

木托盘有限元分析精度的影响因素

沈丹丹，胡万晓，苟进胜
(北京林业大学，北京 100083)

摘要：目的 研究有限元软件模拟木托盘抗弯性能时各因素对其分析精度的影响。**方法** 对木托盘的抗弯性能进行理论分析和有限元模拟。通过计算铺板力学模型得到理论变形值；将 Creo 软件建立的托盘模型导入 Ansys Workbench 进行分析，得到有限元模拟值。采用控制变量法，改变单元类型和网格划分方式，并将结果与理论计算值进行对比分析。**结果** 采用软件默认的单元类型和经网格划分方式等得到的整体位移结果与理论值的误差为 2.97%。通过对各影响因素的调整，顶铺板的位移结果与理论值的误差为 0.02%。**结论** 单元数量相同的情况下，高阶单元的分析精度优于低阶单元，六面体单元优于四面体单元。保持其他设置条件不变，细化网格可提高分析精度。

关键词：木托盘；有限元；Ansys Workbench；单元类型；网格划分

中图分类号： TB485.3；U294.27⁺² **文献标识码：**A **文章编号：** 1001-3563(2018)17-0012-07

DOI： 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.003

Factors Affecting the Precision of Finite Element Analysis of Wooden Pallet

SHEN Dan-dan, HU Wan-xiao, GOU Jin-sheng
(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effects of all factors on the analysis precision when the finite element software was used to simulate the bending performance of wooden pallets. The theoretical analysis and finite element simulation of the bending performance of wooden pallets were made. The theoretical deformation values were obtained through the calculation of deck mechanical model. The pallet model created by Creo software was imported into Ansys Workbench for analysis, and the finite element simulation values were obtained. The control variable method was used to change the element type and meshing method, and the results and theoretical calculations were compared and analyzed. The error between overall displacement results and theoretical value obtained by the default software element type and meshing method was 2.97%. Through the adjustment of each influence factor, the error between the displacement result and the theoretical value of top deck was 0.02%. In the case of the same number of elements, the analysis precision of the higher-order element is better than the lower one. Hexahedral element is superior to the tetrahedral element. With the other setting conditions unchanged, the refined mesh can improve the analysis precision.

KEY WORDS: wooden pallet; finite element; Ansys Workbench; element type; meshing

有限元不仅计算精度高，而且能适应各种复杂形状，是行之有效的工程分析方法。近年来，经过不断发展，有限元方法在木材结构分析中的应用越来越广泛，主要体现在木结构建筑、木制家具、木包装这些方面。胡家航等^[1]总结了 Ansys 在木桁架、木结构剪

力墙和木结构楼板中的应用。张祥等^[2]设计了实木座椅，并运用 Ansys 对不同材料种类的木椅进行了静力分析。谭大松^[3]通过 Ansys Workbench 对包装箱进行了结构静力学、模态和随机振动分析，并对其结构进行了优化设计，达到了节材的目的。

收稿日期：2018-03-30

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金（2017ZY32）

作者简介：沈丹丹（1993—），女，北京林业大学硕士生，主攻计算机技术在包装领域的应用。

通信作者：苟进胜（1979—），男，博士，北京林业大学副教授，主要研究方向为包装废弃物能源化利用和计算机技术在包装领域的应用。

托盘作为最基础的运输单元,是物流高效率化、低成本化的必然选择^[4]。木托盘以其加工简单、成本低廉的优势占据着托盘市场的主导地位。为适应不同场合的作业,对托盘的样式和尺寸进行相应的调整。木托盘的设计大多依据工程师的经验,过度设计或强度不足都会造成资源浪费。有限元分析法可节省大量的人力物力,分析结果与实际的试验值非常接近,具有一定的参考价值。国内外学者也对此进行了颇多的研究。Ratnam^[5]对比相移阴影莫尔法和有限元分析2种方法得到托盘的静态变形结果,最大误差为13.7%。Karacail^[6]研究了木托盘在载荷作用下的断裂和疲劳情况,考虑了钉子和托盘材料的特性,用有限元法得到了应力分布结果,并建立了古德曼疲劳图和N-S疲劳图,验证了Von Mises屈服数据的正确性。曹菲^[7]研究了木托盘在静载堆码时的力学性能,结果显示有限元分析法和理论分析法得到的结果基本一致,同时也验证了2种方法的可行性。丁毅^[8]等利用Ansys Workbench分析了托盘在静载下的应力集中现象,还使用Ansys中的Fatigue Tool对托盘进行疲劳分析,为托盘结构的优化和托盘疲劳寿命的提高提供了基础。巩桂芬等^[9]对钢钉和木材构件分别建模,通过有限元分析验证了木托盘货架载荷工况下变形量计算公式的合理性。

