

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220435-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220435

嵌入流变弹性体智能格栅单元的复材三明治板 弯曲特性研究

王立博^{1,2}, 胡晓岳², 戴智含², 李 晖^{2,3}, 吴海宏³, 韩清凯², 闻邦椿²

(1. 杭州中能透平机械装备股份有限公司, 杭州 310018;

2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819;

3. 河南工业大学 碳纤维复合材料国际合作实验室, 郑州 450001)

摘 要: 对基于磁流变弹性体智能格栅单元的复材三明治板的弯曲特性进行了分析和实验研究。基于一阶剪切变形理论、能量法、最小势能原理、正交多项式法, 建立了该三明治板的弯曲特性分析模型, 在确定了总应变能的基础上, 推导了结构的控制方程, 并成功求解了悬臂边界下该三明治板在线分布载荷作用下的弹性弯曲变形。在分别完成上、下面板和磁流变弹性体格栅功能芯层的制备后, 基于所建立的弯曲特性测试平台, 对试件在不同磁感应强度和磁场控制区域作用下的弯曲变形进行了测试。验证结果表明: 理论模型的最大计算误差不超过 8.2%, 处在误差允许的范围, 可有效预测结构的弯曲特性。研究发现随着内部磁场强度和磁场控制区域数量的增大, 可提升结构的抗弯性能约 15%~21%。

关 键 词: 磁流变弹性体; 智能格栅; 弯曲特性; 复合材料; 三明治板

中图分类号: V233.1

文献标志码: A

Study on the bending properties of composite sandwich sheets embedded with magnetorheological elastomer smart grids

WANG Libo^{1,2}, HU Xiaoyue², DAI Zhihan², LI Hui^{2,3}, WU Haihong³,
HAN Qingkai², WEN Bangchun²

(1. Hangzhou Chinen Turbomachinery Company Limited by Shares, Hangzhou 310018, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation,
Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. International Joint Lab on Carbon Fiber Composites in Henan,
Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The bending properties of composite sandwich sheets embedded with magnetorheological elastomer smart grid units were theoretically and experimentally investigated. A model was proposed to predict the bending characteristics of such sandwich sheets using the first-order shear deformation theory, energy technique, minimal potential energy principle, and the orthogonal polynomial methodology. After the total strain energy was obtained, the governing equation of the structure was deduced. As a result, the elastic bending deformation of such a sheet under the cantilever boundary subjected to the linearly

收稿日期: 2022-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(51970530, U1708257); 中央高校基本科研业务费专项资金(N2103026);

装备预研重点实验室基金(6142905192512)

作者简介: 王立博(1982—), 男, 博士生, 主要从事复合结构动力学设计与优化研究。

通信作者: 李晖(1982—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事复合结构减振降噪研究。E-mail: lh200300206@163.com

引用格式: 王立博, 胡晓岳, 戴智含, 等. 嵌入流变弹性体智能格栅单元的复材三明治板弯曲特性研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220435. WANG Libo, HU Xiaoyue, DAI Zhihan, et al. Study on the bending properties of composite sandwich sheets embedded with magnetorheological elastomer smart grids[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220435.

distributed load can be successfully solved. When the preparation work of the upper and lower panels and the magnetorheological elastomer grid functional core was completed, the structural bending deformation was tested at different magnetic induction amplitudes and magnetic field control regions, based on an established test platform of such a specimen. The verification results showed that the maximum calculation error of the theoretical model did not exceed 8.2%, which was within an allowable error range. Hence, this model is trustworthy to predict the bending characteristics of such composite sandwich structures. It was also found that with the increase of the internal magnetic field amplitude and the number of magnetic field control regions, the structural bending resistance can be further improved by about 15%—21%.

Keywords: magnetorheological elastomer; smart grid; bending property; composite material; sandwich sheet

复合材料三明治板因其具有比刚度大、比强度高等特点^[1-2],被广泛应用于航空、航天、高速列车等领域^[3-4],它们大多在恶劣的力学载荷下工作^[5-6],容易产生大幅变形、分层损伤和疲劳失效等问题,进而引发灾难性的事故。基于磁流变智能格栅单元的复材三明治板,是近年来出现的一种融入新材料轻质高强特征且具有信号感知与静动态力学性能主动控制的新型结构,与传统三明治层合板相比,其具有主动控制能力强、结构承载性能良好和易于批量制备等一系列优点,可在薄壁层合结构的弯曲刚度控制、振动抑制等方面发挥关键作用。因此,非常有必要对该类型三明治板结构的弯曲变形、性能控制等问题开展研究,特别是在早期研发阶段就设计出具有更好刚性、可实现弯曲性能主动控制且高空间利用率的新型结构。

