

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.05.013

夹芯复合材料力学性能分析方法对比

周正亮,陈同海,张守玉,赵大娟,戚洪强

(中材科技股份有限公司,南京 210012)

摘要:采用真空导流成型工艺制备了芳纶/玻纤—泡沫夹芯复合材料,并对其力学性能表征方法进行了研究分析,其表征方法主要包括力学性能测试和有限元数值仿真分析。通过样品的力学性能测试和对样品进行建模仿真分析得出:两种力学性能表征方法的分析结果误差在8%以内,验证了有限元数值仿真分析的可靠性;此外,将有限元分析技能应用于产品的开发过程,可实现产品研发由传统的“经验指导实验”模式向“理论预测、实验验证”新模式转变,在新产品的应用上取得突破,实现缩短研发周期、降低研发成本的目标。

关键词:夹芯复合材料;力学性能;表征方法;有限元分析

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)05-0063-05

Comparative Analysis of Mechanical Properties of Sandwich Composites

Zhou Zhengliang, Chen Tonghai, Zhang Shouyu, Zhao Dajuan, Qi Hongqiang

(Sinoma Science & Technology Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract: The foam sandwich composites were prepared by the vacuum assisted resin transfer molding process. The characterization methods of mechanical properties were also studied and analyzed. Their characterization methods include mechanical properties test and finite element analysis. The mechanical properties of samples and the modeling and simulation of samples show that the error of the two methods is less than 8%, which verifies the reliability of finite element numerical simulation. In addition, the development process of the finite element analysis skills and application of products, product development can be realized from the traditional “experience to guide the experiment” mode to the theoretical prediction and experimental verification of the new mode, a breakthrough in the application of new products can shorten development cycle and reduce development costs target.

Keywords: sandwich composite; mechanical property; characterization method; finite element analysis

夹芯复合材料由强度及刚度较大的面层和质量较轻、强度及刚度较小的泡沫复合而成,具有优异的力学性能,已在航空航天、轨道交通、和船舶等领域应用^[1-3]。

夹层复合材料的研究内容侧重于其制备方法和力学性能表征方法,其表征方法主要包括力学性能测试和有限元数值仿真分析;而通过有限元数值仿真分析可以实现缩短研发周期、降低研发成本的目标。李真等^[4]采用实验方法与有限元分析方法对泡沫夹层结构梁弯曲性能进行了研究,研究结果表明剪切对泡沫夹层复合材料挠度的影响程度随着梁的跨高比的增大而减小,同时进一步研究了梁横截

面正应变及正应力的分布情况。吴晓^[5]在研究铝面板 PMI 泡沫芯夹层梁弯曲的弹性计算理论时,采用弹性力学理论建立了夹层梁弯曲变形的微分方程,并将该方法与试验方法、能量法和有限元方法进行了对比分析,研究结果表明:其推导的变形微分方程接近实验值,计算精度可靠,可用于工程实践指导。赖家美等^[6]通过真空导流成型工艺制备了缝合泡沫夹层复合材料,研究了其失效形式和弯曲性能,研究结果表明:泡沫夹层失效大部分是由于芯材的剪切破坏,通过缝合泡沫夹层结构可以提高材料的弯曲性能。J. S. Kim 等^[7]在研究韩国复合材料夹层摇摆车体时,将数值仿真分析和实验进行

通讯作者: 周正亮,高级工程师,主要从事复合材料研究及管理工作 E-mail: zhouzhengliang@fiberglasschina.com

收稿日期: 2018-03-01

引用格式: 周正亮,陈同海,张守玉,等. 夹芯复合材料力学性能分析方法对比[J]. 工程塑料应用,2018,46(5):63-67.

Zhou Zhengliang, Chen Tonghai, Zhang Shouyu, et al. Comparative analysis of mechanical properties of sandwich composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(5): 63-67.

