

堆垛钢板用木托架的受力分析及优化

马婕

(银川能源学院, 银川 750105)

摘要: **目的** 对某钢材公司现有田字型木托架结构进行分析, 并对其结构进行改进优化, 获得兼顾木托架承载性能与节约成本、降低使用木材资源的设计方法。**方法** 通过建立田字型和外伸梁型(3 纵梁×2 横梁)木托架的堆存工况力学模型, 对木托架的受力情况进行理论推导与研究, 并根据结果制定出外伸梁型木托架的优化设计方案, 并应用有限元法对吊运和多层堆存工况进行仿真, 求出木托架结构的应力响应, 以检验优化设计方案的正确性。**结果** 采用外伸梁型木托架代替田字型的木托架在堆放工况下弯曲应力低, 相同的条件下外伸梁型木托架能够承受田字型木托架所承载载荷, 且成本更低。**结论** 外伸梁型木托架更能节约木材和其他耗材, 具有很好的实际工程价值。

关键词: 木托架; 受力分析; 有限元; 优化设计

中图分类号: TB482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)23-0105-06

Stress Analysis and Optimization of Steel Plates for Stacking with Wooden Pallet

MA Jie

(Yinchuan Energy Institute, Yinchuan 750105, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the existing matts-shaped wooden pallet of some steel company and improve & optimize its structure, so as to achieve the design method that gives considerations to both load-bearing property and cost saving and reduces the timbers to be used. After the mechanical model of stockpiling conditions for matts-shaped and overhang-beam type wooden pallets (with 3 stringers and 3 beams) was built, the theoretical deduction and research of force bearing conditions of wooden pallets were conducted. The optimized design scheme was made according to the results. The lifting and multi-stockpiling conditions in finite element method were simulated to obtain the stress response of wooden pallets. By doing so, the correctness of optimized design scheme was verified. By replacing the matts-shaped wooden pallets, the overhang-beam type wooden pallets had less bending stress under the stockpiling. Under the same conditions, the overhand-beam type wooden pallets could bear the same load applied to matts-shaped ones with lower costs. The overhang-beam type wooden pallets can save timbers, other consumables and manufacturing costs, and have a good value in engineering application.

KEY WORDS: wooden pallet; stress analysis; FEM; optimization design

木托架是一种纵木和横木联接构成的简易装置^[1], 大多用于板材的仓储、堆存、吊运和运输等方面, 其结构因使用用途的不同而多种多样。由于其使用量较大, 特别是在钢铁企业中, 为此设计一

种强度高、耗用木材少、安全性好、结构合理的包装木托架, 具有节约资源的现实意义。通常运送的板材质量较大, 所以在堆存过程中应充分考虑木托架的承载能力^[2-5]。文献[6-8]对板材木托架的受

收稿日期: 2016-05-12

作者简介: 马婕(1981—), 女, 宁夏银川人, 硕士, 银川能源学院讲师, 主要研究方向为 CAD/CAM 一体化技术。

力承载已进行了一定研究,根据研究结果并结合某钢铁企业的木托架实际使用情况来看:板材堆存时,木托架在局部约束处受集中载荷作用下容易发生挤压破坏,同时也容易受均布压载荷而发生弯曲变形。文中结合某钢铁企业板材的生产实际需求,建立了田字型(3×3)和外伸梁型(3×2)的堆存工况木托架的力学模型,对木托架的受力情况进行理论推导与研究,并根据结果制定出了外伸梁型木托架的优化设计方案;并应用 Hypermesh 与 Radioss,对木托架进行了有限元仿真,求出了木托架结构的应力响应并来检验优化设计方案的正确性,为木托架的结构优化提供指导。

1 木托架结构参数

木托架分一般为上下2层,上层为纵木,下层为横木。通常将木托架的纵木称为纵梁,横木称为横梁,该钢铁企业当前使用的木托架结构的三维模型见图1,实际使用情况见图2。企业运送的货物及木托架规格参数:货物为1 m×1 m×0.25 m,横梁为1 m×1 m×0.25 m,纵梁为1 m×0.15 m×0.03 m。材料的力学性能见表1^[9-11]。