近年来,许多科研工作者研究了复合材料三明治板的弯曲特性,以提高其刚度和承载能力。例如,Chang 等^[7]基于 Mindlin-Reissner 板理论,提出了一种描述波纹夹芯层板在不同边界条件下弯曲特性的闭式解,还研究了结构尺寸参数对其刚度和应力状态的影响规律。Zenkour 等^[8]预测了热机械载荷作用下功能梯度夹芯板的弯曲响应。利用满足边界条件的位移函数,给出了结构弯曲变形的精确解。Li 等^[9]应用四变量板理论,分析了简支功能梯度夹层板在热机械载荷作用下的弯曲响应,讨论了体积分数分布、长径比和热载荷对结构弯曲特性的影响。Li 和 Wang^[10]从理论和实验两个方面研究了三弯曲点弯曲载荷作用下通过 3D 打印获得的不同夹芯构型的复材三明治板的弯曲性能,发现具有桁架夹芯构型的整体结构具有更高的抗弯刚度和强度。Zamanifar 等^[11]采用有限条纹法对波纹夹芯板的静态力学性能开展了

预测研究,获得了不同边界条件和结构参数下的弯曲变形,并通过文献结果证明了该方法的有效性。Mohammadabadi 等^[12]建立了一种具有双轴波纹夹芯的复材三明治板弯曲特性分析模型,发现该类型夹芯可提升结构的抗弯性能。Farrokhabadi 等^[13]利用 ABAQUS 软件对多层波纹夹芯板在三弯曲点弯曲载荷作用下的弯曲行为进行了仿真模拟,讨论了波纹芯几何形状对其承载能力的影响。Krishna 等^[14]采用 ANSYS workbench 软件,对带有金属或纤维增强复材料的不同蜂窝夹芯面板结构的三弯曲点弯曲特性进行了仿真分析,揭示了不同面板材料对其承载能力的影响机理。采用理论分析、测试和数值模拟相结合的手段,Zhang 等^[15]对方形蜂窝-波纹混合芯夹板在弯曲载荷作用下的结构刚度和初始破坏失效模式进行了研究,发现蜂窝填料可显著提高结构的抗弯能力。

从以上文献调研可知,目前人们对传统三明治板的弯曲变形问题关注较多,但对智能复材结构的弯曲特性的研究报道很少,也未关注主动控制对其性能的影响。针对上述研究不足,本文建立了基于磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)智能格栅单元的复材三明治板(Composite sandwich sheet embedded with MRE smart grids, CSS-MSGs)的弯曲特性分析模型。该结构在确定了总应变能的基础上,推导了结构系统的控制方程,并成功求解了悬臂边界下该三明治板在线分布载荷作用下的弹性弯曲变形。同时,在制备获得 CSS-MSGs 试件的基础上,利用所建立的弯曲特性测试平台,对试件在不同磁感应强度和磁场控制区域作用下的弯曲变形进行了测试,验证了所提出的理论模型及其预测结果的正确性。本文的研究可为新型智能复合材料结构的工程应用与性能分析提供理论与实践的参考。

1 理论模型

1.1 模型描述

所建立的 CSS-MSGs 结构弯曲特性分析模型如图 1 所示, 假设其长度为 a 、宽度为 b 、厚度为 h , 在芯层的中面建立全局坐标系 xyz 。假设其处于悬臂边界条件, 且在 $x = X_Q$ 处承受线分布载荷 Q 的作用。另外, CSS-MSGs 结构由碳纤维/树脂上、下面板和 MRE 格栅功能芯层组成, 而该功能芯层又是由格栅功能单元和格栅肋条构成的。其中, 格栅肋条与矩形格栅框通过榫卯进行连接, 而格栅功能单元由矩形格栅框和 4 种功能材料层组成, 这 4 种功能材料层分别包括两层铜线圈层、MRE 层和压电层。考虑到压电层的制备经济成本, 故该层是由一个压电薄膜和高性能树脂材料进行填充而获得的, 通过压电薄膜的正压电效应来实现完全变形或振动的感知。此外, 为了便于分析, 还需要在复合材料面板层中建立局部坐标系, 假设“1”代表纤维主轴方向, “2”代表垂直于纤维主轴方向, “3”代表垂直于 1-2 平面的方向, θ 是“1”和 x 方向之间的夹角。此外, 下标 f、p、c、v、gb 和 gf 分别表示碳纤维/树脂面板层、压电层、铜线圈层、MRE 层、肋条和矩形格栅框。如此, 可假设它们各自对应的长、宽、高和密度用 a_i 、 b_i 、 h_i 、 ρ_i ($i = f, p, c, v, gb, gf$) 表示。

