餐桌岩板运输包装设计与跌落仿真分析

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2026.3007

骆泽龙[1] 孙德强[1]
梁巧萍[1] 张卫红[2]
路冰琳[2] 柯贤朋[1]

1. 陕西科技大学
轻工科学与工程学院
陕西 西安 710021
2. 中国包装科研测试中心
天津 300457

摘 要：以某款餐桌岩板为研究对象，开展其运输包装设计及跌落仿真分析。参照运输包装改进设计七步法，选用蜂窝纸板作为缓冲材料，配合瓦楞纸箱构成全纸化单件包装，并搭配木托盘组成集合包装。基于 ANSYS Workbench 开展包装件跌落仿真分析，并通过跌落试验验证仿真模型的可靠性。通过对不同跌落工况的模拟，揭示不同跌落姿势下集合包装内不同位置处餐桌岩板最大主应力和加速度的响应规律。结果表明，各工况下岩板的跌落冲击加速度均低于产品脆值所要求的加速度，最大主应力亦小于其破裂强度，所设计的运输包装方案能够有效满足产品在运输过程中的跌落防护要求。

关键词：餐桌岩板；跌落工况；蜂窝纸板；最大主应力；响应加速度
中图分类号：TB482.2；TS206.2 **文献标志码：**A
文章编号：1674-7100(2026)03-0061-11
引文格式：骆泽龙，孙德强，梁巧萍，等 . 餐桌岩板运输包装设计与跌落仿真分析 [J]. 包装学报，2026，18(3)：61-71.

1 研究背景

近年来，餐桌岩板凭借其独特的表面纹理和优异的耐磨性能，在家居市场中的需求量持续增长[1]。然而，由于岩板材料具有“高脆性、大尺寸”的特点，加之相关配套包装尚未得到企业足够重视，产品在运输过程中常因跌落冲击而发生破损，这不仅造成直接的经济损失，也严重影响了消费者的购买体验，已成为制约行业发展的痛点问题。与此同时，随着国家“双碳”目标的深入推进，生态设计与绿色物流已成为家具包装领域的基本要求[2]，如何在实现环保目标的同时，保障大件易碎家具的运输可靠性，正日益成为行业关注的焦点。在此背景下，用蜂窝纸板等环保型材料代替传统发泡材料已成为行业发展趋势，其承载与缓冲性能研究亦成为国内外包装领域的热点之一[3]。廖国瑾[4]验证了蜂窝纸板对空调产品的运输防护效果优于 EPS 泡沫；岑蕾等[5]、巩桂芬等[6]分别以蜂窝纸板和瓦楞纸板为核心缓冲材料开展包装结构设计，进一步推动了环保材料在缓冲防护中的应用。然而，上述研究对蜂窝材料进行了简化，与其实际的各向异性特性存在差异，导致仿真结果与实际情况存在一定偏差。

跌落是大型包装容器最容易受到冲击的方式[7]，目前已有大量学者借助有限元仿真开展相关研究。P. Yayla 等[8]结合有限元仿真与应变测试，对壁挂式空调室内机的跌落过程进行了分析；李志强等[9]

收稿日期：2025-12-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51575327）；陕西省创新能力支撑计划项目（2025JC-GXPT-022）；陕西省中试基地建设项目（2023ZSJD-06）；陕西省市场监督管理局重点科技研发项目（2025ZDKY06）；陕西省教育厅重点实验室及基地项目（16JS014）
作者简介：骆泽龙，男，硕士生，主要研究方向为产品运输包装系统设计及其虚拟测试，E-mail：lzl200620@163.com
通信作者：孙德强，男，教授，主要从事机器学习、虚拟仿真、工业软件开发、工程结构防护性能预测与优化设计研究，E-mail：wampire@126.com

建立了水槽式洗碗机运输包装模型，验证了其缓冲结构的防护性能。在易碎品包装领域，孙德强等[10]针对真空平板玻璃设计了托盘集装包装系统，并通过跌落仿真与试验验证了方案的可靠性；郭新明等[11]基于 ANSYS Workbench 对落地镜的缓冲包装进行了优化设计。上述研究表明，有限元仿真能够有效预测包装件在跌落冲击下的动力学响应，是验证包装可靠性的重要手段。尽管如此，现有研究多聚焦于单件包装的仿真与可靠性验证，针对集合包装系统的瞬态冲击响应分析以及“单件－集合”体系的系统性仿真研究仍较为匮乏。为此，本文以餐桌岩板为研究对象，开展单件及集合运输包装设计，并基于 ANSYS Workbench 进行跌落仿真分析，结合试验从响应加速度和最大主应力等维度综合评估包装方案的跌落防护效能，以期为脆性产品标准化包装件的可靠性验证提供参考。

2 餐桌岩板运输包装设计

2.1 流通环境及产品特性分析

2.1.1 流通环境

餐桌岩板的全程流通链路遵循工厂→区域配送中心→干线运输→电商前置仓→末端宅配→消费者的路径，全程流通周期约为 3 d。各环节的具体作业环境与风险特征分析如下：

1）工厂至区域配送中心。该环节以厢式货车为运输工具，采用叉车进行批量装卸作业。由于路面平整性较好，主要风险来源于堆码压力与持续振动。

2）干线运输。以重型半挂货车为主要运载工具，运输距离通常在 500~1500 km 之间。除持续随机振动外，运输过程中因急加速、急刹车及转弯等操作易引发包装件窜动，边角部位的碰撞。

3）电商前置仓。产品在横梁式货架上平放存储，分拣环节依赖人工辅助叉车搬运。叉车启停产生的惯性力易导致包装件发生轻微位移。

4）末端宅配。该环节全程依赖人工操作，单次搬运重量较大，装卸过程中易因人为失误导致包装件跌落，是产品破损风险最为集中的关键环节。

2.1.2 产品特性

该款餐桌岩板属于典型的大尺寸、重质量、高脆性复合构件，具体参数如下：质量 m=45 kg，外形尺寸为 1800 mm × 900 mm × 18 mm（长 × 宽 × 厚），长宽比为 2:1，属于薄型板状结构，抗弯曲与抗冲击能力较弱。产品为多层复合结构，从外至内依次为：高压陶瓷面板，具备优异的耐磨性能，但断裂韧性较低，是运输过程中重点防护的部位；聚氨酯胶黏层，用于黏结陶瓷面板与刨花板芯，低温环境下易发生脆化；刨花板芯，提供整体结构支撑；三聚氰胺平衡背板，用于平衡面板应力，防止翘曲变形。

