

引用格式: 周晓松, 张焱冰, 陈如木. 玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板弯曲能量耗散机制[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(4): 28–35.
ZHOU X S, ZHANG Y B, CHEN R M. Bending energy dissipation mechanism of glass fiber/resin composite foam sandwich panel[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(4): 28–35.

玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板 弯曲能量耗散机制



周晓松¹, 张焱冰^{*2}, 陈如木²

1 中国人民解放军军事科学院 国防科技创新研究院, 北京 100071
2 海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033

摘要: [目的] 为了解玻璃纤维/树脂复合材料夹层板在弯曲载荷作用下的能量耗散机制, 从能量耗散角度开展数值模拟分析和试验研究。[方法] 基于有限元软件 ABAQUS 建立玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板的有限元分析模型, 对三点弯曲试验中典型的破坏模式和能量耗散机制进行模拟分析, 将数值模拟结果与试验结果进行对比。在数值模型有效性分析的基础上, 进一步分析面板和夹芯层厚度对玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板力学承载性能和能量耗散机制的影响。[结果] 结果表明, 增加表层复合材料面板厚度能够更大程度地提高玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板的比吸能效率。[结论] 研究成果可为玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层结构的工程防护应用设计提供参考, 具有一定的理论意义和工程应用价值。
关键词: 复合材料; 泡沫夹层板; 破坏模式; 能量耗散
中图分类号: U661.43; U663.9⁹ **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.01426

Bending energy dissipation mechanism of glass fiber/resin composite foam sandwich panel

ZHOU Xiaosong¹, ZHANG Yanbing^{*2}, CHEN Rumu²

1 National Academy of Defense Science and Technology Innovation, Academy of Military Sciences of PLA, Beijing 100071, China

2 College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: [Objectives] In order to understand the energy absorption mechanism of glass fiber/resin composite foam sandwich panels under bending load, the numerical simulation analysis and experimental study were carried out from the angle of energy dissipation. [Methods] The finite element analysis model for glass fiber/resin composite foam sandwich panels was established based on finite element software ABAQUS to simulate and analyze the typical failure mode and energy absorption mechanism under three-point bending and compare the numerical simulation results with test results. Furthermore, the influence of the thickness of the panel and the core on the bearing capacity and energy absorption capacity was further analyzed based on the analysis of the validity of the numerical model. [Results] The results show that an increased thickness of composite face sheet can provide higher energy absorption mechanism of glass fiber/resin composite foam sandwich panels. [Conclusions] The study in this paper can provide reference for the engineering protection application design of glass fiber/resin composite foam sandwich structure, which has certain theoretical significance and engineering application value.
Key words: composite material; foam sandwich panel; failure mode; energy dissipation

收稿日期: 2018-09-11 修回日期: 2019-07-09 网络首发时间: 2019-8-28 16:23
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479205)
作者简介: 周晓松, 男, 1990年生, 博士, 助理研究员。
张焱冰, 男, 1985年生, 博士, 讲师。
^{*}通信作者: 张焱冰

0 引言

随着对冲击防护结构设计要求的不断提高,工程界试图寻求抗冲击性能优良的结构形式以满足不同的防护性能需求。复合材料夹层结构由于具有轻质、比强度高、比刚度大、能量吸收特性好以及力学性能可设计等优异性能,被广泛用于航空航天、交通运输、船舶与海洋工程等冲击防护领域^[1]。

对于应用最为广泛的玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板构件而言,在低速冲击载荷作用下,弯曲变形是其最为常见的承载吸能状态。Li等^[2]指出,高达90%的结构件破坏是由于弯曲破坏所引起,所以研究复合材料夹层板在低速冲击载荷下的弯曲行为成为工程界关注的热点。Xiong等^[3-5]研究了不同材料体系夹层板的准静态和动态弯曲变形响应。范华林等^[6]对轻质高强度点阵材料及其力学性能研究进展进行了总结。目前,国内外在玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板抗冲击性能方面的相关研究主要集中在整体结构的冲击强度、冲击刚度以及冲击后的剩余强度特性方面^[7-9],对结构不同材料组分在冲击载荷作用下的能量耗散机制与协同吸能匹配性方面关注较少,从而难以以为夹层板抗冲击性能设计与优化给出具有工程应用价值的方法。

本文将基于有限元软件ABAQUS建立玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板试件的数值分析模型^[10-12],对三点弯曲载荷作用下玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板的典型破坏模式和能量耗散机制进行模拟分析,并在此基础上分析复合材料面板和夹芯层结构尺寸设计对整体结构能量耗散性能的影响,从而为复合材料夹层板结构抗冲击性能设计与优化提供参考依据。

