

缓冲与隔振

木质平托盘抗冲击性能有限元分析及试验研究

唐英, 李阳, 凌鉴, 丁文东

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

摘要: **目的** 以木质平托盘为对象, 通过有限元仿真和试验分析影响木质平托盘抗冲击性能的主要因素。**方法** 用 SolidWorks 建立木质平托盘的 3D 模型, 利用 Abaqus 有限元软件, 以 GB/T 4996—2014 为依据进行角跌落试验仿真, 分析木质平托盘上木质构件以及托盘钉上产生的应力和位移。为了进行对比, 在实验室进行木质平托盘产品的角跌落试验, 观察木质平托盘的破坏形式, 并测量其对角线长度。**结果** 有限元仿真与实验室实物试验结果相吻合, 验证了有限元仿真分析的正确性和有效性。有限元仿真分析发现钉孔处木质构件和托盘钉产生应力集中并逐渐发生塑性变形, 且应力和变形数值随跌落次数的增加而增大, 仿真和试验均表明跌落侧纵梁向内侧凹陷且变形最为明显, 木质平托盘对角线变化量受跌落次数逐渐变大。**结论** 木质平托盘抗冲击性能随跌落次数的增加而下降。木质平托盘中木质构件、托盘钉的性能, 以及托盘钉紧固件与木质构件的连接强度是决定木质平托盘抗冲击性能的关键因素。

关键词: 木质平托盘; 抗冲击性能; 有限元仿真; 试验分析

中图分类号: U294.27⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)13-0124-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.016

Finite Element Analysis and Experimental Study on the Performance of Resistance to Impact of Wooden Flat Pallets

TANG Ying, LI Yang, LING Jian, DING Wen-dong

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the main factors affecting the performance of resistance to impact of wooden flat pallet by finite element simulation and test with wooden flat pallet as the object. The Solidworks software was used to build the 3D model of a wooden flat pallet. Then the ABAQUS finite element software was used to simulate the corner drop testing process of the flat pallet according to national standard GB/T 4996-2014. The stress and strain occurring on the wooden components and the pallet nails of the flat pallet were obtained. For comparison, corner drop tests of the wooden flat pallet product were also carried out in the laboratory. During the test, the length of diagonal was measured and the damage was checked. It was observed that the measured results obtained in the finite element simulation and in the experimental tests were identical. The correctness and validity of the finite element simulation analysis was thus verified. The finite element simulation analysis showed that the wooden components and pallet nail at the nail hole produced stress concentration and gradually plastic deformation, and the stress and deformation values increased with the increase of drop times. Both simulation and test showed that the longitudinal beam on the falling side sagged inward and the deformation was the most obvious, and the change amount of the flat pallet diagonal was gradually increased with drop times. The impact resistance of wooden flat pallets decreases with drop times. Properties of wooden components, pallet

收稿日期: 2021-09-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1712902)

作者简介: 唐英 (1968—), 女, 博士后, 北京科技大学副教授, 主要研究方向为物流工程及物流标准化。

nails and the joint strength between wooden components and pallet nails are the important factors determining the performance of resistance to impact of wooden flat pallets.

KEY WORDS: wooden flat pallet; resistance to impact; finite element simulation; test analysis

木质平托盘作为大宗的消耗品,越来越多的企业出于降低平托盘全生命周期成本的考虑,注重托盘使用寿命问题。平托盘在装卸、运输、码垛过程中常因磕碰、撞击和跌落等产生过度变形、裂纹甚至损坏^[1]。提高平托盘的抗冲击性能可延长其使用寿命。

GB/T 4995—2014《联运通用平托盘 性能要求和试验选择》规定的耐久性试验项目中,试验 9 的角跌落试验为唯一必做的试验项目,用于鉴定托盘的抗冲击性能^[2]。GB/T 4996—2014《联运通用平托盘 试验方法》规定了角跌落试验步骤,要求观察和记录撞击点处托盘变形和损伤情况^[3]。研究者们依据国标进行各式托盘冲击性能的研究。例如,赵钊等^[4]进行了不同高度的纸浆模塑托盘角跌落试验,得到了托盘在多次跌落后,因跌落角木材被压实变形量会逐步减小的结论。王久龙^[5]在研究 2 种不同结构平托盘的角跌落试验中,通过试验对比发现结构对托盘加速度(g 值)影响很大。李志强等^[6]研究某款网箱托盘的跌落性能中,通过对比底面跌落与底棱跌落找到该托盘的薄弱点,并提出改进意见。邢碧莹^[7]在竹木复合标准平托盘力学性能的研究中,采用试验方法发现侧压单层板结构竹材托盘抗冲击性能优于平压纵横三层板结构竹材托盘。

木质平托盘(后文简称托盘)由铺板、纵梁、纵梁板和垫块等木质构件通过托盘钉组装而成。依据 GB/T 4995—2014 和 GB/T 4996—2014 的规定进行角跌落试验,只能观察和记录撞击点处托盘外部的变形和损伤,却无法了解内部托盘钉的变形和损伤情况。目前采用有限元仿真技术的研究中,出于计算效率的考虑,一般省略托盘钉仅对木质构件设置绑定接触关系^[8-11]或只添加局部托盘钉^[12]建立简化模型,对简化模型做有限元仿真能够分析托盘整体的应力应变,但无法掌握托盘钉的应力应变及其在托盘抗冲击性能中的作用。

为此,文中研究托盘的冲击性能,构建的托盘 3D 模型中反映了木质构件间通过托盘钉连接的结构工艺特点。通过有限元仿真进行分析,全面研究托盘木质构件和托盘钉在角跌落试验过程中应力和位移的变化规律。利用托盘产品在实验室进行实物验证试验,验证了有限元仿真分析的正确性和有效性。

1 木质平托盘冲击过程理论分析

冲击过程实质上是一种瞬态的能量转化过程。托盘在与地面发生跌落冲击后,其内部材料根据自身的弹塑性变形来吸收冲击能量,由托盘的弹塑性变形程

度来反映其抗冲击性能的优劣。托盘跌落冲击时,在不计空气阻力及其他摩擦力的理想状态下,将其势能全部转换为弹塑性变形能量来考虑。

Abaqus 有限元软件可以计算复杂的非线性动力学问题,跌落冲击属于典型的显示动力学问题,采用中心差分法求解有限元方程^[13],用当前增量步的动力学条件来计算下一个增量。如图 1 所示单自由度体系,其中 m 为系统质量, c 为系统阻尼, k 为系统刚度。

