

PMI 泡沫芯材填充 GFRP 帽型筋梁弯曲性能研究^{*}

李文晓 吴文平

(同济大学航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘要 通过三点弯曲试验得到聚甲基丙烯酸(酯) 亚胺(PMI) 泡沫芯材填充玻纤增强塑料(GFRP) 帽型筋梁的弯曲性能数据, 发现该结构有较好的延性, 破坏形式较为安全。采用有限元方法对试验进行了数值模拟, 得到了与试验相符的模拟结果, 证明了数值模拟的可行性。在此基础上研究了泡沫芯材倾角、宽度、厚度的变化对结构刚度的影响并进行了数值计算, 进一步考虑工艺等因素得出用于电动汽车车身覆盖件的 PMI 泡沫芯材填充 GFRP 帽型筋梁的优化设计参数。

关键词 泡沫芯材填充帽型筋梁 弯曲性能 有限元模型

在满足结构件的强度、刚度和稳定性的前提下, 上下面板刚硬、泡沫芯材质轻的三明治夹芯复合材料结构可较大地减轻结构件重量, 从而提高结构件的使用效率和经济性, 因而此种结构的复合材料已被广泛地应用于航空航天^[1]、船舶工程^[2]、交通运输、风力发电等领域。电动汽车因动力系统变化和技术方面的原因, 造成自身车重增加, 因此必须实现轻量化才能保证其在相同能耗下的有效装载能力。车身减重是电动汽车的轻量化工作之一, 而使用泡沫夹芯结构件制作外覆盖件是一行之有效的方法。

泡沫芯材填充帽型筋结构是在全截面泡沫夹芯结构基础上进行的一种优化结构。它仅在局部施放泡沫芯材, 对结构件受力的关键部位进行刚度加强, 这样不仅较大地减少了芯材的用量和成本, 而且提高了结构件的使用效率, 降低了结构件重量。现在这类结构形式已逐渐被研究人员所重视, 空客就采用碳纤维增强塑料(CFRP) 壳体 + 泡沫芯材填充帽型筋方式, 制造了用于 A380 的直径近 4 m 的 CFRP 后压力框。

目前国内关于泡沫芯材填充帽型筋梁板的研究不多, 大多是关于全截面夹层结构, 或不填充泡沫芯材的玻纤增强塑料(GFRP) 加筋板。孙春方等^[3]研究了对泡沫夹层铝板复合材料力学性能的测试方法, 并归纳了全截面夹层结构的刚度、强度和面板剪应力等的计算方法^[4]。陈念众等^[5]对船用无泡沫芯材的复合材料帽型筋的极限承载能力进行了研究, 推导出复合材料梁柱的极限承载能力公式。

笔者通过三点弯曲试验确定了聚甲基丙烯酸(酯) 亚胺(PMI) 泡沫芯材填充 GFRP(为环氧树脂/玻璃纤维复合材料) 帽型筋梁的弯曲性能, 采用有限元方法对试验进行了数值模拟, 得到了与试验相

符的结果, 证明了数值模拟的可行性; 在此基础上, 研究了泡沫芯材倾角、宽度、厚度的变化对梁结构刚度的影响并进行了数值计算, 进一步考虑工艺等因素, 得出用于汽车覆盖件的 PMI 泡沫芯材填充 GFRP 帽型筋梁(以下简称泡沫芯材填充帽型筋梁) 的优化设计参数。

1 泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲性能

考虑到成本等因素, 泡沫芯材填充帽型筋梁试样的长、宽、高分别为 320、120 和 14.7 mm。试样的横截面形状见图 1, 其中倾角 θ 为 30° , 泡沫芯材宽度 b 为 80 mm, 泡沫芯材厚度 h 为 12.7 mm。上下面板的 GF 铺层为 $[\pm 45^\circ]_s$, 面密度为 600 g/m^2 , 芯材为 PMI 泡沫塑料(牌号 ROHACELL - 511G)。PMI 泡沫塑料的拉伸强度为 1.9 MPa, 压缩强度为 0.9 MPa, 拉伸弹性模量为 70 MPa, 泊松比为 0.36, 剪切强度为 0.8 MPa, 剪切弹性模量为 19 MPa。

