

# 某型包装箱的低密度聚乙烯缓冲结构设计与分析

申展, 罗俊杰, 卓毅

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:**目的 基于低密度聚乙烯材料设计一种包装箱的缓冲结构, 以满足冲击加速度的设计要求。方法 采用低密度聚乙烯材料对应的最大加速度-静应力曲线进行理论计算, 设计出包装箱缓冲结构的初始模型, 运用 Ansys Workbench 有限元仿真软件对包装箱整体进行水平跌落仿真, 并对仿真结果进行分析。结果 当缓冲垫设计厚度为 75 mm 时, 包装箱整体跌落后受到的最大冲击加速度低于 40g, 满足设计要求。结论 基于低密度聚乙烯材料设计的缓冲结构能够对包装箱提供有效的缓冲防护, 缓冲性能满足要求。

**关键词:** 低密度聚乙烯; 缓冲设计; 跌落仿真

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)21-0054-04

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.21.011

## Design and Analysis of Low Density Polyethylene Cushioning Construction of a Packaging Box

SHEN Zhan, LUO Jun-jie, ZHUO Yi

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** The work aims to design a cushioning structure of packaging box based on low density polyethylene to satisfy the design requirement of impact acceleration. The maximum acceleration-static stress curve of low density polyethylene was used for theoretical calculation, and an initial model of cushioning structure of the packaging box was designed. Ansys Workbench (finite element simulation software) was applied for the horizontal drop simulation of the whole packaging box and the simulation result was analyzed. When the design thickness of cushion was 75 mm, the maximal impact acceleration of the whole packaging box was below 40g after its drop, which satisfied the design requirements. The cushioning structure designed based on the low density polyethylene material can provide effective cushioning for the packaging box, and the cushioning property satisfies the requirement.

**KEY WORDS:** low density polyethylene; cushioning design; drop simulation

低密度聚乙烯, 简称 LDPE, 又称高压聚乙烯, 是一种具有高强缓冲防振能力的环保包装类材料, 具有质量较轻, 良好的缓冲性能和回弹性, 耐高冲击性能, 材料拉伸强度高, 吸水性小, 抗化学腐蚀性好, 良好的耐候性等优点。尤其在低温环境下, 低密度聚乙烯的缓冲性能依然稳定, 直至低温为  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时才显现出材料脆性, 缓冲性能降低, 因此被广泛应用于军用缓冲包装领域<sup>[1]</sup>。

低密度聚乙烯为交联闭孔结构, 内部含有大量泡孔, 各泡孔之间相互封闭隔离, 由于其密度低, 发泡倍率高, 因此其泡体在成型过程中, 随体积的增大,

聚合物变薄, 球形气泡变为由几个平面聚合物薄层分开的气室, 该类低密度聚乙烯材料对应的单轴准静态压缩应力应变特性为双曲正切型曲线。文中主要研究以低密度聚乙烯为材料, 设计一种包装箱的缓冲结构, 该缓冲结构用于保证包装箱在一定高度水平跌落时, 其内装的产品受到的冲击加速度不超过其许用冲击加速度, 从而实现有效的缓冲防护<sup>[2-6]</sup>。

### 1 包装箱结构及缓冲性能要求

包装箱采用细长型长方体结构, 箱体总体尺寸: 长度为 2400 mm, 宽度为 450 mm, 高度为 430 mm,

收稿日期: 2018-07-18

作者简介: 申展 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向机械结构设计、包装防护、仿真分析。

包装箱总体外形结构见图 1。

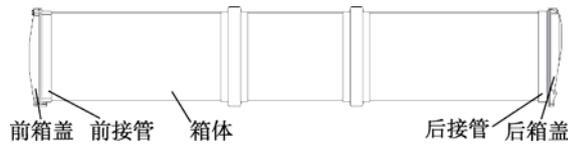


图 1 包装箱外形结构

Fig.1 Outline structure view of packaging box

从图 1 可以看出,包装箱主要由前箱盖、前接管、箱体、后接管和后箱盖等 5 个部分组成,箱体中部设计有 2 个加强筋用于提高整体刚度和强度,包装箱内部装载产品后总体质量约为 140 kg。设计要求包装箱装载产品后从 0.25 m 高度水平跌落时,其内装产品许用最大加速度为 40g,即产品的脆值为 40g。

## 2 低密度聚乙烯缓冲结构总体设计

### 2.1 包装箱缓冲结构设计

包装箱的缓冲结构采用前、后两段缓冲垫结构形式,前、后缓冲垫总体结构相同,局部细微结构根据和包装箱的配合而有细微差别,但几乎不影响缓冲结构的总体缓冲性能。包装箱总体缓冲结构见图 2。



