

碳纤维/环氧树脂拉扭多耦合效应层合板设计与试验验证

崔达 张鸣昊 李道奎

Design and experimental verification of carbon fiber/epoxy resin multi-coupling laminates with extension-twisting coupling effect

CUI Da, ZHANG Minghao, LI Daokui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240716.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳/玻混杂纤维铺层结构对风力机叶片弯扭耦合特性的影响

Influence of carbon/glass hybrid fiber layup structure on the bending-twisting coupling behavior of wind turbine blades
复合材料学报. 2023, 40(7): 3912–3920 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220915.006>

基于新修正偶应力的增强型Reddy层合板热尺度效应分析

Thermal scale effect analysis of enhanced Reddy's laminated composite based on new modified couple stress theory
复合材料学报. 2022, 39(1): 424–430 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210301.003>

基于遗传算法的碳纤维增强树脂复合材料层合板单搭胶接结构的多目标优化

Multi-objective optimization of adhesively bonded single-lap joints of carbon fiber reinforced polymer laminates based on genetic algorithm
复合材料学报. 2021, 38(6): 1847–1858 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200824.001>

低速多次冲击下碳纤维/环氧树脂基复合材料层合板失效机制及剩余强度评估

Failure mechanism and assessment of residual strength of carbon fiber/epoxy resin matrix composite laminates under multiple impacts at low velocities
复合材料学报. 2023, 40(9): 5359–5370 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230510.001>

基于多场耦合方法的厚截面复合材料固化过程的多目标优化

Multi-objective optimization for curing process of thick composite based on multi-physics coupling method
复合材料学报. 2021, 38(2): 526–535 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200603.004>

碳纤维增强聚丙烯复合材料管件“成形-弯曲”耦合数值模型

"Forming-bending" coupling numerical model for the carbon fiber reinforced polypropylene composite tube
复合材料学报. 2024, 41(6): 2947–2958 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231016.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

碳纤维/环氧树脂拉扭多耦合效应层合板设计与试验验证



分享本文

崔达^{1,2,3}, 张鸣昊^{1,3}, 李道奎^{*1,3}

(1. 国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410073; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000;

3. 空天任务智能规划与仿真湖南省重点实验室, 长沙 410073)

摘要: 针对碳纤维/环氧树脂 (Carbon fiber reinforced epoxy resin, CF/EP) 拉扭多耦合效应层合板湿热稳定机制不明、耦合效应不强的问题, 开展碳纤维/环氧树脂拉扭多耦合效应层合板设计与试验验证研究。引入复合材料层合板的几何因子, 推导了拉扭多耦合效应层合板湿热稳定条件。基于湿热稳定条件, 建立了拉扭多耦合效应层合板的非对称铺层优化设计模型, 利用遗传算法-序列二次规划 (Genetic algorithm-sequential quadratic program, GA-SQP) 混合优化算法求解得到了拉扭耦合效应最大的层合板的铺层角度规律。基于三维数字图像相关方法 (Three-dimension digital image correlation, 3D-DIC) 完成了层合板拉扭耦合效应的测量试验。数值仿真和试验结果表明, 当拉扭多耦合效应层合板的铺层角度满足其湿热稳定条件时, 层合板不会发生固化变形; 多耦合效应的引入能够显著提升层合板的拉扭耦合效应, 最大可达 30% 以上。

关键词: 湿热稳定; 拉扭多耦合效应层合板; 优化设计; 试验验证; 几何因子; 鲁棒性分析

中图分类号: TB332; O341

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2025)04-2257-13

Design and experimental verification of carbon fiber/epoxy resin multi-coupling laminates with extension-twisting coupling effect

CUI Da^{1,2,3}, ZHANG Minghao^{1,3}, LI Daokui^{*1,3}

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Hunan Key Laboratory of Intelligent Planning and Simulation for Aerospace Missions, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to reveal the mechanism of hygro-thermal stability and solve the problem of insufficient coupling effect, the design and experimental verification of carbon fiber/epoxy resin (CF/EP) multi-coupled laminates with extension-twisting coupling effect were carried out. The geometric factors of the laminates were introduced, and the conditions for hygro-thermal stability of the multi-coupled laminates with extension-twisting coupling effect were deduced. Based on these conditions, the optimal design model of multi-coupled laminates with extension-twisting coupling effect was established. Genetic algorithm-sequential quadratic program (GA-SQP) hybrid optimization algorithm was used to optimize the stacking sequence of the laminates with the maximum extension-twisting coupling effect. Based on three-dimension digital image correlation (3D-DIC), the extension-twisting coupling effect of the laminates was measured. The numerical simulation and experimental results show that the multi-coupled laminates with extension-twisting effect will not undergo curing deformation when the stacking sequences meet the conditions of hygro-thermal stability. The introduction of multi-coupling effects can significantly improve

收稿日期: 2024-05-16; 修回日期: 2024-06-22; 录用日期: 2024-07-04; 网络首发时间: 2024-07-17 17:13:44

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240716.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (12302197); 国防科技大学青年自主创新科学基金项目 (ZK2023-38)

National Natural Science Foundation of China (12302197); Youth Independent Innovation Science Fund Project of National University of Defense Technology (ZK2023-38)

通信作者: 李道奎, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为航天结构分析与设计、复合材料结构力学 E-mail: lidaokui@nudt.edu.cn

引用格式: 崔达, 张鸣昊, 李道奎. 碳纤维/环氧树脂拉扭多耦合效应层合板设计与试验验证 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 2257-2269.

CUI Da, ZHANG Minghao, LI Daokui. Design and experimental verification of carbon fiber/epoxy resin multi-coupling laminates with extension-twisting coupling effect[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(4): 2257-2269(in Chinese).

the extension-twisting coupling effect of laminates and maximum increase is over 30%.

Keywords: hygro-thermal stability; multi-coupled laminates with extension-twisting coupling effect; optimization design; experimental verification; geometrical factor; robust analysis

基于碳纤维复合材料 (CFRP) 设计的弯扭耦合自适应结构在航空航天和风力发电领域具有重要的应用前景^[1-3]。例如, 利用弯扭耦合自适应结构设计风机叶片, 能够解决常规叶片存在的变桨控制技术调节响应速度慢和过度激励等问题, 使风机叶片能够根据转速或风速自发地改变气动扭角, 实现载荷的重新分配, 改善输出功率的稳定性并拓宽运行风速范围^[4]。在理论研究中, 弯扭耦合自适应结构可以简化为盒型悬臂梁构型, 其弯扭耦合效应可以通过将拉扭耦合层合板作为上、下面板来实现。在利用拉扭耦合层合板构造弯扭耦合自适应结构时, 层合板的拉扭耦合效应是影响结构弯扭耦合效应的重要参数。因此, 对拉扭耦合层合板的耦合特性的研究, 是弯扭耦合自适应结构设计的重要理论基础。与单一拉扭耦合层合板相比, 拉扭多耦合效应层合板 (同时具有拉扭耦合效应和其他耦合效应的层合板) 的耦合特性更为丰富, 具有大幅提升层合板耦合效应及弯扭耦合结构自适应能力的潜力。然而多耦合效应层合板一般采用非对称铺层的形式^[5], 在加工过程中更容易产生固化翘曲变形, 这是限制其在弯扭耦合结构设计中得到进一步发展应用的主要原因。因此, 如何设计出湿热稳定的拉扭多耦合效应层合板, 解决非对称铺层导致的固化变形问题, 实现拉扭多耦合效应层合板非对称铺层设计, 是兼具理论价值和工程价值的问题。

众多学者对拉扭耦合层合板的力学性能进行了研究^[6-9]。在拉扭耦合层合板的湿热稳定机制研究方面, Cross 等^[7]设计了无湿热翘曲变形非对称复合材料, 推导了正交异性材料层合板的湿热稳定性与材料无关的充要条件, 获得了非对称湿热稳定堆叠序列所需的最小层数为 5 层, 并确定了 6 层、7 层和 8 层的稳定层板族。基于此无湿热翘曲变形的充要条件, Haynes 和 Armanios^[8-9]分别对具有拉扭耦合效应和弯扭耦合效应的无湿热翘曲变形复合材料进行了铺层优化设计, 以确定产生最大拉扭耦合效应的铺层序列, 构造并测试了这些优化层合板的代表性样品, 以证明耦合性能比之前已知的最佳值有显著改善。York^[10]设计了 16 层和 18 层标准铺层准均匀正交各向异性拉扭

