

# 液晶电视包装件跌落仿真及结构优化

潘迪<sup>1,2</sup>, 韩勇<sup>1,2</sup>, 张坤伦<sup>1</sup>, 吴岱巍<sup>3</sup>, 吕志雄<sup>1</sup>

(1. 厦门理工学院, 厦门 361024; 2. 福建省客车及特种车辆研发协同创新中心, 厦门 361024;  
3. 冠捷显示科技(厦门)有限公司, 厦门 361101)

**摘要:** **目的** 在提升液晶电视包装泡沫抗冲击性能的基础上进行结构优化设计, 以减少包装成本。**方法** 利用 HyperMesh 建立带有包装的液晶电视整机有限元模型, 并验证模型的有效性。依据企业跌落标准, 采用 LS-DYNA 开展液晶电视仿真跌落分析, 基于仿真结果运用 OptiStruct 对包装结构进行拓扑优化, 最后对比优化前后的结果。**结果** 仿真跌落分析中, 前面和后面跌落工况下液晶电视的加速度峰值最大, 分别为 220.01g 和 183.40g。包装结构优化后加速度峰值均有所降低, 其中后面跌落工况下降最大, 为 23.41%, 同时优化后的结构相对原始结构质量降低 6.73%。**结论** 经过结构优化后的包装泡沫, 有效提升了液晶电视在跌落冲击中的安全性能, 降低了生产成本。

**关键词:** 液晶电视; 包装件; 跌落仿真; 结构优化

中图分类号: TB48, TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)11-0094-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.11.013

## Drop Simulation and Structure Optimization of LCD TV Package

PAN Di<sup>1,2</sup>, HAN Yong<sup>1,2</sup>, ZHANG Kun-lun<sup>1</sup>, WU Dai-wei<sup>3</sup>, LYU Zhi-xiong<sup>1</sup>

(1. Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Fujian Collaborative Innovation Center for R&D of Coach and Special Vehicle, Xiamen 361024, China; 3. TPV Display Technology (Xiamen) Co., Ltd., Xiamen 361101, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to optimize the structure design of LCD TV packaging foam to improve its impact resistance and reduce its packaging costs. The finite element model of the LCD TV with packaging was built with HyperMesh and the validity of the model was verified. According to the drop test standard of enterprise, drop test simulations were conducted with LS-DYNA, and OptiStruct was used to perform topology optimization based on the simulation results. Finally, the results before and after optimization were compared. In the drop test simulations, the acceleration peaks of LCD TV were the highest in the front and back drop conditions, which were 220.01 g and 183.40 g, respectively. After optimization, the peak accelerations of the LCD TV in all conditions were decreased, and the back drop condition was the most, which was 23.41%. At the same time, the optimized structure was 6.73% lighter than the original structure. The structure optimization of the packaging foam effectively improves the safety performance of the LCD TV during the drop impact and reduces the production cost.

**KEY WORDS:** LCD TV; package; drop simulation; structure optimization

收稿日期: 2019-02-18

基金项目: 厦门市科技计划 (3502Z20183068)

作者简介: 潘迪 (1992—), 男, 厦门理工学院硕士生, 主攻汽车碰撞安全。

通信作者: 韩勇 (1984—), 男, 博士, 厦门理工学院副教授、硕导, 主要研究方向为人体损伤生物力学, 汽车碰撞安全性设计、儿童乘员安全。

为保证产品从生产装配完成到消费者使用前完好无损,运输包装必须具有优良的吸能和缓冲能力<sup>[1-2]</sup>。由于全球物流运输距离长、运量大,且运输过程中产品需要堆积、存放和多次装卸,因此导致产品损伤几率增大、破损率增加、运输成本提高<sup>[3-4]</sup>。

