

单向进叉全瓦楞纸板托盘结构设计

王攀登, 杨应龙, 姚卓楠, 寇金宝*

(天津商业大学, 天津 300134)

摘要: **目的** 设计一种新型单向进叉全瓦楞纸板托盘, 以提高物流装卸效率, 降低生产成本, 并满足环保和可持续性的要求。**方法** 基于托盘的实际使用环境和承载要求, 选择 5 层 AB 楞瓦楞纸板作为材料。基于 2 种结构纸板组装形成托盘, 通过抗压测试和对角线刚度试验对托盘性能进行验证。**结果** 所设计的托盘展现出良好的稳定性和较低的生产成本, 其抗压能力和对角刚度符合国家标准要求。**结论** 通过对单向进叉全瓦楞纸板托盘的结构设计、性能测试和优化改进, 有望为物流行业提供一种性能更优、成本更低、更加环保的新型托盘, 对于推动物流行业的绿色转型和可持续发展具有重要的理论和实践价值。

关键词: 单向; 瓦楞纸板; 托盘; 结构设计; 物流包装

中图分类号: TB482

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)21-0240-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.032

Structure Design of a One-Way Pallet with All Corrugated Board

WANG Pandeng, YANG Yinglong, YAO Zhuonan, KOU Jinbao*

(Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: The work aims to design a one-way pallet with all corrugated board to enhance handling efficiency of logistics, reduce production costs, and meet the requirements for environmental protection and sustainability. Based on the actual using environment and bearing requirements of pallets, 5-layer corrugated board with AB flute was selected as the material. The pallet was assembled from corrugated board with two types of structures, and its performance was examined through compression tests and diagonal stiffness tests. The designed pallet showed good stability and low production cost. Its compressive strength and diagonal stiffness could meet the requirements of national standards. Through structural design, performance testing and optimization improvement of one-way pallets with all corrugated board, a new and more environmentally friendly pallet with better performance and lower cost for the logistics industry is developed in this study, which has important theoretical and practical values in promoting the green transformation and sustainable development of the logistics industry.

KEY WORDS: one way; corrugated board; pallet; structural design; logistics packaging

托盘作为国际物流和仓储中不可或缺的基础工具, 其材质种类繁多, 主要包括木材、塑料、纸材以及金属材料等, 各自在实际应用中展现出不同的特性和适用性^[1]。如今各行各业都在积极响应国家绿色发展和“双碳”目标, 以减少资源消耗和环境影响^[2]。如何采用环保材料减少对环境的影响, 是托盘行业发展

的重要思考方向。木质托盘由于其坚固耐用, 曾广泛用于物流行业。然而, 它们因大量消耗森林资源而对环境造成破坏, 且不符合绿色包装材料的标准, 因此正逐渐被全球市场所淘汰; 塑料托盘以其轻便和耐用著称, 适合长期重复使用, 但它们通常由非生物降解材料制成, 存在长期的环境污染问题, 且面临抗老化

收稿日期: 2024-05-21

*通信作者

挑战^[3];金属托盘因其结构坚固和承载能力强而受到青睐,不足的是其质量大和成本高,限制了在物流业的广泛应用^[4]。因此,瓦楞纸板托盘以其绿色、可回收的特性,正逐渐成为物流行业关注的焦点。本研究所用作品即研究对象也将采用环境友好的瓦楞纸板作为主要材料,通过一板成型,折叠形成特殊的部件相互锁合组装而成。

