基于 LS-DYNA 水槽式洗碗机运输包装件的跌落仿真分析

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.2002

李志强[1,2]　李海玲[1]
陈璇希[1]　张　辉[1]
周　旋[1]

1. 陕西科技大学
轻工科学与工程学院
陕西　西安　710021
2. 陕西科技大学
轻化工程国家级实验教学示范中心
陕西　西安　710021

摘　要：以某型号水槽式洗碗机为研究对象，设计缓冲运输包装并进行仿真计算。依据缓冲包装设计“六步法”，进行产品流通环境分析、确定洗碗机易损件及脆值，选用密度为 25 kg/m^3 的 EPS 为缓冲包装材料，设计缓冲运输包装方案。首先通过不同应变率的材料试验，完善 LS-DYNA 材料模型；然后基于 LS-DYNA 对包装件进行有限元仿真分析，结合相关测试标准，对包装件分别进行 10 种工况跌落仿真分析。结果显示：面跌落最大响应加速度为 38.4g，棱跌落最大响应加速度为 26.7g，角跌落最大响应加速度为 23.6g；各工况最大响应加速度均小于产品许用脆值 61g。所设计的包装方案满足运输过程中对产品的缓冲需求。

关键词：水槽式洗碗机；运输包装件；有限元法；跌落仿真分析；应变率
中图分类号：TB482.2　　**文献标志码**：A
文章编号：1674-7100(2025)02-0010-08
引文格式：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.

随着科技的发展，智能家居产品的市场发展迅速。在传统厨电品类需求纷纷遭遇下滑的环境下，嵌入式一体机的市场呈现出亮眼的高增长态势。洗碗机作为嵌入式家居产品的一种典型代表，被越来越多的消费者青睐 [1, 2]。某家电品牌推出容量更大、更便捷的水槽式洗碗机，其独特的大尺寸薄壁空腔结构对包装设计提出了更高要求。

仓储、运输、搬运是物流运输必不可少的环节。在实际运输过程中，冲击和振动是造成包装件损坏的主要原因。冲击能够在极短时间内使包装件速度出现突变并将能量进行转化，同时使内装物发生短暂而猛烈的冲撞，从而造成产品外观损坏或者功能异常。跌落冲击是最为严苛的冲击 [3, 4]。包装可靠性是产品在运输和装卸过程中保障其完整性的前置条件，但在设计缓冲包装时，要保证缓冲包装具有较高的冲击能量吸收较为不易。近年来，国内外许多学者利用有限元技术进行数值模拟运输工况，以降低包装设计周期和成本，如用 LS-DYNA 对家电类包装件进行跌落冲击模拟，以评估包装件可靠性并指导缓冲包装改进设计 [5-11]。因此，本研究为某型号水槽式洗碗机设计一种运输包装方案，利用 LS-DYNA 软件对该方案的包装件进行力学仿真分析，并进一步结合试验数据验证该方案的可行性。

1　包装方案设计

本研究遵循缓冲包装设计“六步法”，先确定水槽式洗碗机流通环境和产品脆值，再进行包装设计。

收稿日期：2024-10-10
作者简介：李志强，男，副教授，主要从事绿色包装技术研究，E-mail：lizq@sust.edu.cn

1.1 流通环境分析

冲击和振动是所有环境因素中较常见的，也是造成产品损坏、产品变形的主要因素。通过环境记录仪 Saver 3M30 PLUS 采集水槽式洗碗机包装件实际流通过程，主要包括仓储、运输、装卸、搬运、配送等环节。从宁波慈溪到上海的典型流通过程，共采集 351 次冲击、振动数据，以及 416 个温湿度、高度和压力数据，部分采集数据如图 1 所示。经研读数据分析，冲击事件为 28 次，加速度范围为 1.97g~4.45g；跌落事件 0 次，振动事件 323 次，加速度变化范围为 0.099g~5.0433g。运输完成后，开箱检查水槽洗碗机衬垫及产品本身未见异常。