1 试验验证方案

1.1 试件制作

玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板试件的制作共需用到3种原材料:表层采用江苏九鼎新材料股份有限公司的EWT400无碱玻璃纤维斜纹布,树脂采用美国亚士兰的510C环氧树脂基树脂,夹芯层泡沫芯材采用DIAB的HP130型,试件如图1所示。其中,表层复合材料厚度为4 mm,共有13层纤维布,铺层方向 $[0]_{13}$,单层厚度约为0.308 mm。夹芯层泡沫芯材厚度为40 mm,试件的整体尺寸(长×宽×厚)为360 mm×50 mm×48 mm。

1.2 试验测试原理

玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板试件的准静态三点弯曲试验是一种位移控制试验,试验进程通过人为设置压缩位移进行控制。在三点弯曲试验过程中,跨中加载头的压缩速率保持稳定,这与实际冲击过程中冲击体压缩速率不断降低直到静止的事实并不完全相同。对于10 m/s以内的低速碰撞问题,准静态压缩载荷下试件的弯曲变形特征与低速冲击过程中的十分相似,与正常的冲击试验条件相比更容易观察到详细的动态变形演变特征,尤其是在检验新结构是否具有优异的力学承载特性和能量耗散性能时,一般首先开展准静态试验研究进行验证。

三点弯曲试验的主要设备为西安力创10 t电液伺服万能材料试验机。试验采用三点弯曲加载方式,底部为简支边界条件,跨距275 mm。跨中加载头与底部简支工装均为直径20 mm的圆柱,跨中加载头位移持续加载,加载速度为2 mm/min,直至卸载或试件出现明显的结构破坏,以获取完整的载荷/位移曲线,加载测试方案如图1所示。

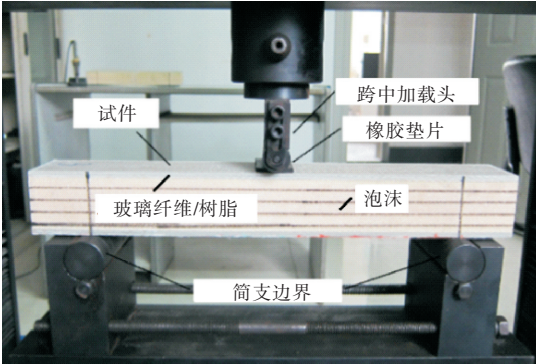


图1 三点弯曲试验测试方案
Fig.1 Test plan of three point bending

2 数值分析模型

2.1 模型建立

采用ABAQUS/Explicit建立复合材料夹层板试件在三点弯曲试验状态下的数值分析模型,其中上下复合材料表层采用SC8R连续壳单元模拟,夹芯层泡沫采用C3D8R三维实体单元模拟,复合材料表层和夹芯层泡沫间的复合界面采用cohesive粘单元COH3D8进行模拟。模型底端两侧钢质支撑圆柱采用固支边界,顶端跨中加载头采用滑动约束,通过MPC作用点施加轴向位移载荷。与复合材料夹层板试件相比,底部简支工装和跨中加载头的刚度较大,因此在数值模拟过程中可忽

略底部简支工装和加载头的变形,将其定义为离散刚体。加载头以及两侧钢质支撑圆柱和试件间的接触可通过显式求解分析中的通用接触算法进行定义,法向采用硬接触,切向摩擦系数设为0.3。复合材料夹层板试件的有限元分析模型如图2所示。

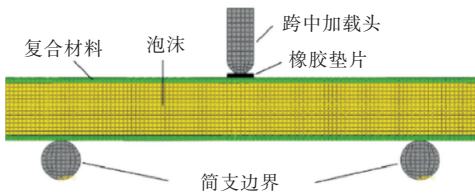


图2 三点弯曲试验有限元模型
Fig.2 Finite element model of three point bending

2.2 材料本构模型

玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板表层复合材料的失效分析采用二维 Hashin 失效准则,该失效判据为基于材料最大应力状态的力学性能退化方案,表层复合材料层合板的力学性能测试参数如表1所示。复合材料表层与夹芯层泡沫芯材间的复合界面选用 ABAQUS 中基于内聚力模型描述的 Traction-separation 双线性本构关系,胶膜单元的失效判据可选用应力准则和应变准则,本文研究采用二次应力准则:

$$D_{\text{init}} = \left[\frac{\langle \sigma_n \rangle}{N_{\text{max}}} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_t}{T_{\text{max}}} \right]^2 + \left[\frac{\sigma_s}{S_{\text{max}}} \right]^2 \quad (1)$$

$$\langle \sigma_n \rangle = \begin{cases} \sigma_n, & \sigma_n > 0 \\ 0, & \sigma_n < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_n , σ_s , σ_t 分别为层间正应力和两个方向的剪切应力; N_{max} , T_{max} , S_{max} 对应层间拉伸和剪

