



异形截面木塑复合材料托盘的数值模拟与实验对比分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2019.02.002

王海飞¹ 滑广军²
郭亚飞² 王丽姝²

1. 湖南工业大学
生命科学与化学学院
湖南 株洲 412007
2. 湖南工业大学
包装与材料工程学院
湖南 株洲 412007

摘要: 利用有限元数值仿真技术,研究了具有异形截面的木塑复合材料托盘的承载能力。采用自定义截面梁单元建立木塑复合材料的异型截面梁模型;基于该异形截面梁模型,建立了托盘有限元模型,并进行承载能力计算;最后将数值计算结果与实验结果进行对比分析。研究表明:数值分析结果与实验结果有比较好的一致性;数值分析方法的计算精度满足实际工程需要。该方法用于具有复杂截面形状的木塑复合材料及制品的研究与开发,能节约实验及研发成本、缩短研发周期。

关键词: 木塑复合材料; 托盘; 有限元分析; 数值分析

中图分类号: TB332; O242.21 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2019)02-0008-06

引文格式: 王海飞, 滑广军, 郭亚飞, 等. 异形截面木塑复合材料托盘的数值模拟与实验对比分析 [J]. 包装学报, 2019, 11(2): 8-13.

1 研究背景

木塑复合材料 (wood-plastic composite, WPC), 是用占总质量 50% 以上的木粉、稻壳、秸秆及废纸等植物纤维与塑料类材料混合, 经塑性成型加工工艺制成的环保型材料。WPC 的防潮、防水性能优于木材, 其环境适应性较好, 因而被广泛应用于建材、家具及物流包装等行业^[1-3]。WPC 在欧美等发达国家经过近 30 a 的发展正向成熟期过渡, 在我国也是林业、家具及物流包装行业研究的热点。近几年, 在新型 WPC 性能、WPC 成型工艺、WPC 制品设计及其性能分析方面的研究情况如下。

在新型 WPC 性能研究方面。张庆法等^[4]对稻壳 /

高密度聚乙烯 (high density polyethylene, HDPE) 复合材料与稻壳炭 / 高密度聚乙烯复合材料的性能进行了对比分析, 结果表明: 虽然两种复合材料的结合方式存在本质性的区别, 但稻壳和稻壳炭的添加都会影响 HDPE 的结晶强度, 但对其微晶结构的产生无影响。曾广胜等^[5]对回收瓦楞纸板浆增强高密度聚乙烯复合材料的力学性能进行了研究, 结果表明: 经马来酸酐接枝 HDPE 和改性烷基酚醛树脂 TKM-M80 共同增容的废纸浆 / HDPE 复合材料的力学性能得到明显提升。朱凌波^[6]制备了稻草纤维填充 ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer) 复合材料, 并分析了复合材料的成型温度、ABS 和稻草纤维的质量比等对复合材料的物理力学性能及

收稿日期: 2019-01-20

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2015JJ6034), 中国包装联合会“绿色包装与安全”专项基金资助项目 (2017ZBLY09)

作者简介: 王海飞 (1979-), 男, 安徽亳州人, 湖南工业大学副研究员, 博士, 主要从事有机合成及应用方面的研究, E-mail: wanghaifei@hut.edu.cn

通信作者: 滑广军 (1975-), 男, 河南长垣人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事运输包装设计与结构动力学方面的研究, E-mail: hgj757@126.com

流变性能的影响, 结果表明: 最佳模压温度和最佳的质量比分别为 170 °C 和 100/30。王春红等^[7]以稻壳粉、竹粉为增强体, 以非医疗回收塑料为基体, 制备了粉体 / 非医疗回收塑料木塑复合材料, 并分析了粉体粒径、用量及种类对 WPC 力学性能和吸水性能的影响, 结果表明: 当稻壳粉的质量分数为 50%、粒径为 40 目时, 稻壳粉 / 非医疗回收塑料木塑复合材料的综合力学性能最佳; 与稻壳粉 / 非医疗回收塑料木塑复合材料相比, 竹粉 / 非医疗回收塑料木塑复合材料的力学性能更优。

在 WPC 成型工艺研究方面。江太君等^[8-9]对木塑复合包装材料的在线挤出计量及计量误差, 以及高填充竹塑包装盒盒坯注塑成型工艺及其性能进行了研究。曾广胜等^[10]研究了 WPC 挤出料条空心现象。张红英^[11]对改性木塑复合托盘的压塑成型方法进行了研究, 重点介绍了木塑复合托盘的挤出、压塑成型和生产工艺控制。