多耦合效应层合板, 提出了无量纲参数, 并利用无量纲参数判断这些层合板是否满足湿热稳定性。York^[11]针对湿热翘曲稳定 (Hygro-thermally curvature-stable, HTCS) 层合板展开研究, 发现只有 8、12、16 和 20 层合板中存在湿热翘曲稳定的标准铺层 (铺层角为 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 90°) 层合板。Li 等^[12]针对 6~14 层拉扭耦合 HTCS 反对称层合板进行了多目标优化设计, 利用加权函数法建立了一个新的目标函数, 期望层合板的拉扭耦合效应和屈曲强度同时达到最大, 才使得国内关于拉扭耦合层合板的设计研究与国外该领域研究正式接轨, 并且将同期国外设计的标准铺层设计拓展至反对称的自由铺层设计。

在复合材料层合板的铺层设计研究方面, 学者们主要基于序列二次规划算法 (Sequential quadratic program, SQP)、遗传算法 (Genetic algorithm, GA)、蚁群优化算法 (Ant colony optimization, ACO) 及其改进算法实现了层合板的铺层优化设计^[6, 8-9, 13-16]。Chen^[6]定义了湿热各向同性复合材料, 基于 SQP 以拉扭耦合效应最大为目标对湿热各向同性层合板的铺层进行了优化设计, 优化得到的层合板同时具有拉扭和拉弯耦合效应。考虑到 SQP 的局限性, Apte 和 Haynes^[13]基于 ACO 算法对具有拉扭耦合效应的 HTCS 层合板进行铺层设计。Haynes 和 Armanios^[8-9]采用 SQP 和 ACO 分别对具有拉扭耦合效应和弯扭耦合效应的 HTCS 层合板进行铺层优化, 并对比分析了两种优化方法的全局最优性。修英姝和崔德刚^[17-20]采用神经网络和遗传算法实现了层合板的优化设计。在拉扭耦合层合板耦合效应的试验测量方面, Shamsudin 等^[21-24]采用拉扭耦合试验机, 验证了标准铺层层合板的拉扭耦合效应。

综上所述, 现有关于复合材料拉扭耦合层合板的研究主要存在如下问题: 多耦合效应层合板湿热稳定机制不明、未能建立拉扭多耦合效应层合板的铺层优化设计模型、测量层合板的拉扭耦合效应时传统的接触式测量方法精度有限, 导致拉扭多耦合效应层合板难以应用在风机叶片的结构设计中。针对以上不足, 本文开展碳纤维/环氧树脂 (CF/EP) 拉扭多耦合效应层合板设计与试验

合效应 (E-T); D_S 代表层合板的刚度系数 D_{16} 和 D_{26} 均为 0, 即不具有弯扭耦合效应, 因此 $A_F B_T D_S$ 代表同时具有拉剪耦合效应和拉扭耦合效应的层合板。

表 1 层合板耦合类型下标表示

Table 1 Subscripts representing the coupling types of laminates

Subscript	Coupling effect	Subscript	Coupling effect
A_S :		A_F :	
$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$	—	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix}$	E-S
B_0 :	—	B_i :	E-B
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	—	$\begin{bmatrix} B_{11} & 0 & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	E-B
B_S :		B_{lt} :	E-T
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & B_{16} \\ 0 & 0 & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & 0 \end{bmatrix}$	E-T S-B	$\begin{bmatrix} B_{11} & 0 & B_{16} \\ 0 & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & 0 \end{bmatrix}$	S-B E-B
B_S :		B_F :	E-B
$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} \end{bmatrix}$	E-B S-T	$\begin{bmatrix} B_{11} & 0 & B_{16} \\ 0 & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & 0 \end{bmatrix}$	E-T S-B S-T
D_S :		D_F :	
$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix}$	—	$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$	B-T

Notes: E-T—Extension-twisting coupling effect; S-B—Shear-bend coupling effect; E-B—Extension-bending coupling effect; S-T—Shear-twist coupling effect; E-S—Extension-shearing coupling effect; B-T—Bend-twist coupling effect; A_{ij} —Tensile stiffness coefficient; B_{ij} —Coupling stiffness coefficient; D_{ij} —Bending stiffness coefficient.

表 2 给出了拉扭耦合层合板的耦合类型。可知, 一共有 12 种拉扭耦合层合板, 包括 1 种单耦合效应层合板和 11 种多耦合效应层合板。需要注意的是, 表中所列层合板耦合类型不是耦合效应的简单排列组合。例如, 由式 (2) 可知, 层合板

表 2 拉扭耦合层合板的耦合类型

Table 2 Coupling types of extension-twisting coupled laminates

Laminate type	Coupling type
$A_S B_T D_S$	E-T
$A_S B_T D_F$	E-T, B-T
$A_S B_{lt} D_S$	E-T, E-B
$A_F B_T D_S$	E-T, E-S
$A_S B_{lt} D_F$	E-T, E-B, B-T
$A_S B_F D_S$	E-T, E-B, S-T
$A_F B_T D_F$	E-T, E-S, B-T
$A_F B_{lt} D_S$	E-T, E-B, E-S
$A_S B_F D_F$	E-T, E-B, S-T, B-T
$A_F B_{lt} D_F$	E-T, E-B, E-S, B-T
$A_F B_F D_S$	E-T, E-B, S-T, E-S
$A_F B_F D_F$	E-T, E-B, S-T, E-S, B-T

剪扭耦合效应的刚度系数 B_{66} 与拉弯耦合效应的刚度系数 B_{12} 在数值上相同, 故层合板具有剪扭耦合效应 ($B_{66} \neq 0$) 时, 必然同时具有拉弯耦合效应 ($B_{12} \neq 0$)。因此, 表 2 中不存在具有剪扭耦合效应 (S-T) 而不具有拉弯耦合效应 (E-B) 的层合板。

由于拉剪与拉扭耦合效应的共同存在不利于盒型结构弯扭耦合效应的提升, 对于拉扭多耦合效应层合板, 除拉扭耦合效应外, 其他耦合效应不应包括拉剪耦合效应。表 2 中满足上述条件的共有 $A_S B_T D_F$ 、 $A_S B_{lt} D_S$ 、 $A_S B_{lt} D_F$ 、 $A_S B_F D_S$ 、 $A_S B_F D_F$, 下面分别推导这 5 种拉扭多耦合效应层合板湿热稳定的充要条件。

$A_S B_{lt} D_S$ 层合板的刚度矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & 0 & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & 0 & 0 & B_{22} & B_{26} \\ 0 & 0 & A_{66} & B_{16} & B_{26} & 0 \\ B_{11} & 0 & B_{16} & D_{11} & D_{12} & 0 \\ 0 & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & 0 \\ B_{16} & B_{26} & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$A_S B_{lt} D_S$ 层合板的拉扭耦合刚度系数 B_{16} 、 B_{26} 不能同时为零, 且拉弯耦合刚度系数 B_{11} 和 B_{22} 不能同时为零, 而其余的耦合刚度系数 B_{12} 、 B_{66} 及拉剪耦合系数 A_{16} 、 A_{26} 和弯扭耦合系数 D_{16} 、 D_{26} 均为零。利用式 (1)~(3), 在材料常数取任意值的条件下可以将式 (6) 转化为几何因子的解析条件, 即

$$\begin{cases} \xi_3 = \xi_4 = \xi_6 = \xi_{11} = \xi_{12} = 0 \\ |\xi_5| + |\xi_6| \neq 0, |\xi_7| + |\xi_8| \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

同理, 联立式 (1)~(3) 和其他 4 种拉扭多耦合效应层合板的耦合系数条件, 可以推导得到对应的耦合效应几何因子解析条件, 汇总得到表 3。

表 3 拉扭多耦合效应层合板的耦合效应几何因子 ξ 解析条件
Table 3 Conditions for geometric factors ξ satisfying coupling effects of multi-coupled laminates with E-T

Type	Condition
$A_S B_{lt} D_S$	$\xi_3 = \xi_4 = \xi_6 = \xi_{11} = \xi_{12} = 0, \xi_5 + \xi_6 \neq 0, \xi_7 + \xi_8 \neq 0$
$A_S B_T D_F$	$\xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_6 = 0, \xi_7 + \xi_8 \neq 0, \xi_{11} + \xi_{12} \neq 0$
$A_S B_{lt} D_S$	$\xi_3 = \xi_4 = \xi_{11} = \xi_{12} = 0, \xi_6 \neq 0, \xi_7 + \xi_8 \neq 0$
$A_S B_{lt} D_F$	$\xi_3 = \xi_4 = \xi_6 = 0, \xi_5 \neq 0, \xi_7 + \xi_8 \neq 0, \xi_{11} + \xi_{12} \neq 0$
$A_S B_F D_F$	$\xi_3 = \xi_4 = 0, \xi_6 \neq 0, \xi_7 + \xi_8 \neq 0, \xi_{11} + \xi_{12} \neq 0$