表1 复合材料层合板参数

Table 1 Material properties of composite laminate

属性类型	特征值
纵向刚度 E_{11} /GPa	25.8
横向刚度 E_{22} /GPa	21.8
面外刚度 E_{33} /GPa	10
泊松比 ν_{12}	0.115
泊松比 ν_{13} , ν_{23}	0.26
剪切模量 G_{12} /GPa	3.85
剪切模量 G_{13} , G_{23} /GPa	1
纵向拉伸强度 X_t /MPa	489
纵向压缩强度 X_c /MPa	309
横向拉伸强度 Y_t /MPa	276
横向压缩强度 Y_c /MPa	183
面外拉伸强度 Z_t /MPa	64.4
剪切强度 S_{12} , S_{23} , S_{13} /MPa	33.9
密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 900

切的峰值强度。当损伤初始变量 $D_{\text{init}} = 1$ 时损伤开始产生,界面层的力学性能参数如表2所示。

表2 胶膜力学性能参数

Table 2 Mechanical parameters of glue film

属性类型	特征值
纵向刚度 E_{11} /MPa	3 000
剪切模量 G_{13} /MPa	1 160
剪切模量 G_{23} /MPa	1 160
正应力 σ_n /MPa	20 000
剪应力 σ_s /MPa	20 000
剪应力 σ_t /MPa	20 000
一次断裂能 G_{1c} /($\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$)	0.252
二次断裂能 G_{IIc} /($\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$)	0.665

夹芯层泡沫的弹性模量和弹性泊松比分别为170 MPa和0.36。由于夹芯层泡沫为弹塑性材料,起提供结构刚度的作用,因而选择 Crushing foam 本构模型作为夹芯层泡沫材料的损伤失效判据,取压缩屈服应力比 $k=1.73$,塑性泊松比 $\nu=0$ 。基于夹芯层泡沫单轴准静态压缩试验获取的塑性应力应变关系如表3所示。

表3 泡沫芯材弹塑性本构参数

Table 3 Elastic-plastic data of the foam core

屈服应力/MPa	塑性应变
1.393	0
1.631	0.003
1.799	0.011
1.854	0.020
1.744	0.032
1.649	0.046
1.671	0.068
1.704	0.126
1.730	0.205

3 结果对比分析

3.1 数值模型有效性验证

3.1.1 弯曲响应特征对比分析

本节首先对复合材料夹层板试件在准静态三点弯曲载荷作用下的响应特征进行仿真计算(FEM)和试验结果(Exp)的对比分析,验证数值模型的有效性并评估该复合材料夹层板试件是否具有良好的力学承载特性和能量耗散机制,如图3所示。

对载荷响应特征曲线进行对比分析可知,复合材料夹层板试件具有明显的三阶段响应特征,包括线弹性承载阶段、刚度退化阶段和结构破坏阶段。初始阶段为线弹性弯曲承载阶段,跨中加载头压缩载荷呈线性上升趋势。当压缩载荷达到