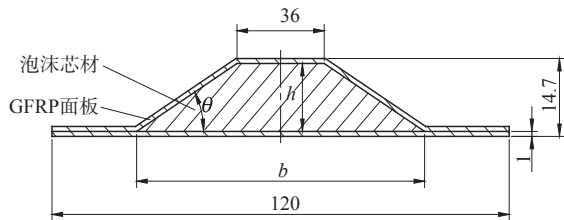


图 1 泡沫芯材填充帽型筋梁试样横截面的几何尺寸

帽型筋梁整体结构(面板与芯材) 采用真空辅助成型(VARI) 工艺^[6]一体成型, 如图 2 所示。测得用 VARI 工艺制作的 GFRP 面板材料的纤维体积分数为 51.8%, 拉伸强度为 564 MPa, 拉伸弹性模量为 36.73 GPa。

^{*} 上海市科委重点项目资助(05dz11007), 上海市自然科学基金项目资助(08ZR1420400), 上海市重点学科建设项目资助(B302)

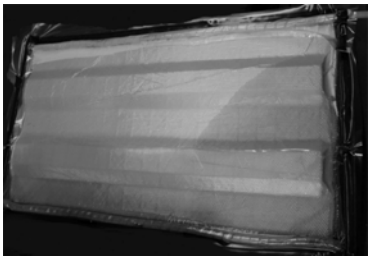


图2 VARI 工艺制备泡沫芯材填充帽型筋梁

弯曲性能测试参照 GB 1456 - 1988 《夹层结构弯曲性能试验方法》^[7] 进行。测试时跨距 160 mm, 外伸长度为 80 mm, 压头尺寸为 120 mm × 30 mm, 并垫橡胶, 试验装置见图 3。图 4 为 PMI 泡沫芯材填充 GFRP 帽型筋梁在试验过程中的变形情况。图 5 为试样典型的弯曲力 - 挠度曲线。试验结果见表 1, 其中弯曲刚度 D 按夹层结构弯曲性能试验方法中的公式计算。

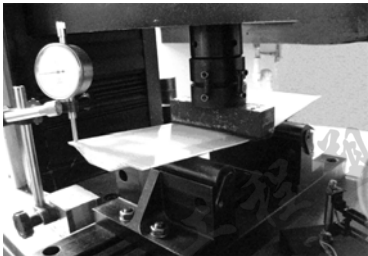


图3 泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲试验

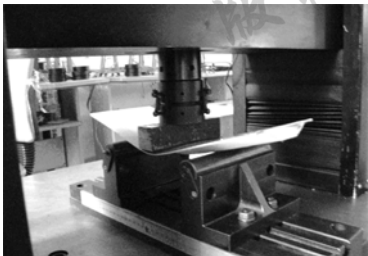


图4 泡沫芯材填充帽型筋梁的变形图

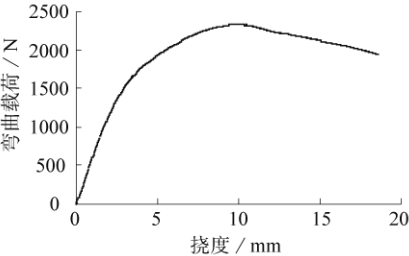


图5 泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲力 - 挠度曲线

表 1 泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲试验结果

最大弯曲载荷 f_{max}/N	弯曲刚度 $D/ \times 10^6 N \cdot mm^2$	挠度 / mm
2324.7	70.77	9.69

在弯曲试验中发现, 泡沫芯材填充帽型筋梁在受力初期阶段, 受到的弯曲力与挠度呈线性关系; 随

着弯曲载荷的增大, 弯曲载荷和挠度转化为非线性关系; 在载荷达到最大值后, 梁的结构没有被突然破坏, 而是随着变形的继续加大, 承载力缓慢降低(见图 5)。在挠度达到 20 mm 即跨距的 1/8 左右时, 帽型筋梁已发生很大变形(见图 4), 但其结构仍有较大的承载能力(此时所能承受的弯曲力为 1936 N, 是最大承载力的 83%), 较普通的 GFRP 结构有更好的延性, 是破坏形式较为安全的一种结构。此时在加载的压头附近发现有纤维脱粘现象(见图 6), 脱粘由帽型筋梁上下 GFRP 面板与泡沫芯材的交界处向整个结构边缘扩散。这是因为在交界处, 上下 GFRP 面板间有夹角, 而填充在此的泡沫芯材的刚度远低于 GFRP, 因此会存在很大的应力集中, 容易发生初始脱粘, 而后向整个结构边缘扩散, 最终导致帽型筋梁的结构失效。

