

板材包装结构强度分析与优化

敖文刚^{1,2}, 宋泽良³, 程惠峰¹, 彭斯洋³

(1.重庆工商大学 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆 400067;
2.智能制造服务国际科技合作基地, 重庆 400067; 3.重庆理工大学, 重庆 400054)

摘要: **目的** 以板材包装结构为研究对象, 研究其承载能力。**方法** 运用力学原理对结构强度进行定性分析, 同时利用有限元软件 Ansys Workbench 进行定量分析。**结果** 得到了承载不同厚度铝板的包装结构正应力云图及最多能承载铝板的数量。**结论** 板材厚度对结构的力学模型有较大影响。承载厚板时结构危险截面剪应力较大, 剪应力成为控制条件; 承载薄板时结构危险截面正应力较大, 正应力成为控制条件。
关键词: 板材包装结构; 结构强度; 力学模型

中图分类号: TB487; TB485.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2017)13-0133-04

Strength Analysis and Optimization of Plate Packaging Structure

AO Wen-gang^{1,2}, SONG Ze-liang³, CHENG Hui-feng¹, PENG Si-yang³

(1.Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2.National Research Base of Intelligent Manufacturing Service, Chongqing 400067, China; 3.Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: The work aims to study the bearing capacity of plate packaging structure with such structure as the study object. The qualitative analysis and quantitative analysis of its structural strength was done by using mechanics principle and Ansys Workbench separately. The normal stress nephogram of packaging structure bearing aluminum plates of different thicknesses, together with the corresponding number of aluminum plates were obtained. In conclusion, plate thickness has great influence on the mechanical model of the structure. The shear stress of the dangerous section is larger when the structure is bearing thicker plates, and the shear stress will be the controlling condition; while the normal stress of the dangerous section is larger when the structure is bearing thinner plates, and the normal stress will be the controlling condition.

KEY WORDS: plate packaging structure; structural strength; mechanical model

板材包装通常用于运输铝板、冷轧钢板等材料, 一般要求其结构具有足够的强度和刚度, 保证板材在堆码、运输和起吊等工况下能得到有效保护。板材包装结构大多采用木材、层积材^[1-4], 但大尺寸的板材包装也可采用型钢结构。起吊过程中, 包装结构受到板材动荷载作用, 且受力条件最为不利, 是最容易引起结构被破坏的工况。

李扬、康柳^[5-6]通过 SolidWorks 对托盘结构进行了有限元分析, 验证了运用有限元分析、仿真和设计托盘的合理性, 大大降低了托盘设计及试验成本, 大

幅减少了设计时间, 为产品方案修订提供了依据。李志强^[7]运用 Ansys Workbench 对网箱托盘进行了结构静力学分析和跌落分析, 为结构设计提供了合理建议。宋洪震、宋海燕等^[8-10]均选择 UG 或 Ansys 等有限元软件作为包装结构强度性能分析的工具, 丰富了包装结构设计手段。文中将依据力学原理对某一系列铝板包装结构受力模型、危险截面正应力和剪应力进行定性分析, 并运用有限元软件 Ansys Workbench^[11-13]进行定量分析, 为结构设计提出合理的建议。

收稿日期: 2017-01-11

作者简介: 敖文刚 (1976—), 男, 硕士, 重庆工商大学副教授, 主要研究方向为工程力学。

1 板材包装基本情况

铝板包装结构见图1, 主要由底方、长方和铺板构成, 可以简化为一平面框架结构, 一般情况下长方是主要受弯构件, 最容易发生破坏。某系列铝板平面尺寸为 4000 mm×2000 mm, 板材厚度有 1, 2, 5, 10, 20, 30, 60 mm 等多种规格。图1中 L_1 为包装结构两侧底方到长方端头的距离, δ 为铺板间距, $L+10$ 和 $b+10$ 表示包装结构尺寸比板材 (L 和 b 为板材尺寸) 长、宽各长 10 mm。

