

木托盘受力性能理论分析及有限元模拟

曹菲

(天津职业大学, 天津 300410)

摘要: **目的** 对木托盘静载堆码时的力学性能进行理论分析和有限元模拟。**方法** 建立木托盘顶铺板和纵梁板的力学模型, 通过理论计算获得选用松木和杨木 LVL 2 种不同材料时的最大应力和最大挠度; 按国家标准建立木托盘有限元模型, 进行网格划分、施加载荷和约束后, 获得选用松木和杨木 LVL 2 种不同材料时的最大等效应力值和最大变形量, 并与理论分析结果进行对比。**结果** 理论分析和有限元分析结果规律一致, 最大应力均出现在中间纵梁板上, 最大变形均发生在顶铺板上, 且数值差距较小, 2 种分析方法均合理可行。**结论** 该研究为木托盘的性能分析提供了有效的方法。

关键词: 木托盘; 受力分析; 有限元分析; 应力; 挠度

中图分类号: TB485.3; TB484.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)23-0050-05

Theoretical Analysis and Finite Element Simulation of Mechanical Property for Wooden Pallet

CAO Fei

(Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China)

ABSTRACT: The work aims to carry out theoretical analysis and finite element simulation on mechanical property for wood pallet at stacking under static load. The mechanical model of top planking and stringer plate of wooden pallet were established, and the maximum stress and maximum deflection of two different materials (pine and cottonwood LVL) selected were obtained by theoretical calculations. After the finite element model of wooden pallet was established according to national standards, and then mesh was divided, load was applied and constrained. The maximum equivalent stress and maximum deformation of two different materials (pine and cottonwood LVL) selected were obtained. The differences between theoretical calculation and simulation results were compared and analyzed. The regularity of theoretical analysis and finite element analysis was in consistency with each other. The maximum stress occurred on the middle stringer plate and the maximum deformation occurred on the top planking. The gap of theoretical analysis and finite element analysis was smaller. These two methods were feasible. The study provides an effective method for the property analysis of wooden pallets.

KEY WORDS: wooden pallet; force analysis; finite element analysis; stress; deflection

托盘是商品流通中最基本的集装单元, 应用极为广泛。目前我国现有托盘的总数量在一亿个以上, 其中木质托盘约占 90%。一直以来, 木质托盘存在设计理论不完善、基础参数较缺乏等问题, 导致木质托盘设计不合理, 造成托盘材料浪费或强度不够。

木托盘的承载能力决定了包装货物的受保护程度, 其抗弯力学性能是承载能力的重要体现。

国内外许多学者在托盘设计、受力分析以及有限元法的应用等方面开展了积极探索。Lim^[1]利用有限元法对托盘的静态变形进行了研究; Ratnam^[2]

收稿日期: 2016-07-18

作者简介: 曹菲 (1980—), 女, 内蒙古包头人, 硕士, 天津职业大学讲师, 主要研究方向为食品包装材料与技术。

利用有限元法对托盘三维变形进行了研究; Masood^[3]利用有限元法进行了托盘设计; Hicks^[4]基于有限元方法研究了包装系统仿真; 何为宏^[5]对木质托盘铺板进行了受力分析与设计; 刘锋枫^[6]研究了均布载荷下木质托盘抗弯力学性能; 朱兆明^[7]研究了竹制通用平托盘的制作工艺与力学性能; 魏占国^[8]研究了木塑托盘力学性能的测试方法。这些研究为托盘的理论分析奠定了基础。为进一步分析托盘的力学性能, 很多研究人员对其开展了有限元分析。马卫静^[9]利用 Ansys 分析了托盘板材在静态承重与叉车叉起时的力学性能; 王艳菊^[10]利用 Ansys 分析了托盘弯曲承载特性, 并进行试验验证; 丁毅^[11]利用 Ansys Workbench 分析了轻质托盘承载性能; 邱鹏飞^[12]利用 Ansys 分析了大型机电产品包装箱力学性能; 李杨^[13]利用 SolidWorks 对托盘结构进行了有限元分析及优化设计。这些研究有效促进了有限元仿真技术在托盘设计中的应用。上述研究多侧重于理论分析、实验研究或有限元分析, 没有将其结合在一起进行对比分析。文中以松木和杨木 LVL (Laminated Veneer Lumber, 单板层级材) 2 种不同材料的木托盘为研究对象, 通过理论推导和 Ansys Workbench 有限元软件对木托盘在受载情况下的应力和变形情况进行对比分析, 为其设计和应用提供理论依据。