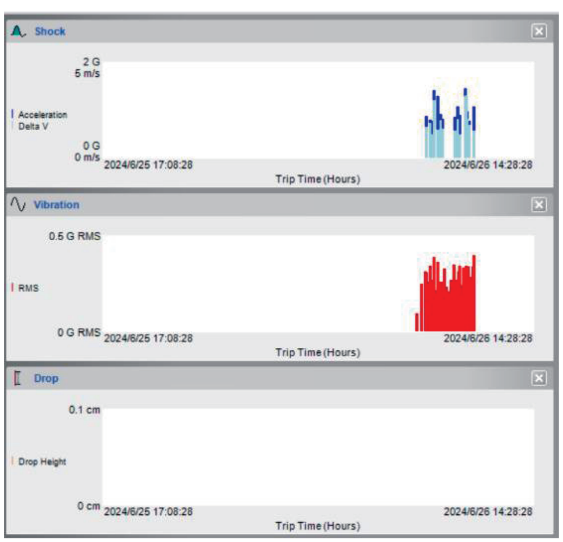


图 1 包装件冲击、振动数据

Fig. 1 Packaging shock and vibration data

1.2 产品特性分析

本研究对象为某家电品牌某型号水槽式洗碗机，产品外观如图 2 所示。产品净重 28 kg，毛重 29 kg，最大尺寸为 1075 mm × 510 mm × 652 mm。该洗碗机由功能槽、洗碗槽、控制面板、电机、菜篮、碗架、排水管组件、下水器等构成，其中洗碗槽、功能槽和连襟片为易损部件。

图 2 水槽式洗碗机展示效果图

Fig. 2 Display effect of sink dishwasher

经流通过程调研分析，在运输过程中最有可能受到的冲击强度是中等冲击。根据经验法估算产品脆值（见式（1）和（2）），得到产品许用脆值为 61g。

$$G_c=\alpha m^{-\beta}, \quad (1)$$

$$[G]=G_c/n, \quad (2)$$

式（1）（2）中：G_c 为包装件受到的最大加速度；

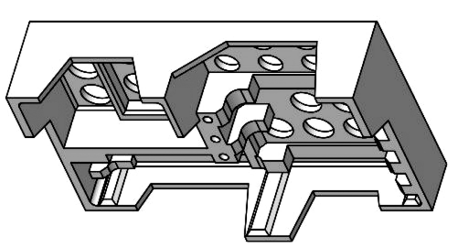
m 为包装件的质量；

α、β 为经验参数，中等冲击中，α=203，β=0.306；

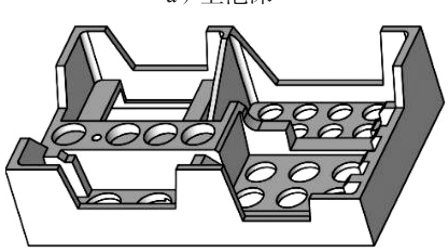
n 为安全系数，n=1.2。

1.3 包装件设计

由于洗碗机为分布不均的薄壁空腔结构，在运输过程中钣金件空腔结构易发生变形。根据生产实际情况，缓冲材料选择 25 kg/m^3 的发泡聚苯乙烯（expandable polystyrene，EPS）泡沫和 5 层瓦楞纸箱。以 EPS 泡沫缓冲特性曲线作为设计依据，对水槽式洗碗机底部进行局部缓冲包装。考虑包装结构稳定性，参照凹陷埋入式设计思路，将 EPS 泡沫缓冲衬垫结构设计为上下两个部分，产品可嵌入缓冲衬垫之间，并在缓冲衬垫局部做掏孔处理，以减少材料用量。经计算，材料最低缓冲面积为 0.65 m^2，缓冲厚度为 18 mm。综合考虑工艺及产品形状因素，最终确定下泡沫厚度为 25 mm，上泡沫厚度为 20 mm，缓冲衬垫整体结构如图 3 所示。



a）上泡沫



b）下泡沫

图 3 缓冲衬垫结构图

Fig. 3 Structure diagram of cushion pad

2 缓冲包装件跌落仿真分析

2.1 包装件 3D 模型构建

利用 CREO 建立 3D 模型，包括洗碗机、上泡沫、下泡沫和瓦楞纸箱。建立洗碗机的包装件仿真模型，需要准确地还原各零件的结构、尺寸及其装配关系。功能槽、洗碗槽、连襟片为易损部件，对非关键零件如电机、碗架等在不影响仿真结果的前提下进行必要的简化处理，以提高计算效率。将模型导出为 X_T 格式后，导入仿真前处理软件中。

2.2 有限元模型材料试验及材料属性定义

包装件 3D 模型建立完成后，需要将其导入 LS-DYNA 仿真软件中，建立跌落仿真项目。LS-DYNA 包含多种材料模型，如弹性流体、正交各向异性弹性、可压缩泡沫、黏弹性等。材料属性一般包括材料密度、弹性模量、泊松比、屈服应力。

