

# EPS 泡沫包装箱有限元分析与优化设计

秦志远, 黄海松, 张慧

(贵州大学, 贵阳 550025)

**摘要:** **目的** 为了节省泡沫包装箱设计和制造时间, 减少材料浪费, 以提高使用性能。**方法** 首先在 UG 中建立所选取的销量较好的 3 种 EPS 泡沫包装箱模型, 然后导入 Abaqus 中进行结构静力学分析, 最后根据分析结果对包装箱结构进行优化设计及结构静力学分析。**结果** 得到了 3 种样品模型和优化模型的应力分布云图, 3 种样品模型最大应力均位于箱盖与箱体接触区域, 箱盖中心区域变形最大。**结论** 优化设计后的模型最大应力减小, 应力分布更加合理。

**关键词:** 泡沫包装箱; 有限元分析; 优化设计

中图分类号: TB482.2; TB487 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2016)23-0100-05

## Finite Element Analysis and Optimal Design of EPS Foam Packing Case

QIN Zhi-yuan, HUANG Hai-song, ZHANG Hui

(Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**ABSTRACT:** The work aims to save the time of design and manufacturing of foam packing, reduce the waste of materials, so as to improve its usability. The models of three kinds of foam packing cases with better sales were established in UG, and then structure static analysis was carried out with the models imported into ABAQUS. Finally, the optimal design of packing case and structure static analysis were conducted according to analysis results. The stress distribution contour of three kinds of sample models and optimized models were obtained. The maximum stress of all three kinds of sample models was applied on the contact area of case cover and the case. The central area of the case cover was subject to maximum deformation. The maximum stress of the optimally designed models decreases and the stress distribution is more rational.

**KEY WORDS:** foam packing case; finite element analysis; optimal design

随着社会经济的飞速发展, 人民生活水平不断提升, 对高质量农产品的需求日益提高。泡沫塑料具有密度小、吸收冲击载荷性好、隔热性优良、隔音效果好、比强度高特点<sup>[1]</sup>, 因此被广泛应用于有机蔬菜、时令水果、海鲜等农产品的运输。泡沫包装箱在农产品运输中发挥越来越重要的作用, 其中 EPS (可发性聚苯乙烯) 包装箱应用最为广泛。

EPS 包装箱易加工, 质轻价廉, 应用广泛, 研究其抗压性能具有重要的现实意义和工程价值。

目前包装箱抗压性能测试多采用物理测试方法, 具有成本高、结果随机性大等缺陷<sup>[2]</sup>。生产泡沫包装箱前需要首先制作模具, 通过有限元分析软件对泡沫箱进行结构静力学有限元分析, 能够简化设计流程, 节省大量人力物力。

收稿日期: 2016-06-09

基金项目: 贵州省自然科学基金 (黔科合 J 字[2015]2043 号); 贵州省重大基础研究项目 (黔科合 JZ 字[2014]2001)

作者简介: 秦志远 (1991—), 男, 山东泰安人, 贵州大学硕士生, 主攻数字化设计制造, 制造业信息化。

通讯作者: 黄海松 (1977—), 女, 贵州大方人, 博士, 贵州大学教授、博导, 主要研究方向为先进制造技术, 制造业信息化。

## 1 研究概况

由于空间限制,泡沫包装箱在运输过程中一般采用堆码的形式进行摆放。泡沫包装箱变形过大会对运输物品造成挤压,包装破损还会降低其防潮、保温等效果,带来经济损失,因此包装箱设计时应充分考虑其抗压性能。对包装箱及缓冲材料抗压性能的研究,一般先对材料进行物理测试得出相关参数,如弹性模量、泊松比及应力应变数据等,然后使用有限元分析软件进行计算。Ansys 和 Abaqus 是应用广泛也是研究者最常使用的两大有限元分析软件,也有研究者使用三维设计软件自身包含的有限元分析模块对包装箱进行抗压性能分析<sup>[3-5]</sup>。现阶段对于瓦楞纸箱<sup>[6-9]</sup>和泡沫衬垫的有限元分析较多,对于泡沫包装箱的有限元分析有一定的借鉴意义。文中选取市面上销量较高的 3 种邮政 4 号泡沫箱为例进行结构静力学分析,并对其结构进行优化设计,探究结构对其应力分布及使用性能的影响。

## 2 建立泡沫包装箱模型

UG 是西门子公司出品的大型三维设计软件,广泛应用于各类三维设计部门。使用 UG 建立样品三维模型,1 号样品规格外尺寸为 340 mm×220 mm×180 mm,内尺寸为 300 mm×180 mm×140 mm;2 号样品规格外尺寸为 345 mm×225 mm×180 mm,内尺寸为 305 mm×185 mm×140 mm;3 号样品规格外尺寸为 340 mm×220 mm×186 mm,内尺寸为 304 mm×184 mm×154 mm。