了对比分析研究,结果表明:车底部位最大变形量,实验结果和数值仿真分析结果分别为 9.25 mm 和 8.28 mm,误差为 10.5%。G. Belingardi 等^[8]研究了泡沫夹层结构复合材料在静态和动态状态下的一系列实验,研究结果表明:在泡沫表面增加一层面层,可以提高夹层结构的动力抗冲击性。

笔者要针对夹芯复合材料力学性能两种表征方法进行对比分析研究,以此来验证有限元数值仿真分析的可靠性,并评估有限元数值仿真分析方法是否可以在工程应用中应用。

1 实验部分

笔者研究的目的在于比较两种力学性能表征方法可靠性,并探索一种快速表征力学性能的研究方法,为将有限元分析技能应用于产品的开发过程,实现产品研发由传统的“经验指导实验”模式向“理论预测、实验验证”新模式转变,在新产品的应用上取得突破,实现缩短研发周期、降低研发成本的目标。笔者拟首先研究芳纶/玻纤—泡沫夹芯复合材料的三点弯曲性能,研究内容主要围绕夹芯复合材料在特定载荷作用下,复合材料产生的变形,即载荷—位移曲线图;通过该试验分析的数据,为后续采用有限元分析结果进行对比分析提供依据,并优化有限元分析,为其指导产品开发奠定基础。

1.1 主要原材料

环氧树脂 A:5078,惠柏新材料科技(上海)股份有限公司;

固化剂 B-1:5078-1,惠柏新材料科技(上海)股份有限公司;

PET 泡沫:100 kg/m³,固瑞特(天津)复合材料有限公司;

芳纶(经向)/玻纤(纬向)混杂织物:250 g/m²,常州迈特锐欧新材料科技有限公司。

选择的环氧树脂体系混合黏度低,对纤维有良好的浸润性,适用于真空导流;并且操作灵活,其固化类型有 B, B-1、B-2 和 B-3 等类型,可以根据不同固化剂的选择适用期在 1~4 h 范围,笔者选择 B-1 作为固化剂,树脂和固化剂的质量比例为 100:30,固化工艺为 50℃,4 h+70℃,6 h。

芳纶/玻纤混杂织物类型为径向纱线采用芳纶纤维(经密为 5 根/cm,0.111 g/m),纬向纱线采用玻璃纤维(纬密为 5 根/cm,0.25 g/m)。

1.2 主要仪器及设备

智能水刀:LTJ1616-5D 型,狮迈科技有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:HJ101-0 型,杭州振和科学仪器;

万能材料试验机:DR-6000M 型,深圳东仪精工设备有限公司。

1.3 夹芯材料及测试样品制备方法

(1) 夹芯材料的制备。

采用真空导流工艺制备芳纶/玻纤—泡沫夹芯复合材料制备过程,铺层结构为:以模具面为基准依次为 6 层芳纶/玻纤混杂布、17 mm PET 泡沫和 6 层芳纶/玻纤混杂布。

真空度要求为真空袋膜铺放完毕后,检查真空保持度;待模具上真空表示数在 0.094 MPa 以上后,关闭真空阀门,记录真空表示数 a,及阀门关闭时间,15 min 后记录真空表示数 b,计算真空降值(b-a)小于等于 0.003~0.005 MPa 即为合格。

真空度合格后,根据混合黏度曲线,在 25℃左右进行真空导流,并根据固化工艺进行操作。

(2) 测试样品的制备

参照标准 GB/T1456-2005,制备样品尺寸为 400 mm×60 mm,为保证测试的有效性,在测试过程,去掉最大值和最小值,取 5 个数据为有效数据,因此,0°和 90°方向各需要制备 7 个样品。

