

结构-功能一体化异种复合材料壁板优化与验证

钟小平, 刘斌, 张纯, 李斐, 陈子昂, 刘彦诚

(西北工业大学航空学院, 西安, 710072)

摘要 基于航空壁板结构承载-电气功能的一体化需求,对适用于智能蒙皮的异种复合材料壁板开展了优化设计与试验验证。通过在高模量碳纤维蒙皮的外侧增加玻璃纤维层,进行了以碳纤维-玻璃纤维-金属结构单元阵列-玻璃纤维复合顺序的壁板承载-电气功能一体化设计。针对异种复合材料结构的铺层优化需要考虑共胶接的分区域及铺层连续性的工艺要求,发展了基于丢层序列的优化方法,并对于加筋壁板的几何外形、筋条数量、筋条几何参数以及筋条与蒙皮的铺层角度进行了优化设计。通过压缩稳定性试验验证了该结构在承载能力和稳定性方面的收益,明晰了其压缩载荷下的屈曲模态及后屈曲失效机理。

关键词 壁板;结构-电气功能一体化;屈曲;失效;复合材料

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.03.010

中图分类号 V261.97;V257 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)03-0063-08

Optimization and Verification of a Structure-Function Integrated Heterogeneous Composite Wall Panel

ZHONG Xiaoping, LIU Bin, ZHANG Chun, LI Fei, CHEN Ziang, LIU Yancheng
(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Based on the integrated requirements of load-bearing and electrical functions of aviation wall panel, an optimized design and an experimental verification are conducted to heterogeneous composite material wall panel suitable for intelligent skin. By adding a glass fiber layer in the outer side of the high modulus carbon fiber skin, a wall panel load-bearing electrical functional integration design is carried out in the order of carbon fiber glass fiber metal structural unit array glass fiber composite. The layer optimization of heterogeneous composite material structures is in consideration of the zoning of co bonding and the process requirements for layer continuity. An optimization method based on layer dropping sequence is developed, and the geometric shape, number of ribs, geometric parameters of ribs, and layer angle between ribs and skin of the reinforced wall panel are optimized. The benefits of the structure in terms of load-bearing capacity and stability are verified through compression stability tests, and the buckling mode and post buckling failure mechanism under compression load are clarified.

Key words wall panel; integration of structure-electrical function; buckling; failure; composite material

收稿日期: 2023-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(51902256);工业装备结构分析国家重点实验室开放基金(GZ21115);航空科学基金(2020Z057053002)

作者简介: 钟小平(1977-),男,江西吉安人,讲师,博士,研究方向为航空科学宇航与技术。E-mail:zxp-proteus@nwpu.edu.cn

通信作者: 刘斌(1986-),男,陕西富平人,副研究员,博士,研究方向为航空科学宇航与技术。E-mail:binliu@nwpu.edu.cn

引用格式: 钟小平,刘斌,张纯,等.结构-功能一体化异种复合材料壁板优化与验证[J].空军工程大学学报,2024,25(3):63-70. ZHONG Xiaoping, LIU Bin, ZHANG Chun, et al. Optimization and Verification of a Structure-Function Integrated Heterogeneous Composite Wall Panel[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(3): 63-70.

航空器问世以来,蒙皮经历了从布料、木材、金属到复合材料的发展历程,尽管蒙皮的力学性能与疲劳寿命等已经有了长足的进步,但其始终未能摆脱承力结构的单一功能,充分利用其整流与大面积的特性、利用结构-功能一体化材料对其进行开发是航空器蒙皮未来的发展方向。

1985年,美国空军首次提出智能结构/蒙皮(smart structures/skins)的概念,此后的几年该定义与技术需求得到了完善^[1]。相较于传统蒙皮,智能蒙皮在提供承力结构外还拥有大量的嵌入式传感器、接收器与发射器阵列,能够集成航空器的部分电气功能,起到增加相控阵雷达单元数、减少传感器外露等效果,近几年针对智能蒙皮对机体结构状况的持续监测功能的相关研究也有了一定进展^[2]。将功能性组件整合入蒙皮材料可以在多个尺度上完成,随尺度减小,工程难度会随之增加^[3]。Matic^[4]将不同尺度的整合进行了分类:Ⅰ类由多相材料简单层压构成;Ⅱ类将功能性材料嵌入到结构相中;Ⅲ类由不同材料相互交织,最终得出一种新的一体化材料。虽然Ⅰ类与Ⅱ类材料的设计集成度较低,但工程难度更低,已经被证明相较传统材料有了质的飞跃^[5],故当前的研究主要围绕这两个尺度展开。目前,智能蒙皮有望集成的功能主要包括共形天线阵列与隐身超表面技术。

共形天线阵列可用于发射与接收信号的天线阵列与蒙皮承力结构复合,从而减少导航、通信、目标搜索截获等功能天线的外露^[6]。现代大型民用航空器的外露天线约20~30处^[7],军用航空器上更高达60~70处^[8]。利用蒙皮安置天线阵列将减小外露机构产生的阻力和雷达散射截面积,相关研究的仿真实验结果也证实了共形天线阵列有助于提高天线增益与雷达孔径^[9]。现阶段,美国雷声公司开发了单曲面有源电扫阵列,诺·格公司在试验机上完成搭载智能蒙皮天线阵列的试飞^[10],以色列服役“费尔康”雷达准共形天线阵列预警机,中国首架采用共形天线技术的无人机“天哨”已经首飞。共形天线阵列正在完成从实验性技术到实用化技术的转变。