1 理论分析

1.1 木托盘结构

木托盘结构见图 1, 顶铺板、纵梁板、底铺板是木托盘的重要组成部分。通常情况下, 托盘的承载能力是以纵梁板的承载能力为衡量指标, 木托盘的挠度是以铺板的挠度为衡量指标。

文中的分析对象为单面使用四向进叉木托盘, 托盘尺寸为 GB/T 2934—2007^[14]所规定的 1200 mm×1000 mm, 顶铺板、纵梁板、底铺板均使用宽度 b 为 100 mm、厚度 d 为 18 mm 的板材。

1.2 力学模型

木托盘共有 7 条顶铺板, 每条顶铺板下有 3 条纵梁板。由于第 2, 3, 5, 6 根顶铺板的支撑面在纵梁板悬空位置, 纵梁板底部没有垫块, 因此这几条顶铺板易产生变形。取其中一条顶铺板进行分析,

顶铺板与纵梁板接触的部位可以简化为铰支座, 力学模型视为一次超静定梁, 见图 2。

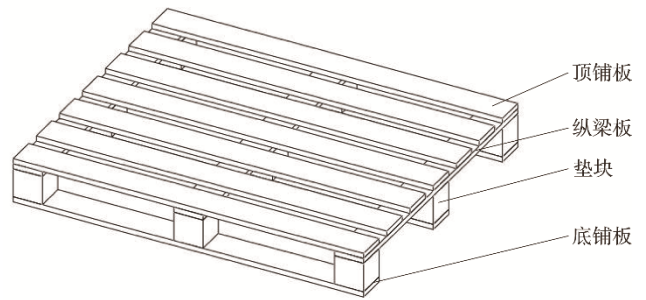


图 1 托盘结构
Fig.1 Pallet construction

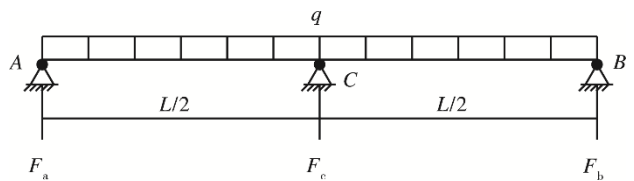


图 2 顶铺板受力情况
Fig.2 Stress of top planking

木托盘所受工况为 p 的堆码静载, 在分析计算时载荷均匀分布在木托盘顶铺板上, 每条顶铺板均匀承受 $p/7$ 的力。建立方程组解一次超静定梁的支座反力, 根据材料力学弯曲内力、弯曲应力和弯曲变形理论^[15], 有 $F_a = F_b$, $F_a + F_b + F_c = qL$, $\frac{F_c L^3}{48EI} - \frac{5qL^4}{384EI} = 0$, 则:

$$F_a = F_b = \frac{3}{16} qL \quad (1)$$

$$F_c = \frac{5}{8} qL \quad (2)$$

式中: $q = p/7L$, 为均布载荷; $L = 1200$ mm, 为顶铺板的长度, 即托盘的长度; E 为材料弹性模量; $I = bd^3/12$, 为截面惯性矩。

