# 基于 Ansys Workbench 的塑料蜂窝板仿真分析及优化

# 潘凤丽,李光

(天津科技大学, 天津 300222)

摘要:目的 通过对 PVC, PP, PE 这 3 种材料的塑料蜂窝板蜂窝单元进行多目标优化求解,得到 PVC, PP, PE 这 3 种材料塑料蜂窝板的最优结构参数。方法 利用 Ansys Workbench 仿真分析和多 目标优化迭代求解。结果 硬质 PVC 材料的蜂窝板蜂窝单元的最优结构参数是蜂窝边长为 10.135 mm,蜂窝壁厚为 0.151 44 mm,蜂窝高度为 10.925 mm; PP 材料的蜂窝板蜂窝单元的最优结构参数是蜂窝边长为 10.001 mm,蜂窝壁厚为 0.150 24 mm,蜂窝高度为 10.621 mm; HDPE 材料的塑料 蜂窝板蜂窝单元的最优结构参数是蜂窝边长为 10.998 mm,蜂窝壁厚为 0.150 16 mm,蜂窝高度为 10.196 mm。优化后的质量有了明显的降低,PVC 蜂窝板的质量降低了 10.74%, PP 蜂窝板的质量 降低了 11.11%, HDPE 蜂窝板的质量降低了 11.97%。结论 通过 Ansys Workbench 进行仿真分析和 多目标优化设计能够快速有效地得到结构件最优结构参数。

中图分类号: TB484.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2016)23-0044-06

# Ansys Workbench-based Simulation Analysis and Optimization of Plastic Perforated Board

PAN Feng-li, LI Guang (Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

**ABSTRACT:** The work aims to obtain optimal structure parameters of plastic perforated board made from PVC, PP and PE based on multiobjective optimization solution of perforated unit of plastic perforated board made from the three materials. Simulation analysis and multiobjective optimization iterative solution were carried out via Ansys Workbench. Optimum structure parameters of hard PVC material were: honeycomb length as 10.135 mm, cell wall thickness as 0.151 44 mm and honeycomb height as 10.925 mm. For PP material: honeycomb length as 10.001 mm, cell wall thickness as 0.150 24 mm, and honeycomb height as 10.621 mm. For HDPE material: honeycomb length as 10.998 mm, cell wall thickness as 0.150 16 mm and honeycomb height as 10.196 mm. The mass of optimized plastic perforated board decreased significantly, that of PVC honeycomb board decreased by 10.74%, PP perforated board by 11.11% and HDPE perforated board by 11.97%. Ansys Workbench-based simulation analysis and multi-objective optimization design is a fast and efficient method to obtain the optimum structure parameters of structural parts.

KEY WORDS: plastic perforated board; perforated units; multiobjective optimization; optimization design

蜂窝结构起源于仿生学,最早应用于航空航天 领域,以铝为原料的蜂窝板在提高产品性能的同时 又大大降低了产品的质量<sup>[1]</sup>。塑料蜂窝板作为一个 新兴的工业材料,生产加工速度慢等问题仍然是限

收稿日期: 2016-07-15

作者简介:潘凤丽(1991—),女,新疆乌鲁木齐人,天津科技大学硕士生,主攻包装机械设计及仿真优化。

通讯作者:李光(1975—),男,山东潍坊人,天津科技大学副教授,主要研究方向为包装机械、虚拟仿真和包装动力学。

制其大规模生产的关键所在,改善塑料蜂窝板的生 产工艺是重中之重。蜂窝芯结构力学特性良好,且 其结构质量轻、承载能力高<sup>[2]</sup>。关于蜂窝板材的分 析和优化国内外有许多学者进行了研究。国外学者 Aktay<sup>[3-6]</sup>对铝制和 Nomex 材料的蜂窝板进行试 验、有限元仿真分析和空间自回归分析的研究,得 出了铝制以及 Nomex 材料的蜂窝板受平压时的应 力与应变关系。国内学者<sup>[7-13]</sup>使用 Ansys 进行了多 种材料的蜂窝结构有限元分析和优化,得到了多种 材料下蜂窝板材的性能及优化尺寸。