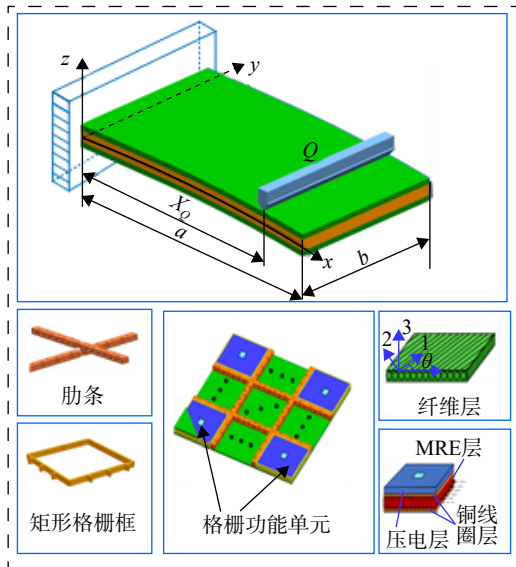


图 1 CSS-MSGs 结构弯曲特性分析模型

Fig. 1 Analysis model of bending characteristics of CSS-MSGs structure

1.2 弯曲特性求解

MRE 层的切变模量与磁感应强度有关^[16], 为

了描述磁感应强度与其模量之间的关系, 本文采用多项式法将 MRE 的切变模量 G_v 定义为

$$G_v = a_0 + a_1 B + a_2 B^2 + \cdots + a_n B^n \quad (1)$$

式中 a_0 、 a_1 、 $\cdots$ 、 a_n 为与缠绕在 MRE 周围的铜线圈层产生的内部磁场相关的多项式系数。

根据一阶剪切变形理论^[17], 假设所研究的 CSS-MSGs 结构的位移场为

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\varphi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\varphi_y(x, y, t) \\ w &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 u_0 、 v_0 和 w_0 表示该类型三明治板中面任一点沿 x 、 y 和 z 三个方向的位移分量, t 表示时间, φ_x 和 φ_y 分别表示 y - z 及 x - z 面内的转角。

CSS-MSGs 结构的应力-位移关系为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 ε_x 、 ε_y 、 ε_z 、 ε_{xy} 、 ε_{xz} 、 ε_{yz} 分别代表沿 x 、 y 和 z 方向的线应变与 y - z 、 x - z 和 x - y 方向的剪应变, ε_x^0 、 ε_y^0 、 ε_{xy}^0 为相应的中面应变, k_x 、 k_y 和 k_{xy} 为曲率, 它们表达式为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

CSS-MSGs 结构的应力-应变关系为

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}^j & Q_{12}^j & & & \\ & Q_{12}^j & Q_{22}^j & & \\ & & & Q_{44}^j & \\ & & & & Q_{55}^j \\ & & & & & Q_{66}^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

($j = f, p, v, c, gf$)

式中对于压电层, MRE, 肋条和矩形格栅框, 式中的刚度系数 Q_{ij}^d 可表示为

$$\begin{aligned} Q_{11}^d &= Q_{22}^d = \frac{E_d}{1 - \nu_d^2}, \quad Q_{12}^d = Q_{21}^d = \frac{\nu_d E_d}{1 - \nu_d^2} \\ Q_{44}^d &= Q_{55}^d = Q_{66}^d = G_{p12} \quad (d = p, v, gb, gf) \end{aligned} \quad (6)$$

对于铜线圈层, 式(5)中的刚度系数 Q_{ij}^c 可表示为

$$\begin{aligned} Q_{11}^c &= \frac{E_{c1}}{1 - \nu_{c12}\nu_{c21}}, & Q_{12}^c &= Q_{21}^c = \frac{\nu_{c12}E_{c2}}{1 - \nu_{c12}\nu_{c21}} \\ Q_{22}^c &= \frac{E_{c2}}{1 - \nu_{c12}\nu_{c21}}, & Q_{66}^c &= G_{c12} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 E_{c1} 和 E_{c2} 别代表铜线圈在 1 方向和 2 方向的弹性模量, ν_{c12} 和 ν_{c21} 分别为对应的泊松比, G_{c12} 为铜线圈层的 1-2 面的切变模量。

由于构成纤维/树脂层的每层碳纤维主轴方向与整体坐标系之间有一定夹角 θ , 因此, 用应力-应变转轴公式计算获得第 k 层复合材料层在整体坐标系下的应力-应变关系如下:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \\ & & & \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} \\ & & & \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix}^k \quad (8)$$

式中 $\bar{Q}_{ij}$ 为偏轴刚度系数, 其表达式为

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}^f \cos^4 \theta_k + 2(Q_{12}^f + 2Q_{66}^f) \sin^2 \theta_k \cos^2 \theta_k + Q_{22}^f \sin^4 \theta_k \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11}^f + Q_{22}^f - 4Q_{66}^f) \sin^2 \theta_k \cos^2 \theta_k + \\ &\quad Q_{12}^f (\sin^4 \theta_k + \cos^4 \theta_k) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}^f \cos^4 \theta_k + 2(Q_{12}^f + 2Q_{66}^f) \sin^2 \theta_k \cos^2 \theta_k + \\ &\quad Q_{22}^f \cos^4 \theta_k \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11}^f - Q_{12}^f - 2Q_{66}^f) \sin \theta_k \cos^3 \theta_k + \\ &\quad (Q_{12}^f - Q_{22}^f + 2Q_{66}^f) \sin^3 \theta_k \cos \theta_k \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11}^f - Q_{12}^f - 2Q_{66}^f) \sin^3 \theta_k \cos \theta_k + \\ &\quad (Q_{12}^f - Q_{22}^f + 2Q_{66}^f) \sin \theta_k \cos^3 \theta_k \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11}^f + Q_{12}^f - 2Q_{12}^f - 2Q_{66}^f) \sin^2 \theta_k \cos^2 \theta_k + \\ &\quad Q_{66}^f (\sin^4 \theta_k + \cos^4 \theta_k) \\ \bar{Q}_{44} &= Q_{44}^f \cos^2 \theta_k + Q_{55}^f \sin^2 \theta_k \\ \bar{Q}_{55} &= Q_{55}^f \cos^2 \theta_k + Q_{44}^f \sin^2 \theta_k \\ \bar{Q}_{45} &= (Q_{55}^f + Q_{44}^f) \sin \theta_k \cdot \cos \theta_k \end{aligned} \quad (9)$$