可知, 顶铺板在两纵梁板中间位置的弯矩最大, 即距离顶铺板一端 $L/4$ 处弯矩最大, 则该处的弯矩为顶铺板的最大弯矩 $M_{\max}$, 计算过程为:

$$M_{\max} = \frac{3}{16} qL \cdot \frac{1}{4} L - \frac{1}{2} q \left(\frac{L}{4} \right)^2 = \frac{1}{64} qL^2 \quad (3)$$

则其最大应力 $\sigma_{\max}$ 为:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} = \frac{3qL^2}{32bd^2} \quad (4)$$

式中: $W_z = bd^2/6$, 为抗弯截面系数; $b = 100$ mm, 为顶铺板的宽度; $d = 18$ mm, 为顶铺板的厚度。

将 CB 段的分布力和 B 点的反力简化到 C 点,

得到一等效集中力 $5qL/16$ 和力偶矩 $qL^2/32$, 根据变形叠加法^[15], 可得最大挠度 $w_{\max}$ 为:

$$w_{\max} = \frac{5q\left(\frac{L}{2}\right)^4}{484EI} - \frac{\left(\frac{qL^2}{32}\right)\left(\frac{L}{2}\right)^2}{16EI} = \frac{qL^4}{3072EI} \quad (5)$$

由式(1)—(2)可知, 3根纵梁板受力不均, 中间纵梁板承担 62.5% 的力, 两边的纵梁板加起来只承担了 37.5%, 因此中间纵梁板是木托盘危险部件。对中间纵梁板进行单独分析, 中间纵梁板与垫块的接触面简化为铰支座; 由于中间纵梁板承载了 7 条顶铺板, 所以中间纵梁板的载荷相当于 7 个集中载荷 p_1 , 中间纵梁板受力情况见图 3, 其中 F_d , F_e , F_f 为支座反力。

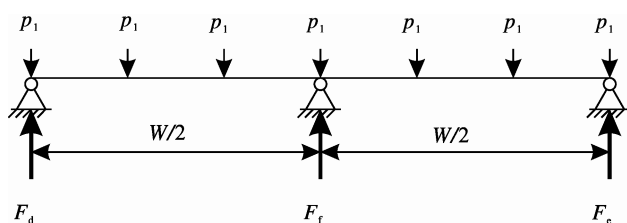


图3 中间纵梁板受力情况
Fig.3 Stress of middle stringer plate

中间纵梁板任意两支座最大弯矩为 $M_{\max1} = p_1 W/24$, 其中 $p_1 = 0.625p/7$, 为集中载荷, $W = 1000$ mm, 为纵梁板的长度, 即托盘的宽度。则其最大应力和最大挠度为:

$$\sigma_{\max1} = \frac{M_{\max1}}{W_z} = \frac{p_1 W}{4bd^2} \quad (6)$$

$$w_{\max1} = \frac{p_1}{6} \frac{W}{EI} \left[\frac{W}{3} \frac{W}{4} \left[\left(\frac{W}{4} \right)^2 - \left(\frac{W}{2} \right)^2 + \left(\frac{W}{3} \right)^2 \right] + \frac{W}{6} \frac{W}{4} \left[\left(\frac{W}{4} \right)^2 - \left(\frac{W}{2} \right)^2 + \left(\frac{W}{6} \right)^2 \right] - \frac{\left(p_1 W - F_e \frac{W}{2} \right) \left(\frac{W}{2} \right)^2}{16EI} \right] \quad (7)$$

1.3 模型求解

分别采用松木和杨木 LVL 2 种材料来进行对比分析, 由于只需考虑纵向的变形和应力, 所以只需取 2 种材料的纵向弹性模量^[12]。松木的弹性模量 E_1 为 9.17 GPa, 泊松比 λ_1 为 0.34; 杨木 LVL 的弹