层合板抵抗湿热剪切变形的充要条件^[25] 为

$$\xi_1 = \xi_3 = 0 \quad \text{or} \quad \xi_3 = \xi_4 = 0 \quad (8)$$

层合板抵抗湿热翘曲变形^[26] 的充要条件为

$$\xi_1 = \xi_3 = \xi_5 = \xi_7 = 0 \quad \text{or} \quad \xi_5 = \xi_6 = \xi_7 = \xi_8 = 0 \quad (9)$$

层合板湿热稳定, 即要求层合板不发生湿热

剪切变形和湿热翘曲变形,也即式(8)和式(9)应该同时成立。将式(8)和式(9)与表3中的耦合效应几何因子解析条件联立,即可得到对应层合板湿热稳定的几何因子解析条件,如表4所示。 $A_S B_{II} D_S$ 层合板和 $A_S B_{II} D_F$ 层合板的耦合效应条件与式(8)、式(9)不能同时成立,故表4中没有列出。为了便于对比分析多耦合效应对层合板的影响,表4中还补充了单一拉扭耦合效应层合板(即 $A_S B_I D_S$ 层合板)湿热稳定的解析条件^[26]。

表4 拉扭多耦合效应层合板湿热稳定的几何因子 ξ 解析条件
Table 4 Conditions for geometric factors ξ satisfying hygro-thermally stable of multi-coupled laminates with E-T

Type	Conditions for geometric factor
$A_S B_I D_S$	$\xi_1 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_6 = \xi_7 = \xi_{11} = \xi_{12} = 0, \xi_8 \neq 0$
$A_S B_I D_F$	$\xi_1 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_6 = \xi_7 = 0, \xi_8 \neq 0, \xi_{11} + \xi_{12} \neq 0$
$A_S B_{II} D_S$	$\xi_1 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_7 = \xi_{11} = \xi_{12} = 0, \xi_6 \neq 0, \xi_8 \neq 0$
$A_S B_{II} D_F$	$\xi_1 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_7 = 0, \xi_6 \neq 0, \xi_8 \neq 0, \xi_{11} + \xi_{12} \neq 0$

2 铺层优化设计

当层合板的层数、几何尺寸和材料类型均已确定时,层合板的耦合效应大小由其纤维铺层角度唯一确定。考虑到层合板的拉扭耦合效应是构成结构自适应能力的主导因素,是主要刚度性能,因此,本节对层合板的拉扭耦合效应大小进行优化。层合板的拉扭耦合柔度系数大小 $|b_{16}|$ 可由下式求出:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} & b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} & b_{12} & b_{22} & b_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} & b_{16} & b_{26} & b_{66} \\ b_{11} & b_{12} & b_{16} & d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ b_{12} & b_{22} & b_{26} & d_{12} & d_{22} & d_{26} \\ b_{16} & b_{26} & b_{66} & d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} =$$
$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}^{-1} \quad (10)$$

优化问题的约束条件为表4中相应的几何因子充要条件。对于4类拉扭多耦合效应层合板($A_S B_I D_S$ 层合板、 $A_S B_I D_F$ 层合板、 $A_S B_{II} D_S$ 层合板、 $A_S B_{II} D_F$ 层合板),其优化问题的数学模型分别为

$$\max |b_{16}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)|$$

$$\begin{cases} -90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ & (i = 1, 2, \dots, n) \\ \xi_1 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_6 = 0 \\ \xi_7 = \xi_{11} = \xi_{12} = 0, \xi_8 \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \max |b_{16}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)| \\ -90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ & (i = 1, 2, \dots, n) \\ \xi_1 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = 0 \\ \xi_6 = \xi_7 = 0, \xi_8 \neq 0, |\xi_{11}| + |\xi_{12}| \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \max |b_{16}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)| \\ -90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ & (i = 1, 2, \dots, n) \\ \xi_1 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = 0 \\ \xi_7 = \xi_{11} = \xi_{12} = 0, \xi_6 \neq 0, \xi_8 \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \max |b_{16}(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)| \\ -90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ & (i = 1, 2, \dots, n) \\ \xi_1 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_7 = 0 \\ \xi_6 \neq 0, \xi_8 \neq 0, |\xi_{11}| + |\xi_{12}| \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

利用GA-SQP混合优化算法对拉扭多耦合效应层合板进行铺层优化设计。为最大程度发挥层合板的铺层优势,层合板的铺层形式不再局限于标准铺层、对称铺层等特殊形式,采取自由铺层的形式进行铺设。拉扭耦合层合板的单层板材料采用IM7/8552型碳纤维/环氧树脂复合材料,其参数如表5所示。

表5 IM7/8552型碳纤维/环氧树脂(CF/EP)单层板材料属性
Table 5 Properties of IM7/8552 carbon fiber reinforced epoxy resin (CF/EP) single layer laminate

Parameter	Value	
Young's modulus/GPa	E_1	161.0
	E_2	11.38
Shear modulus/GPa	G_{12}	5.17
Poisson's ratio	ν_{21}	0.38
Thickness of single layer/mm	h	0.1397
Thermal expansivity/ $(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	α_1	-0.0181
	α_2	24.3

考虑到蒙皮厚度一般为2 mm,而单层板厚度为0.1397 mm,在此以14层层合板为例进行设计。表6给出了湿热稳定的4类拉扭耦合层合板铺层优化结果及其拉扭耦合柔度系数。通过分析表中数据可以得到如下结论:

(1) 利用GA-SQP算法可以实现对于给定层数的拉扭耦合层合板的铺层优化设计;

(2) 相比于单一拉扭耦合 $A_S B_I D_S$ 层合板,拉扭多耦合效应层合板($A_S B_I D_F$ 层合板、 $A_S B_{II} D_S$ 层合板和 $A_S B_{II} D_F$ 层合板)的拉扭耦合效应获得了大幅度提升,说明多耦合效应的引入能够大幅提升层合板的拉扭耦合效应。

表 6 湿热稳定的 CF/EP 拉扭耦合层合板
Table 6 Hygro-thermally stable CF/EP laminates with E-T coupling effect

Type	Optimization result/(°)	$ b_{16} /\text{N}^{-1}$
$A_5B_7D_5$	[69.8/-6.7/-17.1/79.4/-30.4/ 76.9/-53.0/37.3/13.8/81.5/ -63.2/8.5/16.9/-72.2] _T	1.69×10^{-5}
$A_5B_7D_F$	[12.9/-64.1/-63.5/-58.9/ 29.5/-3.3/40.3/55.6/51.3/ -43.0/84.7/70.3/-19.7/ -26.2] _T	2.25×10^{-5}
$A_5B_F D_5$	[-8.5/73.8/-24.6/64.8/64.1/ -38.3/-48.6/29.5/-88.0/0.8/ 24.9/-75.1/-72.7/12.0] _T	2.17×10^{-5}
$A_5B_F D_F$	[-11.3/83.4/-16.7/65.7/-23.5/ 70.9/86.9/-57.8/33.8/7.2/ 28.8/-70.8/5.9/-66.3] _T	2.07×10^{-5}

Note: $|b_{16}|$ —Absolute value of extension-twisting coupling flexibility coefficient.

层合板刚度性能提升的主要原因在于如下两方面：(1) 相比于 $A_5B_7D_5$ 层合板，多耦合效应层合板能够满足湿热稳定性的几何因子约束条件数量变少，导致其可设计域大幅增加；(2) 相比于

$A_5B_7D_5$ 层合板，多耦合效应层合板的拉扭耦合柔度系数影响因素更为复杂，且耦合效应数量越多，拉扭耦合柔度系数表达式的多项式项越多。因此，若对层合板的铺层进行合理设计，可以大幅提升拉扭耦合效应。

3 耦合效应验证与鲁棒性分析

3.1 数值仿真验证

3.1.1 湿热效应

本节采用有限元法验证表 6 中层合板的湿热稳定性。利用 Patran/Nastran 软件建立层合板的有限元模型，尺寸设定为长 0.18 m、宽 0.1 m，共划分 800 个壳单元。为模拟实际的固化降温(由固化温度 200℃ 降至室温 20℃)，将层合板的几何中心固支，对每个单元施加 -180℃ 的温度差，即施加均匀温度场。计算得到的降温自由收缩变形如图 2 所示。可以看出：在高温固化过程中，层合板及其弯扭耦合结构的切应变、弯曲曲率和扭曲率均为 0，说明其是湿热稳定的，符合预期设计。