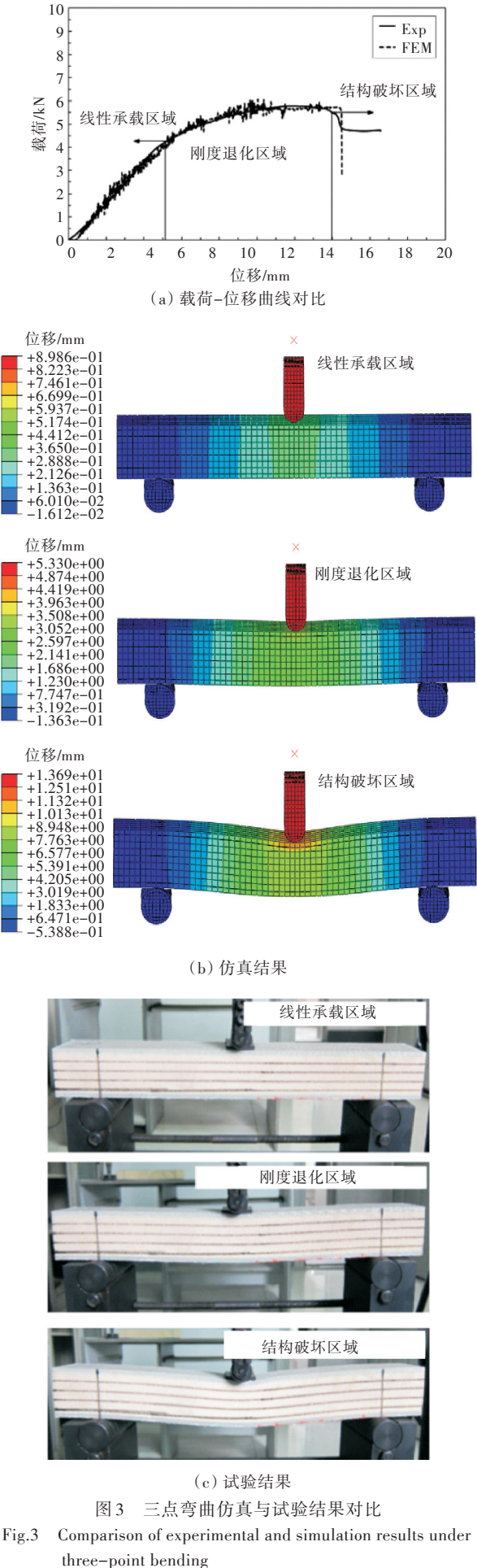


图3 三点弯曲仿真与试验结果对比

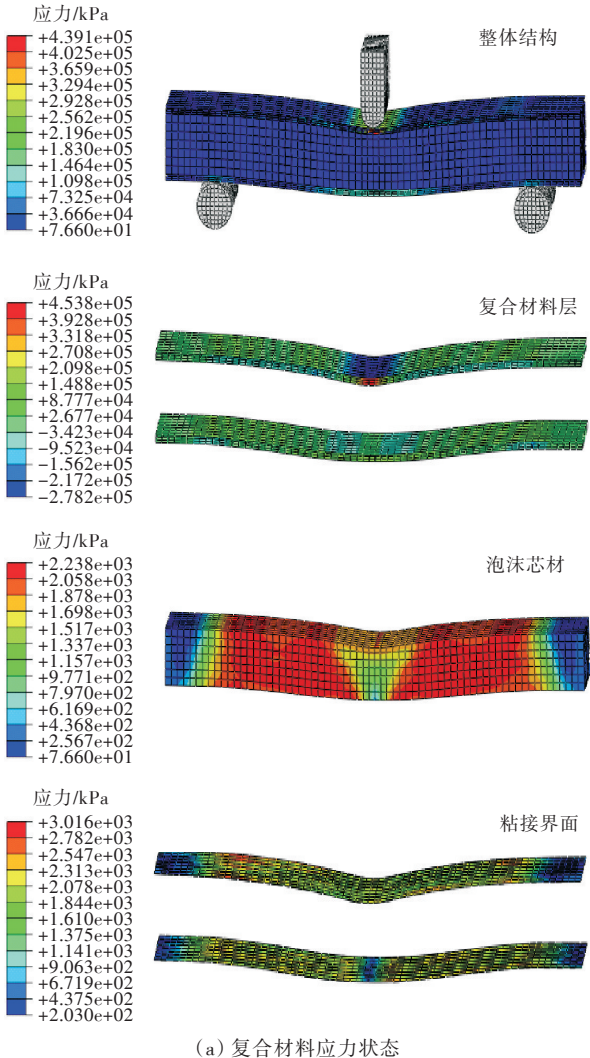
Fig.3 Comparison of experimental and simulation results under three-point bending

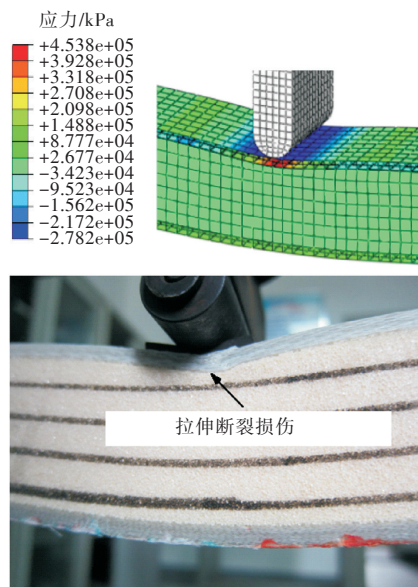
3.99 kN时,结构刚度出现折减,试件开始进入刚度退化阶段,但结构的承载能力仍呈上升趋势,在较长的压缩行程区间内压缩载荷较为平稳。当压缩载荷达到5.76 kN时,结构刚度退化阶段结束,跨中加载头载荷出现大幅度下降,试件进入结构破坏阶段。仿真计算与试验结果一致性较好,如图3(a)所示。

复合材料夹层板试件的三点弯曲变形过程也可分为两个阶段。在初始线弹性承载阶段,试件呈现整体弯曲变形特征。随着跨中加载头加载位移的增加,加载头与试件接触区域的应力水平不断上升,试件在由刚度退化阶段向结构破坏阶段过渡过程中,局部压入变形不断变大,试件呈现局部压入变形和整体弯曲变形共存的状态。仿真计算与试验结果一致性较好,如图3(b)和图3(c)所示。

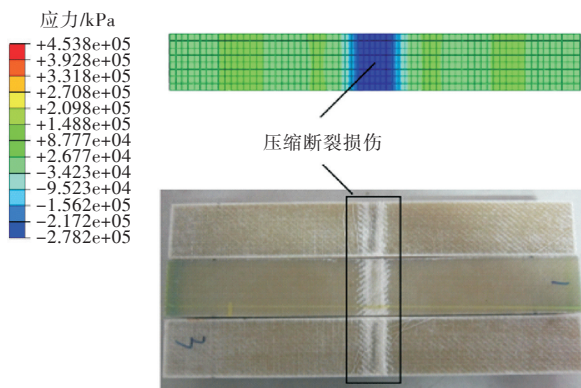
3.1.2 弯曲破坏模式对比分析

本文采用数值分析模型和高速摄影对复合材料夹层板试件在三点弯曲载荷作用下的损伤演变过程进行对比分析,试件极限承载状态下不同材料组分的应力云图和最终破坏模式如图4所示。