性模量 E_2 为 7.72 GPa, 泊松比 λ_2 为 0.28。

根据托盘在实际流通过程中的工作压力, 设木托盘所受工况为堆码铺板强度试验额定载荷 2210 kg^[16], 且均匀分布在木托盘的顶铺板上, 由式(4)—(7)可得顶铺板和中间纵梁板的最大应力和最大挠度, 见表 1。由表 1 可以看出, 最大应力发生在中间纵梁板上, 为 13.50 MPa, 最大变形发生在顶铺板上, 松木和杨木 LVL 的最大挠度分别为 3.58, 4.25 mm。

表1 理论分析结果
Tab.1 Theoretical analysis results

结构部件	松木		杨木 LVL	
	最大应力 /MPa	最大挠度 /mm	最大应力 /MPa	最大挠度 /mm
顶铺板	9.72	3.58	9.72	4.25
中间纵梁板	13.50	1.73	13.50	2.05

2 有限元分析

2.1 木托盘建模与网格划分

利用三维软件 SolidWorks 建立单面使用四向进叉木托盘模型, 并将模型另存为 x_t 格式。在 Ansys Workbench 中创建“Static Structural”, 导入 x_t 格式的模型, 并将顶铺板与纵梁板之间、纵梁板与垫块之间、垫块与底铺板之间的接触设置为绑定接触。弹性模量和泊松比等模型材料参数与前述理论分析中的一致。网格划分采用 Hex Dominant (六面体主导) 的方法, 网格尺寸设置为 5 mm, 经生成网格得到 312 767 个单元、1 508 997 个节点, 托盘网格模型见图 4。

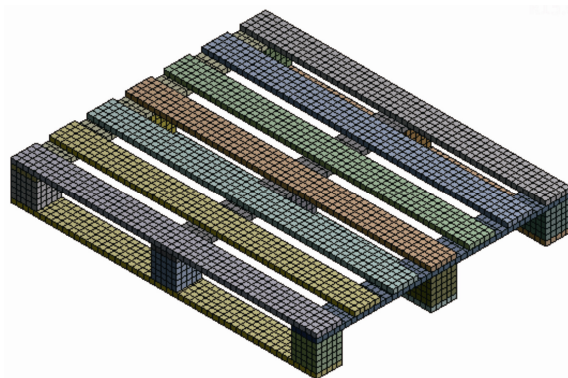


图4 托盘有限元网格模型
Fig.4 Finite element mesh model of pallet

2.2 施加载荷与约束

施加与理论分析相同的载荷，即木托盘堆码额定载荷 2210 kg,该研究的木托盘共有顶铺板 7 条，合计面积为 0.84 m²，则托盘所受压力为 25 783.3 Pa。在边界约束的处理上，底铺板所在底面设置为固定约束，顶铺板约束其在 z 方向的位移。

2.3 结果分析

分别对松木和杨木 LVL 的木托盘进行静态载荷分析，其等效力云图见图 5。中间纵梁板以及与顶铺板接触处有应力集中现象，最大应力均出现在此处，为 22.55 MPa。这一应力值均小于松木的屈服极限 61 MPa 和杨木 LVL 的屈服极限 56 MPa。2 种材料木托盘的变形云图见图 6，木托盘的最大变形发生在顶铺板中部，材料为松木和杨木 LVL 时的最大挠度分别为 2.91，3.48 mm。由图 5—6 可以看出，除了中间纵梁板和顶铺板接触处应力较大外，中间纵梁板的应力是最大的；而顶铺板的变形是最大的，主要是由于第 2，3，5，6 根顶铺板的支撑面在纵梁板中间位置，而纵梁板中间部分也有较大变形。