在 WPC 制品设计及其性能分析方面。曾珊珊等^[12]基于经典力学研究了矩形截面实心 WPC 托盘的动态及静态性能。马卫静等^[13]基于托盘装卸工况, 选用实体单元, 建立了正方形、矩形及圆孔木塑复合梁的有限元模型。魏占国等^[14]对木塑托盘力学性能测试方法进行了研究, 初步提出了 WPC 托盘的性能测试标准。王艳菊^[15]设计了活接式木塑托盘, 该托盘的构件能灵活地组装与拆卸, 且适时调节构件数量能使木塑托盘满足不同的包装承载要求, 以弥补木塑制品强度不够、刚度不足的缺点。汪恭平^[16]利用 ANSYS/LSDYNA 软件对木塑托盘进行仿真实验, 并依据仿真结果对木塑托盘工字梁结构进行优化。

本文结合 WPC 特性与 WPC 托盘的加工工艺特点, 利用三维建模及 ANSYS 有限元分析软件, 研究具有异型截面梁的 WPC 托盘的承载能力, 并与实验结果进行对比分析。

2 WPC 性能及其托盘结构

2.1 材料性能

经检验, WPC 的静曲强度为 19.1 MPa, 弯曲弹性模量为 1 298 MPa, 泊松比 0.45, 硬度为 8HRR, 握螺旋钉力为 1 354 N。

2.2 异形截面梁形状

WPC 托盘的截面形状如图 1 所示。梁截面的宽度为 140 mm, 厚度为 35 mm, 中间有 5 个直径为 18

mm 的孔, 孔间距为 25 mm。

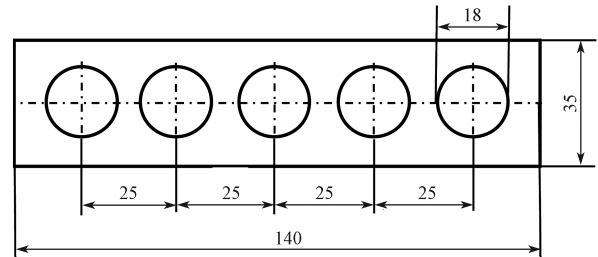


图 1 异形截面梁

Fig. 1 Shape of irregular section beam

2.3 托盘结构

图 2 为 WPC 托盘结构。托盘长 1.2 m, 宽 1 m, 铺板由 5 根异形截面梁构成, 底板与纵梁分别由 3 根异形截面梁构成, 在纵梁与底板之间有两层短异形截面梁叠置垫块。各构件之间采取黏结方式固定。

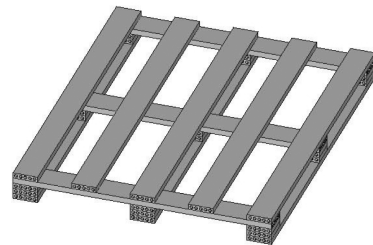


图 2 托盘结构图

Fig. 2 Pallet structure diagram

2.4 托盘的力学模型

托盘在承载状态下进行装卸时, 各构件主要承受弯矩载荷。对于截面及承载状态比较简单的梁结构, 其最大挠度 δ_{\max} 及最大应力 σ_{\max} 可以利用理论的方法计算。两端支承, 集中力作用于正中间的简支梁。

最大挠度及最大应力计算公式如下:

$$\delta_{\max} = \frac{pl^3}{48EI}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{ply}{4I}. \quad (2)$$

式中: p 为集中力;

l 为梁的跨距;

E 为材料弹性模量;

I 为梁的抗弯截面系数;

y 为梁截面至中性轴最大处的距离。

对于异形截面的 WPC 托盘, 其承载状态比较复杂 (承载状态与被装物的形状有关), 其截面形状及各构件之间的约束关系也比较复杂。对于复杂的工程结构, 数值模拟技术具有更强的分析能力。下面利用数值模拟方法对该异形截面 WPC 托盘进行分析, 并与实验方法进行对比。