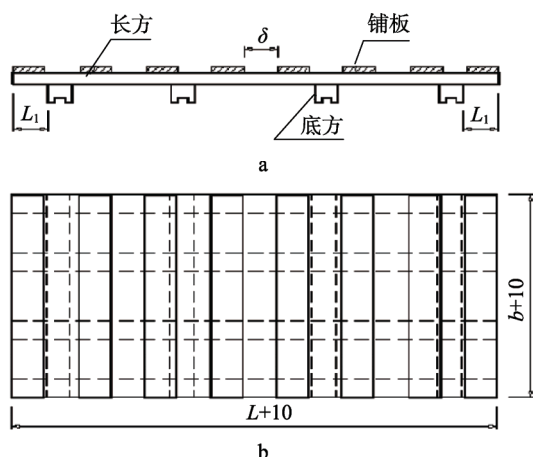


图1 铝板包装结构平面

Fig.1 Packaging structure plan of aluminum plate

铝板需使用牛皮纸进行全封闭包装。底方的凹槽有利于穿钢带捆扎, 长方方向也要用钢带将铝板固定在包装结构上。铝板上方四边需加薄钢板保护。仓库中铝板包装结构实物见图2。



图2 铝板包装结构实物

Fig.2 Aluminum packaging structure

2 板材包装结构具体尺寸

底方和长方都选用横截面尺寸为 65 mm×75 mm 的层积材, 铺板选用横截面尺寸为 65 mm×10 mm 的层积材。底方共 6 根, 间距为 700 mm, 两边底方位置距两端 215 mm; 长方共 4 根, 间距为 645 mm; 铺板 11 块, 间距为 350 mm。铝板包装结构见图3。

3 结构受力模型分析

文中包装结构可简化为外伸梁, 见图4, 起吊位置

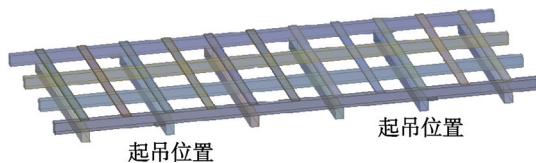


图3 铝板包装结构

Fig.3 Aluminum plate packaging structure

可简化为支座, 此处刚度最大, 分布的荷载集度最大, 但分布力系的总和不变, 等于铝板和结构总质量的 2.2 倍。铝板自身具有抗弯刚度, 单张铝板的抗弯刚度^[14-15]可表达为:

$$K = \frac{Ebd^3}{12} \quad (1)$$

式中: E 为铝板弹性模量; b 为铝板宽度; d 为单张铝板厚度。当共有 n 张铝板, 则总厚度 $\delta=nd$, 则全部铝板总抗弯刚度为:

$$K_a = \frac{Eb\delta^3}{12n^2} \quad (2)$$

由式(2)可知, 总厚度不变的情况下, 单张铝板越薄, n 就越大, 其总抗弯刚度越小。

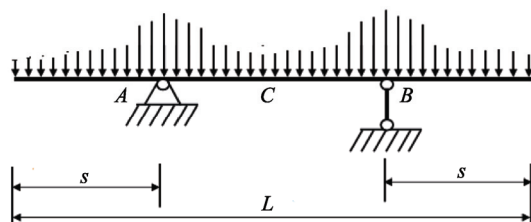


图4 包装结构力学模型

Fig.4 Mechanical model of packaging structure

极端情况下, 假定单张铝板厚度趋于 0 mm, 那么 n 可取无穷大, 铝板总抗弯刚度趋于 0, 铝板自身不能抵抗弯曲变形, 完全随包装结构变形, 则结构承受均布荷载。均布荷载作用下, 根据等强度设计思想, 要求支座 A (或 B) 处的负弯矩 (绝对值) 等于跨中 C 处的正弯矩, 则:

$$M_A = M_C \quad (3)$$

式中: $M_A = \frac{1}{2}qs^2$; $M_C = \frac{1}{8}qL^2 - \frac{1}{2}qLs$; q 为均布荷载的大小。可计算出最佳起吊点位置处 $s \approx 0.21L$ 。由于铝板厚度变化会引起结构总抗弯刚度变化, 进而引起荷载分布的变化, 因此最佳起吊位置也是会变化的, 根据技术人员多年经验总结, 确定 s 为 $0.21L \sim 0.25L$ 较合适。如果铝板较厚, 荷载会集中分布在支座附近, 而跨中、外伸部分荷载分布较少, 此时结构弯曲变形量、弯曲正应力较小; 如果铝板较薄, 荷载会向跨中、外伸部分移动, 此时结构弯曲变形, 弯曲正应力就会变大。