(b) 拉伸断裂损伤



(c) 压缩断裂损伤

图4 复合材料夹芯板试件弯曲破坏模式

Fig.4 Bending failure modes of composite foam sandwich panel specimens

准静态三点弯曲过程中的初始阶段为线弹性弯曲承载状态,夹芯层泡沫与表层复合材料面板均处于线弹性状态,协同承载跨中压缩载荷。当跨中压缩载荷上升至3.99 kN时,试件夹芯层泡沫出现压缩塑性损伤,宏观上表现为试件结构刚度的折减。结合数值模型分析可知,跨中加载头与试件上表面接触区域内夹芯层泡沫的平均应力水平已高于1.39 MPa,表明夹芯层泡沫出现了大面积的塑性损伤退化,导致复合材料夹层板试件的结构刚度出现退化。此时,接触区域上表层复合材料面板沿跨长方向的拉伸应力峰值和压缩应力峰值仅为109.8和166.7 MPa,远小于面板在该方向的拉伸强度和压缩强度阈值,因而上面板仍处于线弹性承载状态。试件进入刚度退化阶段后,与金属材料结构不同,此时结构内部应力重新分布且仍具有较强的承载能力。随着跨中压缩载荷和压缩变形的不断增大,复合材料表层面板的应力水平不断上升,当跨中压缩载荷达到5.76 kN

时,此时接触区域上表层复合材料面板沿跨长方向的拉伸应力峰值和压缩应力峰值达到453.8和278.2 MPa,已接近复合材料面板在跨长方向的拉伸强度和压缩强度阈值。进一步增加跨中加载头的压缩变形,试件将进入结构破坏阶段,复合材料上面板外表层出现局部压缩损伤,下表层与夹芯层泡沫相接面出现拉伸断裂破坏。此时,复合材料面板与夹芯层泡沫间复合界面的应力峰值仅为3.02 MPa,远小于粘接界面的极限强度20 MPa,因而未出现任何形式的界面损伤,与试验情况的一致性较好,表明试件界面处理工艺较好。综合分析可知,数值模拟与试验结果一致性较好,有效模拟了玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板的损伤失效过程和典型破坏模式。

3.1.3 能量耗散历程对比分析

结合ABAQUS数值模拟分析结果,对复合材料夹层板试件三点弯曲过程中不同材料组分的能量耗散历程进行定量分析,并将数值模拟结果(FEM)和试验结果(Exp)进行对比分析,如图5所示。图中, E_w 为外载荷做功。

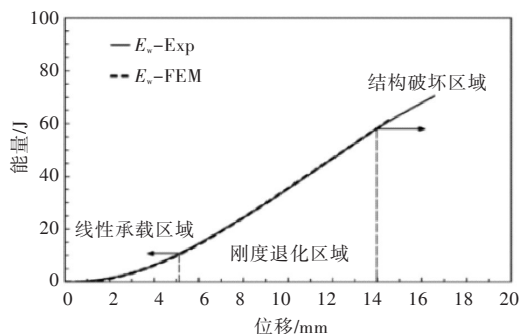


图5 整体能量试验与仿真结果对比

Fig.5 Comparison of experimental and simulation results of total energy

由图5可知,试验结果(Exp)和数值模拟结果(FEM)中的外载荷做功 E_w 曲线一致性较好。

三点弯曲数值分析模型的整体能量平衡可表示为

$$E_i + E_v + E_f + E_k - E_w = E_{\text{total}} \quad (3)$$

式中: E_i 为内能; E_v 为粘性耗散能; E_f 为摩擦耗散能; E_k 为动能; E_{total} 为这些能量分量的总和且必须为常数,在数值分析模型中通常有小于1%的误差。

$$E_i = E_e + E_p + E_c + E_d + E_a \quad (4)$$

式(4)中,内能表示能量的总和,包括可恢复的弹性应变能 E_e 、塑性耗散能 E_p 、粘弹性或者蠕变过程的耗散能 E_c 、复合材料和界面的损伤耗散能 E_d 以及伪应变能 E_a 。伪应变能包括储存在沙漏阻力以及在梁和壳单元的横向剪切中的能量。伪

