

铝合金托盘有限元分析及优化设计

李志强，李俊，刘方凯
(陕西科技大学，西安 710021)

摘要：目的 通过对不同托盘结构进行分析，选出满足托盘承载性能要求的轻量化的铝合金托盘结构。
方法 利用 SolidWorks 软件对不同类型托盘进行三维建模，并用 Ansys Workbench 对其进行静力分析，对比不同类型托盘应力、变形及安全系数，选出结构最优的铝合金托盘，并对其尺寸进行优化。**结果** 方案 C 的托盘质量、纵梁应力、纵梁变形和纵梁安全系数分别为 19.68 kg, 247.39 MPa, 3.41 mm 和 1.13，优于其他类型托盘，对其铺板厚度及纵梁相关尺寸进行优化后，其质量减少 22%，纵梁安全系数提高 20.4%。**结论** 铺板厚度为 1 mm，垫块厚度为 1.5 mm，以及其他相关尺寸分别为 5, 5, 30 mm 的方案 C 铝合金托盘为载荷一定条件下的最优结构。

关键词：铝合金托盘；静力分析；安全系数；优化设计

中图分类号： TB482 **文献标识码：**A **文章编号：** 1001-3563(2018)05-0126-06

DOI： 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.024

Finite Element Analysis and Optimum Design of Aluminum Alloy Pallet

LI Zhi-qiang, LI Jun, LIU Fang-kai
(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to select a lightweight aluminum alloy pallet structure satisfying the requirements of pallet load-carrying performance based on the analysis of different pallet structures. 3D modeling of different types of pallets was carried out with SolidWorks software, the static analysis was carried out with Ansys Workbench, and the stress, deformation and safety factor of different types of pallets were compared. Then, the optimal aluminum alloy pallet was selected and its size was optimized. In scheme C, the pallet quality, and the stress, deformation and safety factor of the stringer were 19.68 kg, 247.39 MPa, 3.41 mm and 1.13, respectively, better than other types of pallets. After the thickness of top deck and the relevant sizes of the stringer were optimized, its mass was reduced by 22% and the safety factor of the stringer was increased by 20.4%. The aluminum alloy pallet in scheme C in which the thicknesses of the top deck and cushion are 1 mm and 1.5 mm, and other relevant sizes are 5, 5 and 30 mm respectively is the optimal structure when the load remains constant.

KEY WORDS: aluminum alloy pallet; static analysis; safety factor; optimum design

托盘是用于集装、堆放、搬运和运输放置作为单元负荷的货物和制品的水平平台装置，具有单元化、集装化、高层码垛、充分利用空间等优点，广泛应用于生产、运输、仓储和流通等领域。目前，托盘制作材料呈现出多元化趋势，如木质、金属、塑料、塑木等。其中，木质托盘应用范围广泛，价格便宜，精度高，但易受潮，不易清洁，回收成本高。金属托盘，一般为钢托盘，适合叉车作业，方便存取，承载性能

强，环保，但其自身质量较大，成本较高且易被腐蚀。塑料托盘，操作方便，使用安全，易于清洁，但其破损后可修复性很差。纸托盘制作灵活性较大，但防潮、防湿能力较差，使用方式落后，不利于国际化。塑木托盘集木托盘、塑料托盘优点于一体，易清洗，韧性高，易加工^[1]，对于环保及承载要求而言，金属托盘具有更长久的经济价值。近年来越来越多的学者专家对托盘结构性能进行研究，M.M.Ratnam、彭彪等^[2—5]

学者将有限元分析方法、参数化设计方法应用于木质、塑料和塑木等托盘的力学性能研究,通过对仿真得到的等效应变、等效应力和总变形量数据进行分析,进一步了解托盘结构承载性能,并对其结构进行改进。洪芳华、朱利军等^[6]针对电力物资的多样化的特点设计符合运输环境的可调式两用钢制托盘,不但可以适应仓储自动化的要求,更适用于自动化立体库的仓储要求,节约仓储面积。针对现有金属托盘自重大、易腐蚀的弊端,结合现有托盘性能研究方法,考虑物流运输条件,文中拟对以铝合金材质为主体的金属托盘进行静力学性能分析,并对其结构进行优化。