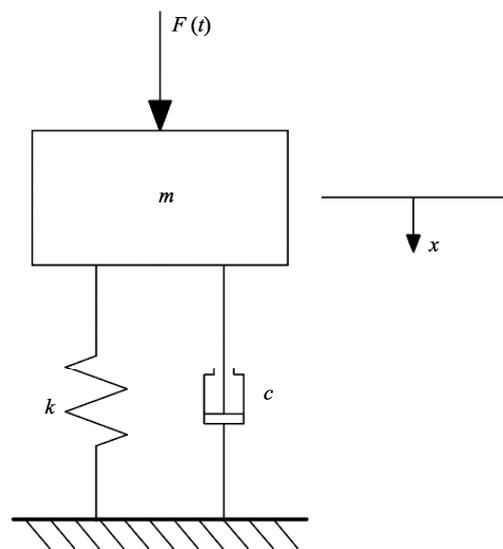


图 1 单自由度力学模型

Fig.1 Single-degree-of-freedom mechanical model

动力学求解托盘动力学响应的基本运动方程见式(1)。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 分别为节点的加速度矢量、速度矢量、位移矢量; $F(t)$ 为施加的载荷矢量。在给定任意时间 t , 此方程对考虑了惯性力和阻尼力的模型均适用。

2 木质平托盘有限元模型建立

2.1 三维模型建立

托盘主要在快消品领域用于零售场所商品陈列销售、仓储和带托运输^[14]。该托盘的外形尺寸为 $800 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 166 \text{ mm}$, 由顶铺板、纵梁板、纵梁和底铺板构成, 通过 90 颗托盘钉连接紧固组装而成。各木质构件主要参数见表 1, 托盘产品见图 2, 它的 3D 模型见图 3。

表 1 托盘木质构件参数
Tab.1 Wooden component parameters of pallet

名称	数量	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm
顶铺板	7	600	100	22
纵梁板	3	800	78	22
纵梁	3	600	100	45
底铺板	3	800	78	22



图 2 托盘产品
Fig.2 Pallet product

2.2 材料参数定义

顶铺板、底铺板、纵梁板和纵梁的材料选择花旗松。花旗松不仅具有较高的弹性模量，而且其弯曲纤维应力、顺纹拉力、横纹剪力亦都极其良好，是制作托盘的常用材料^[15]。托盘钉选择优质碳素结构钢制成的环纹钉，共有 3 种规格：连接底铺板与纵梁的环纹钉 2.87 (P) × 63.5 (HW)；连接顶铺板与纵梁板的环纹钉 2.87 (P) × 44 (HW)；连接顶铺板、纵梁板和纵梁之间的环纹钉 3.05 (P) × 76.2 (HW)。P 代表圆头帽钉规格，HW 代表环纹形杆。

花旗松具有显著的各向异性，沿树干方向为纵向 (x)，沿年轮方向为弦向 (y)，沿树干半径方向为径

向 (z)，即顺纹方向为纵向，横纹方向包括弦向和径向，在不同方向上材料的力学性能也不同^[16]。木材的应力-应变关系一般由屈服点和细胞壁压密化临界应变点划分为弹性载荷、塑性屈服和密实化等 3 个不同阶段^[17-19]，见图 4。在 Abaqus 软件中采用工程常数法定义花旗松的弹性阶段，其密度为 590 kg/m³，弹性模量 $E_x=16\ 400\ \text{MPa}$ 、 $E_y=900\ \text{MPa}$ 、 $E_z=1\ 300\ \text{MPa}$ ，泊松比 $\sigma_{xy}=0.37$ 、 $\sigma_{yz}=0.63$ 、 $\sigma_{zx}=0.42$ ，剪切弹性模量 $G_{xy}=1\ 180\ \text{MPa}$ 、 $G_{yz}=79\ \text{MPa}$ 、 $G_{xz}=910\ \text{MPa}$ ，顺纹屈服应力为 32 MPa，横纹屈服应力为 3.24 MPa，塑性屈服阶段的应力-应变关系见表 2^[20-21]，密实化阶段根据塑性阶段多线性的曲率来近似拟合，即可完整定义花旗松的材料参数。

表 2 花旗松的应力与塑性应变
Tab.2 Stress and plastic strain of douglas fir

顺纹方向		横纹方向	
应力/MPa	塑性应变/mm	应力/MPa	塑性应变/mm
32	0	3.24	0
33	0.000 3	3.50	0.000 3
34	0.000 7	3.55	0.000 5
35	0.000 8	3.60	0.000 8
36	0.001 8	3.69	0.001 7

将结构钢定义为各向同性的理想弹塑性材料，应力-应变特性曲线见图 5，其中 c 点为屈服点，当受到的应力小于其屈服强度时，材料发生弹性变形，这一阶段变形是可逆的，若超过它的屈服强度后仍继续加压，材料会发生不可逆的塑性变形。钢材的密度选择 7 850 kg/m³，弹性模量选择 210 GPa，泊松比选择 0.3，屈服强度选择标准值 235 MPa。结构钢真实应力与塑性应变^[22]的关系见表 3，即可完整定义结构钢的材料参数。