此外，由图 2 可知具有不同铺层角度的拉扭

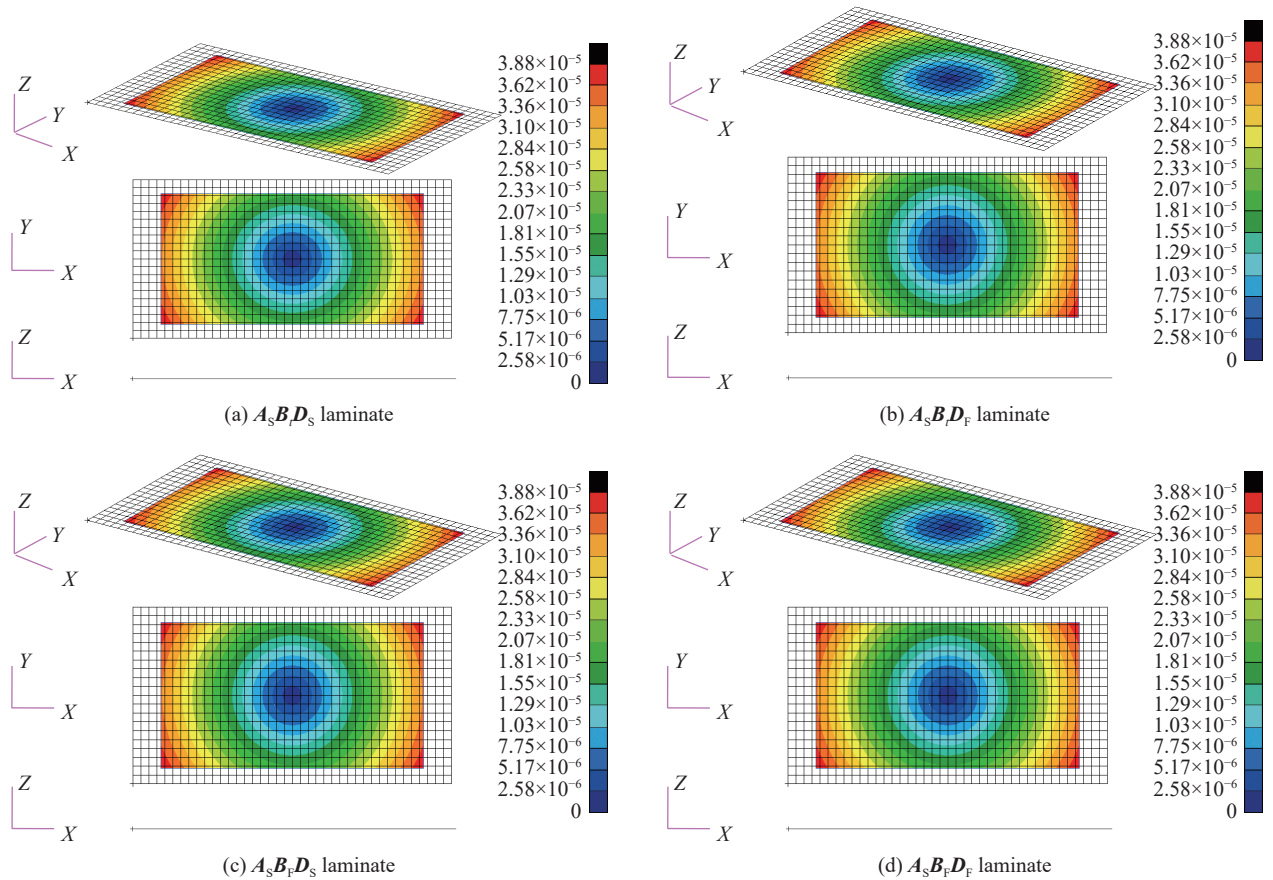


图 2 CF/EP 拉扭耦合层合板降温自由收缩位移云图

Fig. 2 Cooling free displacement cloud images of CF/EP extension-twisting coupled laminates

耦合层合板产生了相同的热线应变,其原因如下:拉扭耦合层合板的热线应变 ε_x^T 和 ε_y^T 、热切应变 γ_{xy}^T 、热曲率 κ_x^T 、 κ_y^T 和 κ_{xy}^T 可以通过如下关系来求解:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x^T \\ \varepsilon_y^T \\ \gamma_{xy}^T \\ \kappa_x^T \\ \kappa_y^T \\ \kappa_{xy}^T \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ a_{12} & a_{22} & 0 & b_{12} & b_{22} & b_{26} \\ 0 & 0 & a_{66} & b_{16} & b_{26} & b_{66} \\ b_{11} & b_{12} & b_{16} & d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ b_{12} & b_{22} & b_{26} & d_{12} & d_{22} & d_{26} \\ b_{16} & b_{26} & b_{66} & d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \\ M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{pmatrix} \quad (15)$$

而拉扭耦合层合板热内力 N_x^T 、 N_y^T 、 N_{xy}^T 和热内力矩 M_x^T 、 M_y^T 、 M_{xy}^T 可以通过两组相互独立的参数:热弹性不变量 $U_i^T(i=1,2)$ 和几何因子 ξ_i 来求解^[26],即

$$\begin{pmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{pmatrix} = \frac{H\Delta T}{2} \begin{bmatrix} 1 & \xi_1 \\ 1 & -\xi_1 \\ 0 & \xi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^T \\ U_2^T \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{pmatrix} = \frac{H^2\Delta T}{8} \begin{bmatrix} 0 & \xi_5 \\ 0 & -\xi_5 \\ 0 & \xi_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^T \\ U_2^T \end{bmatrix} \quad (17)$$

由表 4 可知 4 类拉扭耦合层合板湿热稳定的共有解析条件为

$$\xi_1 = \xi_3 = \xi_4 = \xi_5 = \xi_7 = 0 \quad (18)$$

联立式 (18) 和式 (16)、式 (17) 可得

$$\begin{pmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{pmatrix} = \frac{H\Delta TU_1^T}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

此时,将式 (19) 代入式 (15) 可得

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x^T \\ \varepsilon_y^T \\ \gamma_{xy}^T \\ \kappa_x^T \\ \kappa_y^T \\ \kappa_{xy}^T \end{pmatrix} = \frac{H\Delta TU_1^T}{2} \begin{pmatrix} a_{11} + a_{12} \\ a_{12} + a_{22} \\ 0 \\ b_{11} + b_{12} \\ b_{12} + b_{22} \\ b_{16} + b_{26} \end{pmatrix} \quad (20)$$

而将式 (19) 代入式 (1) 和式 (2) 可得

$$\begin{pmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{22} \\ A_{66} \\ A_{16} \\ A_{26} \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} U_1 + \xi_2 U_3 \\ U_4 - \xi_2 U_3 \\ U_1 + \xi_2 U_3 \\ U_5 - \xi_2 U_3 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{22} \\ B_{66} \\ B_{16} \\ B_{26} \end{pmatrix} = \frac{H^2}{4} U_3 \begin{pmatrix} \xi_6 \\ -\xi_6 \\ \xi_6 \\ -\xi_6 \\ \xi_8 \\ -\xi_8 \end{pmatrix} \quad (21)$$

进而联立式 (20) 和式 (21) 可得

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x^T \\ \varepsilon_y^T \\ \gamma_{xy}^T \end{pmatrix} = \frac{H\Delta TU_1^T}{2(A_{11} + A_{12})} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{\Delta TU_1^T}{2(U_1 + U_4)} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

由式 (22) 可知层合板的两个主轴方向的热线应变相同,且只与材料常量 U_1 及 U_4 、材料热弹性不变量 U_1^T 和温差 ΔT 有关,与层合板的层数与铺层角度无关。

3.1.2 耦合效应

采用有限元法验证表 6 中多耦合效应层合板的湿热稳定性。利用 MSC. Patran/Nastran 软件建立层合板的有限元模型,尺寸设定为长 0.18 m、宽 0.1 m,共划分 800 个壳单元,层合板的几何中心固支,施加轴向均布拉力载荷 400 N/m,采用线性静力学功能进行计算。图 3 展示了层合板在轴向拉伸载荷作用下的位移云图。表 7 给出了层合板在轴向拉伸载荷作用时扭曲率 κ_{xy} 的解析解与数值解,以及相同层数多耦合效应层合板相比于 $A_S B_i D_S$ 层合板的拉扭耦合效应提升效果。其中, κ_{xy} 数值解可通过下式来求解:

$$\kappa_{xy} = \frac{2\phi}{L} \quad (23)$$

此时,需要先提取出层合板一短边中心节点的扭转角 ϕ ,然后代入式 (23) 中求解;而 κ_{xy} 的解析解大小可通过式 (15) 直接求解。

由表 7 可以看出:拉扭耦合层合板的扭曲率理论与仿真结果吻合非常好,验证了拉扭耦合效应的正确性。此外, $A_S B_i D_F$ 层合板、 $A_S B_F D_S$ 层合板、 $A_S B_F D_F$ 层合板的拉扭耦合效应,相对于 $A_S B_i D_S$ 层合板的拉扭耦合效应均有所提升,提升幅度依次为 32.35%、27.94% 和 22.06%,说明多耦合效应的引入能够显著提升层合板的拉扭耦合效应,最大可达 30% 以上。