压头载荷卸去以后, 笔者发现帽型筋梁的结构形状有所恢复, 仅余 7 mm 的塑性变形。同时在帽型筋梁加载压头的另一面出现了泡沫芯材被压塌的现象, 在该处泡沫芯材明显凹进去一部分, 见图 7。这是由于泡沫芯材在该处所受的应力大于其能承受的最大应力所致。可见帽型筋梁结构的破坏是伴随泡沫芯材的塑性变形和梁截面积的变化而逐渐发生的。

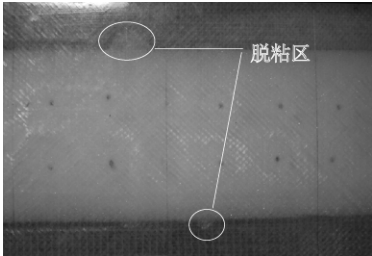


图6 泡沫芯材填充帽型筋梁纤维脱粘区

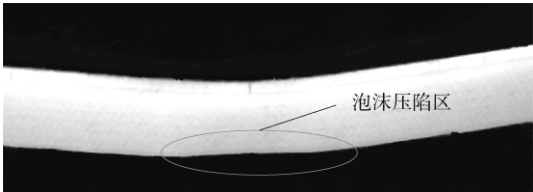


图7 泡沫芯材填充帽型筋梁压陷区侧视图

2 泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲刚度有限元分析

采用 Ansys 有限元软件对泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲刚度进行了数值模拟。复合材料结构采用 solid46 单元, 面板选择正交各向异性, 弯曲弹性模量 $E_1 = 36.73 \text{ GPa}$, $E_2 = 6.344 \text{ GPa}$, $G = 2 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.26$, 上下面板 GF 铺层均为 $[\pm 45^\circ]_s$ 。泡沫芯材采用 solid45 单元, 按各向同性处理, 弯曲弹性

模量 $E=70\text{ MPa}$ 、泊松比 $\nu=0.36$ 。压头采用 sol-id45 单元, $E=200\text{ GPa}$ 、泊松比 $\nu=0.3$ 。

按图 1 泡沫芯材填充帽型筋梁的几何尺寸建立模型,压头和 GFRP 面板接触处采用接触单元。在梁的总长 $1/4$ 、 $3/4$ 处均施加 z 方向位移约束。在压头上表面施加均布载荷应力(模拟弯曲试验中载荷应力通过压头传递给试件的情况),计算模型见图 8。图 9 为计算所得挠度云图,弯曲刚度 D 的计算结果见表 2。

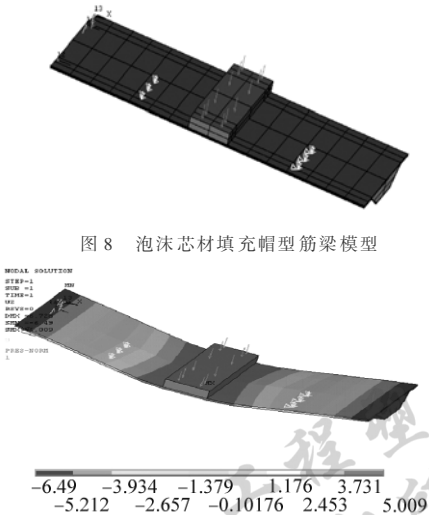


图 8 泡沫芯材填充帽型筋梁模型

图 9 泡沫芯材填充帽型筋梁挠度云图

表 2 泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲刚度计算与测试结果比较

项 目	弯曲刚度 $D/\times 10^6\text{ N}\cdot\text{mm}^2$	挠度/mm
试验结果	70.77	0.362
有限元计算结果	70.69	0.373
误差/%	1.13	1.13