2.1.3 产品脆值的确定

为确定餐桌岩板的脆值，本研究首先采用公式法[12]初步估算得产品脆值为 51g。鉴于该产品价值较高，为提升脆值的准确性与可靠性，参考李国志等[13]提出的有限元法，并依据 ASTM D3332 标准[14]，构建了相应的有限元仿真模型。在模型中，分别沿 x（岩板短边方向）、y（岩板长边方向）和 z（岩板方向）3 个正交方向施加半正弦加速度脉冲，并按一定步长增加加速度幅值，求解餐桌岩板的最大主应力，并将其与岩板的破裂强度进行比较：若最大主应力小于破裂强度，则增大冲击加速度；若最大主应力超过破裂强度，则步长减半并减小冲击加速度。当前后两次激励所产生的最大主应力之差小于 0.1 MPa，且后一次最大主应力刚好超过破裂强度时，将前一次施加的半正弦脉冲加速度幅值作为该方向的临界加速度，并将该临界加速度与重力加速度（取 g=9.8 m/s^2）的比值，定义为该方向上的脆值。最后，取 3 个方向的最小脆值作为餐桌岩板的整体脆值。3 个方向的临界加速度及对应的最大主应力如表 1 所示，其脆值分别为 140g、125g 和 45g，故该产品的整体脆值为 45g。

表 1 不同方向的临界加速度－最大主应力

Table 1 Critical accelerations and maximum principal stresses in different directions

x 方向		y 方向		z 方向	
临界加速度 /(m·s^{-2})	最大主应力 /MPa	临界加速度 /(m·s^{-2})	最大主应力 /MPa	临界加速度 /(m·s^{-2})	最大主应力 /MPa
1373.80	24.91	1226.40	24.96	441.30	24.98

2.2 现有包装缺陷

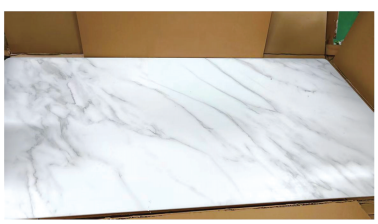
现有餐桌岩板包装方案如图 1 所示，采用 EPE 泡沫衬垫对产品四周进行局部防护，顶部与底部则以整块蜂窝纸板作为缓冲层，外部用瓦楞纸箱封装。该方案在实际应用中存在以下 3 方面问题：

1）绿色包装理念贯彻不足：内部缓冲衬垫采用 EPE 泡沫塑料，材料本身降解周期长，废弃后难以自然分解，与当前绿色包装的环保要求存在差距。

2）防护性能存在短板：现有包装未针对陶瓷面板边角区域进行重点加固，导致产品在流通过程中破

损频发。根据企业提供的实测数据，该包装方案引发的产品运输破损率高达 10%，严重影响了物流效益与消费者体验。

3）固定可靠性不足：EPE 衬垫挺度较低，易发生滑动，对产品的包裹与约束作用有限，难以有效限制餐桌在箱内的位移。运输过程中因产品窜动引发的边角碰撞，易导致陶瓷面板开裂甚至整体结构破损，进一步加剧了运输风险。



a）餐桌岩板



b）现有包装

图 1　餐桌岩板及现有包装

Fig. 1　Dining table rock plate and its existing packaging

2.3　包装设计原则

为降低餐桌岩板在运输过程中因跌落冲击而破损的风险，本研究参照产品运输包装改进设计七步法 [15]。以包装 5R 原则为指导 [16]，确立了“精准防护、绿色环保、高效通用”的设计原则，具体内容如下：

1）强化边角区域的缓冲设计。针对餐桌岩板陶瓷层边角部位易产生裂纹且裂纹易扩展，可设计双层全包裹式缓冲结构对该区域进行重点加固，有效吸收跌落冲击能量，提升局部防护可靠性。

2）贯彻全生态设计理念。缓冲与包装主体选用蜂窝纸板、瓦楞纸板、胶合板等可回收材料，全生命周期降低包装对环境的影响 [17]。

3）采用模块化组件设计。通过标准化组件的灵活插接与组合，可在满足多型号产品包装需求的同时，有效降低包装设计与生产成本，提升包装作业效率。

2.4　单件包装方案

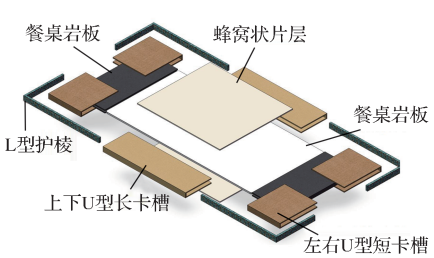
依据蜂窝纸板的缓冲性能特点，选取合适的蜂窝纸板材料作为缓冲层 [18]。鉴于餐桌岩板在使用中易发生脆性断裂，本设计采用全面包裹的缓冲结构以增强防护效果。因餐桌岩板价值高、破损后不可修复，将安全系数设定为 1.4，并以最为严苛的角跌落工况为基础，采用有限元方法对缓冲结构的厚度进行优化设计。以 10 mm 厚度作为初始值，仿真分析得到材料的最大主应力和加速度峰值，分别与材料的破裂强度及产品脆值进行比较，初步确定缓冲厚度的合理区间为 10~20 mm。在此基础上，采用区间中点厚度进行验证，根据仿真结果逐步缩小厚度范围，并通过细化步长向最优值逼近。不同蜂窝厚度的仿真结果对比见表 2。在满足最大主应力和加速度峰值的前提下，得到最优厚度值为 13.4 mm。结合蜂窝纸板的实际规格，最终确定缓冲层厚度为 15 mm。

表 2　不同蜂窝厚度仿真结果对比

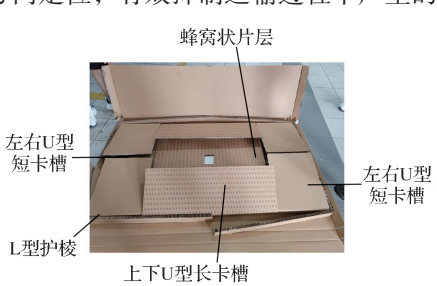
Table 2　Simulation results with different honeycomb thicknesses

蜂窝厚度 /mm	最大主应力 /MPa	最大响应加速度 /g
10	30.25	58.2
12	20.12	45.7
15	13.39	26.1
20	8.54	19.8