目前,国内企业产品包装的定型往往通过多次开展跌落试验来获得可行性方案。随着计算机技术和有限元法的发展,通过计算机可以精确模拟出各种复杂的工况,获得力、加速度、应力、应变、固有频率等数据,用于指导产品的研发。罗思源等<sup>[5]</sup>采用 ABAQUS/Explicit 对某运输包装件进行了跌落仿真,通过分析包装结构的应力、应变和能量变化等确定了包装件的受冲击情况,为产品设计提供了参考。崔睿等<sup>[6]</sup>采用 Ansys Workbench 对座便器缓冲包装进行了跌落仿真。丁玉平等<sup>[7]</sup>运用 Ansys Workbench 对电饭煲整体包装件的动态缓冲特性进行了分析,通过增加厚度提高了包装件的缓冲保护功能。白淑伟<sup>[8]</sup>采用 Hyperworks 和 LS-DYNA 对带有 EPS 缓冲垫的平板电视进行了跌落模拟,分析了电视机的最大冲击加速度等相关数据。魏洁<sup>[9]</sup>采用 Abaqus 对通用服务器带包装模型进行了跌落分析,结合零部件变形和应力分布确定了产品的破坏情况。有限元仿真分析能有效模拟产品在实际跌落过程中的受力情况,以及开展结构优化设计。文中拟以液晶电视包装件为研究对象,利用 HyperMesh 建立液晶电视整机有限元模型,依据企业跌落标准开展仿真跌落分析,确定最危险工况并采用

OptiStruct 对包装泡沫进行拓扑优化。以期在提升产品安全性的前提下,减少泡沫用量,降低包装成本。

## 1 有限元建模

### 1.1 液晶电视包装件建模

文中液晶电视由冠捷显示科技提供,规格为 1240 mm×85 mm×720 mm。外包装箱为 0201 型瓦楞纸箱,规格为 1350 mm×158 mm×832 mm,楞型为 AB 型瓦楞。缓冲衬垫为 EPS 和 EPE 泡沫。其中, EPS 采用上、中、下全包裹托住的形式保护电视机, EPE 与瓦楞纸板粘接后位于液晶电视两侧,用于保护显示屏。液晶电视及包装件几何模型采用三维建模软件 Pro/E 建立,并通过相关接口导入有限元软件 HyperMesh 中建立有限元模型。液晶电视包装件及 EPS 泡沫衬垫有限元模型见图 1。

文中主要针对 EPS 泡沫进行结构优化设计。为了减少模型计算时间,同时保证模型精度,将电视机整体设置为刚体<sup>[10]</sup>,因此液晶电视有限元模型主要分为刚性体液晶电视、EPS 缓冲衬垫、EPE 缓冲衬垫、外包装瓦楞纸箱等 4 个部分。考虑到单元尺寸及数量对模型计算时间的影响<sup>[11]</sup>,根据 EPS 包装几何尺寸,设置网格尺寸为 5 mm。划分完成后,有限元模型中单元总数为 1 414 089,节点总数为 1 519 426,其中 EPS 泡沫共 332 721 个单元,391 148 个节点。

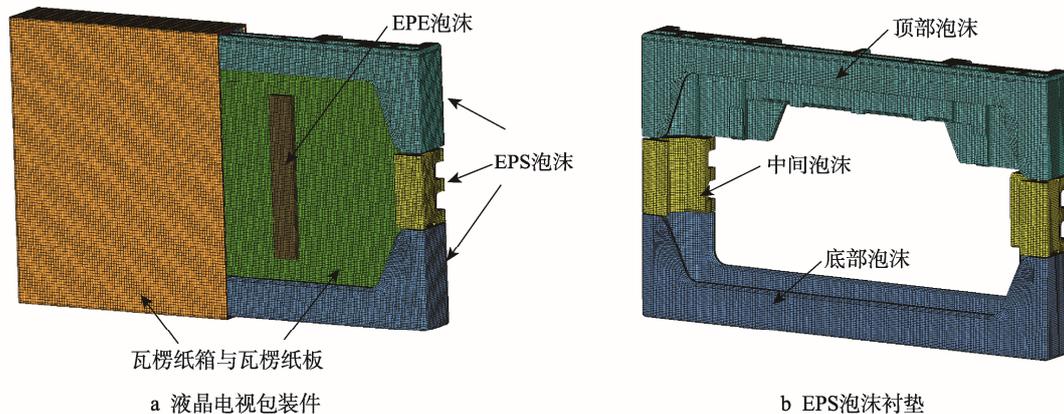


图1 液晶电视包装件有限元模型  
Fig.1 Finite element model of LCD TV packaging

### 1.2 材料参数设置

LS-DYNA 中提供了多种类型的材料模型,可用于模拟不同特性的材料。文中液晶电视采用的材料主要为 SGCC, HIPS V0 和 ABS,其有限元材料参数如下:电视机背板 SGCC 密度为 7850 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 210 GPa;后壳 HIPS V0 密度为 1040 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 1850 MPa;边框 ABS 密度为 1050 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 2000 MPa。