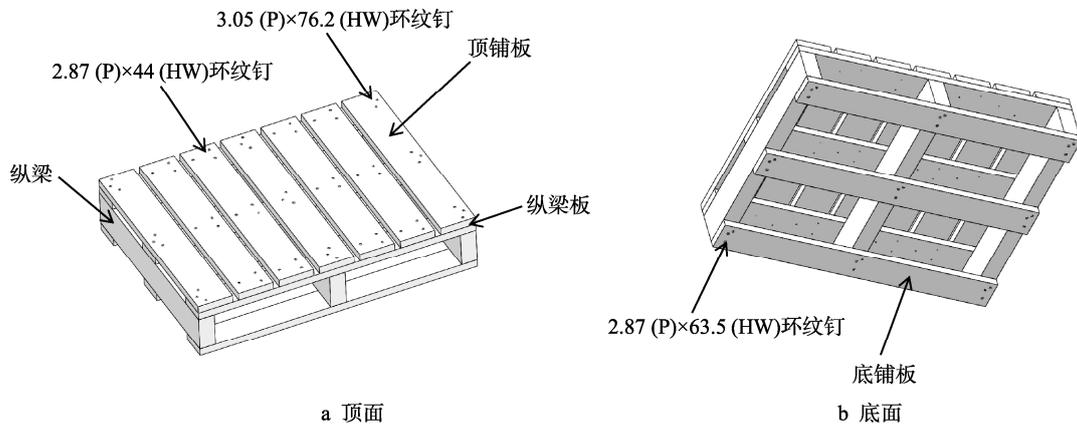


图 3 托盘 3D 模型
Fig.3 3D model of the pallet

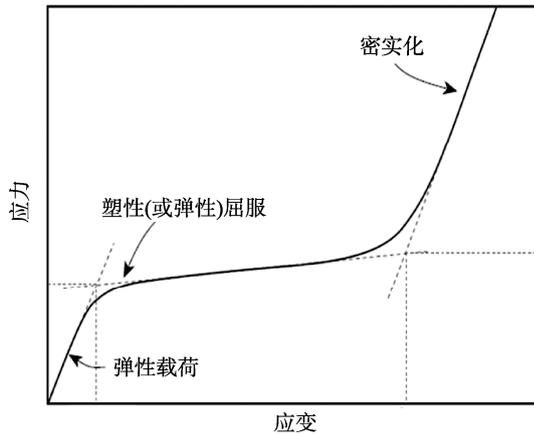


图 4 花旗松的应力-应变特性曲线
Fig.4 Stress-strain characteristic curve of douglas fir

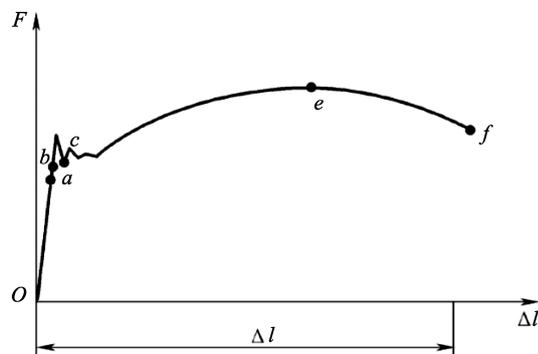


图 5 结构钢的应力-应变特性曲线
Fig.5 Stress-strain characteristic curve of structural steel

表 3 结构钢的应力与塑性应变
Tab.3 Stress and plastic strain of structural steel

应力/MPa	塑性应变/mm
235	0
300	0.038
350	0.072
400	0.146
500	0.172

2.3 接触设置及网格划分

木质构件通过托盘钉进行连接紧固, 在托盘钉钉入木材的过程中周围的木材纤维受到挤压或被局部切断, 木材纤维被分开的部分对钉的侧面形成了压力^[23], 当托盘钉从木材中拔出时产生对钉侧面作用的摩擦力, 即握钉力。文中基于 SolidWorks 建立有限元仿真模型, 为了方便网格划分和减少计算时间, 将螺纹钉的侧面设置为光滑面, 螺纹钉钉尖的作用是易于钉进木材内部, 在 3D 建模中可直接进行装配, 为使螺纹钉侧面受到均匀的握钉力, 故将钉尖筒

化成平头。通过设置摩擦因数产生的摩擦力代替实际的握钉力, 接触构件的具体参数见表 4。考虑托盘内含有 90 颗托盘钉, 为提高网格质量, 采用六面体为主、四面体为辅的网格划分方法。设置网格尺寸, 木质构件的网格尺寸为 18 mm, 托盘钉的网格尺寸为 5 mm。

表 4 接触构件的具体参数
Tab.4 Specific parameters of contact members

接触构件	接触类型	静摩擦因数	动摩擦因数
木质构件与木质构件	摩擦	0.5	0.2
木质构件与托盘钉	摩擦	0.53	0.2

3 托盘角跌落试验有限元仿真及试验结果分析

3.1 托盘角跌落试验的试验步骤及要求

如图 6 所示, GB/T 4996—2014 规定的托盘角跌落试验的试验步骤为: 将托盘沿对角线吊起至离地面 0.5 m 的高度, 待稳定后, 松开托盘使它做自由落体运动, 撞击在平滑、坚硬的钢板上。对托盘一角进行 3 次跌落, 每进行 1 次都利用直尺记录托盘 A 和 B 2 点对角线长度的变化量。GB/T 4995—2014 要求跌落 3 次以后, 如果对角线长度变化量不超过对角线长度的 4%, 则认为无影响托盘性能或功能的损坏。

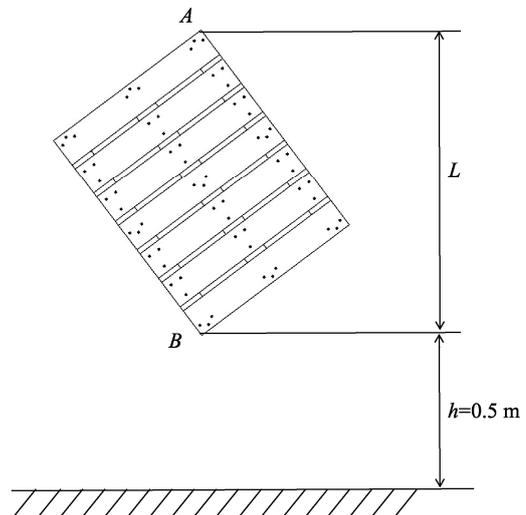


图 6 角跌落试验原理
Fig.6 Schematic diagram of corner drop test

3.2 托盘角跌落仿真分析

3.2.1 初始化设置

SolidWorks 构建的托盘 3D 模型保存为 x-t 格式, 导入 Abaqus 中, 赋予各构件材料参数、指派材料方向、接触关系、初速度和重力, 设地面为完全固定的

刚体,分析步时长为 1×10^{-4} s,共 20 帧,网格划分后的模型见图 7,新建 Job 求解计算。角跌落试验为动态冲击试验,托盘的初始位置距撞击点距离为 0.5 m,为了缩短仿真计算时间,仅仿真托盘在撞击地面之后的应力和应变情况,根据能量守恒定律可计算出托盘从初始位置自由落体至撞击点时所获得的瞬时速度,见式(2)

$$mgh = \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (2)$$

式中: v_1 为跌落物接触地面时瞬时冲击速度, m/s; m 为跌落物质量, kg; h 为跌落高度, m; g 为重力加速度, m/s^2 。托盘至撞击点瞬时速度为 3.13 m/s。