1 瓦楞纸板托盘的研究现状

1.1 国内现状

在国内,随着物流行业的迅猛发展和环保理念的深入人心,瓦楞纸板托盘这种绿色可回收的物流包装产品逐渐进入了大众视野。其独特的环保特性和实用性能,使其在物流领域中的应用日益广泛^[5]。近年来,虽然国内对于瓦楞纸板托盘的研究逐渐增多,但主要聚焦在纸托盘的制造工艺、力学性能及环保性能等基础领域。对单向进叉全瓦楞纸板托盘这一具有特定功能和应用场景的结构设计,国内的研究尚处于起步阶段,相关文献和实践案例相对较少。这在一定程度上制约了该类型纸托盘在国内物流行业中的推广和应用。值得注意的是,伴随着国内对环保物流和可持续发展理念的持续关注,越来越多的学术机构和企业开始认识到单向进叉全瓦楞纸托盘研究的关键性,积极投身于该领域的研究,并通过改进生产流程和优化设计结构,努力提高纸托盘的承载力和稳定性,以适应物流行业的增长需求^[6]。同时,国内也在积极构建一个全面的纸托盘回收和再利用系统,旨在降低物流成本,减少对环境的影响,并促进资源的循环利用^[7]。这无疑为单向进叉全瓦楞纸托盘在国内的应用和普及提供了有利的政策支持和市场机会。

1.2 国外现状

在全瓦楞纸板托盘的研究与实践方面,国际社会已经取得了显著的进步,并且较之国内更早地投身于该领域的探索。海外研究者的焦点集中在提升其力学性能、创新结构设计及增强环保属性上。他们运用先进的计算机模拟技术与精确的实验测试方法,对纸托盘的结构进行了详尽的分析与优化,旨在最大化提升其承载力与稳定性。这种精细的研究策略不仅增强了纸板托盘的性能,还为未来的应用打下了坚实的理论基础。在结构设计领域,国外研究者持续打破常规,探索创新的纸托盘结构。他们以市场需求为指导,通过调整结构形态和优化尺寸,提升了纸托盘的实用性与适应性。这种需求驱动的设计思维促进了纸托盘结构的不断创新。同时,国际社会也极为重视纸托盘的环保特性与可持续性研究,致力于开发环保材料和生产流程,减少纸托盘在生产与使用过程中对环境的影响。他们还关注纸托盘的回收与再利用,积极寻求循

环经济下的物流包装解决方案。这些努力不仅反映了对环境保护的承诺,也促进了全瓦楞纸板托盘在物流行业的广泛应用。

值得我们借鉴的是,一些国际先进企业在全瓦楞纸板托盘的研发与制造上展现了卓越的能力。他们投入巨额资金,建立了专业的研究团队,成功研制了一系列既有较高性能又环保的全瓦楞纸板托盘产品^[8]。这些产品不仅在本国市场获得了认可,还成功打入国际市场,赢得了全球客户的青睐。国际社会在全瓦楞纸板托盘领域的研究成就与实践经验,为全瓦楞纸板托盘的研究与应用提供了宝贵的参考与启示。随着国际交流与合作的日益加深,相信全瓦楞纸板托盘的研究与应用将迎来更加可观的前景。

2 单向进叉全瓦楞纸板托盘结构设计

2.1 材料及参数的选择

托盘最重要的性能是其承载能力,这包括了静态和动态负载的承受能力。瓦楞纸板的层数和厚度是决定其承载力的关键因素^[9]。在通常情况下,层数和厚度的增加会提升托盘的强度与刚性,但也会使得成本上升。因此,本文设计选择了 AB 楞型的 5 层瓦楞纸板作为主要材料,以平衡承载需求和成本效益。

根据我国国家标准 GB/T 40479—2021《联运通用半托盘尺寸及性能要求》,本文设计方案确定瓦楞托盘的平面尺寸为 1 200 mm×1 000 mm,有助于提升托盘的通用性和适用性。为了便于叉车进行搬运作业,叉孔的竖向尺寸设计为 90 mm,而横向开口的尺寸则设计为超过 180 mm,以确保叉车顺利插入并提供稳定的搬运支持。

2.2 制造尺寸计算

本文设计的单向进叉全瓦楞纸板托盘由 2 种结构纸板组装而成,其中共需 4 片纸板,每种结构纸板 2 片。此瓦楞纸板托盘的外尺寸设计为: $L_0=1\ 200\text{ mm}$, $B_0=1\ 000\text{ mm}$, $H_0=300\text{ mm}$ 。按照设计的瓦楞纸板托盘外尺寸,用 AutoCAD 软件绘制出 2 种结构纸板的展开草图,如图 1a、1b 所示,并据以进行制造尺寸的计算。