单件包装采用分体式模块化结构（见图 2），各部件通过插接组合实现快速装配，能够灵活适配不同尺寸的餐桌岩板。包装内部由 U 型卡槽、片状缓冲层和 L 型护棱组成。U 型卡槽对边角进行支撑并实现水平方向定位，有效抑制运输过程中产生的窜动；



a）部件组成图



b）产品组装图

图 2　餐桌岩板单件包装件及其组装图

Fig. 2　Single package for the dining table rock plate and its assembly drawing

顶部与底部分别设有蜂窝状片层，用于吸收垂直方向的冲击力；L 型护棱则对四角形成多层包覆，强化角部易损区域的缓冲防护性能。

2.5 集合包装方案

针对现有餐桌岩板集合包装中存在的木箱空间利用率低及资源浪费问题，本文在综合考虑运输车辆货厢尺寸、托盘极限承载能力及装卸作业需求的基础上，提出卡槽分隔式一体化循环集合包装方案（见图 3）。该方案采用“立式插接＋托盘集成”的结构形式，可容纳 10 块餐桌岩板，实现产品的高效集装。一方面，通过胶合板立向卡槽与托盘一体化成型结构，有效增强包装整体的抗弯抗压性能与承载稳定性；另一方面，利用垂直分隔布局，避免产品在运输过程中发生碰撞与挤压损伤。该方案不仅减少了木材用量，同时显著提升了物流装卸与仓储作业效率。

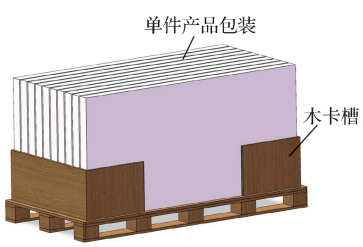


图 3 餐桌岩板集合包装件内部结构

Fig. 3 Internal structure of unit load package for the dining table rock plate

3 跌落仿真分析

3.1 跌落有限元模型建立

为验证所设计的餐桌岩板包装件在跌落工况下的可靠性，采用 ANSYS Workbench 对包装件的跌落过程进行仿真模拟。依据国家标准 GB/T 5398—2016《大型运输包装件试验方法》[19] 与 GB/T 4857.17—2017《包装 运输包装件基本试验 第 17 部分：编制性能试验大纲的通用规则》[20] 的相关规定，设定单件包装件的跌落高度为 400 mm，由此计算得出其接触地面瞬间的速度约为 2800 mm/s。重力加速度取值为 9806.6 mm/s²，地面模型设为刚性固定支撑，单次仿真分析的总时长为 15 ms。对于集合包装件，跌落高度设定为 300 mm，对应的接触地面瞬时速度约为 2425 mm/s。重力加速度取值跟单件包装件一样，仿真时长为 40 ms。通过仿真获取产品在跌落过程中的最大应力值，以此评估包装结构对产品的防护效果。餐桌岩板单件包装与集合包装的跌落有限元模型分别如图 4 和图 5 所示。

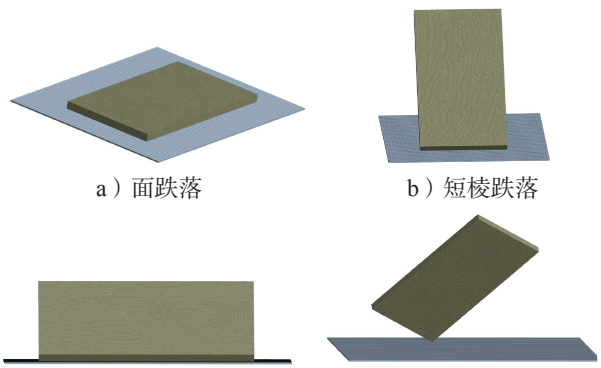


图 4 餐桌岩板单件包装跌落有限元模型

Fig. 4 Drop finite element model of single package for the dining table rock plate

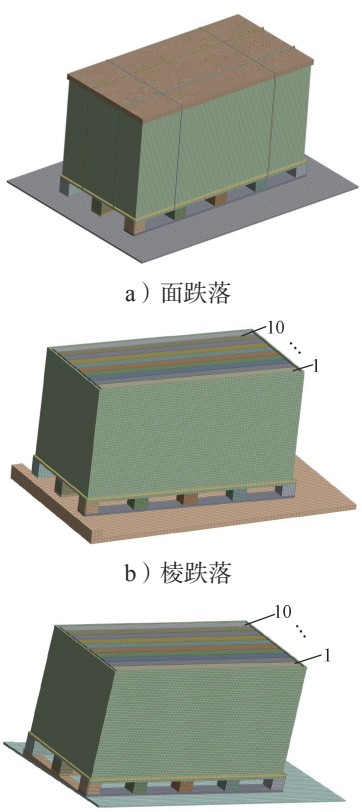


图 5 餐桌岩板集合包装跌落有限元模型

Fig. 5 Drop finite element model of unit load packaging for the dining table rock plate

3.1.1 材料选取

有限元仿真中，核心材料属性主要包括密度、弹性模量和泊松比等关键力学参数。蜂窝材料与瓦楞纸板均属于芯层为多孔结构的夹层复合材料 [21-22]，仿真中需进行等效处理。基于等效均匀化理论，可将二

者等效为厚度相同的正交各向异性板。蜂窝材料直接采用 ANSYS Workbench 材料库中的内置蜂窝模型，胶合板则选用正交各向异性模型。对于集合包装中所使用的捆扎带，其在运输过程中主要承受纵向拉伸载荷，横向受力可忽略不计，因此在仿真中仅考虑其纵向力学性能，将其视为各向同性材料。各包装材料的力学参数及参考标准如表 3 所示。

根据表 3 相关标准以及企业提供的数据信息，汇总得到餐桌岩板包装核心材料的力学参数，详见表 4。

表 3　有限元仿真核心材料及参考标准

Table 3　Core materials and reference standards for finite element simulation

材　料	参　考　标　准
蜂窝、瓦楞	GB/T 1454—2021《夹层结构侧压性能试验方法》[23] GB/T 1453—2022《夹层结构或芯子平压性能试验方法》[24]
捆扎带	GB/T 1040.1—2018《塑料 拉伸性能的测定 第 1 部分：总则》[25] GB/T 1040.3—2006《塑料拉伸性能的测定 第 3 部分：薄膜和薄片的试验条件》[26]
胶合板	GB/T 9846—2015《普通胶合板》[27] GB/T 17657—2022《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》[28]

表 4　餐桌岩板包装材料的力学参数

Table 4　The mechanical parameters of packaging materials for the dining table rock plate

