

金属托盘面板弯曲力学性能研究及有限元分析

巩桂芬, 白治明, 李超, 刘雨杉, 陈勃新

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 确认以镀锌钢为材质的面板是否适合物流金属托盘包装, 并对其弯曲变形力学性能进行研究。**方法** 通过 SolidWorks 软件对金属面板进行建模, 利用力学相关知识建立面板的形心位置模型及惯性矩求解方法。同时在 Ansys Workbench 中对长度为 600~1200 mm 之间的面板进行位移弯曲变形仿真, 及对面板的最大挠度理论计算过程进行推导。**结果** 得到了面板的精确形心位置 $y_p=10.334$ mm, 惯性矩 $I_{zp}=1.372 \times 10^{-8}$ m⁴, 以及不同长度面板的最大位移变形理论与仿真数值。**结论** 提供了金属托盘面板弯曲变形的理论计算方法, 进一步确认了金属托盘面板在物流包装中的耐用性、实用性, 该研究为金属托盘力学性能探讨、结构优化提供依据。

关键词: 面板; 金属托盘; 惯性矩; 有限元分析; 弯曲变形

中图分类号: TB485.3; TB484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)09-0012-04

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.09.003

Bending Mechanical Properties of Metal Pallet Panel and Finite Element Analysis

GONG Gui-fen, BAI Zhi-ming, LI Chao, LIU Yu-shan, CHEN Bo-xin
(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to confirm whether the galvanized steel panel is suitable for the logistics metal pallet package and study the mechanical property of its bending deformation. The metal panel was modeled based on SolidWorks software. The centroid position model and the method of solving moment of inertia of the panel were established based on the relevant knowledge of mechanics. At the same time, the displacement bending deformation simulation was carried out on the panel with a length ranging from 600 mm to 1200 mm in Ansys Workbench. The theoretical calculation of the maximum deflection of the panel was deduced. The accurate centroid position $y_p=10.334$ mm and its moment of inertia $I_{zp}=1.372 \times 10^{-8}$ m⁴ of the panel, as well as the maximum displacement deformation theory and the simulation values of the panels of different lengths were obtained. The theoretical calculation method for the bending deformation of the metal pallet panels is provided, which further confirms the durability and practicability of the metal pallet panel in logistics package. The study provides the basis for the discussion on the pallet's mechanical property and structural optimization.

KEY WORDS: panel; metal pallet; moment of inertia; finite element analysis; bending deformation

近年来,国内物流托盘使用量飞速增长。从国内托盘行业的发展情况来看,木托盘的增长速度在降低,其在托盘行业所占的比例在下降^[1-3],在国家绿色环保经济发展理念的大背景情况下,木托盘企业在物流包装行业将日趋减少。金属托盘当今被广泛应用于生产、运输、仓储和流通等领域,在现代物流中发挥着巨大的作用^[4-8]。

国内廖英杰等^[9]进行了均布载荷下木质托盘抗弯力学性能研究,同时提出了托盘提高弯曲强度和刚

度的方法。陈志强等^[10]基于 Ansys 的托盘弯曲承载特性分析及试验验证,得到了托盘数值模拟解与试验值,结果表明模拟解与试验值相对误差很小。汪恭平等^[11]进行了托盘工字梁结构优化设计,通过优化设计提升了托盘屈服强度。国外 Ungureanu 等^[12]提出了一种对冷型钢托盘架进行压缩的缺陷敏感性分析。Federico 等^[13]进行了工业梁柱节点的单调循环试验托盘架研究。Soury 等^[14]介绍了一种托盘创新的优化设计方法,得到了当托盘承受最大载荷时会产生最小

收稿日期: 2018-01-03

作者简介: 巩桂芬(1974—),女,陕西科技大学副教授,主要研究方向为运输包装和包装机械。

挠度。金属托盘可减少森林资源的利用,是木托盘良好的替代选择,其承载能力高于木托盘。金属托盘强度高、稳定性好、刚度高,比木塑托盘的使用寿命长且可靠性高,可减少由于托盘材料造成的环境污染,因此,对金属托盘进行力学特性研究具有实用价值。