3 实验结果与分析

对图2所示的托盘,制备成试样后进行了3种工况的实验。工况1是将铺板朝下放置在拉压试验机的底部支承面上,沿托盘长度方向,距底板两端的0.3 m处施加载荷,在15 000 N的压力载荷作用下,底板挠度为4 mm,加载工况如图3所示。工况2是将底板朝下,沿托盘长度方向,在底板两端用两根下枕梁支承,在铺板中间加载11 000 N的压力,在此压力下,托盘底板挠度为14 mm,加载工况如图4所示。工况3将底板朝下放置,沿托盘宽度方向,端部两根底板用两根下枕梁支承,在铺板中间加载8 700 N的压力,在此压力下,托盘底部挠度达到40 mm,纵梁中间出现断裂,加载工况如图5所示。可见,工况3是最恶劣的承载工况,在实际使用时要尽量避免这种装卸或堆垛方式。

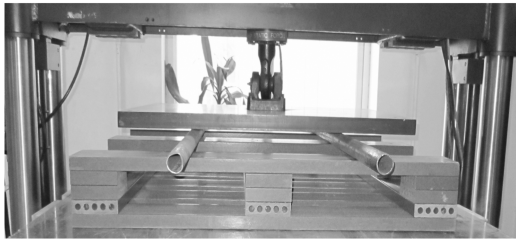


图3 工况1加载方法

Fig. 3 Loading method of experiment I

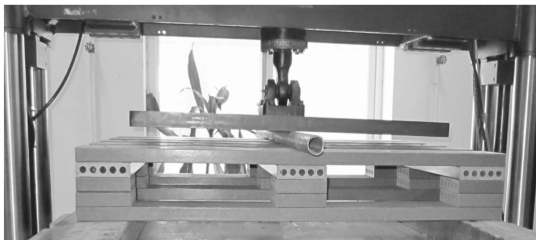
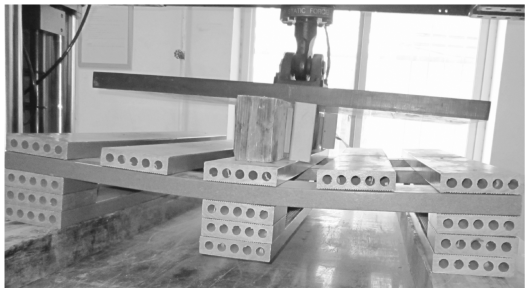
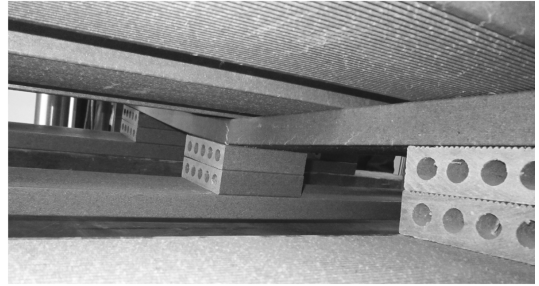


图4 工况2加载方法

Fig. 4 Loading method of experiment II



a) 整体变形



b) 局部破损

图5 工况3加载方法

Fig. 5 Loading method of experiment III

4 仿真模型构建

图2所示的托盘是由29根异形截面的WPC相互连接构成的复杂工程结构。在有限元软件中,如果选用实体单元对该托盘进行分析,由于构成整个托盘的面、体的数量过多,接触方式复杂,建模难度比较大,对计算机的硬件性能要求也比较高。与实体单元和壳单元相比,梁单元分析效率更高,因此本文考虑选用梁单元进行模拟。在ANSYS软件的梁截面库中,截面模型有圆形、矩形、工字型、槽型、角型、圆管、方管等,但没有图1所示的异形截面。因此,选择ANSYS软件的自定义截面梁单元功能,选用beam188单元模拟异形截面梁。由于梁单元属于线单元,在厚度方向只有一个节点,而本托盘是多个异性截面梁沿不同方向黏结而成,因此采用节点自由度全耦合的方式模拟相互交错梁的连接。