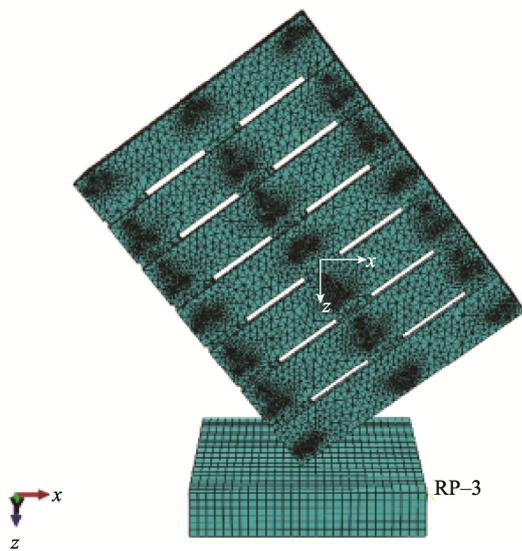


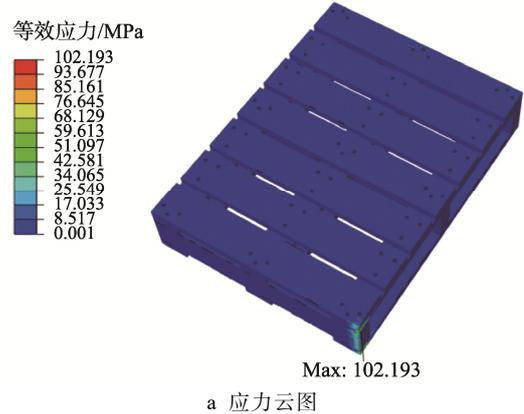
图 7 角跌落模型有限元网格划分

Fig.7 Meshing of finite element model of corner drop test

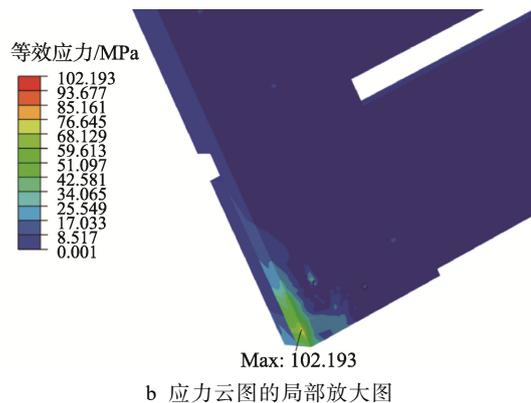
3.2.2 第 1 次角跌落过程有限元分析

提取第 1 次角跌落过程中木质构件应力最大时刻应力和位移云图,见图 8。由图 8a 可知,木质构件跌落棱边处出现应力集中,最大应力为 102.2 MPa。最大应力单元出现在撞击棱边用于紧固顶铺板与纵梁的托盘钉孔处木材上,局部放大图见图 8b,该单元最大应力沿木质构件顺纹方向和横纹方向的分量分别为 81.8 MPa 和 61.3 MPa,均大于花旗松的顺纹屈服应力和横纹屈服应力,并产生塑性变形,也导致钉孔处木材密实化。由托盘的相对运动来看,位移云图上位移最小的部位恰恰反映的是托盘变形最大的部位。由图 8c 可知动态跌落过程中局部的、微小的塑性变形主要发生于应力集中区域。由图 8d 可知,木质构件最大变形位置出现在托盘纵梁靠近纵梁板一侧的跌落棱边上,经 Abaqus 测量后,纵梁与纵梁板之间产生了向横纹方向上的错位,错位量为 0.07 mm。

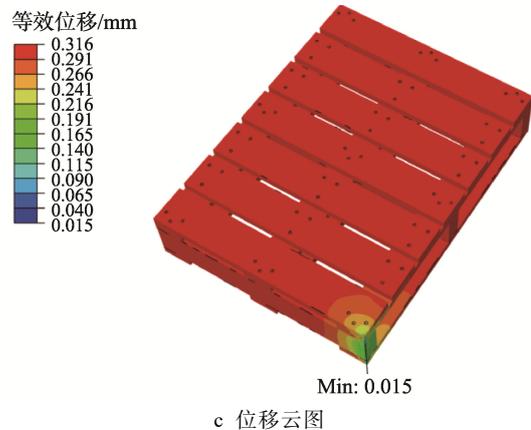
提取第 1 次角跌落过程中托盘钉应力最大时刻的应力和位移云图,见图 9(图中钉帽朝向左下方的



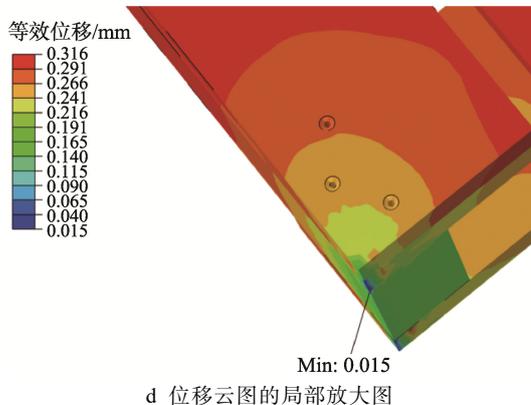
a 应力云图



b 应力云图的局部放大图



c 位移云图



d 位移云图的局部放大图

图 8 第 1 次角跌落过程木质构件应力最大时刻的应力与位移云图

Fig.8 Stress nephogram and displacement nephogram at the moment of maximum stress occurring of wooden components during the first corner drop test

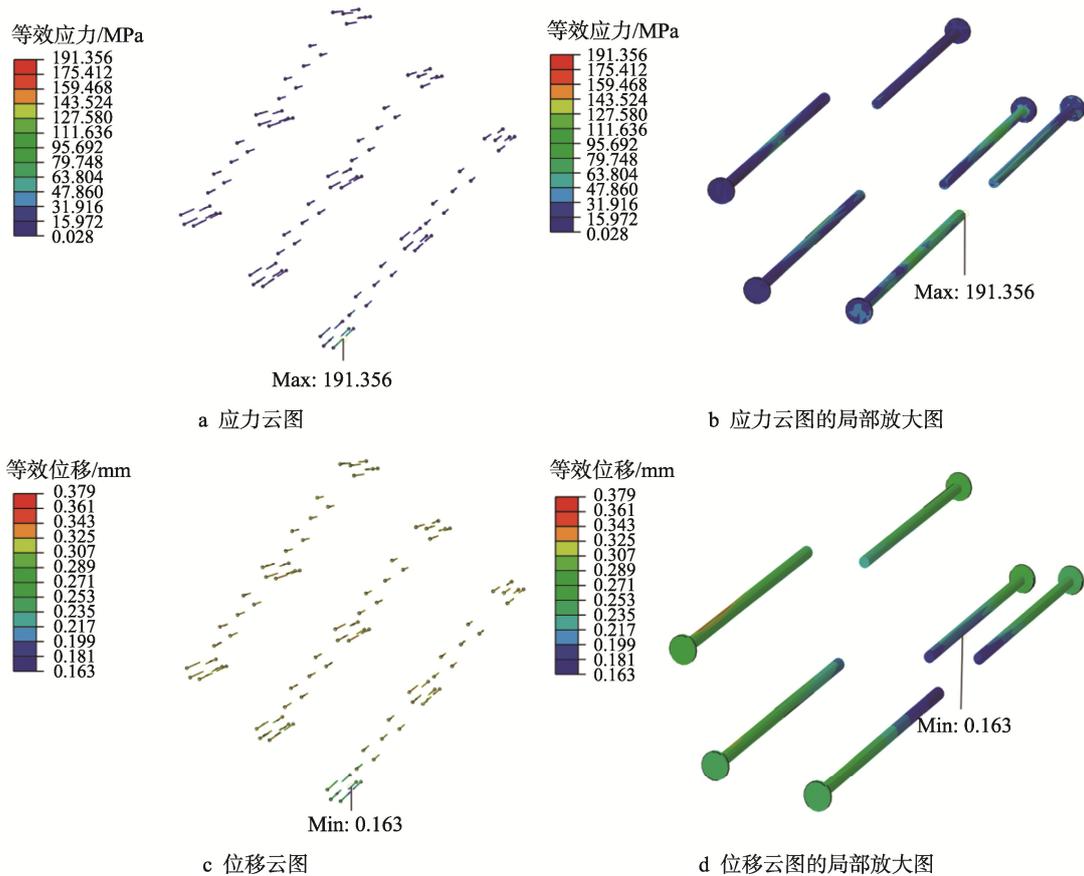


图 9 第 1 次角跌落过程托盘钉应力最大时刻的应力与位移云图

Fig.9 Stress nephogram and displacement nephogram at the moment of maximum stress occurring of pallet nails during the first corner drop test