1 模型建立及有限元分析

1.1 托盘基本参数及模型建立

利用SolidWorks软件对托盘进行三维建模,其结构见图1。托盘整体尺寸为1200 mm×1000 mm,其中边面板尺寸为1000 mm×134 mm×10 mm,上连板尺寸为1000 mm×120 mm×10 mm,纵梁尺寸为1200 mm×100 mm×115 mm,下铺板尺寸为1200 mm×96 mm×13 mm,顶铺板、纵梁均为空心结构,厚度为2 mm。

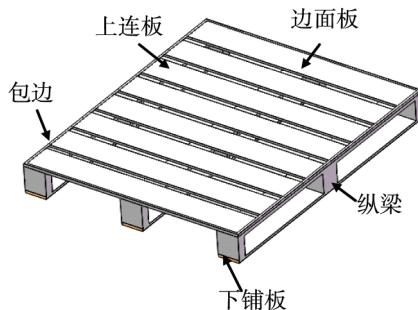


图1 托盘结构
Fig.1 Pallet construction

托盘主要材料为铝合金,密度为2770 kg/m³,弹性模量为71 GPa,泊松比为0.33,屈服强度为280 MPa。木制下铺板,选用松木,密度为559 kg/m³,弹性模量为10 GPa,泊松比为0.49,屈服强度为70 MPa^[7-8]。

1.2 有限元仿真分析

静态载荷是导致托盘产生破坏的主要原因^[5],托盘在使用过程中主要是各构件受力超过材料屈服强度而造成产品损坏。根据《GB 10486—89 铁路货运钢制平托盘》^[9]要求,钢托盘载质量为1000 kg,在存放时应能堆码4层,确定模拟其存放堆码工作载荷压力为39 200 N。利用有限元软件Ansys Workbench,导入托盘模型,对其进行静力分析。托盘结构采用自动网格划分方式,共有单元数125 066,节点数302 019,见图2。



图2 托盘有限元网格模型
Fig.2 Finite element grid model of the pallet

以铝合金、松木屈服强度作为有限元分析边界条件,对托盘下表面进行固定约束,在托盘上表面施加均布载荷,得到顶铺板和纵梁的应力分布见图3^[10]。由图3可知,托盘最大应力出现在顶铺板与纵梁结合部位为300.65 MPa,大于材料屈服强度为280 MPa,将导致托盘的损坏。纵梁板与垫块结合部位应力达到263.56 MPa,接近材料屈服强度,导致该托盘结构安全系数过低,需对其顶铺板和纵梁结构进行改进,减小应力集中现象,提高托盘安全系数。下铺板所受应力、变形和安全系数分别为6.73 MPa,0.01 mm和10.40,远小于木材屈服强度,符合联运托盘挠度要求^[11],对其结构予以保留。

