

含线弹性易损件的 EPE 缓冲优化设计

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.4006

薛 飞¹ 王召霞²

1. 杭州泰鑫自动化有限公司

浙江 杭州 311200

2. 浙江大胜达包装股份

有限公司

浙江 杭州 311200

摘 要: 基于 EPE 缓冲材料跌落缓冲动态本构模型, 分析耦合线弹性缓冲包装系统对易损件的缓冲特性, 研究 EPE 缓冲衬垫的结构尺寸对含易损件的包装系统冲击特性影响。建立含易损件的非线性缓冲包装系统动力学模型, 利用最小二乘法确立了影响易损件加速度变化与 EPE 的厚度和面积之间的关系。依据易损件响应加速度小于易损度及缓冲材料用量最经济两个原则, 构建优化设计混合罚函数, 并获得最优解。结果表明, EPE 缓冲衬垫的厚度和面积对易损件的加速度影响巨大, 最优值出现在某一较小的衬垫面积和适当厚度的优化组合下, 且建立的 EPE 厚度和面积之间的关系, 相对误差在 0.37% 内。此设计方法可有效降低缓冲包装体积, 为验证 EPE 缓冲衬垫结构尺寸的合理性提供一种方法。

关键词: 易损件; 发泡聚乙烯; 缓冲包装; 跌落冲击

中图分类号: TB485.3; O322

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)04-0048-04

引文格式: 薛 飞, 王召霞. 含线弹性易损件的 EPE 缓冲优化设计 [J]. 包装学报, 2025, 17(4): 48-51.

电子产品在运输过程中, 易受道路颠簸产生的冲击振动等影响, 致使电子产品内部的一个或多个易损件发生损坏^[1-3]。缓冲包装则可以在产品受到外部冲击时, 迅速分散和吸收压力, 保护物品免受损坏。然而, 对缓冲包装进行设计与分析时, 通常将缓冲包装、易损件及产品进行独立考虑, 忽略电子产品的复杂构造。此方法虽提升计算效率, 但不能真实反映冲击振动对产品内部易损件的影响, 且分析结果与实际情况存在较大误差。故研究者们深入研究易损件的冲击振动强度^[4-7], 以确保电子产品在运输过程中的安全性。李志强等^[8]以某型号水槽式洗碗机为研究对象, 采用发泡聚苯乙烯 (expanded polystyrene, EPS) 为缓冲包装材料, 设计缓冲运输包装方案, 然后基于 LS-DYNA 对包装件进行有限元仿真分析, 确定洗碗

机的易损件及脆值。卢富德等^[9-11]基于发泡聚乙烯 (expanded polyethylene, EPE), 对筒支梁式易损件、梯形缓冲结构以及连续跌落载荷作用进行了系统的动力学分析, 建立具有易损件的产品包装动力学模型。

但在实际情况中, 易损件质量远小于主体部分的质量, 且易损件和主体大多是刚性连接。若物品受到外部冲击振动^[12], 物品产生的矩形加速度脉冲会直接作用到易损件上, 在多次冲击振动下包含易损件的产品难以保持完好。因此, 对缓冲材料与产品模型之间的动力学关系进行分析成为设计缓冲包装系统的关键^[13, 14]。本研究基于 EPE 本构关系, 建立含易损件缓冲系统的动力学方程, 分析耦合线弹性缓冲包装系统对易损件缓冲特性的影响, 以期 EPE 在工程

收稿日期: 2025-01-20

作者简介: 薛 飞, 男, 工程师, 主要研究方向为包装动力学、包装自动化装备, E-mail: 373105318@163.com

通信作者: 王召霞, 女, 高级工程师, 主要研究方向为包装结构、包装材料, E-mail: wzx@sdgroup.cn

设计应用提供理论指导。

1 建立含易损件的非线性缓冲系统模型

针对含线弹性易损件的 EPE 缓冲系统, 建立运输过程中发生跌落冲击时的易损件-产品-EPE 缓冲系统动力学模型, 如图 1 所示。图中: m 为包装件质量; m_1 为易损件质量; $\ddot{x}$ 为物品加速度; $\ddot{x}_1$ 为易损件加速度; k 为易损件刚度系数; k_1 为 EPE 刚度系数; c_1 为 EPE 平均阻尼系数; H 为跌落高度。