3.2 实验测量验证

3.2.1 实验方案设计

(1) 实验件设计

层合板试验件的几何外形为 20 mm×200 mm 的长条形,其长度方向尺寸 $L=200$ mm,如图 4 所示。其中,长度方向为 0°铺层方向,试验件两端的加载与固定区域 (20 mm×30 mm) 采用总厚度为 10 mm 的铝块做加厚处理,被铝块夹持的中心贯穿打孔 (M8 通孔)。

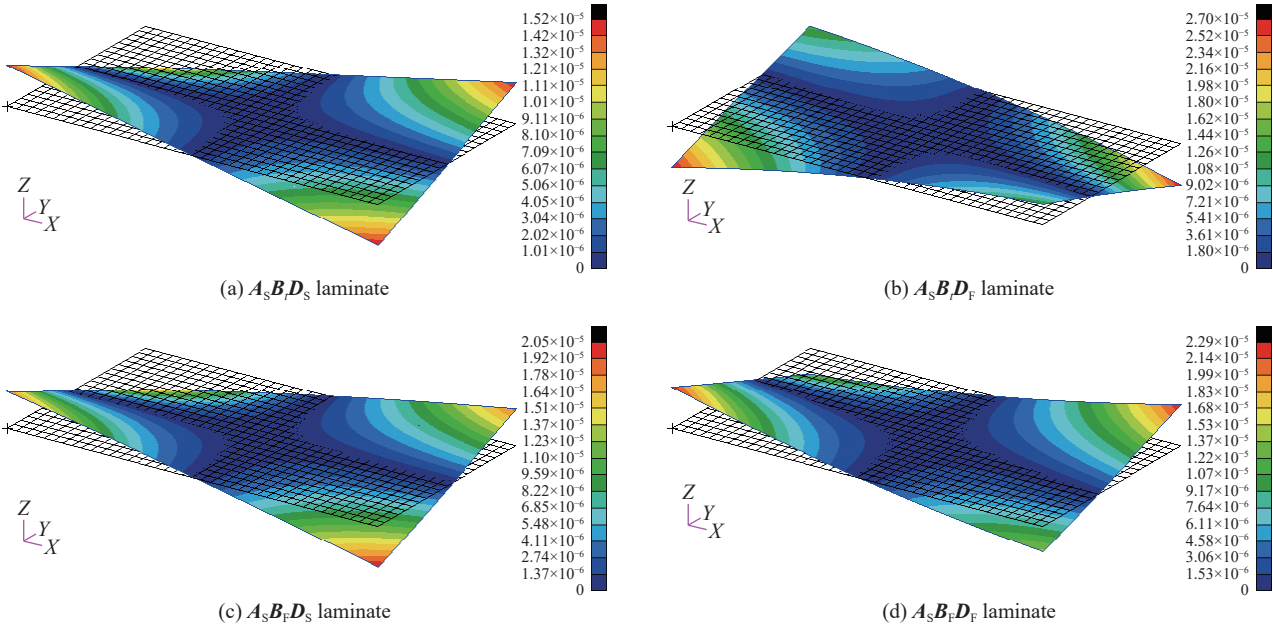


图3 CF/EP 拉扭耦合层合板轴向拉伸时的位移云图

Fig. 3 Displacement cloud images of CF/EP extension-twisting coupled laminates under axial tension

表 7 CF/EP 层合板扭曲率变形解析解与数值解
Table 7 Analytical and numerical solutions of the distortion rate of CF/EP laminates

Type	Analytical κ_{xy}	Numerical κ_{xy}	Promotion
$A_5B_7D_S$	0.68×10^{-2}	0.68×10^{-2}	—
$A_5B_7D_F$	0.90×10^{-2}	0.90×10^{-2}	32.35%
$A_5B_7D_S$	0.87×10^{-2}	0.87×10^{-2}	27.94%
$A_5B_7D_F$	0.83×10^{-2}	0.83×10^{-2}	22.06%

Note: κ_{xy} —Torsional curvature of laminates.

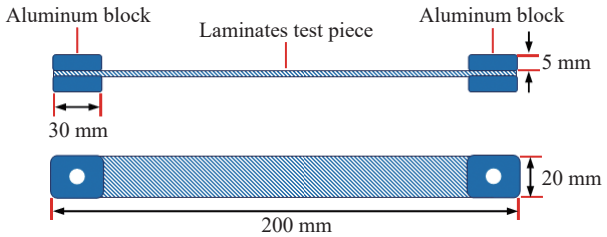


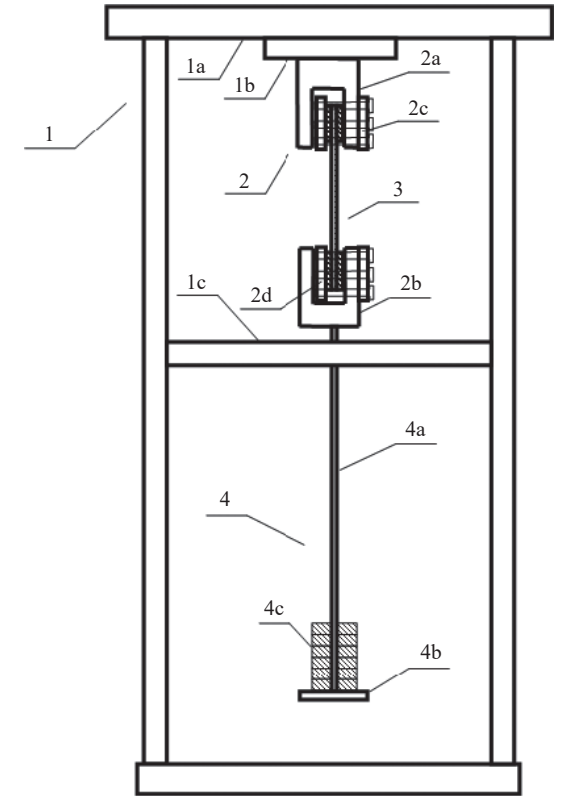
图4 CF/EP 层合板几何模型示意图

Fig. 4 Geometric model of CF/EP laminate

(2) 加载方案设计

考虑到需要测量的是层合板在拉力作用下的自由扭转变形，加载装置不能限制层合板自由端的扭转变形，因此采用如图 5 所示的试验加载装置对拉剪多耦合效应层合板进行加载。

试验加载装置分别由如下 4 部分组成：试验架 (1)、连接装置 (2)、试验件 (3) 和加载装置 (4)。



1—Test stand; 1a—The body of test stand; 1b—Connecting disc; 1c—The beam of the test stand; 2—Connecting device; 2a—Upper fixture; 2b—Lower fixture; 2c—Outer clamping block; 2d—Outer clamping block; 3—Test pieces; 4—Loading device; 4a—Connecting rod; 4b—Weight tray; 4c—Weights

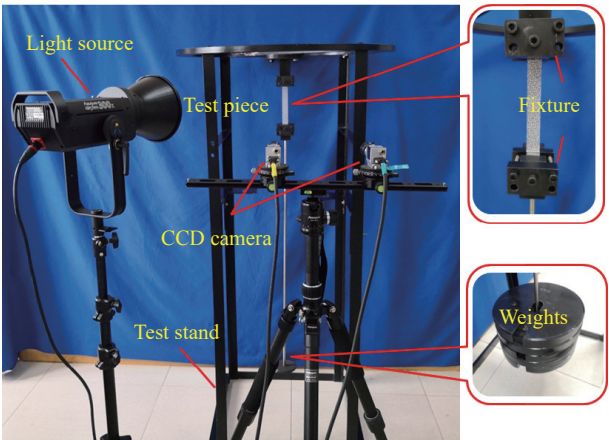
图5 多耦合效应层合板试验加载装置示意图

Fig. 5 Loading device for multi-coupled laminates

其中, 试验架 (1) 主要起固定和支撑的作用, 包括架体 (1a)、连接圆盘 (1b) 和横梁 (1c); 连接装置 (2) 包括上端夹具 (2a)、下端夹具 (2b)、外夹块 (2c) 和 (2d), 分别用于固定和连接试验件的作用, 可以使试验件上端固支、下端自由悬空; 加载装置 (4) 包括连接杆 (4a)、砝码托盘 (4b) 和砝码 (4c), 用于提供向下的拉力。通过上述加载装置对层合板试验件加载, 便可以保证层合板试验件在一端拉力作用下自由地发生变形。