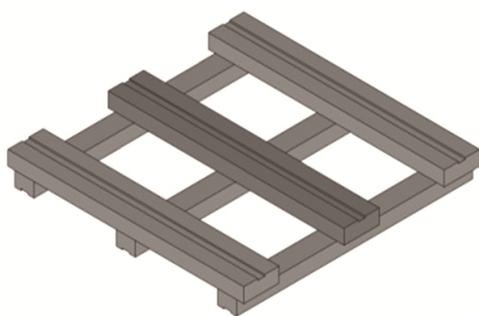


图1 木托架的三维结构

Fig.1 The three-dimensional structure of wooden pallet



图2 包装车间木托架应用

Fig.2 Application of wood bracket in packaging workshop

表1 材料力学性能指标
Tab.1 Mechanical properties of materials

| 名称 | 弹性模量 /GPa | 屈服强度 /MPa | 抗拉强度 /MPa | 抗弯强度 /MPa | 许用 挠度 |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| 落叶松木 | 4.97 | 57.6 | 32.2 | 39.12 | — |
| Q235 钢 | 200 | 235 | 375 | 205 | 1/300 |

2 堆存时原木托架受力分析

以该企业所原设计木托架作为研究对象,该结构设计为3纵梁3横梁的田字型结构。对上层纵梁和下层横梁进行受力分析:由于田字型木托架的结构设计满足空间3个方向的对称条件,且在不考虑木托架的制造装配误差、被托运钢板厚度及密度的细微差别等因素,在承载过程中各纵梁、各横梁受力相等。可选取上层中间的纵梁和下层中间的横梁为研究对象,分别对其上、下接触面进行承载受力分析。从图1的木托架安装关系可以看出,横梁的上表面与纵梁为局部接触,下表面与地面接触(当多层木托架堆存时,下表面则与下层钢板接触,与地面接触分析类似)。该接触面上的受力特征为局部压载,其压应力表达为:

$$\sigma = \frac{G}{qb_1b_2} \leq [\sigma] \quad (1)$$

式中: $[\sigma]$ 为许用应力; G 为钢板重量; b_1 为纵梁的宽度; b_2 为横梁的宽度; q 为接触面应力系数,其大小受载重和纵梁受力面积影响^[12]。取单层堆存,则 $G=58\ 800\ \text{N}$ (当多层木托架堆存时,其值成倍数增加); $b_1=0.15\ \text{m}$; $b_2=0.08\ \text{m}$; $q=26.79$, 板垛的长宽高分别为 1.00, 1.00, 0.25 m。

将值代入式(1)中,得到横梁上局部压应力 $\sigma_1=0.1829\ \text{MPa}$ 。同时,横梁的下表面与地面接触,其接触面积为整个表面接触,其下表面的压应力明显比上表面接触面积大,故横梁受到的最大载荷为局部压载 σ_1 。

钢板堆放在纵梁上,其上表面与钢板接触,接触面积明显大于纵梁在纵梁与横梁的接触面上的接触面积。故对与纵梁只需分析纵梁下端面的受力。由作用力与反作用力便知木托架纵梁上最大压应力仍为 $0.1829\ \text{MPa}$ 。由于纵梁在钢板的自重作用下,下表面不为全支撑,因此会受到弯矩,其受力见图3。纵梁受力左右为对称受力结构,可只分析右半段受力,将纵梁的受力简化为一次静

不定问题^[13-14]，见图 4。

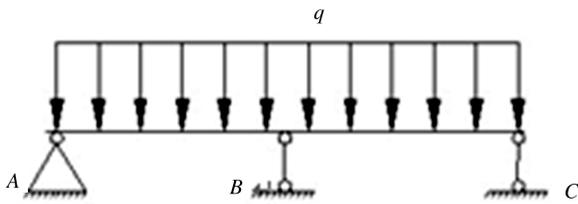


图 3 木托架纵梁受力
Fig.3 Wooden pallet longitudinal forces

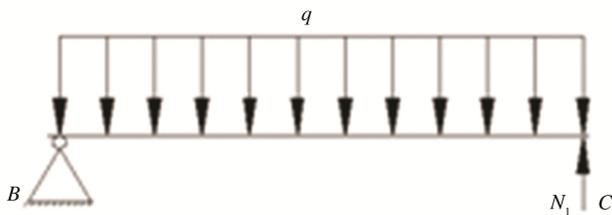


图 4 木托架纵梁超静定
Fig.4 Wooden pallet stringer indeterminate diagram

纵梁总长，BC 长 $l=L/2$ ，根据叠加原理，均布载荷 q 和集中力 N_1 在纵梁右端点 C 的挠度分别为 ω_1 和 ω_2 ：

$$\omega_1 = \frac{N_1 x^2}{6EI} (3l-x), \quad \omega_2 = -\frac{qx^2}{24EI} (x^2 - 4lx + 6l^2) \quad (2)$$