图 2 包装箱缓冲结构

Fig.2 Cushioning structure of packaging box

由图 2 可以看出,包装箱缓冲结构由前缓冲垫和后缓冲垫组成,前、后缓冲垫设计为上下开合形式,通过绳带将其锁紧固定在包装箱上。根据包装箱的结构特征,设计前、后缓冲垫的总长为 270 mm,总宽为 365 mm。根据包装箱要求的缓冲性能进行前、后缓冲垫的厚度设计。

### 2.2 缓冲性能理论计算

跌落冲击缓冲性能的理论计算目前主要还是采用绘制材料性能曲线和经验公式的方式,该方式依靠对材料进行大量试验,并对试验数据进行统计、分析和总结<sup>[7]</sup>。

选用发泡倍率为 20 倍,密度为 0.037 g/cm<sup>3</sup> 的低密度聚乙烯泡沫塑料。包装箱跌落高度为 0.25 m 时的低密度聚乙烯泡沫塑料缓冲材料最大加速度-静应力曲线见图 3。根据图 3 所示材料对应的最大加速度-静应力曲线进行缓冲性能理论计算,该理论计算不考

虑被缓冲产品和缓冲的具体结构,仅用投影面积进行计算,因此只做初始设计<sup>[8]</sup>。

包装箱的前、后缓冲垫缓冲总长为 270 mm,总宽为 365 mm,因此低密度聚乙烯泡沫塑料缓冲材料的受力投影面积为 1971 cm<sup>2</sup>。

包装箱缓冲结构所受的静应力为:

$$\sigma_{st} = \frac{W}{A} \times 10 = 7.1 \text{ kPa}$$

理论计算参见 GJBZ 85—1997《缓冲包装设计手册》中图 B64,图 B64 的横坐标为包装箱缓冲结构所受的静应力值,纵坐标为包装箱整体作为刚性受到的最大加速度值,图 3 中曲线 1,2,3,4,5,6 分别代表缓冲材料的厚度为 2.5,5,7.5,10,12.5,15 cm。以包装箱缓冲结构所受的静应力 7.1 kPa 为横坐标、最大加速度 40g 为纵坐标,可以看出曲线 1 不满足设计要求,曲线 2,3,4,5,6 满足设计要求,曲线 2 材料厚度 5 cm 对应的最大加速度曲线约为 30g,曲线 3 至 6 对应的最大加速度曲线均在 20g 左右,因此确定出满足缓冲性能要求的材料厚度应大于等于 50 mm。从图 B64 中还可以看出在静应力 7.1 kPa 附近,投影面积的大小对最大加速度的影响不大,因此影响缓冲效果的决定性因素是厚度。考虑一定的安全系数,设计初始厚度分别为 60,65,70,75 mm 这 4 种不同厚度的缓冲垫。

## 3 跌落仿真前处理

低密度聚乙烯材料具有双正切型非线性特性,其表现出的强非线性将导致理论分析困难,因此通过材料的最大加速度-静应力曲线进行的理论计算仅作为初始设计。对于包装系统的跌落冲击响应特性分析和缓冲材料结构设计需要采用有限元仿真分析方法进行优化设计<sup>[9]</sup>。

### 3.1 材料参数

包装箱箱体采用增强型玻璃纤维材料,密度为 1800 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 18 GPa,泊松比为 0.3。前箱盖、前接管、后箱盖、后接管均采用铝合金材料,材料密度为 2780 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 71 GPa,泊松比为 0.33。包装箱缓冲结构采用发泡倍率为 20 倍的低密度聚乙烯材料,其密度为 37 kg/m<sup>3</sup>,线性阶段的弹性模量为 1.05 MPa,泊松比为 0.18,同时利用 Ansys Workbench 中的 Crushable Foam 模型,将低密度聚乙烯材料的应力-应变正切型静态压缩特性引入材料模型中<sup>[10]</sup>。

### 3.2 建立模型

文中的设计对象为采用 LDPE 材料的缓冲结构,分析对象为包装箱的内装产品在 0.25 m 水平跌落时

受到的加速度冲击过载, 包装箱整体缓冲体系建模见图3。



图3 缓冲体系建模  
Fig.3 Cushioning system modeling

如图3所示, 将仿真跌落模型做如下简化: 将包装箱内装产品简化为圆筒状结构, 长度略小于箱体长度, 由于内装产品材料为钢, 因此可将内装产品设定为刚性; 在包装箱水平跌落过程中, 前、后箱盖对整体的缓冲性能影响不大, 因此建模时可将前、后箱盖去除, 仅保留箱体前、后端部的接管, 以确保包装箱端部的刚强度与实际相符<sup>[1]</sup>。