(3) 测量方案设计

基于 VIC-3D 非接触全场应变测量系统测量拉扭多耦合效应层合板试验件的拉扭耦合效应大小, 如图 6 所示。整个层合板耦合效应测量系统主要包括: 电荷耦合元件 (CCD) 双目相机、光源、试验架、夹具、砝码、标定板和 VIC-3D 非接触全场应变测量系统。其中, 相机镜头型号为 HIKRobot MVL-MF1628M-8MP, 相机为 Basler acA1440-220um 型号工业相机。



CCD—Charge-coupled device

图 6 层合板耦合效应测量系统

Fig. 6 Test system for coupling effect of laminates

利用该实验系统进行测量的步骤为:

- (1) 搭建合适的测试平台, 主要包括光源环境、双目相机摆放位置等;
- (2) 调节相机的焦距和光圈, 确保待测物体的散斑能在双目图像中清晰地显示;
- (3) 利用标定板进行双目相机的内外参标定;
- (4) 计算标定误差, 若满足误差要求则进行下一步, 反之则重新标定;
- (5) 分别拍摄待测物体变形前和变形后的散斑图像;
- (6) 计算物体待测区域的三维变形结果。

3.2.2 拉扭耦合效应测量

基于表 6 中的湿热稳定拉扭耦合层合板的铺层优化设计结果, 分别加工 4 类拉扭耦合层合板 ($A_5B_1D_5$ 层合板、 $A_5B_1D_F$ 层合板、 $A_5B_FD_5$ 层合板、 $A_5B_FD_F$ 层合板) 试验件, 分别记为试件 P1、试件 P2、试件 P3、试件 P4, 并将每个层合板试验件的一侧粘贴散斑, 如图 7 所示。试验件采用如表 8 所示的碳纤维/环氧树脂复合材料, 加工工艺为真空袋压成型工艺。在整板降温成型以后, 还需对其进行板面的平整度检验, 检验结果表明试验件未发生面内剪切变形和离面翘曲变形, 如图 7 所示。

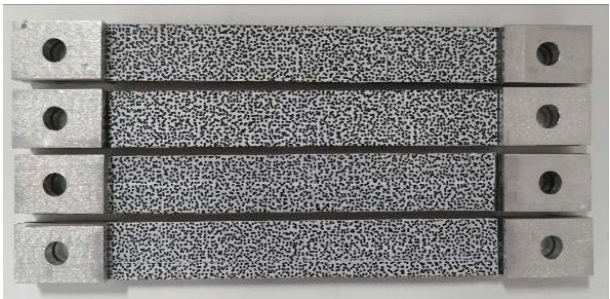


图 7 CF/EP 拉扭耦合层合板试验件

Fig. 7 Test pieces of CF/EP extension-twisting coupled laminates

表 8 CF/EP 试验件的材料属性

Table 8 Properties of CF/EP test pieces

Young's modulus/GPa	E_1	135.0
	E_2	9.0
Shear modulus/GPa	G_{12}	3.9
Poisson's ratio	ν_{21}	0.3
Thickness of single layer/mm	h	0.155

按照 3.2.1 节设计的实验方案进行实验。在实验过程中, 加载砝码的质量 m 分别为 10 kg、20 kg、30 kg、40 kg 和 50 kg。

图 8 给出了试验件扭转角 ϕ 的试验测量结果, 仅以 30 kg 加载为例进行说明, 其余加载时的结论与此一致。可以看出扭转角随长度的变化整体呈线性增加趋势。

为了方便对比分析和验证, 还需要对拉剪多耦合效应层合板试验件的变形进行数值仿真验证。利用有限元软件 MSC. Patran/Nastran, 建立尺寸为 200 mm×20 mm 的层合板有限元模型, 并将其划分为 80 个壳单元, 采用 RBE2 单元将两端 30 mm×20 mm 的区域进行六自由度的多点单元约束, 如图 9 所示。层合板一端固支、另一端自由

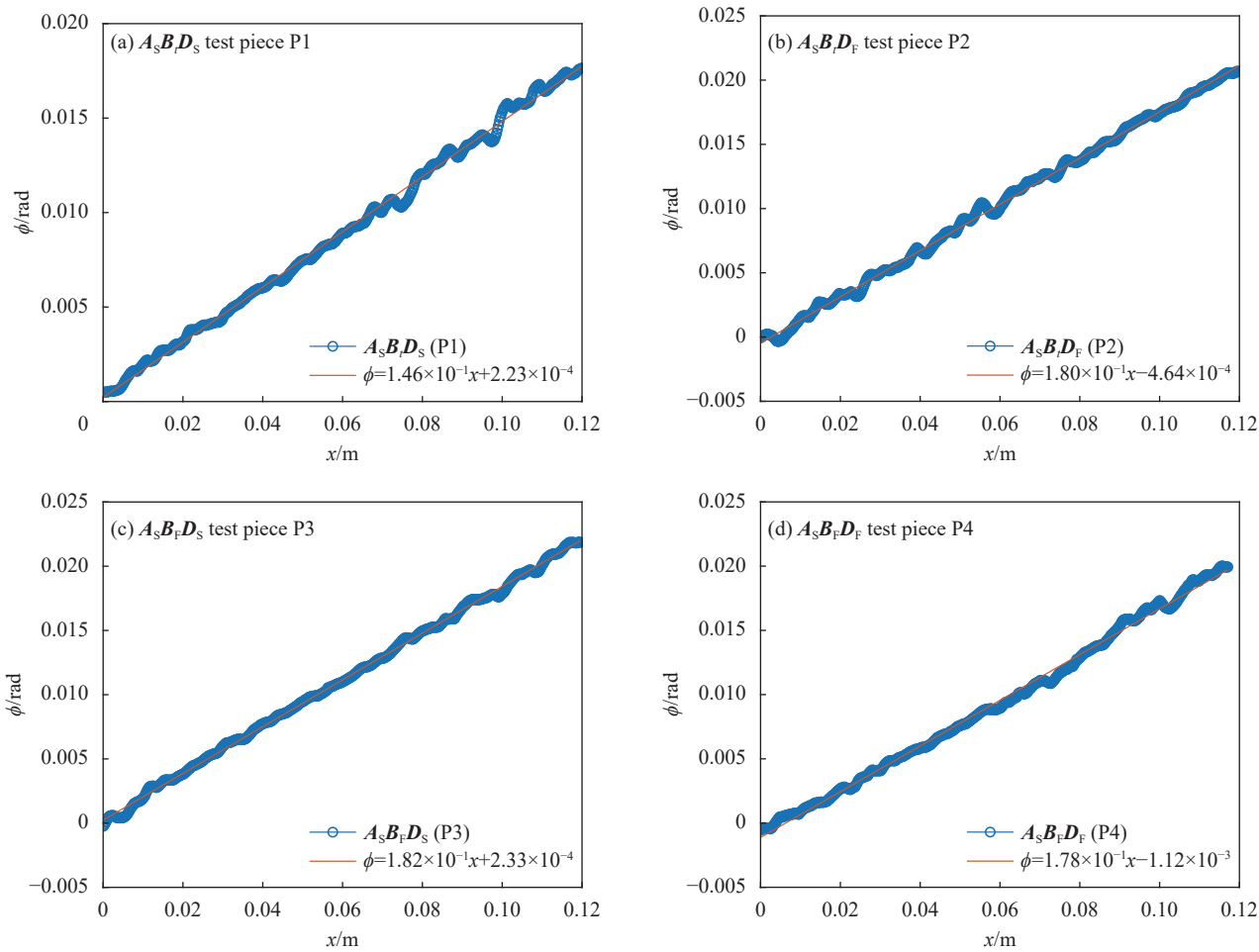


图 8 CF/EP 拉扭耦合层合板试验件扭转角 ϕ 变形试验结果

Fig. 8 Test results of torsion angle ϕ deformation of CF/EP extension-twisting coupled laminates