材料	密度 /(kg·m^{-3})	弹性模量 /MPa			泊松比			剪切模量 /MPa			屈服应力 /MPa		
		E_x	E_y	E_z	μ_x	μ_y	μ_z	G_x	G_y	G_z	σ_x	σ_y	σ_z
胶合板	667	6190.5	2452.6	380.6	0.32	0.45	0.36	324.2	131.5	163.1	85.10	85.10	68.20
瓦楞纸板	165	334.4	361.3	10.7	0.21	0.01	0.01	310.7	45.3	26.2	1.46	0.67	0.95
蜂窝纸板	140	341.6	282.1	16.4	0.31	0.35	0.32	398.5	49.8	512.4	2.41	1.65	1.35
捆扎带	1085	5838.9			0.30			2245.7			196.70		
复合支撑层	703	3060.2			0.33			1150.4			16.20		
餐桌岩板	2370	7×10^4			0.24			2.8×10^4			25（破裂强度）		

3.1.2　接触设置

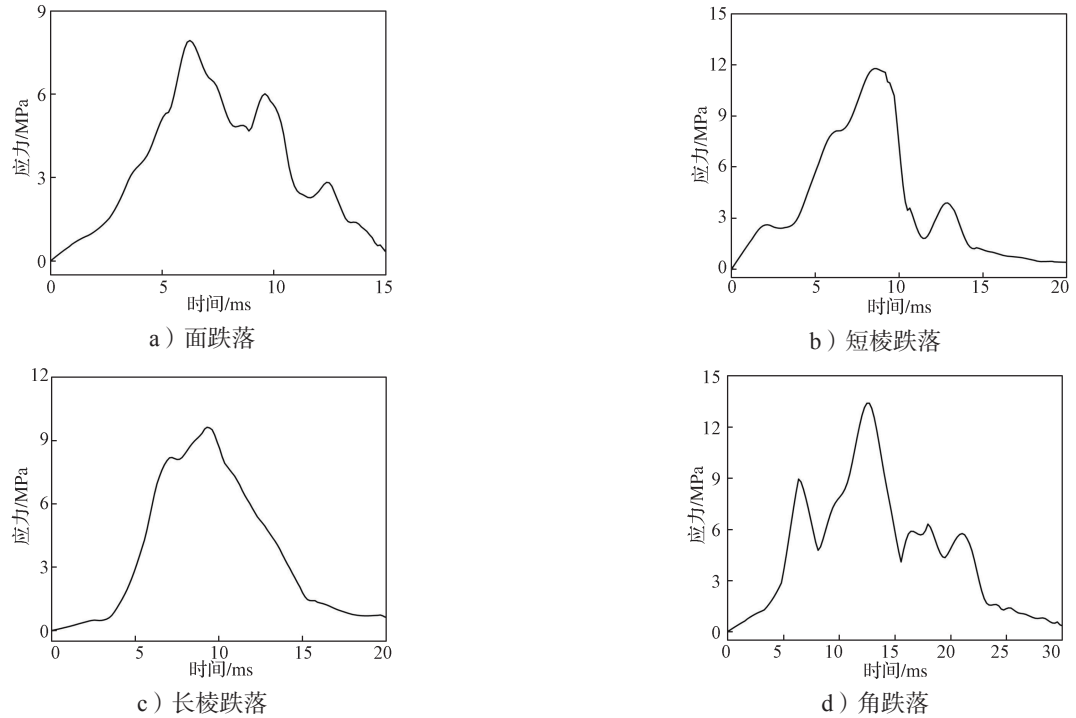
有限元仿真的接触设置遵循以下准则：通常将凸面、细网格面、刚度较小的柔性面以及高阶单元所在面定义为接触面；而将几何尺寸较大且能够包络另一侧的表面、粗网格面以及刚度较大的刚性面定义为目标面。当上述准则在实际应用中存在冲突时，则结合餐桌岩板运输包装的具体装配工况进行综合判定。为模拟包装件各部件之间的装配关系，仿真中主要采用绑定接触与摩擦接触两种接触类型。其中，绑定接触应用于托盘各构件之间、餐桌岩板与复合支撑层之间、纸箱与箱盖之间，以及捆扎带与纸箱、胶合板之间的连接区域；其余部件之间的接触均设置为摩擦接触。各材料间的摩擦因数通过摩擦因数仪实测获得，岩板与蜂窝板之间的动摩擦因数为 0.07，静摩擦因数为 0.10；蜂窝板或瓦楞板之间的动摩擦因数为 0.10，静摩擦因数为 0.15。

3.1.3　网格划分

网格划分直接影响有限元仿真的计算精度与求解效率 [29]。本研究通过多次网格划分试验及网格无关性验证，确定了合理的网格尺寸。采用“关键区域精细控制、非关键区域适度简化”的划分原则，对与岩板直接接触的缓冲结构区域，单元尺寸设为 5 mm，以精确捕捉应力分布特征；对于其他非关键区域，则将单元尺寸适当放宽至 10 mm，在保证计算精度的同时提升求解效率。据此，单件和集合包装件最终划分的节点数分别为 124 793 和 291 641，划分的单元数分别为 702 300 和 1 592 361，单元质量评价值分别为 0.814 75 和 0.763 64，均满足仿真分析对计算精度与可靠性的要求。

3.2　单件包装仿真结果

餐桌岩板的陶瓷面板属于典型的脆性材料，其断裂失效行为采用最大主应力进行判定。当材料内部任意位置的最大主应力超过其极限断裂强度时，即认为该点发生脆性断裂 [30]。为系统评估包装的缓冲防护性能与结构可靠性，选取餐桌岩板的最大加速度与最大主应力作为核心评价指标 [31]。其中，最大加速度用于表征包装件在运输过程中的整体动力学响应，最大主应力用于反映岩板的局部断裂风险，从而实现对包装防护效果的科学评价。具体仿真结果如图 6~8 所示。