式中： E 为材料弹性模量； I 为截面惯性矩； x 为所求挠度点的坐标值。根据约束条件 $\omega_1 + \omega_2 = 0$ ，在右端点 C，即 $x=l$ 处，求得 $N_1 = N_2 = \frac{3}{16}qL$ ，

$$N_3 = \frac{5}{8}qL。$$

以纵梁的左端点 A 为原点，建立弯矩方程。纵梁的剪力图和弯矩见图 5。

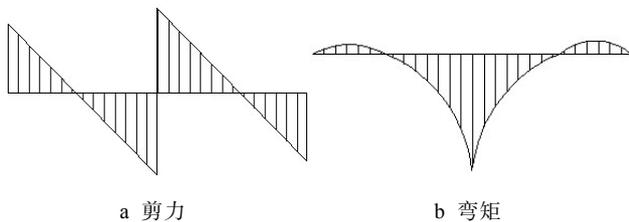


图 5 纵梁的剪力和弯矩

Fig. 5 Longitudinal shear diagram and bending moment diagram

当 $x = \frac{3}{16}L$ 或 $\frac{13}{16}L$ 时，得出极值 $M_1 = \frac{9}{512}qL^2$ ；

当 $x = \frac{1}{2}L$ 时，端点值 $M_2 = \frac{1}{32}qL^2$ 。由 $M_1 < M_2$ ，可

知在纵梁的中点 B 处为危险截面处，该处按式(3)校核，其中 W_z 为抗弯截面系数。

$$\sigma_B = \frac{M_{\max}}{W_z} = \frac{M_2}{W_z} = 0.1813 \frac{qL^2}{b_1 h_1^2} \leq [\sigma] \quad (3)$$

3 木托架的结构优化后分析

基于上述分析和结合木托架的实际使用工况，考虑减质量和节省成本，拟采用 3 纵梁 2 横梁构成的外伸梁型木托架代替田字形木托架，并同样对其进行横梁的最大压载及纵梁的最大弯矩计算，用以与原设计结构对比。按该改进思路，优化后结构三维模型见图 6。

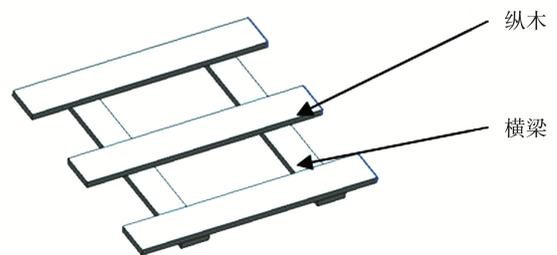


图 6 优化后三维结构
Fig.6 The optimized three-dimensional structure

设横梁距纵梁边缘的距离为 a ，受力见图 7，其剪力图和弯矩图见图 8，由弯矩图知 M_1, M_2 为极值点。

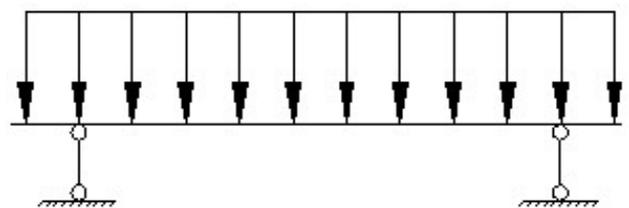


图 7 外伸梁型木托架纵梁受力
Fig.7 Longitudinal force of overhanging beam bracket

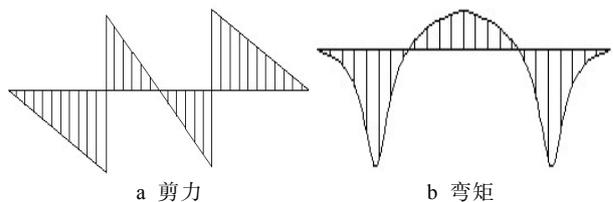


图 8 纵梁的剪力和弯矩

Fig.8 Longitudinal shear diagram and bending moment diagram

令 $M_1 = M_2$ ，解得 $a = \frac{\sqrt{2}-1}{2}L \approx 0.21L$ ；

$M_{\max} = M_1 = M_2 = 0.02205qL^2$ ，其危险截面的强度校核

公式见式(4)。

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} = \frac{M_1}{W_z} = 0.1323 \frac{qL^2}{b_1 h_1^2} \leq [\sigma] \quad (4)$$