Ansys Workbench是一款简单易学的有限元分析平台,以项目流程图的方式,集成了结构、流体和电磁等各种分析系统。它具有Windows交互界面和工程材料库,方便用户的使用和选择,其建模方式与Creo, UG, SolidWorks等十分相似,比Ansys经典界面更方便快捷^[10]。为使该软件在木托盘应用方面得到的模拟结果更精确,这里将进行以下研究,探索影响有限元分析精度的因素,找到较为精确的分析方式,为设计者提供一种有效的模拟方法。

1 理论分析

1.1 结构模型

文中选取传统的双面托盘,两面均可承载,并具有相同的承载能力。参考GB/T 2934—2007^[11],托盘平面尺寸为1100 mm×1100 mm。上下铺板尺寸相同,宽度为90 mm,厚度为22 mm。纵梁宽为50 mm,厚度为100 mm。该托盘的模型见图1。

1.2 力学模型

以GB/T 4996—2014^[12]规定的托盘弯曲试验条件进行研究,力施加的位置距离托盘边缘0.18l(l为铺板的长度),托盘的额定载荷p设为2210 kg。托盘及其构件的受力情况见图2。

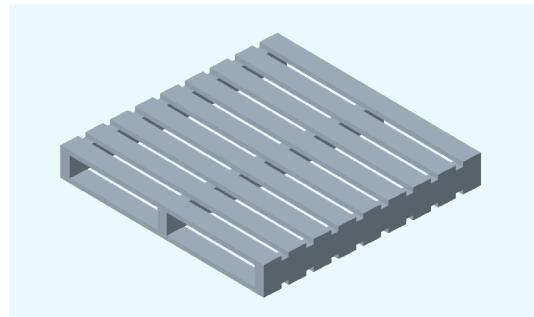


图1 托盘模型

Fig.1 Pallet model

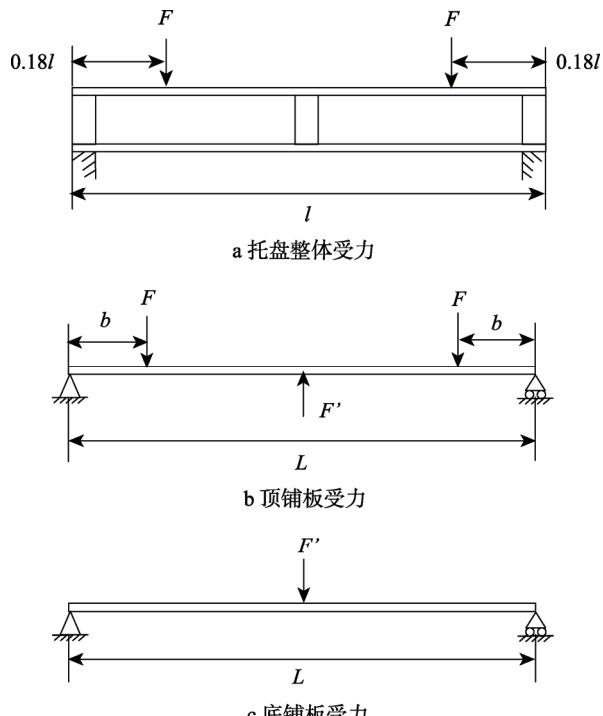


图2 力学模型

Fig.2 Mechanical model

1.3 模型求解

将铺板的力学模型视为简支梁,根据材料力学变形叠加法可以得到顶铺板和底铺板中间位置的挠度 ω_1 和 ω_2 :

$$\omega_1 = 2 \frac{Fb(3L^2 - 4b^2)}{48EI} - \frac{F'L^3}{48EI} \quad (1)$$

$$\omega_2 = \frac{F'L^3}{48EI} \quad (2)$$

式中: F 为每根铺板上承受的压力, $F = \frac{9.8p}{18}$;

F 为支座反力; b 为力 F 到支座的距离, $b=148\text{ mm}$ ^[13]; L 为2根纵梁之间的距离, $L=1000\text{ mm}$; E 为材料弹性模量; I 为截面惯性矩, $I = \frac{BH^3}{12}$ (铺板宽度 $B=90\text{ mm}$,铺板厚度 $H=22\text{ mm}$)。