与金属材料蜂窝板相比,塑料蜂窝板除了具有 其他蜂窝材料强度高、质量轻的优点外,还有很强 的抗水、抗酸碱能力,但现阶段国内外对塑料蜂窝 板性能的研究仍然是空白的,塑料蜂窝芯最优结构 参数的确定依然没有一个好的方法。市场现有塑料 蜂窝板材料为 PP 和 PC, 其中 PC 材料的塑料蜂窝 板主要用于隔音、过滤等, 文中主要考虑板材抗压 强度方面的性能,因此使用现有 PP 材料以及常用 的塑料材料 PVC 和 HDPE 作为该研究的蜂窝材料。 以3种材料的塑料蜂窝板和蜂窝单元为研究对象, 通过在 Ansys Workbench 建模、设置材料属性、划 分网格、设置约束和载荷完成塑料蜂窝板的仿真分 析。以塑料蜂窝结构中的蜂窝边长、壁厚、高度为 设计变量,以蜂窝单元的总变形量、等效应力为约 束条件,以所用材料的质量和蜂窝板的强度作为优 化目标进行多目标优化,得到不同材料蜂窝结构的 性能特点以及最优结构参数,为塑料蜂窝板的最优 设计提供理论依据。

# 1 塑料蜂窝板仿真分析

#### 1.1 结构模型

Ansys 软件是集结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型有限元分析软件。作为一个重要的 CAE 软件, Workbench 是其中重要的优化模块<sup>[14]</sup>。

在 Ansys Workbench 中建立塑料蜂窝板的模型。首先建立 Static Structural 分析系统,然后在 Geometry 模块中进行模型的建立。该设计中模型 尺寸是根据 GB/T 1453—2005<sup>[15]</sup>《夹层结构或芯子 平压性能试验方法》确定的,根据标准规定,优化 的蜂窝芯材尺寸为 60 mm×60 mm×17 mm,其中芯 材的厚度按标准采用 15 mm,面板的厚度为 1 mm。

模型中单个蜂窝的蜂窝单元的边长为 10 mm、壁厚 为 0.2 mm、高度为 15 mm,最终模型见图 1。



图 1 塑料蜂窝板 3D 模型 Fig.1 3D model of plastic honeycomb board

#### 1.2 建立材料参数

使用 PVC, PP, PE 这 3 种材料作为优化分析 材料,在 Engineering Data 中设置模型材料的参数, 在分析中将材料参数赋于模型。根据分析材料类型 的差异,在不同的分析优化中需要的材料参数也不 尽相同,此次进行的优化需要的 3 种材料的物理力 学参数见表 1。其中 3 种材料的密度、弹性模量和 泊松比是为了设定材料属性,完成仿真分析,压缩 强度则是为了给多目标优化的约束条件提供依据。

表 1 PVC, PP, PE 的材料参数 Tab.1 Material parameters of PVC, PP and PE

材料	密度/	弹性模	压缩强	近ねい
	$(g \cdot cm^{-3})$	量/GPa	度/MPa	们你儿
硬质PVC	1.37	3.5	70	0.3825
PP	1.04	0.896	45	0.4103
HDPE	0.917	1.07	22.5	0.4101

#### 1.3 分析设置

模型及材料设置完成后退回系统界面,在系统中双击 model 进入分析模块。在 DM 模块中进行网格划分以及约束条件和载荷的设置。Ansys Workbench 中提供了适合不同分析的多种网格设置,该研究使用适合实体的 20 节点的四面体单元 solid 187,网格尺寸为1 mm,网格划分后的模型见图 2。设置模型的下表面受固定约束,上表面受 0.2 MPa的均布载荷。考虑到塑料蜂窝板在包装方面的实际使用中,主要是用于塑料蜂窝托盘,但现有的塑料蜂窝托盘的相关使用参数数据较少,因此在设置载荷参数时参考常用木托盘的载荷数据。木托盘的载荷一般为 0.2 MPa,因此这里将载荷设置为 0.2 MPa<sup>[16]</sup>。



图 2 网格划分 Fig.2 The results of meshing

#### 1.4 仿真结果

完成模型建立、材料定义、网格划分和分析设 置后就可以开始进一步的求解。在求解前首先需要 进行求解项的设置,选择工具栏中的结果显示选择 项,其中包括变形、应力、应变等,点击选择需要 的结果项,DM窗口左侧的模型树结构下就会出现 相应的结果栏。文中选择显示 Equivalent Elastic Strain(等效应变)和 Equivalent Stress(等效应力) 这 2 项结果。3 种材料的仿真分析结果见图 3—4。