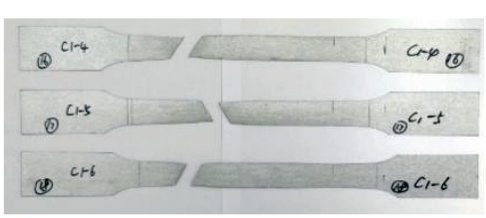
对于洗碗机这一类薄壁空腔结构，其在跌落过程中容易出现受力变形。洗碗槽、功能槽、连襟片及缓冲衬垫均需要通过弹塑性材料模型进行建模，准确的材料模型需要进行材料试验及材料标定，主要结构进行试验力学材料试验并建立仿真材料卡片，如表 1 所示。金属、塑料材料以拉伸变形为主，通过拉伸试验获得材料的应力 – 应变曲线；泡沫材料以压缩变形为主，通过压缩试验获得材料的应力 – 应变曲线，同时，对 3 种材料（304 不锈钢、聚丙烯（polypropylene，PP）、EPS 泡沫）还需考虑其应变率效应。根据材料属性，在 LS-DYNA 材料库中选取合适的材料卡片模拟，金属和塑料采用 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY（*MAT_024）材料模型，泡沫采用 *MAT_CRUSHABLE_FOAM 材料模型。

表 1 洗碗机材料试验和本构模型

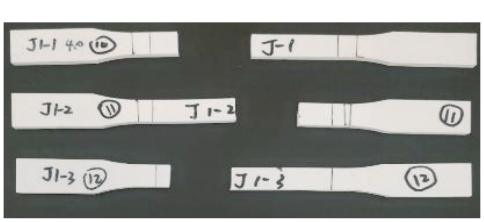
Table 1 Dishwasher material tests and intrinsic modeling

材料	所属构件	是否考虑应变率	试验类型	材料卡片
304 不锈钢	洗碗槽、功能槽、超声波换能器支架、加热盘支架	是	静态拉伸、高速拉伸	*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
锌合金	连襟片	是	静态拉伸、高速拉伸	*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
PP 塑料	底盖、电器盒等	是	静态拉伸、高速拉伸	*MAT_ PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
EPS 泡沫	缓冲衬垫	是	静态压缩、高速压缩	*MAT_CRUSHABLE_FOAM
玻璃	门体玻璃	否		*MAT_MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
尼龙	门体框架	否		*MAT_ELASTIC

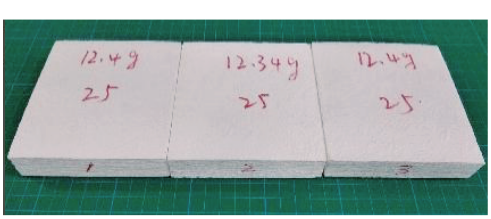
为保证试验数据的准确性，每种材料需进行 3 组试验并取平均值，试验后样品状态如图 4 所示。



a）金属试样



b）塑料试样



c）泡沫试样

图 4 试验后样品状态

Fig. 4 State of the sample after the test

金属和塑料试验数据为力 – 位移，将力 – 位移曲线转化成工程应力 – 应变曲线，然后将工程应力 – 应变曲线转化成真实应力 – 应变曲线，并对曲线进行修正[12–16]。