4 铝板包装结构有限元模型

由包装结构受力模型分析可知, 当铝板较厚时结

构所受荷载向支座集中, 最极端情况下全部荷载集中于支座位置, 此时支座附近横截面所受剪切力最大。通过顺纹抗拉强度和横纹抗剪强度测试, 该批次层积材抗拉强度 $\sigma_{0.95}=22.36$ MPa, 抗剪强度 $\tau_{0.95}=5.07$ MPa。结构承载 60 mm 厚铝板时, 通过抗剪强度分析确定结构可起吊 4 块铝板。根据板材包装结构的实物, 利用 Ansys Workbench 进行建模, 铝板包装结构有限元模型见图 5。牛皮纸、钢带、薄钢板等物体的质量和抗弯刚度相对铝板和层积材是非常小的, 因此构建有限元模型时忽略它们对分析结果的影响。在材料库中添加铝板和层积材 2 种材料, 设置铝板的弹性模量为 69 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 2700 kg/m³, 层积材的弹性模量为 50 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 500 kg/m³。铝板采用 sweep 方式划分单元, 网格尺寸为 200 mm, 层积材采用 Hex Dominant 方式划分单元, 网格尺寸为 20 mm, 打开网格自动过渡功能, 在容易产生应力剧烈变化的部位增大网格密度。包装结构和底层铝板设置为绑定接触, 铝板之间设置为不分离接触。

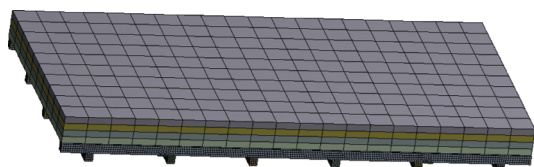


图 5 铝板包装结构有限元模型

Fig.5 Finite element model of aluminum packaging structure

5 包装结构强度分析

板材包装结构在起吊过程中具有竖直向上的加速度, 其荷载需乘以动载系数, 忽略吊带对中间 2 根长方的竖向作用力, 仅将竖向约束施加在两边长方, 其简化后的力学模型见图 6。

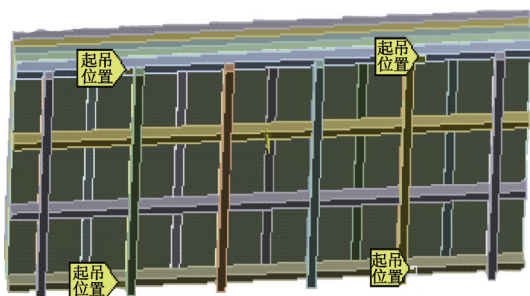


图 6 包装结构简化力学模型

Fig.6 Simplified mechanical model of packaging structure

5.1 抗剪强度

板材较厚时, 具有远大于包装结构的抗弯刚度, 其弯曲变形较小, 荷载主要分布在支座位置附近, 即图 6 中的起吊位置附近。对于起吊工况下取最不利的动载系数为 2.2, 长方截面最大剪力计算可进行估算。将得到的最佳起吊位置范围放松为两侧 $0.2L\sim 0.3L$ 范

