

结构设计制造

基于正交试验和有限元法的木支撑结构优化设计

李志强^{a,b,c}, 樊博^{a,b,c}, 张素风^{a,b,c}

(陕西科技大学 a.陕西省造纸技术及特种纸品开发重点实验室 b.中国轻工业纸基功能材料
重点实验室 c.轻化工程国家级实验教学示范中心(陕西科技大学), 西安 710021)

摘要: 目的 通过正交试验和有限元法得到一组强度和稳定性最优的木支撑结构。方法 以某胶合板木支撑结构为研究对象,采用3D建模软件IronCAD建立木支撑结构模型,利用正交试验的方法设计 $L_9(3^4)$ 的正交试验表。在此基础上,借用有限元软件Ansys Workbench对正交试验确定的方案进行静力学分析,将仿真结果归纳整理并进行极差分析和综合平衡,得出影响木支撑结构性能的主次因素,确定最优的试验方案。结果 通过极差分析,得到了影响木支撑结构性能的主次因素,由主到次依次为两侧加强板距离中心的距离、开槽圆弧的圆心距离中间板上端的距离、加强板的长宽比,继而通过综合平衡法确定了最优设计方案参数(即开槽圆弧的圆心距离支撑板上端65 mm,两侧加强板距离中心的距离为280 mm,加强板的长宽比为2.5:2)。经过与原方案对比,最大应力值降低了16%,一阶模态的频率提高了58.2%,最大变形量降低了0.9%。结论 采用正交试验法和有限元法寻找木支撑结构的最优化设计是可行的,将结果应用到木支撑结构设计中,可以满足要求,并能得到合理的开槽深度和两侧加强板合理的排布位置。

关键词: 木支撑; 正交试验; 有限元

中图分类号: TB482.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)19-0109-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.19.016

Optimization of Wooden Support Structure Based on Orthogonal Experiment and Finite Element Method

LI Zhi-qiang^{a,b,c}, FAN Bo^{a,b,c}, ZHANG Su-feng^{a,b,c}

(a.Shaanxi Provincial Key Laboratory of Papermaking Technology and Special Paper Development b.Key Laboratory of Paper Based Functional Materials of China Nation Light Industry c.National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The paper aims to obtain a group of wood supporting structures with optimal strength and stability through orthogonal test and finite element method. A certain plywood wood support was taken as the research object, the 3D modeling software IronCAD was adopted to establish a wood support model, and an orthogonal test table of $L_9(3^4)$ was designed with the orthogonal test method. On this basis, the finite element software Ansys Workbench was used to carry out statics analysis on the program determined by orthogonal test. The simulation results were summarized and sorted out, range analysis and comprehensive balance were carried out to get the primary and secondary factors affecting the performance of the wooden support structure, and the optimal test program was determined. Through the range analysis, the primary and secondary factors affecting the performance of the wooden support structure were obtained. They were the distance from the center to stiffeners on both sides the distance from the center of the slotted arc to the intermediate plate end, and the aspect ratio of the stiffener from the main to the secondary. Then, the optimal design parameters were deter-

收稿日期: 2019-05-07

作者简介: 李志强(1976—),男,陕西科技大学副教授,主要研究方向为绿色包装技术。

通信作者: 张素风(1972—),女,博士,陕西科技大学教授、博导,主要研究方向为纤维新材料与纸基复合材料。

mined by the comprehensive balance method (the center of the slotted arc was 65 mm from the upper end of the support, the distance between the two sides of the stiffener was 280 mm from the center, and the aspect ratio of the stiffener was 2.5 : 2). Compared with the initial scheme, the maximum stress value was reduced by 16%, the frequency of the first-order mode was increased by 58.2%, and the maximum deformation was reduced by 0.9%. It is feasible to find the optimal design of the wooden support through the orthogonal test method and the finite element method. Application of the results to the wooden support design can meet the requirements and obtain a reasonable groove depth and a reasonable arrangement position of the reinforcing plates on both sides.