托盘钉位于顶铺板一侧, 钉帽朝向右上方的托盘钉位于底铺板一侧)。发现仅在跌落棱边附近的托盘钉受到跌落冲击的影响较大, 局部放大该区域 6 颗托盘钉的应力和位移云图, 由图 9b 可知, 托盘钉最大应力出现在跌落棱边用于紧固顶铺板与纵梁的托盘钉上, 数值为 191.4 MPa, 小于托盘钉屈服强度。这说明在第 1 次跌落中, 顶铺板和纵梁受到的冲击力最大, 托盘钉承受的冲击力也最大, 结合图 9b 和图 9d 可知, 顶铺板一侧的托盘钉变形程度大于另一侧, 这与应力分析结果一致。托盘钉钉身上承受的应力大小不同, 产生的弹性变形程度也不同, 这是由于钉孔处木材不同程度的塑性变形会挤压托盘钉, 导致钉孔原本的形状被破坏, 进而使得托盘钉与钉孔间出现缝隙, 造成握钉力下降。

托盘在跌落过程中对角线的位移变化曲线见图 10。该位移变化曲线波折上升, 反映出冲击力从撞击点向周边逐渐传播的过程中, 波及的托盘钉及钉孔周边的木材在冲击力的作用下具有塑性变形与弹性恢复并存的现象, 但在跌落过程中塑性变形总体上是逐渐累积的。经测量可得, 第 1 次角跌落导致托盘对角线长度缩短了 0.13 mm。

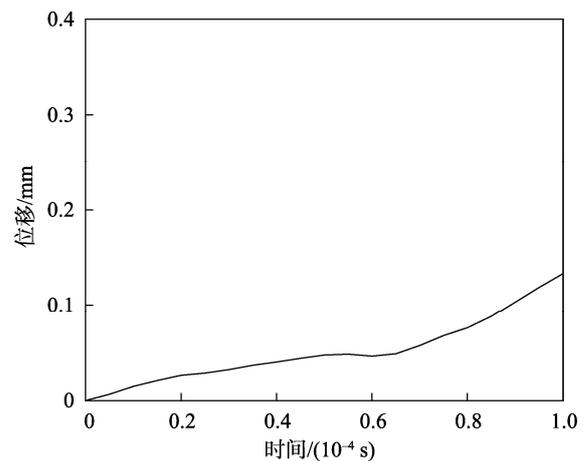


图 10 第 1 次角跌落过程托盘对角线位移变化曲线
Fig.10 Change of pallet diagonal displacement during the first corner drop test

3.2.3 第 2 次角跌落过程有限元分析

进行第 2 次角跌落仿真时, 在 Abaqus 中复制上一次的模型文件, 在设置载荷时将上一次的 odb 文件作为初始状态, 即将上一步得出的模型作为下一步的输入模型继续分析, 并勾选更新引用配置以消

除掉上次跌落后的残余应力，其余参数不变，新建 Job 求解计算。由图 11—12 所示（图中钉帽朝左上方的托盘钉位于顶铺板一侧，朝向右下方的托盘钉位于底铺板一侧），第 2 次角跌落过程中木质构件和托盘钉最大应力分别为 161.2 MPa 和 433.7 MPa，位置由顶铺板与纵梁连接处转移到底铺板与纵梁连接处。第 1 次跌落后的钉孔处木材由于密实化使得抗压性能提高，导致第 2 次跌落时托盘钉所受应力大于其屈服应力，并发生塑性变形，钉孔的间隙再次增加，托盘钉的握钉力进一步下降。由图 11b 可知，木质构件变形最大的位置仍出现在靠近纵梁板一侧的纵梁跌落棱边上，该位置错位量增加至 0.19 mm，纵梁进一步向横纹方向凹陷。由图 12b 可知，临近跌落侧的多颗托盘钉由于分担冲击载荷发生了不同程度的塑性变形，也意味着跌落侧多处钉孔连接出现松动，其中应力最大位置处的托盘钉变形程度也是最大的。

由图 13 可知，第 2 次跌落后托盘钉对角线长度进一步缩短了 0.17 mm，且曲线波折程度减小、数值变大，说明在第 2 次跌落冲击力的作用下，已发生塑性变形的木质构件和托盘钉的弹性恢复能力下降，托盘整体的连接关系不再紧固。

3.2.4 第 3 次角跌落过程有限元分析

复制第 2 次的模型文件，在设置载荷时选择上一次跌落仿真生成的 odb 文件作为模型下一次跌落的初始状态，勾选更新引用配置以消除掉上次跌落后的残余应力，其余参数不变，进行第 3 次角跌落仿真。由图 14 可知，第 3 次角跌落过程中最大应力点位置出现在底铺板与纵梁连接的托盘钉孔处，最大应力为 167.5 MPa，大于花旗松的屈服应力，并产生了塑性变形。由图 14b 可知，纵梁的跌落棱边处产生的位移最大，经测量，纵梁与纵梁板之间的错位量增加至 0.21 mm，纵梁继续向横纹方向凹陷。