1 金属面板的弯曲变形性能

1.1 面板横截面的形心位置

力学中研究的构件,其横截面是具有一定几何形状的平面图形,而构件的应力、变形与其横截面的形状及尺寸有关,因此这里建立金属托盘面板的弯曲变形模型,进行理论分析计算。通过 SolidWorks 软件进行金属托盘的面板建模,见图 1,由金属镀锌钢波纹型面板、“工”字型镀锌钢方管构成。

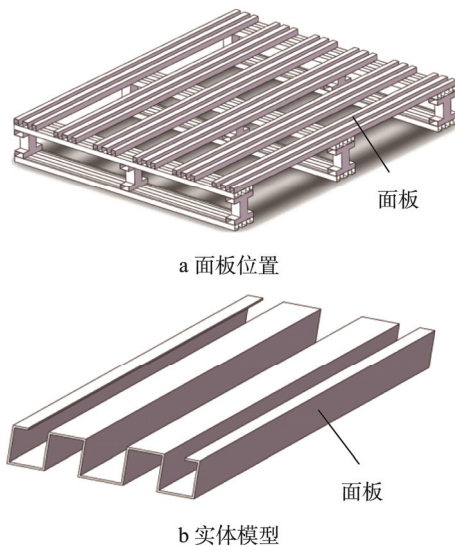


图 1 金属托盘的面板模型
Fig.1 The panel model of the metal pallet

为了进行面板弯曲变形力学分析,首先要求得到面板横截面的形心位置,其次才能得到惯性矩,推导计算模型。面板的横截面见图 2。

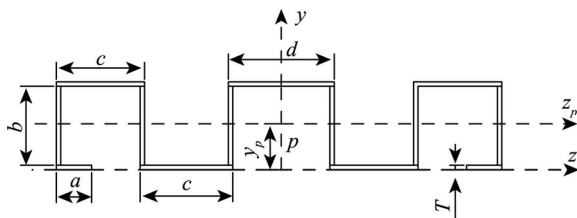


图 2 面板的横截面
Fig.2 The cross section of the panel

面板横截面关于 y 轴对称,形心 p 位置坐标在 y 轴上,且到 z 轴距离为 y_p 。 z_p 轴为中性轴, $a=8$ mm, $b=18$ mm, $c=20$ mm, $d=24$ mm, $T=1$ mm。

面板横截面形心位置的计算为:

$$y_p = \frac{\int_A y_0 dA}{A} \quad (1)$$

式中: A 为截面面积; y_0 为积分区域 y 轴坐标位置。

由于式 (1) 计算繁杂,结合面板横截面特点,全部是由 13 个矩形图形组合而成,故这里采用组合图形计算式:

$$y_p = \frac{\sum_{i=1}^{13} A_i y_{p_i}}{\sum_{i=1}^{13} A_i}$$

即

$$y_p = \frac{2aT \frac{T}{2} + 6bT(T + \frac{b}{2}) + 2cT(T + b + \frac{T}{2})}{2aT + 6bT + 4cT + dT} + \frac{2cT \frac{T}{2} + dT(T + b + \frac{T}{2})}{2aT + 6bT + 4cT + dT} \quad (2)$$

式中: A_i 为面板截面中矩形面积; y_{p_i} 为面板截面中矩形的形心在 y 轴的坐标位置。将 a, b, c, d, T 代入式 (2) 中,得到 $y_p=10.334$ mm。

1.2 面板横截面的惯性矩及面板最大变形

经过上述讨论,确定了面板横截面的形心 y 轴的坐标位置,下面讨论计算面板横截面的惯性矩。结合力学平面图形几何性质中的平行移轴公式:

$$I_{zp} = I_{z_{p_i}} + n^2 A_i$$

即

$$I_{zp} = 2 \left[\frac{aT^3}{12} + aT(y_p - \frac{T}{2})^2 \right] + 6 \left[\frac{Tb^3}{12} + bT(y_p - \frac{b}{2} - T)^2 \right] + 2 \left[\frac{cT^3}{12} + cT(1.5T + b - y_p)^2 \right] + 2 \left[\frac{cT^3}{12} + cT(y_p - \frac{T}{2})^2 \right] + \left[\frac{dT^3}{12} + dT(1.5T + b - y_p)^2 \right] \quad (3)$$