文中瓦楞纸箱为 AB 型瓦楞,由面纸、芯纸、夹芯纸、芯纸和里纸 5 层组成,其定量依次为 230, 170, 170, 170, 230 g/m<sup>2</sup>,因此各层的材料性能存在差异。为充分模拟瓦楞纸箱的几何特性与材料特性,有限元模型中采用各层单独划分网格,接触面共节点的方式建模。其中,面纸、夹芯纸和里纸选择弹性材料本构模型(\*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY),采用壳单元建模。瓦楞芯纸选择可压碎泡沫材料本构模型(\*MAT\_MODIFIED\_CRUSHABLE\_FOAM),实

体单元建模。根据泡沫缓冲衬垫的材料特性，EPS 采用 \*MAT\_MODIFIED\_CRUSHABLE\_FOAM 本构模型，EPE 采用 \*MAT\_FUCHANG\_FOAM 本构模型。液晶电视包装件的详细材料参数见表 1。

表 1 包装件材料参数  
Tab.1 Material parameters of the packaging

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比
面纸/里纸	610	3200	0.3
芯纸	92	3200	0.34
夹芯纸	92	3200	0.3
EPS	24.62	10	0.18
EPE	27.8	10	0.3

### 1.3 接触和边界条件设置

通过在部件之间建立接触对关系，能准确模拟部件间的真实接触特性。由于文中主要考虑 EPS 泡沫的吸能特性，有限元模型中接触关系的设置如下：电视机整体设置为自接触（\*Contact\_Automatic\_Single\_Surface），电视机与包装以及包装之间建立面面接触（\*Contact\_Automatic\_Surface\_To\_Surface）。根据企业标准，不同类型的跌落工况其跌落高度不同，为减少有限元模型计算时间，将仿真高度设置为距离地面 0.01 m，并赋予相应的初始速度  $v$ ，其计算公式如下：

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

式中： $g$  为重力加速度， $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ； $h=H/100-0.01$ ， $H$  为跌落高度。模型第 1 次接触地面时，液晶电视加速度最大，损伤风险也最大，因此文中主要分析电视机与地面首次碰撞的过程，则仿真时间设置为 0.02 s。

## 2 液晶电视跌落仿真

### 2.1 跌落工况仿真矩阵

根据 GB/T 4857—2005，跌落试验包括面跌落、棱跌落和角跌落 3 种情况，且跌落工况、产品质量不同，其跌落高度也不相同。结合企业产品开发经验以及国标规定，文中对液晶电视的跌落高度进行了调整。液晶电视跌落示意图 2，以电视屏幕面为前面，依次确定其他跌落面。选定图 2 中标定的角跌落点，与之相交的 3 条棱即为跌落棱，最终确定的仿真跌落顺序和跌落高度见表 2。由于液晶电视整机模型结构对称，左面和右面跌落仅选取左面跌落工况。

### 2.2 模型有效性验证

为确定有限元模型的有效性，文中以前面跌落工况进行验证，见图 3，在电视机背板中心区域固定加速度计，以获得跌落试验中液晶电视的加速度。仿真分析中，在相应位置建立加速度计并设置加速度输出，则加速度曲线对比结果见图 4。

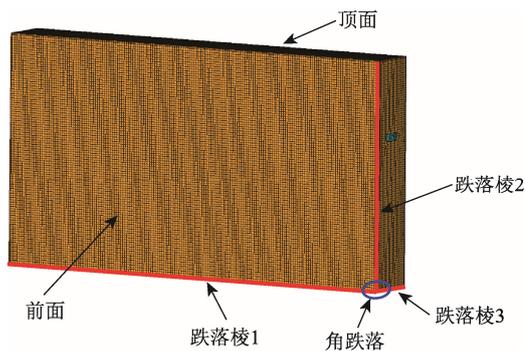


图 2 跌落工况  
Fig.2 Drop conditions

表 2 液晶电视跌落仿真矩阵  
Tab.2 Drop simulation matrix of LCD TV

编号	工况	类型	名称	测试高度 H/cm
1		顶面	Drop test 1	100
2		底面	Drop test 2	100
3	面跌落	前面	Drop test 3	69
4		左面	Drop test 4	100
5		后面	Drop test 5	69
6		棱 1	Drop test 6	57.5
7	棱跌落	棱 2	Drop test 7	57.5
8		棱 3	Drop test 8	57.5
9	角跌落	角	Drop test 9	57.5