包装箱整体在距离地面 0.25 m 高度进行水平自由跌落, 为了缩短仿真运算的时间, 提高仿真效率, 可以不考虑包装箱跌落过程中的下落过程, 而将包装箱跌落高度换算成与地面接触瞬间的初速度, 即在建模时设置包装箱缓冲结构底面与地面的间隙为 0.01 mm, 包装箱与地面几乎接触, 同时赋予包装箱整体竖直向下的初速度。

### 3.3 设置接触

包装箱整体模型的接触面分为缓冲结构与包装箱箱体的安装配合面、缓冲结构底面与地面的接触

面、包装箱箱体与内装产品的安装配合面。首先选择 Pure Penalty 惩罚函数方法对接触面进行控制, 防止模型中面与面之间出现渗透, 接触面均采用主-从面接触。其中缓冲结构与包装箱箱体装配方式为捆绑装配, 因此其接触面设定为 bonded 形式, 缓冲结构底面与地面的接触面设定为 Frictionless 形式, 内装产品通过机械连接固定于包装箱内部, 因此其接触面设定为 bonded 形式<sup>[12-14]</sup>。

### 3.4 划分网格

在有限元分析过程中, 模型网格划分的精度直接影响到计算结果的精度, 模型中网格采用 Element Size 进行划分, 通过对单元 Size 的设定, 控制网格划分精度<sup>[15]</sup>。

## 4 跌落仿真分析

### 4.1 定义载荷和约束

包装箱跌落高度为 0.25 m, 换算成包装箱接触地面时瞬间的初速度为 2.22 m/s, 即赋予包装箱整体初速度为 2.22 m/s, 方向竖直向下。赋予缓冲系统重力加速度 ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ), 方向竖直向下, 将地面施加固定约束并设置为刚性, 设定仿真分析时间为 20 ms。