式中 Q_{ij}^f 为碳纤维/树脂层的刚度系数, 可表示为

$$\begin{aligned} Q_{11}^f &= \frac{E_{f1}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}}, & Q_{12}^f &= Q_{21}^f = \frac{\nu_{f12}E_{f2}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}}, \\ Q_{66}^f &= G_{f12}, & Q_{22}^f &= \frac{E_{f2}}{1 - \nu_{f12}\nu_{f21}}, & Q_{44}^f &= G_{f23}, \\ Q_{55}^f &= G_{f13}, & \nu_{f21} &= \nu_{f12} \frac{E_{f2}}{E_{f1}} \end{aligned} \quad (10)$$

式中 E_{f1} 、 E_{f2} 分别为碳纤维/树脂层沿着纤维“1”方向、纤维“2”方向的弹性模量, G_{f12} 、 G_{f23} 和 G_{f13} 分别为碳纤维/环氧树脂层的 1-2、2-3、1-3 面的切变

模量, ν_{f12} 为碳纤维/环氧树脂层的泊松比。

进一步, 碳纤维/树脂层、MRE 层、铜线圈层、压电层、肋条和矩形格栅框分别对应的应变能 U_i 为

$$U_i = \int_{V_i} \sigma_x^i \varepsilon_x^i + \sigma_y^i \varepsilon_y^i + \tau_{xy}^i \gamma_{xy}^i + \tau_{yz}^i \gamma_{yz}^i + \tau_{xz}^i \gamma_{xz}^i dV^i \quad (i = f, c, v, p, gb, gf) \quad (11)$$

式中 V 是构成格栅功能单元的各部分的体积。

如此, CSS-MSGs 结构总应变能 U 可表示为

$$U = U_p + U_v + U_c + U_{gb} + U_{gf} + U_f \quad (12)$$

$$W_b = \int_A Q \omega' dA \quad (13)$$

根据最小势能原理, 可获得如下控制方程:

$$\delta U - \delta W_b = 0 \quad (14)$$

处理后可得:

$$\begin{aligned} \int_V \sigma_x \delta \varepsilon_x + \sigma_y \delta \varepsilon_y + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz} + \\ \tau_{xz} \delta \gamma_{xz} dV - \int_A Q \delta \omega' dA = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

将式(5)代入式(15)中, 并对 z 积分, 可得:

$$\begin{aligned} \int_A N_x \delta \varepsilon_x + N_y \delta \varepsilon_y + N_{xy} \delta \gamma_{xy} + M_x \delta k_x + M_y \delta k_y + \\ M_{xy} \delta k_{xy} + Q_{yz} \delta \gamma_{yz} + Q_{xz} \delta \gamma_{xz} dA - \int_A Q \delta \omega' dA = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

式中 N_x 、 N_y 、 N_{xy} 为内力, M_x 、 M_y 、 M_{xy} 为转矩, Q_{yz} 、 Q_{xz} 为横向剪力, 其具体表达式如下:

$$\begin{aligned} (N_x^i, N_y^i, N_{xy}^i) &= \int_{h_i} (\sigma_x^i, \sigma_y^i, \sigma_{xy}^i) dz \\ (M_x^i, M_y^i, M_{xy}^i) &= \int_{h_i} (\sigma_x^i, \sigma_y^i, \sigma_{xy}^i) z dz \\ (Q_{yz}^i, Q_{xz}^i) &= \int_{h_i} (\sigma_{yz}^i, \sigma_{xz}^i) z dz \\ (i = p, c, gf, gb) \end{aligned} \quad (17)$$

将式(3)代入式(12)中, 分别令 δu_0 、 δv_0 、 δw_0 的系数等于零, 可得到如下平衡方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} &= 0, & \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + Q &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

为了求解 CSS-MSGs 结构的弯曲变形, 将其位移函数定义为

$$\begin{aligned} \bar{W} &= \sum_{i_a=1}^{I_a} \sum_{j_a=1}^{J_a} a_{i_a j_a} P_{i_a}(x) P_{j_a}(y) \sin(\omega t) \\ (\bar{W} &= u_0, v_0, w_0, \phi_x, \phi_y) \end{aligned} \quad (19)$$

式中 $a_{ij} = A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij}, E_{ij}$ 为待定的 Ritz 参数,

$p_i(\xi)$ 和 $p_i(\eta)$ 为一系列正交多项式, I_a 和 J_a 为截断系数。通过对满足边界条件的多项式函数进行正交化处理来获得一系列的正交多项式^[18]:

$$\begin{aligned} P_1(\xi) &= \chi(\xi), & P_1(\eta) &= \kappa(\eta), \\ P_2(\phi) &= (\phi - H_2) P_1(\phi) \\ P_i(\phi) &= (\phi - H_i) P_{i-1}(\phi) - V_i P_{i-2}(\phi), \\ \phi &= \xi, \eta, & i > 2 \end{aligned} \quad (20)$$