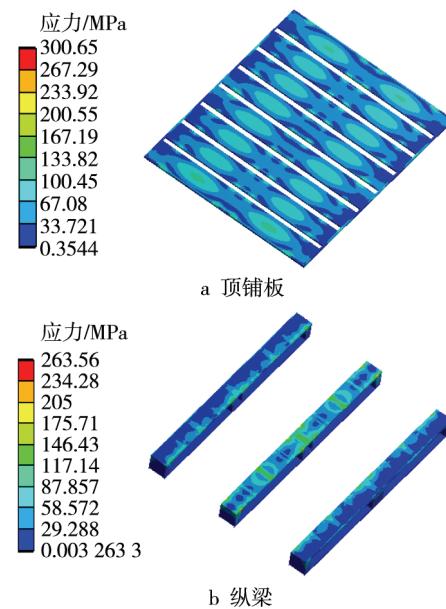


图3 应力云图
Fig.3 Stress contour

2 托盘结构尺寸优化设计

2.1 托盘结构优化

托盘顶铺板截面分为a,b等2种,纵梁分为c,d,e等3种,见图4。针对以上托盘各部分结构进行组

合，并分析比较不同组合托盘结构的应力、变形和安全系数，结果见表1。由表1可知，各类托盘模型，其顶铺板变形量与纵梁变形量均满足托盘挠度要求。方案A主要改变托盘顶铺板结构（由图4a改为图4b），同时保持纵梁（图4c）不变，与原方案比较，其铺板应力下降53%，变形量下降32%，同时应力安全系数提高112%，有效地降低了铺板上的应力集中现象。方案B在方案A的基础上，保持托盘顶铺板（图4b）不变，改变其纵梁结构，添加三角形肋板（图4d），与方案A相比，其顶铺板应力变化较小，纵梁应力上升15%，纵梁安全系数降低。方案C保持方案A中的顶铺板结构（图4b），更换其纵梁结构为（图4e），与方案A相比，其纵梁应力降低5%，

安全系数提高5%，对于降低纵梁上的应力起到一定的作用。由此可得，b类截面和e类纵梁结构对于托盘应力安全系数的提高具有一定的改善作用，因此设计托盘结构选用b,e组合的方案C托盘，其纵梁应力云图、顶铺板位移云图和纵梁安全系数见图5。

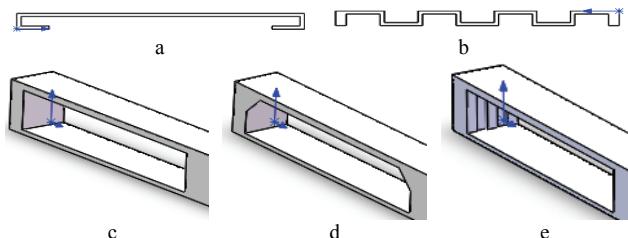


图4 托盘结构类型
Fig.4 Pallet structural type

表1 不同类型托盘静力分析结果
Tab.1 Static analysis results of different pallet types

托盘模型	组合结构	托盘质量/kg	顶铺板应力/MPa	顶铺板变形量/mm	顶铺板安全系数	纵梁应力/MPa	纵梁变形量/mm	纵梁安全系数
原方案	ac	17.34	300.65	6.52	0.93	263.56	3.91	1.06
方案A	bc	19.41	141.54	4.40	1.98	261.39	3.85	1.07
方案B	bd	19.51	130.22	3.44	2.15	299.27	2.69	0.94
方案C	be	19.68	139.33	4.03	2.01	247.39	3.41	1.13

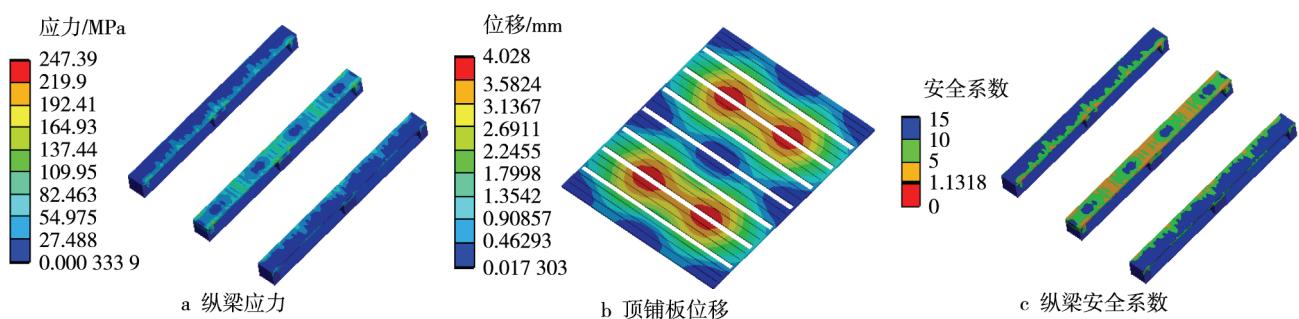


图5 C 方案云图
Fig.5 Contour of scheme C

2.2 托盘尺寸优化

通过对方案C托盘结构进行尺寸优化，达到提高纵梁安全系数的同时托盘质量最小化的目的。结合接口技术利用SolidWorks软件对托盘中要编辑为驱动参数的尺寸进行编辑、特征配置，导入Ansys Workbench优化模块对上述托盘结构尺寸进行优化设计^[12-13]。