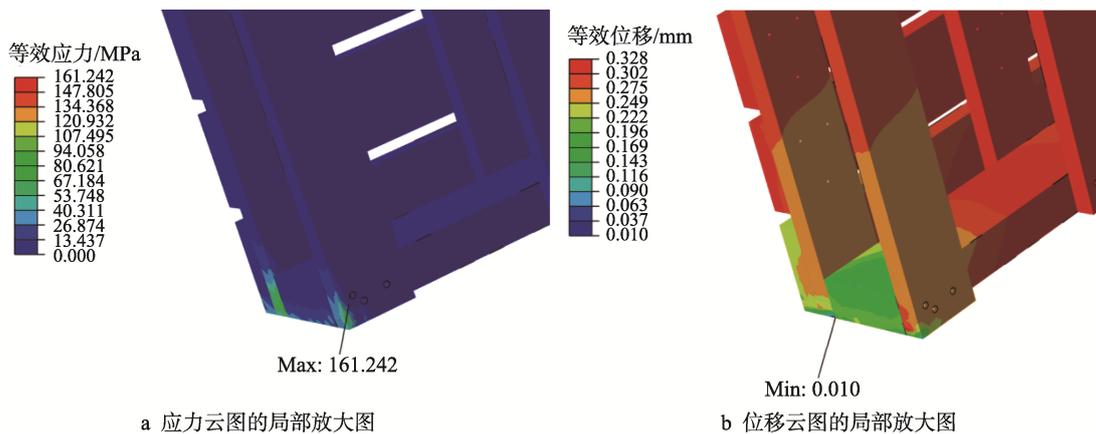


图 11 第 2 次角跌落过程木质构件应力最大时刻的应力与位移云图

Fig.11 Stress nephogram and displacement nephogram at the moment of maximum stress occurring of wooden components during the second corner drop test

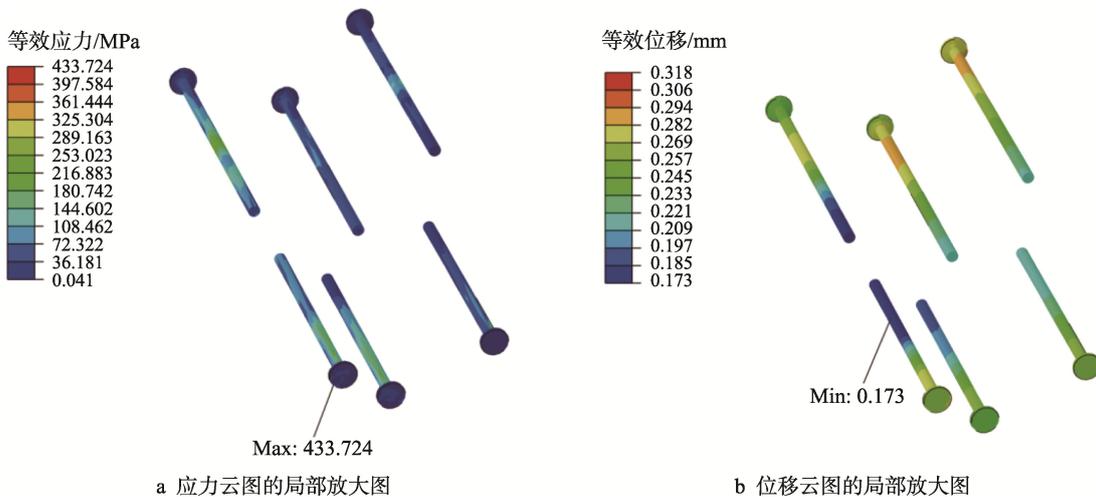


图 12 第 2 次角跌落过程托盘钉应力最大时刻的应力和位移云图

Fig.12 Stress nephogram and displacement nephogram at the moment of maximum stress occurring of pallet nails during the second corner drop test

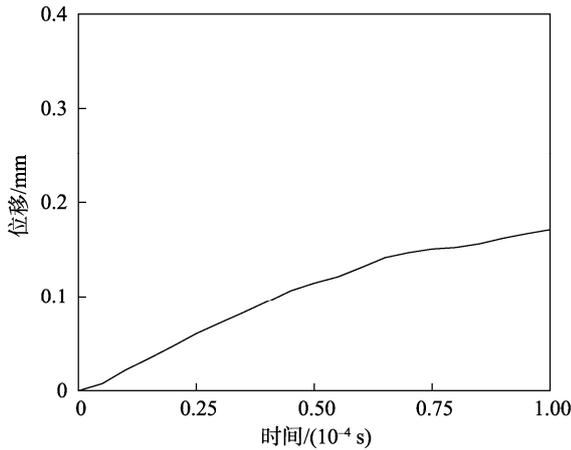


图 13 第 2 次角跌落过程托盘对角线位移变化曲线
Fig.13 Change of pallet diagonal displacement during the second corner drop test

从图 15a 可知(图中钉帽朝左上方的托盘钉位于顶铺板一侧, 朝向右下方的托盘钉位于底铺板一侧), 托盘钉最大应力为 497.9 MPa, 其位置由紧固底

铺板的托盘钉处再次转移至紧固顶铺板一侧的托盘钉处。从图 15b 可知, 承受应力最大的托盘钉出现的变形量也最大。第 3 次跌落后木质构件和托盘钉的最大应力位置不在托盘的同一侧, 这是由于前 2 次跌落使得托盘顶铺板与底铺板两侧的钉孔关系均被破坏, 钉接强度下降导致的。

如图 16 所示, 第 3 次角跌落导致托盘对角线长度进一步缩短了 0.31 mm, 曲线较前 2 次跌落时更加光滑, 说明连续跌落下的木质构件和托盘钉基本失去弹性恢复能力。经连续 3 次跌落后托盘的钉接强度减弱, 致使抗冲击性能下降, 托盘整体趋于松散。

第 1 次角跌落时, 木质构件和托盘钉的最大应力出现在顶铺板位置处, 第 2 次角跌落时, 二者最大应力均转移至底铺板位置处, 第 3 次跌落时木质构件最大应力仍在底铺板处, 而托盘钉最大应力转移至顶铺板处, 说明了随着跌落次数的增加, 钉孔配合的间隙先出现在托盘的一面, 再次跌落后托盘另一面的钉孔配合也被破坏。当托盘上下两面的钉孔配合均被破坏后, 托盘两面握钉力下降, 托盘整体变得不再紧固。

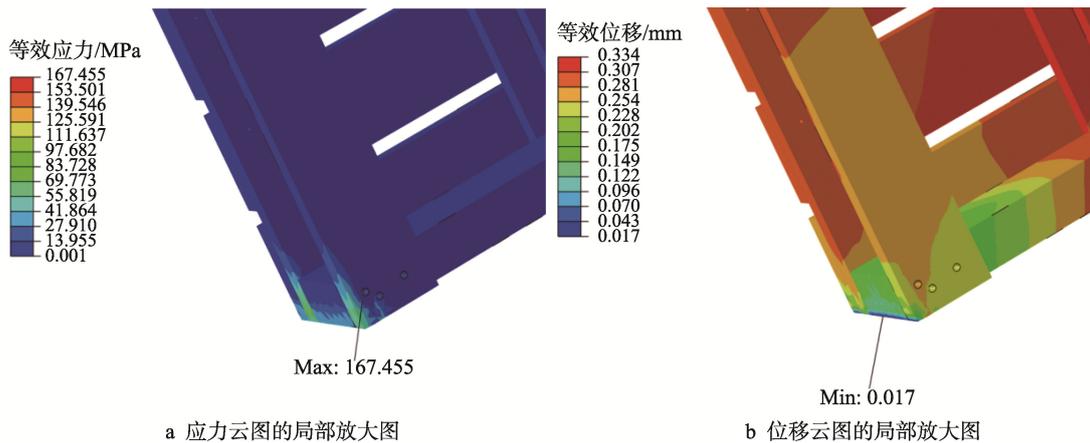


图 14 第 3 次角跌落过程木质构件应力最大时刻的应力和位移云图
Fig.14 Stress nephogram and displacement nephogram at the moment of maximum stress occurring of wooden components during the third corner drop test