式中 H_i 和 V_i 为系数函数, 其表达式分别为

$$\begin{aligned} H_i &= \frac{\int_0^1 W(\phi) [P_{i-1}(\phi)]^2 \phi d\phi}{\int_0^1 W(\phi) [P_{i-1}(\phi)]^2 d\phi} \\ V_i &= \frac{\int_0^1 W(\phi) P_{i-1}(\phi) P_{i-2}(\phi) \phi d\phi}{\int_0^1 W(\phi) [P_{i-2}(\phi)]^2 d\phi} \\ \phi &= \xi, \eta \end{aligned} \quad (21)$$

式中 $W(\phi)$ 是权函数, 通常取 $W(\phi) = 1$ 。而 $\chi(\xi)$ 和 $\kappa(\eta)$ 是满足边界条件的多项式函数, 具有如下的形式:

$$\begin{aligned} \chi(\xi) &= \xi^p (1 - \xi)^q, \\ \kappa(\eta) &= \eta^r (1 - \eta)^s \\ \xi &= x/a, & \eta &= y/b \end{aligned} \quad (22)$$

对于本文所研究的悬臂条件, 可取 $p=2, q=0, r=0, s=0$ 。

将式(3)和式(16)代入式(15)中, 可得:

$$KB = P \quad (23)$$

式中 K 为刚度矩阵, B 为位移矩阵, P 为广义力矩阵。

最后, 通过求解式(23), 求出待定 Ritz 参数, 再将 Ritz 参数代入到位移函数(式(19))中, 即可求结构的弯曲变形 w_0 。

2 弯曲特性测试与验证

2.1 试件制备

CSS-MSGs 结构分为上、下面板层和格栅功能芯层。首先, 制备面板层, 其制备流程如下:

1) 将钢化玻璃放置在工作台上, 用酒精清洗钢化玻璃表面, 待酒精挥发后, 用胶头滴管将脱模剂滴在玻璃板表面。

2) 将碳纤维布按照一定角度逐层铺设在玻璃板上, 并将其刮平和压实。然后, 在钢化玻璃四周贴好密封胶带, 将真空袋铺在密封胶带上, 在真空袋边角处裁剪一个小孔, 使用真空泵将真

空袋内的空气抽走。

3) 将铺设好的碳纤维布以及钢化玻璃放入热箱中, 编写加热程序, 设定升温速率和加热时间, 设置完成后开始加热。待试件冷却后, 从热箱中取出, 进行脱模、切割、修剪处理后, 即可获得纤维/树脂复材面板试件。图 2 给出了上、下面板层的制备流程图。

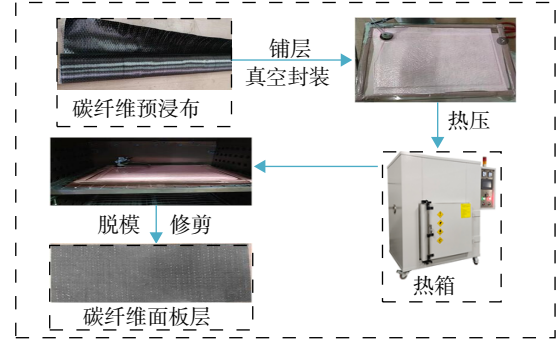


图 2 上、下面板层的制备流程

Fig. 2 Preparation process of upper and lower plate layers

进一步, 制备基于 MRE 的格栅功能芯层, 其制备流程如下:

1) 将炭基铁粉、硅油、硅橡胶以 7 : 1.5 : 1.5 的质量比例混合, 用玻璃棒搅拌均匀。静置并去除气泡使上述混合物在室温对应的强磁场环境下固化, 待大约 48~72 h 实现块状 MRE 材料的制备。

2) 将铜线缠绕在 3D 打印获得的绕线模具上, 并在铜线上均匀地涂刷无水乙醇, 待其挥发后, 将铜线圈绕线模具上取下。将 MRE 分别放入缠绕好的铜线圈中, 并在每个铜线圈外表面粘贴一片压电薄膜材料。

3) 将相应的嵌入 MRE 材料的各个铜线圈嵌入到 3D 打印获得的矩形格栅框, 同时将压电薄膜与环氧树脂材料固化。然后, 将 3D 打印好的多个肋条通过卡槽每个格栅功能单元组装在一起, 以此获得嵌入多个矩形 MRE 材料的格栅功能芯层。

4) 最后, 利用环氧树脂黏合剂将上、下碳纤维/树脂面板黏结在制作好的芯层的上下两侧, 待固化成型后, 便可获得 CSS-MSGs 结构, 其对应的制备流程图如图 3 所示。