1.4 性能测试

(1) 力学性能测试。

参照标准 GB/T1456-2005 对其开展了三点弯曲试验,测定其载荷—位移曲线、弯曲弹性模量与弯曲强度,跨距为 360 mm。图 1 为试件尺寸与试验工装。

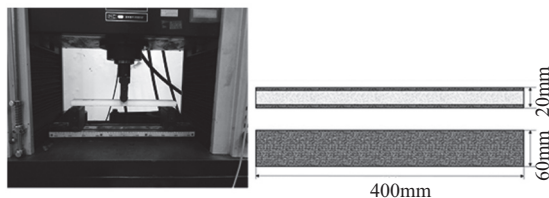


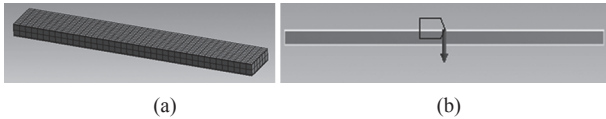
图 1 试件尺寸与试验工装

参照 GB/T2577-2005 和 GB/T3855-2005 分别对面层结构的树脂含量和孔隙率进行了测试。

(2) 有限元分析。

尺寸规格:模型的长宽高分别为 400 mm, 60 mm 和 19.7 mm,其中夹芯材料的面层均为 1.35 mm 和芯层为 17 mm。

边界条件:如图 1 所示,模型两边采用简支结构,支撑面中心距离两端均为 20 mm,此外,施加载荷位置位于模型中间部位。图 2 为三维建模示意图。



a—网格划分模型; b—载荷约束模型

图2 三维建模

2 结果与讨论

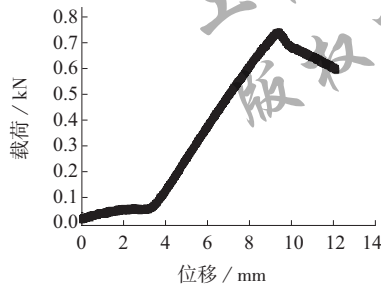
2.1 力学性能测试

芳纶纤维浸渍效果较差,因此采用了芳纶纤维和玻璃纤维混编的织物,其中,玻璃纤维起到了促进纤维浸渍的效果,将该混杂纤维增强复合材料作为面层制备了夹芯结构材料。

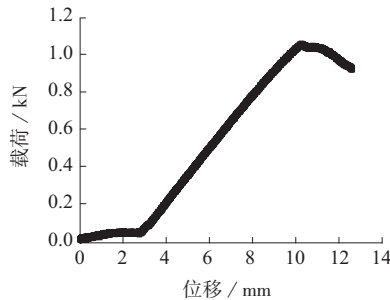
夹芯结构铺层结构为上、下面层为 1.35 mm、PET 泡沫厚度为 17 mm,其中面层结构的树脂质量含量 35%、孔隙率为 0.8%;夹芯材料的力学性能见表 1。图 3 为载荷—位移曲线。

表1 三点弯曲力学性能测试数据

试样编号	0° 拉伸弹性模量 / MPa	0° 拉伸强度 / MPa	90° 拉伸弹性模量 / MPa	90° 拉伸强度 / MPa
1 [#]	2871.08	30.91	3973.88	26.93
2 [#]	3419.50	18.95	3999.10	25.93
3 [#]	3334.47	18.95	4039.06	27.92
4 [#]	3278.92	23.93	3876.95	25.93
5 [#]	3309.53	18.95	4035.66	26.93
均值	3335.60	20.20	3984.93	26.73



(a)



(b)

a—0° 试件; b—90° 试件

图3 载荷—位移曲线

由图 3 可知,曲线图主要分为三部分。第一区域:由于该阶段压头和样品处于虚接触模式,导致曲线呈现平缓变化趋势;第二区域:载荷位移曲线处于线性变化阶段,通过该区域的数值分析可以得

知夹芯材料的弯曲模量,此外,该区域加载载荷范围宽,可考虑在此范围承载;第三区域:夹芯材料发生破坏。

通过采集原始实验数据,分析了夹芯复合材料在不同载荷作用下的位移,如表 2 和表 3 所示。

表2 不同载荷作用下的 0° 方向位移 mm

试样编号	100 N	200 N	300 N	400 N	500 N	600 N
1 [#]	0.887	1.774	2.661	3.548	4.435	5.322
2 [#]	0.844	1.688	2.532	3.376	4.22	5.064
3 [#]	0.852	1.704	2.556	3.408	4.26	5.112
4 [#]	0.852	1.704	2.556	3.408	4.26	5.112
5 [#]	0.855	1.710	2.565	3.42	4.275	5.13
均值	0.858	1.716	2.574	3.432	4.29	5.148