隐身超表面是一种新兴技术,基于的电磁超材料最早由Rodger^[11]提出,特指一种人工设计的层压电磁复合材料。该材料利用周期性亚波长金属/介电结构,通过亚波长金属谐振器实现对电磁波的可控变化,达到控制入射电磁波散射幅度、相位、极化等特性的目的,从而实现雷达隐身^[12]。由于超材料本身存在工艺复杂、欧姆损耗明显等问题,目前实验室制造的隐身结构以其二维形式超表面为主^[13],如东南大学完成的雷达-红外隐身超表面^[14]与宁波

大学钟硕敏团队完成的基于超表面的雷达-红外隐身结构^[15]。针对隐身超表面的散射模式控制,空军工程大学的王甲富、屈绍波团队则成功测试了一种基于脑电波的远程控制方法,并将就控制精度做进一步完善^[16]。

在上述背景下,共形天线阵列技术将很快趋于成熟并应用于新一代军用航空器,隐身超表面技术也展现出了较好的前景,针对其所需的结构-功能一体化异种复合材料的结构设计工作对于其应用推广尤为重要。薄壁结构在飞机结构中应用广泛^[17-20],机翼上壁板在飞行中受压缩和剪切载荷,需要有良好的抗失稳及后屈曲承载能力^[21-22]。基于结构-电气功能一体化的趋势要求,设计一种可同时满足承载和电气功能要求的壁板结构十分必要。本文通过在高模量碳纤维蒙皮的外侧增加玻璃纤维层,形成碳纤维-玻璃纤维-金属结构单元阵列-玻璃纤维的铺层顺序壁板结构,实现飞机壁板的承载-电气功能一体化设计。关于CFRP-GFRP异种材料结构-电气功能一体化的文献很少,Damghani关注了CFRP-GFRP异种材料结构的压缩、剪切及冲击后拉伸性能^[23-26]。但是,尚未有公开发表的关于加筋壁板研究的文献。需要提出和验证异种材料加筋结构的优化设计方法。本文针对这类共胶结结构提出了一种分区域和丢层方法用于对铺层角度连续工艺的约束条件,并对优化结果进行了试验验证,结果表明该方法结构减重、承载能力提高以及稳定性提高改善显著。

结构各区域承受载荷的大小不同,分区域设计可以尽可能地减轻结构重量。然而,对于多区域的复合材料结构,针对各区域分别进行优化得到的铺层顺序可能会出现铺层角度冲突的情况,即纤维不连续情况。纤维的不连续不仅会切断传力路径(原本由纤维传递的载荷会转移到基体上进行传递),导致区域连接处的应力集中,也会增加连接件的数量,影响结构的整体性能,甚至工艺上的不可行。对此,国外学者对大型复合材料结构多区域优化设计的纤维连续性优化进行了广泛研究,而国内关于这一问题研究也不断跟进并取得突破。优化软件Hypersizer^[27]中新增了一个关于铺层递减纤维协调优化设计的模块,也突显了纤维连续性问题的重要性。Zabinsky和Kristinsdottir^[28]于1994年首次提出blending这一术语用于描述纤维连续性模型,其定义为:对于多优化区域复合材料进行铺层顺序设计,保证相邻区域间某些或全部的铺层角度保持连续,这一准则称为纤维连续性。Kristinsdottir^[29]给出“不小于准则”用以限制两相邻区域间的铺层情况:对于两相邻区域,较厚区域

在连接处通过丢弃若干单层的方式形成较薄区域的铺层结构。Campen^[30]于2008年将该模型命名为广义纤维连续性模型。Liu和Haftka^[31]以及Toropov^[32]将纤维连续性其作为约束条件进行考虑。为了度量相邻区域间纤维的连续性,定义了2种连续性指标:材料组分连续和铺层顺序连续。Soremekun^[33]通过引入设计变量区域(design variable zones, DVZ)和子层合板(sub-laminates, SL)2个概念进行复合材料纤维连续性设计。采用两级优化策略,第1级对各区域分别进行优化,第2级对相同的厚度区域进行重新定义和优化,使得各区域纤维连续。由于该方法采用了启发式策略和分级策略,所以无法保证全局最优解。Adams^[34]通过在并行环境中采用迁移分布式遗传算法进行复合材料多区域设计,对每个区域分别进行优化,并通过Levenstein距离实现对相邻区域间纤维的不连续的惩罚。Adams随后提出基于纤维连续性的向导式纤维连续模型,使得计算量大幅度减小,并且优化结果能完全满足其定义的纤维连续模型。Liu和Butler^[35]对复杂受载情况下的复合材料加筋板采取两级优化方法进行纤维连续性优化设计:全局级优化和局部级优化。在全局级优化中,固定各层组的铺层比例,设计变量为蒙皮厚度,以及蒙皮、筋条腹板和凸缘的宽度,目标为重量最小。在局部级优化中,以屈曲载荷因子最大为目标,进行各部件(蒙皮、筋条腹板和凸缘)的铺层顺序优化设计,并采用铺层顺序表以保证满足复合材料工艺要求。重复使用预先定义子层合板作为铺层模板,对各部件进行铺层调整以达到铺层的整体连续性,但研究表明该表格方法通常会导致屈曲能力的下降。Liu^[36-37]提出一种共享铺层连续性模型(shared layers blending, SLB)进行相邻区域的纤维连续性调整,即对每个角度的所有铺层进行排序,所有区域包含的最小层数放置在最外面,对剩余的铺层重复此算法。该方法实施过程较为繁琐,往往需要人工干预才能保证最终铺层结构满足各种约束。为了更好地解决铺层冲突问题,确保得到的铺层结构满足纤维连续性要求,本文发展了基于丢层序列^[38]的多区域异种复合材料结构优化铺层模型。

