

不同堆码型式物流包装件的稳定性分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.06.006

许增刚 曾台英

上海理工大学

出版印刷与艺术设计学院

上海 200093

摘要: 利用有限元分析方法,通过静力学分析提出应力包络图面积概念,再结合谐响应和随机振动分析综合评价重叠式、旋转交错式、正反交错式3种堆码包装件的稳定性。研究表明:在水平轴向上,正反交错式堆码随着层数的增加应力包络图面积逐渐减少,受到的应力比其它两种堆码型式的小,且最大、最小应力的波动和形变量是三者中较小的;在垂直轴向上,3种堆码型式最大应力和最小应力的波动都较大,正反交错式堆码与重叠式堆码的形变量相近,旋转交错式堆码的形变量最大。因此在运输过程中,堆码件被捆绑或被缠绕薄膜固定时,选择正反交错式堆码更好。

关键词: 堆码型式;物流包装件;稳定性;应力包络图

中图分类号: TB485.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2022)06-0043-09

引文格式: 许增刚,曾台英.不同堆码型式物流包装件的稳定性分析[J].包装学报,2022,14(6):43-51.

0 引言

随着物流业的迅速发展,货物的堆码型式受到人们广泛关注。例如美国 CAPE Systems 软件公司开发了 CAPE PACK 软件,在该软件中设置货物尺寸、托盘尺寸,即可设计出货物的多种堆码方案,用户可以从中选择最优方案。王伟楼^[1]研究了堆码摆放和优化空间利用的问题,采用启发式算法,将具有相同特征的货物进行组合,以达到更高的空间利用率。徐跃明等^[2]研究了基于 Beam 搜索算法的成品烟箱自动装车系统垛型算法,该算法能控制不同地点的烟箱装车前后顺序,适应多品规、多地点烟箱混装和多种车辆的情况,使空间利用率达到 90% 以上。张洪军等^[3]基于 MATLAB,利用改进蚁群算法对集装箱空间利用率进行了优化求解,结果表明,该方法使集装箱装载的空间利用率提高了 9.13%。

对于货物堆码的问题,人们更多关注的是如何有效地利用空间,堆放更多的货物,却忽略了堆码的稳定性,甚至对于包裹的完整性及包装的最大承受力不作考虑。这样导致许多货物到达目的地时就已经破损,给顾客一种较差的体验。

一些学者对于货物堆码的稳定性问题进行了研究,例如唐英等^[4]在对两种堆码型式不施加裹膜、捆扎等约束的情形下,建立动力学模型,得到货物运输时的脆值,并评估货载的稳定性;王艳芳等^[5-6]提出了运用静力学和动力学分析,定义定量评估垛型稳定性的方法。以上文献对于堆码的稳定性均提出了相应的评判方法,但其过程均过于繁琐。

针对以上问题,本文对不同堆码型式物流包装件的稳定性进行研究,提出一种简易评估堆码稳定性的方法,以为货物堆码方案的选择提供帮助。

收稿日期: 2022-09-09

作者简介: 许增刚(1995-),男,安徽宿州人,上海理工大学硕士生,主要研究方向为轴向包装运输动力学,

E-mail: 1666392035@qq.com

通信作者: 曾台英(1978-),女,浙江台州人,上海理工大学讲师,博士,硕士生导师,主要从事包装设计和包装运输动力学研究, E-mail: zty3160@126.com

1 稳定性判定方法

本研究通过静力学和动力学分析, 综合评估重叠式堆码、旋转交错式堆码、正反交错式堆码(如图1所示)3种包装件的稳定性。

1.1 静力学分析

利用应力包络图来评判堆码件不同层数的稳定性: 以每层的几何中心为坐标原点建立 xOy 坐标系(如图2所示), 将任一单元纸箱的重心视为一个点, 设第 r 层第 i 单元为 $A_{r,i}$, 并将其与原点相连, 得到 $\angle A_{r,i}Ox$ 作为旋转角(如图2a所示); 以包装件受到的最大应力作为该角度轴向的径向长度; 连接该层面上所有纸箱的径向长度末端, 得到应力包络图, 如图3所示。