如本文 2.1 节所述,该托盘选用的瓦楞纸板为 AB 楞,根据表 1 知其厚度 t 为 8.1 mm,然后按 AutoCAD 软件绘制的 2 种结构纸板成型后试样的截面如图 1c、1d 所示,并对每一结构纸板进行制造尺寸的计算^[10]。

1) 结构纸板 1 的制造尺寸

$$B_0=B_1=B_2=B_3=B_4=B_5,$$

$$L_2'=L_2-2\times 0.5t=491.9\text{ mm},$$

$$L_4'=L_4-2\times 0.5t=191.9\text{ mm},$$

$$H_1'=H_1-0.5t=95.95\text{ mm},$$

$$H_3'=H_3-2\times 0.5t=291.9\text{ mm},$$

$$H_5'=H_5-0.5t=145.95\text{ mm}.$$

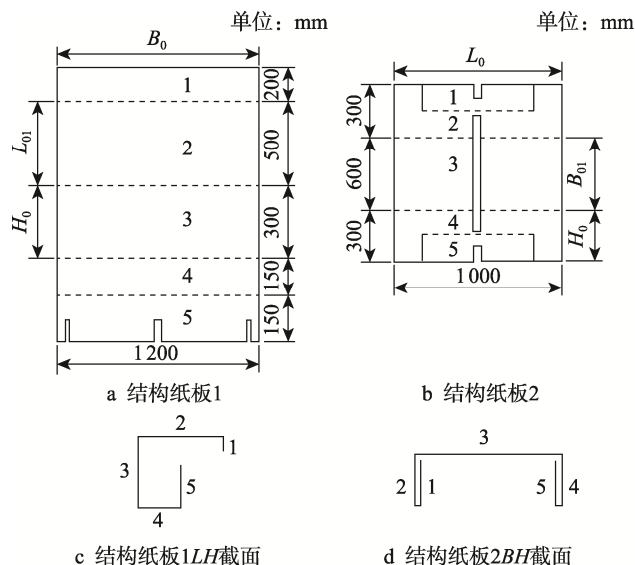


图 1 2 种结构纸板设计和截面示意图

Fig.1 Design and section sketches of boards with two structures

表 1 瓦楞纸板的计算厚度
Tab.1 Calculation thickness of corrugated board

楞型	A	B	C	E	F	AB	BC
纸板计算厚度/mm	5.3	4.3	3.3	2.3	1.2	8.1	7.1

2) 结构纸板 2 的制造尺寸

$$L_0=L_1=L_2=L_3=L_4=L_5,$$

$$B_3'=B_3-2\times 0.5t=591.9\text{ mm},$$

$$H_2'=H_2-2\times 0.5t=141.9\text{ mm},$$

$$H_4'=H_4-2\times 0.5t=141.9\text{ mm},$$

$$H_1'=H_1-0.5t=145.95\text{ mm},$$

$$H_5'=H_5-0.5t=145.95\text{ mm}.$$

根据前面的计算已经获得制造尺寸, 由此利用 AutoCAD 软件绘制该方案瓦楞纸板托盘各部件的平面设计图, 如图 2 所示。

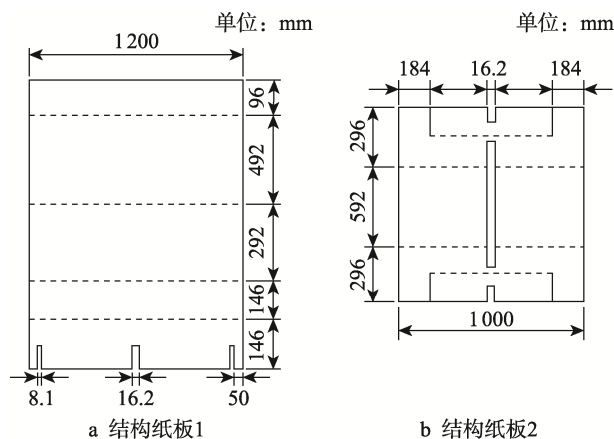


图 2 瓦楞纸板托盘的尺寸标注

Fig.2 Dimensioning diagrams of pallet with corrugated board

2.3 托盘结构设计优化