根据以上尺寸参数在 UG 中建立各样品的原始三维模型,为使分析结果更接近于真实情况,对外表各边进行倒圆角操作,圆角半径为 5 mm。1 号、2 号和 3 号样品的最终三维模型见图 1。

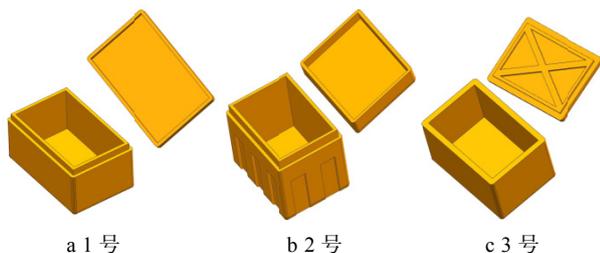


图 1 UG 中建立的样品模型

Fig.1 The sample model established in UG

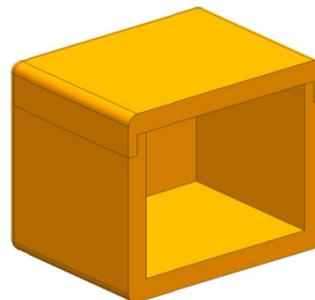


图 2 横向剪切示例

Fig.2 Transverse shear sample

为方便后续观察有限元分析结果,在模型中线位置对泡沫包装箱模型进行横向剪切操作,以 1 号样品模型为例,具体见图 2。将剪切后的模型导出为 \*.x\_t 格式文件,此格式文件可以用在不同的 CAD 或 CAE 文件之间转换<sup>[10]</sup>,相对于 iges 文件能保证更好的模型转化质量。

## 3 泡沫包装箱结构静力学有限元分析

Abaqus 是一套功能强大的工程模拟有限元软件,不但可以解决相对简单的线性分析问题,还可以解决许多复杂的非线性问题。EPS 材料多种多样,制作工艺不同,各项力学性能也不相同<sup>[11-12]</sup>。为便于研究,将 EPS 材料等效为各项同性的线弹性材料。

### 3.1 材料定义

将 UG 中导出保存的模型文件导入 Abaqus 中,分别定义材料的密度、弹性模量、泊松比以及塑性阶段应力-应变数据。文中以文献[13]中实验数据为例进行研究,对于其弹性阶段,弹性模量为 1.52 MPa,泊松比为 0.3,密度为 11.18 kg/m<sup>3</sup>。在其塑性阶段,应力为 0.044 MPa 时,塑性应变为 0;应力为 0.054 MPa 时,塑性应变为 0.02;应力为 0.059 MPa 时,塑性应变为 0.04;应力为 0.064 MPa 时,塑性应变为 0.06;应力为 0.066 MPa 时塑性应变为 0.08;应力为 0.07 MPa 时,塑性应变为 0.10;应力为 0.072 MPa 时,塑性应变为 0.12;应力为 0.075 MPa 时,塑性应变为 0.14;应力为 0.077 MPa 时,塑性应变为 0.16;应力为 0.081 MPa 时塑性应变为 0.18,应力为 0.084 MPa 时,塑性应变为 0.20;应力为 0.086 MPa 时,塑性应变为 0.22。

### 3.2 接触方式定义

绑定约束用于将模型中的2个区域(面或节点区域)绑定在一起,使它们之间没有相对运动<sup>[14]</sup>。泡沫包装箱在使用过程中,一般使用胶带等将箱体与箱盖固定,可视为接触面之间没有相对运动。首先在箱盖和箱体各对应接触边分别创建 surface 类型的主面和从面,其中1号和2号样品模型分别创建3个主面和从面,3号样品模型创建2个主面和从面,然后将对应的主面和从面分别进行绑定约束。离散化方法选择选择面-面方式,此方式仅适用于主面和从面都是 surface 类型的情况,虽然增加了计算时间,但能够提高计算精确度。

### 3.3 边界条件及加载

对箱体和箱盖的切割边施加对称载荷,箱体底边施加三自由度固定约束,箱盖上表面施加  $p=1.6$  kPa 的压强(按照箱盖表面施加 100 N 压力计算)。

### 3.4 网格划分

对3种样品模型分别进行如上所述的参数设置后,进行网格划分操作。为使分析结果更加精确,设置网格种子单元大小为 5 mm。设置网格单元类型为一阶四面体 C3D4 单元,确认对箱盖和箱体进行网格划分。