式中: A_i 为面板截面中矩形面积; $I_{z_{p_i}}$ 为面板截面中矩形的惯性矩; I_{zp} 为面板截面的惯性矩; n 为面板截面中矩形形心到 z_p 轴距离。

将 a, b, c, d, T, y_p 代入式 (3) 中,得到 $I_{zp}=1.372 \times 10^{-8}$ m⁴。

由材料力学知识及 GB/T 4996—2014《联运通用平托盘试验方法》^[15]中又举试验要求,以及面板在金属托盘的使用工况,将金属托盘面板简化为连续梁模型,见图 3。

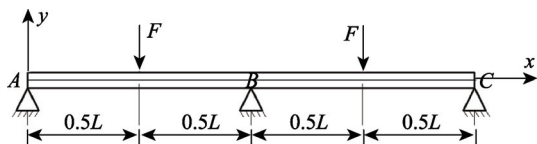


图3 面板的力学模型

Fig.3 The mechanical model of the panel

最大变形位移为：

$$|y_{\max}| = \frac{FL^3}{48EI_{zp}} \quad (4)$$

式中： L 为面板长度； F 为加载力； E 为镀锌钢板材料的弹性模量。

2 面板的静力学有限元分析

首先在 SolidWorks 16.0 中建模以 parasolid.x-t 格式文件导入 Workbench 16.0 中。为了尽可能使面板弯曲变形力学分析接近实际工况，统一施加 F 为 4.9 kN，且 A 、 B 、 C 这 3 处约束为位移约束。面板模型网格划分采用六面体单元 (solid 186)，面板在网格划分时，网格尺寸设置为 0.5 mm，Relevance center 设置为 fine，Relevance 设置为 100。面板的镀锌钢材弹性模量 E 为 209 GPa，泊松比 μ 为 0.3，密度 ρ 为 7850 kg/m³。在 Workbench 中对面板的位移变形仿真结果见图 4。