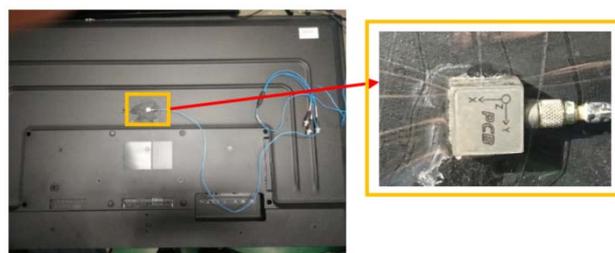


图 3 加速度计安放位置  
Fig.3 Installation location of accelerometer

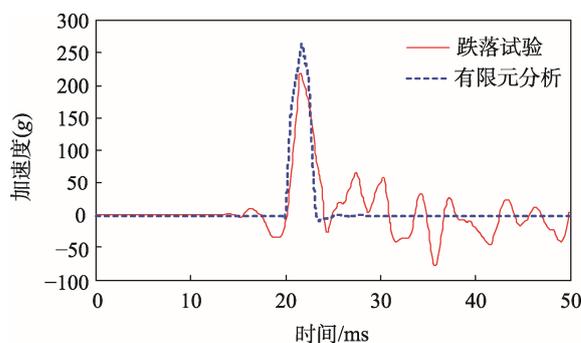


图 4 前面跌落试验与仿真中液晶电视加速度曲线对比  
Fig.4 Comparison of LCD TV acceleration curves in front drop test and simulation

由图 4 可知,有限元分析中除加速度峰值大于跌落试验外,2 条曲线在峰值期间的整体趋势和峰值时间较为一致,而导致加速度峰值差异的原因主要为有限元分析中将液晶电视简化为了刚体,其相对于真实跌落过程不会发生变形,因此峰值更大。综合考虑加速度曲线的趋势和脉宽,有限元模型能较好地反应液晶电视的实际跌落情况,即有限元模型有效,可以进行下一步的研究。

### 2.3 仿真跌落分析

根据文献[12—13],选取液晶电视加速度作为泡沫吸能能力的评价指标。以表 1 中的跌落矩阵开展仿真跌落分析,则液晶电视的加速度曲线见图 5。对比可知,Drop test 3 和 Drop test 5 中的加速度峰值远大于其他工况,因此可以确定前面和后面跌落工况最恶劣。为降低液晶电视的加速度,减少损伤风险,基于仿真跌落分析结果,对泡沫结构进行优化设计具有重要意义。

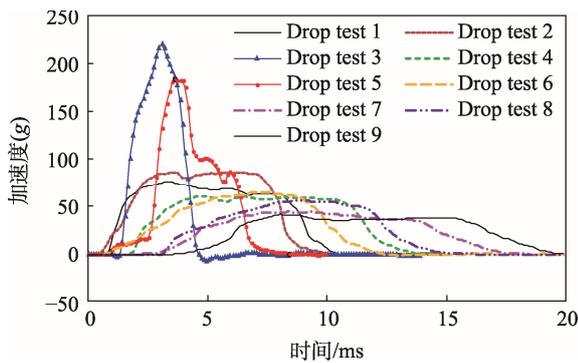


图 5 不同跌落工况仿真加速度曲线对比  
Fig.5 Comparison of simulation acceleration curves in different drop conditions

## 3 拓扑优化设计

### 3.1 拓扑优化理论

拓扑优化是结构优化中的一种,其主要原理为在给定负载、约束条件和性能指标下,对指定区域内的材料分布进行优化,使得优化后的材料分布更加符合受力情况。目前,拓扑优化主要包括连续体拓扑优化和离散结构拓扑优化<sup>[14]</sup>,其中连续体拓扑优化方法中使用较多的为变密度法,其拓扑优化的数学模型基本结构为<sup>[15]</sup>式(2)。

$$\begin{cases} \text{Find : } x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ \text{Min : } C(x) = F^T U \\ \text{S.t.} \begin{cases} V \leq V^* \\ F = KU \\ 0 < x_{\min} \leq x_i \leq 1 \quad (i = 1 \dots n) \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $x_i$  为设计变量,代表离散单元的相对密度;  $n$  为设计变量个数;  $C(x)$  为目标函数,为结构的柔顺度;  $K$  为结构的总体刚度矩阵;  $U$  为结构的总体位移向量;  $F$  为结构所受载荷向量;  $V$  为结构优化后的体积;  $V^*$  为体积上限; 为避免总刚度矩阵奇异而导致仿真结果不准确或不收敛,通常引入  $x_{\min}$ , 其取值一般为 0.001。