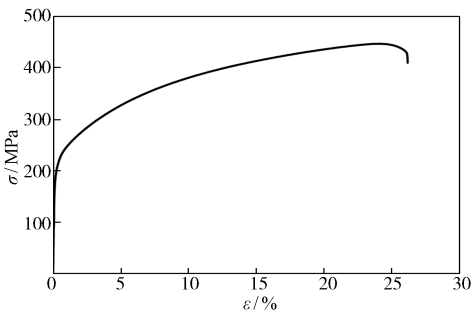
$$\sigma_t=(1+\varepsilon), \quad (3)$$

$$\varepsilon_t=\ln(1+\varepsilon), \quad (4)$$

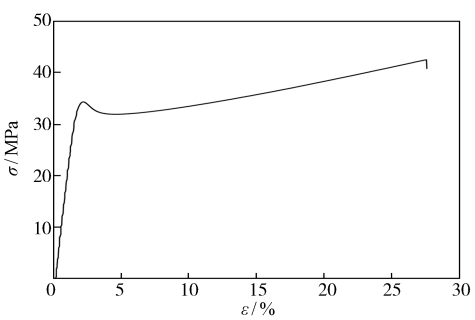
式（3）（4）中：σ_t 为真实应力；

ε_t 为真实应变。

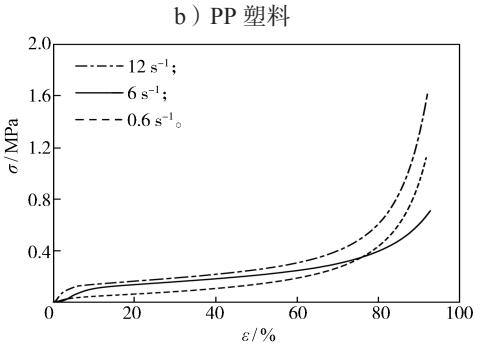
将通过以上方法得到的材料真实应力 – 应变曲线，输入到 LS-DYNA 材料卡片。图 5 为不同材料在静态和不同应变率的拉伸、压缩工况下的应力 – 应变曲线。产品各部件及包装件材料属性 [17] 如表 2 所示。



a）金属板材



b）PP 塑料



c）EPS 泡沫

图 5　不同应变率下材料应力 – 应变曲线

Fig. 5　Stress-strain curves for different strain rates

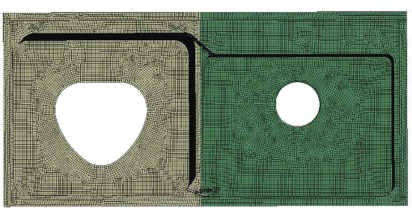
表 2　包装件各部件材料参数

Table 2　Material parameters of each component of the package

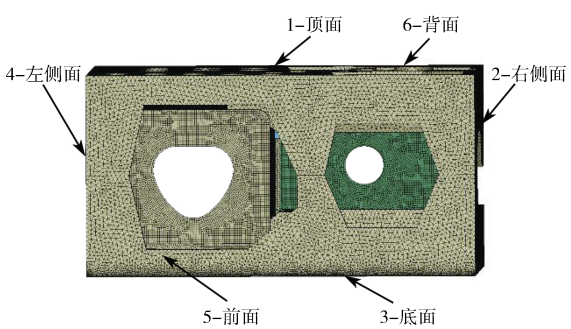
序号	材料	密度 / ($kg·m^{-3}$)	弹性模量 / MPa	泊松比	屈服应力 / MPa
1	304 不锈钢	7930	1.94×10^4	0.30	410
2	锌合金	6600	8.50×10^4	0.30	447
3	尼龙	1120	2.62×10^4	0.34	40
4	PP 塑料	890	8.96×10^4	0.41	34
5	玻璃	2460	6.89×10^4	0.23	28
6	瓦楞纸板	150	7.00	0.30	
7	EPS 泡沫	25			

2.3　接触类目设置和网格划分

接触的设定是为了尽可能还原各零件间连接关系。将洗碗机产品与 EPS 泡沫缓冲衬垫之间、衬垫与瓦楞纸箱之间设置为 Frictional，摩擦系数设置为 0.2，瓦楞纸箱与地面之间设置为 Frictionless。网格划分的目的是对模型实现离散化，把求解域分解成可得到精确解的求解单元。网格划分的质量和数量将直接影响有限元求解的准确度，将不同部位采用不同的网格划分方式和大小，缓冲衬垫、底盖等三维结构采用 Automatic 方法进行划分 [18]，衬垫单元尺寸设为 1.5 mm，底盖等零件单元尺寸设为 5 mm，如图 6 所示。最终，仿真模型共 307 078 个节点、813 404 个单元。



a）产品网格划分



b）包装件网格划分

图 6　洗碗机及包装件有限元模型网格划分

Fig. 6　Mesh generation of finite element model of dishwasher and packaging parts

2.4　求解模型设置

在跌落试验中，包装件释放后做自由落体运动，参考 GB/T 1019—2008《家用和类似用途电器包装通则》[19] 和 GB/T 4857.5—1992《包装 运输包装件跌落试验方法》[20]，设置 1 角 3 棱 6 面 10 个工况跌落，确定面跌落高度为 450 mm，冲击地面初速度约为 2970 mm/s；角、棱跌落高度为 400 mm，冲击地面初速度约为 800 mm/s。在上述速度下，材料表现出应变率强化特性。