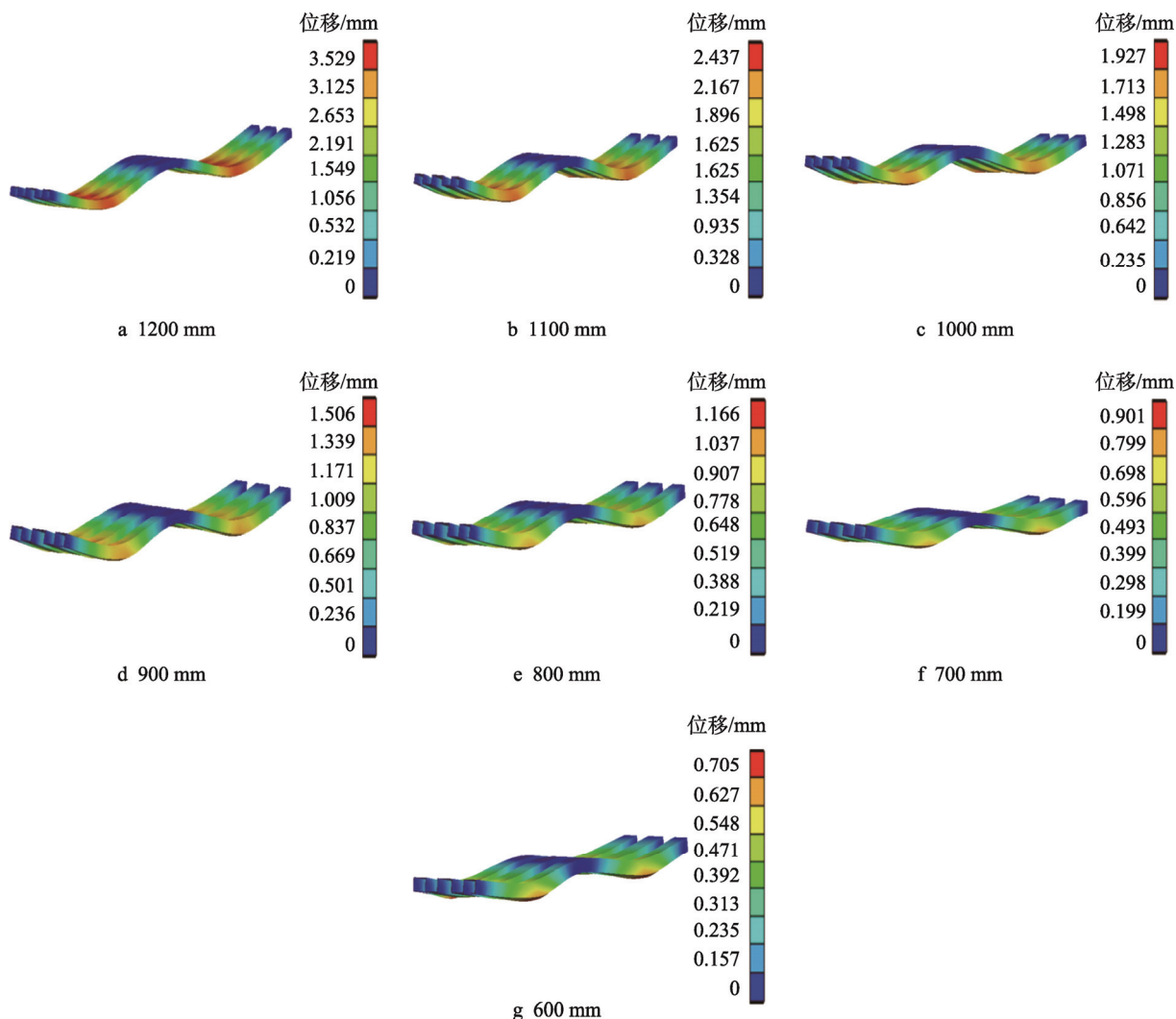


图4 面板长度不同时的位移云图

Fig.4 Displacement nephogram when panel has different lengths

3 面板的仿真与理论计算结果分析

当面板上表面施加载荷 4.9 kN 时，不同长度面板的弯曲变形最大位移变化见图 5。面板较短时，仿真结果比理论计算结果略高，式 (4) 误差较大，从工程的刚度问题来讲，较短的面板刚度较高、柔度较

小。面板较长时，仿真结果与理论计算结果数值的差值减小，实际情况更接近细长梁的挠度方程，即式 (4)，较长的面板刚度较低、柔度较大。进行面板有限元分析时，面板接触部位采用网格加密控制面板网格单元划分精细程度，网格较大或较小时，仿真求解结果易发散，最终仿真结果数值与理论结果会有一定

误差。从总体变化趋势来看,金属托盘面板弯曲变形理论计算与仿真结果接近,可进一步验证仿真计算的可靠性。

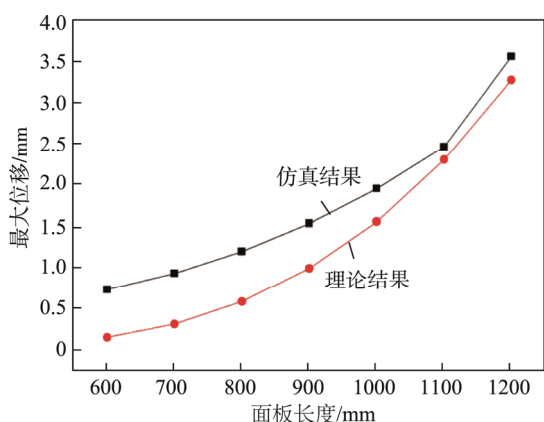


图5 面板的最大位移

Fig.5 Maximum displacement of the panel

4 结语

通过对金属托盘的面板弯曲变形力学性能进行研究及其静力学弯曲变形仿真分析,得到以下主要结论:对波纹型金属面板的截面形心位置进行理论计算,得到其形心精确位置 $y_p=10.334\text{ mm}$;对波纹型金属面板的截面惯性矩进行理论计算,结合力学平面图形几何性质中的平行移轴公式,推导出了其截面惯性矩 $I_{zp}=1.372\times 10^{-8}\text{ m}^4$,且同时计算了不同长度面板的最大位移弯曲变形;对波纹型金属面板进行了静力学弯曲变形仿真分析,最后对比分析了理论计算与仿真计算,为今后研究金属托盘的力学性能提供一定的依据。