表3 不同载荷作用下的 90° 方向位移 mm

试样编号	100 N	200 N	300 N	400 N	500 N	600 N
1 [#]	0.717	1.434	2.150	2.867	3.584	4.301
2 [#]	0.712	1.424	2.136	2.848	3.561	4.273
3 [#]	0.704	1.409	2.113	2.817	3.522	4.226
4 [#]	0.733	1.466	2.199	2.932	3.666	4.399
5 [#]	0.699	1.397	2.096	2.794	3.493	4.191
均值	0.713	1.426	2.139	2.852	3.565	4.278

2.2 有限元分析

(1) 芳纶/玻纤—泡沫夹芯复合材料仿真分析参数预测。

表4 主要原材料及性能参数

材料	密度 / (g · cm ⁻³)	泊松比	剪切弹性模量 / GPa	拉伸弹性模量 / GPa
玻璃纤维	2.54	0.23		73
芳纶纤维	1.4			54
环氧树脂	1.1	0.35	1.4	2.8
泡沫	0.1			

依据复合材料力学理论和查阅文献,得出复合材料力学性能数值仿真分析方法,公式如下^[9-11]。

复合材料纤维体积含量:

$$V_f = \frac{1 - c}{1 + \frac{A_f \rho_f}{(1 - A_f) \rho_m}} \quad (1)$$

复合材料泊松比为:

$$\mu_L = \mu_f V_f + \mu_m (1 - V_f) \mu_T = \frac{\mu_L E_T}{E_L} \quad (2)$$

对于单向纤维复合材料,0° 和 90° 弹性模量分别为:

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) E_T = E_m \frac{1 + V_f}{1 - V_f} \quad (3)$$

层间剪切模量为:

$$G = G_m \frac{1 + V_f}{1 - V_f} \quad (4)$$

其中, ρ_f 为纤维纱线密度, g/cm³; E_f 为纤维弹性模量, MPa; μ_f 为纤维泊松比; ρ_m 为树脂基体密度, g/cm³; E_m 为树脂基体弹性模量, MPa; G_m 为

树脂基体剪切模量, GPa ; μ_m 为树脂基体泊松比。

有限元数值仿真模拟分析参数主要依据夹芯复合材料铺层设计和上述数值理论分析方法得出,见表 5。

表 5 模拟分析参数

E_{11}	E_{22}	μ_{12}	G_{12}
20.8 GPa	22.6 GPa	0.21	3.89 GPa

(2) 有限元数值仿真分析结果

在不同载荷作用下,对夹芯复合材料“载荷—位移”进行了仿真分析,其中以 100 N 载荷为代表,0° 和 90° 仿真分析云图如图 4 所示,模拟位移数据见表 6。

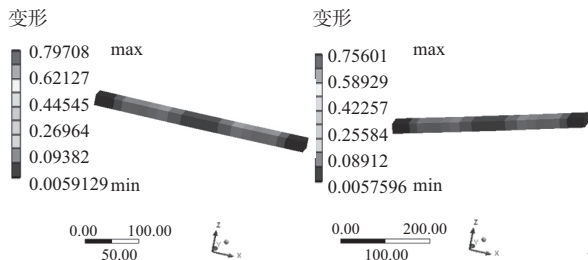


图 4 0° 和 90° 方向力学性能模拟云图

表 6 模拟位移数据

项目	100 N	200 N	300 N	400 N	500 N	600 N
0° 位移 / mm	0.797	1.596	2.396	3.198	4.003	4.81
90° 位移 / mm	0.756	1.514	2.273	3.033	3.797	4.562

2.3 力学性能分析方法对比分析

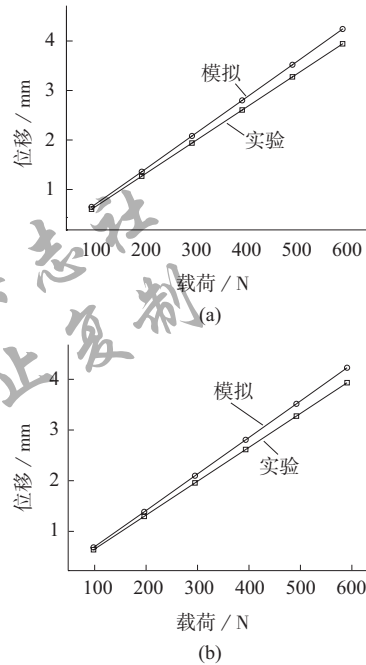
由夹芯复合材料的力学性能测试和对该材料进行建模仿真分析得出:两种力学性能表征方法的分析结果误差在 8% 以内,验证了有限元数值仿真分析的可靠性,该有限元数值仿真分析可以为工程应用做理论指导。表 7 为实验结果和有限元分析结果对比分析。