1 结构-电气功能一体化加筋壁板的优化设计

1.1 优化设计方法

对于加筋壁板的设计布局,设计之初的信息并

不全面,仅有工况要求与壁板几何大小,并无筋条加固形式、筋条数量、筋条几何参数等信息。这些信息需要通过优化设计的方法进行确定。优化过程涉及对壁板建模和铺层优化设计,优化流程如图1所示。

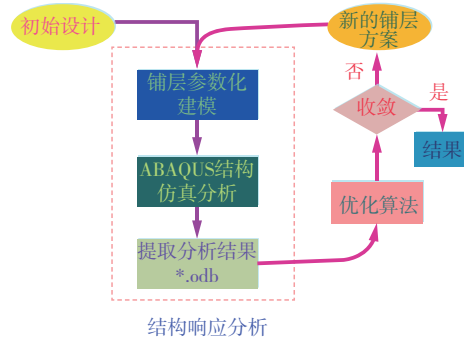


图1 本文的优化设计流程

步骤1 设计变量包括截面参数、铺层数目和铺层角度。

步骤2 确定优化目标为加筋结构重量最轻。

步骤3 优化设计的约束条件为刚度约束,即采用稳定性与刚度对结构参数进行限制。另外,压缩许用应变为 $-3\ 000\ \mu\epsilon$ 。

步骤4 透波玻璃纤维层和承载高模量碳纤维层的铺层优化。施加铺层限制,即工艺铺层约束和设计铺层约束。加筋板采用共胶接的铺层工艺,筋条铺层、蒙皮透波玻璃纤维铺层和蒙皮承载高模量碳纤维铺层分别独立设计。为了简化加工制造,各筋条采用相同的尺寸和铺层。这样,筋条、蒙皮透波玻璃纤维层和蒙皮承载高模量碳纤维层各自形成一组铺层设计,从而将文献[38]中的单一丢层序列拓展到多个丢层序列,以对异种复合材料结构的铺层结构进行优化。对于每一个丢层序列,多区域铺层模型见图2,丢层序列示意图见图3。

设计铺层约束为:

- 1) 采用标准的 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 90° 铺层角;
- 2) 对称均衡铺层;
- 3) 同一铺层角的连续铺层数不超过4层;
- 4) 最外层为 $\pm 45^\circ$;
- 5) 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 90° 各铺层角的最大铺层比例不超过60%且不小于10%;
- 6) 由于承受单向轴压,要求 0° 铺层角铺层所占的比例不小于40%。

设计优化结果通过工程算法进行校核。对于给定载荷 $N_x=697\ \text{N/mm}$ 时,屈曲因子计算式为:

$$\lambda(m) = \frac{\pi^2 D_{22}}{b^2} \cdot$$

$$\left[\frac{D_{11}}{D_{22}} \left(\frac{b}{a} \right)^2 m^2 + 2 \left(\frac{D_{12} + 2D_{66}}{D_{22}} \right) + \left(\frac{a}{b} \right)^2 \frac{1}{m^2} \right] \frac{1}{N_x} \quad (1)$$