原方案的托盘底部未进行封底, 这虽然有助于提高材料的利用率, 减少生产过程带来的余料, 但叉车作业时会出现稳定性不足的问题。为了克服该缺陷, 对托盘底部进行了改进, 通过将纸板向外延伸并采用内折对接的方式实现封底, 如图 3a、3b 所示。这种改进显著增加了托盘与叉车的接触面积, 不仅减少了叉车叉刀与托盘接触时的磨损, 而且在叉车作业时明显提升了托盘的稳定性; 改进后的托盘底部结构更加稳固, 减少了托盘被叉车抬起过程中发生偏移或翻转的风险, 从而提高了货物搬运的安全性和效率。

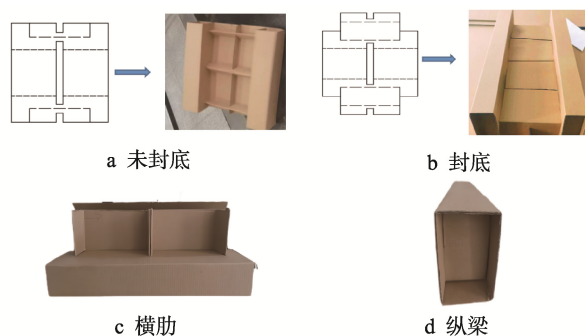


图 3 设计方案优化前后托盘结构

Fig.3 Structure of pallet before and after scheme optimization

另外, 还可通过加入多个横肋加强箱型纵梁结构, 如图 3c、3d 所示, 不仅可增强托盘的承压和抗弯强度, 而且在托盘的载货面上采用“田”字形横纵加劲肋设计, 可显著提升托盘的横向稳定性和载货面的承载能力, 使得托盘在面对重载或不规则摆放的货物时, 仍能保持卓越的结构完整性和使用性能。正常来说, 横肋和纵梁结构越多, 其力学性能越优异, 结构越稳固, 但是也会造成一定成本的浪费, 所以需要根据实际情况适当增加。

3 单向进叉全瓦楞纸托盘结构性能的试验研究

3.1 试验标准

在本次设计中, 瓦楞纸板托盘的试验遵循 GB/T 20077—2006《一次性托盘》和 GB/T 19450—2004《纸基平托盘》的规范进行^[11]。使用该试验流程旨在模拟瓦楞纸板托盘在实际使用中的各种情况, 以确保设计既符合成本效益又满足性能的要求。这些标准可确保新设计的瓦楞纸板托盘在发布性能数据或进入市场之前, 已经通过规定的测试流程, 从而保证其试验结果的准确性和可靠性, 以便在后续的实际应用中得到验证。通过这种方式, 能够实现成本控制与性能优化之间的平衡, 为市场提供既经济又耐用的瓦楞纸板托盘解决方案。

3.2 压力试验

3.2.1 试验条件

温湿度处理条件: 托盘样品需要经过常态温度 23℃±2℃和相对湿度 50%±5%条件下放置 24 h 之后进行测试^[12]。

试验要求: 平压瓦楞纸板托盘, 当变形量为 10 mm

时,需达到的最低载荷为 $3.3R=1\,650\text{ kg}$,其中 $R=500\text{ kg}$ 。

根据实验要求设计试验, 并采用电脑伺服纸箱压力试验机进行测试, 如图 4a、4b 所示。将托盘样品放置在压力试验机底座正中心, 压板加载速度设置为 10 mm/min, 缓慢施加压力, 当托盘开始受损时, 停止施压, 此时的压力为托盘所能承受的最大压力。