由式(1)得用此种木托架的局部压载 $\sigma_2=0.2744$ MPa。用于木托架的原材料是常用的集成木，其顺纹抗压强度^[15] $[\sigma]_{\text{顺}}=57.6$ MPa，横纹抗压强度一般为顺纹抗压强度的 10%~20%^[16]。文中取值为 20%，则 $[\sigma]_{\text{横}}=11.52$ MPa。不难看出，仍有 $\sigma_1 < \sigma_2 < [\sigma]_{\text{横}}$ 成立。当横梁换成 2 根之后，横梁上端面受到的局部压载仍在安全范围内，同时上层纵梁弯曲时，在横梁的上部表现为顺纹抗压、下部表现为顺纹抗拉，受压区最先达到强度极限。木材的顺纹抗弯强度约为顺纹抗压强度的 2 倍，故纵梁所受弯曲应力也在安全范围内，由 $\sigma_{\max} < \sigma_B$ 可知，采用外伸梁类型的木托架代替原田字型的木托架可获得更好的弯曲强度。

4 板材木托架的优化前后有限元仿真验证

4.1 原设计木托架仿真验证

板材包装体包装完成后，板材通常需要随木托架一起完成多层堆存和吊运工况^[17]。在这些工况下，板材受力情况复杂，因此对木托架在吊运和多层堆存工况下的受力状况进行校核，以求出结构应力响应，并验证木托架优化方案的正确性。吊运工况有限元模型数据见表 2。

表 2 吊运工况有限元模型数据

Tab.2 Data table of finite element model for suspended operation

| 部件 | 节点数 | 单元数 | 单元类型 | 材料 |
|-----|--------|--------|-------|--------|
| 板材 | 2682 | 2000 | solid | Q235 钢 |
| 下盖板 | 918 | 400 | shell | Q235 钢 |
| 木托架 | 28 374 | 20 766 | solid | 木材 |
| 吊绳 | 2286 | 2016 | shell | Q235 钢 |

使用 Hypermesh+Radioss 联合对平板模型建立有限元模型进行仿真计算^[18-21]，Hypermesh 进行网格划分与边界条件、载荷设置，前处理完成后提 Radioss 进行计算。

建立板材吊运有限元模型，见图 9，板材包装组合体从上至下建立接触面，共 7 组接触对；设置相应的主接触面 (master)，与从接触面 (slave)，接触类型设置为 slide, REVNORM。载荷和边界条件为：建立 2 个载荷，分别为重力 (grav) 和约束

(cons)对吊绳的 4 个头部进行 6 自由度的全约束。建立一个载荷步 loadsteps，静态约束 SPC=cons，载荷 load=grav，TYPE=non-linear quasi-static。吊绳壳单元厚度 $d=2$ mm。计算结果见图 10，在吊运工况下吊绳作用在上层纵梁上，其最大应力为 7.473 MPa，小于木材的横纹抗压强度为 11.52 MPa。

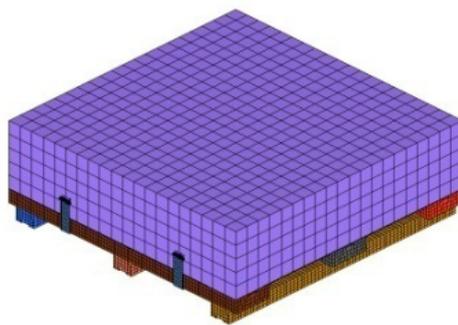


图 9 板材吊运有限元模型
Fig.9 Lifting plate finite element model

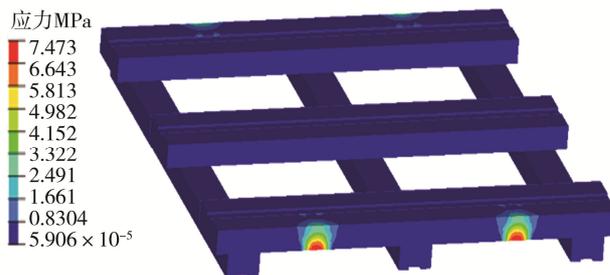


图 10 木托架吊运工况应力云图
Fig.10 Wooden pallet lifting condition stress nephogram

4.2 优化后木托架仿真验证

由于在吊运过程中钢板对下层横木没有力的作用，优化后方案只是对下层横木的布置进行了改进，所以优化后方案在吊运工况的受力情况与原设计结构一致。优化后木托架的多层堆存见图 11。对工况进行计算如下。在有限元模型中，外伸梁型木托架板材包装组合体的有限元模型从上至下建立接触面，共 18 组 contactsurfs；设置相应的主接触面 (master) 与从接触面 (slave)，接触类型设置为 slide, REVNORM。载荷和边界条件为：建立 2 个 loadcollector，分别为重力 (grav) 和约束 (cons) 对木托架纵梁与地面接触的面进行 6 自由度的全约束。建立 1 个 loadsteps，静态约束 SPC=cons，载荷 load=grav，TYPE=non-linear quasi-static。离散后模型数据见表 3。