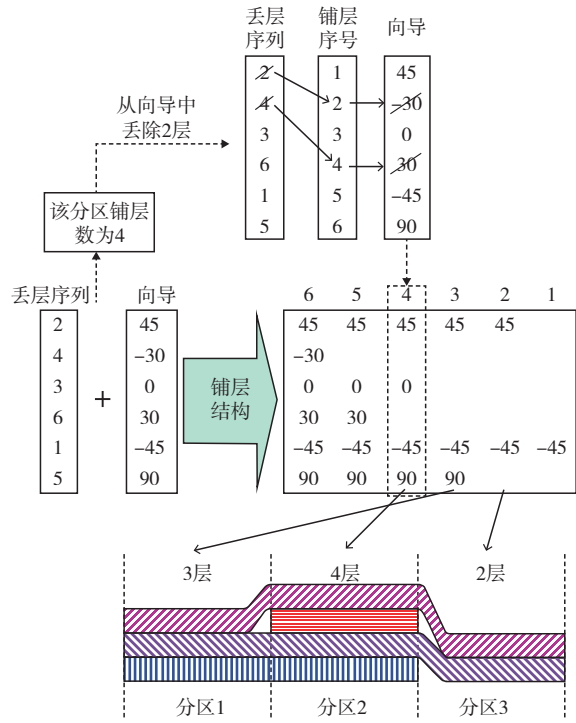


图2 多区域铺层模型示意图

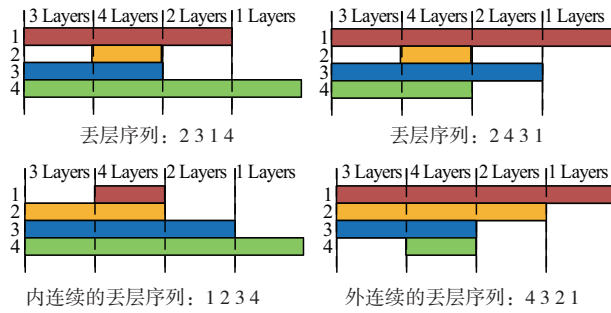


图3 丢层序列说明图

1.2 优化结果

加筋壁板采用有限元参数化建模,基于本论文优化设计方法,加筋板重量随进化代数的历程曲线如图4所示,最终设计优化结果如表1、表2所示。

上述优化结果,蒙皮的碳纤维、玻璃布和筋条碳纤维各铺角度的铺层比例如表3所示。

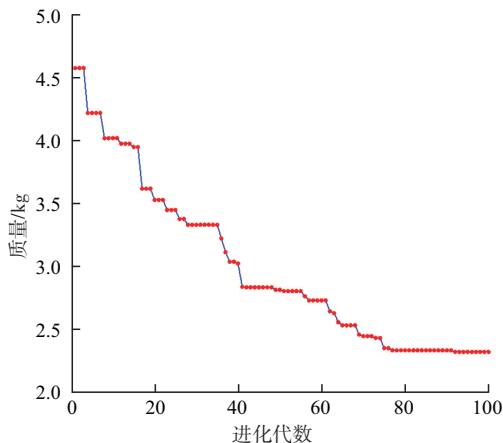


图4 加筋板重量随进化代数的变化曲线

表1 复合材料加筋壁板轴压稳定性试验件名义尺寸

参数	1组	2组
材料	纯碳纤	碳纤+玻纤
结构形式	J型	J型
试验件长度/mm	816	816
试验件宽度/mm	300	300
长桁间距/mm	135	135
蒙皮厚度/mm	3	5
长桁垂直腹板高度/mm	45.2	45.2
长桁垂直腹板厚度/mm	1.6	1.6
长桁底缘宽度/mm	30	30
长桁底缘厚度/mm	1.6	1.6
长桁上缘条宽度/mm	12.2	12.2
长桁上缘条厚度/mm	1.6	1.6

表2 复合材料加筋壁板轴压稳定性试验件铺层形式

部位	参数	优化数值	备注
蒙皮	厚度/mm	2	
	层数	10	
GFRP	铺层	$[-45/0/45/0/90]_s$	织物经向变化
	厚度/mm	2.75	
CFRP	层数	22	
	铺层	$[45/0/-45/0/90/0/90/45/0/-45/0]_s$	单向带
	数目	3	
	高度/mm	42	
J型筋	缘条半	15	
	宽度/mm	1.5	
	厚度/mm	1.5	
	层数	12	
	铺层	$[-45/0/45/0/90/0]_s$	单向带

表3 蒙皮与筋条的不同铺层角度的铺层比例

铺层方向	蒙皮碳纤维	蒙皮玻璃布	筋条碳纤维
0°	10/22=45.5%	4/10=40%	6/12=50%
±45°	8/22=36.4%	4/10=40%	4/12=33.3%
90°	4/22=18.1%	2/10=20%	2/12=16.7%

2 材料、试验件及试验

2.1 材料与试验件

加筋壁板分为蒙皮与J型筋条,其中蒙皮分为CFRP与CFRP-GFRP 2种。碳纤维采用单向复合材料,纤维牌号为HF34-12K,树脂牌号为EM916。

玻纤布采用 2D 织物,牌号为 EW210,基体的树脂与碳纤维层相同。蒙皮与 J 型筋采用共胶结形式进行连接,胶膜牌号为 EM603。2 种壁板制造流程如图 5 所示。一体化壁板试验件如图 6 所示。加筋板共 3 件,纯碳纤维壁板 1 件用于作为对比,承载透波一体化异种材料壁板共 2 件。

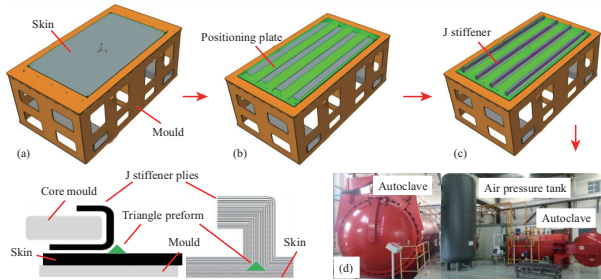
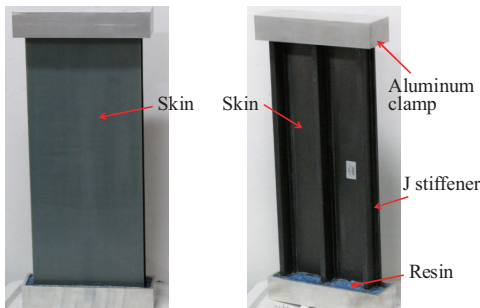