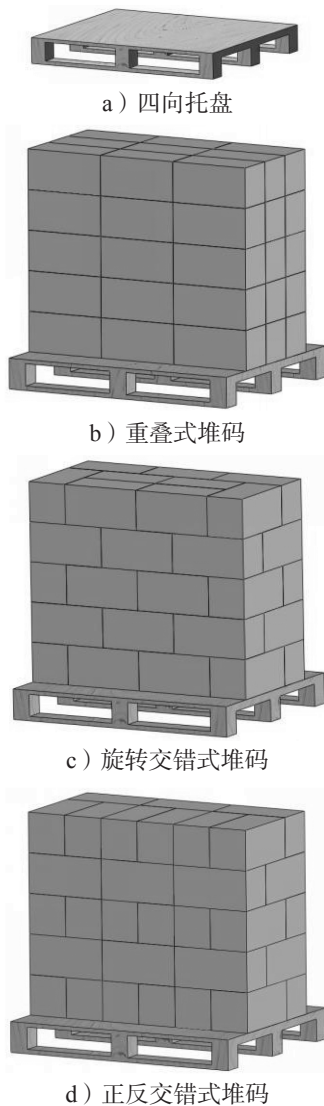


图1 堆码模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stacking model

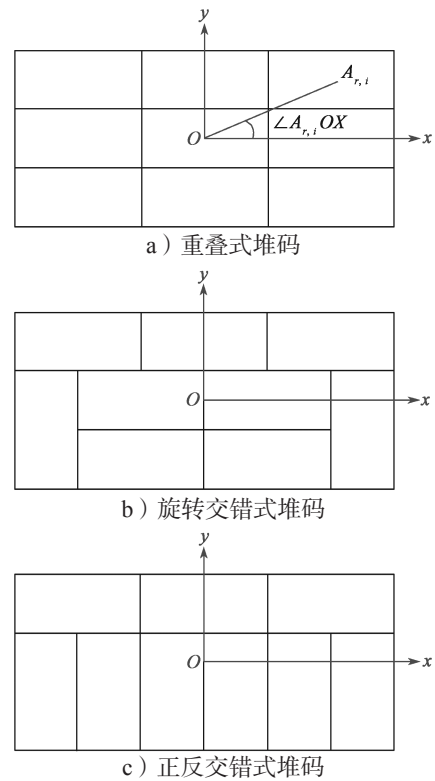
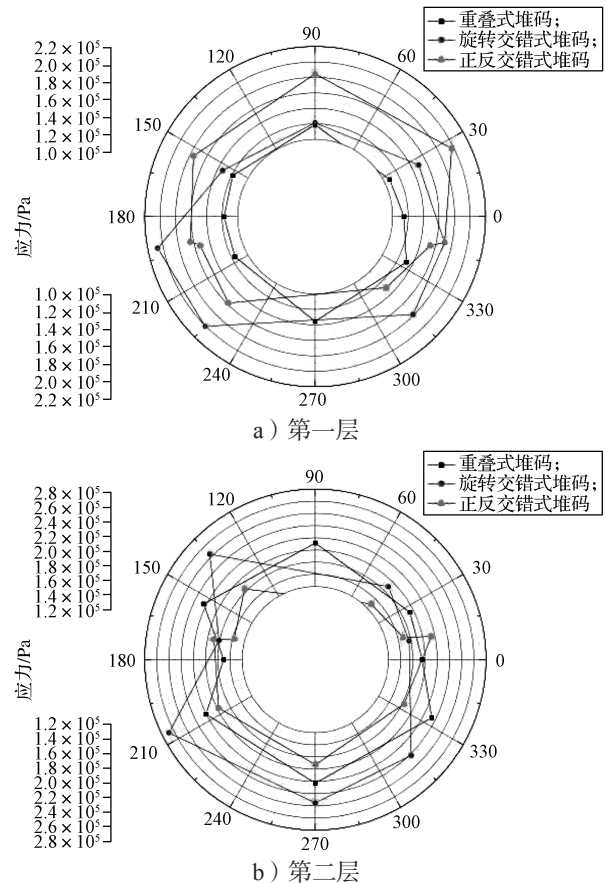


图2 不同堆码型式的坐标系

Fig. 2 Coordinate systems of different stacking models



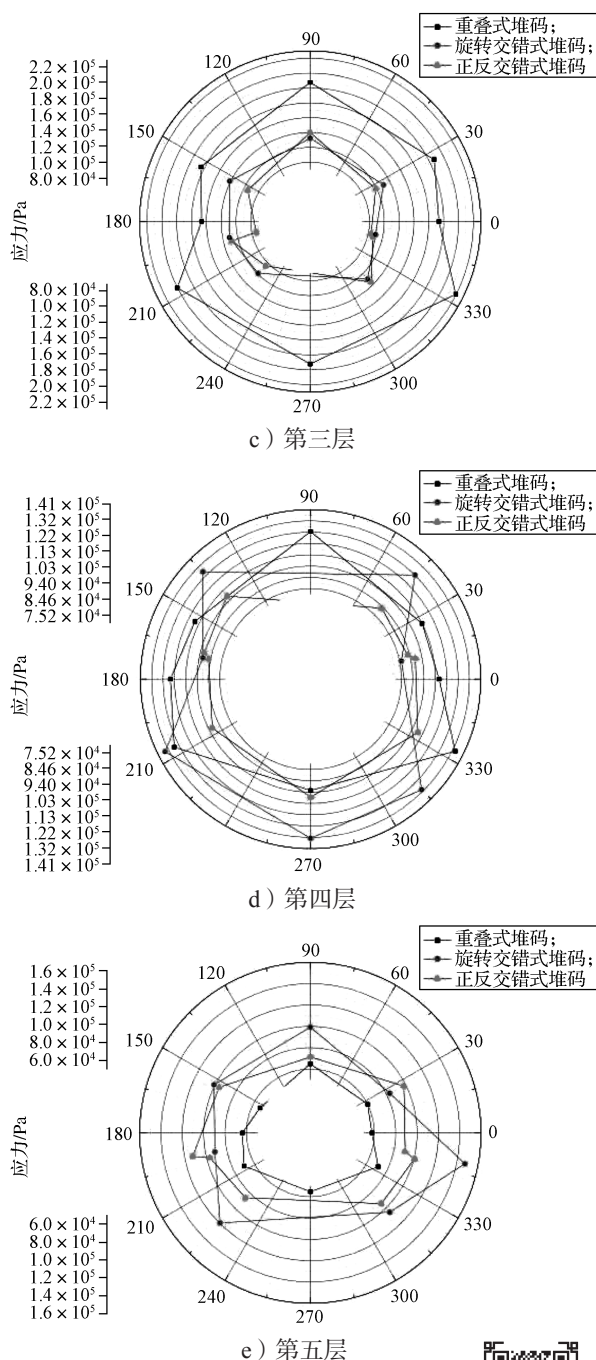


图3 不同层次不同堆码的应力包络图

Fig. 3 Stress envelope diagram of different layers and stacks

彩图

1.2 动力学分析

由于每层中 yOz 面与 zOx 面的纸箱中心不在同一平面, 因此通过谐响应与随机振动分析进行垂直轴向的分析, 并结合静力学分析判断最佳的堆码型式。物流包装件的稳定性会随着堆码层数的增加而改变^[4], 因此根据不同货车的高度计算堆码层数, 计