### 3.5 计算与分析

提交分析作业计算后,进入分析结果,选择显示 Mises 应力的云纹图,3种样品模型的应力云图见图3。1号样品的应力云图中最大应力为 44.9 kPa,位于箱体与箱盖接触部分。2号样品相对于1号样品,箱体进行了减量化设计,其最大应力为 45.9 kPa,仍位于箱体与箱盖接触部位,同时箱盖中心区域应力增大,但没有超过弹性极限,箱体应力较小且相对于1号样品模型变化不大。在3号样品箱盖下表面设计了加强筋,箱盖结构与前2种样品不同,如图3c所示,最大应力为 47.0 kPa,可看出箱盖中心区域应力明显减小,但由于箱盖设计问题导致其箱体与箱盖接触部位最大应力区域较大。

## 4 优化设计

根据分析结果可得出泡沫箱主要变形部位为

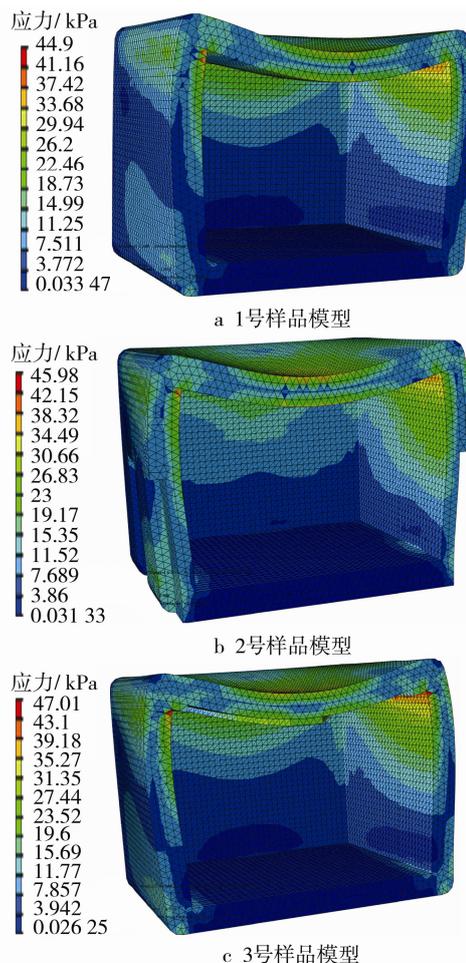


图3 ABAQUS中各样品模型应力云图  
Fig.3 Stress contour of sample models in ABAQUS

箱盖中心区域,应力最大区域为箱体与箱盖接触部分,箱体所受应力与应变较小。

综上,设计一种泡沫包装箱模型,厚度为 20 mm,以箱盖内部物理中心为原点,设计一个内径为 60 mm,外径为 100 mm,高度为 100 mm 的圆环。这个结构可以有效解决箱盖中央部分所受过大应力问题<sup>[15]</sup>,同时沿箱盖对角线增加一个“X”型加强筋,宽度为 20 mm,高度为 10 mm。箱体设计与2号样品相同,采用减量化设计,凹槽长 100 mm,宽 50 mm,高 10 mm,见图4。

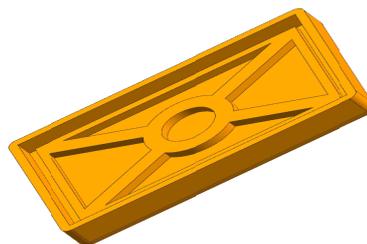


图4 箱盖造型设计  
Fig.4 Design of lid modeling

根据前文方法,对优化设计后的泡沫包装箱模型进行有限元分析,其应力云图见图 5。

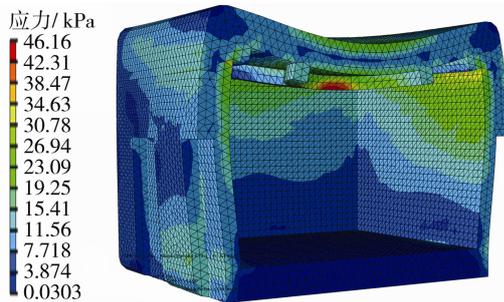


图 5 优化模型的应力云图

Fig.5 Stress contour of the optimization model

相对于 3 种样品,经过优化设计的泡沫箱的箱盖应力分布更加分散,最大应力减小为 43.4 kPa。箱盖与箱体接触区域应力减小,凹槽设计方便搬运,同时减少了材料使用量。