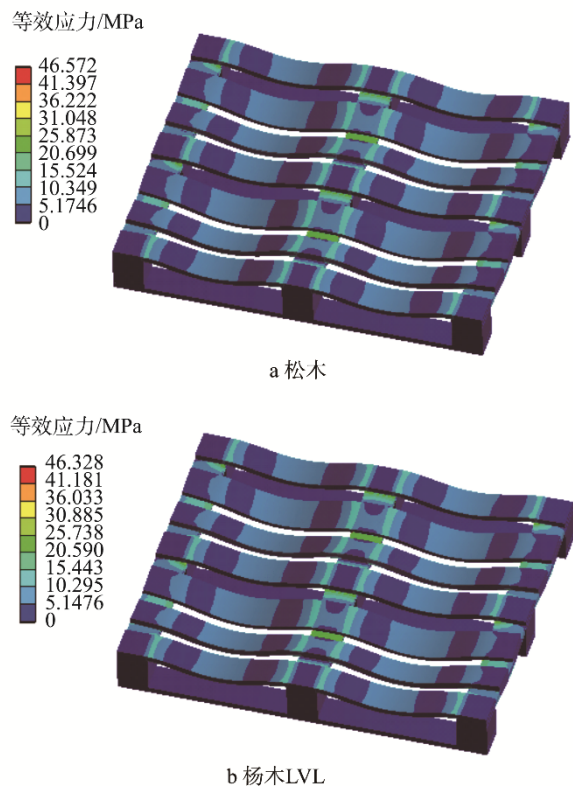


图 5 木托盘等效力云图
Fig.5 Equivalent stress nephogram of wooden pallet

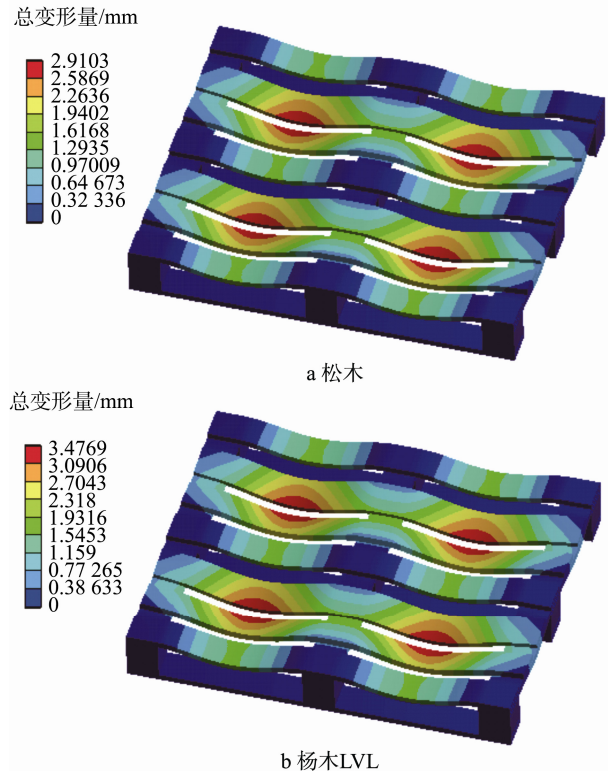


图 6 木托盘变形云图
Fig.6 Deformation nephogram of wooden pallet

有限元分析计算结果见表 2，可以看出 2 种材料中间纵梁板的最大应力和最大挠度与理论分析结果较为接近，总体规律和变化趋势是一致的，可见这 2 种分析方法是合理有效的。具体数据仍存在一些差异，这主要是由于理论分析时将顶铺板和中间纵梁板抽象为梁结构，在有限元分析时将木托盘各板接触面设置为绑定接触，以及对托盘材料设置为各向同性材料，从而造成了分析的误差。

表 2 有限元分析计算结果 Tab.2 Finite element analysis results				
结构部件	松木		杨木 LVL	
	最大应力 /MPa	最大挠度 /mm	最大应力 /MPa	最大挠度 /mm
顶铺板	10.05	2.91	10.05	3.48
中间纵梁板	15.55	1.45	15.55	1.74

3 结语

采用理论分析与有限元分析相结合的方法，研究选用松木和杨木 LVL 2 种不同材料时的单面使用四向进叉木托盘受力情况。通过理论分析得到顶铺板和中间纵梁板的最大应力和最大挠度；设定特定参数的有限元方法，更形象地得到各木托盘在静