根据变形协调条件有:

$$\omega_1 = \omega_2 \quad (3)$$

由式(1—3)可以得出 F 和托盘中间位置的挠度值:

$$F' = \frac{Fb(3L^2 - 4b^2)}{L^3} \quad (4)$$

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{Fb(3L^2 - 4b^2)}{48EI} \quad (5)$$

为简化问题, 将忽略木材各向异性的特性, 选取松木^[14]的纵向弹性模量 $E=9.171$ GPa, 泊松比为 0.34。将各数值代入式(5), 求得铺板中部挠度值为 14.75 mm, 则托盘整体结构的最大挠度值也为 14.75 mm。

2 有限元分析

2.1 前处理部分

将在 Creo 中建立的双面托盘模型保存为.stp 格式, 并导入 Ansys Workbench 进行分析。在工程数据部分添加新材料, 输入松木的纵向弹性模量和泊松比。把托盘各个部件的材料定义为松木, 加载头和支座的材料定义为钢材。各构件之间的接触方式默认为绑定, 网格划分采取自动分网方式, 划分结果见图 3。共生成 1174 个单元, 10 567 个节点, 系统默认的单元类型为 Solid 186 单元。

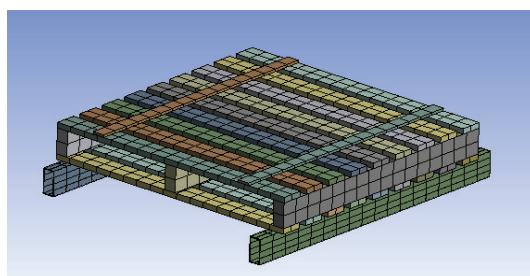


图 3 有限元网格模型
Fig.3 Finite element mesh model

2.2 加载求解

加载和约束方式见图 4, 在 2 根加载头表面分别施加向下的力(A, B), 大小均为 10 829 N。左侧支座底面设置为固定约束(C), 右侧支座底面添加位移约束, 限制其竖直方向的位移(D), 添加求解项便可通过计算得出变形结果。托盘的整体位移结果见图 5。有限元分析结果显示, 托盘的最大位移发生在中部, 顶铺板与底铺板的中部位移最大值为 14.312 mm, 与理论分析值的误差仅为 2.97%。

3 影响因素探究

3.1 模型的建立

为探究单元类型和网格划分对有限元分析精度的影响, 将不考虑托盘各构件之间的接触方式, 只对

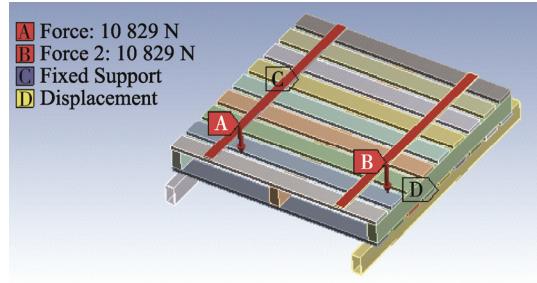


图 4 托盘加载和约束方式
Fig.4 Pallet loading and constraint methods

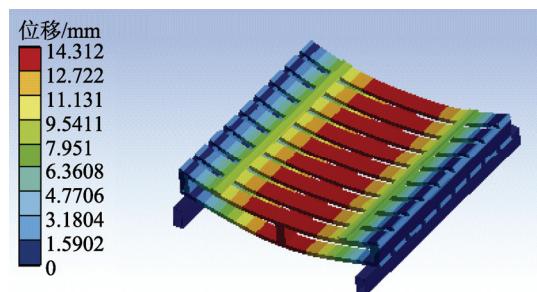


图 5 托盘位移云图
Fig.5 Displacement nephogram of pallet

其中一根顶铺板的变形进行分析。顶铺板的有限元模型应与 1.2 节中简化的力学模型保持一致, 长宽高分别为 1000, 90, 22 mm。加载约束方式见图 6, 其中 D 为固定约束, E 为位移约束, 限制其竖直方向的位移。

3.2 不同单元类型

经典界面需要用户选择单元, 并对单元的输入、输出选项进行设置。Ansys Workbench 则把这些步骤完全封装起来, 它会自动根据用户的分析类型来挑选单元。一般而言, 对于结构分析, Ansys Workbench 中默认的实体单元类型通常是 Solid 185, Solid 186 和 Solid 187 单元。