2.2.1 尺寸优化设计数学模型^[14]

1) 确定设计变量。在优化设计过程中，根据托盘结构堆码分析及实际托盘运输条件，保持整体尺寸不变，仅对影响安全系数和质量的尺寸进行优化，将其顶铺板厚度以及纵梁上垫块结构相关尺寸作为设计变量，即 $X=[P_1\ P_2\ P_3\ P_4\ P_5\ P_6]^T$ 。其中， P_1 为边面板厚度， P_2 为上连板厚度， P_3 为垫块厚度， P_4, P_5 和 P_6 是垫块凹槽相关尺寸，见图6。

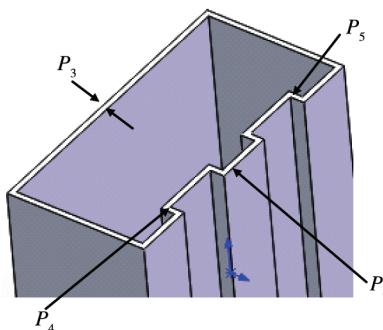


图6 部分优化参数设定
Fig.6 Setting of partial optimization parameters

2) 目标函数。文中优化目的是满足顶铺板安全系数，纵梁安全系数满足要求条件下，托盘质量最小化。将托盘质量最小化、铺板安全系数、纵梁安全系数作为目标函数，不改变托盘除设计变量以外的其他

构件尺寸, 以防止托盘整体结构出现较大变化^[14], 最终优化数学模型为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5 \ P_6]^T \\ F(\mathbf{X}) &= [f_1(x) \ f_2(x) \ f_3(x)]^T \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $1 \leq P_1 \leq 2$, $1 \leq P_2 \leq 2$, $1.5 \leq P_3 \leq 5$, $3 \leq P_4 \leq 10$, $3 \leq P_5 \leq 10$, $15 \leq P_6 \leq 35$; \mathbf{X} 为各设计变量组成的向量, 其尺寸范围上下限单位为 mm; $F(\mathbf{X})$ 为多个目标函数组成的向量; $f_1(x)$ 为托盘质量最小化函数; $f_2(x)$ 为顶铺板最小安全系数函数; $f_3(x)$ 为纵梁最小安全系数函数。

2.2.2 灵敏度及响应面分析

1) 实验设计。在静力分析完成后, 将顶铺板最小安全系数 P_7 、纵梁最小安全系数 P_8 、顶铺板质量(包括边面板质量 P_9 和上连板质量 P_{10}) 和纵梁质量 P_{11} 设置为输出参数, 导入优化模块的实验设计单元(DOE), 并输入设计变量的上下限, 采用软件默认的中心组合设计采集设计参数样本点, 计算每一个样本点的响应结果。对于该托盘的优化, 有 6 个优化参数, 生成 45 个样本点, 部分数据见表 2。

表 2 实验设计部分数据样本点
Tab.2 DOE partial data sample points

序号	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
1	2	1.5	3.25	6.5	6.5	25	2.34	1.32	1.22	0.91	2.88
2	1.68	1.68	3.88	7.76	7.76	28.60	2.42	1.34	1.07	0.98	3.07
3	1.5	1.5	5	6.5	6.5	25	2.39	1.35	0.98	0.91	4.89
4	1.5	1.5	3.25	3	6.5	25	2.47	1.31	0.98	0.91	2.86
5	1.5	1.5	3.25	6.5	6.5	35	2.71	1.17	0.98	0.91	2.87

2) 灵敏度分析。对参数直接求偏导是简单的灵敏度分析方法, 设目标函数为:

$$f = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n 为设计变量, 将初始设计点 $x^0 = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})^T$ 代入式(2)求偏导数, 见式(3), 其中 $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ 表示各个设计变量在初始设计点的值。

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}|_{x^0} = \frac{\partial f(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})}{\partial x_i} \quad (3)$$