表 3 3 层堆存工况有限元模型数据
Tab.3 3-layer storage condition of finite element model data table

| 部件 | 节点数 | 单元数 | 单元类型 | 材料 |
|-----|--------|--------|-------|--------|
| 板材 | 2682 | 2000 | solid | Q235 钢 |
| 下盖板 | 918 | 400 | shell | Q235 钢 |
| 木托架 | 16 116 | 11 550 | solid | 木材 |

注：3 层板材包装组合体网格划分、约束等条件设置是一致的。

其计算结果见图 12，在多层堆存工况下最下层的木托架横梁应力最大，其最大应力值为 1.412 MPa，仍小于木材的横纹抗压强度 11.52 MPa。因此，优化设计后的外伸梁型木托架结构在多层堆存工况下仍能够满足强度要求。

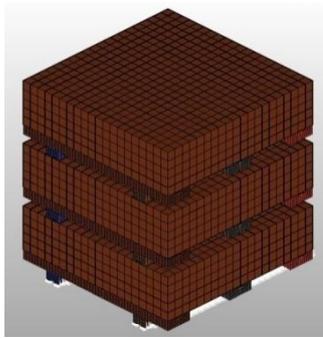


图 11 板材 3 层堆存有限元模型
Fig.11 Finite element model of 3-layer plate stockpiling

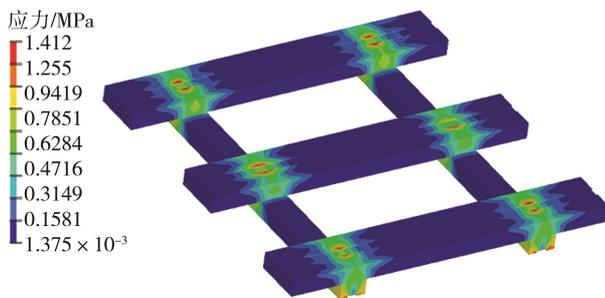


图 12 木托架多层堆存工况应力云图
Fig.12 Multi-layer wooden pallet storage conditions stress

通过对改进前田字型木托架和改进后外伸梁型木托架进行有限元分析，外伸梁型木托架强度完全能够满足吊运、多层堆存使用，且明显更省材料。其优化改进具有重要实际意义，该钢铁企业板材年产量达到上万吨，根据木托架的使用量来看，可以显著减少包装托运材料费用，降低生产成本，达到了节约资源与保护环境的目的。在后续批次的木托架生产中，该钢厂部分采用了外伸梁型木托架结构，见图 13。



图 13 优化后木托架在该单位的应用
Fig.13 Optimization of the application of the rear wood bracket in the unit

5 结语

以板材木托架为研究对象，以易发生破坏的堆存工况为典型工况，建立了木托架堆存条件下的力学模型，推导了木托架的结构压应力、弯矩和剪力的函数表达式，并根据受力分析结果对其进行了结构设计和改进优化。以实际使用中常用的吊运工况和多层堆存工况进行有限元仿真，验证了木托架优化设计的合理性。其结果表明，改进优化后的木托架在减少了一横梁后，其结构强度仍能满足使用要求。结合该企业使用优化后木托架的情况来看，实现了满足木托架使用要求并达到了节约木托架用料和其他耗材，具有很好的实际工程价值。

参考文献：

- [1] 刘宝朋, 陆佳平. 钢板材木托架的受力分析和机构优化[J]. 包装工程, 2010, 31(11): 42—45.
LIU Bao-peng, LU Jia-ping. Force Analysis and Mechanism Optimization of Steel Plate Timber Bracket[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(11): 42—45.
- [2] 刘海江, 周浩升. 钢板包装中捆带的力学性能分析[J]. 包装工程, 2011, 32(17): 44—46.
LIU Hai-jiang, ZHOU Hao-sheng. Analysis of Mechanical Properties of Steel Packaging Strapping[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(17): 44—46.
- [3] 刘宝朋. 钢板材包装木托架的承载研究和结构优化[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
LIU Bao-peng. Research and Structural Steel Plate Bearing Wooden Tray Packaging Optimization[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [4] MITCHELL H, ELINOR B, CYNTHIA T, et al. The Use of ArtiosCAD Software in Corrugated Packaging Design Courses[J]. Technology Education Journal, 2011, 101: 350—361.
- [5] 刘宝朋, 陆佳平. 基于 ANSYS 的木托架调运工况的