3.2.1 常用单元类型介绍

Solid 185^[15]由 8 个节点定义, 用于建立三维实体结构模型。每个节点有 x , y , z 方向上的 3 个平动自由度。该单元可模拟塑性、超弹性、蠕变、应力刚化、大应变和大变形等性能, 可利用混合公式模拟不可压

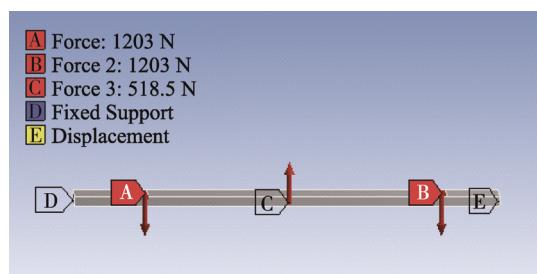


图 6 一根顶铺板的约束加载方式
Fig.6 Constraint loading method of a top deck

缩弹塑材料和不可压缩超弹性材料的变形。

Solid 186^[16]是由 20 个节点定义的具有二次位移形函数的三维高阶实体单元,适于生成不规则网格模型。每个节点有 x , y , z 方向上的 3 个平动自由度,可模拟塑性、超弹性、蠕变、应力刚化、大应变和大变形等性能,也可利用混合公式模拟不可压缩弹塑材料和不可压缩超弹性材料的变形。

Solid 187^[16]是由 10 个节点定义的具有二次位移形函数的三维高阶实体单元,适于生成不规则网格模型。每个节点有 x , y , z 方向上的 3 个平动自由度,可模拟塑性、超弹性、蠕变、应力刚化、大应变和大变形等性能,也可利用混合公式模拟不可压缩弹塑材料和不可压缩超弹性材料的变形。

选用高阶单元可提高计算精度,因为高阶单元的曲线或曲面边界能够更好地逼近结构的曲线和曲面边界,且高次插值函数可更精确地逼近复杂场函数,所以当结构形状不规则、应力分布或变形很复杂时可以选用高阶单元。高阶单元的节点数较多,计算结果时需要更大的内存和更多的时间,因此选择单元时应权衡考虑各种因素。

3.2.2 高低阶单元对比

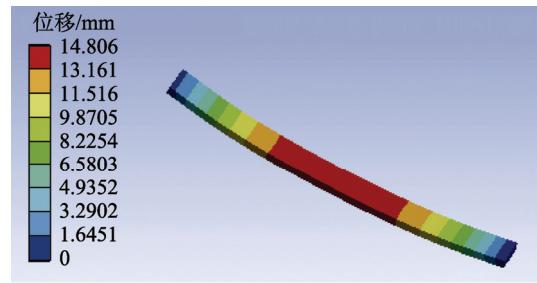
文中的有限元分析采用的单元类型是软件自动定义的 Solid 186 单元,该单元是具有 20 个节点的高阶单元,其对应的低阶单元是 Solid 185。在 Ansys Workbench 的 Model 界面中可以直接把 Solid 186 单元修改为 Solid 185 单元。在 Mesh 属性窗口的 Advanced 选项下面有一个 Element Midside Node,通过该设置可以选择是否保留单元的中间节点。如果 Solid 186 单元不留中间节点,就变成 Solid 185 单元。对顶铺板分别赋予 Solid 186 和 Solid 185 单元,网格划分方式和大小都保持一致,求解得到 2 张位移云图,见图 7。

3.2.3 结果分析

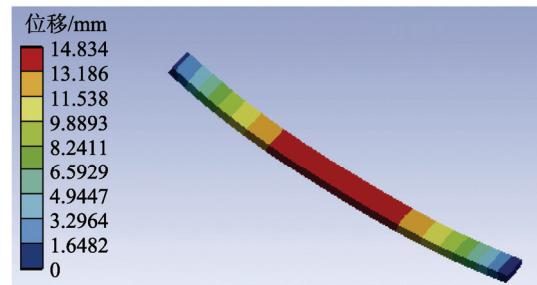
Solid 186 单元对应的铺板中部位移值为 14.806 mm, Solid 185 单元对应的位移值为 14.834 mm。2 种单元都是六面体,自动划分后得到的单元个数相同,不同之处是高阶单元 Solid 186 比低阶单元 Solid 185 的节点数多。分析得到两者最大位移相差甚微,但是和理论位移值 14.751 mm 相比较,应用 Solid 186 单元得到的铺板变形值 14.806 mm 误差更小。这说明在单元数相同的情况下,高阶单元的精确度高于低阶单元。