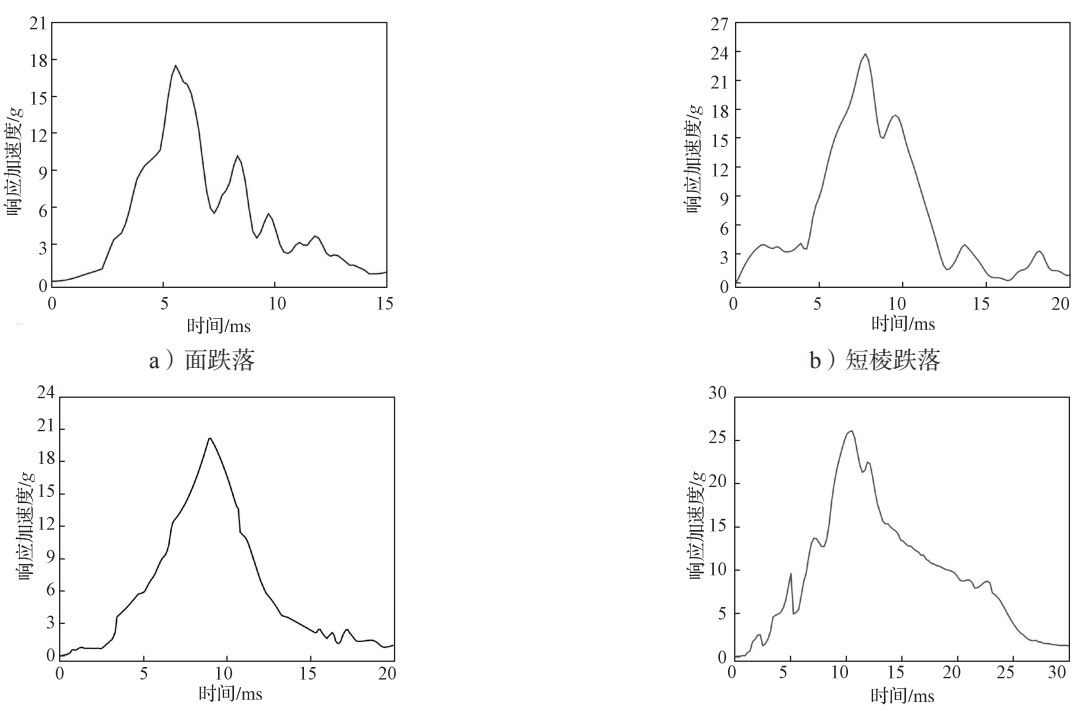


a）面跌落　b）短棱跌落

c）长棱跌落　d）角跌落

图 6　不同跌落工况单件包装件最大主应力仿真曲线

Fig. 6　Simulation curves of maximum principal stress for single package under different drop conditions



a）面跌落　b）短棱跌落

c）长棱跌落　d）角跌落

图 7　不同跌落工况单件包装件加速度仿真曲线

Fig. 7　Simulation curves of acceleration of single package under different drop conditions

由图 6 可见，在餐桌岩板跌落的初始阶段，应力曲线呈现出缓慢上升的趋势；当应力达到峰值后，曲线逐渐下降并趋于平稳。曲线上出现的多个小峰值，是由于餐桌岩板在弹起过程中与接触部件相互作用所致。该变化规律与实际跌落冲击过程中餐桌岩板的响应特征高度吻合，验证了仿真模型的合理性。

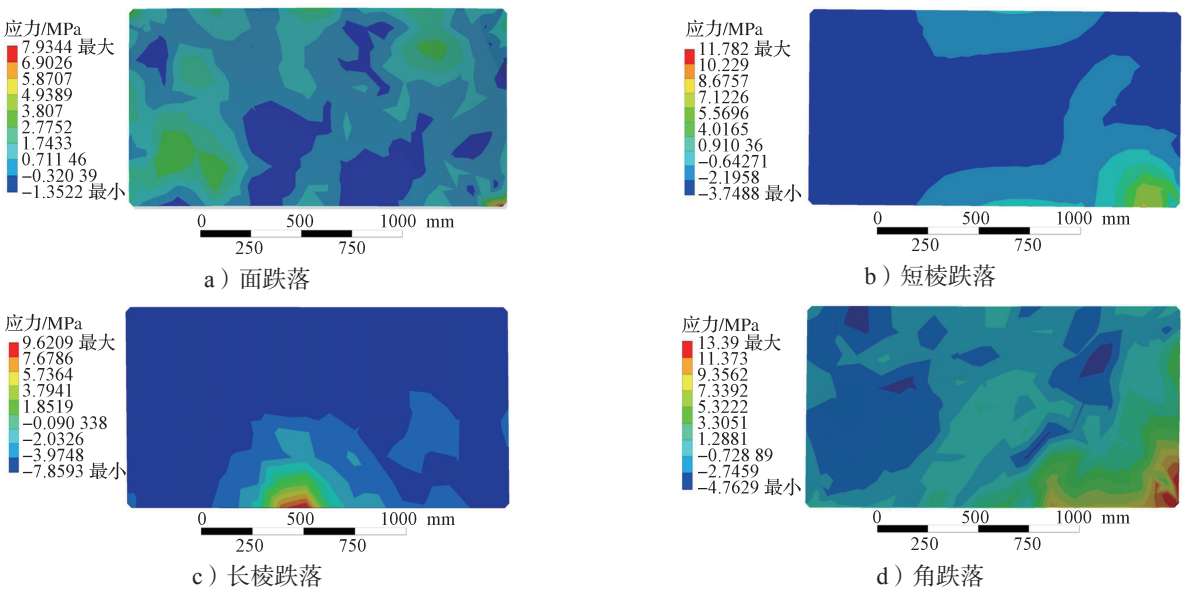


图 8　不同跌落工况单件包装件最大主应力云图

Fig. 8　Cloud maps of maximum principal stress for single package under different drop conditions

由图 8 可知，不同跌落姿态下，餐桌岩板的最大主应力及其位置存在差异：面跌落时为 7.93 MPa，位于岩板四角区域；短棱跌落时为 11.78 MPa，位于跌落棱的角部区域；长棱跌落时为 9.62 MPa，位于跌落棱的中部；角跌落时则为 13.39 MPa，位于跌落接触角处。各最大主应力均低于岩板破裂强度（25 MPa），表明单件包装方案满足跌落防护要求。

3.3　集合包装仿真结果

按照集合包装内各岩板距跌落角的距离，由近及远依次进行编号（见图 5），距离跌落角最近的岩板标为 1 号，最远的标为 10 号。集合包装内各餐桌岩板加速度、最大主应力随时间变化曲线如图 9~10 所示，其相应的极值分布如图 11 所示，最大主应力云图如图 12 所示。