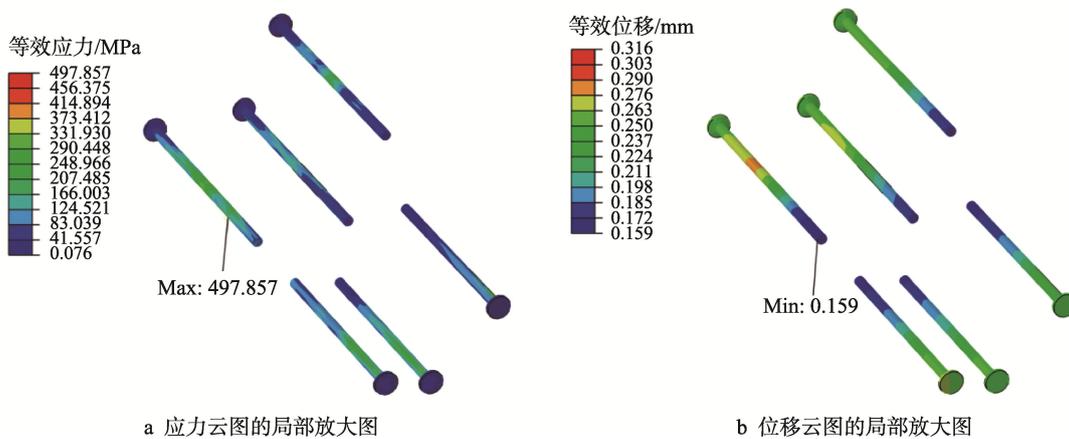


图 15 第 3 次角跌落过程应力最大时刻托盘钉应力和位移云图
Fig.15 Stress nephogram and displacement nephogram at the moment of maximum stress occurring of pallet nails during the third corner drop test

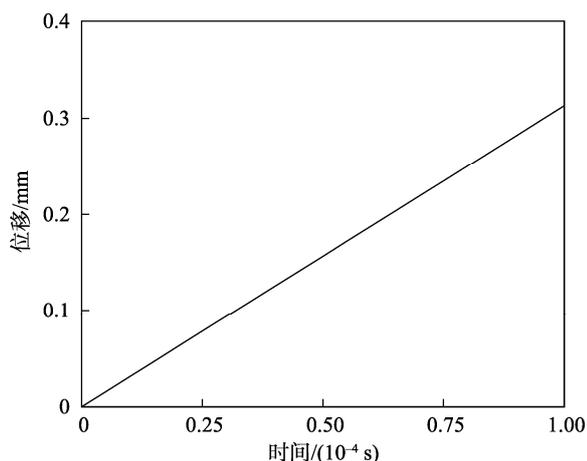


图 16 第 3 次角跌落过程托盘对角线位移变化曲线
Fig.16 Change of pallet diagonal displacement during the third corner drop test

通过分析托盘的变形可知,最大变形均出现在纵梁的跌落棱边上,且纵梁向横纹方向分别凹陷 0.07、0.19、0.21 mm,纵梁作为连接顶铺板与底铺板的关键部件,错位量逐渐增大,说明了随跌落次数增加,钉接强度的下降导致纵梁与其他木质构件的缝隙越来越大。托盘对角线长度分别缩短 0.13、0.17 和 0.31 mm,缩短量逐次增加说明了托盘由于握钉力的下降导致整体趋于疏松,波动程度逐次减小说明托盘随跌落次数的增加逐渐失去弹性回复能力。在 3 次跌落后托盘对角线长度的总缩短量为 0.61 mm,缩短率为 0.07%,远小于标准要求的 4%,可认为托盘内部发生的塑性变形在允许范围内,托盘无损坏,也说明了此款托盘的抗冲击性能良好,满足使用要求。

3.3 托盘角跌落试验测试

为了验证仿真结果的可靠性,如图 17 所示,按照 GB/T 4996—2014 规定的角跌落试验方法对图 2 所示的托盘试件进行试验。在 3 次角跌落试验后托盘外观见图 18,没有出现影响使用的裂纹或严重变形。利用塞尺记录托盘纵梁沿横纹方向的凹陷量,分别为 0.02、0.2、0.26 mm,可以看出第 1 次角跌落后的变化量较小,后 2 次的变化量均远大于第 1 次的变化量,且呈现随跌落次数增加变化量递增的规律,说明托盘在第 1 次跌落后纵梁的凹陷使得跌落角处托盘钉的钉接强度下降,导致托盘的抗冲击性下降。利用钢直尺记录托盘每次跌落后对角线的变化量,分别为 0.1、0.4、0.6 mm,变化量呈递增趋势,3 次角跌落后托盘对角线缩短率为 0.11%,远小于标准要求的 4%,从试验角度说明了此款托盘抗冲击性能良好。

在仿真结果中,纵梁凹陷量为 0.47 mm,对角线缩短率为 0.07%,均略小于试验结果中的 0.48 mm 和 0.11%,究其原因是在 3D 建模时,对托盘木质构件和托盘钉都进行了理想化的简化处理,且托盘的木质构件上存在斜纹理、翘曲等缺陷,部分托盘钉钉入木

材时有微小弯曲现象,因此试验值较仿真值大,符合实际情况。

从试验和仿真两方面验证了托盘的抗冲击性能,满足使用要求,也说明托盘在角跌落过程中跌落侧的钉孔连接处和纵梁跌落棱边为易损位置,并且钉接强度是影响托盘抗冲击性的关键因素。



图 17 托盘试件角跌落试验
Fig.17 Corner drop test of pallet specimen



图 18 角跌落试验后托盘外观
Fig.18 Pallet appearance after corner drop test

4 结语

文中运用有限元仿真与试验分析结合的方法,研究木质平托盘抗跌落冲击性能得出如下结论。

通过仿真与试验所获得的木质平托盘对角线长度缩短率远小于 4%,说明作为研究对象的木质平托盘拥有良好的抗冲击性能,并且有限元仿真与试验分析结果吻合,也说明了仿真研究方法的可行性。