### 3.2 包装拓扑优化

根据拓扑优化理论,有限元模型需要确定设计变量、目标函数和约束条件等参数。其中,设计变量为单元相对密度。根据液晶电视仿真跌落结果,获得不同跌落工况下 EPS 泡沫的受力情况,提取各工况下最大压力作为包装优化中的载荷输入。考虑到包装泡沫与瓦楞纸箱接触,选择 EPS 泡沫与液晶电视接触区域为非设计空间,其他部分为设计空间。同时,以 EPS 泡沫与瓦楞纸箱接触面为约束面,与液晶电视接触面为加载面,则优化分析中泡沫的加载受力情况见图 6。

为提升泡沫结构的吸能保护能力,需保证泡沫的刚度与体积比最大,因此建立以加权应变能最小为优化目标,以设计区域的体积分数为约束条件的优化模型。考虑到结构优化的整体均匀性,在优化前将 EPS 泡沫均匀分块(见图 7),设定整体体积分数响应上限值为 0.3,即优化后的泡沫结构应不超过原始优化空间的 30%。由于顶部泡沫和底部泡沫左右对称,泡沫分块和优化结果仅显示几何结构的一半。

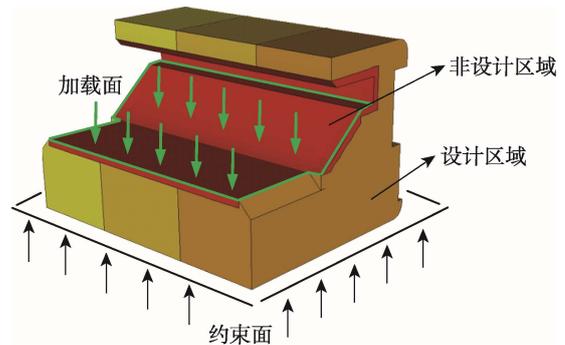


图 6 泡沫优化加载示意  
Fig.6 Diagram of foam optimizing and loading

在 OptiStruct 中设置优化参数,提交计算求解。使用 HyperView 对 EPS 泡沫迭代优化结果进行后处理分析,单元密度为 0.3 时 EPS 泡沫的等值面云图见图 8。可以看到,优化后的泡沫结构在不同区域内均出现了不同程度的网格删除,且网格整体分布均匀。

观察泡沫结构的材料分布变化趋势,调整单元密度,多次优化后得到 EPS 拓扑优化结构,见图 9。与原始结构相比,拓扑优化后的 EPS 泡沫主要在与纸箱接触的区域建立了凹槽结构,减少了与瓦楞纸箱的接触面积,提高了泡沫的变形能力。然而,根据实际