利用ANSYS软件对WPC托盘进行数值分析流程如图6所示。

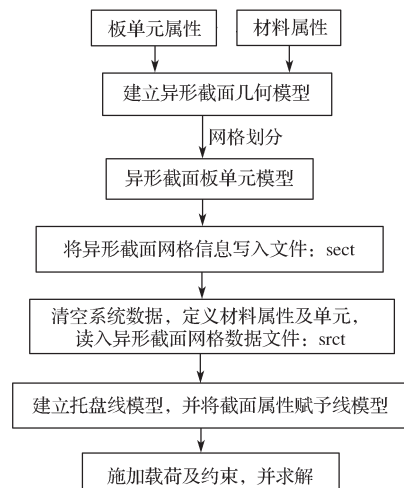


图6 数值仿真分析流程图

Fig. 6 Numerical simulation and analysis scheme

4.1 创建异形截面梁模型

利用有限元软件创建自定义的截面梁模型, 单元选用与材料属性设定: 单元选用 PLANE82, WPC 弹性模量为 1 298 MPa, 泊松比为 0.45。

先通过布尔运算获得带圆孔的矩形截面 (见图 7), 再将单元尺寸设定为 0.005 mm, 并将 PLANE82 单元属性与材料属性赋予梁截面模型, 执行网格划分 (见图 8), 最后执行 APDL 命令: secwrite, jml, sect, , 1, 将图 8 所示截面单元数据写入文件 jml。

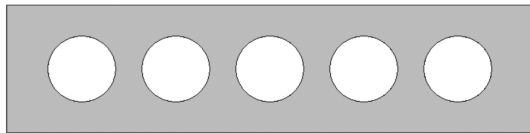


图 7 异形截面几何模型

Fig. 7 Geometric model of irregular section

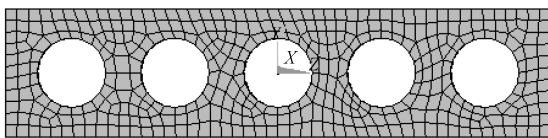


图 8 异形截面有限元模型

Fig. 8 Finite element model of irregular section

4.2 创建托盘模型

单元选择与材料属性定义: 单元选 BEAM188, 材料弹性模量为 1 298 MPa, 泊松比为 0.45。

先读入异形截面梁模型, 再以线段方式描述托盘的铺板、纵梁、底板及垫块, 并赋予其异形截面梁属性及材料属性, 最后将梁单元尺寸设为 0.05 mm, 执行网格划分。

4.3 施加载荷及约束

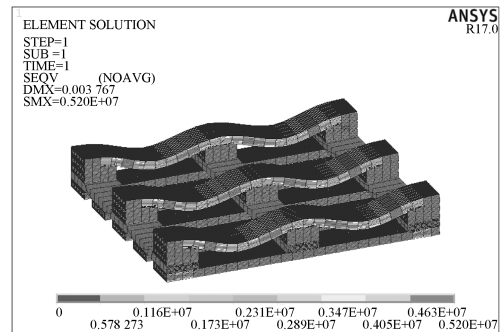
对铺板、纵梁、底板、垫块之间相交的节点处分别进行耦合, 模拟这些构件的固定连接。耦合后节点会有同样的位移, 相当于将这些构件固连在一起。

对应图 3~5 的 3 种工况的载荷及支承方式, 分别给托盘施加载荷及约束, 并进行数值计算。

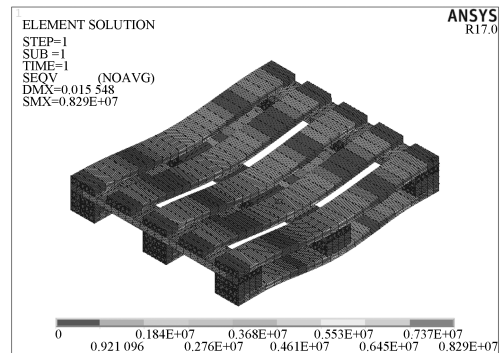
5 仿真结果分析

3 种工况下, WPC 托盘有限元模型的数值仿真结果如图 9 所示。由图可知: 工况 1 下, 最大挠度为 3.77 mm (实验结果为 4 mm), 最大应力为 5.2 MPa, 小于静曲强度值 19.1 MPa (强度值 19.1 MPa 是实验室的测试强度, 实际应用中工程材料的许用应力要小于该强度值); 工况 2 下, 最大挠度为 15.55