式(3)的值为目标函数在初始设计点对于某一设计变量的敏感程度, 相对于其他设计变量敏感程度可以此类推。大部分工程问题得不到准确的目标函数表达式, 所以采用有限差分法, 其基本思想是假设变量有微小的扰动 Δx_i , 以差分代替变量的偏导数^[15]。结构灵敏度的数值可以反映结构设计变量对结构性能的影响, 数值越大, 则设计变量对于相应的结构响应影响程度越大, 数值越小, 则影响程度越小; 另外数值的正负反映了设计变量与结构响应属于正相关或负相关, 通过灵敏度图表可以为参数设计提供依据^[16]。参数边面板厚度 P_1 、上连板厚度 P_2 、垫块壳厚度 P_3

以及相关尺寸对输出参数的影响见表 3。对于结构最小安全系数来讲, 在顶铺板的最小安全系数中, 除参数 P_6 为正值, 其余均为负值, 说明 P_6 的增加会提高结构安全系数, 相反其他参数的增大会降低其安全系数。在纵梁的最小安全系数中, 上连板厚度、垫块壳厚度以及参数 P_6 对其影响较大。其中, 上连板厚度和参数 P_6 的增加均会降低其安全系数值, 而垫块厚度的增加则会增加其安全系数值。由于顶铺板的应力安全系数值远大于 1, 设计过程可能造成制造材料的浪费, 故其应力安全系数值可以适当降低, 而纵梁的应力安全系数值接近于 1, 使用过程中有可能发生托盘强度不足, 故其应力安全系数值有待提高, 因此在参数设计中, 应减小除参数 P_3 以外的参数值。对结构质量来讲, 边面板质量与边面板厚度, 上连板质量与上连板厚度, 纵梁质量与垫块壳厚度相关性较大, 而其他参数的相关性较小。对于这三者而言, 厚度的增加会增大其质量, 因此, 在满足结构最小安全系数条件的同时, 应减小各结构厚度, 以达到轻量化的目的。

表 3 输出参数对输入参数的灵敏度
Tab.3 Sensitivity of output parameters to input parameters

参数	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
P_1	-0.23	/	0.48	/	/
P_2	-0.3	-0.18	/	0.42	/
P_3	-0.13	0.38	/	/	0.7
P_4	-0.2	/	/	/	/
P_5	-0.12	/	/	/	/
P_6	0.12	-0.1	/	/	/

注: 表格中“/”表示无影响

3) 响应面分析。输出参数对输入参数的灵敏度见表 3, 仅考虑对响应贡献较大的参数。相关输出参数对输入参数的响应见图 7—8。由图 7—8 可得, 在 $1 \text{ mm} \leq P_1 \leq 2 \text{ mm}$, $1 \text{ mm} \leq P_2 \leq 2 \text{ mm}$ 范围内, 当边面板厚度 P_1 、上连板厚度 P_2 值越小时, 其顶铺板安全系数越高; 在 $1 \text{ mm} \leq P_2 \leq 2 \text{ mm}$, $1.5 \text{ mm} \leq P_3 \leq 5 \text{ mm}$ 范围内, 当 $P_3 < 2 \text{ mm}$ 或 $P_3 > 2.5 \text{ mm}$ 时, 上连板厚度 P_2 值越小时, 其纵梁板安全系数越高。