围内, 按均布荷载计算得到最大剪力 $F_{smax}=0.3qL$, 假定荷载全部集中作用于吊带内侧, 则 $F_{smax}=0.5qL$ 。对厚板材可先按照 $F_{smax}=0.5qL$ 进行估算, 这里取 4 块 60 mm 厚铝板, 则 4 个起吊位置长方横截面剪力 $F_{smax}=27\,941.76$ N, 则此 4 个位置长方剪应力预估为 $\tau_{max}=5.73$ MPa, 超过材料抗剪强度, 但如按照均布荷载计算则 $\tau_{max}=3.44$ MPa。真实情况在两者之间, 有限元分析结果见图 7, 最大剪应力出现在支座位置, 为 4.7572 MPa, 小于材料抗剪强度, 结构安全。当板材厚度减小, 铝板抗弯刚度降低, 在总质量相同的情况下, 结构荷载分布趋于均匀, 支座附近荷载降低, 截面剪力减小, 剪应力减小, 结构抗剪性能提高。

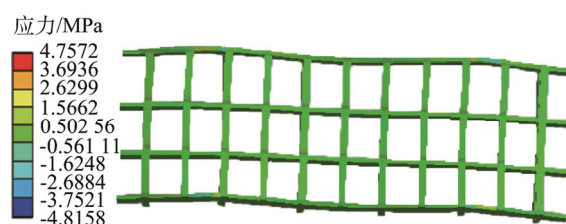


图 7 承载 4 张 60 mm 铝板时结构剪应力云图

Fig.7 Structural shear stress when carrying 4 sheets of 60 mm aluminum plate

5.2 结构抗弯强度

随着铝板变薄, 在总厚度相同的情况下, 板材总抗弯刚度减小, 荷载分布趋于均匀, 支座和跨中截面剪应力会减小, 但相应弯矩会提高。板材刚度变化, 荷载分布规律随之改变, 支座和跨中位置弯矩无法准确用解析的方法计算, 文中运用 Ansys Workbench 分析结构弯曲正应力。承载 4 张 60 mm、24 张 10 mm 铝板的结构模型 x 轴向正应力云图见图 8a—b。虽然这 2 种情况下结构承载铝板的总质量相同, 但随着铝板变薄, 结构最大 x 轴向正应力从 7.89 MPa 逐渐增加到 23.49 MPa。文中有限元模型选用了最不利的动载系数, 且未考虑中间 2 根长方竖向的受力, 因此可将结构许用抗弯正应力从 22.36 MPa 提高到 25~26 MPa 左右, 结构仍然安全。

随着铝板进一步变薄, 当结构承载 48 张 5 mm 铝板时, 长方支座处最大 x 轴向正应力增加到了 28.24 MPa, 超出了材料许用应力, 结构不安全。将结构承载铝板减少到 40 张时, 铝板总厚度减至 200 mm, 结构 x 轴向最大正应力为 23.95 MPa, 可认为此结构安全, 见图 8c。铝板继续变薄, 结构承载 90 张 2 mm 铝板时, 其最大 x 轴向正应力为 24.06 MPa; 结构承载 170 张 1 mm 铝板时, 其最大 x 轴向正应力为 25.846 MPa。