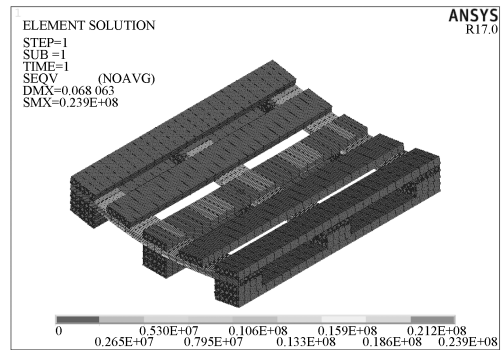
mm (实验结果为 14 mm), 最大应力为 8.29 MPa, 小于静曲强度值 19.1 MPa; 工况 3 下, 最大挠度为 68.06 mm (实验结果为 40 mm), 最大应力为 23.9 MPa, 超过静曲强度值 19.1 MPa, 材料发生破损, 这与实验测试结果是一致的。



a) 工况 1



b) 工况 2



c) 工况 3

图 9 数值仿真计算结果

Fig. 9 Numerical simulating results



彩图

综上所述, 数值计算结果与测试结果有较好的一致性, 其存在的偏差在实际工程应用中是可以接受的。分析本研究存在偏差的原因如下: 1) 数值仿真建模时, 所采取的节点耦合方式是对托盘各构件的实际连接方式的一种近似; 2) 数值仿真对有限元模型的约束方式与实际存在偏差; 3) 异形截面梁及托盘在制备过程中与设计尺寸也存在偏差。因此完全消除

偏差是不可能的, 只能通过更精确的数值建模与实验测试减小偏差。

6 结论

将 WPC 托盘的数值仿真结果与实验测试结果进行对比, 结果表明:

1) 对具有复杂截面形状的 WPC 托盘, 利用有限元软件进行数值仿真分析, 与实验测试结果具有较好的一致性。工况 1 下, 数值仿真计算的挠度计算结果与实验测试结果的偏差约为 5%; 工况 2 下, 数值仿真计算的挠度计算结果与实验测试结果的偏差约为 11%; 工况 3 下, 数值仿真计算的挠度结果与实验测试结果偏差较大, 但计算应力表明, 最大应力已超过静曲强度, 材料发生破损, 与实验测试结果相同。

2) 本研究所进行的实验测试方法, 只能得到 WPC 托盘的挠度测试结果, 观测其破损情况。采取数值仿真分析方法, 能够提取应力分布、变形状态等更丰富的分析数据。数值仿真与实验测试技术相结合能进一步提高仿真分析精度。

3) 数值建模分析方法可用于具有复杂截面形状的 WPC 型材及制品的研究与开发。该方法不仅可以节约实验及研发成本、缩短研发周期, 且其分析精度能够满足实际工程需要。

参考文献:

- [1] 张求慧. 新型木塑复合材料研究进展 [J]. 化工新型材料, 2014, 42(2): 6-8.
ZHANG Qiuhui. Research Progress of New Wood-Plastic Composite Material[J]. Chemical Materials, 2014, 42(2): 6-8.
- [2] 杨守禄, 罗莎, 章磊, 等. 木塑复合材料功能化改性研究进展 [J]. 材料导报, 2018, 32(17): 3090-3098.
YANG Shoulu, LUO Sha, ZHANG Lei, et al. An Overview on Functionalization Modification of Wood-Plastic Composites[J]. Materials Review, 2018, 32(17): 3090-3098.
- [3] 曾广胜, 徐成, 江太君. 发泡木塑复合材料发泡及成型工艺研究 [J]. 包装学报, 2011, 3(4): 27-32.
ZENG Guangsheng, XU Cheng, JIANG Taijun. Investigation of Foaming and Molding of Micro-Foamed Wood Plastic Composites[J]. Packaging Journal, 2011, 3(4): 27-32.
- [4] 张庆法, 杨科研, 蔡红珍, 等. 稻壳/高密度聚乙烯复合材料与稻壳炭/高密度聚乙烯复合材料性能对比 [J]. 复合材料学报, 2018, 35(11): 3044-3050.
ZHANG Qingfa, YANG Keyan, CAI Hongzhen, et al. Comparison of Properties Between Rice Husk/High Density Polyethylene and Rice Husk Biochar/High Density Polyethylene Composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2018, 35(11): 3044-3050.
- [5] 曾广胜, 许超, 刘跃军, 等. 废纸浆增强 HDPE 复合材料的力学性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(12): 64-67.
ZENG Guangsheng, XU Chao, LIU Yuejun, et al. Mechanical Properties of Waste Paper Pulp Reinforced HDPE Composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2011, 27(12): 64-67.
- [6] 朱凌波. 稻草纤维填充 ABS 复合材料性能研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
ZHU Lingbo. Preparation and Properties of ABS Filled Straw Fiber Composites[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.
- [7] 王春红, 任子龙, 吴利伟, 等. 木质纤维对木塑复合材料力学性能和吸水性能的影响 [J]. 塑料科技, 2018, 46(5): 65-70.
WANG Chunhong, REN Zilong, WU Liwei, et al. Effects of Wood Fiber on Mechanical Properties and Water Absorbability of Wood Plastic Composite[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(5): 65-70.
- [8] 江太君, 徐成, 陈磊, 等. 木塑复合包装材料在线挤出计量及计量误差研究 [J]. 包装工程, 2018, 39(11): 133-136.
JIANG Taijun, XU Cheng, CHEN Lei, et al. Online Extrusion Measurement and Measurement Error for Wood Plastic Packaging Composites[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(11): 133-136.
- [9] 江太君, 邹思敏, 曾广胜. 高填充竹塑包装盒盒坯注塑成型工艺及性能研究 [J]. 包装学报, 2018, 10(2): 56-61.
JIANG Taijun, ZOU Simin, ZENG Guangsheng. Injection Moulding Process and Performance of Highly Filled Bamboo Plastic Composite Packaging Box[J]. Packaging Journal, 2018, 10(2): 56-61.
- [10] 曾广胜, 陈磊, 林瑞珍, 等. 木塑复合材料挤出料条空心现象的研究 [J]. 塑料工业, 2011, 39(12): 72-75.
ZENG Guangsheng, CHEN Lei, LIN Ruizhen, et al. Research on the Hollow Phenomenon in the Extrusion Article Material of WPC[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(12): 72-75.