应变能 E_a 通常小于 5%, 出现大量的伪应变能则表明必须对网格划分进行细化或修改。

三点弯曲数值分析模型能量耗散历程如图 6 所示。

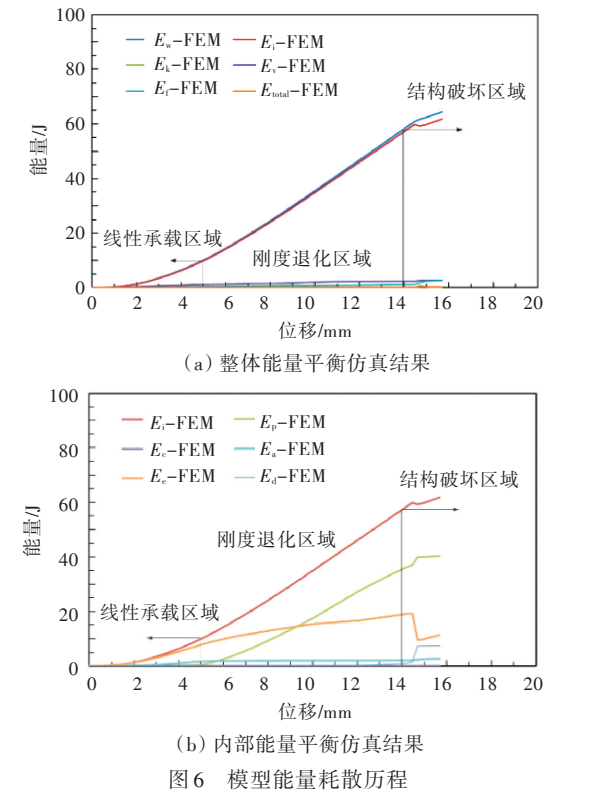


图6 模型能量耗散历程

由图 6 可知, 整个加载过程中外载荷对复合材料夹层板试件所做的功绝大部分转化为试件的内能, 内能中绝大部分转化为非弹性不可恢复的损伤耗散能和储存在结构中可恢复的弹性应变能, 能量耗散的主要区间段为结构刚度退化阶段。在非弹性不可恢复的损伤耗散能中, 夹芯层泡沫的塑性损伤吸能占 85%, 复合材料表层面板的断裂损伤吸能仅占 15%, 具体的能量耗散分布特征如表 4 所示。

表 4 模型能量耗散分布特征

Table 4 Energy absorption distribution of model

能量类型	特征值/J		
	总体	表层	芯材
总能量	66	-	-
摩擦耗散能	2.6	-	-
粘性耗散能	2.8	-	-
动能	0.1	-	-
内能	61	-	-
损伤耗散能	7.4	7.4	0
塑性耗散能	40.3	0	40.3
蠕变耗散能	0	-	-
线弹性应变能	11.3	8.2	3.1
伪应变能	2.7	-	-

3.2 结构尺寸对能量耗散性能的影响

在数值分析模型有效性验证的基础上, 本文进一步对不同面板和芯层厚度的玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板进行数值模拟分析, 分析结构尺寸设计参数与能量耗散性能之间的影响规律, 为复合材料夹层板的抗冲击性能优化设计提供参考。将不同结构尺寸的玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板简记为 $a+b+a$, 其中 a 代表复合材料表层面板厚度, 计算模型中 a 取值为 2~6 mm, b 代表夹芯层泡沫厚度, 计算模型中 b 取值为 20~60 mm。将数值模拟结果与 1.1 节所述 4+40+4 夹层板试件的计算结果进行对比分析, 如图 7 所示。

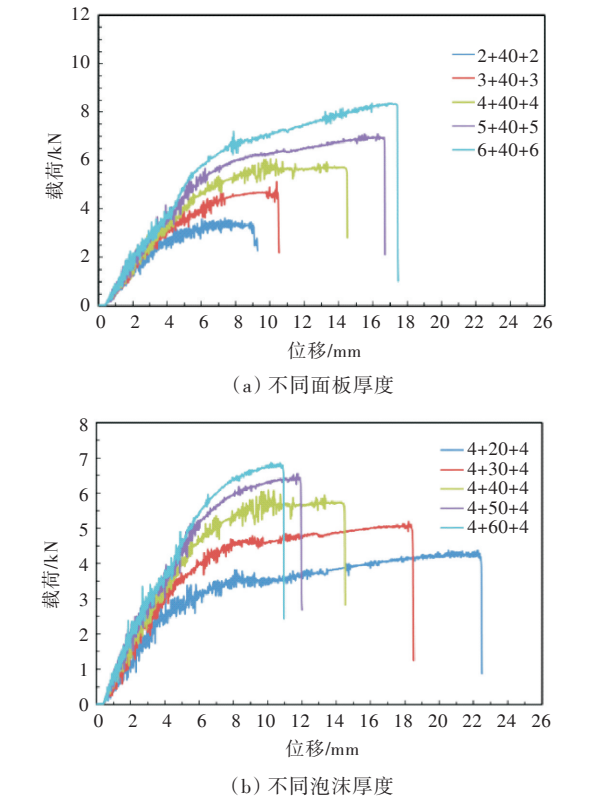


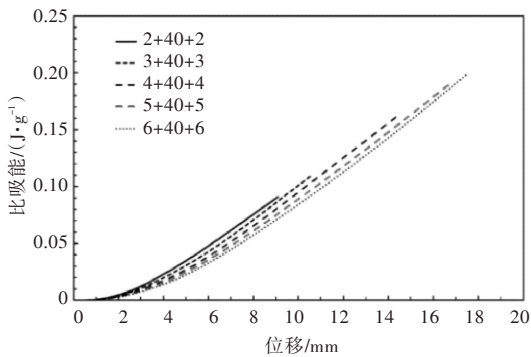
图 7 不同尺寸玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板载荷—位移结果