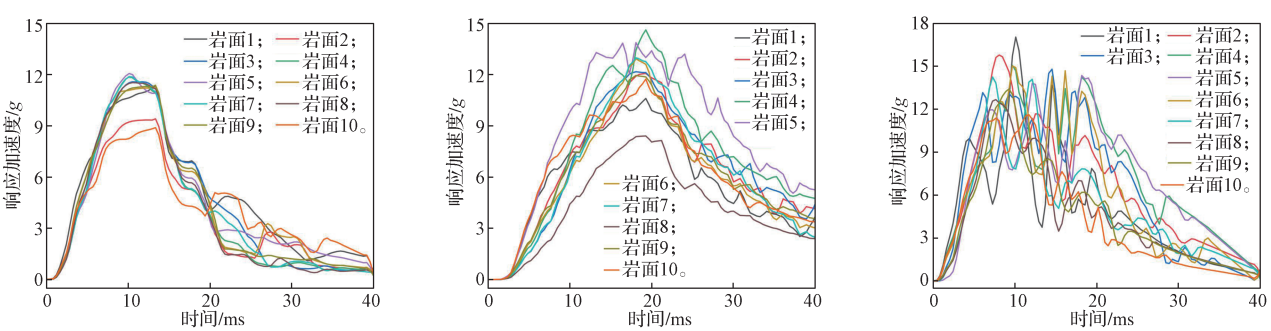


图 9　集合包装内各餐桌岩板加速度仿真曲线

Fig. 9　Simulation curves of acceleration for each dining table rock plate in the unit load package

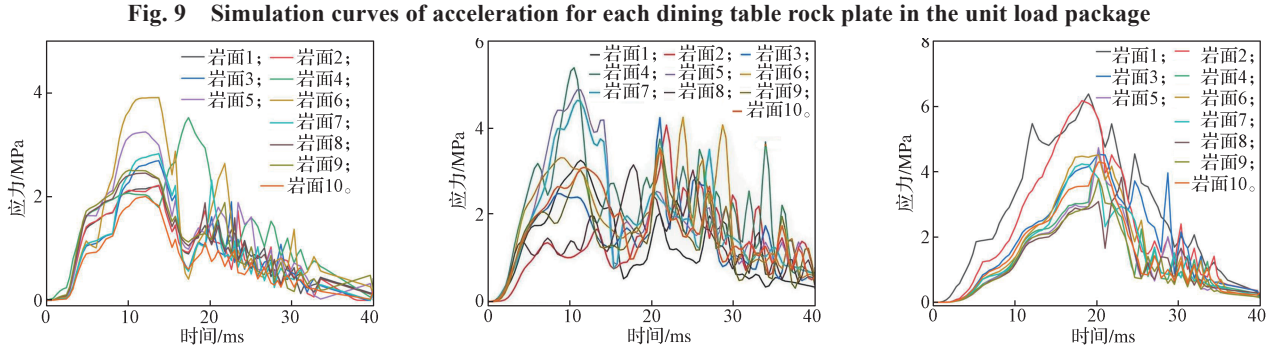
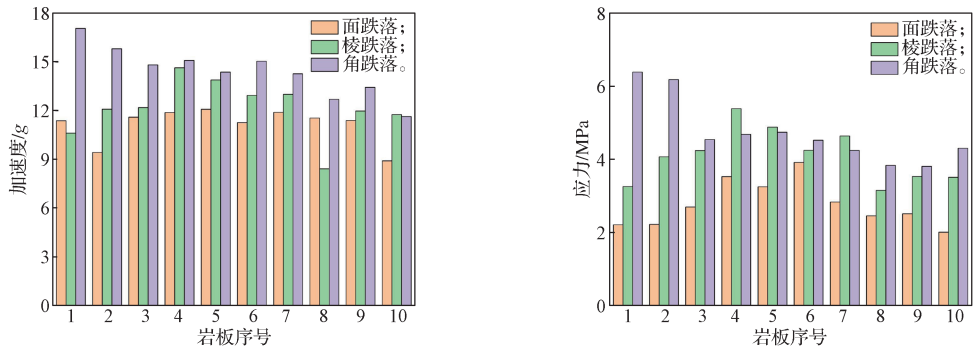


图 10　集合包装内各餐桌岩板最大主应力仿真曲线

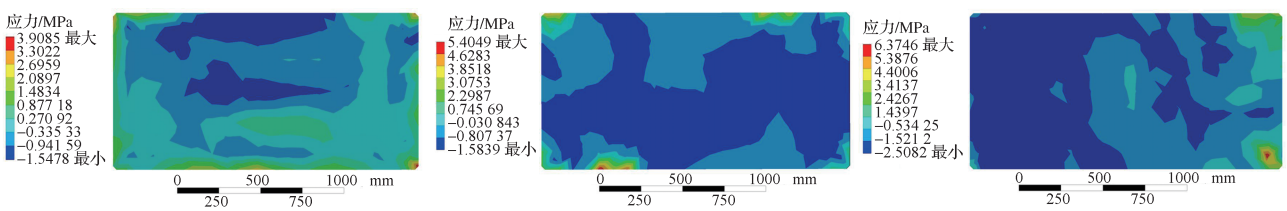
Fig. 10　Simulation curves of maximum principal stress for each dining table rock plate in the unit load package



a）最大响应加速度　　b）最大主应力

图 11　不同工况下集合包装内各餐桌岩板最大加速度和最大主应力极值

Fig. 11　Extreme values of maximum acceleration and maximum principal stress for each dining table rock plate in the unit load package under different working conditions



a）面跌落　　b）棱跌落　　c）角跌落

图 12　不同工况下集合包装内岩板最大主应力云图

Fig. 12　Cloud maps of maximum principal stress for rock plates in the unit load package under different drop conditions

由图 9~11 可知，在面和棱跌落工况下，加速度与主应力的峰值分布均呈现“中间大、两端小”的特征，且中间区域的峰值出现时刻略早于两端。该现象的产生是因为跌落冲击瞬间，托盘在岩板传递的载荷作用下发生变形，导致托盘底部中心先于边缘触地。在角跌落工况下，加速度与主应力的峰值分布则遵循“近跌落角大、远跌落角小”的规律，且峰值出现时刻随跌落角距离的增加而依次延后。这是因为冲击载荷通过 1 号岩板所在的角部实现点接触传递，载荷在层层传递过程中逐渐衰减，使得远离冲击点的岩板响应幅值相应降低。由图 12 可知，3 种跌落工况下产生的最大主应力分别为 3.91 MPa、5.40 MPa 和 6.37 MPa，均低于产品的破裂强度（25 MPa）；同时，集合包装的最大响应加速度分别为 12.2g、14.6g 和 17.1g，也均低于产品脆值。这表明所设计的集合包装方案能够满足跌落防护要求。