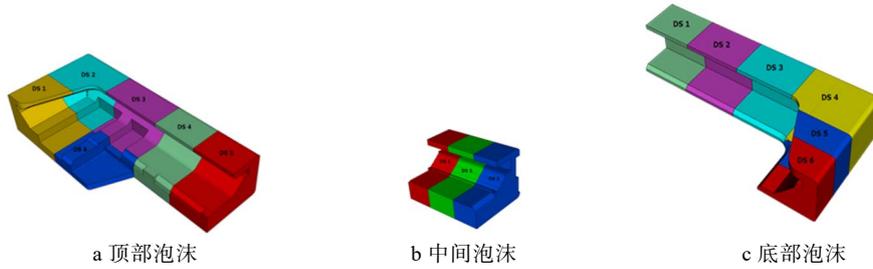


图 7 EPS 泡沫分块优化示意  
Fig.7 Sub-region optimization diagram of EPS foam

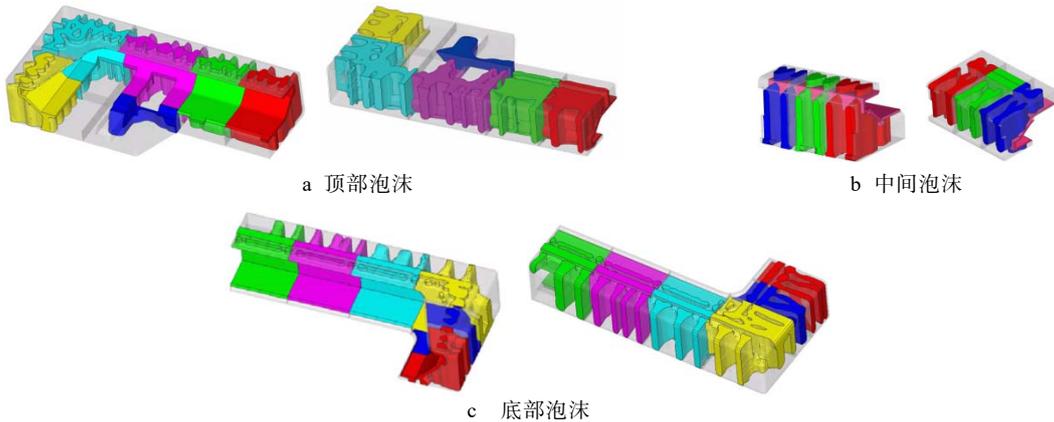


图 8 EPS 泡沫优化等值面云图  
Fig.8 ISO contour of EPS foam optimization

工程开模经验, 拓扑优化后的泡沫无法直接用于开模生产, 因此基于优化结果进一步改进泡沫结构, 见图 10。与拓扑优化结构相比, 改进后的 EPS 泡沫仅保留上下部分的凹槽结构, 此时泡沫质量相对原始结构减少了 6.73%。

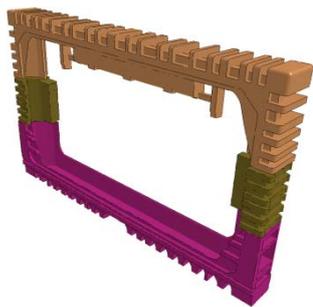


图 9 拓扑优化后的 EPS 泡沫  
Fig.9 Topology optimized EPS foam

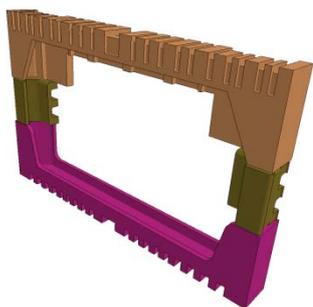


图 10 基于拓扑优化结果改进的结构  
Fig.10 Structure improved based on topology optimization results

### 3.3 优化前后结果对比

将优化改进后的 EPS 泡沫替换原始结构进行仿真跌落分析, 液晶电视加速度峰值优化前后结果对比见表 3。可以发现, 结构优化后的液晶电视加速度峰值均有所下降, 其中后面跌落降低最明显, 优化比例为 23.41%。对于前面跌落, 虽然加速度峰值有一定下降, 但程度较小, 仅为 5.74%, 这主要是由于包装优化前液晶电视结构确定, 以及开模要求等使得前侧泡沫无法过多调整导致的。

表 3 优化前后加速度峰值对比  
Tab.3 Comparison of acceleration peaks before and after optimization

编号	工况	类型	液晶电视加速度(g)		
			优化前	优化后	优化比例/%
1	面跌落	顶面	75.79	65.47	13.62
2		底面	85.65	77.74	9.24
3		前面	220.01	207.39	5.74
4		左面	59.68	59.66	0.03
5		后面	183.40	140.47	23.41
6	棱跌落	棱 1	64.70	60.83	5.98
7		棱 2	55.87	49.99	10.52
8		棱 3	43.44	36.14	16.8
9	角跌落	角	40.58	34.5	14.98

## 4 结语

通过 HyperMesh 和 LS-DYNA 有限元软件对液晶电视整机模型进行跌落仿真分析,随后基于仿真结果运用结构优化软件 OptiStruct 对包装泡沫进行了拓扑优化。该分析在保证泡沫结构强度的基础上,提出了优化方案,降低了泡沫结构的质量,减少了生产成本。

需要指出的是,为减少计算时间,液晶电视简化为了刚体结构;拓扑优化中,仅选取了体积响应作为约束变量,而没有考虑实际运输中的振动频率等其他响应;由于条件限制,优化后的包装结构无法通过跌落试验进行验证。大尺寸液晶电视的泡沫结构较为复杂,更深入的结构优化分析还需进一步讨论。