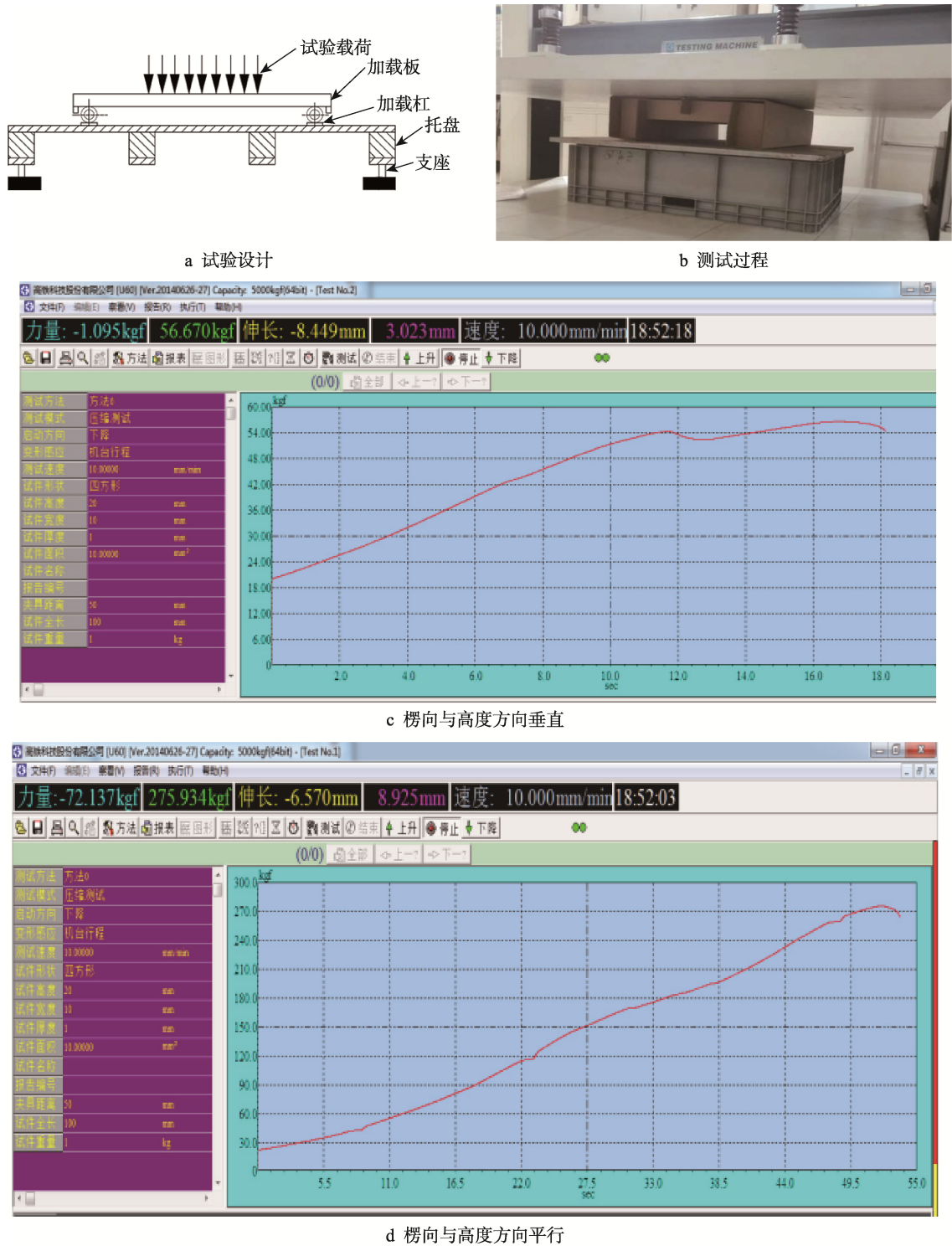


图 4 压力测试
Fig.4 Stress test

3.2.2 试验结果

考虑到原设计的托盘所需瓦楞纸板较厚,人工难以裁切及测量误差较大等因素,试验所测得的数据均由 1:2 模型的 3 层 B 型瓦楞纸板制作而成的托盘所测得,先根据马基公式 $P_c=5.87P_{ECT}\sqrt{Zt}$ (P_c 为抗压强度; P_{ECT} 为边压强度; Z 为托盘载荷面周长; t 为瓦楞纸板的厚度) 换算成 1:1 模型的 3 层 B 型瓦楞托盘的数据,再换算成 1:1 模型的 5 层 AB 型瓦楞托盘的数据,计算不同纸板不同比例模型所用的马基公式参数见表 2。