通过对厚度为 1, 2, 5, 10, 20, 30, 60 mm 等规格的铝板包装结构有限元模型进行抗弯强度分析, 可知最大 x 轴向正应力皆位于支座处。

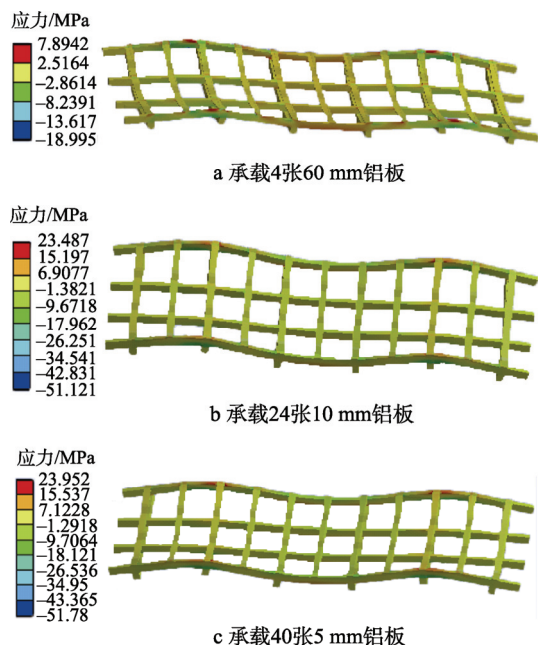


图8 结构x轴向正应力云图
Fig.8 Structural x axial normal stress

6 结语

运用力学原理对板材包装结构抗弯、抗剪强度问题进行了定性分析,得到了结构危险截面的大致位置和其危险正应力、剪应力随板材厚度改变而变化的规律。在定性分析的基础上,运用 Ansys Workbench 建立板材包装结构有限元模型,定量计算结构危险正应力、剪应力,并比照材料抗弯、抗剪强度判断结构是否安全。文中分析表明:结构所能承载厚板的数量受危险截面剪应力控制,此时危险截面正应力一般比材料抗弯强度小很多,剪应力成为控制条件;结构所能承载薄板的数量受危险截面正应力控制,弯曲正应力成为控制条件。

理论分析结合有限元软件平台对板材包装结构进行仿真分析,能加快设计进程,减少设计中实物消耗,找准结构存在的强度问题,可针对性地进行改善,为板材包装结构设计提供参考数据。

参考文献:

- [1] 付昕, 申婷婷. 浅谈木质包装[J]. 河南科技, 2013(10): 71.
FU Xin, SHEN Ting-ting. Wood Package[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2013(10): 71.
- [2] 韩雪山, 何渊井, 陈志强. 单板层积材在机电产品包装上的应用前景[J]. 中国包装工业, 2012(11): 40—41.
HAN Xue-shan, HE Yuan-jing, CHEN Zhi-qiang. Application Prospect of Laminated Veneer Lumber in Packaging of Mechanical and Electrical Products[J]. China Packaging Industry, 2012(11): 40—41.
- [3] 张金菊, 申世杰. 关于指接集成材力学性能及其分析模型的研究[J]. 中国人造板, 2006(7): 16—18.

- [4] ZHANG Jin-ju, SHEN Shi-jie. Study on Mechanical Properties and Analysis Model of Finger Jointed Timber[J]. Chinese Wood-based Panel, 2006(7): 16—18.
张金菊, 申世杰. 关于指接集成材力学性能及其分析模型的研究(续)[J]. 中国人造板, 2006(8): 7—9.
ZHANG Jin-ju, SHEN Shi-jie. Study on Mechanical Properties and Analysis Model of Finger Jointed Timber(Continued)[J]. Chinese Wood-based Panel, 2006(8): 7—9.
- [5] 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.
- [6] 康柳, 刘婧. 基于 SolidWorks 的卡扣快装箱有限元分析[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 65—69.
KANG Liu, LIU Jing. Finite Element Analysis of Quickie Assembled Box with Buckles via SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 65—69.
- [7] 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.
- [8] 宋洪震. Ansys 在包装工程的应用[J]. 湖南包装, 2009, 16(1): 13—14.
SONG Hong-zhen. The Application of Ansys in Packaging Engineering[J]. Hunan Packaging, 2009, 16(1): 13—14.
- [9] 舒祖菊. 快装箱的有限元仿真与优化设计[D]. 西安: 陕西科技大学, 2009.
SHU Zu-ju. Finite Element Simulation and Optimization Design of Plywood Box[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2009.
- [10] 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. Mechanical Properties and Optimization Design of Splice Box Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 25—29.
- [11] 浦广益. Ansys Workbench 基础教程与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
PU Guang-yi. Ansys Workbench Based Tutorials and Example Explanation[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [12] 王新敏. Ansys 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
WANG Xin-min. Ansys Numerical Analysis of Engineering Structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [13] 盛和太, 喻海良, 范训义. Ansys 有限元原理与工程应用实例大全[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
SHENG He-tai, YU Hai-liang, FAN Xun-yi. Ansys Finite Element Theory and Engineering Application Examples[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [14] 刘鸿文. 简明材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
LIU Hong-wen. Concise Mechanics of Materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [15] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
SUN Xun-fang, FANG Xiao-shu, GUAN Lai-tai. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.