图 5 J 型加筋壁板制造工艺流程



(a) 蒙皮外侧(GFRP 面) (b) 内侧
图 6 承载透波一体化 J 型筋壁板试验件

2.2 试验装置

如图 7 所示,壁板轴压稳定性试验夹具由底座、压头、导柱、刀口架立柱、刀口架和刀口等组成。底座和压头分别装有球形支座,实现铰支,通过两侧的圆滚对中调节。刀口架立柱前后侧有燕尾槽,实现了刀口的无级调节。把刀口立柱架、上下球形支座等拆除后,进行压缩试验。试验中,对载荷、应变进行了实时监测。

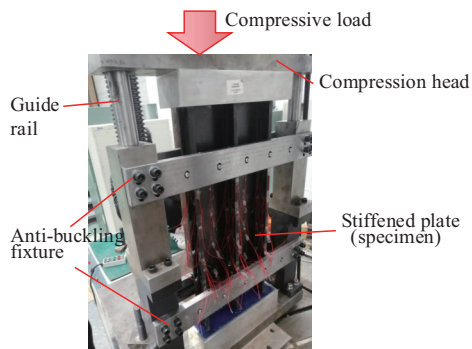


图 7 加筋壁板压缩试验装置

图 8 为加筋板压缩破坏情况,图 9 为典型位置应变-载荷曲线。H(Hybrid)为 GFRP-CFRE 结构-电气功能一体化臂板结构,C(Carbon)为 CFRP 纯碳纤维臂板结构。由图 8 和图 9 试验结果可知,在

压缩加载过程中,纯 CFRP 壁板首先发生长桁与蒙皮之间的脱粘,其次发生屈曲变形,然后进入后屈曲承载阶段,其屈曲载荷较低;GFRP-CFRP 结构-电气功能一体化壁板屈曲最先发生,然后于蒙皮 GFRP 与 CFRP 界面脱粘,屈曲后并很快进入破坏。另外,由图 9 可以看出,蒙皮局部屈曲失稳最先发生,然后筋条发生局部屈曲失稳,这种屈曲失稳顺序符合结构设计的愿望。

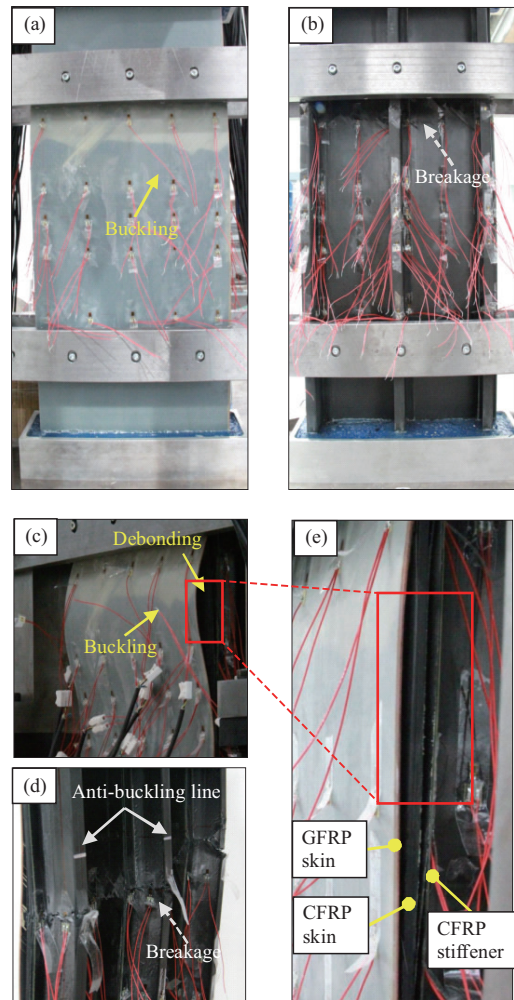
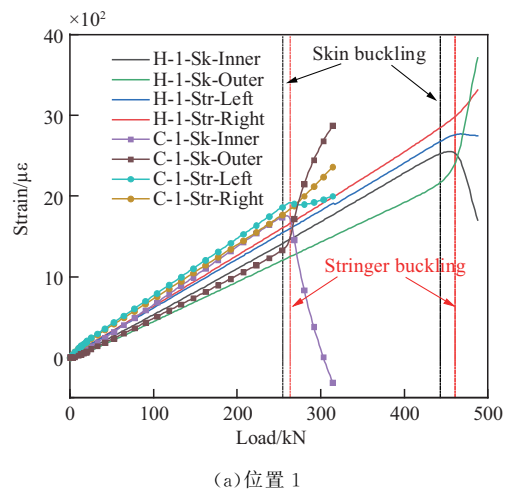
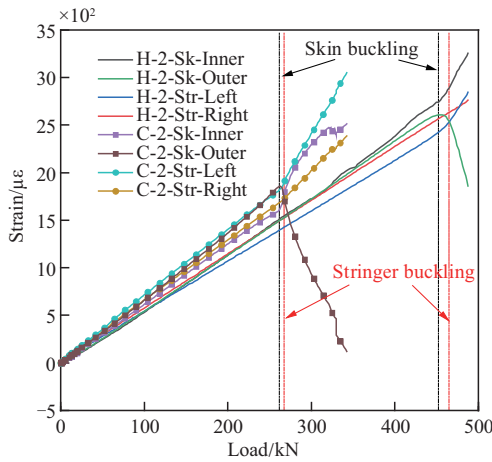