参考文献:

- [1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.
PENG Guo-xun. Design of Transportation Packaging [M]. Beijing: Graphic Communication Press, 2012.
- [2] 杨世军, 杨学春. 木托盘的发展前景及存在的问题研究[J]. 森林工程, 2013, 29(2): 135—138.
YANG Shi-jun, YANG Xue-chun. Research on the Development Prospect and Existing Problems of Wooden Pallets[J]. Forest Engineering, 2013, 29(2): 135—138.
- [3] 丁毅, 苏杰. 基于 ANSYS Workbench 的轻质托盘承载性能分析[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(2): 67—69.
DING Yi, SU Jie. Analysis of Bearing Performance of Light Pallet Based on ANSYS Workbench[J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(2): 67—69.
- [4] 黎红. 循环经济下物流企业托盘使用问题浅探[J]. 现代物流, 2008, 26(4): 34—36.
LI Hong. Discussion on the Use of Pallet for Logistics Enterprises under Circular Economy[J]. Modern Logistics, 2008, 26(4): 34—36.
- [5] 李志强, 晏立熊. 网箱托盘静动态力学性能的有限元分析[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 17—21.
LI Zhi-qiang, YAN Li-xiong. Finite Element Analysis of Static and Dynamic Mechanical Properties of Trays[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 17—21.
- [6] 刘锋枫. 木质托盘弯曲承载特性与试验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
LIU Feng-feng. Test and Study on the Bending Bearing Characteristics of Wooden Pallets[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [7] 朱兆朋. 竹质通用平托盘制作工艺与力学性能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
ZHU Zhao-peng. Study on the Production Process and Mechanical Properties of the Universal Plain Tray[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014.
- [8] 易振. 塑木复合托盘力学性能分析[D]. 珠海: 暨南大学, 2009.
YI Zhen. Analysis of Mechanical Properties of Wood Plastic Composite Tray[D]. Zhuhai: Jinan University, 2009.
- [9] 廖英杰. 线性粘弹性塑料托盘的大挠度特性与变形协调研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
LIAO Ying-jie. Study on the Large Deflection and Deformation Coordination of a Linear Viscoelastic Plastic Tray[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [10] 陈志强. 轻型环保泡沫复合托盘力学性能研究[J]. 包装工程, 2017, 38(17): 118—123.
CHEN Zhi-qiang. Study on Mechanical Properties of Light Environmental Foam Compound Tray[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(17): 118—123.
- [11] 汪恭平. 木塑托盘工字梁结构优化设计[J]. 机械工程师, 2013, 29(2): 135—138.
WANG Gong-ping. Structure Optimization Design of Wood Plastic Tray[J]. Mechanical Engineer, 2013, 29(2): 135—138.
- [12] UNGUREANU V, MADEO A, ZAGARIKOITER G. Asymptotic Analysis of Thin-walled Cold-formed Steel Uprights Pallet Racks[J]. Structures, 2016, 10(8): 286—299.
- [13] FEDERICO G, GIOVANNI L, MAURIZIO O. Monotonic and Cyclic Tests on Beam-column Joints of Industrial[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 140(10): 92—107.
- [14] SOURY E, BEHRAVESH A H. Design, Optimization and Manufacturing of Wood-plastic Composite Pallet[J]. Materials and Design, 2009, 30(10): 4183—4191.
- [15] GB/T 4996—2014, 联运通用平托盘试验方法[S].
GB/T 4996—2014, Test Method of Universal Plain Tray[S].