表 7 实验结果和有限元分析结果对比分析

项目	100 N	200 N	300 N	400 N	500 N	600 N
0° 实验位移 / mm	0.858	1.716	2.574	3.432	4.29	5.148
0° 有限元位移 / mm	0.797	1.596	2.396	3.198	4.003	4.810
0° 误差 / %	7.11	6.99	6.92	6.82	6.69	6.57
90° 实验位移 / mm	0.713	1.426	2.139	2.852	3.565	4.278
90° 有限元位移 / mm	0.756	1.514	2.273	3.033	3.797	4.562
90° 误差 / %	6.03	6.17	6.26	6.35	6.51	6.64

从实验数据和模拟分析图中可看出,在同样载荷作用下 90° 方向较 0° 方向位移偏小,通过分析织物性能参数得知,芳纶纤维的弹性模量较玻璃纤维偏低,因此模拟结果符合实际情况。图 5 为实验结

果和有限元分析结果对比分析。对比上述载荷—位移曲线图,可知在一定载荷范围内,载荷和位移变化量呈现线性关系;此外,通过数据分析,得出两种力学性能的表征分析方法误差在 8% 以内,偏差较小;主要有以下几方面因素造成上述偏差:1) 成型过程中,由于采用人工铺层,难易保证芳纶纤维和玻璃纤维的方向一致性;2) 在测试样品的制备过程中,难易控制样品的精度,如尺寸精度和切割方向与纤维的夹角精度等;3) 在仿真分析过程中,对模型进行了简化处理,未考虑层间剪切力^[12]。



a—0° 方向对比曲线; b—90° 方向对比曲线

图 5 实验结果和有限元分析结果对比分析

针对上述原因分析,为同时提高夹芯复合材料力学性能测试和有限元数值分析的准确度,拟从以下几方面入手:第一、在铺层的过程中,通过引入相应的工装,保证纤维在纵向和横向的方向一致性,即控制纤维角度的偏差;第二、依据夹芯复合材料纤维走向,规划刀具切割路径;第三、细化仿真分析模型,将面层与芯层之间的相互作用力考虑在模型的分析中。

3 结论

(1) 夹芯复合材料力学性能测试数据较稳定,为有限元分析奠定了坚实的基础。

(2) 力学性能测试和有限元分析两种表征方法都较好的对材料的性能进行了表征,且通过多组数据对比分析,得出两种表征分析方法的误差在 8% 以内,从而可知:将有限元分析技能应用于产品的