态载荷工况下的应力云图和变形云图等,也可得到顶铺板和中间纵梁板的最大应力和最大挠度。经分析,不同材料托盘的最大应力均出现在中间纵梁板与顶铺板接触处,最大变形均发生在顶铺板中部。理论分析和有限元模拟规律一致,结果基本吻合,进一步验证了2种分析方法的可行性,为木托盘的性能分析提供了有效的方法。

参考文献:

- [1] LIM J H, RATNAM M M, ABDUL K H. An Experimental and Finite Element Analysis of the Static Deformation of Natural Fiber-reinforced Composite Beam[J]. Journal of Polymer Testing, 2003, 22(2): 169—177.
- [2] RATNAM M M, LIM J H, ABDUL K H. Study of Three-dimensional Deformation of a Pallet Using Phase-shift Shadow Moiré and Finite-element Analysis[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(1): 9—17.
- [3] MASOOD S H, 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.
- [4] HICKS B J, MULLINEUX G, SIRKETT D. A Finite Element-Based Approach for Whole-System Simulation of Packaging Systems for Their Improved Design and Operation[J]. Packaging Technology & Science, 2009, 22(4): 209—227.
- [5] 何为宏, 卢立新. 木质托盘铺板的受力分析与设计[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 70—72.
HE Wei-hong, LU Li-xin. Stress Analysis and Design of Wooden Pallet Plank[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 70—72.
- [6] 刘锋枫, 陆佳平. 均布载荷下木质托盘抗弯力学性能研究[J]. 包装工程, 2008, 29(3): 33—35.
LIU Feng-feng, LU Jia-ping. Study on the Anti-bending Mechanical Performance of Wooden Pallets under Uniformly Distributed Load[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 33—35.
- [7] 朱兆朋. 竹制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. The Study of Bamboo Material Pallet's Making Process and Mechanical Property[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014.
- [8] 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 Zhan-guo, WANG Zhong-wei, PANG Yan. Test Method for Mechanical Property of Wood Plastic Pallet[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 32(10): 116—122.
- [9] 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 Wei-jing, CHEN Man-ru, LI Qiang. Finite Element Analysis of "Tetra Pak" Plastic Wood Pallet[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(1): 76—79.
- [10] 王艳菊, 陆佳平. 基于Ansys的托盘弯曲承载特性分析及试验验证[J]. 包装工程, 2012, 33(17): 23—26.
WANG Yan-ju, LU Jia-ping. Ansys Based Analysis of Pallet Bending Performance and Its Experimental Verification[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 23—26.
- [11] 丁毅, 苏杰, 陈立民. 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, CHEN Li-min. Analysis of Load Bearing Properties for the Lightweight Pallet Based on Ansys Workbench[J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(2): 67—69.
- [12] 邱鹏飞. 大型机电产品包装箱力学性能仿真分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
QIU Peng-fei. Simulation Analysis of Mechanical Properties of Large Boxes of Electromechanical Products[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.
- [13] 李杨, 李光. 基于SolidWorks的托盘结构有限元分析及优化设计[J]. 包装工程, 2011, 32(19): 1—4.
LI Yang, LI Guang. Structural Finite Element Analysis and Optimum Design of Pallet Via SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 1—4.
- [14] GB/T 2934—2007, 联运通用平托盘: 主要尺寸及公差[S].
GB/T 2934—2007, General-purpose Flat Pallets for Through Transit of Goods: Principal Dimensions and Tolerances[S].
- [15] 秦飞. 材料力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
QIN Fei. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [16] GB/T 4995—2014, 联运通用平托盘: 性能要求和试验选择[S].
GB/T 4995—2014, General-purpose Flat Pallets for Through Transit of Goods: Performance Requirements and Selection of Tests[S].