KEY WORDS: wood support; orthogonal test; finite element

通常在使用木箱包装时,对于质量相对较大且形状不规则的产品来说,产品底部应该使用支撑部件,防止其在运输过程中倾倒或者摇晃^[1]。设计人员往往都是根据以往经验进行设计,如何设计一个强度满足要求、成本合理的支撑,具有重要意义。将正交试验和有限元法结合应用到木支撑结构设计上来,在减少试验次数和不浪费大量样品的情况下,完成试验的模拟和结构的合理化设计。

邱鹏飞和王泉中基于 Ansys 有限元软件针对大型机电产品包装箱底架,对比研究了在3种不同材料下的包装箱底架的变形和应力变化情况^[2];谭大松、王泉中对大型机电产品包装箱进行了不同工况下的理论分析和有限元仿真分析,得到了其应力和变形量分布情况^[3];宋海燕、杨帆基于 Ansys 对拼装箱的镀锌钢带厚度、胶合板厚度、胶合板材质,在不同水平下进行了堆码仿真分析和跌落仿真分析^[4];A. Arswendy, Torgeir Moan 通过实验和有限元分析,对胶合板构件压碎和屈曲行为进行了研究^[5];Yifei Wu, Hongxia Zhao 采用多因素分析的方法对喷射器的性能进行了研究,并通过五因素和四水平正交试验对喷射器的结构进行了优化,得到了各因素对喷射器性能的敏感性^[6]。

李光、王文雅等通过 Ansys Workbench 建立快装箱的几何模型和有限元模型,对快装箱进行多目标优化设计,分析对比了优化前后的结果^[7];卢军、陈明等将有限元法和最优化方法结合起来,采用正交试验设计和响应面法来确定法兰结构参数的几何尺寸组合^[8];唐德强、张国梁等应用正交试验法对稻壳模压夹具中的夹板模型进行了有限元分析,通过极差分析获得了影响夹板结构性能因素的主次顺序,并且结合有限元模型的验证分析确定了夹板结构的合理方案^[9];沈丹丹、胡万晓等研究了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^[10];袁玮采用正交试验设计方法分析了弹药密封包装内部的湿度变化规律,得出了三因素对密封包装内部湿度影响的强弱程度,并检验了此结果的正确性^[11]。王涛、李航通过优化B柱结构来改善整车轻量化的问题,对B柱结构和材料进行了优化设计^[12]。宋庭新、刘么和通过正交试验选择了缓冲包装件的9组不同的结构参

数,并进行跌落冲击试验和随机振动试验,通过对试验信号分析,最终优选出了动态性能最佳的结构参数^[13]。

文中针对某公司提供的胶合板木支撑,基于正交试验方法寻找最优的设计参数,利用有限元法对选出的方案进行静力学分析,验证其可行性。

1 设计基础

1.1 建立模型

包装产品为某公司的金属管道连接,材质为不锈钢,质量约为800 kg,最大外尺寸为1378 mm×1338 mm×615 mm。在进行包装设计时,设计人员根据经验设计了一款支撑结构,见图1,分为中间的支撑板(1480 mm×380 mm×12 mm)和两边的加强板(200 mm×200 mm×12 mm)以及底部托盘。为了契合产品外观形状,支撑板上设有开槽圆弧,圆心距离中间板上端为125 mm。

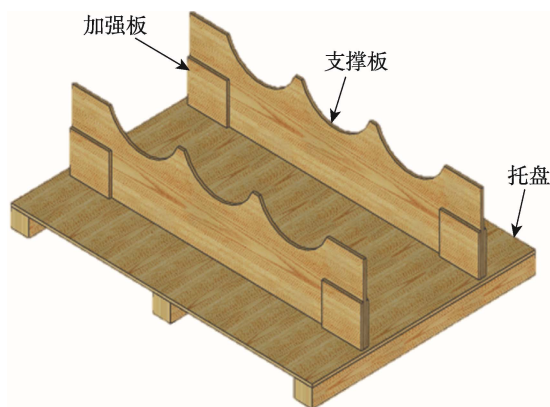


图1 木支撑件模型
Fig.1 Wooden support model

1.2 模型试验参数确定

胶合板试验方案主要参考 GB/T 17657—1999^[14]中规定的方法要求进行取样测试,试验样品选取常用的C级杨木胶合板,密度为580 kg/m³,样品尺寸为290 mm×50 mm×12 mm,数量为6个。

对试验数据处理依照 GB/T 17657—1999 中的公式，分别计算出试件的静曲强度和弹性模量值：

$$\delta_b = \frac{3P_{\max}l}{2bh^2}$$

(1)

$$E_b = \frac{l^3}{4bh^3} \times \frac{\Delta f}{\Delta s}$$

(2)