3.3 不同网格划分方法

对于不同的模型,网格划分方法不同,而在复杂结构中,可以结合使用不同的网格划分方法。Ansys Workbench 包含了 5 种 3D 实体网格控制法。



a Solid 186 单元



b Solid 185 单元

图 7 顶铺板位移云图

Fig. 7 Top deck displacement nephogram

3.3.1 3D 实体网格划分方法

1) 自动划分 (Automatic)。自动划分法是 Workbench 中最简单的网格划分方法,通过程序自动检测,将实体分为可扫描和不可扫描的部分,采用扫描法将可扫描部分划分为六面体网格,对于不可扫描部分,程序会自动生成四面体网格。

2) 四面体网格 (Tetrahedrons)。四面体网格划分法将实体划分成四面体单元,包含协调分片算法 (Patch Conforming) 和独立分片算法 (Patch Independent)。协调分片算法基于 TGrid,适用于质量好的几何模型;独立分片算法基于 ICEM CFD,适用于质量差的需要清除小特征的几何模型。

3) 六面体域网格 (Hex Dominant)。六面体网格划分法的使用有利于减少单元数量,加快求解收敛。划分过程中主要生成六面体单元,对于复杂模型则会出现少量棱锥单元和四面体单元。该方法适用于不能扫描划分的实体和具有很大内部体积的模型。

4) 扫掠网格 (Sweep)。将可以扫描的实体划分为六面体单元或棱柱单元,远远低于四面体网格的单元节点数,可以节省计算时间,但要求实体在某一个方向上具有相同的拓扑结构。

5) 多区域网格 (Multizone)。多区域网格划分法可将几何体自动分解为映射区和自由区,在映射区内生成六面体/棱柱单元,而自由区可由四面体或六面体域网格来划分。这与扫掠网格划分法类似,但更适合于扫掠方法不能分解的几何模型^[17]。

3.3.2 不同网格划分方法对比

前文采用的网格划分方法都是自动划分法,为探

索不同网格划分方式对分析结果的影响,保持材料、模型、接触和约束加载条件完全相同,对其他4种网格划分方式进行分析,得到的结果见图8。

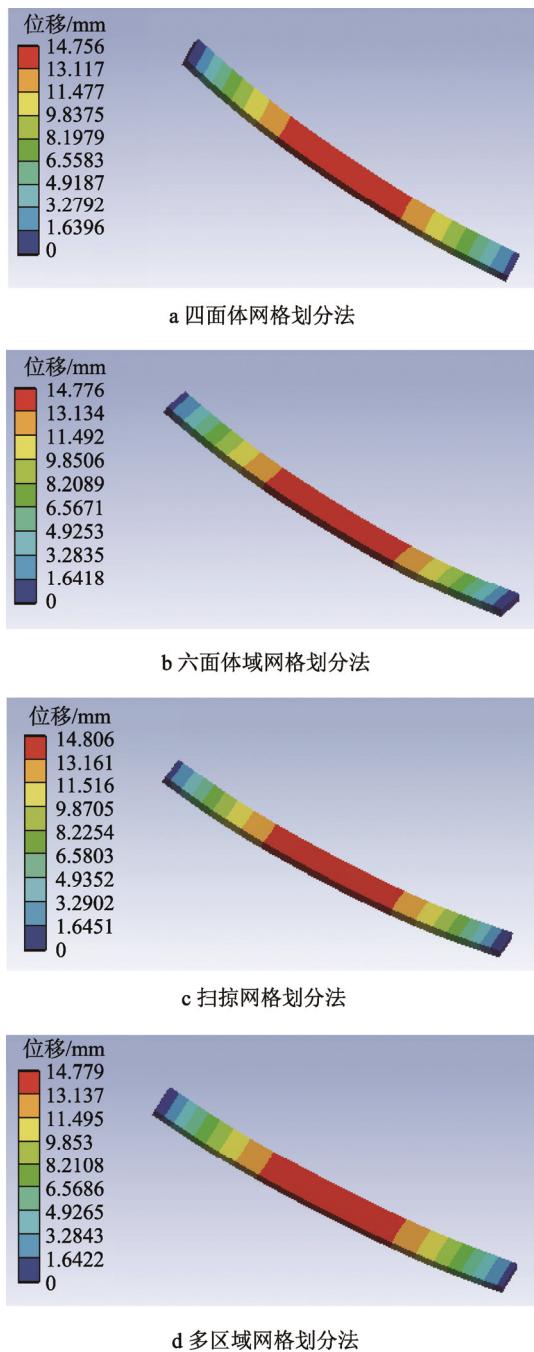


图8 不同网格划分方式下的托盘位移云图
Fig.8 Pallet displacement nephogram under different grid division methods