基于上述规律，后续集合包装设计可针对中间区域及近角部区域进行局部强化。通过提升高风险区域的防护等级，有效防止局部过载损坏内装物，从而增强包装防护体系的稳定性和可靠性。同时，该方案无需强化整个包装结构，可在确保防护效能的前提下，减少材料用量。

4　岩板跌落试验

尽管有限元仿真能够高效预测包装件在跌落过程中的动态响应，但由于材料参数的非线性特性以及边界条件的简化处理，其分析结果仍需通过物理试验进行校验。为此，本研究开展跌落试验，通过对比实测与仿真的加速度响应，验证所建有限元模型的精度与可靠性。

4.1　试验设置

参照国家标准相关要求，对单件包装件进行跌落试验。选取底面及其棱、角跌落作为典型跌落工况，采用购自苏州苏试试验集团股份有限公司的 CY−206 型零跌落试验机进行跌落冲击，跌落高度设为 400 mm。为精确获取跌落过程中的动力学响应，试验中采用三轴加速度传感器，实时采集瞬时加速度信号。试验过程及传感器安装位置如图 13 所示。

4.2　试验结果与分析

每次跌落试验完成后，在保持包装形态不变的前提下对包装件进行拆解，并对餐桌岩板进行全面的外观与结构完整性检查。检查结果如图 14 所示，4 种跌落工况下的餐桌岩板表面平整，均没有裂纹、边角崩缺等损伤，充分表明该包装在跌落工况下能够对产

品起到有效的保护作用。

为进一步量化评估模型的可靠性，将各工况下有限元仿真与试验实测的加速度响应曲线进行对比，如图 15 所示。



a）跌落试验机



b）传感器位置



c）跌落试验过程

图 13　单件包装件跌落试验

Fig. 13　Drop test of single package



a）面跌落



b）短棱跌落



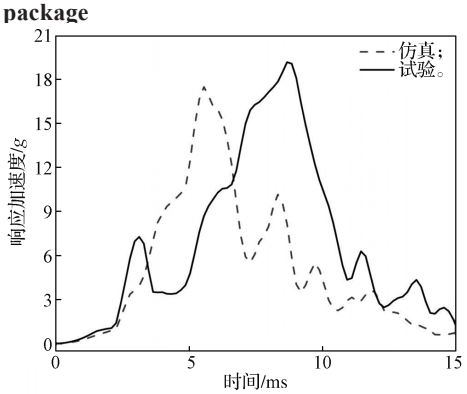
c）长棱跌落



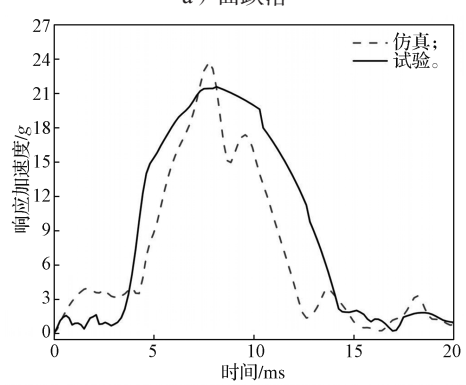
d）角跌落

图 14　单件包装件跌落试验结果

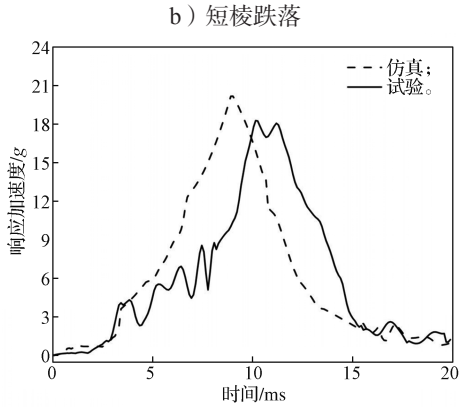
Fig. 14　Drop test result of single package



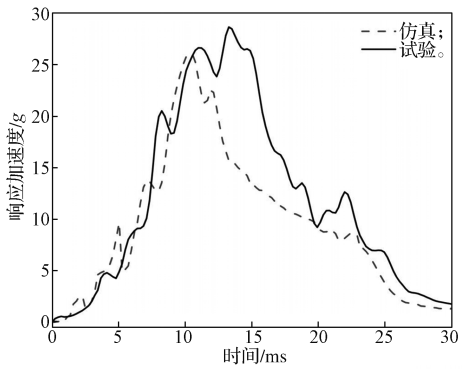
a）面跌落



b）短棱跌落



c）长棱跌落



d）角跌落

图 15　单件包装件内餐桌岩板试验与仿真的加速度曲线

Fig. 15　Acceleration curves of test and simulation for the dining table rock plate in single package

由图 15 可知，在面跌落工况下，试验峰值为 19.2*g*，仿真峰值为 17.5*g*；短棱跌落工况下，试验峰值为 21.6*g*，仿真峰值为 23.1*g*；长棱跌落工况下，试验峰值为 18.4*g*，仿真峰值为 20.1*g*；角跌落工况下，试验峰值为 28.5*g*，仿真峰值为 26.1*g*。各工况下仿真值与试验值的相对误差分别为 8.85%、6.94%、9.23% 和 8.42%，均在可接受误差范围内。此外，仿真所得的加速度响应曲线不仅在峰值上与试验结果相近，其脉冲持续时间也基本一致，进一步验证了所建有限元模型的可靠性。

5　总结

本研究针对某款餐桌岩板，设计了单件及集合包装方案，并经试验与仿真验证，确认其满足跌落防护要求。具体完成的工作如下：

1）设计了全纸化单件与集合包装方案。以蜂窝纸板为缓冲材料，结合瓦楞纸板与胶合板构建复合结构。单件包装通过模块化设计适配多型号产品，集合包装材料可重复利用，符合绿色包装理念。

2）建立了餐桌岩板跌落仿真的有限元模型并验证其可靠性。充分考虑材料特性，合理确定材料模型及相应参数，并参照相关标准试验测得各参数值。通过对比试验与仿真结果，验证了模型的准确性与可靠性。

3）形成了基于加速度与主应力峰值的脆性产品运输包装跌落可靠性系统评价方法。揭示了不同跌落工况下集合包装内岩板力学响应与其位置之间的关联，为包装结构的优化设计提供了理论依据。

参考文献：

[1] 朱　敏 . 陶瓷岩板的现状和发展前景 [J]. 陶瓷，2021(8)：103−104.