Fig.7 Load-displacement results of composite foam sandwich panels with different dimensions

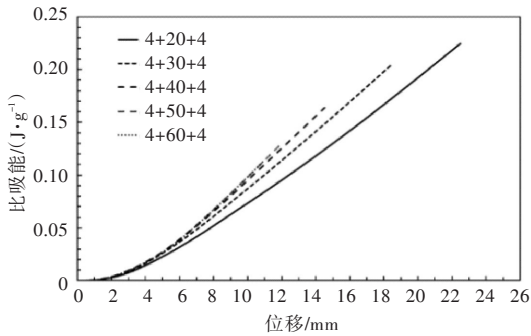
图 7(a) 给出了夹芯层泡沫厚度相同、表层复合材料面板厚度不同模型的载荷—位移曲线计算结果。分析可知, 当夹芯层泡沫厚度为 40 mm、面板厚度由 2 mm 逐步增加至 6 mm 时, 载荷—位移曲线的初始加载刚度和屈服载荷值呈逐步上升趋势, 同时结构的有效压缩变形大小也大幅提高, 整体能量耗散性能得到有效增强。图 7(b) 给出了表层面板厚度相同、夹芯层厚度不同模型的弯曲压头载荷—位移曲线。分析可知, 在表层面板厚度保持 4 mm 不变的情况下, 当夹芯层泡沫厚度从

20 mm 逐步增加至 60 mm 时,载荷-位移曲线的初始加载刚度和屈服载荷值同样呈逐步上升趋势,但结构有效压缩变形的大小却出现大幅下降,导致结构整体能量耗散性能出现退化。

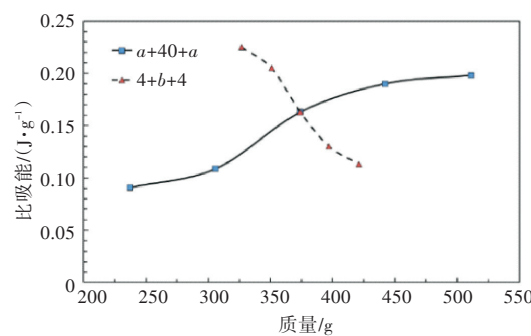
为定量衡量表层复合材料面板和夹芯层泡沫厚度改变对整体结构能量耗散性能的影响,图 8 给出了不同复合材料面板和夹芯层泡沫厚度下玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板的比吸能变化曲线。其中,比吸能定义为三点弯曲试验过程中单位质量试件吸收的能量值。



(a) 不同面板厚度



(b) 不同泡沫厚度



(c) 比吸能效率

图 8 不同尺寸玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板比吸能效率结果

Fig.8 Energy absorption results of composite foam sandwich panels with different dimensions

由图 8 分析可知,在三点弯曲载荷作用下,玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板在夹芯层厚度一定的情况下,增加面板厚度对夹层板线性段的加载刚度、初始屈服载荷和有效加载变形过程中

的能量耗散效率均有提高作用。进一步分析可知,复合材料表层面板厚度的增加提高了整体结构的有效加载变形区间,夹芯层泡沫在有效加载变形区间范围内发生了更为充分的塑性损伤,因而整体结构的能量耗散性能得到大幅提高。如图 8(c) 所示,在泡沫夹芯层厚度为 40 mm 的条件下,上下表层厚度由 4 mm 增加到 6 mm 时,即上下表层单层与中间层芯材的厚度比由 1:10 提高到 1:6.7 时,比吸能得到较大提高。然而,在面板厚度一定的情况下,增加夹芯层泡沫厚度虽然提高了夹层板在三点弯曲载荷作用下线性段的加载刚度和初始屈服载荷,但夹芯层泡沫弯曲刚度过大也造成试件上表层复合材料面板的变形特征从整体弯曲变形为主转变为局部压入变形为主,上表层复合材料面板压缩断裂损伤的提前出现导致了夹层板有效加载变形区间的下降。夹芯层泡沫芯材不能发生更为充分的塑性损伤破坏,因而夹层板的比吸能效率随夹芯层厚度的增加呈现下降趋势。如图 8(c) 所示,在表层厚度为 4 mm 的条件下,中间夹芯层由 20 mm 增加到 40 mm 时,即上下表层单层与中间层芯材的厚度比由 1:5 下降到 1:10 时,比吸能出现大幅下降。在实际工程应用当中,玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板在满足基本的结构强度和刚度设计要求前提下,合理增加表层复合材料面板厚度和力学性能可有效提高整体结构的力学承载能力和能量耗散性能。