算方法如下。

$$B = E \times \left(\frac{4a}{Z} \right)^2 \times Z \times J, \quad (1)$$

式中: B 为瓦楞纸箱的抗压强度;

E 为瓦楞纸板的边压强度;

Z 为瓦楞纸箱的周长;

a 为瓦楞常数;

J 为纸箱常数。

根据实际瓦楞纸板的铺层形式, 边压强度可以表示为

$$E = R_1 + R_3 + f_B R_2, \quad (2)$$

式中: R_1 、 R_2 、 R_3 分别为瓦楞纸箱面纸、里纸、芯纸的横向环压强度;

f_B 为 B 型瓦楞纸的楞率, 取值为 1.59。

堆码层数 N 的计算公式为

$$B = KG(N-1), \quad (3)$$

式中: K 为经多次使用修正确定的安全系数, 取值为 6.5;

G 为纸箱和产品的总毛重, 取值为 5 kg。

由公式 (3) 计算得到 $N=96$, 即最大堆码为 96 层, 完全满足集装箱堆码的高度。

在后续研究中, 以 5 层堆码为算例分析不同型式堆码包装件的稳定性, 如图 1 所示。

2 堆码件稳定性仿真分析

2.1 堆码型式选取

仓储和物流中常见的堆码型式有 4 种: 重叠式堆码、旋转交错式堆码、正反交错式堆码、纵横交错式堆码。根据纸箱的堆码型式, 采用纵横交错式堆码时, 第二层不能规整摆放, 故本文只分析前 3 种堆码型式的稳定性。本研究采用尺寸为 1200 mm × 1000 mm × 150 mm 四向木托盘 (图 2a) 满铺堆码, 其中堆码件纸箱的尺寸和材质参数如下: 长、宽、高分别为 400, 200, 200 mm; 面纸、里纸、芯纸定量分别为 110, 110, 130 g/m², 芯纸的楞型为 B 型, 楞率为 1.59。

2.2 有限元模型建立

假设包装件摆放的轴向都与重叠式堆码的轴向保持一致, 建立图 2 所示的应力包络图分析所需的坐标系。根据本文提出的方法, 通过 Solid Works 建立图 1 所示的重叠式堆码、旋转交错式堆码、正反交错式堆码的三维模型; 将模型导入 ANSYS Workbench

中,在 Workbench 中赋予模型的材料属性、约束条件、接触关系,并完成网格划分。通过静力学、谐响应、随机振动分析^[7-11]求解出各纸箱的最大应力值、频率-应力谱、形变量。

2.3 静力学分析

在静力学分析时先进行模态分析,材料属性如表 1^[12]所示。

表 1 材料属性
Table 1 Material properties

材料	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比 ($xy/yz/zx$ 轴向)	弹性模量 /MPa ($xy/yz/zx$ 轴向)	剪切模量 /MPa ($xy/yz/zx$ 轴向)
纸箱	143.40	0.34/0.01/0.01	118.50/64.30/0.59	33.78/1.84/2.15
托盘	437.47	0.3	2×10^3	

位于顶层包装件 z 轴的位移分量为 0,其它轴位移分量为自由,托盘底面为固定。由于在实际运输过程中,堆码件常采用捆绑型式,所以纸箱和纸箱、纸箱和木托盘之间为绑定接触。纸箱、木托盘采用六面体网格划分,并进行求解。静力学分析时,由公式(3)知,产品与纸箱总毛重为 5 kg,对 1~5 层每个纸箱施加垂直于木托盘方向的载荷,分别为 98.0, 73.5, 49.0, 24.5, 0 N,木托盘底面为固定,并进行求解。由静力学分析得到各层位于外围包装件的最大应力

值,以包装件受到的最大应力值作为旋转角 $\angle A_{r,i}Ox$ 的径向长度,依次连接该层面上相邻纸箱的径向长度末端点,得到每层堆码型式的应力包络图,如图 3 所示。

2.4 动力学分析

在上述模态分析的基础上进行谐响应和随机振动分析。

谐响应分析时,由于模拟运输中的振动频率一般为 1~300 Hz,而货运汽车振动频率一般为 1~200 Hz,故输入 Range 值为 1~200 Hz,并设 Solution Intervals 为 100。根据路况不良的运行情况得到各方向的最大加速度幅值,并设左右(x 轴方向)、前后(y 轴方向)、上下(z 轴方向)加速度幅值分别为 0.5g、1.5g、1.3g。输入参数后进行求解。根据求解结果筛选出每层包装件的最大、最小应力谱。本文只选取第一、三、五层的结果进行讨论,如图 4~6 所示。

随机振动分析时,首先将 Boundary Condition 设为 All Fixed Supports,再在 PSD G 中填入公路运输随机振动频率-功率谱密度,并将方向设为 z 轴进行求解。为验证上述静力学分析的结论,选取第一、三、五层部分包装件(见图 7)形变量的结果,由随机振动仿真得到 x 、 y 、 z 轴方向的形变量,如图 8 所示。