基于上文初始条件设置和方法，对地面施加固定约束且设置为刚性体；功能槽、洗碗槽、连襟片为壳单元，其余产品部件为体单元；包装模型纸箱为壳单

元，其余为四面体单元。设置求解时间为 15 ms，求解完成后查看包装件各部位等效应力值结果。

2.5 仿真结果分析

模型设置完成后导出 K 文件，金属和塑料采用 LS-DYNAN 的非线性材料模型 *MAT_024 材料模型，将不同应变率下的应力－应变曲线各材料参数输入 K 文件中。使用后处理软件 LS-PREPOST，将 K 文件导入 LS-PREPOST，查看包装件各个部位的能量变化及每个跌落工况下不同位置产品的响应加速度[21, 22]。在包装件的跌落仿真过程中，面跌落最大响应加速度为 38.4g，棱跌落最大响应加速度为 26.7g，角跌落最大响应加速度为 23.6g。不同跌落工况下洗碗槽和功能槽的跌落仿真结果如表 3 所示。

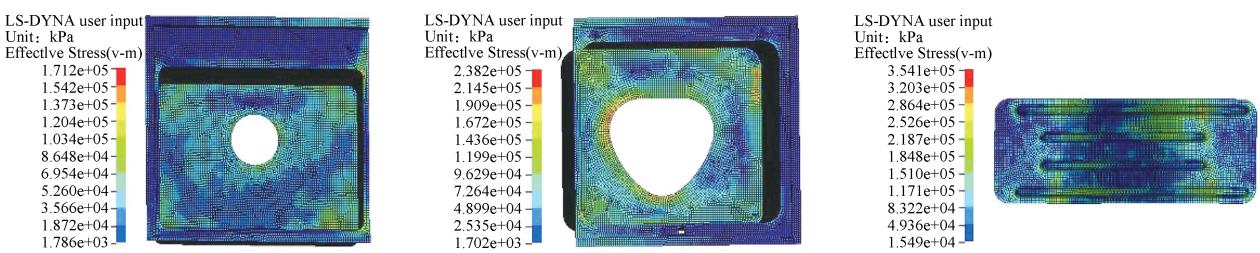
不同跌落工况下洗碗机易损部件应力峰值的等效应力分布云图如图 7~9 所示。

由图 7~9 可知：1）6 面（背面）跌落下，洗碗槽应力峰值为 171.2 MPa，功能槽应力峰值为 238.2 MPa，连襟片应力峰值为 354.1 MPa，均小于相应材料的屈服应力。2）4-5 棱（竖棱）跌落下，洗碗槽应力峰值为 114.7 MPa，功能槽应力峰值为 272.1 MPa，连襟片应力峰值为 146.7 MPa，均小于相应材料的屈服应力。3）3-4-5 角跌落下，洗碗槽应力峰值为 213.0 MPa，功能槽应力峰值为 240.7 MPa，连襟片应力峰值为 216.4 MPa，均小于相应材料的屈服应力。

表 3 不同跌落工况下洗碗槽和水槽的最大响应加速度

Table 3 Maximum response acceleration of dishwasher and sink under different falling conditions g

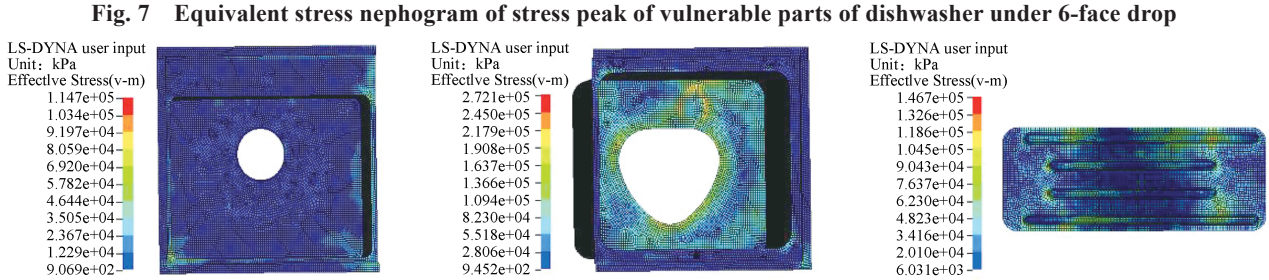
跌落工况	洗碗槽	功能槽
6 面	38.4	33.6
4-5 棱	20.7	26.7
3-4-5 角	21.6	23.6