开发过程,可实现产品研发由传统的“经验指导实验”模式向“理论预测、实验验证”新模式转变,在新产品的应用上取得突破,实现缩短研发周期、降低研发成本的目标。

(3) 采用的有限元分析方法可为后续在三维中空织物复合材料的应用奠定基础。

参考文献

- [1] Zinno A, Fusco E, Prota A, et al. Multiscale approach for the design of composite sandwich structures for train application [J]. Composite Structures, 2010, 92 (9):2208-2219.
- [2] Atkinson R. Innovative uses for sandwich constructions[J]. Reinforced Plastics, 1997, 41(2):30-33.
- [3] Kim J S, Lee S J, Shin K B. Manufacturing and structural safety evaluation of a composite train carbody[J]. Composite Structures, 2007, 78(4):468-476.
- [4] 李真,周仕刚,薛元德. 剪切对泡沫夹层结构梁弯曲性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011, 217(2):19-23.
Li Zhen, Zhou Shigang, Xue Yuande. The Influence of shear on the bending properties of foam core sandwich beams[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2011, 217(2):19-23.
- [5] 吴晓. 铝面板 PMI 泡沫芯夹层梁弯曲的弹性计算理论[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1):156-160.
Wu Xiao. Elasticity computing theory of bending for aluminum face PMI foam core sandwich beam[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):156-160.
- [6] 赖家美,鄢冬冬,饶欣远,等. 缝合泡沫夹层结构复合材料三点弯曲性能研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(2):101-105.
Lai Jiamei, Yan Dongdong, Rao Xinyuan, et al. Study on three point bending properties of stitched foam sandwich structure composites[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):101-105.
- [7] Kim J S, Jeong J C, Lee S J. Numerical and experimental studies on the deformational behavior a composite train carbody of the Korean tilting train[J]. Composite Structures, 2007, 81(2):168-175.
- [8] Belingardi G, Cavatorta M P, Duella R. Material characterization of a composite-foam sandwich for the front structure of a high speed train[J]. Composite Structures, 2003, 61(1-2):13-25.
- [9] 周祝林,王亚熊. 多层复合材料弹性模量理论估算[J]. 玻璃钢, 2002, 32(2):6-11.
Zhou Zhulin, Wang Yaxiong. The oretical estimation of elastic modulus of multilayer composites[J]. Fiber Reinforced Plastics, 2002, 32(2):6-11.
- [10] 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, 32(2):3-6.
Sun Chunfang, Xue Yuande, Hu Pei. Mechanical properties and test method for foam core sandwich structure[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2005, 32(2):3-6.
- [11] 周祝林,张长明. 船舰用玻璃钢夹层结构设计基础[J]. 中国造船, 2004, 45(3):43-49.
Zhou Zhulin, Zhang Changming. Design base of FRP sandwich construction for ship[J]. Shipbuilding of China, 2004, 45(3):43-49.
- [12] 陈同海,周正亮,张守玉,等. 夹层复合材料三点弯曲试验和有限元模拟分析对比[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(7):111-114.
Chen Tonghai, Zhou Zhengliang, Zhang Shouyu, et al. Comparison of three point bending test and finite element simulation analysis of sandwich composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(7):111-114.

埃克森美孚推出全新埃启峰高阶聚丙烯

2018 国际橡塑展首日,休斯顿-埃克森美孚在上海国家会展中心洲际酒店召开新闻发布会。在发布会上,埃克森美孚官方宣布:公司已推出了全新埃启峰™ 高阶聚丙烯系列,可提供远超传统聚丙烯的非凡产品性能。其中包括:汽车零部件、硬质包装、无纺布和家用电器领域。埃启峰高阶聚丙烯的卓越性能以及与价值链的通力协作,将为客户开启新商机。

相比传统聚丙烯,埃启峰高阶聚丙烯无需纠结于性能和工艺上的取舍权衡。例如,在汽车应用中,提升了刚性和韧性的平衡;在硬质包装方面,同时提高了刚性和加工效率;而在家用电器零部件的应用中,可以经济高效地获得高光泽度。

“埃启峰高阶聚丙烯将极大地满足客户对创新与增长的渴望,通过相互协作及专业技能分享,该高阶聚丙烯的解决方案将为您开启新商机。”埃克森美孚塑料和树脂副总裁舒欣迪 (Cindy Shulman) 表示,“埃启峰高阶聚丙烯的推出进一

步体现了我们对聚丙烯行业的承诺,是我们最近宣布的美国墨西哥湾沿岸聚丙烯投资计划之外的另一重要举措。”



埃启峰高阶聚丙烯可以制造出异常坚韧的汽车零部件,激励汽车改性材料生产商和汽车制造商共同塑造非凡。埃启峰高阶聚丙烯的抗冲击强度比普通抗冲共聚聚丙烯高 35%,可以制成轻量、安全、异常坚韧的汽车零部件。塑性体的使用量减少高达 50%,从而有效节约成本。

该高阶聚丙烯还可以用于制造坚挺耐用的容器和杯子,激励零售业和食品服务行业的生产商共同塑造非凡。使用高熔体强度聚丙烯,设计师可以打造挺度更好的包装产品,同时拥有经济高效的加工性能。 (新材料在线)