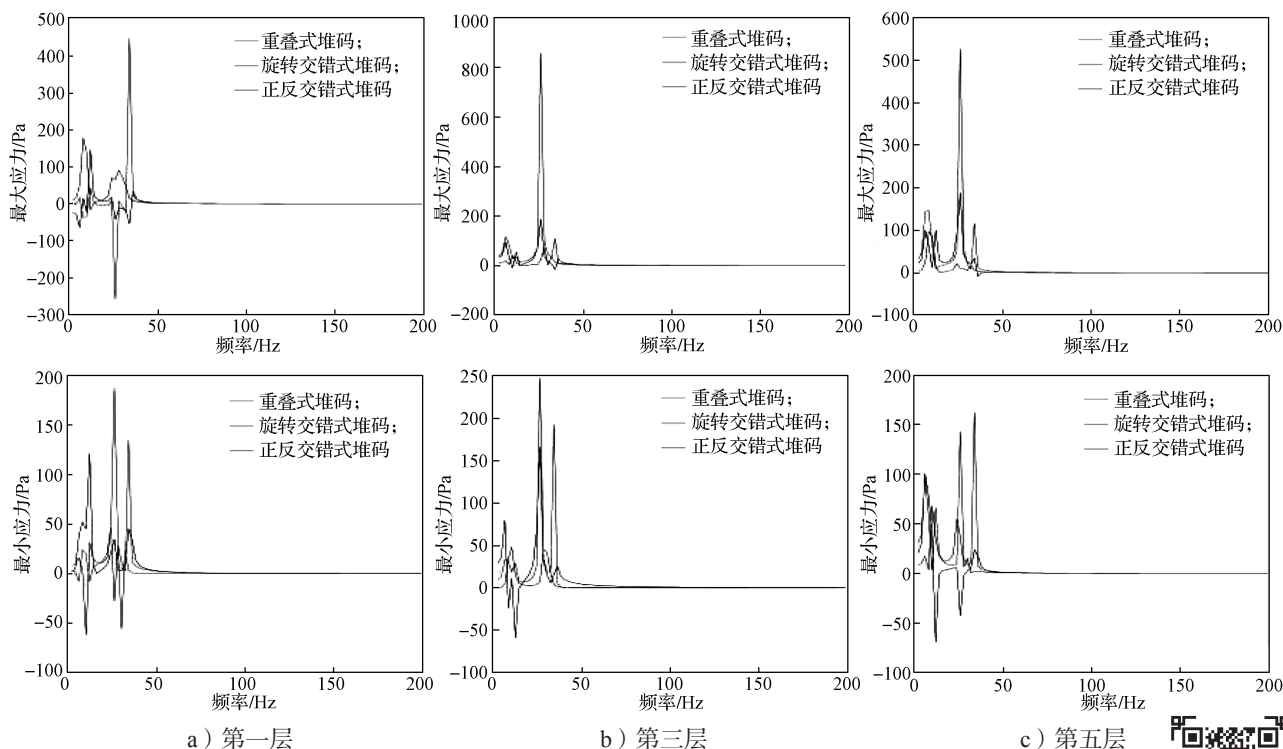


图 4 包装件 x 轴向应力谱

Fig. 4 x -axial stress spectrum of package

彩图



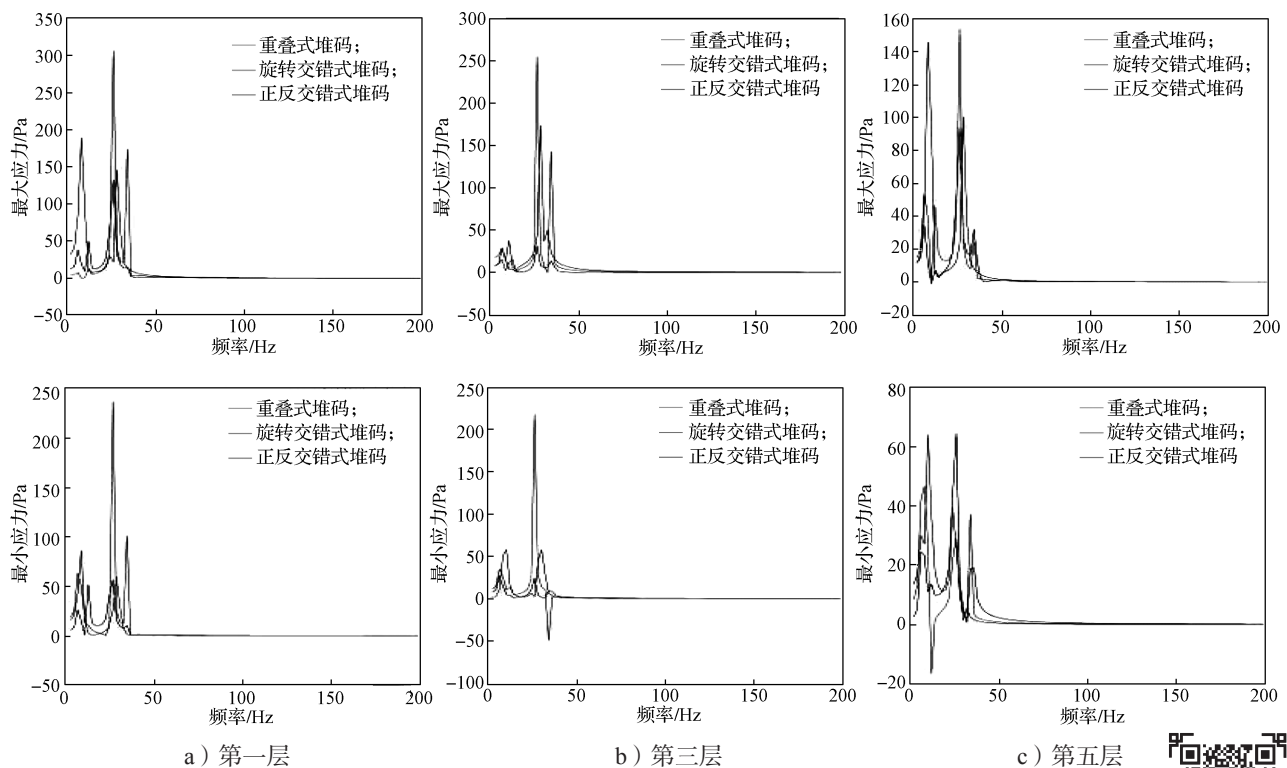


图 5 包装件 y 轴向应力谱
Fig. 5 y -axis stress spectrum of package

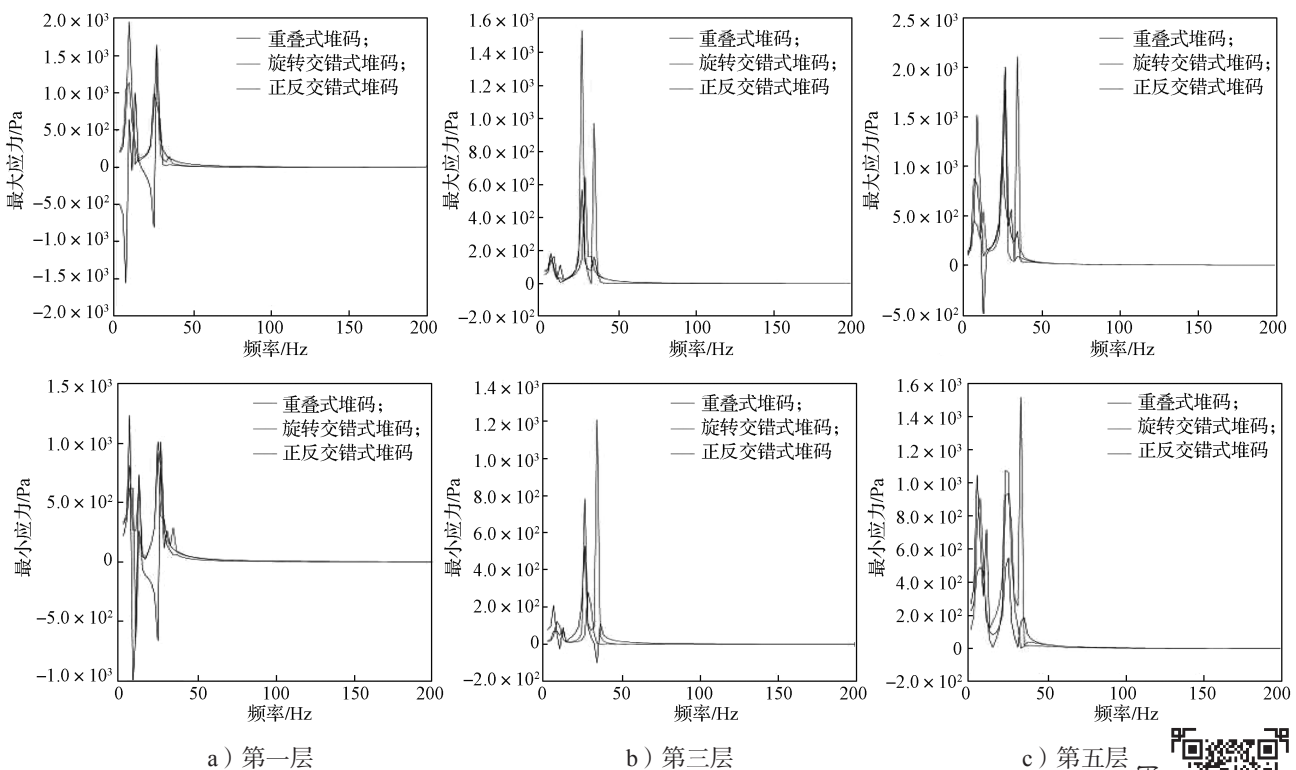


图 6 包装件 z 轴向应力谱
Fig. 6 z -axis stress spectrum of package



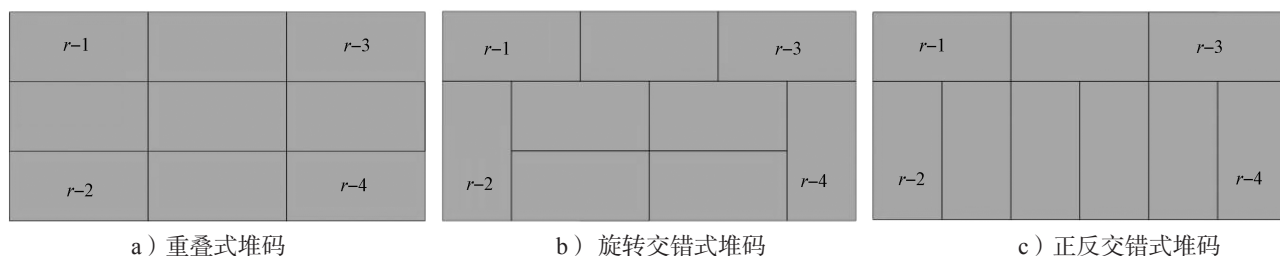


图 7 纸箱序号示意图

Fig. 7 Carton serial number diagram

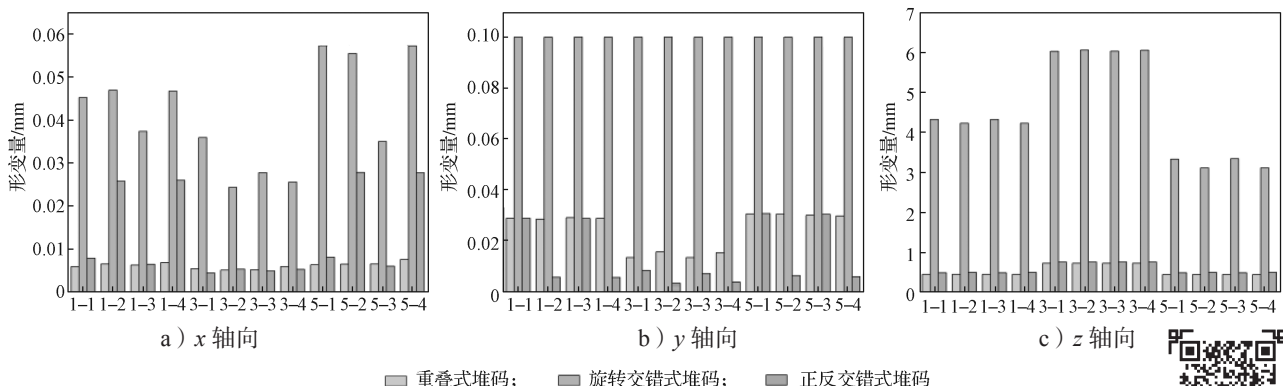


图 8 各轴向包装件的形变量

Fig. 8 Deformation of each axial package



彩图

3 结果分析

3.1 应力包络图

由图 3 的应力包络图可知, 3 种堆码型式重叠式堆码在第一层的应力包络图面积最小; 在第二、三、四层, 正反交错式堆码明显比其它两种堆码型式的应力包络图的面积小; 在第五层, 重叠式堆码的应力包络图面积最小。

将正反交错式第一层的应力包络图面积作为单位 1, 其它各层和其它堆码型式与之相比, 得到应力包络图面积的比例系数。包络图面积及其比例系数如表 2 所示。