3.3.3 结果分析

5种不同网格划分方式得到的单元节点数和最大位移值见表1。自动划分方式所得到的分析结果与扫掠网格划分方式的结果完全相同,这是因为自动划分方法检测到铺板模型是可以扫掠的实体,因此对其实施扫掠方法划分为六面体网格。

四面体网格划分方法得到的结果最小,这是因为软件定义的单元类型为Solid 187。在3.2节中给出了Solid 187单元的基本介绍,它是10节点四面体单元。理论上,Solid 187要达到和Solid 186相似的精度,需要更细的网格划分。Solid 187的值最接近理论值,而这并不能说明它的分析精度高,因为有限元模型的精确解并不等同于理论值。

表1 5种分网方式结果对比
Tab.1 Comparison of five meshing methods

方法	单元数	节点数	最大位移/mm
自动划分	80	773	14.806
四面体网格	211	524	14.756
六面体域网格	44	431	14.776
扫掠网格	80	773	14.806
多区域网格	46	450	14.779

对于复杂模型,六面体网格划分和多区域网格划分都会包含一部分四面体单元和棱锥单元,因此在节点数相差不大的情况下,计算精度要低于全为六面体网格的扫掠划分法。由于顶铺板结构简单规整,除四面体网格划分法得到的是四面体网格外,其他的都是六面体网格。六面体划分法、多区域网格划分法与自动划分法和扫掠划分法所得到的位移值之间存在差异,这是因为划分得到的单元数量不同。

3.4 网格细化程度

3.4.1 细化网格

由3.3.3节的结果分析可以看出,有限元模型的精确解并不等于理论模型的解。通过不断细化网格,有限元分析值会越来越稳定和精确。四面体网格划分法和自动划分法通过细化网格,来得到有限元模型的精确解。2种方法的分析结果见表2。

表2 2种划分方法网格细化的分析结果
Tab.2 Mesh refinement analysis results of two partitioning methods

网格尺寸/mm	单元数		节点数		最大位移/mm	
	四面体网格	自动划分	四面体网格	自动划分	四面体网格	自动划分
default	211	80	524	733	14.756	14.806
20	797	520	1895	3321	14.779	14.783
15	1203	828	2756	5159	14.78	14.783
10	3225	2754	6323	14 998	14.781	14.785
5	12 758	18 090	23 817	86 948	14.784	14.786

注: default为软件中默认的网格尺寸

3.4.2 结果分析

由表2中的数据可以看出,随着网格的细化,四面体网格划分法得到的位移值逐渐变大,而自动划分法对应的位移值先降低后升高,变化范围特别小。综合两者的变化趋势,最终位移值都趋向于14.78 mm,可认为顶铺板有限元模型的精确解为14.78 mm,这与理论位移值相差0.03 mm,误差为0.2%。

4 结语

木托盘形状规则,适用于扫掠划分方式。对大多数结构静力分析而言,整体控制的默认值足够精确,不需要再去调整网格尺寸的大小。整体分析结果表明,由软件默认条件下得到的分析值与理论值误差仅为2.97%。

通过对各种影响因素的探究,可以得到以下几点结论。

1) 在单元数量相同的情况下,高阶单元的计算精度优于低阶单元。

2) 对于简单模型而言,除四面体网格以外,各种划分方法没有太大区别;四面体单元需要更细化的网格才能达到六面体单元的分析精度。

3) 网格细化能提高分析精度。当网格数量较少时,通过细化网格,分析结果会有明显的变化;当网格数量达到一定程度时,再增加网格数量,分析结果的变化就会非常小,此时还会增加计算时间,因此应注意增加网格的经济性。

4) 有限元分析与理论计算都是将问题简化后得到的结果,这两种方法只能作为参考。要提高参考价值,还应结合实际试验,对模型进行校核。

参考文献:

- [1] 胡家航,强添纲,郭明辉. Ansys在木结构构件中的应用[J]. 世界林业研究,2016,29(3): 75—79.
HU Jia-hang, QIANG Tian-gang, GUO Ming-hui. Ansys Application in Wood Structural Components[J]. World Forestry Research, 2016, 29(3): 75—79.
- [2] 张祥,程玉龙,王巍. Ansys环境下座椅的结构设计与强度分析[J]. 山西建筑,2016,42(28): 216—217.
ZHANG Xiang, CHENG Yu-long, WANG Wei. Structural Design and Strength Analysis of Ansys Environment[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(28): 216—217.
- [3] 谭大松. 大型机电产品包装箱力学性能研究与结构优化设计[D]. 南京:南京林业大学,2015.
TAN Da-song. Mechanical Properties and Structural Optimization Design of the Packing Box of Electromechanical Products[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.
- [4] 吴清一,靳伟. 中国托盘手册[M]. 北京:中国财富出版社,2014.
WU Qing-yi, JIN Wei. China Pallet Handbook[M]. Beijing: China Fortune Press, 2014.
- [5] RATNAM M M, LIM J H, ABDUL K H. Study of Three-dimensional Deformation of a Pallet Using Phase-shift Shadow Moire and Finite-element Analysis[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(1): 9—17.
- [6] KARACAIL O. Explicit Analysis of Cyclic Fatigue Behavior of Poplar Wood Pallet by Computational Engineering-von Mises Yield, Goodman and N-S Diagram Approach[J]. Acta Physical Polonica, 2017, 131(3): 457—459.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 巩桂芬,李毅,孔腾华. 托盘货架载荷仿真及计算公式推导[J]. 物流科技,2018,41(1): 65—67.
GONG Gui-fen, LI Yi, KONG Teng-hua. Pallet Shelf Load Simulation and Derivation of Calculation Formula Fork Test and Finite Element Analysis for OSB Board Pallet[J]. Logistics Sci-Tech, 2018, 41(1): 65—67.
- [10] 许京荆. Ansys Workbench工程实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2015.
XU Jing-ji. Detailed Explanation of Ansys Workbench Engineering Example[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
- [11] 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].
- [12] 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: Experimental Method[S].
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 凌桂龙,沈再阳. Ansys 结构单元与材料应用手册

- [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- LING Gui-long, SHEN Zai-yang. Ansys Structural Units and Materials Applications Handbook[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [16] 杨茜. 压力管道腐蚀缺陷的非线性有限元分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2014.
- YANG Qian. Non-linear Finite Element Analysis for the Corrosion Defects of Pressure Pipelines[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2014
- [17] 王泽鹏, 胡仁喜, 康士廷, 等. Ansys Workbench 14.5 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- WANG Ze-peng, HU Ren-xi, KANG Shi-ting, et al. Ansys Workbench 14.5 Finite Element Analysis from Entry to Master[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2014.

Labthink 采用重复性试验验证压力差对材料透气量测试无影响

近年来, 随着包装材料种类的增多, 尤其是含有镀层、涂层类材料的研发及应用, 引发了业内对压差法气体透过率测试方法是否对样品阻隔性产生影响的关注。关注点大多集中在试验过程中试样两侧的压力差是否会破坏材料结构, 导致镀层、涂层产生裂纹、针孔等缺陷, 或者是否会使材料发生形变, 改变材料厚度或测试面积等方面。

根据多年的测试经验, 若压力差对材料结构产生破坏, 那么会使其气体透过量的测试结果出现较大偏差, 随着压力差对材料作用时间的延长, 气体透过量会呈现较为明显的变化趋势。基于这一思路, Labthink 包装安全检测中心与山东省产品质量监督检验研究院研究员设计了一组重复性试验, 即利用压差法原理在相同的测试环境与抽真空时间下对 PET、VMPET、KPET 等 3 种样品的氧气透过量连续重复测试 5 次, 通过数据的标准偏差和波动情况, 为大家细致解读上述疑问。

压差法气体透过量测试重复性验证

试验对象选用了厚度均匀且无质量问题的 PET 薄膜、VMPET 薄膜、KPET 薄膜。依据 GB/T 1038—2000《塑

表 1 3 种样品氧气透过量重复测试的试验结果

样品	氧气透过量/(cm ³ ·m ⁻² ·(24 h) ⁻¹ ·(0.1 MPa) ⁻¹)					相对标准偏差/%	
	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次		
PET薄膜	54.774	52.281	54.361	53.748	54.243	53.881	1.79
VMPET薄膜	0.913	0.861	0.876	0.943	0.903	0.899	3.57
KPET薄膜	6.916	7.124	7.038	6.871	6.781	6.946	1.96