2.2 测试系统与流程

为了验证所建立模型的正确性, 搭建了如图 4 所示的弯曲特性测试平台。

实验仪器主要包括通力 CGQ-PM-200 力传感器、Fiaeye LSM-5 位移传感器、24 V 直流电源、可

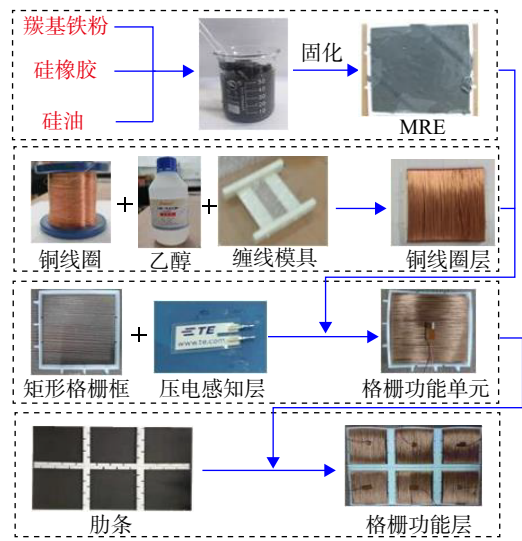


图 3 CSS-MSGs 结构制备流程图

Fig. 3 Preparation flow chart of the CSS-MSG structure

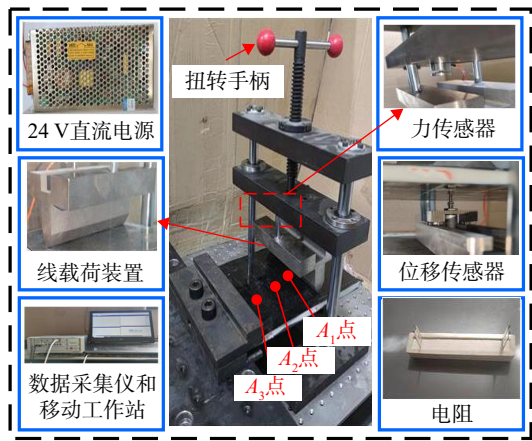


图 4 CSS-MSGs 结构弯曲特性测试平台

Fig. 4 Bending characteristic test platform of the CSS-MSGs structure

变电阻、数字万用表、LMS 数据采集仪、笔记本电脑移动工作站和自行设计的弯曲力加载装置。该装置由线载荷装置、丝杠、滑块、固定组件、导杆、悬臂边界约束夹具等部件组成。通过扭转手柄来控制线分布载荷的大小。直流电源和电阻器用于为铜线圈提供电流,从而使 CSS-MSGs 结构的每个 MRE 在内部磁场的作用下产生磁流变效应。数字万用表用来测试电路中电流的大小。位移传感器和力传感器分别用来获取结构在线载荷力作用时弯曲变形所产生的位移信号和力信号,并通过 LMS 数据采集仪将上述信号采集到移动工作站中进行数据存储和分析。值得指出的是,在实验测试之前,力传感器已嵌入在加载装置和加载组件之间,位移传感器被布置到结构的下表面进行测量,为了提高测试精度,选取 A_1 、 A_2

和 A_3 这 3 个位移测量点,坐标分别为 $(2a/3, b/2)$ 、 $(a/2, b/2)$ 和 $(a/3, b/2)$,而此时结构在距离悬臂约束端 $2a/3$ 处受到线分布载荷力的作用。

具体实验时,首先在无磁场环境下开展 CSS-MSGs 结构的弯曲变形测试;进一步,在连续改变电流条件后,在不同的磁感应强度下实现结构的弯曲特性测试;最后,测试不同 MRE 磁场控制区域下结构的受力与变形,并评估主动控制方式和加载的内部磁场大小对其弯曲特性的影响规律。此时,加载的线分布载荷力为在 $0\sim 100\text{ N}$ 范围内。

2.3 理论计算与测试结果对比

为了验证计算结果,采用第 1 部分的模型在不同的磁感应强度和磁场控制区域下对 CSS-MSGs 结构的弯曲特性进行计算。首先在不同的磁场强度下开展测试,利用基于固有频率的实验数据,通过迭代辨识方法^[19-20]获得与磁场加载相关的系数 $a_0=2.5$, $a_1=5.4$, $a_2=190.4$, $a_3=-4\ 012$, $a_4=35\ 150$, $a_5=-137\ 200$, $a_6=190\ 500$ 。另外,在计算过程中,表 1 给出了所采用的该结构对应的各个部分的材料与尺寸参数。

表 1 理论分析时的材料与尺寸参数

Table 1 Material and dimensional parameters in theoretical analysis

类型	参数和数值
铜线圈层	$a_c = 80\text{ mm}$, $b_c = 80\text{ mm}$, $h_c = 2\text{ mm}$, $E_c = 120 \times 10^3\text{ MPa}$, $G_c = 3 \times 10^3\text{ MPa}$, $\nu_c = 0.25$, $\rho_c = 7\ 800\text{ kg/m}^3$
肋条	$a_{gb} = 278\text{ mm}$, $b_{gb} = 13\text{ mm}$, $h_{gf} = 1\text{ mm}$ $E_{gb} = 110 \times 10^2\text{ MPa}$, $G_{gb} = 2.5 \times 10^2\text{ MPa}$ $\nu_{gb} = 0.4$, $\rho_{gb} = 2\ 500\text{ kg/m}^3$
MRE 层	$a_v = 80\text{ mm}$, $b_v = 80\text{ mm}$, $h_v = 5\text{ mm}$, $E_v = 12\text{ MPa}$, $G_v = 6\text{ MPa}$, $\nu_v = 0.47$, $\rho_v = 4\ 000\text{ kg/m}^3$
压电层	$a_p = 80\text{ mm}$, $b_p = 80\text{ mm}$, $h_p = 1\text{ mm}$, $E_p = 76 \times 10^3\text{ MPa}$, $G_p = 4\text{ MPa}$, $\nu_p = 0.32$, $\rho_p = 3\ 500\text{ kg/m}^3$
矩形格栅框	$a_{gf} = 84\text{ mm}$, $b_{gf} = 84\text{ mm}$, $h_{gf} = 9\text{ mm}$ $E_{gf} = 1.1 \times 10^4\text{ MPa}$, $G_{gf} = 2.5 \times 10^2\text{ MPa}$ $\nu_{gf} = 0.4$, $\rho_{gf} = 2\ 500\text{ kg/m}^3$
碳纤维/树脂面板层	$a_f = 278\text{ mm}$, $b_f = 181\text{ mm}$, $h_f = 1.4\text{ mm}$, $E_{f1} = 150 \times 10^3\text{ MPa}$, $E_{f2} = 8 \times 10^3\text{ MPa}$, $G_{f12} = G_{f13} = G_{f23} = 4 \times 10^3\text{ MPa}$, $\nu_f = 0.3$, $\rho_f = 1\ 618\text{ kg/m}^3$