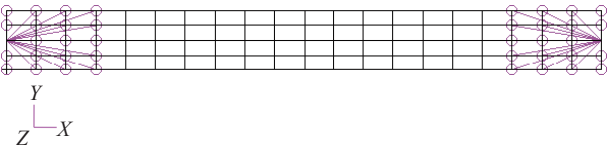


图 9 CF/EP 层合板试验件有限元模型

Fig. 9 Finite element model of CF/EP test pieces

并施加集中载荷，采用线性静力学计算功能进行计算。

图 10 以 30 kg 加载工况为例，给出了 4 类拉扭耦合层合板试验件扭转角变化率 k_ϕ 的理论、仿真和试验结果。其中， k_ϕ 的理论结果通过层合板的扭曲率 κ_{xy} 来求解，其关系为

$$\kappa_{xy} = \frac{2\phi(L)}{L} = 2k_\phi \tag{24}$$

从图 10 可以看出：(1) 在不同拉力作用时，4 类拉扭耦合层合板试验件 k_ϕ 的理论结果和仿真结

果基本一致，相比于理论结果，仿真结果均偏小，其原因为试验件两端受到固定夹持约束，限制了端部的自由扭转变形，根据圣维南原理可知，会产生局部误差；(2) k_ϕ 的试验结果与理论、仿真结果吻合较好，随着拉力的增加， k_ϕ 的试验结果近似呈线性增加，其误差大小普遍在 10% 以内，个别加载条件下的误差超过了 10%，最大误差为 12.4%；(3) 在相同加载情况下，相比于 $A_s B_t D_s$ 层合板试验件 P1，拉扭多耦合效应层合板试验件 (P2、P3 和 P4) 的 k_ϕ 均出现了不同程度的提升，说明对于表 6 中所设计的多耦合效应层合板铺层，其相比于单耦合层合板能获得更大拉扭耦合效应的结论在材料属性变化时仍然成立。

3.3 鲁棒性分析

为了确保拉扭多耦合效应层合板的实用性，设备和人为误差等因素引起的铺层角度偏差不应引起过大的层合板耦合刚度性能偏差，因此采用

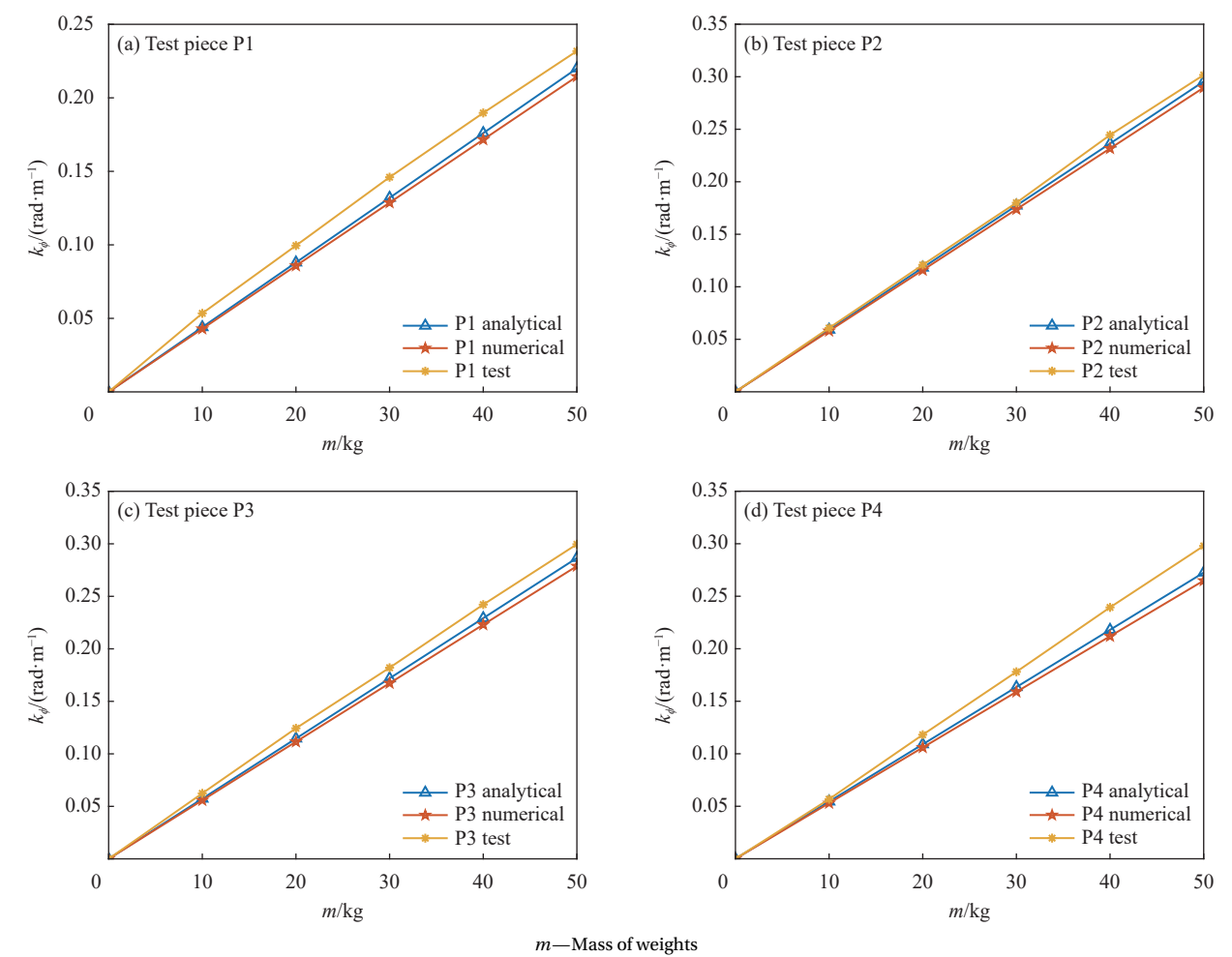


图 10 CF/EP 层合板试验件在不同拉力下的扭转角变化率 k_ϕ

Fig. 10 Change rate of torsion angle k_ϕ of CF/EP extension-twisting coupled laminates under different tensile forces

Monte Carlo 方法，对拉扭耦合层合板的耦合效应进行鲁棒性分析。层合板第 k 层的铺层角度为 $(\theta_k \pm \Delta\theta_k)$ ，这里设随机角度偏差为 $\Delta\theta_k = 2^\circ$ 。

图 11 给出了随机抽样 20 000 次时，表 6 中的层合板拉扭耦合效应误差的分布，及其 95% 置信水平下的置信区间。从图 11 可以看出：当铺层角度存在误差时，层合板的拉扭耦合效应误差服从正态分布，且 95% 置信水平的置信区间控制在 $\pm 5\%$ 之内，具有较高的可控性；3 类拉扭多耦合效应层合板的鲁棒性均优于单一拉扭耦合的 $A_s B_t D_s$ 层合板。

4 结论

基于经典层合理论推导得到了碳纤维/环氧树脂拉扭多耦合效应层合板的湿热稳定解析条件，基于此条件建立了拉扭多耦合效应层合板的非对称铺层优化设计模型，以 14 层层合板为例优

化得到了使得层合板拉扭耦合效应最大的铺层角度规律。分析了采用非对称形式的铺层角度，对拉扭多耦合效应层合板耦合效应的影响规律。最后利用数值仿真、试验测量以及鲁棒性分析手段验证了理论的正确性和实用性。主要结论总结如下：

- (1) 通过铺层设计的方式避免了非对称层合板的固化变形，推导得到的湿热稳定几何因子解析条件适用于其他类型的纤维增强/环氧树脂复合材料；
- (2) 遗传算法-序列二次规划 (GA-SQP) 算法可以实现对于给定层数的拉扭耦合层合板的铺层优化设计；
- (3) 相对于单一拉扭耦合层合板而言，多耦合效应的引入能够大幅提升层合板的拉扭耦合效应，最大可达 30% 以上；
- (4) 采用不同铺层角度的拉扭耦合层合板的两