试验结束后, 3 种不同材质样品的测试区域均未出现明显弯曲变形或者蒸镀层被破坏的现象, 样品的氧气透过量由大到小依次为 PET、KPET、VMPET, 这种阻氧性能的高低主要与样品结构有关, 与普通的 PET 材料相比, KPET、VMPET 样品因 PET 薄膜表面蒸镀或涂布阻隔性更高的铝层、PVDC 材料而显著提高了阻隔性能。这种因材料结构所引起的阻隔性趋势也在基于压差法原理的重复性测试过程中未被影响, 进一步说明了压差对含有镀层或涂层的材料没有明显影响。

压差法气体透过量测试方法 兼顾高透过量与高阻隔材料

当前, 包装材料气体透过量测试主要采用 2 种方法: 压差法和等压法。压差法是测试包装材料气体透过量的常用方法之一, 利用薄膜两侧的压力差实现气体从薄膜的高压侧向低压侧渗透, 并利用压力传感器监测低压侧压力随时间的变化情况, 计算薄膜的气体透过量。该方法应用时间最为悠久。

随后, 衍生出等压法气体透过量测试方法, 采用库仑计法, 试验过程中薄膜两侧为压力相等的待测气体氧气与载气氮气, 氧气在浓度差的作用下通过试样渗透到氮气侧, 并被氮气携带至库仑传感器处进行定量分析, 从而得到试样的氧气透过量。

料薄膜和薄片气体透过性试验方法 压差法》, 采用 Labthink VAC-V2 压差法气体渗透仪对从 3 种薄膜裁取的 φ97 mm 的试样进行氧气透过量的重复测试。

具体方法: 装样, 在仪器的 3 个测试腔周边均匀涂抹一层真空油脂, 并在测试区域各放置一片直径为 65 mm 的滤纸, 将裁制的 3 片试样分别放置在设备的 3 个测试腔上, 轻轻按压试样与测试腔周边接触位置, 去除测试腔与试样间的气泡, 然后拧紧上腔; 试验, 在控制软件上设置试样名称、试验模式、试验温度、湿度、抽真空时间等参数信息, 打开真空泵, 点击试验开始选项, 试验开始。待设备按照设定参数完成试验后, 记录设备显示试验结果; 重复测试, 在控制软件上设置试样名称、试验模式、试验温度、湿度、抽真空时间等参数信息, 打开真空泵, 点击试验开始选项, 试验开始, 待设备按照设定参数完成试验后, 记录设备显示试验结果。

从表 1 中每种样品的试验结果来看, 随着测试次数的增多, 样品各次测试结果间并未出现明显增加或减小的趋势, 且相对标准偏差在 2%~4% 内。由此说明 3 种样品氧气透过量测试结果的平行性与重复性较好, 离散性小。

由于测试原理的不同, 2 种方法在测试的气体种类, 采用的传感器类型, 以及测试范围方面存在较大的差异。

在气体透过量的 2 种测试方法中, 压差法监测的是气体压力变化情况, 可测试气体不受传感器的限制, 可用于多种不同种类气体的渗透性能测试, 适用范围极广; 非消耗型的压力传感器决定了该原理方法可用于高透气性材料的测试, 且设备使用寿命长。另外, 随着压力传感器技术的不断发展, 压差法原理设备的检测精度已达到 10^{-2} cm³/(m²·24 h·0.1 MPa)。由此可见, 压差法原理的透气性测试方法是一种可同时兼顾高透过量与高阻隔性材料、可测试多种气体渗透性能的试验方法。

从历史角度来看, 压差法的通用性以及非损耗性等优势使其一直作为气体透过量测试的基础方法。在基于压差法原理的试验过程中, 薄膜两侧的 0.1 MPa 压差并不会影响含有镀层、涂层类薄膜材料的结构及其阻隔性能。同样, 压差法也适用于稳定材质的薄膜材料及相应的含有镀层、涂层薄膜材料的气体透过量测试。

济南兰光机电技术有限公司 于佳佳、陈欣
山东省产品质量监督检验研究院 高翠玲、王恬