### 4.2 跌落冲击加速度情况

4种不同厚度的缓冲系统模型分别进行跌落仿真分析, 得到其跌落冲击加速度响应曲线见图4。

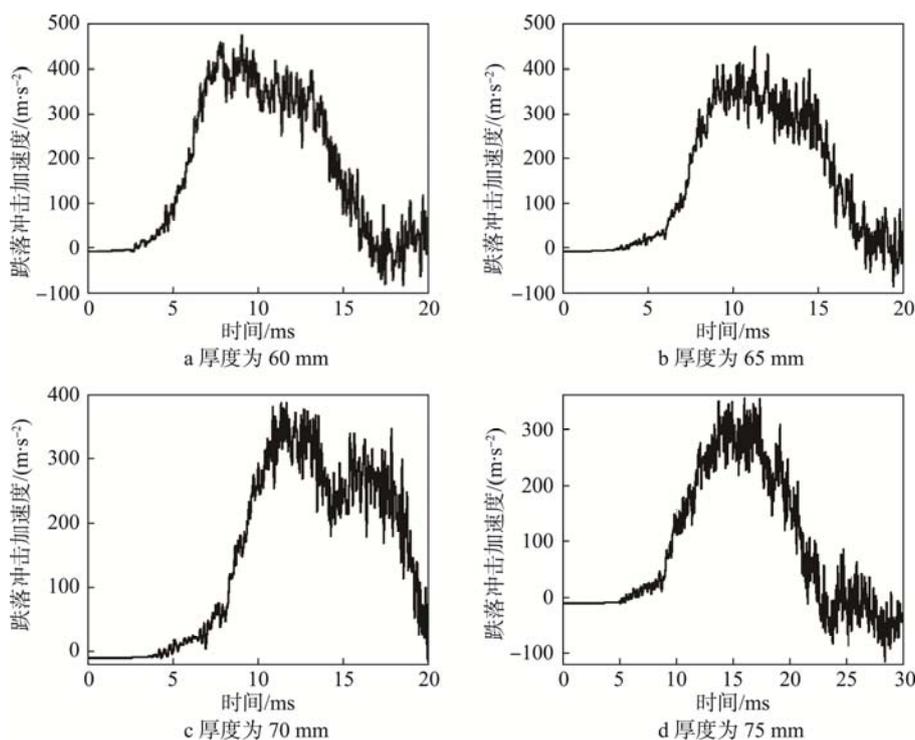


图4 跌落冲击加速度响应曲线  
Fig.4 Drop impact acceleration response curve

从图4a中可以看出,当缓冲垫设计厚度为60 mm时,产品受到的最大冲击加速度在40g到50g之间,不满足设计要求。从图4b中可以看出,当缓冲垫设计厚度增加至65 mm时,产品受到的最大冲击加速度在40g左右,基本满足设计要求。从图4c中可以看出,当缓冲垫设计厚度增加至70 mm时,产品受到的最大冲击加速度略小于40g,满足设计要求。从图4d中可以看出,当缓冲垫设计厚度增加至75 mm时,产品受到的最大冲击加速度略小于35g,满足设计要求。

## 5 结语

针对包装箱的结构特征,设计出缓冲系统的总体结构,再对低密度聚乙烯缓冲性能进行理论计算,确定出4种满足理论计算的缓冲垫厚度。最后利用有限元软件Ansys Workbench,对4种不同缓冲厚度的包装箱整体进行跌落仿真,得到产品跌落加速度响应曲线,通过分析可以得出,当缓冲垫设计厚度为75 mm时,能够对包装箱提供有效的缓冲防护,缓冲性能能够满足要求。

## 参考文献:

- [1] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
LIU Pei-sheng. Introduction to Cellular Materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [2] 卢富德, 陶伟明, 高德. 串联缓冲系统冲击响应与结构优化分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(10): 1773—1777.  
LU Fu-de, TAO Wei-ming, GAO De. Impact Response of Series Cushion System and Structure Optimization Analysis[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(10): 1773—1777.
- [3] MINDLIN R D. Dynamics of Package Cushioning[J]. Bell System Technical Journal, 1945, 24(3/4): 353—461.
- [4] MILLS N J, MASSO-MOREU Y. Finite Element Analysis(FEA) Applied to Polyethylene Foam Cushions in Package Drop Tests[J]. Packaging Technology and Science, 2005(18): 29—39.
- [5] HAMOUDA H, BEN H. Viscoplastic Behavior of a Medium Density Polyethylene: Constitutive Equations Based on Double Nonlinear Deformation Model[J]. International Journal of Plasticity, 2007, 23: 1307—1327.
- [6] NIKOLOV S. A Micro/Macro Constitutive Model for The Small-deformation Behavior of Polyethylene[J]. Polymer, 2000, 41: 1883—1891.
- [7] 田静敏, 黄秀玲. 包装件跌落冲击研究现状[J]. 包装工程, 2016, 37(11): 119—203.  
TIAN Jing-min, HUANG Xiu-ling. Status of Package Dropping Impact Research[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(11): 119—203.
- [8] BRANDEL B, LAKES R S. Negative Poisson's Ratio Polyethylene Foams[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(24): 5885—5893.
- [9] 陈安军. 非线性包装系统跌落冲击问题变分迭代法[J]. 振动与冲击, 2013, 32(18): 105—107.  
CHEN An-jun. Variation Iteration Method in Dropping Shock Problem on Cubic Non-linear Packaging System[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(18): 105—107.
- [10] 申展, 陈东, 罗俊杰. 聚乙烯泡沫缓冲系统跌落冲击过载仿真分析[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 128—131.  
SHEN Zhan, CHEN Dong, LUO Jun-jie. Simulation and Analysis of Dropping Impact Acceleration of Polyethylene Foam Buffer[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 128—131.
- [11] 王宇, 卢玲, 李文韬. 基于Ansys的有限元网格划分方法应用研究[J]. 起重运输机械, 2014(3): 53—56.  
WANG Yu, LU Ling, LI Wen-tao. Research on Finite Element Meshing Method Based on Ansys[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2014(3): 53—56.
- [12] 杨书仪, 刘德顺, 赵继云. 基于LS-DYNA的移动硬盘跌落冲击耐撞性能分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(9): 13—17.  
YANG Shu-yi, LIU De-shun, ZHAO Ji-yun. Drop Impact Crashworthiness Analysis for Mobile Hard Disk Based on LS-DYNA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(9): 13—17.
- [13] ESSER P, GRANDE J, REUSKEN A. An Extended Finite Element Method Application of Finite Element Method[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2010(11): 6—8.
- [14] HICKS B J, MULINEUX G, SIRKETT D. A Finite Element-based Approach for Whole-system Simulation of Packaging Systems for Their Improved Design and Operation[J]. Packaging Technology and Science, 2009, 22(4): 209—227.
- [15] 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 Washing Machine Based on FEM Analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 164—166.