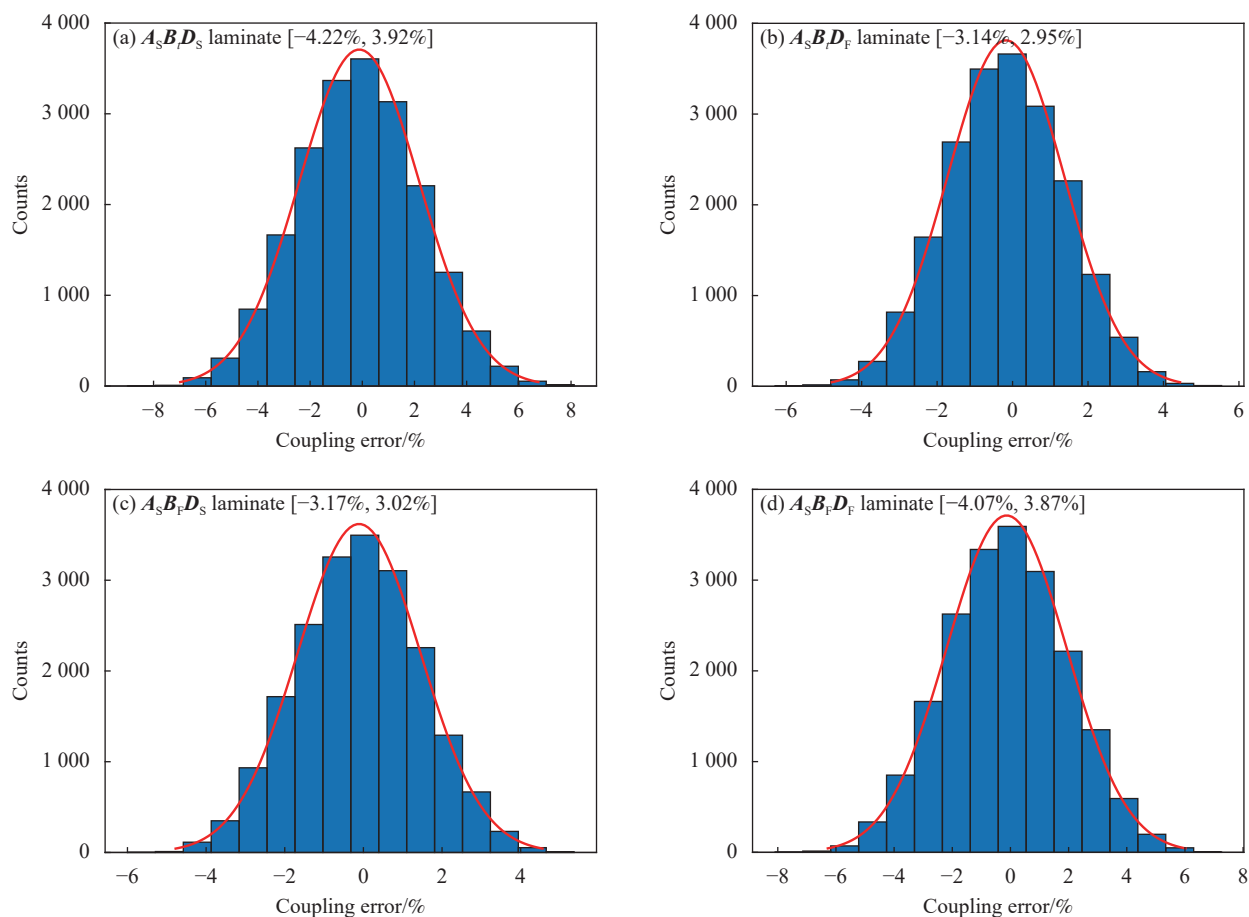


图 11 CF/EP 层合板拉扭耦合效应的鲁棒性分析结果

Fig. 11 Robustness analysis results of extension-twisting coupling effect of CF/EP laminates

个主轴方向的热应变相同，且只与材料常量 U_1 及 U_4 、材料热弹性不变量 U_1^T 和温差 ΔT 有关，与层合板的层数与铺层角度无关。

参考文献:

- [1] 张立, 缪维跑, 李春, 等. 基于气动弹性剪裁的大型风力机弯扭耦合叶片力学性能分析 [J]. 动力工程学报, 2021, 41(8): 674-683.
ZHANG Li, MIAO Weipao, LI Chun, et al. Mechanical performance analysis of large wind turbine bend-twist coupling blade based on aeroelastic tailoring [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(8): 674-683(in Chinese).
- [2] 张立, 缪维跑, 李春, 等. 基于弯扭耦合的大型风力机复合材料叶片结构特性研究 [J]. 机械强度, 2021, 43(6): 1382-1392.
ZHANG Li, MIAO Weipao, LI Chun, et al. Study of the structural characteristics of large wind turbine composite blade based on bend-twist coupling [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(6): 1382-1392(in Chinese).
- [3] 王海生, 缪维跑, 李春, 等. 大型风力机叶片腹板偏置对弯扭耦合特性研究 [J]. 机械强度, 2023, 45(4): 887-893.
- WANG Haisheng, MIAO Weipao, LI Chun, et al. Study on bend-twist coupling characteristics of web offset for large wind turbine blades [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(4): 887-893(in Chinese).
- [4] 李谨. 基于非对称复合材料的弯曲-扭转耦合结构设计方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2016.
LI Jin. Investigation on design method for bending-twisting coupled structure with asymmetric composite laminates [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016(in Chinese).
- [5] 沈观林, 胡更开, 刘彬. 复合材料力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 89-110.
SHEN Guanlin, HU Gengkai, LIU Bin. Mechanics of composite materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 89-110(in Chinese).
- [6] CHEN H P. Study of hygrothermal isotropic layup and hygrothermal curvature-stable coupling composite laminates [C]//44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials. Norfolk, Virginia: AIAA, 2003: 1506.
- [7] CROSS R J, HAYNES R A, ARMANIOS E A. Families of hygro-

- thermally stable asymmetric laminated composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2008, 42(7): 697-716.
- [8] HAYNES R A, ARMANIOS E A. New families of hygro-thermally stable composite laminates with optimal extension-twist coupling[J]. *AIAA Journal*, 2010, 48(12): 2954-2961.
- [9] HAYNES R A, ARMANIOS E A. The challenge of achieving hygrothermal stability in composite laminates with optimal couplings[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2012, 59: 74-82.
- [10] YORK C B. Coupled quasi-homogeneous orthotropic laminates[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2011, 47(4): 405-426.
- [11] YORK C B. Tapered hygro-thermally curvature-stable laminates with non-standard ply orientations[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 44: 140-148.
- [12] LI J, LI D K. Multi-objective optimization of hygro-thermally curvature-stable antisymmetric laminates with extension-twist coupling[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(4): 1373-1380.
- [13] APTE A P, HAYNES R A. Design of optimal hygrothermally stable laminates with extension-twist coupling by ant colony optimization[C]//2nd International Conference on Engineering Optimization. Lisbon: APMTAC, 2010: 1-7.
- [14] LUO C, GUEST J K. Optimizing topology and fiber orientations with minimum length scale control in laminated composites[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2021, 143(2): 021704.
- [15] MORADI S, VOSOUGHI A R, ANJABIN N. Maximum buckling load of stiffened laminated composite panel by an improved hybrid PSO-GA optimization technique[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 160: 107382.
- [16] 洪厚全, 李玉亮, 徐超. 复合材料层合板屈曲优化设计的模拟退火算法应用[J]. *强度与环境*, 2012, 39(6): 8-13.
- HONG Houquan, LI Yuliang, XU Chao. Optimization of composite laminates for buckling by simulated annealing algorithm[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2012, 39(6): 8-13(in Chinese).
- [17] 修英妹, 崔德刚. 非对称非均衡复合材料铺层优化设计[J]. *航空学报*, 2004, 25(2): 137-139.
- XIU Yingshu, CUI Degang. Optimum design of unsymmetrical and unbalanced composite laminate[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2004, 25(2): 137-139(in Chinese).
- [18] 修英妹, 崔德刚. 复合材料层合板稳定性的铺层优化设计[J]. *工程力学*, 2005, 22(6): 212-216.
- XIU Yingshu, CUI Degang. Ply optimization design for stability of composite laminates[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 212-216(in Chinese).
- [19] 修英妹, 崔德刚. 复合材料蜂窝夹层结构的优化设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(9): 855-858.
- XIU Yingshu, CUI Degang. Optimal design of composite sandwich structure[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(9): 855-858(in Chinese).
- [20] 修英妹. 基于遗传算法的复合材料飞机结构优化设计[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.
- XIU Yingshu. Optimum design of composite aircraft structure based on genetic algorithm[D]. Beijing: Beihang University, 2004(in Chinese).
- [21] SHAMSUDIN M H, CHEN J, YORK C B. Bounds on the compression buckling strength of hygro-thermally curvature-stable laminate with extension-twisting coupling[J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2013, 4(4): 477-486.
- [22] SHAMSUDIN M H, ROUSSEAU J, VERCHERY G, et al. Experimental validation of the mechanical coupling response for hygro-thermally curvature-stable laminated composite materials[C]//6th International Conference "Supply on the Wings" in Conjunction with AIRTEC 2011 International Aerospace Supply Fair. Frankfurt, Germany: University of Glasgow, 2011: 1-12.
- [23] SHAMSUDIN M H, ROUSSEAU J, YORK C B. Warping curvature predictions for non-symmetric woven cloth laminates[C]//Designing Against Deformation & Fracture of Composite Materials: Engineering For Integrity Large Composite Structures. Cambridge: University of Glasgow, 2013: 8-11.
- [24] SHAMSUDIN M H, CHEN J, YORK C B. Buckling response of hygro-thermally curvature-stable laminates with extension-twisting coupling[C]//1st International Conference of the International Journal of Structural Integrity. Porto: Publindústria, 2012: 35.
- [25] LI J, LI D K. Extension-shear coupled laminates with immunity to hygro-thermal shearing distortion[J]. *Composite Structures*, 2015, 123: 401-407.
- [26] 崔达. 复合材料弯扭耦合结构优化设计[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- CUI Da. Optimization design of bending-twisting coupled composite structure[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018(in Chinese).