式中： δ_b 为静曲强度（MPa）； $P_{\max}$ 为试样破坏时的最大载荷（N）； l 为支座间的跨度距离（mm）； b 为试样的宽度（mm）； h 为试样的厚度（mm）； E_b 为弹性模量（MPa）； Δf 为载荷变形图中直线段的载荷增量（N）； Δs 为载荷变形图中直线段的变形量（mm）。

根据试验所测数据计算得：厚度为 12 mm，顺纹弹性模量为 6605.47 MPa，顺纹静曲强度为 56.53 MPa。

2 正交试验设计与有限元分析

2.1 建立因素水平表

根据木支撑的初步设计，选择以下 3 个设计变量：A 为开槽圆弧的圆心距离中间支撑板上端的距离；B 为两侧加强板距离中心的距离；C 为加强板的长宽比。

每个因素选择 3 个水平，分别为：开槽圆弧的圆心距离中间支撑板上端的距离：125，95，65 mm；两侧加强板距离中心的距离：0，280，540 mm；加强板的长宽比：2：2.5，1：1，2.5：2。

试验指标： Y_1 最大变形量（ μm ）， Y_2 最大应力（kPa）， Y_3 一阶模态（Hz）。

根据确定的试验因素和水平，试验选用 $L_9(3^4)$ 正交表^[15]（见表 1），每一个试验方案确定之后（见表 2），均采用 Ansys Workbench 进行静力学试验模拟。

2.2 有限元分析

根据表 2 确定的 9 组试验方案，将对应的因素水平带入各个试验方案中，利用 3D 建模软件 IronCAD 一一建立模型。模型建立完成后，分别代入 Ansys Workbench 中进行静力学分析，获取变形、应力和模态结果。这里以试验方案 $A_1B_1C_1$ 为例描述有限元模拟过程。

表 1 因素水平
Tab.1 Factor level

水平	A 圆弧的圆心距离中间支撑板上端的距离/mm	B 加强板距离中心的距离/mm	C 加强板的长宽比
1	125	0	2：2.5
2	95	280	1：1
3	65	540	2.5：2

表 2 试验方案
Tab.2 Test plan

试验序列	因素				试验方案
	A	空列	B	C	
1	1	1	1	1	$A_1B_1C_1$
2	1	2	2	2	$A_1B_2C_2$
3	1	3	3	3	$A_1B_3C_3$
4	2	1	2	3	$A_2B_2C_3$
5	2	2	3	1	$A_2B_3C_1$
6	2	3	1	2	$A_2B_1C_2$
7	3	1	3	2	$A_3B_3C_2$
8	3	2	1	3	$A_3B_1C_3$
9	3	3	2	1	$A_3B_2C_1$

2.2.1 木支撑建模与网格划分

由于包装产品具有对称性，所以底部 2 个支撑受力情况完全一样，选取其中的一个木支撑，利用 IronCAD 建立模型，并将模型存为 x_t 格式。得到的有限元模型见图 2，其中加强板尺寸为 250 mm×200 mm×12 mm，距离中心 0，支撑板尺寸为 1480 mm×380 mm×12 mm，板上圆弧的直径是 185 mm，圆心距离支撑板上端 125 mm。在软件中创建静力分析和模态分析模块，导入 x_t 模型，并将支撑板与加强板之间、支撑板与底板之间、加强板与底板之间的接触设置为绑定接触。弹性模量与前面试验数据一致。网格划分选取 Hex Dominant 六面体主导的方法^[10]，网格尺寸设置为 10 mm。最终生成 118 086 个网络节点和 20 688 个网格单元。

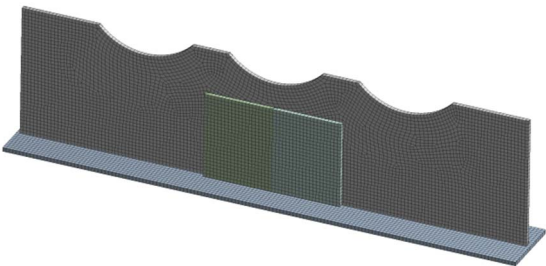


图 2 有限元模型
Fig.2 Finite model

2.2.2 加载边界条件

根据产品放置在木支撑上的受力情况，经受力分析可知，每个支撑承受压力分别为 4 kN，方向朝下，因此选取受力的 3 个面，施加方向朝下的力（Force）4 kN。在实际的过程中，支撑件的底部会固定在托盘上，因此对支撑件底部采取固定约束（Fixed Support），见图 3。