图 8 加筋板压缩破坏



(a) 位置 1



(b)位置 2

图 9 加筋板典型位置应变-载荷曲线

3 结果与讨论

本文分别完成 1 件 CFRP 壁板和 2 件 GFRP-CFRP 壁板轴压稳定性试验。加筋壁板压缩稳定性试验结果如表 4 所示。加筋板压缩破坏如图 8 所示。典型位置应变-载荷曲线如图 9 所示,典型贴片位置如图 10 所示。屈曲模式对比如图 11 所示。

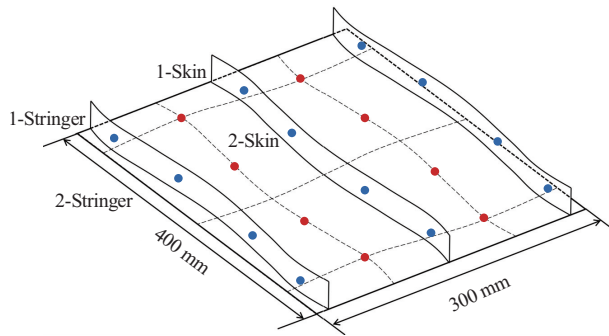
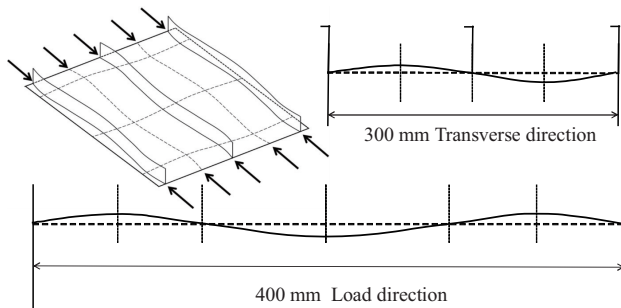
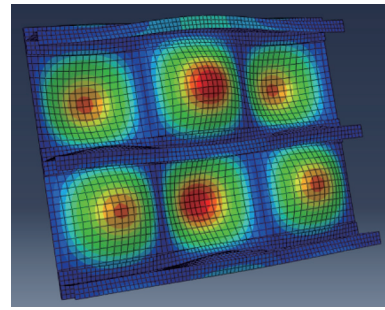


图 10 加筋板典型贴片位置



(a)试验结果



(b)有限元计算结果

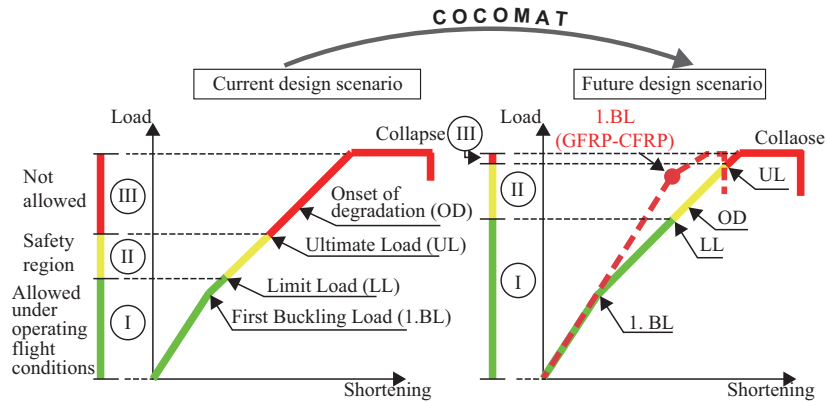
图 11 GFRP-CFRP 壁板压缩屈曲模式对比

根据蒙皮与筋条正反面应变的分叉现象可以判断该部位屈曲失稳的面外位移方向,图 10 中红色为蒙皮应变监测位置,蓝色为筋条应变监测位置。依据应变分叉即屈曲的原理和应变-载荷位移曲线可得到 CFRP 壁板和 GFRP-CFRP 壁板的屈曲波形一致,如图 11(a)所示,且与有限元线性屈曲计算模式图 11(b)相同。采用式(1)计算得到 CFRP 壁板的线性屈曲因子 $\lambda = 1.230$ (即 257.2 kN),半波数 $m = 3$,与有限元仿真结果相比:①半波数相同,都为 3;②线性屈曲因子较吻合,分别为 1.230 与 1.105,相对误差 11.3%。

