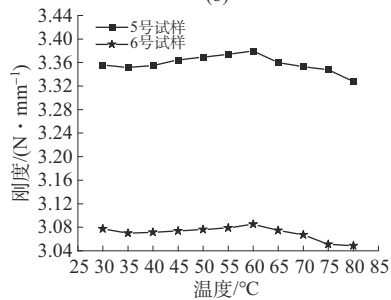
取未通电、 30°C 下的层合板刚度数据进行分析,如图 10 所示,使用控制变量的方式分析 SMA 丝



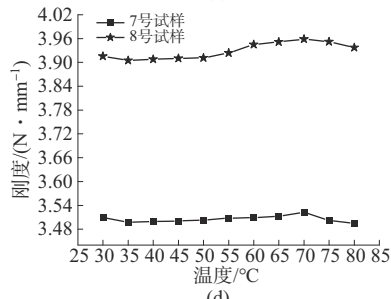
(a)



(b)



(c)

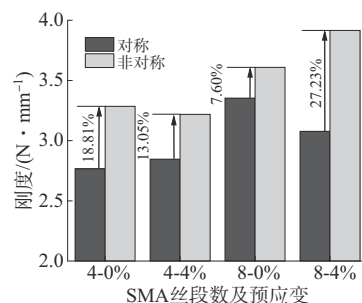


(d)

a—1,2号试样; b—3,4号试样; c—5,6号试样; d—7,8号试样
图9 试验刚度与温度关系图

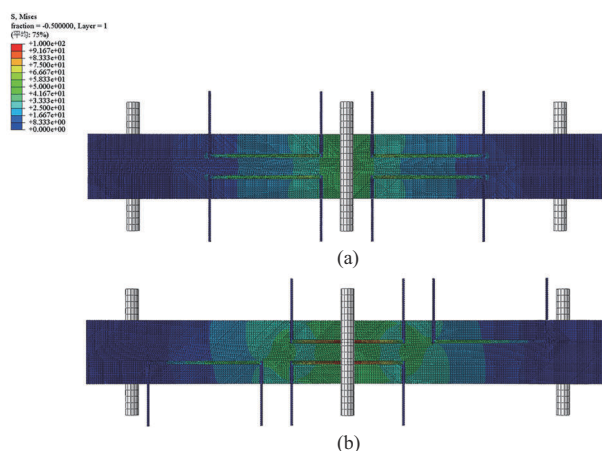
位置分布对刚度的影响。由图10可以发现,非对称布置有利于提升层合板的刚度,4段SMA丝和8段SMA丝的平均刚度提升率为16.67%,其中8段SMA丝4%预应变非对称排布与对称排布相比,其层合板刚度提升最多为27.23%。

图11为不同SMA丝位置排布的仿真应力云图。从图11可以看出不同的位置排布可以改变SMAHC层合板的应力分布。在实际应用中,对需要局部加强的部位能够做到精准调控,且可以通过优化模块化SMA的位置分布节省材料、降低成本。



4-0%表示SMA丝为4段,预应变为0%,其余类同

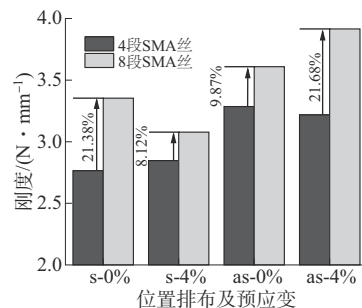
图10 不同SMA丝位置排布下的刚度



a—1号试样应力云图; b—3号试样应力云图

图11 不同SMA位置的仿真应力云图

使用单一变量法分析SMA丝数量对刚度的影响,如图12所示。由图12可以看出,随着SMA数量的增加层合板刚度增大,SMA丝对称排布和SMA丝非对称排布的平均刚度提升率为15.26%,其中SMA非对称排布预应变为4%的情况下,8段SMAHC层合板比4段SMAHC层合板刚度提升21.68%。



s-0%表示为对称排布,预应变0%,as表示为非对称排布,其余类同

图12 不同SMA丝数量下的刚度

从图10和图12的平均值和最大值分析,SMA丝的位置排布对刚度的影响大于SMA丝数量对刚度的影响,从这两张图中也可以看出在其它变量相同的情况下,SMA预应变对层合板刚度的影响规律