图 5 给出了在悬臂边界条件下仅控制约束端附近的一个磁场控制区域时,测试获得的 CSS-MSGs 结构在不同磁感应强度下多个测点的弯曲变形峰值及其最大变化率 $D_{\max}$ 。同时,将理论计

算结果及其相对于测试结果的最大计算误差 $R_{\max}$ 也一并列入该图中。从中可以看出, 模型的计算误差不得超过为 8.2%, 处在误差允许范围内, 可以利用其该模型预测内部磁场主动控制后 CSS-MSGs 结构的弯曲特性问题。另外, 随着磁感应强度从 0T 增加到 0.18T, CSS-MSGs 结构的抗弯性能也随之增强, 因为相对于未加载磁场状态, 其弯曲变形的下降峰值为 15.6%。因此, 可通过增大内部磁感应强度的大小, 来提升其弯曲性能的主动控制效果。

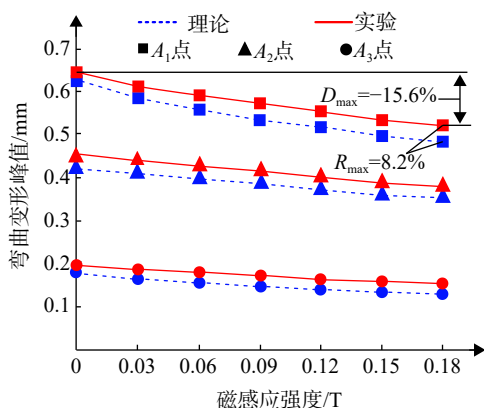


图 5 不同磁感应强度作用下多个测点的弯曲变形峰值计算与测试结果对比

Fig. 5 Comparison of calculation and test results of the peaks of bending deformation with several measurement points and different magnetic field intensities

图 6 给出了在 0.12 T 磁感应强度下, 不同磁场控制区域作用下 CSS-MSGs 结构在多个测点的弯曲变形峰值计算与测试结果的对比图, 从中可以看出, 3 个测点的最大计算误差分别为 $R_{1\max}=7.8\%$, $R_{2\max}=5.9\%$ 和 $R_{3\max}=4.2\%$, 且测试获得的在不同磁场控制区域下 3 个测点的弯曲变形峰值的最大变化率 $D_{1\max}=20.8\%$, $D_{2\max}=16.1\%$ 和 $D_{3\max}=14.5\%$ 。因此, 可看出增加该类型结构的 MRE 控制区域, 还可进一步提升其抗弯性能。此外, 由于 A_1 到 A_3 这 3 个测点距离约束端越来越远, 它们各自对应的最大弯曲变形也依次下降, 这表明了距离结构约束端越远的位置, 其在主动控制下弯曲性能的提升就越显著。最后, 仍有必要对模型预测误差的来源进行分析, 其可能来自于下面方面: ①没有考虑相邻铜线圈磁场的耦合效应; ②肋条和矩形格栅框存在缺口, 但在理论建模过程中忽视了缺口对结构刚度的影响; ③建模过程中忽略了弯曲造成的结构产生的材料分层与损伤问题。后续研究应尽可能在建模与分析过程中考

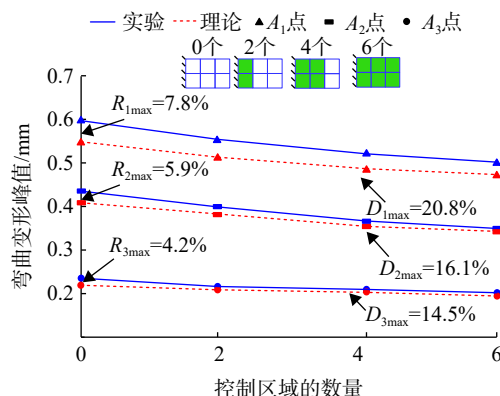


图 6 不同磁场控制区域作用下多个测点的弯曲变形峰值计算与测试结果对比

Fig. 6 Comparison of calculation and test results of the peaks of bending deformation with several measurement points and different magnetic field control regions