2.2.3 有限元结果

经过对方案 $A_1B_1C_1$ 进行静力分析和模态分析，得到其变形云图见图 4，最大变形位置出现在两边的

圆槽上,而中间位置因为为加强板的作用,变形最小。其应力云图见图 5,最大应力位置出现在两边圆槽的边缘位置上,而且应力直接传递到了最底部,而中间位置的圆槽因为为加强板的存在,起到了分担的作

用。其一阶模态见图 6,由于加强板位于中部,所以呈现出两边摇摆的振型。

其他 8 组试验方案静力分析和模态分析过程同上所述,最终得到的结果见表 3。

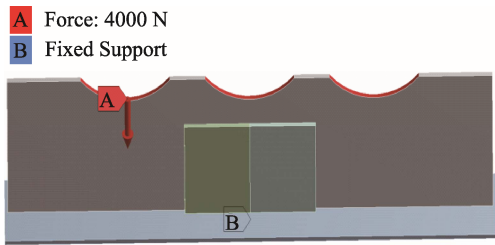


图 3 结构受力模型
Fig.3 Support stress model

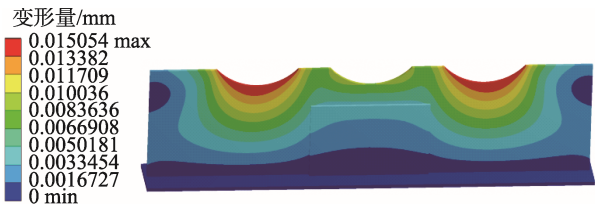


图 4 结构变形云图
Fig.4 Deformationcontours of plywood

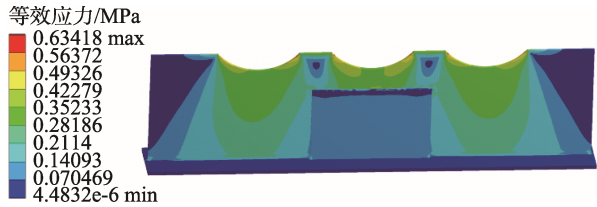


图 5 结构应力云图
Fig.5 Stress contours of plywood

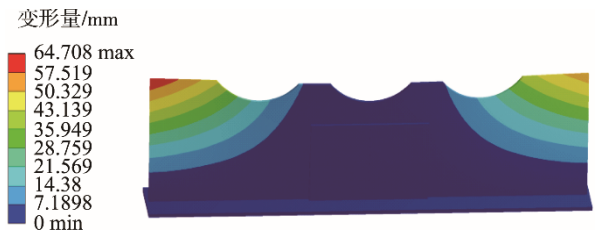


图 6 结构一阶模态图
Fig.6 First order mode of plywood

表 3 正交试验方案和试验结果
Tab.3 Orthogonal test scheme and test results

试验序列	因素				指标		
	A	空列	B	C	最大变形量/ μm	最大应力/kPa	一阶模态/Hz
1	1	1	1	1	15.05	634.18	60.68
2	1	2	2	2	15.50	632.83	87.48
3	1	3	3	3	16.03	633.91	67.24
4	2	1	2	3	14.33	545.21	95.18
5	2	2	3	1	15.46	545.72	71.65
6	2	3	1	2	13.37	552.10	59.54
7	3	1	3	2	16.80	534.00	78.00
8	3	2	1	3	14.12	532.43	60.90
9	3	3	2	1	15.90	531.88	93.50

3 结果分析

3.1 正交试验结果极差分析

对试验结果进行极差分析,见表 4。

从表 4 可以看出,不同的试验指标所对应的最优方案是不同的,但是通过综合平衡法可以得到综合的最优方案,平衡过程如下所述。

因素 A,对于后 2 个指标来说都是取 A_3 为最佳水平,而对于等效应力来说 A 因素为最主要因素,在选择最优水平时应重点考虑,对于最大变形指标来说 A_2 是最好的水平,但从 k_i 可以看出,当 A 取 A_2 ,