木质平托盘在受到角跌落冲击时,主要由跌落侧的托盘钉承受冲击力,托盘钉孔处木材受压变形出现密实化现象,钉接强度减弱,导致托盘在连续跌落过

程中逐渐失去弹性恢复能力,抗冲击性能逐渐下降。考虑托盘在使用过程中遭受冲击的部位、方向等存在较大的不确定性,因此,增强木质构件、托盘钉自身性能,加强托盘钉与木质构件的钉接强度是提高木质平托盘抗冲击性能的关键因素。

参考文献:

- [1] 唐英,宋博瀚.半托盘国外发展现状及其在中国的推广应用[J].物流技术与应用,2018,23(6):126-130.
TANG Ying, SONG Bo-han. The Overseas Development of Half-Pallets and Its Popularization and Application in China[J]. Logistics & Material Handling, 2018, 23(6): 126-130.
- [2] 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].
- [3] GB/T 4996—2014, 联运通用平托盘 试验方法[S].
GB/T 4996—2014, General-Purpose Flat Pallets for Through Transit of Goods - Test Methods[S].
- [4] 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 Zhao, ZHANG Xiao-chuan, WANG Jiao, et al. Drop Test of Molded Pulp Pallet and Diagonal Stiffness Analysis[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(11): 1-4.
- [5] 王久龙.塑料平托盘循环共用性能的分析研究[D].天津:天津科技大学,2015:49-50.
WANG Jiu-long. Study on Performance of Plastic Flat Pallet for through Transit of Goods[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2015: 49-50.
- [6] 李志强,晏立熊,梁佩,等.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, LIANG Pei, et al. Finite Element Analysis of Static and Dynamic Mechanical Properties of Cage Pallet[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 17-21.
- [7] 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,2020:38-43.
XING Bi-ying. The Research on Mechanical Properties of Bamboo-Wood Composite Standard Flat Tray[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2020: 38-43.
- [8] 储德森,母军,康柳,等.单板层积材的三维光学检测及其托盘的有限元仿真分析[J].北京林业大学学报,2019,41(9):147-155.
CHU De-miao, MU Jun, KANG Liu, et al. Three-Dimensional Optical Deformation Measurement of Laminated Veneer Lumber and the Finite Element Simulation Analysis of the Pallets[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(9): 147-155.
- [9] 曹菲.木托盘受力性能理论分析及有限元模拟[J].包装工程,2016,37(23):50-54.
CAO Fei. Theoretical Analysis and Finite Element Simulation of Mechanical Property for Wooden Pallet[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(23): 50-54.
- [10] 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.
WANG Hai-fei, HUA Guang-jun, GUO Ya-fei, et al. Numerical Simulation and Experimental Analysis of Wood Plastic Composite Pallet with Irregular Section[J]. Packaging Journal, 2019, 11(2): 8-13.
- [11] 沈丹丹,胡万晓,苟进胜.木托盘有限元分析精度的影响因素[J].包装工程,2018,39(17):12-18.
SHEN Dan-dan, HU Wan-xiao, GOU Jin-sheng. Factors Affecting the Precision of Finite Element Analysis of Wooden Pallet[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 12-18.
- [12] 巩桂芬,李毅,孔腾华.OSB板托盘的叉举试验及有限元分析[J].包装工程,2017,38(19):137-141.
GONG Gui-fen, LI Yi, KONG Teng-hua. Fork Test and Finite Element Analysis for OSB Board Pallet[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19): 137-141.
- [13] 刘晶波,杜修力.结构动力学[M].北京:机械工业出版社,2005:101-103.
LIU Jing-bo, DU Xiu-li. Structural Dynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 101-103.
- [14] 唐英.中国托盘标准体系研究[J].物流技术与应用,2019,24(2):122-126.
TANG Ying. Research on Chinese Pallet Standard System[J]. Logistics & Material Handling, 2019, 24(2): 122-126.
- [15] 曹海.花旗松工程木的材性研究[J].黄山学院学报,2010,12(5):95-97.
CAO Hai. A Study on Physical and Mechanical Properties of Douglas-Fir Engineered Wood[J]. Journal of Huangshan University, 2010, 12(5): 95-97.
- [16] 邵卓平,任海青,江泽慧.木材横纹理断裂及强度准则[J].林业科学,2003,39(1):119-125.
SHAO Zhuo-ping, REN Hai-qing, JIANG Ze-hui. Fracture Perpendicular to Grain of Wood and Strength Criterion[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(1): 119-125.
- [17] 伍艳梅,黄荣凤,高志强,等.木材横纹压缩应力-应变关系及其影响因素研究进展[J].林产工业,2018,45(11):11-16.
WU Yan-mei, HUANG Rong-feng, GAO Zhi-qiang, et al. Research Development of Influencing Factors of Stress-Strain Relationship under Wood Transverse

- Compression[J]. China Forest Products Industry, 2018, 45(11): 11-16.
- [18] XING Zhi-yan, ZHANG Jin, ZHENG Cheng-yu, et al. Experimental Study and Finite Element Analysis on Residual Carrying Capacity of CLT Wall-Floor Angle Bracket Connections after Fire[J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 113-127.
- [19] HUANG Chen, GONG Meng, CHUI Ying-hei, et al. Mechanical Behaviour of Wood Compressed in Radial Direction-Part I. New Method of Determining the Yield Stress of Wood on the Stress-Strain Curve[J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2020, 5(3): 186-195.
- [20] 宋博瀚. 联运通用半托盘尺寸及性能要求研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018: 81-86.
- SONG Bo-han. Research on Dimensions and Performance Requirements for General-Purpose Half-Pallet [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018: 81-86.
- [21] 孙小鸾, 刘伟庆, 袁盛林, 等. 基于 Abaqus 的木结构螺栓节点刚度有限元分析[J]. 结构工程师, 2019, 35(4): 21-29.
- SUN Xiao-luan, LIU Wei-qing, YUAN Sheng-lin, et al. Finite Element Analysis of Stiffness of Bolted Joints of Timber Structures Based on Abaqus[J]. Structural Engineers, 2019, 35(4): 21-29.
- [22] 孙玉萍, 安建永, 王万祯, 等. 结构钢开孔管断裂试验及有限元分析[J]. 建筑科学, 2009, 25(5): 28-32.
- SUN Yu-ping, AN Jian-yong, WANG Wan-zhen, et al. The Fracture Experimental and Finite Element Analysis of the Steel Pipe with Hole[J]. Building Science, 2009, 25(5): 28-32.
- [23] 滕启城, 王菲彬, 阙泽利, 等. 圆钢钉和自攻螺钉钉入角度对规格材握钉力性能的影响[J]. 林业科学, 2020, 56(1): 154-161.
- TENG Qi-cheng, WANG Fei-bin, QUE Ze-li, et al. Effects of Angles on the Screw and Nail Withdrawal Strength in Dimension Lumber[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(1): 154-161.

责任编辑: 曾钰婵