由表 2 可知, 随着层数的增加, 重叠式堆码的应力包络图面积, 从第一层到第二层突增, 第二层起呈现下降的趋势; 旋转交错式堆码的应力包络图面积, 从第一层到第二层突增, 从第二层到第三层下降, 之

后各层基本稳定; 正反交错式堆码的应力包络图面积, 从第一层起各层呈现下降趋势。

对于堆码件, 层面应力随着层数的增加而减小更有利于保证多层堆码件的稳定性。因此, 3 种堆码型式中正反交错式堆码的稳定性最佳。但仅依据静力学分析并不能保证结论的准确性, 故需进行以下的综合评估。

3.2 谐响应分析

由图 4~6 可知, 3 种堆码型式的每层在各个轴向的最大、最小应力峰值, 出现在 8 Hz 或 25 Hz 附近。在 x 轴向 (见图 4), 正反交错式堆码的最大、最小应力峰值大部分低于其它两种堆码型式的; 在 y 轴向 (见图 5), 重叠式堆码的最大、最小应力峰值全部低于其它两种堆码型式的; 在 z 轴向 (见图 6), 3 种堆码型式的最大、最小应力峰值参差不齐, 需根据具

表 2 各堆码型式的应力包络图面积和比例系数

Table 2 Stress envelope diagram area and scale factor of each stacking type

堆码型式	第一层		第二层		第三层		第四层		第五层	
	面积	比例系数	面积	比例系数	面积	比例系数	面积	比例系数	面积	比例系数
重叠式	3.93×10^5	0.54	9.86×10^5	1.35	9.31×10^5	1.28	3.85×10^5	0.53	1.02×10^5	0.14