表 4 给出了 2 种壁板压缩试验的载荷、应变及提高百分比结果。增加 GFRP 外层后,加筋壁板的屈曲载荷提高了 82.5%,破坏载荷提高了 42.4%,破坏应变提高了 50%,说明这种结构-电气功能一体化加筋壁板有更好的稳定性和承载能力。更重要的是,试验发现屈曲载荷与破坏载荷之比由原来的 0.72 提高到了 0.92,这说明 GFRP-CFRP 加筋壁板在破坏载荷的 92% 以前不会发生屈曲,即该类结构在设计载荷范围内不会轻易发生屈曲,结构更为安全。图 12 为 Degenhardt^[39-40]指出欧盟第七框架项目提出的未来复合材料壁板结构应提高允许飞行载荷,图中虚线标出了本文承载-电气功能一体化壁板结构的屈曲载荷值提高到了接近破坏载荷的示意位置,这表面该类结构的后屈曲阶段较少。

表 4 加筋壁板压缩试验结果

结构形式	屈曲载荷 /kN	提高比例	破坏载荷 /kN	提高比例	破坏应变水平 / $\mu\epsilon$	提高百分比	屈曲/破坏载荷比	提高比例
CFRP 壁板	246		342.5		2 000		0.72	
GFRP-CFRP 壁板	449	82.5%	487.6	42.4%	3 000	50%	0.92	27.8%

图 12 典型桁条加筋复合材料板的当前和未来设计方案^[39-40]

4 结语

1) 本文对结构-电气功能一体化壁板的参数进行了优化设计,发展了采用共胶接的分区域及铺层连续性工艺约束的丢层序列铺层优化模型。该优化模型可对加筋壁板的几何外形、J形筋条数量、筋条几何参数以及筋条与蒙皮的铺层数目、铺层角度进行优化设计。

2) 虽然结构-电气功能一体化异种复合材料壁板较纯碳纤维壁板蒙皮只增加了 2 mm 厚的玻璃纤维,但其屈曲载荷提高了 82.9%,破坏载荷提高了 39.7%,承载性能提高显著。

3) 传统纯碳纤维壁板的屈曲/破坏载荷比为 71.8%,而异种材料壁板的屈服/破坏载荷比高达 92.3%。因此,结构-电气功能一体化异种复合材料壁板的屈曲载荷更接近其承载能力。

参考文献

- [1] MAZUR C J, SENDECKY G P, STEVENS D M. Air Force Smart Structures/Skins Program Overview[C]//Fiber Optic Smart Structures and Skins. Washington D C: SPIE, 1989: 19-31.
- [2] WANG Y, HU S, XIONG T, et al. Recent Progress in Aircraft Smart Skin for Structural Health Monitoring[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(5): 2453-2480.
- [3] MOMODA L A. The Future of Engineering Materials; Multifunction for Performance-Tailored Structures[C]//Frontiers of Engineering; Reports on Leading-Edge Engineering from the 2004 NAE Symposium on Frontiers of Engineering. Washington D C: National Academies Press, 2005: 47-152.
- [4] MATIC P. Overview of Multifunctional Materials[C]//Smart Structures and Materials 2003; Active Materials; Behavior and Mechanics. Washington D C: SPIE, 2003: 61-69.
- [5] CHRISTODOULOU L, VENABLES J D. Multifunctional Material Systems; The First Generation[J]. Jom, 2003, 55: 39-45.
- [6] JOSEFSSON L, PERSSON P. Conformal Array Antenna Theory and Design [M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [7] HOPKINS M, TUSS J, LOCKYER A, et al. Smart Skin Conformal Load-Bearing Antenna and Other Smart Structures Developments[C]//38th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Kissimmee, FL: AIAA, 1997: 1163.
- [8] SCHNEIDER S W, BOZADA C, DETTMER R, et al. Enabling Technologies for Future Structurally Integrated Conformal Apertures[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Piscataway: IEEE, 2001: 330-333.
- [9] 叶杰, 刘志慧. 机载预警雷达共形阵应用技术分析[J]. 现代雷达, 2009, 31(7): 8-11.
- [10] 朱松. 共形天线的发展及其电子战应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2007, 2(6): 6.
- [11] WALSER R M. Electromagnetic Metamaterials [C]//Complex Mediums II; Beyond Linear Isotropic Dielectrics. Washington D C: SPIE, 2001: 1-15.
- [12] CHEN H T, TAYLOR A J, YU N. A Review of Metasurfaces: Physics and Applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2016, 79(7): 076401.
- [13] JOY V, DILEEP A, ABHILASH P V, et al. Metasurfaces for Stealth Applications; A Comprehensive Review [J]. Journal of Electronic Materials, 2021, 50(6): 3129-3148.
- [14] ZHANG C, YANG J, YUAN W, et al. An Ultralight and Thin Metasurface for Radar-Infrared Bi-Stealth Applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(44): 444002.
- [15] ZHONG S, JIANG W, XU P, et al. A Radar-Infrared Bi-Stealth Structure Based on Metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(6): 063502.
- [16] ZHU R, WANG J, QIU T, et al. Remotely Mind-Con-