a）洗碗槽　　b）功能槽　　c）连襟片

图 7 6 面跌落下洗碗机易损部件应力峰值的等效应力云图

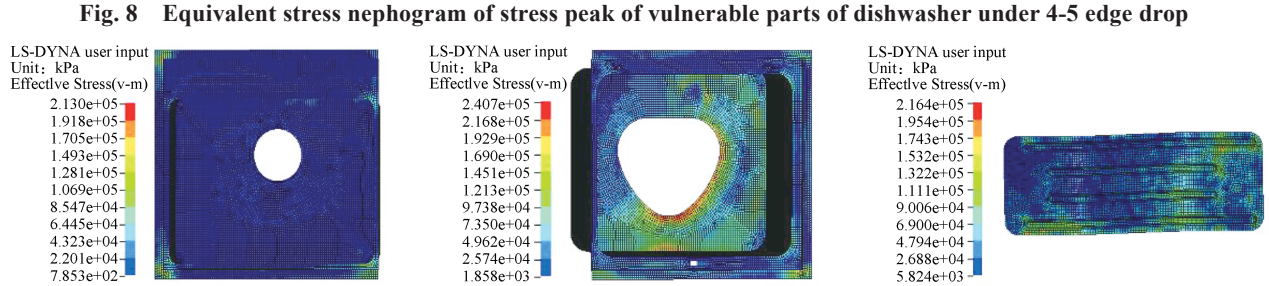
Fig. 7 Equivalent stress nephogram of stress peak of vulnerable parts of dishwasher under 6-face drop



a）洗碗槽　　b）功能槽　　c）连襟片

图 8 4-5 棱跌落下洗碗机易损部件应力峰值的等效应力云图

Fig. 8 Equivalent stress nephogram of stress peak of vulnerable parts of dishwasher under 4-5 edge drop



a）洗碗槽　　b）功能槽　　c）连襟片

图 9 3-4-5 角跌落下洗碗机易损部件应力峰值的等效应力云图

Fig. 9 Equivalent stress nephogram of stress peak of vulnerable parts of dishwasher under 3-4-5 angle drop

3 可靠性验证

3.1 能量法验证

在动力学仿真分析中，求解结果收敛并非意味着仿真结果是正确的，还需要进一步结合能量法进行可靠性验证。验证包装件跌落仿真结果的可靠性，一个重要指标是沙漏能（hourglass energy）。在 LS-PrePost 中，采用 ASCII 读取文件，绘制材料的能量摘要（energy summary）曲线，其包括 4 项能量指标：弹性势能（internal energy）、动能（kinetic energy）、沙漏能和总能量（total energy），如图 10 所示。通过理论计算可得，洗碗机包装件跌落系统的总能量理论上约为 131 J，在 15 ms 的计算时间内，跌落系统实际总能量约为 137 J，与理论值的偏差较小。在整个跌落的过程中，能量时程曲线总体遵循能量守恒定律。

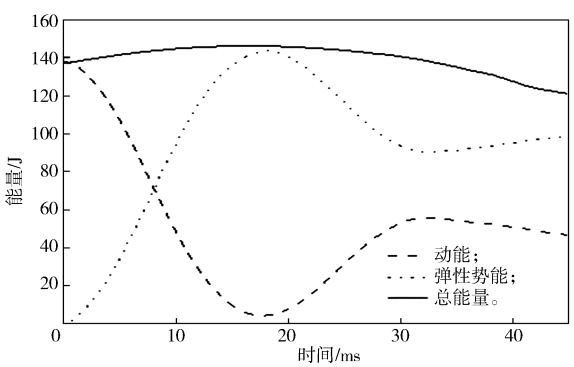


图 10 跌落能量摘要曲线

Fig. 10 Drop energy summary curves

3.2 试验验证

为模拟水槽式洗碗机包装件在实际运输情况下可能受到的损坏，还需对其进行不同工况下的试验测试，以进一步验证包装方案对水槽式洗碗机产品的实际保护效果[23-25]。各个工况下，水槽式洗碗机槽体响应加速度及产品损坏情况如表 4 所示。开箱后发现产品并未发生损坏，底衬垫有轻微损坏，侧轻面的冲击加速度也并未超过产品本身脆值，可见包装方案能够满足跌落要求。