旋转交错式	6.95×10^5	0.95	1.14×10^6	1.57	3.00×10^5	0.41	4.01×10^5	0.55	2.84×10^5	0.39
正反交错式	7.28×10^5	1.00	6.77×10^5	0.93	2.53×10^5	0.35	2.49×10^5	0.34	2.13×10^5	0.29

体数值分析。

各堆码型式在不同层次、不同轴向的最大、最小应力峰值如表 3 所示。在 x 轴向, 第一层最大应力值最低的是重叠式堆码, 最小应力值最低的是正反交错式堆码; 第二、三层的最大、最小应力值最低的是正反交错式堆码; 第四层最大应力值最低的是重叠式堆码, 但最小应力值最低的是正反交错式堆码; 第五层最大、最小应力值最低的是正反交错式堆码。在 y 轴向, 第一层到第四层最大、最小应力值最低的是重叠式堆码; 第五层最大应力值最低的是重叠式堆码,

但最小应力值最低的是旋转交错式堆码。在 z 轴向, 第一层最大应力值最低的是重叠式堆码, 但最小应力值最低的是旋转交错式堆码; 第二层最大应力值最低的是正反交错式堆码, 但最小应力值最低的是重叠式堆码; 第三层最大应力值最低的是重叠式堆码, 但最小应力值最低的是正反交错式堆码; 第四层最大、最小应力值最低的是旋转交错式堆码; 第五层最大、最小应力值最低的是正反交错式堆码。

不同轴向的最大、最小应力峰值与堆码件层次之间的关系曲线如图 9 所示。

表 3 各堆码型式在不同层次、不同轴向的应力峰值

Table 3 Stress peak value of each stacking type at different levels and different axes