表 2 马基公式参数
Tab.2 Parameters of Mckee formula

	$P_{ECT}/(N\cdot m^{-1})$	t/mm	Z/m
3 层 B 型纸板(1:2)	4.07×10^3	3	1.8
3 层 B 型纸板(1:1)	4.07×10^3	3	3.6
5 层 AB 型纸板(1:1)	6.37×10^3	8.1	3.6

当托盘样品的瓦楞楞向与高度方向垂直时,所测得的最大极限承重为 56.670 kg,根据马基公式换算得 3 层 B 型纸板 1:1 模型的托盘极限承重为 78.513 kg,5 层 AB 型纸板 1:1 模型的托盘极限承重为 139.998 kg;当托盘样品的瓦楞楞向与高度方向平行时,所测得的最大极限承重为 275.934 kg,根据马基公式换算得 3 层 B 型纸板 1:1 模型的托盘极限承重为 390.230 kg,5 层 AB 型纸板 1:1 模型的托盘极限承重为 1 003.570 kg。它们的测试结果见图 4c、4d。

由试验数据及根据马基公式计算出的结果可知,用 5 层 AB 楞纸板所制得的托盘,极限承重远远超过测试标准静载荷 $R=500$ kg,说明该托盘的抗压性能十

分出众。此外还可看出,不同楞向的极限承重不同,当楞向与高度方向平行时,该结构的托盘所能承受的压力最大,故本文设计托盘的楞向为与高度方向平行。

3.3 对角线刚度试验

通过垂直冲击跌落试验机对瓦楞纸板托盘执行对角线刚度试验,该过程模拟了托盘在实际使用中可能遭遇的跌落冲击情况。在受控实验条件下,托盘从预定高度跌落至坚固平面,通过精确的数据采集和细致的分析,可以定量评估托盘在受到冲击时的抗变形能力,从而确保其结构稳定性和实际应用中的可靠性。

3.3.1 试验原理

根据 GB/T 4996—2014《联运通用平托盘试验方法》的规定,对角刚度试验是通过特定方法对托盘对角线刚度进行评估的。在该试验中,对托盘同一角重复进行 3 次跌落,每次都从精确的高度落至平整、坚硬的冲击面上。试验后,将托盘对角线长度 y 的测量值与跌落前的长度进行比较,其变化量的最大允许值为 $0.04y$,以确保托盘在实际使用中能承受预期的冲击而不发生过度变形^[13]。具体的试验设计和操作如图 5a、5b 所示。

3.3.2 试验过程

使用苏州东菱振动试验仪器有限公司 PD-315-A 型包装件跌落试验机进行测试^[14]。取 1:2 模型的 3 层 B 型瓦楞托盘在托盘底端距离地面 0.5 m 的高度跌落。此时,环境温度为 25℃,相对湿度为 50%。在进行托盘角跌落试验时,首先将托盘沿其对角线方向吊起至离地面高度为 H 的位置,随后让其自由跌落至平整且坚硬的冲击面上。为了获得可靠的试验数据,需对 3 个相同规格的托盘各执行 3 次独立的跌落