- trolled Metasurface via Brainwaves [J]. *eLight*, 2022, 2(1): 121-131.
- [17] 韩庆, 宋恩鹏, 陆华, 等. 复合材料加筋结构后屈曲的自开发程序[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(7):1443-1450.
- [18] 赵群, 金海波, 丁运亮, 等. 加筋板总体失稳分析的等效层合板模型[J]. *复合材料学报*, 2009, 26(3):195-201.
- [19] 霍世慧, 王富生, 王佩艳, 等. 复合材料机翼加筋壁板稳定性分析[J]. *应用力学学报*, 2010, 27(2):423-427, 451.
- [20] 吴存利, 聂小华. 加筋板破坏载荷计算中的蒙皮有效宽度计算方法适应性验证[J]. *航空工程进展*, 2020, 11(3): 387-393, 407.
- [21] 王海燕, 段世慧, 孙侠生. 复合材料加筋板后屈曲设计技术欧盟研究综述[J]. *航空工程进展*, 2015, 6(2):139-148.
- [22] 阳奥, 陈普会, 孔斌, 等. 数字图像相关技术在复合材料加筋曲板压缩试验中的应用[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(10):2439-2451.
- [23] DAMGHANI M, PIR R A, MURPHY A, et al. Experimental and Numerical Study of Hybrid (CFRP-GFRP) Composite Laminates Containing Circular Cut-Outs under Shear Loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 179: 109752.
- [24] DAMGHANI M, SADDLER J, SAMMON E, et al. An Experimental Investigation of the Impact Response and Post-Impact Shear Buckling Behavior of Hybrid Composite Laminates[J]. *Composite Structures*, 2023, 305: 116506.
- [25] DAMGHANI M, WALLIS C, BAKUNOWICZ J, et al. Using Laminate Hybridization (CFRP-GFRP) and Shaped CFRP Plies to Increase Plate Post-Buckling Strain to Failure under Shear Loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 162: 107543.
- [26] DAMGHANI M, MATTHEWS J, MURPHY A, et al. Numerical Shape, Thickness and Stacking Sequence Optimisation and Experimental Study of Hybrid Composite Plates under In-Plane Shear Loading[J]. *Structures*, 2023, 51: 372-390.
- [27] 卢秉贺, 李萍. 基于 Hypersizer 的复合材料结构铺层设计和铺层过渡设计[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(2): 5482-5485.
- [28] KRISTINSDOTTIR B, ZABINSKY Z. Including Manufacturing Tolerances in Composite Design[C]//35th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Hilton Head; AIAA, 1994: 1495.
- [29] KRISTINSDOTTIR B P, ZABINSKY Z B, TUTTLE M E. Optimal Design of Large Composite Panels with Varying Loads [J]. *Composite Structures*, 2001, 51(1): 93-102.
- [30] VAN CAMPEN J, KASSAPOGLOU C, ABDALLA M, et al. Blended Designs for Composite Plates with Two Concentric Layups under Compression[C]//Proceedings of ICCM-17. Edinburgh: The British Composites Society, 2009: 27.
- [31] LIU B, HAFTKA R. Composite Wing Structural Design Optimization with Continuity Constraints[C]//19th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Anaheim: AIAA, 2001: 1205.
- [32] TOROPOV V V, JONES R, WILLMENT T, et al. Weight and Manufacturability Optimization of Composite Aircraft Components Based on a Genetic Algorithm[C]//Proceedings of 6th World Congress of SMO. Brazil: [s. n.], 2005.
- [33] SOREMEKUN G, GÜRDAL Z, KASSAPOGLOU C, et al. Stacking Sequence Blending of Multiple Composite Laminates Using Genetic Algorithms [J]. *Composite structures*, 2002, 56(1): 53-62.
- [34] ADAMS D B, WATSON L T, GÜRDAL Z. Optimization and Blending of Composite Laminates Using Genetic Algorithms with Migration [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2003, 10(3): 183-203.
- [35] ADAMS D B, WATSON L T, GÜRDAL Z, et al. Genetic Algorithm Optimization and Blending of Composite Laminates by Locally Reducing Laminate Thickness [J]. *Advances in Engineering Software*, 2004, 35(1): 35-43.
- [36] LIU W, BUTLER R. Optimum Buckling Design of Composite Wing Cover Panels with Manufacturing Constraints [C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, Hawaii: AIAA, 2007:2215.
- [37] LIU D, TOROPOV V V, QUERIN O M, et al. Bilevel Optimization of Blended Composite Wing Panels[J]. *Journal of Aircraft*, 2011, 48(1):107.
- [38] YANG J, SONG B, ZHONG X, et al. Optimal Design of Blended Composite Laminate Structures Using Ply Drop Sequence [J]. *Composite Structures*, 2016, 135:30-37.
- [39] DEGENHARDT R, TESSMER J. Improved Design Scenario for Composite Airframe Structures [C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, Hawaii: AIAA, 2007: 2180.
- [40] DEGENHARDT R, ROLFES R, ZIMMERMANN R, et al. COCOMAT Improved Material Exploitation of Composite Airframe Structures by Accurate Simulation of Postbuckling and Collapse [J]. *Composite Structures*, 2006, 3(2):175-178.

(编辑:徐楠楠)