图 4 寻欢应受乙图 Fig.4 Equivalent strain nephogram

蜂窝板进行仿真分析时,由于边缘存在非封闭 型蜂窝单元,所以边缘的面板和芯楞存在局部应力 集中的现象。在实际设计中不应该以这些边缘的局 部特殊现象来代表蜂窝板的总体性能,而应该以蜂 窝板的内部蜂窝受力情况来代表蜂窝板的性能。

由图 3—4 可以看出,除去蜂窝单元的局部受力,蜂窝板内部的受力情况中蜂窝面板与蜂窝芯楞接触的地方应力最大,最大应力值为 9.9185 MPa (优化前 PVC 材料),其次是蜂窝的中心部位,最小受力位置是蜂窝壁到蜂窝芯之间的部分,应力值为 4.9594 MPa (优化前 PVC 材料)。优化前蜂窝板质量、最大等效应力和最大等效应变结果见表 2。

表 2 优化前蜂窝板的质量、最大等效应力和最大等效应变 Tab.2 Mass, maximum equivalent stress and maximum equivalent strain of honeycomb panel before optimization

材料类型	质量/g	等效应力/MPa	等效应变/%
PVC	13.166	9.9185	0.343 53
PP	9.9587	2.1929	1.3219
HDPE	8.7809	2.1968	1.1086

# 2 塑料蜂窝板优化设计

从蜂窝芯的结构以及蜂窝板的受力云图上可 以明显地看出,蜂窝结构是一种规律性很强的结 构,蜂窝板材在受到平压约束时,其受力与变形具 有循环重复性。由于塑料蜂窝板的生产工艺明显与 蜂窝纸板的生产工艺不同,不是点粘合的方式成型 的,不存在纸蜂窝结构中的 1/3 双层壁厚,2/3 单 层壁厚的问题,是一个壁厚完全一致的蜂窝结构, 在结构上与纸蜂窝相比,具有更大的优势。同时, 由于现阶段分析优化软件的局限性,这里对 3 种材 料的蜂窝单元进行多目标优化来求得蜂窝结构的 最佳设计参数。多目标优化问题就是在给定的载荷 和环境条件下,在给定的关系和约束范围内选取设 计变量,建立目标函数和约束条件,使三者在设计 空间构成设计问题。优化设计的过程实际上就是选 择设计变量,使目标函数达到最优值。多目标优化 问题的数学表达式如下<sup>[17]</sup>。 设计变量 X:  $X=[x_1, x_2...x_n]$ 目标函数 F(X):  $F(X)= U_{\min}[f_1(x), f_2(x)...f_m(x)]$ 约束条件:  $a_i \le x_i \le b_i$  (*i*=0, 1...*n*)  $h_j(x)=0$  (*j*=0, 1...*p*)  $g_k(x) \le 0$  (*k*=0, 1...*q*)

式中: *U*<sub>min</sub>(*x*)为求解最小值的函数; *a<sub>i</sub>*和 *b<sub>i</sub>*为 第 *i* 个设计变量的上、下限; *n* 为设计变量的个数; *h<sub>j</sub>*(*x*)与 *g<sub>k</sub>*(*x*)为选择函数, 控制所选变量为最优解; *p* 为非上、下限等式约束的个数; *q* 为非上、下限 不等式约束的个数。

#### 2.1 蜂窝单元优化

与蜂窝板的建模环境一致,在 Ansys Workbench 中建立 Static Structural 分析系统, 然后在 Geometry 模块中进行模型的建立,模型中蜂窝单 元的边长为10mm、壁厚为0.2mm、高度为15mm。 建模时在相应参数前选中参数化确定框,来实现边 长、壁厚以及高度的参数化。使用 PVC, PP, PE 这3种材料作为优化分析材料,在Engineering Data 中设置模型材料的材料参数,分析中将材料参数赋 予模型。模型及材料参数设置完成后在 DM 模块中 进行网格划分以及设置分析约束条件和载荷。网格 划分使用 20 节点的四面体单元 solid 187。该研究 中以蜂窝单元的边长、壁厚、高度为设计变量,以 蜂窝板材的用料质量、蜂窝单元的总体变形量和等 效应力为目标函数,约束条件是在下表面的固定约 束下,上表面施加 0.2 MPa 的均布载荷。文中以塑 料蜂窝板的质量作为最主要的目标函数,其权重为 0.5, 其次是塑料蜂窝板的等效应变, 权重为 0.3, 最后是等效应力,权重为0.2。