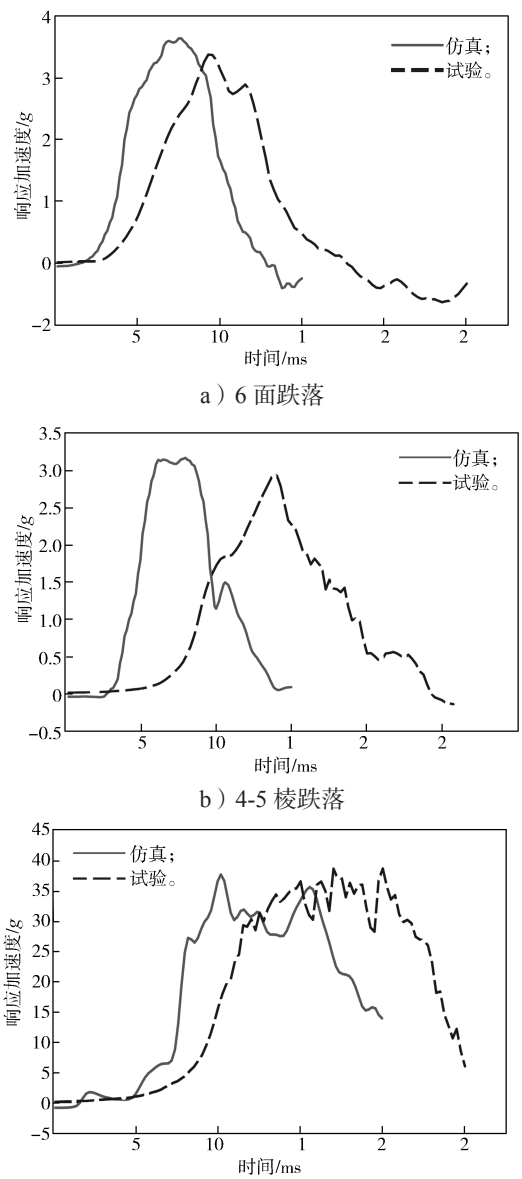
表 4 跌落试验数据

Table 4 Drop test dates

跌落工况	功能槽响应加速度 /g	产品损坏情况
6 面	37.53	未损坏
4-5 棱	23.27	未损坏
3-4-5 角	27.26	未损坏

3.3 试验和仿真对比验证

冲击波形峰值和加速度脉冲持续时间是冲击试验的两大主要参数。本试验和仿真的加速度－时间响应曲线如图 11 所示。通过加速度峰值及脉冲持续时间评估仿真模型、参数的准确性。由图 11 可知，试验和仿真的跌落冲击加速度响应波形基本吻合，脉冲持续时间也基本相同。可见水槽式洗碗机包装件的有限元模型及参数是准确的。



a）6 面跌落

b）4-5 棱跌落

c）3-4-5 角跌落

图 11 跌落响应加速度对比曲线

Fig. 11 Contrast curve of drop response acceleration

4 结语

目前，洗碗机功能设计与销售已经逐步进入新

的发展阶段。本研究以某家电品牌某款洗碗机为例，对该款洗碗机的性能和包装设计进行研究，通过计算机仿真验证包装可靠性，以缩短产品包装设计周期与资金投入。在跌落仿真分析中，加入材料不同应变率的应力－应变曲线，使仿真分析结果更加贴合实际。10 个跌落工况下，最大响应加速度均未超过产品许用脆值 61*g*，沙漏能未超过总能量的 5%，仿真与试验跌落冲击加速度响应波形基本吻合，说明了仿真结果的可靠性，同时验证了该包装设计满足洗碗机跌落过程中的防护要求。