虑上述因素, 则可进一步提升预测精度。

3 结 论

本文建立了 CSS-MSGs 结构的弯曲特性分析模型, 在制备该结构试件的基础上, 通过实验测试数据, 验证了理论模型的正确性, 同时对计算误差来源进行了客观分析。研究发现在相同控制区域下, 随着磁感应强度从 0T 增加到 0.18T, 结构弯曲变形下降的峰值为 15.6%; 在相同磁感应强度的条件下, 其弯曲变形的峰值减少了 20.8%。因此, 通过对 CSS-MSGs 结构的内部磁场进行调控, 确实可实现弯曲性能的主动控制。

本文提出的相关理论模型可为分析与预估新型智能复材三明治板结构的静力学问题提供有效的分析工具, 对其稍加改进, 亦可用于其他类型的智能复材结构的弯曲性能预测。然而, 本文在建模过程中忽略了铜线圈通电产生的热效应对结构性能的影响, 这在一定程度上可能会影响理论模型预测结果的准确性。后续研究有必要考虑上述热效应, 建立更加准确的理论模型。同时, 在结构设计与制备中应考虑散热问题, 以提升 CSS-MSGs 结构的弯曲控制效果。

参考文献:

- [1] 李晖, 孙伟, 许卓, 等. 纤维增强复合薄板振动测试与分析方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
LI Hui, SUN Wei, XU Zhuo, et al. Test and analysis method for vibration of fiber reinforced composite sheet[M]. Beijing: China Machine Press, 2019. (in Chinese)
- [2] HUDA Z, EDI P. Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: a review[J]. Materials & Design, 2013,

- 46: 552-560.
- [3] YEH J Y. Vibration analysis of sandwich rectangular plates with magnetorheological elastomer damping treatment[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(3): 035010.
- [4] YARALI E, ALI FARAJZADEH M, NOROOZI R, et al. Magnetorheological elastomer composites: modeling and dynamic finite element analysis[J]. *Composite Structures*, 2020, 254: 112881.
- [5] LI Hui, WANG Xintong, HU Xiaoyue, et al. Vibration and damping study of multifunctional grille composite sandwich plates with an IMAS design approach[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 223: 109078.
- [6] 李晖, 孙伟, 常永乐, 等. 具有振幅依赖性的纤维增强复合薄板非线性阻尼的时域测试方法[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(5): 169-174, 187.
- LI Hui, SUN Wei, CHANG Yongle, et al. Time domain test method for nonlinear damping of a fiber-reinforced composite thin plate with amplitude dependence[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(5): 169-174, 187. (in Chinese)
- [7] CHANG Wanshu, VENTSEL E, KRAUTHAMMER T, et al. Bending behavior of corrugated-core sandwich plates[J]. *Composite Structures*, 2005, 70(1): 81-89.
- [8] ZENKOUR A M, ALGHAMDI N A. Bending analysis of functionally graded sandwich plates under the effect of mechanical and thermal loads[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2010, 17(6): 419-432.
- [9] LI Dongdong, DENG Zongbai, XIAO Huaizhi. Thermomechanical bending analysis of functionally graded sandwich plates using four-variable refined plate theory[J]. *Composites: Part B Engineering*, 2016, 106: 107-119.
- [10] LI Tiantian, WANG Lifeng. Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials[J]. *Composite Structures*, 2017, 175: 46-57.
- [11] ZAMANIFAR H, SARRAMI-FOROUSHANI S, AZHARI M. Static and dynamic analysis of corrugated-core sandwich plates using finite strip method[J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 30-51.
- [12] MOHAMMADABADI M, YADAMA V, SMITH L. The effect of plate theories and boundary conditions on the bending behavior of a biaxial corrugated core sandwich panel[J]. *Composite Structures*, 2020, 241: 112133.
- [13] FARROKHABADI A, AHMAD TAGHIZADEH S, MADADI H, et al. Experimental and numerical analysis of novel multi-layer sandwich panels under three point bending load[J]. *Composite Structures*, 2020, 250: 112631.
- [14] KRISHNA P S, VEMULA A M, AHAMED P U, et al. Bending analysis of honeycomb sandwich panels with metallic face sheets and GFRP core[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 60: 1537-1547.
- [15] ZHANG Zhijia, WEI Xin, WU Ke, et al. Failure analysis of brazed sandwich structures with square honeycomb-corrugation hybrid cores under three-point bending[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 170: 108591.
- [16] VEMULURI R B, RAJAMOHAN V, ARUMUGAM A B. Dynamic characterization of tapered laminated composite sandwich plates partially treated with magnetorheological elastomer[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2018, 20(3): 308-350.
- [17] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- SHEN Guanlin, HU Gengkai. *Mechanics of composite materials*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [18] MAHI A, ADDA BEDIA E A, TOUNSI A. A new hyperbolic shear deformation theory for bending and free vibration analysis of isotropic, functionally graded, sandwich and laminated composite plates[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(9): 2489-2508.
- [19] LI Hui, WANG Wenyu, WANG Xintong, et al. A nonlinear analytical model of composite plate structure with an MRE function layer considering internal magnetic and temperature fields[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 200: 108445.
- [20] LI Hui, WU Tengfei, GAO Zhijiang, et al. An iterative method for identification of temperature and amplitude dependent material parameters of fiber-reinforced polymer composites[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 184: 105818.

(编辑: 张 雪)