- 挠度分析[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(21): 5236—5239.
- LIU Bao-peng, LU Jia-ping. Wooden Pallet Transporting Conditions for ANSYS Analysis Based on Rao[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(21): 5236—5239.
- [6] 刘海江, 周呈呈. 钢卷包装中周向内捆带及卷眼捆带的力学性能分析[J]. 包装工程, 2013, 34(15): 70—74.
- LIU Hai-jiang, ZHOU Cheng-cheng. Mechanical Property Analysis of Radial Strap and Inner Circle Strap in Steel Coil Packaging[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15): 70—74.
- [7] ZHANG Fu-xiang, LI Wen-zhong. Application of Modern Design Methods in the Graduation Designs of Mechanical Engineering Science[J]. Communications in Computer and Information Science, 2011, 243(1): 330—336.
- [8] ZHOU Ran, SU Shu-qiang, YAN Li-ping, et al. Effect of Transport Vibration Levels on Mechanical Damage and Physiological Responses of Huanghua Pears[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(1): 20—28.
- [9] 王宏棣, 王子奇, 王春明. 幼龄落叶松木材力学性能的试验[J]. 林业科技, 2000, 25(3): 44—46.
- WANG Hong-li, WANG Zi-qi, WANG Chun-ming. Test of Mechanical Properties of Larch Wood Young[J]. Forestry Science and Technology, 2000, 25(3): 44—46.
- [10] 鲍甫成, 江泽慧. 中国主要人工林树种木材力学性质[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- BAO Fu-cheng, JIANG Ze-hui. The Mechanical Properties of the Main Artificial Forest Tree Species in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1998.
- [11] 周海宾, 江京辉, 王学顺, 等. 兴安落叶松目测等级锯材抗拉强度的宽度尺寸效应[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(1): 127—130.
- ZHOU Hai-bin, JIANG Jing-hui, WANG Xue-shun, et al. The Width of the Size Effect of Xingan Larch Lumber Visual Grade of Tensile Strength[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(1): 127—130.
- [12] 刘一星, 赵广杰. 木质资源材料学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- LIU Yi-xing, ZHAO Guang-jie. Wood Resources and Materials Science[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004.
- [13] BENJAMIN F. Corrugated Box Compression—A Literature Survey[J]. Packaging Technology and Science, 2013, 21(1): 6—20.
- [14] 单祖辉. 材料力学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- SHANG Zu-hui. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [15] GB/T 1928—2009, 木材物理力学实验方法总则[S]. GB/T 1928—2009, General Test Methods for Physical and Mechanical Wood[S].
- [16] GB/T 1928—2009, 木材横纹抗拉强度实验方法[S]. GB/T 1928—2009, Wood Grain Tensile Strength Testing[S].
- [17] 李宗远, 尚新春. 木托架整体结构的挠度分析[C]//北京力学学会第17届学术年会论文集, 2011.
- LI Zong-yuan, SHANG Ying-chun. Disturbance of Wooden Pallet and Overall Structure Analysis[C]//Beijing Mechanics will be the 17th Annual Conference Proceedings, 2011.
- [18] 李楚琳, 张胜兰, 冯樱, 等. Hyperworks 分析应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- LI Chu-lin, ZHANG Sheng-lan, FENG Ying, et al. Hyperworks Analysis and Application Examples[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2008.
- [19] 刘海江, 周呈呈. 钢卷包装中周向内捆带及卷眼捆带的力学性能分析[J]. 包装工程, 2013, 34(15): 70—74.
- LIU Hai-jiang, ZHOU Cheng-cheng. Mechanical Property Analysis of Radial Strap and Inner Circle Strap in Steel Coil Packaging[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15): 70—74.
- [20] ZHANG Fu-xiang, LI Wen-zhong. Application of Modern Design Methods in the Graduation Designs of Mechanical Engineering Science[J]. Communications in Computer and Information Science, 2011, 243(1): 330—336.
- [21] ZHOU Ran, SU Shu-qiang, YAN Li-ping, et al. Effect of Transport Vibration Levels on Mechanical Damage and Physiological Responses of Huanghua Pears[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(1): 20—28.