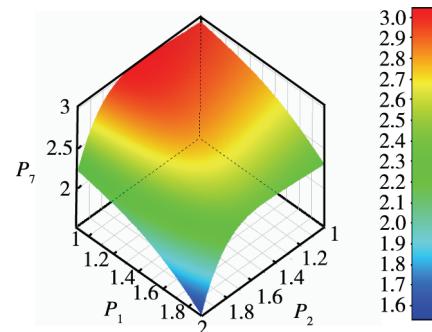


图 7 P_7 对 P_1, P_2 的响应
Fig.7 Response of P_7 to P_1, P_2

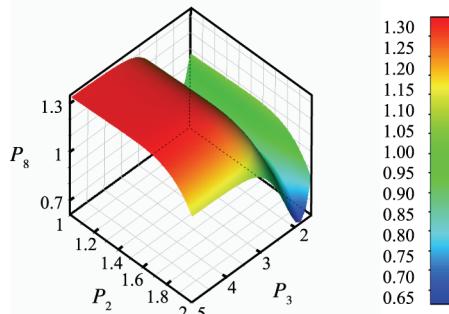


图 8 P_8 对 P_2, P_3 的响应
Fig.8 Response of P_8 to P_2, P_3

2.2.3 优化求解

托盘优化方法采用 MOGA (多目标遗传算法), 即通过“Pareto 最优个体”对群体中个体进行排序, 根据排序前后进行选择, 从而增大了优秀的个体被遗传到下一代概率, 经过一定代数循环, 从而找到最优的参数。设置种群数量为 100, 最大迭代次数为 20。由于 Pareto 最优解集根据需要设置不同的权重来选择不同的优化方案^[17], 故将关注度比较高的质量最小化 $f_1(x)$ 变量设置为 Higher, 其他 2 个目标函数变量设置为 Lower。最终获得最优的 3 组参数组合方案, 见表 4。

表 4 最优参数组合方案
Tab.4 Optimal parameter combination scheme

序号	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}
1	1.0041	1.002	1.53	4.86	3.98	33.95	2.68	1.55	0.749	0.711	2.594
2	1.0044	1.0022	1.57	3.97	8.05	33.94	2.75	1.47	0.749	0.711	2.597
3	1.0014	1.0018	3.27	4.86	4.03	16.02	2.32	1.30	0.748	0.711	2.817

根据灵敏度、响应面以及优化后的方案进行分析, 参数 P_4 和 P_5 具有一定的对称性, 因此舍弃第 2 组方案, 若要得到质量的轻量化, 则主要影响参数 (P_1, P_2, P_3) 应尽量减小, 因此舍弃第 3 组方案。为便于生产与制造, 对方案 1 尺寸进行圆整, 取 $X=[1, 1, 1.5, 5, 5, 30]$ 。

3 优化后模型的静力分析

为了检验圆整后的托盘轻量化结构的性能, 通过将方案 C 优化圆整后的托盘与优化前的托盘做对比, 对其质量、安全系数、应力水平以及变形情况进行分析, 以验证轻量化结构的可行性。圆整后方案的应力水平见图 9。

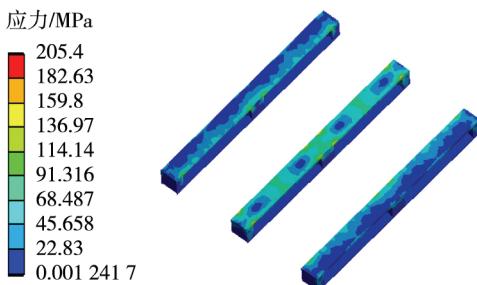


图 9 优化后纵梁应力云图
Fig.9 Stress contour of optimized stringer

对优化后的模型进行静力分析, 得其质量为 15.37 kg, 顶铺板应力、变形和安全系数分别为 108.2 MPa, 4.49 mm 和 2.59, 其纵梁应力、变形和安全系数分别为 205.46 MPa, 3.31 mm 和 1.36。结合表 1 可得, 针对 C 方案优化前的方案, 优化圆整后质量减小 22%, 纵梁安全系数提高 20.4%, 相应的铺板变形增大, 纵

梁变形减小, 但均在托盘挠度标准许可范围之内。

4 结语

对不同方案的托盘进行了分析及优化, 可得到如下结论。

1) 将三维软件建模与有限元分析相结合, 探索了铝合金托盘代替部分钢制托盘的可能, 节省了大量的托盘设计时间与实验成本。

2) 对不同铝合金托盘结构进行了分析, 得出 b 类托盘顶铺板结构承载性能优于相同厚度下的 a 类托盘铺板结构, 其顶铺板等效应力下降 53%、变形量下降 32%, 同时应力安全系数提高 112%。e 类纵梁角结构承载性能优于 c, d 类, 与 c 类相比, 纵梁等效应力降低 5%, 应力安全系数提高 5%, 变形量下降 11.4%, 因此选用 b, e 组合类型托盘(即方案 C 托盘)进行尺寸优化。