完成分析后退回系统界面,将 Direct Optimiza-

tion 优化模块拖入 Parameter Set 模块下的方框中,双 击 Optimization 进入优化设置界面。优化使用直接优 化中的多目标优化方法,可以通过选择候选点个数 以及迭代次数等对优化方式进行设置。文中的候选 点为5个,迭代次数为20次。优化的输入参数为蜂 窝单元的边长、壁厚和高度,并在优化模块中设置 输入变量的上下限,边长范围为10~30 mm,壁厚 范围为0.15~0.3 mm,厚度范围为10~30 mm,经 过多目标优化迭代计算得到最优解,见表3。

表 3 PVC, PP 和 PE 这 3 种材料蜂窝单元的优化最优点 Tab.3 Optimum point of optimization of PVC, PP and PE cellulars

材料	蜂窝边长/mm	蜂窝壁厚/mm	蜂窝高度/mm
硬质PVC	10.135	0.151 44	10.925
PP	10.001	0.150 24	10.621
HDPE	10.998	0.150 16	10.196

## 2.2 优化后塑料蜂窝板模型仿真

将经过多目标优化得到的塑料蜂窝单元最优 设计参数带入蜂窝板模型中,得到优化后的蜂窝板 模型,见图 5。分别将优化后的3种材料的蜂窝板 模型导入蜂窝板仿真分析系统中,得到优化后的蜂 窝板的仿真分析结果,其等效应力和等效应变云图 见图 6—7。由于优化前后的模型使用的是与分析 参数设置完全相同的仿真系统,所以仿真差异仅由 模型自身结构参数决定,对比前后2套仿真结果数 据就可以验证蜂窝板优化的效果。



图 5 优化后的 PVC 蜂窝板模型 Fig.5 Model of PVC plastic honeycomb board after optimization



图 6 优化后的等效应力云图 Fig.6 Equivalent stress nephogram after optimization



图 7 优化后的等效应变云图 Fig.7 Equivalent strain nephogram after optimization

优化后蜂窝板的质量、最大等效应力和最大等 效应变结果见表 4。对比表 2 和表 4 可以发现,优 化前后的最大等效应力和最大等效应变变化很小, 将表 2 和表 4 中的数据与表 1 中的压缩强度进行对 比可以发现,优化前后的等效应力和等效应变均低 于压缩强度的要求,可满足强度要求。优化后的质 量有了明显的降低,其中 PVC 蜂窝板质量降低了 10.74%, PP 蜂窝板质量降低了 11.11%, HDPE 蜂 窝板质量降低了 11.97%,证明该优化设计在保证 强度的情况下降低成本是有效可行的。

表 4 优化后蜂窝板质量、最大等效应力和最大等效应变 Tab.4 Mass, maximum equivalent stress and maximum equivalent strain of honeycomb panel after optimization

材料类型	质量/g	等效应力/MPa	等效应变/%
PVC	11.752	11.503	0.863 78
PP	8.8524	9.4349	1.1206
HDPE	7.7296	10.152	1.1479

# 3 结语

首先根据 GB/T 1453—2005《夹层结构或芯子 平压性能试验方法》对塑料蜂窝板受平压状态的等 效应力和应变规律进行了仿真分析,得出了蜂窝结 构是一种规律性很强的结构,蜂窝板材在受到平压 约束时,其受力与变形具有循环重复性。然后通过 对 PVC, PP, PE 这 3 种材料的塑料蜂窝单元进行 多目标优化求解,求得了 PVC, PP, PE 这 3 种材 料的塑料蜂窝单元的最优结构参数,为塑料蜂窝板 最优结构参数的确定提供了依据。将最优设计参数 带入蜂窝板模型,进行优化后蜂窝板的仿真分析, 得到优化后的塑料蜂窝板的仿真结构,对比优化前 后的蜂窝板仿真结果,验证了优化有效可行,为塑 料蜂窝板的优化设计提供了理论依据。

## 参考文献:

[1] 吴国荣. 我国蜂窝纸板发展概述[J]. 机电信息,

2003, 52(16): 21-25.