[2] 许美贤，郑　琰，徐　丽 . 基于绿色物流理念的家具包装研究 [J]. 物流科技，2020，43(9)：30−32.

[3] MOU X N，LU L X，ZHOU Y L. Evaluation of In-Plane Compressive Densification Strain of Honeycomb Paperboard[J]. Advances in Mechanical Engineering，2020，12(4)：1−11.

[4] 廖国瑾 . 落地式柜机空调包装用蜂窝纸板的结构与性能研究 [J]. 华东纸业，2025，55(1)：25−27，54.

[5] 岑　蕾，潘晓芬，颜伟航 . 空调室外机纸质缓冲包装设计及其仿真研究 [C]//2020 年中国家用电器技术大会论文集 . 宁波：[s. n.]，2020：636−641.

[6] 巩桂芬，何兴娟，周健民，等 . 某型号锂电池全纸化包装件跌落仿真分析 [J]. 包装工程，2023，44(13)：277−284.

[7] 郭佳龙，王　虎，周懿欣，等 . 基于 LS-DYNA 的复合材料包装容器旋转跌落数值模拟分析 [J]. 包装工程，2025，46(1)：279−285.

[8] YAYLA P，TEKNECİ M F. Failure Analysis of a Drop Tested Wall-Mounted Air Conditioner Indoor Unit: Simulation and Experimental Analysis[J]. Gazi University Journal of Science，2020，33(4)：843−855.

[9] 李志强，李海玲，陈璇希，等 . 基于 LS-DYNA 水槽式洗碗机运输包装件的跌落仿真分析 [J]. 包装学报，2025，17(2)：10−17.

[10] 孙德强，宋雅玲，王　力，等 . 真空平板玻璃托盘集装包装系统设计与跌落测试验证 [J]. 包装工程，2024，45(7)：274−280.

[11] 郭新明，陈喜春，马仁玉，等 . 落地镜缓冲包装设计及仿真分析 [J]. 包装工程，2024，45(3)：299−307.

[12] 彭国勋 . 物流运输包装设计 [M]. 2 版 . 北京：印刷工业出版社，2012：95−98.

[13] 李国志，刘　迪，雒波波，等 . 多因素影响下红陶制品脆值的研究与应用 [J]. 包装学报，2023，15(6)：1−8，33.

[14] Anon. Standard Test Methods for Mechanical-Shock Fragility of Products, Using Shock Machines: ASTM D3332-99(2016)[S]. ASTM International，2016：1−8.

[15] 孙德强，宋雅玲，李欣怡，等 . 一种产品运输包装改进设计的方法：CN116842711A[P]. 2023−10−03.

[16] 罗雨婷，罗瑞雪，孙林玉，等 . 我国塑料软包装发展存在的问题及解决措施 [J]. 包装学报，2011，3(2)：37−39.

[17] 胡茜雯 . 生命周期理念在包装设计中的应用研究 [J]. 网印工业，2024(11)：26−28.

[18] 滑广军，陈　琬，卢富德，等 . 蜂窝纸板缓冲曲线特征分析 [J]. 包装学报，2018，10(1)：1-7.
[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会 . 大型运输包装件试验方法：GB/T 5398—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2016：1-6.
[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会 . 包装 运输包装件基本试验 第 17 部分：编制性能试验大纲的通用规则：GB/T 4857.17—2017[S]. 北京：中国标准出版社，2017：1-10.
[21] 朱大鹏 . 蜂窝纸板静态弹性与黏弹性特性建模与参数识别 [J]. 包装工程，2015，36(21)：1-6.
[22] 廖雁兵，宋海燕，王立军，等 . 基于 Ansys 的新型双层蜂巢板抗压性能研究及优化设计 [J]. 包装工程，2021，42(7)：113-119.
[23] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会 . 夹层结构侧压性能试验方法：GB/T 1454—2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021：1-8.
[24] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会 . 夹层结构或芯子平压性能试验方法：GB/T 1453—2022[S]. 北京：中国标准出版社，2022：1-6.
[25] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会 . 塑料 拉伸性能的测定 第 1 部分：总则：GB/T 1040.1—2018[S]. 北京：中国标准出版社，2019：1-14.
[26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会 . 塑料拉伸性能的测定 第 3 部分：薄膜和薄片的试验条件：GB/T 1040.3—2006[S]. 北京：中国标准出版社，2007：1-4.
[27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会 . 普通胶合板：GB/T 9846—2015[S]. 北京：中国标准出版社，2015：1-16.
[28] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会 . 人造板及饰面人造板理化性能试验方法：GB/T 17657—2022[S]. 北京：中国标准出版社，2022：1-13.
[29] 付应海，唐文评，石　勇，等 . 超静定储运装置仿真分析及结构优化 [J]. 包装学报，2025，17(1)：40-46.
[30] 宋晓明 . 工程力学 [M]. 北京：化学工业出版社，2024：161-165.
[31] 杨松平，王志伟 . 运输包装随机振动的加速度响应谱分析 [J]. 振动与冲击，2023，42(16)：37-46.

（责任编辑：廖带莲）

Packaging Design and Drop Simulation Analysis for the Transportation of Dining Table Rock Plates

LUO Zelong[1]，SUN Deqiang[1]，LIANG Qiaoping[1]，ZHANG Weihong[2]，LU Binglin[2]，KE Xianpeng[1]

（1. College of Bioresources Chemical and Materials Engineering，Shaanxi University of Science and Technology，Xi’an 710021，China；2. China Packaging Research & Test Center，Tianjin 300457，China）

Abstract：Taking a certain type of dining table rock plate as the research object, the transportation packaging design and drop simulation analysis were carried out. Referring to the seven-step method for improving the design of transportation packaging, honeycomb paperboard was selected as the cushioning material and corrugated box as the outer packaging container to construct an all-paper single package, and the unit load packaging scheme was designed using wooden pallets. Based on ANSYS Workbench, the drop simulation analysis of the packaging system was conducted, and the reliability of the simulation model was verified through the drop test. Through the simulation of different drop conditions, the response laws of maximum principal stress and acceleration on the rock face of the dining table at different positions in the unit load package under different drop postures were revealed in detail. According to the drop simulation analysis, the drop impact acceleration of the rock plate under each working condition was lower than the acceleration determined by the product’s fragility, and the maximum principal stress was smaller than its fracture strength, verifying that the designed transportation packaging scheme can effectively meet the drop protection requirements of the product during transportation.

Keywords：dining table rock plate；drop condition；honeycomb paperboard；maximum principal stress；response acceleration