3) 对方案 C 托盘进行了尺寸优化, 得到纵梁应力安全系数为 1.36、质量为 15.37 kg 的托盘结构, 其安全系数相比于优化前上升 20.4%, 质量下降 22%, 符合优化设计要求。

参考文献:

- [1] 党文峰. 基于绿色物流的木塑托盘应用研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
DANG Wen-feng. The Research on the Application of Wood-plastic Pallets Based on Green Logistic[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014.
- [2] RATNAM M M. Study of Three-dimensional Defor-

- mation of a Pallet Using Phase-shift Shadow Moiré and Finite-element Analysis[J]. Experimental Mechanics, 2005, 45(1): 9—17.
- [3] 彭彪, 陈满儒. 木托盘的参数化设计及其应用[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013.
- PENG Biao, CHEN Man-ru. Parameterized Design and Application of Wooden Pallet[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2013.
- [4] 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. The Research of Liner-viscoelastic Plastic Pallet Big Deflection Distortion Character and Coordination[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [5] 兰葱. 木塑托盘性能检测及标准建立[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- LAN Cong. Performance Testing & Standard Establishment of Wood-Plastic Pallets[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [6] 洪芳华, 朱利军, 顾逸峰, 等. 可调式两用钢制托盘的设计与应用[J]. 中国物流与采购, 2015(11): 74—75.
- HONG Fang-hua, ZHU Li-jun, GU Yi-feng, et al. Design and Application of Adjustable Dual-purpose Steel Pallet[J]. China Logistics & Purchasing, 2015(11): 74—75.
- [7] 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.
- [8] 李晓刚, 薛婉婉, 邹圣扬, 等. 非固定箱式托盘结构优化设计[J]. 中国包装工业, 2015(22): 25—26.
- LI Xiao-gang, XUE Wan-wan, ZOU Sheng-yang, et al. Structural Optimization Design of Non Fixed Box Pallet[J]. China Packaging Industry, 2015(22): 25—26.
- [9] GB 10486—1989, 铁路货运钢制平托盘[S].
- GB 10486—1989, Steel Flat Pallets for Railway Goods Traffic[S].
- [10] 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.
- [11] GB/T 4995—1996, 联运通用平托盘 性能要求[S].
- GB/T 4995—1996, General-purpose Flat Pallets for Through Transit of Goods-Performance Requirements [S].
- [12] 杜秀菊, 贾长治, 董兆伟, 等. 基于接口的协同仿真技术在动态优化设计中的应用[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 123—131.
- DU Xiu-ju, JIA Chang-zhi, DONG Zhao-wei, et al. Application of Collaborative Simulation Based on Interfaces Used in Dynamic Optimization Design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 123—131.
- [13] 郝钟雄. ANSYS 与 CAD 软件的接口问题研究[J]. 机械设计与制造, 2007(7): 75—76.
- HAO Zhong-xiong. ANSYS and CAD adapter Problems [J]. Machinery Design & Manufacture, 2007(7): 75—76.
- [14] 张兵, 王宗彦, 陆春月, 等. 面向轻量化的重型卡车板簧压板优化设计[J]. 机械强度, 2015, 37(1): 88—93.
- ZHANG Bing, WANG Zong-yan, LU Chun-yue, et al. Lightweight-Oriented Optimization Design on Leaf Spring Clamp of Heavy-truck[J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37(1): 88—93.
- [15] 张国锋, 王卫荣. 基于 ANSYS Workbench 的吊座尺寸多目标优化设计[J]. 机械工程与自动化, 2014(1): 69—70.
- ZHANG Guo-feng, WANG Wei-rong. Multi-objective Optimization Design of Hanging Seat's Dimensions by ANSYS Workbench[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(1): 69—70.
- [16] 刘林华, 辛勇. 基于灵敏度分析的汽车车架轻量化研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(10): 1724—1727.
- LIU Lin-hua, XIN Yong. A Study on The Light Weighting of Vehicle Frame Based on Sensitivity Analysis[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(10): 1724—1727.
- [17] 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 Plywood Box Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(23): 29—33.