不明显。本次试验的最小值刚度值为 2.746 8 N/mm, 出现在 1 号试样 80 °C 时; 最大刚度值为 3.999 5 N/mm, 出现在 8 号试样 70 °C 时; 整体的刚度可调控范围为 45.61%。

3.2 SMAHC 层合板变刚度调控方法

SMAHC 层合板刚度由温度驱动, 用 $F(T)$ 表示, $F(T)$ 由 SMA 数量 $f(T)$ 、单层中 SMA 位置分布 $g(T)$ 及 SMA 预应变 $h(T)$ 和其它因素 $k(T)$ 决定。如图 13 所示, 以刚度最大值对应的温度 T_M 为分界点

对试验数据进行分段拟合, 拟合结果 $F(T)$ 为五次多项式, 如式(3)所示。

$$F(T) = aT^5 + bT^4 + cT^3 + dT^2 + eT + m \quad (3)$$

记录试样刚度最大值对应的温度值, 见表 6。因为复合材料在制备过程中结构的差异性, 不同的试样刚度最大值对应的温度略有不同。但整体位于 60~70 °C 范围内。

表 6 最大刚度及其对应的温度

试样编号	最大刚度/(N·mm ⁻¹)	对应温度/°C
1	2.781 4	60
2	2.880 7	60
3	3.353 8	70
4	3.237 8	60
5	3.369 7	60
6	3.085 1	60
7	3.515 4	70
8	3.958 5	70

根据式(3)得到的每组结果对应系数见表 7。

根据拟合的结果函数可以预测 30~80 °C 区间内每一个温度对应的刚度值, 进而实现精准的刚度调控。

4 结论

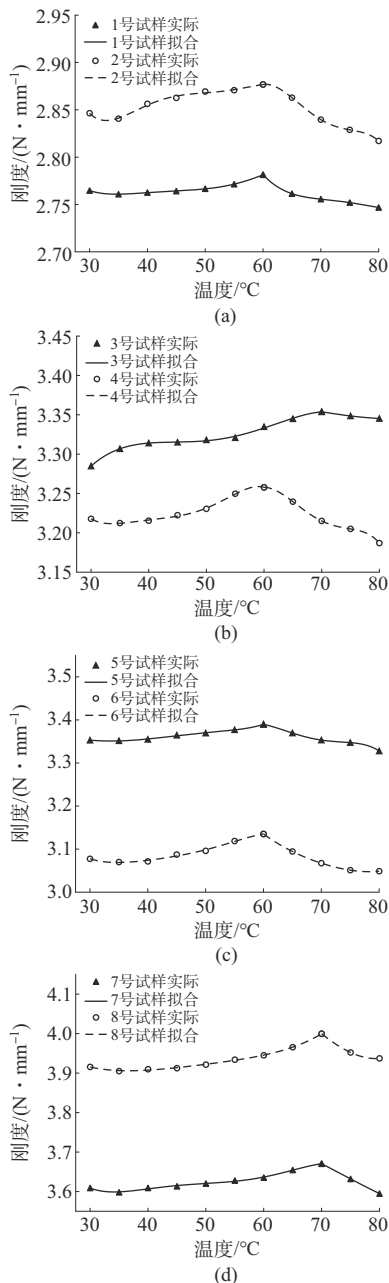
为研究 SMAHC 层合板变刚度调控机制, 将 SMA 模块化植入树脂/玻纤层合板中, 通过三点压弯试验得出不同变量对刚度控制的影响结果, 给出了 SMAHC 的仿真方法, 通过与试验结果对比来验证仿真结果的正确性。该研究得到的主要结论如下:

(1) 对于笔者研究的 SMAHC 层合板, 通电后层合板的弯曲刚度略微下降。出现此现象的原因为通电后 SMA 丝因回复力收缩, 导致层合板刚度出现略微下降。随后随着温度升高, 层合板刚度逐渐增大, 在 60~70 °C 左右达到最大值, 随后又逐步降低。

(2) 位置排布对 SMAHC 板基本刚度的影响最大, SMA 数量的影响次之, SMA 预应变对 SMAHC 板刚度的影响最小。

(3) 通过调整合金丝的温度, 可以精准地实现 SMAHC 层合板的刚度调控。

(4) 模块化、分布式的植入方式能够改变 SMAHC 层合板整体的应力分布, 提升层合板刚度调控精度, 降低 SMA 纤维用量, 而且能保证个别 SMA 失效后层合板整体仍然有一定的变刚度能力, 研究结果可用于实现板式结构可靠、高效的变刚度驱动及精准的刚度调控。



a—1号与2号试样; b—3号与4号试样;
c—5号与6号试样; d—7号与8号试样

图 13 SMAHC 层合板温度-刚度数据拟合

表7 多项式拟合结果对应系数

试样编号	温度区间	a	b	c	d	e	m
1	$T \leq T_M$	-7.600×10^{-09}	1.872×10^{-06}	-1.803×10^{-04}	8.532×10^{-03}	-1.984×10^{-01}	4.576
	$T \geq T_M$	7.694×10^{-09}	-2.146×10^{-06}	2.125×10^{-04}	-7.875×10^{-03}	-2.268×10^{-04}	7.087
2	$T \leq T_M$	-3.347×10^{-08}	8.084×10^{-06}	-7.705×10^{-04}	3.616×10^{-02}	-8.325×10^{-01}	10.35
	$T \geq T_M$	-2.738×10^{-08}	7.249×10^{-06}	-6.792×10^{-04}	2.372×10^{-02}	6.832×10^{-04}	8.510
3	$T \leq T_M$	-8.825×10^{-10}	1.856×10^{-08}	2.134×10^{-05}	-2.290×10^{-03}	8.791×10^{-02}	2.139
	$T \geq T_M$	5.624×10^{-11}	-5.796×10^{-09}	-1.160×10^{-10}	-1.549×10^{-12}	-1.380×10^{-14}	3.398
4	$T \leq T_M$	-4.493×10^{-08}	9.943×10^{-06}	-8.694×10^{-04}	3.763×10^{-02}	-8.062×10^{-01}	10.05
	$T \geq T_M$	-3.268×10^{-08}	8.570×10^{-06}	-7.954×10^{-04}	2.752×10^{-02}	7.929×10^{-04}	9.722
5	$T \leq T_M$	9.733×10^{-09}	-1.958×10^{-06}	1.519×10^{-04}	-5.594×10^{-03}	9.661×10^{-02}	2.738
	$T \geq T_M$	-2.243×10^{-08}	5.765×10^{-06}	-5.238×10^{-04}	1.772×10^{-02}	5.106×10^{-04}	4.570
6	$T \leq T_M$	-2.013×10^{-08}	4.579×10^{-06}	-4.142×10^{-04}	1.871×10^{-02}	-4.218×10^{-01}	6.855
	$T \geq T_M$	4.345×10^{-09}	-1.167×10^{-06}	1.138×10^{-04}	-4.261×10^{-03}	-1.227×10^{-04}	5.658
7	$T \leq T_M$	-1.438×10^{-08}	3.712×10^{-06}	-3.756×10^{-04}	1.863×10^{-02}	-4.520×10^{-01}	7.885
	$T \geq T_M$	1.743×10^{-10}	-2.087×10^{-08}	-4.177×10^{-10}	-5.577×10^{-12}	-4.969×10^{-14}	3.879
8	$T \leq T_M$	3.142×10^{-08}	4.923×10^{-10}	-1.816×10^{-05}	1.664×10^{-03}	-5.938×10^{-02}	4.652
	$T \geq T_M$	7.370×10^{-10}	-7.307×10^{-08}	-1.463×10^{-09}	-1.953×10^{-11}	-1.740×10^{-13}	4.516