### 参考文献:

- [1] 吴月. 基于动力学的 PC 服务器运输包装件缓冲性能评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.  
WU Yue, Evaluation of Buffer Performance of PC Server Transport Package Based on Dynamics[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.
- [2] 车宪香. 包装件跌落模拟计算与缓冲结构优化[D]. 济南: 山东大学, 2013.  
CHE Xian-xiang. Computer Simulation on Drop Tests of Packages and Optimization of Cushion Foams Structure[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [3] 崔小龙, 王泉中, 蒋身学. 基于 ANSYS 的机电产品包装箱底架模态分析与研究[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(6): 35—39.  
CUI Xiao-long, WANG Quan-zhong, JIANG Shen-xue. The Modal Analysis of Mechanical Products Packing Box Chassis in ANSYS[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(6): 35—39.
- [4] 宋海燕. 运输包装理论与技术发展动态[J]. 包装工程, 2005, 26(3): 108—110.  
SONG Hai-yan. Analysis of the Development Trends on Transport Packaging Theory and Technology[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(3): 108—110.
- [5] 罗思源, 兀光波, 王延琦, 等. 某运输包装件的跌落冲击仿真分析[J]. 机械与电子, 2016, 34(8): 16—20.  
LUO Si-yuan, WU Guang-bo, WANG Yan-qi, et al. Drop Impact Simulation Analysis for a Transport Package[J]. Machinery & Electronics, 2016, 34(8): 16—20.
- [6] 崔睿, 张广文. 智能座便器包装的跌落仿真研究[J]. 机械工程与自动化, 2017(2): 91—92.  
CUI Rui, ZHANG Guang-wen. Intelligent Implement Packaging Drop Simulation Research[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017(2): 91—92.
- [7] 丁玉平, 钱怡. 包装件跌落仿真分析与结构优化[J]. 包装与食品机械, 2014(4): 44—47.  
DING Yu-ping, QIAN Yi. Drop Simulation Analysis and Structure Optimization of the Overall Package[J]. Packaging and Food Machinery, 2014(4): 44—47.
- [8] 白淑伟, 王春香. 平板电视 EPS 缓冲垫设计及跌落分析研究[J]. 现代制造技术与装备, 2014(4): 17—19.  
BAI Shu-wei, WANG Chun-xiang. Research on EPS Cushion Design and Drop Analysis for FPTV[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2014(4): 17—19.
- [9] 魏洁, 龚宝龙. 通用服务器带包装跌落仿真分析[J]. 机械与电子, 2016, 34(9): 16—18.  
WEI Jie, GONG Bao-long. Simulation Analysis of Universal Server Package Dropping[J]. Machinery & Electronics, 2016, 34(9): 16—18.
- [10] 刘永辉, 张银. 基于有限元分析的洗衣机跌落冲击仿真及改进设计[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 164—166.  
LIU Yong-hui, ZHANG Yin. Dropping Simulation and Design Improvement of a Washing Machine Based on FE Analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 164—166.
- [11] ANJANEYULU Y, MANIKANTA K, PRASAD K. Modelling and Optimization of I.C Engine Crank Shaft with Different Materials and Loads by Using Finite Element Analysis[J]. International Journal of Innovative Technologies, 2015, 12: 1994—1998.
- [12] 石岩, 张括, 王芳, 等. 全瓦楞纸板的红酒包装内衬设计及跌落分析[J]. 包装工程, 2017, 38(9): 145—150.  
SHI Yan, ZHANG Kuo, WANG Fang, et al. Design and Dropping Analysis of Package Lining for Red Wine with All Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(9): 145—150.
- [13] 余本刚, 林翰, 孙瑜, 等. 微波炉跌落仿真及结构优化设计[J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 187—190.  
YU Ben-gang, LIN Han, SUN Yu, et al. Simulation of Microwave Oven Drop-test and Optimum Design of Its Package Structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(2): 187—190.
- [14] 沈斌, 姜冬, 刘杰. 基于 HyperMesh/OptiStruct 的发动机支架结构拓扑优化设计[J]. 机电一体化, 2011, 33(5): 50—53.  
SHEN Bin, JIANG Dong, LIU Jie. The Structural Optimization Design of Engine Bracket Based on HyperMesh/OptiStruct[J]. Mechatronics, 2011, 33(5): 50—53.
- [15] 吴顶峰. 基于变密度法的连续体结构拓扑优化研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.  
WU Ding-feng. Research on Topology Optimization of Continuum Structure Based on Variable Density Method[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.