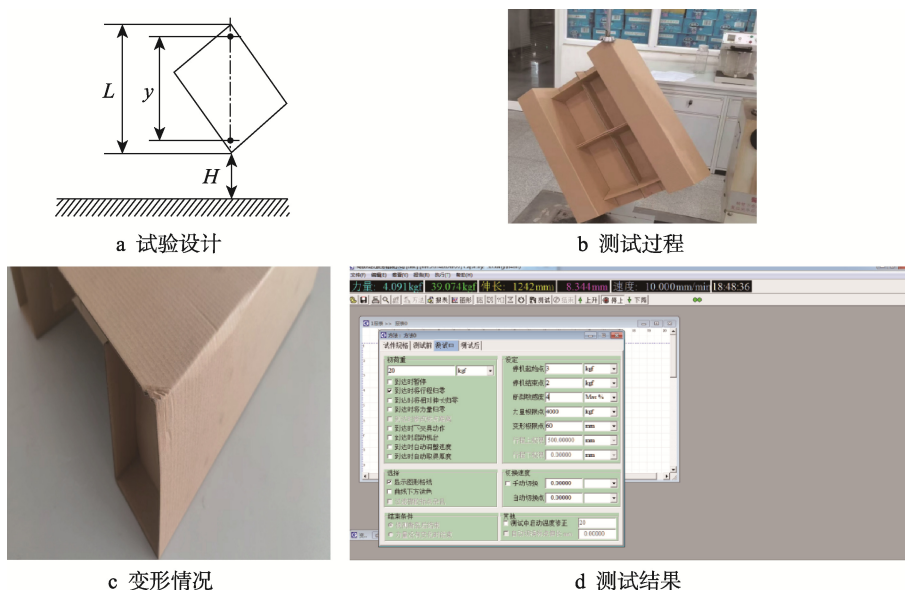


图 5 对角刚度实验
Fig.5 Test of diagonal stiffness

试验,并计算这些试验结果的平均值以减少随机误差的影响。在每次试验的开始(托盘吊起后)和结束(第 3 次跌落后),都需精确测量托盘的对角线长度 y ,确保每次测量都在对角线上的同一位置进行,以便准确评估跌落对托盘对角线长度的影响。

3.3.3 试验结果

瓦楞纸板托盘对角跌落冲击试验后的结果及变形情况见图 5。由图 5c 可以看出,跌落角边局部出现塑性变形,其他地方无明显变形,说明瓦楞纸板托盘对角跌落冲击时跌落角局部变形较大,对其他部分几乎没有影响。

对试验托盘对角线进行测量,试验前的结果如图 5d 所示,3 次跌落的对角线长度变化见表 3。根据国家标准 GB/T 4996—2014 对跌高为 0.5 m 时托盘对角刚度进行校核: $0.04y_0=60.32\text{ mm}$, $|y_3-y_0|=59.3<0.04y_0$ 。所以跌高为 0.5 m 时该托盘对角刚度满足国家标准要求^[15],而且 3 次跌落后对角线变化率与蜂窝纸基托盘的相接近^[16]。

表 3 跌落高度为 0.5 m 时瓦楞纸板
托盘冲击跌落实验结果
Tab.3 Experimental results of drop test of pallet with
corrugated board with drop height of 0.5 m

对角线长度/mm				压缩变形量/mm	
初始 值 y_0	第 1 次 跌落 y_1	第 2 次 跌落 y_2	第 3 次 跌落 y_3	$ y_1-y_0 $	$ y_3-y_0 $
1 242	1 212.5	1 190.1	1 182.7	29.5	59.3

4 结语

本文研究了一种新型单向进叉全瓦楞纸板托盘的结构设计与性能测试,通过选用 AB 楞 5 层瓦楞纸板作为材料,进行细致的结构设计和尺寸计算,并对托盘进行了封底和结构优化,以提高其稳定性和承载能力。通过抗压测试和对角线刚度试验,验证了托盘的出色性能,展示了其在满足国家标准的同时,具有较低的生产成本和环保优势,为物流行业提供了一种性能更优、成本更低、更加环保的新型托盘解决方案,对推动物流行业的绿色转型和可持续发展具有重要的理论和实践意义。利用马基公式换算托盘的抗压强度,有一定的可靠性,但这种方法并不是最佳的办法,为了得到更准确的结果,可采用有限元仿真模拟和人工智能(AI)机器学习的评价方法。如果在湿度高的区域应用全瓦楞纸托盘可选择抗水性比较好的瓦楞面纸,对于对角刚度要求高的使用场合还可搭配金属护角一起使用。

参考文献:

[1] 孙熙军,王芮. 托盘市场 2023 年回顾和 2024 年展望

[J]. 物流技术与应用, 2024, 29(4): 60-65.
SUN X J, WANG R. Review of Pallet Market in 2023 and Prospect in 2024[J]. Logistics & Material Handling, 2024, 29(4): 60-65.
[2] 张自强,周伟,杨重玉. 碳中和背景下森林采伐限额对中国森林碳汇影响的空间效应[J]. 统计与决策, 2024, 40(8): 84-88.
ZHANG Z Q, ZHOU W, YANG Z Y. Spatial Effects of Forest Cutting Quota on Forest Carbon Sequestration in China Under the Background of Carbon Neutralization[J]. Statistics & Decision, 2024, 40(8): 84-88.
[3] 王兵,郭浩宇,赵秀国. 不同材质托盘载具选取经济性分析研究[J]. 物流技术与应用, 2023, 28(2): 155-157.
WANG B, GUO H Y, ZHAO X G. Economic Analysis and Research on the Selection of Different Materials Pallet[J]. Logistics & Material Handling, 2023, 28(2): 155-157.
[4] 张帷,张琪,王辉,等. 金属托盘面板弯曲力学性能研究及有限元分析[J]. 冶金与材料, 2019, 39(1): 67, 69.
ZHANG W, ZHANG Q, WANG H, et al. Study on Bending Mechanical Properties of Metal Pallet Panel and Finite Element Analysis[J]. Metallurgy and Materials, 2019, 39(1): 67, 69.
[5] 邢碧滢. 竹木复合标准平托盘力学性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
XING B Y. The Research on Mechanical Properties of Bamboo-Wood Composite Standard Flat Tray[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020.
[6] 洪兹文. 客车制造企业精益物流研究: 以厦门金旅为例[D]. 泉州: 华侨大学, 2016.
HONG Z W. A Study on the Lean Logistics in Coachmanufacture: A Case of Xiamen Jinlv[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2016.
[7] 王利芳. 高职物流产业学院探索实践与发展建议: 以唯品会学院为例[J]. 物流技术, 2023, 42(9): 158-160.
WANG L F. Exploration, Practice and Development Suggestion of Higher Vocational Logistics Industrial Colleges: Taking VIPs College as Example[J]. Logistics Technology, 2023, 42(9): 158-160.
[8] MASOOD S H, HAIDER RIZVI S. An Investigation of Pallet Design Using Alternative Materials for Cold Room Applications[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(1): 1-8.
[9] 柳雅真,陆家辉,马博晗,等. 纸托盘缓冲垫块设计[J]. 机械工程师, 2018(3): 113-116.

- LIU Y Z, LU J H, MA B H, et al. Design of Buffer Block for Paper Pallet[J]. Mechanical Engineer, 2018(3): 113-116.
- [10] 孙诚. 包装结构设计[M]. 2 版. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
- SUN C. Package Structure Design[M]. 2nd ed. Beijing: China Light Industry Press, 2003.
- [11] 全国包装标准化技术委员会. 纸基平托盘: GB/T 19450—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- National Packaging Standardization Technical Committee. Paper Flat Pallets: GB/T 19450—2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [12] JI H W, WANG H W. Short Span Compressive Stress-Strain Relation and Model of Molded Pulp Material[J]. Key Engineering Materials, 2010, 450: 202-205.
- [13] 赵钊, 张晓川, 王佼, 等. 纸浆模塑托盘对角刚度的跌落试验测试[J]. 包装工程, 2012, 33(11): 1-4.
- ZHAO Z, ZHANG X C, WANG J, et al. Drop Test of Molded Pulp Pallet and Diagonal Stiffness Analysis[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(11): 1-4.
- [14] 邵文全, 计宏伟, 李砚明, 等. 信号采集仪运输包装件缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 11-14.
- SHAO W Q, JI H W, LI Y M, et al. Research on Cushioning Properties of the Signal Acquisition Instrument Package[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 11-14.
- [15] 王佼. 纸浆模塑托盘的力学性能及构型优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- WANG J. Research on Mechanical Performance and Structure Optimizing of Molded Pulp Pallet[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [16] 刘珊. 蜂窝纸基托盘结构及承载性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
- LIU S. Research of Honeycomb Paper Base Tray Structure and Performance[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.