A_3 时最大变形量相差不大,并从极差可以看出, A 为较次要因素,所以根据多数倾向和 A 因素对于不同指标的重要程度来看,选择 A_3 。

因素 B,对于最大变形和一阶模态指标来说, B 因素为最主要因素,但是在相同水平上影响程度不同;但对于一阶模态指标来说, B_1 和 B_2 的值相差较大,而最大变形量在这 2 个水平上变化不大,且从最大等效应力来看, B 因素为较次要因素,选取 B_2 为最优水平。根据 B 因素对于不同指标的重要程度来看,选取 B_2 。

因素 C,对于 3 个指标而言,因素 C 均处于最次要位置,选取哪一个对 3 个指标的影响都较小,前 2 个指标都是以 C_3 为优,所以选取 C_3 。

表 4 试验结果极差分析
Tab.4 Range analysis of test results

指标		A	空列	B	C
最大 变形 量	K1	46.58	46.18	42.54	46.41
	K2	43.16	45.08	45.73	45.67
	K3	46.82	45.30	48.29	44.48
	k1	15.53	15.39	14.18	15.47
	k2	14.39	15.03	15.24	15.22
	k3	15.61	15.10	16.10	14.83
	极差 R	1.22	0.37	1.92	0.64
	因素主次	B, A, C			
	最优方案	$A_2B_1C_3$			
最大 应力	K1	1900.92	1713.39	1718.71	1711.78
	K2	1643.03	1710.98	1709.92	1718.93
	K3	1598.31	1717.89	1713.63	1711.55
	k1	633.64	571.13	572.90	570.59
	k2	547.68	570.33	569.97	572.98
	k3	532.77	572.63	571.21	570.52
	极差 R	100.87	1.50	2.93	2.38
	因素主次	A, B, C			
	最优方案	$A_3B_2C_3$			
一阶 模态	K1	163.19	177.54	137.81	172.39
	K2	171.62	166.71	213.25	170.60
	K3	177.58	168.15	161.34	169.41
	k1	54.40	59.18	45.94	57.46
	k2	57.21	55.57	71.08	56.87
	k3	59.19	56.05	53.78	56.47
	极差 R	4.80	3.61	25.15	0.99
	因素主次	B, A, C			
	最优方案	$A_3B_2C_1$			

综上可以得到主次因素依次为：B 两侧加强板距离中心的距离、A 开槽圆弧的圆心距离中间板上端距离、C 加强板的长宽比，最优方案为 $A_3B_2C_3$ ，即开槽圆弧的圆心距离支撑板上端为 65 mm，两侧加强板距离中心的距离为 280 mm，加强板的长宽比为 2.5：2。

3.2 仿真结果对比

通过正交试验的方法得到了最优方案为 $A_3B_2C_3$ ，并以最优方案对应的参数建立有限元模型，参照 2.2 节的仿真分析步骤，最终得到 3 个指标的数值结果，并与初始方案得到的值进行比较。

由图 1 可以看出，原方案的木支撑 3 个因素水平为：开槽圆弧圆心距离支撑板上端 125 mm，加强板位置排布在支撑板两端，取材时长宽比为 1：1。而经过正交试验的方法得到的方案，3 个因素水平为开槽圆弧圆心距离支撑板上端 65 mm，加强板位置排布在支撑板两端上两端开槽圆弧的下方，取材时长宽比为 2.5：2。仿真结果见表 5。通过表 5 数据对比可知，

优化后的方案在最大变形量上降低了 0.9%，而最大等效应力降低了 16%，一阶模态的值增加了 58.2%，说明正交试验得出的最优方案具有可靠性。

表 5 仿真结果对比
Tab.5 Comparison of simulation results

方案	最大变形量 / μm	最大应力 /kPa	一阶模态 /Hz
原方案	16.03	633.26	63.78
优化后	15.87	527.15	100.21

4 结语

采用正交试验法，基于目前的方案设计，选取三因素三水平，建立 $L_9(3^4)$ 的正交试验表，确定了 9 个试验方案。借用有限元软件，将由正交试验表得到的 9 个方案进行静力分析和模态分析，得到了最大变形量、最大等效应力和一阶模态的值。运用极差分析和综合平衡法，得出了试验因素的主次顺序，确定了最优的试验参数。并将最优方案的仿真结果与原方案对比，由最大变形量、最大应力和一阶模态结果可知，优化后的方案均优于原方案。

根据以上分析，在木支撑结构设计时，在满足基本设计要求的前提下，应首先考虑两侧加强板的位置，最优位置为开槽部位的下方，其次开槽的深度应在允许的范围内取最大值，最后在考虑加强板取材时长度方向应大于宽度方向。这样才能够在材料方案形式不变的情况下，更大程度地满足运输过程中的强度和稳定性要求，也为类似的方案设计提供参考依据。

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. Logistics Transportation Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.