## 5 结语

3 种样品包装箱受压时最大应力位于箱盖与箱体接触部位,箱盖中心区域变形最大,箱体减量化设计对应力应变影响较小。对泡沫包装箱结构进行优化设计后,其应力分布更加合理,改善其使用性能。在前期设计中对产品模型进行有限元分析并进行性优化设计,降低了模具的投入风险,提高了产品设计的可信度,缩短了产品设计周期,提高了相关企业的竞争力。

## 参考文献:

- [1] 刘瑛. 泡沫塑料可压缩的塑性力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.  
LIU Ying. Investigations on Compressible Plastic Mechanical Properties of Foam Plastic[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [2] 何自芬, 张印辉. 基于有限元法的包装箱抗压性能研究[J]. 包装工程, 2009, 30(3): 39—41.  
HE Zi-fen, ZHANG Yin-hui. Study of Compression Resistance of Packaging Box Based on Finite Element Method[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(3): 39—41.
- [3] 段艳健, 钱怡. 基于 ANSYS Workbench 的瓦楞纸箱抗压性能仿真研究[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 23—26.  
DUAN Yan-jian, QIAN Yi. Simulation Study of Compression Strength of Corrugated Box Based on ANSYS Workbench[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 23—26.
- [4] 许洪龙. 基于 UG 的某洗碗机包装防震垫的设计[J]. 包装工程, 2012, 33(17): 70—73.  
XU Hong-long. Design of ANTivibration Pad of Dishwasher Packing Based on UG[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 70—73.
- [5] 康柳, 刘婧, 张佳娟, 等. 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, ZHANG Jia-juan, et al. Finite Element Analysis of Quickly Assembled Box with Buckles via SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 65—69.
- [6] 梁秀, 王玉龙, 丁辉. 蜂窝纸芯静态压缩性能有限元分析[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 59—63.  
LIANG Xiu, WANG Yu-long, DING Hui. Finite Element Analysis of Static Compression Performance of Honeycomb Paper-core[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(19): 59—63.
- [7] 丁毅, 杨鹏. 运用 Pro/MECHANICA 进行 EPE 缓冲衬垫的静态和动态压缩分析[J]. 包装工程, 2009, 30(6): 36—37.  
DING Yi, YANG Peng. Analysis of Static and Dynamic Compression of EPE Cushion with Pro/Mechanica[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(6): 36—37.
- [8] 廖泽顺, 滑广军, 谢勇, 等. 瓦楞纸板横向边压强度有限元分析[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 56—60.  
LIAO Ze-shun, HUA Guang-jun, XIE Yong, et al. Finite Element Analysis on Transverse Compressive Strength of Corrugated Board Edge[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 56—60.
- [9] 刘跃军, 江太君, 曾广胜, 等. 基于 ANSYS 的新型瓦楞纸板结构的有限元分析[J]. 包装工程, 2010, 31(13): 11—13.  
LIU Yue-jun, JIANG Tai-jun, ZENG Guang-sheng, et al. Finite Element Analysis of Novel Corrugated Board Structure Based on ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(13): 11—13.
- [10] 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, 35(6): 35—39.  
CUI Xiao-long, WANG Quan-zhong, JIANG Shen-xue. The Modal Analysis of Mechanical Products Packaging Box Chasis in ANSYS[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 35(6): 35—39.
- [11] 熊志远. 聚苯乙烯泡沫 (EPS) 力学行为的实验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2007.  
XIONG Zhi-yuan. Experimental Study on Mechanical Behaviors of Expanded Polystyrene (EPS) [D]. Xiang-

- tan: Xiangtan University, 2007.
- [12] 周文管, 王喜顺. 泡沫塑料主要力学性能及其力学模型[J]. 塑料科技, 2003(6): 17—19.  
ZHOU Wen-guan, WANG Xi-shun. Main Mechanical Properties of Foamed Plastics and Its Mechanical Model[J]. Plastics Science and Technology, 2003(6): 17—19.
- [13] 丁玉平. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的某缓冲包装缓冲特性分析与优化[D]. 无锡: 江南大学, 2014.  
DING Yu-ping. Cushioning Characteristics Analysis and Optimization Of Some Cushioning Package Based on ANSYS/LS-DYNA[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [14] 陈海燕. ABAQUS 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.  
CHEN Hai-yan. ABAQUS Finite Element Analysis from the Introduction to the Master[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- [15] 陈满儒, 张文明, 左维凌. 基于 ANSYS /UG 对企业某系列滚筒洗衣机包装顶盖的改进设计[J]. 包装工程, 2009, 30(2): 39—40.  
CHEN Man-ru, ZHANG Wen-ming, ZUO Wei-ling. Improvement Design of Packaging Roof for Drum-type Washing Machine Based on ANSYS/UG[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(2): 39—40.