由表 2 可得,用有限元计算所得的弯曲刚度、挠度与试验值很接近,误差仅为 1.13%(小于 5%),该模型精度较好。

3 帽筋梁结构的优化设计

3.1 倾角 θ 变化对帽筋梁刚度的影响

采用相同的模型计算倾角 θ 从 $20^\circ\sim 90^\circ$ 变化时的刚度和挠度,计算结果见表 3。根据 VARI 工艺要求,倾角 θ 越小,越有利于纤维铺设和压实,从表 3 可以看出, $\theta=45^\circ$ 时的弯曲刚度损失相对最小,所以 45° 为最佳倾角。

3.2 泡沫芯材宽度 b 、厚度 h 变化对泡沫芯材填充帽型筋梁弯曲刚度的影响

对倾角 θ 为 45° 下的泡沫芯材填充帽型筋梁结构进行数值分析,得到泡沫芯材宽度 b 、厚度 h 对其弯曲刚度的影响关系曲线。图 10 为改变厚度 h 时,泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲刚度随宽度 b 的变化

表 3 倾角变化对泡沫芯材填充帽型筋梁弯曲刚度的影响

倾角 $\theta/(^\circ)$	弯曲刚度 $D/\times 10^6\text{ N}\cdot\text{mm}^2$	挠度/mm
20	49.58	0.516
30	70.69	0.362
45	85.79	0.298
60	97.72	0.262
75	106.57	0.240
90	113.83	0.225

曲线。由图 10 可见,在不同厚度 h 的情况下,当宽度 b 为 80 mm 时,泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲刚度均会出现极大值。因此将 80 mm 定为泡沫芯材的最佳宽度。另外,随着泡沫芯材厚度的增加,在相同宽度的条件下,弯曲刚度也随之增加,泡沫芯材越厚,弯曲刚度就越大。所以在宽度给定、空间尺度足够的情况下,可以用增加泡沫芯材厚度的方法,尽可能提高泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲刚度。但随着厚度的增加,泡沫芯材梯形截面的上底宽度将越来越窄,而 GF 的刚度相对于泡沫芯材高很多,在制作过程中,GF 布较难压平。综合考虑, 20 ~25 mm 是较为合适的厚度选择。图 11 为当泡沫芯材宽度 b 为最佳宽度 80 mm 时,泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲刚度随泡沫芯材厚度 h 变化的情况,由图 11 亦可见到弯曲刚度随泡沫芯材厚度增加的情况。

综上所述,可以得到泡沫芯材填充帽型筋梁结构的优化结果为泡沫芯材最佳倾角 θ 为 45° ,最佳宽度 b 为 80 mm,最佳厚度 h 为 20 ~25 mm。

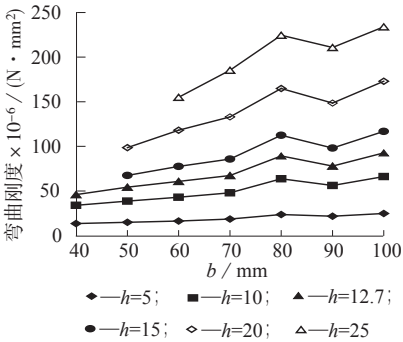


图 10 不同厚度 h 下泡沫芯材填充帽型筋梁弯曲刚度随宽度 b 的变化曲线

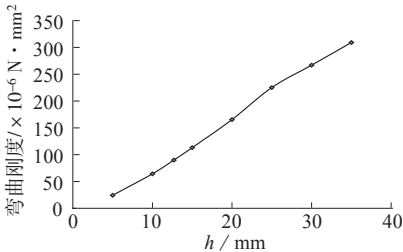


图 11 泡沫芯材填充帽型筋梁弯曲刚度和泡沫芯材厚度 h 的关系曲线 ($b=80\text{ mm}$)

4 结论

(1) 通过试验得到泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲性能数据,其结构的破坏是伴随泡沫芯材的塑性变形和梁截面积的变化逐渐发生的,结构延性较好,破坏模式较为安全。