[2] 邱鹏飞, 王泉中, 蒋身. 基于 Ansys 的大型机电产品包装箱底架有限元分析[J]. 木材加工机械, 2014, 25(1): 45—48.
QIU Peng-fei, WANG Quan-zhong, JIANG Shen. Finite Element Analysis of the Bottom Frame of Large Mechanical and Electrical Products Packaging Box Based on Ansys[J]. Wood Processing Machinery, 2014, 25(1): 45—48.

[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. Research on Mechanical Properties and Structural Optimization Design of Large Mechanical and Electrical Product Packing Boxes[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.

[4] 宋海燕, 杨帆, 王斌. 基于 Ansys 的拼装箱力学性能

- 研究及优化设计[J]. 包装工程, 2016, 37(3): 25—29.
- SONG Hai-yan, YANG Fan, WANG Bin. Research and Optimization Design of Mechanical Properties of Container Assembly Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 25—29.
- [5] ARSWENDY A, MOAN T. Strength and Stiffness Assessment of an LNG Containment System—Crushing and Buckling Failure Analysis of Plywood Components[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 48: 247—258.
- [6] WU Yi-fei, ZHAO Hong-xia. Optimization Analysis of Structure Parameters of Steam Ejector Based on CFD and Orthogonal Test[J]. Energy, 2018, 151.
- [7] 李光, 王文雅, 孙彬青, 等. 基于 Ansys Workbench 的快装箱多目标优化设计[J]. 包装工程, 2016, 37(23): 29—33.
- LI Guang, WANG Wen-ya, SUN Bin-qing, et al. Multi-Objective Optimization Design of Fast Packing Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(23): 29—33.
- [8] 卢军, 陈明, 彭泽军, 等. 基于响应面法的双楔角环垫螺栓法兰接头多目标优化研究[J]. 压力容器, 2018, 35(8): 24—32.
- LU Jun, CHEN Ming, PENG Ze-jun, et al. Research on Multi-Objective Optimization of Double-Wedge Angle Ring Gasket Bolt Flange Joint Based on Response Surface Method[J]. Pressure Vessel, 2018, 35(8): 24—32.
- [9] 唐德强, 张国梁, 蔡小娜, 等. 基于正交试验和有限元法的稻壳模压夹具的优化设计[J]. 农机化研究, 2013, 35(1): 98—100.
- TANG De-qiang, ZHANG Guo-liang, CAI Xiao-na, et al. Optimal Design of Rice Husk Mould Press Fixture Based on Orthogonal Test and Finite Element Method [J]. Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(1): 98—100.
- [10] 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. Influence Factors of Finite Element Analysis Accuracy of Wooden Pallet[J]. Packaging Engineering, 2008, 39(17): 12—18.
- [11] 袁玮. 正交试验设计法研究弹药密封包装内部湿度变化规律[J]. 包装工程, 2007, 28(2): 50—51.
- YUAN Wei. Study on Variation Rule of Internal Humidity of Ammunition Sealing Packaging by Orthogonal Test Design[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(2): 50—51.
- [12] 王涛, 李航. 基于正交试验法的汽车 B 柱结构优化设计[J/OL]. 机电工程, 2019(3): 302—306.
- WANG Tao, LI Hang. Optimal Design of Automotive B-Column Structure Based on Orthogonal Test Method [J/OL]. Mechatronics Engineering, 2019(3): 302—306.
- [13] 宋庭新, 刘么和, 朱若燕. 基于动态性能测试和正交试验的缓冲包装结构优化设计[J]. 包装工程, 2006, 27(5): 56—57.
- SONG Ting-xin, LIU Yao-he, ZHU Ruo-yan. Buffer Packaging Structure Optimization Design Based on Dynamic Performance Test and Orthogonal Test[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(5): 56—57.
- [14] GB/T 17657—1999, 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S].
- GB/T 17657—1999, Test Method For Physical and Chemical Properties of Wood-Based Panels and Veneered Panels[S].
- [15] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- LI Yun-yan, HU Chuan-rong. Experimental Design and Data Processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.