参考文献

- [1] Rogers C, Robertshaw H. Shape memory alloy reinforced composites[J]. Engineering Science Preprints, 1988, 25:20–22.
- [2] Xu L D, Shi M F, Wang Z Q, et al. Experimental and numerical investigation on the low-velocity impact response of shape memory alloy hybrid composites[J]. Materials Today Communications, 2020, 26(11). DOI:10.1016/j.mtcomm.2020.101711.
- [3] 马晓宇. 基于形状记忆合金的复合材料车身板件的耐冲击性研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2018.
Ma Xiaoyu. Research on impact resistance of composite autobody panel based on shape memory alloy[D]. Jilin: Jilin University, 2018.
- [4] Gandhi Y, Pirondi A, Collini L. Optimal design of shape memory alloy composite under deflection constraint[J]. Materials, 2019, 12(11). DOI:10.3390/ma12111733.
- [5] 张晓梅, 赵仰生, 任勇生, 等. 嵌入 SMA 丝的复合材料轴的刚度与变形特性研究[J]. 太原科技大学学报, 2019, 40(4):301–310.
Zhang Xiaomei, Zhao Yangsheng, Ren Yongsheng, et al. Deformation and stiffness characteristics study of composite thin-walled shaft with SMA wire[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2019, 40(4):301–310.
- [6] Karimi Mahabadi R, Danesh Pazhooh M, Shakeri M. On the free vibration and design optimization of a shape memory alloy hybrid laminated composite plate[J]. Acta Mechanica, 2020, 232(1): 323–343.
- [7] Ren Y S, Dai Q Y, An R J, et al. Modeling and dynamical behavior of rotating composite shafts with SMA wires[J]. Shock and Vibration, 2014. DOI:10.1155/2014/765875.
- [8] Katsiropoulos C V, Pappas P, Koutroumanis N, et al. Improving the damping behavior of fiber-reinforced polymer composites with embedded superelastic shape memory alloys (SMA) [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(2). DOI: 10.1088/1361-665X/ab6026.
- [9] Vaibhav S, Manish G. Experimental assessment of self-healing characteristics in AA2014matrix with nitinol wire and solder alloy as healing agents[J]. Materials Research Express, 2019, 6(8): 85704–85704.
- [10] Dahnke C, Pottmeyer F, Pinter P, et al. Influence of SMA-induced stress on shape memory alloy metal matrix composites manufactured by continuous composite extrusion[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(8). DOI:10.1088/1361-665X/ab2d6a.
- [11] Han M W, Rodrigue H, Kim H I, et al. Shape memory alloy/glass fiber woven composite for soft morphing winglets of unmanned aerial vehicles[J]. Composite Structures. 2016, 140:202–212.
- [12] Akbari T, Khalili S M R. Numerical simulation of buckling behavior of thin walled composite shells with embedded shape memory alloy wires[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 143: 106193.1 – 106193.13.
- [13] Salim M, Bodaghi M, Kamarian S, et al. Free vibration analysis and design optimization of SMA/Graphite/Epoxy composite shells in thermal environments[J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2018, 15(1). DOI:10.1590/1679-78253070.
- [14] Mehar K, Panda S K, Dewangan H C. Multiscale finite element prediction of thermomechanical flexural strength of nanotube-reinforced hybrid smart composite panel bonded with SMA fibre [J]. Structures, 2020, 28:2 300–2 310.
- [15] Ke J, Gao J, Wu Z Y, et al. Vari-stiffness characteristics of a 3D SMA hybrid basalt woven composite[J]. Composite Structures, 2022, 285. DOI:10.1016/j.compstruct.2022.115192.
- [16] Asadi H, Akbarzadeh A H, Wang Q. Nonlinear thermo-inertial instability of functionally graded shape memory alloy sandwich plates[J]. Composite Structures, 2015, 120:496–508.
- [17] 王明义. 基于形状记忆合金的结构刚度控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
Wang Mingyi. Stiffness control of structure using shape memory

(下转第 28 页)