(2) 建立有限元模型计算泡沫芯材填充帽型筋梁的刚度,与试验结果相比,该模型精度较好。

(3) 对该泡沫芯材填充帽型筋梁进行优化设计,用该模型分析泡沫芯材的倾角 θ 、宽度 b 、厚度 h 对泡沫芯材填充帽型筋梁的弯曲刚度的影响,得出用于汽车覆盖件的 PMI 泡沫芯材填充 GFRP 帽型筋梁的最佳倾角 θ 为 45° ,泡沫芯材最佳宽度 b 为 80 mm,泡沫芯材最佳厚度 h 为 20 ~25 mm。

参考文献

- [1] 张丽华,范玉青.复合材料在飞机上的应用评述[J].航空制造技术,2006(3):64-66.
- [2] 马世勇,刘洪军.玻璃钢夹芯材料的应用[J].玻璃钢/复合材料,2001(3):53-55.
- [3] 孙春方,薛元德,李文晓.铝面板 PMI 泡沫芯夹层材料力学性能研究[J].建筑材料学报,2007,10(3):364-368.
- [4] 孙春方,薛元德,胡培.复合材料泡沫夹层结构力学性能与试验方法[J].玻璃钢/复合材料,2005(2):3-6.
- [5] 陈念众,张圣坤,孙海虹.复合材料船体纵向极限承载能力分析[J].船舶工程,2001(5):51-53.
- [6] 赵渠森,赵攀峰.真空辅助成型工艺(VARI)研究[J].纤维复合材料,2002(1):42-46.
- [7] 全国纤维增强塑料标准化委员会.纤维增强塑料(玻璃钢)标准汇编[S].北京:中国标准出版社,1998.

BENDING PROPERTY OF PMI FOAM CORE FILLED GFRP HAT-STIFFENED BEAM

Li Wenxiao, Wu Wenping

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT Three-point bending test were carried out to obtain the bending properties of PMI foam core filled GFRP hat-stiffened beam, it was found that the hat-stiffened beam with the structure above mentioned had better ductility and it was safe for failure pattern of beam. The numerical simulation was carried out by a finite element model and the simulation results was similar to the test results, and it was proved that the numerical simulation was reliable. Based on it, the effects of angle, width and thickness of PMI foam core on stiffness of beam were studied and the numerical calculating was executed. Finally, considering the processing factors, the optimized parameters of PMI foam core filled GFRP hat-stiffened beam were obtained for the body panel of fuel cell car.

KEYWORDS foam core filled hat-stiffened beam, bending property, finite element model

优惠销售 2000 ~2008 年中国工程塑料加工应用技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国工程塑料工业协会加工应用专委会为了配合 2000 ~2008 年先后召开的中国工程塑料加工应用技术研讨会共编辑、出版了 9 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术,以及文献综述、评论等,尤其突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析,应对 REACH、RoHS 的对策等行业规则、政策。现尚有部分《论文集》以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘,以优惠价格(含邮费)销售,欢迎订阅。

1. 《论文集》,优惠价 240 元/套,单册价格如下:

《2008 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 351 页,50 元/册;

《2007 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 343 页,45 元/册;

《2006 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 346 页,含中国工程塑料工业“十一五”发展规划,40 元/册;

《2005 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 338 页,35 元/册;

《2004 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 337 页,30 元/册;

《2003 年塑料助剂和塑料加工应用技术研讨会论文

集》,论文 105 篇,正文 373 页,25 元/册;

《2002 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 351 页,20 元/册;

《2001 年中国工程塑料加工及模具技术研讨会论文集》,论文 80 篇,正文 270 页,20 元/册;

《2000 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》,论文 100 篇,正文 339 页,20 元/册。

2. 论文集光盘,优惠价为 160 元/盘。

本光盘除收录上述 9 本《论文集》的全部内容外,还包括约 1800 人次的会议代表通讯录。

凡需购买《论文集》或论文集光盘的读者,请尽快办理邮购手续。汇款时请注明“论文集”或“论文集光盘”。

邮局汇款

收款单位:山东济南市 108 信箱杂志社 邮编:250031

电话:(0531) 85878057 85878223 85878278

传真:(0531) 85947355 85878057

银行汇款

户名:中国兵器工业集团第五三研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

帐号:1602001229014425546

网上订购 <http://www.epa1973.com>