- [11] 张红英. 改性木塑复合托盘的压塑成型 [J]. 塑料制造, 2013(5): 66-68.
ZHANG Hongying. Compression Molding and Production of Wood-Plastic Composite Pallet[J]. Plastics Manufacture, 2013(5): 66-68.
- [12] 曾珊珊, 胡妍, 丁毅. 塑木托盘力学性能分析 [J]. 包装工程, 2007, 28(10): 113-115.
ZENG Shanqi, HU Yan, DING Yi. Mechanical Property Analysis of Plastic-Wooden Stock[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10): 113-115.
- [13] 马卫静, 陈满儒, 李强. “利乐包”塑木托盘的有限元分析 [J]. 包装工程, 2011, 32(1): 76-79.
MA Weijing, CHEN Manru, LI Qiang. Finite Element Analysis of “Tetra Pak” Plastic-Wood Pallet[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 76-79.
- [14] 魏占国, 王忠伟, 庞燕. 木塑托盘力学性能测试方法研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(10): 116-122.
WEI Zhanguo, WANG Zhongwei, PANG Yan. Test Method for Mechanical Property of Wood Plastic Pallet[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(10): 116-122.
- [15] 王艳菊. 活接式木塑托盘的结构研究与设计 [D]. 无锡: 江南大学, 2013.
WANG Yanju. The Structure Research and Design of the Loosen Joint Wood and Plastic Pallet[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [16] 汪恭平. 木塑托盘工字梁结构优化设计 [J]. 机械工程师, 2013(7): 140-143.
WANG Gongping. Optimization Design of I-Beam Structure for Wood-Plastic Pallet[J]. Mechanical Engineer, 2013(7): 140-143.
- (责任编辑: 邓彬)

Numerical Simulation and Experimental Analysis of Wood Plastic Composite Pallet with Irregular Section

WANG Haifei¹, HUA Guangjun², GUO Yafei², WANG Lishu²

(1. College of Life Sciences and Chemistry, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Based on finite element numerical simulation technology, a method of calculating the load-carrying capacity of wood-plastic composite pallets with irregular cross-section was put forward. Firstly, an irregular section beam model of wood-plastic composites was established by using the method of self-defined cross-section beam element. Secondly, based on the irregular section beam model, a pallet structure model was established and the bearing capacity was calculated. Finally, the numerical calculation results were verified with the experimental results. The results showed that the numerical analysis results were in good agreement with the experimental results. The accuracy of numerical analysis method could meet the engineering requirements. Being applied to the research and development of wood-plastic composites and products with complex cross-section shape, the method could be cost saving and shorten the research and development cycle.

Keywords: wood-plastic composite; pallet; finite element analysis; numerical analysis