参考文献：

[1] 潘　祺，潘嘉威 . 洗碗机行业热闹非凡，已步入发展快车道 [J]. 电器，2024(5)：76−77.
[2] 周肖舒，霍　楷 . 基于知识图谱的我国绿色包装发展路径研究 [J]. 包装学报，2024，16(2)：39−45.
[3] 徐红艳，李志强，樊　博，等 . 侧吸式油烟机包装件的跌落分析及优化设计 [J]. 包装工程，2020，41(9)：136−142.
[4] 范正炼，马荣鑫，宋　畅 . 跌落仿真技术在家电产品品质提升中的应用 [J]. 家电科技，2023(4)：104−108.
[5] MÜLKOĞLU O，GÜLER M A，ACAR E，et al. Drop Test Simulation and Surrogate-Based Optimization of a Dishwasher Mechanical Structure and Its Packaging Module[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization，2017，55(4)：1517−1534.
[6] NYGÅRDS M，SJÖKVIST S，MARIN G，et al. Simulation and Experimental Verification of a Drop Test and Compression Test of a Gable Top Package[J]. Packaging Technology and Science，2019，32(7)：325−333.
[7] 孙德强，石　威，李　彬，等 . 基于 Ansys Workbench 的投影仪运输包装仿真分析 [J]. 包装工程，2021，42(9)：11−16.
[8] 何　雯，陈满儒 . 薄型烟机包装实验室测试与跌落仿真分析 [J]. 包装工程，2019，40(3)：125−130.
[9] YAYLA P，TEKNECI M F. Failure Analysis of a Drop Tested Wall-Mounted Air Conditioner Indoor Unit: Simulation and Experimental Analysis[J]. Journal of Science，2020：843−855.
[10] 杨　杰，付志强，张　蕾，等 . EPE 动态冲击曲线拟合函数对比 [J]. 包装工程，2021，42(9)：32−36.
[11] 张鹏娥，赵　林，纪春荣，等 . 基于 LS-DYNA 的空调连续跌落仿真研究 [J]. 力学与实践，2020，42(1)：60−65.
[12] ABEDINI A，NARAYANAN A，BUTCHER C. An Investigation into the Characterization of the Hardening Response of Sheet Metals Using Tensile and Shear Tests with Surface Strain Measurement[J]. Forces in Mechanics，2022，7：100090.
[13] SUTTNER S，MERKLEIN M. A New Approach for the Determination of the Linear Elastic Modulus from Uniaxial Tensile Tests of Sheet Metals[J]. Journal of Materials Processing Technology，2017，241：64−72.
[14] 徐庭栋，王民庆，何慧敏 . 金属“力学性能－拉伸应变速率”曲线 [J]. 物理测试，2019，37(2)：54−59.
[15] 徐庭栋 . 金属拉伸试样原始力学性能测量的讨论 [J]. 物理测试，2022，40(1)：10−14.
[16] 王少辉，李　颖，翁依柳，等 . 基于棒材拉伸试验确定金属材料真实应力应变关系的研究 [J]. 塑性工程学报，2017，24(4)：138−143.
[17] 辛春亮，薛再清，涂　建，等 . 有限元分析常用材料参数手册 [M]. 北京：机械工业出版社，2020：5−6.
[18] 马玉政 . 四面体网格划分算法研究及虚拟手术切割 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2022.
[19] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会 . 家用和类似用途电器包装通则：GB/T 1019—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009：1−2.
[20] 国家技术监督局 . 包装 运输包装件 跌落试验方法：GB/T 4857.5—1992[S]. 北京：中国标准出版社，1992：1−3.
[21] GKATZOGIANNIS S，KNOEDEL P，UMMENHOFER T. Calibration of High-Frequency Mechanical Impact Simulation Based on Drop Tests[J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2020，29(8)：4879−4887.
[22] PENG X F，ZHAO J B，LIU Y T，et al. Simulation Analysis and Experimental Study on Impact Fall Test of Forklift Overhead Guard[J]. Journal of Physics：Conference Series，2022，2262(1)：012013.
[23] 常　江，巩　雪 . 电饭煲运输包装设计及跌落仿真分析 [J]. 包装学报，2019，11(5)：38−43.
[24] 郝智伟，钱　静 . 洗衣机关键部件的跌落仿真分析 [J]. 包装工程，2009，30(7)：27−29.
[25] 李小丽 . 非线性缓冲包装系统冲击特性的仿真研究 [D]. 西安：西安理工大学，2004.

（责任编辑：邓　彬）

Drop Simulation Analysis of Sink Type Dishwasher Transportation Packaging Based on LS-DYNA

LI Zhiqiang[1,2]，LI Hailing[1]，CHEN Xuanxi[1]，ZHANG Hui[1]，ZHOU Xuan[1]

（1. College of Bioresources Chemical & Materials Engineering，Shaanxi University of Science &Technology，Xi’an 710021，China；2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Light Chemistry Engineering，Shaanxi University of Science &Technology，Xi’an 710021，China）

Abstract：A certain model of sink-type dishwasher is taken as the object of study, for which cushioning transportation packaging is designed and simulation calculations are carried out. Following the “six-step method” of cushioning packaging design, the cushioning transportation packaging scheme is designed by analyzing the distribution environment of the product, determining the fragile parts and brittle value of the dishwasher, and choosing EPS with a density of 25 kg/m^3 as the cushioning packaging material. Firstly, the material model of LS-DYNA is perfected through the material test of different strain rates, then the finite element simulation analysis of the packaging parts is carried out based on LS-DYNA, and the simulation analysis of three kinds of working conditions of the packaging parts is carried out respectively in combination with the relevant test standards. The results show that the maximum response acceleration of prismatic fall is 38.4*g*, the maximum response acceleration of angular fall is 26.7*g*, and the maximum response acceleration of face fall is 23.6*g*. All the maximum response acceleration of each condition is less than the permissible 61*g* brittle value of the product, and the designed packaging solution meets the buffer demand of the product in the transportation process.

Keywords：ink dishwasher；transport packages；finite element method；drop simulation analysis；strain rate