WU Guo-rong. The Development Overview of Honeycomb Paperboard[J]. Mechanical and Electronic Information, 2003, 52(16): 21–25.

- [2] XU X F, QIAN P Z, DAVALOS J F. Transverse Shear Stiffness of Composite honeycomb Core with General Configuration[J]. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 2001, 127(11): 1144–1151.
- [3] AKTAY L, JOHNSON A F, KROPLIN B H. Numerical Modeling of Honeycomb Core Crush Behavior[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(5): 2616– 2630.
- [4] AKTAY L, JOHNSON A F, HOLZAPFEL M. Prediction of Impact Damage on Sandwich Composites[J]. Computational Materials Science, 2005, 32(3): 252-260.
- [5] AKTAY L, JOHNSON A F. Semi-adaptive Coupling Technique for the Prediction of Impact Damage[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 25(3): 2351– 2368.
- [6] AKTAY L, JOHNSON A F, KROPLIN B H. Combined FEM/SPH Method for Impact Damage Prediction of Composite Sandwich Panels[C]// Portugal: Proceedings of the ECCOMMAS Thematic Conference on Meshless Methods, 2005.
- [7] 龚洋. 新型蜂窝集装箱地板结构的优化设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
  GONG Yang. New Cellular Container Floor Structure Optimization Design[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [8] 刘旺玉,赖基平.蜂窝集装箱地板结构优化设计及强度校核[J].包装工程,2013,34(11):46—50.
   LIU Wang-yu, LAI Ji-ping. Honeycomb Container Floor Structure Optimization Design and Strength Check[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11):46—50.
- [9] 王栋. 军车装甲用蜂窝夹层板的抗弹性研究及优化
   [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
   WANG Dong. Military Armored Resistance of Honeycomb Sandwich Plate is Used to Study and Optimize[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [10] 王显会, 佘磊. 基于抗冲击波响应的新型蜂窝夹层 结构多目标优化设计[J]. 车辆与动力技术, 2014, 136(4): 25—30.
   WANG Xian-hui, SHE Lei. Based on Shock Response

of the New Honeycomb Sandwich Structure Multi-objective Optimization Design[J]. Vehicle and Power Technology, 2014, 136(4): 25—30.

- [11] 张碧辉, 马存旺. 考虑多指标约束的蜂窝夹层防热 结构参数优化[J]. 机械强度, 2014, 36(3): 388—392. ZHANG Bi-hui, MA Cun-wang. Considering Multi-index Constraint of Honeycomb Sandwich Structure of Heat Parameter Optimization[J]. Journal of Mechanical Strength, 2014, 36(3): 388—392.
- [12] 吴雨潇.复合材料层合面层蜂窝夹芯结构的协同优化[D].广州:暨南大学,2014.
  WU Yu-xiao. Composite Laminated Surface Cellular Sandwich Structure of the Collaborative Optimization[D]. Guangzhou: Jinan University, 2014.
- [13] 刘明.蜂窝芯结构参数多目标优化研究[D].北京: 中国科学技术大学, 2014.
   LIU Ming. Structural Parameters of the Honeycomb Core Multi-objective Optimization Research[D]. Beijing: China University of Science and Technology,

2014.

- [14] 张洪才. Ansys Workbench 14.5 数值模拟工程实例解 析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
   ZHANG Hong-cai. Ansys Workbench 14.5 Numerical Simulation Project Instance Analysis[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2013.
- [15] GB/T 1453—2005, 夹层结构或芯子平压性能试验方法[S].
   GB/T 1453—2005, Test method for Flatwise Compres-

sion Properties of Sandwich Constructions or Cores[S].

- [16] 孟唯娟. 托盘装载优化系统的研究与开发[D]. 天津: 天津科技大学, 2010.
   MENG Wei-juan. Research and Development on Optimal System of Pallet Loading[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2010.
- [17] MARLER R T, ARORA J S. Survey of Multi-objective Optimization Methods for Engineering[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(6): 369– 395.