Pa

堆码型式	轴向	第一层		第二层		第三层		第四层		第五层	
		最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
重叠式	x 轴	147.04	121.24	229.46	158.34	568.99	528.65	119.83	87.95	188.00	100.24
	y 轴	132.68	56.67	64.50	16.76	31.45	26.94	63.00	35.23	93.61	64.55
	z 轴	1575.50	1233.30	1296.00	570.42	568.99	528.65	872.61	743.57	2006.00	1045.2
旋转交错式	x 轴	449.32	188.13	915.18	190.92	859.08	248.47	173.42	124.63	527.49	162.23
	y 轴	306.23	237.03	306.49	176.49	255.10	217.49	173.42	124.63	153.81	46.67
	z 轴	1647.90	919.31	1856.40	1324.10	1534.20	1206.90	713.09	553.53	2111.7	1514.70
正反交错式	x 轴	179.17	61.58	113.94	73.54	73.27	48.21	147.37	70.87	97.06	68.07
	y 轴	188.92	86.48	156.99	99.15	173.64	57.88	147.37	70.87	146.05	63.98
	z 轴	1952.80	1014.60	775.17	647.75	645.84	278.89	967.17	625.97	1521.50	936.24

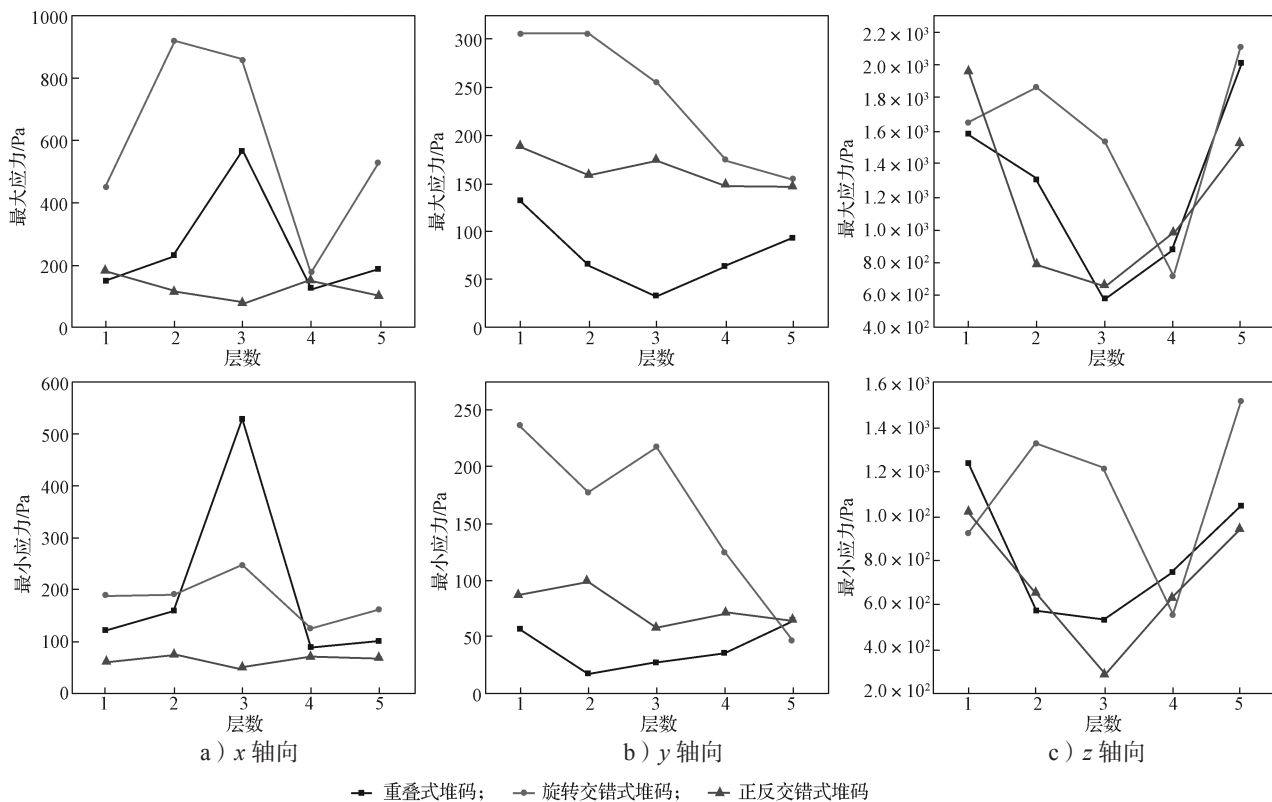


图 9 不同轴向的最大、最小应力峰值与堆码件层次之间的关系曲线

Fig. 9 Relation curve between the maximum and minimum stress peaks in different axes and the stacking layers

从图9可以看出,正反交错式堆码的曲线变化比重叠式、旋转交错式堆码的更平稳。因此,在捆绑约束的状态下,正反交错式堆码较为稳定。

3.3 随机振动分析

由图8中各轴向包装件的形变量可知,在 x 轴向,重叠式堆码比正反交错式堆码的形变量稍小,旋转交错式堆码形变量最大;在 y 轴向,正反交错式堆码的形变量均比其它两种堆码型式的小;在 z 轴向,正反交错式堆码与重叠式堆码的形变量相差不大,旋转交错式堆码形变量最大。综合评估,正反交错式堆码的形变量比其他2种堆码型式的小,因此正反交错式堆码较为稳定,这与上述静力学及谐响应分析所得的结论一致。

4 结论

本文通过应力包络图面积、谐响应、随机振动综合分析,判断不同堆码型式物流包装件层面上的稳定性,可得如下结论:

1) 由静力学分析得到应力包络图,只有正反交错式堆码的应力包络图面积随着层数的增加而逐渐减小。

2) 由谐响应分析得到各轴的最大、最小应力谱,综合对比得波动较小的为正反交错式堆码。

3) 由随机振动分析得到各轴向包装件的形变量,综合对比形得变最小的是正反交错式堆码。

因此,在运输过程中当堆码件处于捆绑状态时,选择正反交错式堆码更为稳定。

参考文献:

- [1] 王祎楼. 基于货物组合的三维装箱启发式算法[J]. 物流工程与管理, 2018, 40(12): 73-75.
WANG Yilou. A Heuristic Approach to Container Loading Problem Based on Cargo Combination[J]. Logistics Engineering and Management, 2018, 40(12): 73-75.
- [2] 徐跃明, 方锦明, 刘哲贤, 等. 成品烟箱自动装车系统垛型算法[J]. 起重运输机械, 2021(23): 76-82.
XU Yueming, FANG Jinming, LIU Zhexian, et al. Stacking Algorithm of Automatic Loading System of Finished Smoke Box[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2021(23): 76-82.
- [3] 张洪军, 邢红光. 改进蚁群算法在港口集装箱装载中的应用[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2020, 36(1): 34-38.
- [4] 唐英, 凌鉴, 尹书贤, 等. 滑板托盘集装单元货载搬运稳定性研究[J]. 包装工程, 2022, 43(3): 144-154.
TANG Ying, LING Jian, YIN Shuxian, et al. Handling Stability of Palletized Unit Loads with Slip Sheets[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(3): 144-154.
- [5] 王艳芳. 航空行李在线码放规划及垛型稳定性评估[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
WANG Yanfang. Research on Online Luggage Planning and Evaluation of Stack Stability[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [6] 张长勇, 王艳芳, 吴智博. 强异构货物垛型稳定性分析及评估方法[J]. 包装工程, 2019, 40(15): 164-169.
ZHANG Changyong, WANG Yanfang, WU Zhibo. Stability Analysis and Evaluation Method for Strong Heterogeneous Stack Type[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(15): 164-169.
- [7] 王志伟, 曹燕. 托盘堆码包装单元随机振动响应的实验研究[J]. 振动工程学报, 2021, 34(6): 1187-1197.
WANG Zhiwei, CAO Yan. Experimental Investigation on Response of Random Vibration for Pallet Stacked Packaging Unit[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(6): 1187-1197.
- [8] 林深伟, 王志伟. 两层堆码包装单元的随机振动响应[J]. 包装学报, 2017, 9(4): 10-19.
LIN Shenwei, WANG Zhiwei. Response of Two Layer Stacked Packaging Unit in Random Vibration[J]. Packaging Journal, 2017, 9(4): 10-19.
- [9] 王志伟, 戚德彬. 两层计算机堆码包装动力学试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 90-99.
WANG Zhiwei, QI Debin. Experimental Study of Dynamic Response of Two Layers Stacked Packaging Units of Computers[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 90-99.
- [10] 王志伟, 林深伟. 随机振动下产品包装件动态响应的实验研究和有限元分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 223-229.
WANG Zhiwei, LIN Shenwei. Tests and FE Analysis for Dynamic Responses of Packaged Products Under Random Vibration Environment[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 223-229.
- [11] 王军, 王志伟. 多层堆码包装系统冲击动力学特性

- 研究 (II): 破损边界 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 108-109, 181.
- WANG Jun, WANG Zhiwei. Combined Damage Boundary Curve of Linear Stacking Packaging System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 108-109, 181.
- [12] 曾台英, 周龙炎, 江海林. 复杂运输工况下堆码包装的疲劳寿命分析方法 [J]. 包装工程, 2022, 43(5): 159-166.
- ZENG Taiying, ZHOU Longyan, JIANG Hailin. Fatigue Life Analysis Method of Stacked Products under Complex Transportation Conditions[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(5): 159-166.
- [13] 段 良, 赵希枫, 赵可可, 等. 基于脆值理论的家
空调器挂机包装防护研究 [J]. 上海包装, 2017(10): 33-37.
- DUAN Liang, ZHAO Xifeng, ZHAO Keke, et al. Research on Package Protection of Household Air Conditioner on Hook Based on Fragility Theory[J]. Shanghai Packaging, 2017(10): 33-37.
- [14] 李雪佳, 钱 静, 张 敏, 等. X-PLY 型瓦楞纸板与原纸强度关系的研究 [J]. 包装工程, 2019, 40(7): 38-45.
- LI Xuejia, QIAN Jing, ZHANG Min, et al. Strength Relationship between X-PLY Corrugated Board and Base Paper[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 38-45.
- (责任编辑: 邓光辉)

Stability Analysis of Logistics Packages with Different Stacking Types

XU Zenggang, ZENG Taiying

(College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The concept of stress envelope diagram area is put forward by using finite element analysis method through static analysis, combined with harmonic response and random vibration analysis to comprehensively evaluate the stability of overlapping stacking, rotary staggered stacking, positive and negative staggered stacking packages. The results show that in the horizontal axis, the stress envelope diagram area of positive and negative staggered stacking gradually decreases with the increase of the number of layers, the stress is smaller than the other two stacking types, and the fluctuation and deformation of the maximum and minimum stress are relatively small among the three. In the vertical axis, the maximum stress and minimum stress of the three stacking types fluctuate greatly. The shape variable of the positive and negative staggered stacking is equivalent to that of the overlapping stacking, while the shape variable of the rotary staggered stacking is the largest. Therefore, in the transportation process, when the stacking pieces are bundled or fixed by winding film, it is better to choose the positive and negative staggered stacking.

Keywords: stacking type; logistics package; stability; stress envelope diagram