4 结 语

基于有限元软件 ABAQUS 建立的玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板试件的数值分析模型,有效模拟了三点弯曲试验过程中典型的破坏模式和能量耗散机制,数值模拟结果与试验结果一致性较好,为玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板结构抗冲击性能设计提供了依据,具有一定的工程价值。

研究结果表明,在满足防护结构重量设计要求的前提下,适当增加表层面板的厚度和力学性能能够更大程度上提高玻璃纤维/树脂复合材料泡沫夹层板的力学承载能力和能量耗散性能,上下表层单层与中间层芯材的厚度比在 1:5 至 1:8 之间较为合理,能量吸收效率较高。

参考文献:

[1] 赵效东. 海洋工程结构物碰撞失效准则研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
ZHAO X D. Research of failure criterion of offshore structural collision [D]. Harbin: Harbin Engineering

University, 2010 (in Chinese).

[2] LI X, WANG Z H, ZHU F, et al. Response of aluminum corrugated sandwich panels under air blast loadings: experiment and numerical simulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 65: 79–88.

[3] XIONG J, GHOSH R, MA L, et al. Bending behavior of lightweight sandwich-walled shells with pyramidal truss cores [J]. Composite Structures, 2014, 116: 793–804.

[4] AHMAD Z, THAMBIRATNAM D P. Application of foam-filled conical tubes in enhancing the crashworthiness performance of vehicle protective structures [J]. International Journal of Crashworthiness, 2009, 14 (4): 349–363.

[5] ZHANG Y, SUN G Y, LI G Y, et al. Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria[J]. Materials & Design, 2012, 38: 99–109.

[6] 范华林, 杨卫. 轻质高强点阵材料及其力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2007, 37(1): 99–112.

FANG H L, YANG W. Development of lattice materials with high specific stiffness and strength [J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(1): 99–112 (in Chinese).

[7] HE W, GUAN Z D, LI X, et al. Prediction of permanent indentation due to impact on laminated composites based on an elasto-plastic model incorporating fiber failure [J]. Composite Structures, 2013, 96: 232–242.

[8] LIM J Y, BART-Smit H. Theoretical approach on the dynamic global buckling response of metallic corrugated core sandwich columns [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2014, 65: 14–31.

[9] ISMAIL M S, Purbolaksono J, Andriyana A, et al. The use of initial imperfection approach in design process and buckling failure evaluation of axially compressed composite cylindrical shells [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 51: 20–28.

[10] 周晓松, 梅志远. 舰船复合材料夹层板架结构的分级递进优化设计方法[J]. 中国舰船研究, 2014, 9 (4): 63–69.

ZHOU X S, MEI Z Y. Hierarchical progressive optimum design method for composite stiffened panels of warships [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(4): 63–69 (in Chinese).

[11] 武大江, 梅志远, 周晓松. 深水静压下混杂夹芯复合结构形变及强度特性[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(5): 47–52.

WU D J, MEI Z Y, ZHOU X S. Deformation and strength characteristics of hybrid sandwich composite structures under static pressure in deep water environment [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10 (5): 47–52 (in Chinese).

[12] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 219–223.

ZHUANG Z, YOU X C, LIAO J H, et al. Finite element analysis and application based on ABAQUS [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 219–223 (in Chinese).



(上接第 27 页)

[41] LI Y, LIANG B, ZOU X Y, et al. Extraordinary acoustic transmission through ultrathin acoustic metamaterials by coiling up space [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(6): 063509.

[42] HINDERS M K, RHODES B A, FANG T M. Particle-loaded composites for acoustic anechoic coating [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 185(2): 219–246.

[43] IVANSSON S. Numerical modeling for design of viscoelastic coatings with favorable sound absorbing properties [J]. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications, 2005, 63(5/6/7): e1541–e1550.

[44] 赵宏刚, 刘耀宗, 温激鸿, 等. 含有周期球腔的黏弹性覆盖层消声性能分析[J]. 物理学报, 2007, 56 (8): 4700–4707.

ZHAO H G, LIU Y Z, WEN J H, et al. Analysis of the anechoic properties of viscoelastic coatings with periodically distributed cavities [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4700–4707 (in Chinese).

[45] MILTON G W, CHERKAEV A V. Which elasticity tensors are realizable? [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1995, 117(4): 483–493.

[46] XIAO Q J, WANG L, WU T, et al. Research on layered design of ring-shaped acoustic cloaking using bi-mode metamaterial [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 687/688/689/690/691: 4399–4404.

[47] 王兆宏, 李青蔚, 蔡成欣, 等. 可用于隔声和带隙调控的五模式超材料[J]. 声学学报, 2017, 42 (5): 610–618.

WANG Z H, LI Q W, CAI C X, et al. Pentamode metamaterials used for sound insulation and band gap controlling consisting of double-cones [J]. Acta Acustica, 2017, 42(5): 610–618 (in Chinese).