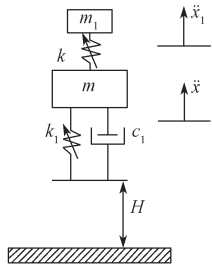


图 1 易损件-产品-EPE 缓冲系统动力学模型

Fig. 1 Buffer system dynamics model of critical component-product-EPE

根据牛顿定律, 其动力学方程为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k(x_1 - x) = 0, \\ m \ddot{x} + k_1(x - y) + c_1(\dot{x} - \dot{y}) - k(x_1 - x) = 0, \\ f(x - y) = k_1(x - y) + c_1(\dot{x} - \dot{y}). \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{x}$ 为物品的速度; $f(x-y)$ 为 EPE 弹性力。该动力学模型的初始条件为: $x(0)=0$, $x_1(0)=0$; $\dot{x}(0)=\dot{x}_1(0)=v_0=-\sqrt{2gH}$ 。

理论缓冲弹性材料发生形变时, 其应变和应变率均与缓冲包装厚度 h 相关。

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = x(t)/h, \\ \dot{\varepsilon}(t) = \dot{x}(t)/h. \end{cases} \quad (2)$$

EPE 非线性黏弹性跌落冲击模型^[13]为

$$\sigma = a_1 \varepsilon^2 \dot{\varepsilon} + a_2 \dot{\varepsilon} + a_3 \varepsilon + a_4 \tan(a_5 \varepsilon), \quad (3)$$

式中 $a_1 \sim a_5$ 为待识别参数。其中, $a_1=0.0028$ MPa/s, $a_2=395.36$ Pa/s, $a_3=0.038$ MPa, $a_4=0.0894$ MPa, $a_5=1.91$ MPa/s。

由应力-应变模型可计算出力学模型(即 EPE 缓冲材料的弹性力)为

$$f(x-y) = A \left\{ a_1 \frac{x^2 \dot{x}}{h^3} + a_2 \frac{\dot{x}}{h} + a_3 \frac{x}{h} + a_4 \tan\left(\frac{a_5 x}{h}\right) \right\}. \quad (4)$$

则式(1)可转化为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k(x_1 - x) = 0, \\ m \ddot{x} + A \left\{ a_1 \frac{x^2 \dot{x}}{h^3} + a_2 \frac{\dot{x}}{h} + a_3 \frac{x}{h} + a_4 \tan\left(\frac{a_5 x}{h}\right) \right\} - k(x_1 - x) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

在进行缓冲包装结构优化设计时, 需考虑以下问题: 1) 易损件最大加速度要小于易损度 G_m ; 2) 防止衬垫发生挠曲或变弯, 衬垫的面积 A 和厚度 h 之比需满足 $A \geq (1.33h)^2$; 3) 材料用量需最省, 避免过度包装。

在进行缓冲包装尺寸设计时, EPE 的面积 A 和厚度 h 为变量, 根据优化条件, 其优化目标函数为

$$\begin{cases} \min(f(x)) = A_h, \\ s.t.: \min(G) = \frac{G_m}{n_s}, \\ 0 < A \leq A_0, \\ h > 0. \end{cases} \quad (6)$$

式中: x 为设计变量, $x=[A, h]^T$; G 为易损件无量纲加速度; G_m 为易损件无量纲最大加速度; n_s 为安全系数; A_0 为包装产品的最大底面积。优化目标函数含有不等式约束条件, 需转化成无约束函数, 构造混合罚函数, 即

$$T(x, \mu_k) = F(x) + \mu_k \sum \left(\frac{1}{A} - \frac{1}{A - A_0} + \frac{1}{h} \right) + \frac{1}{\sqrt{\mu_k}} \left(\min(G) - \frac{G_m}{n_s} \right)^2. \quad (7)$$

2 结果与分析

考虑电子产品易损件的质量通常为数克, 本研究采用易损件质量 $m_1=0.001m$ 。用上述计算模型, 对含线弹性易损件的缓冲包装进行研究。提供案例为: 包装商品质量 $m=6$ kg; 易损件质量 $m_1=6$ g; $k=19\,739.2$ N/m; 跌落高度 $H=0.8$ m; 易损件无量纲最大加速度 $G_m=25g$; 安全系数 $n_s=1.01$ 。

采用式(5)计算运输过程中易损件的加速度, 结果如图 2 所示。由图 2 可知, 含易损件的包装产品在跌落冲击过程中, 易损件加速度响应曲线近似为完整的正弦波, 且在自身固有频率的作用下做小幅度衰减振动。初始时刻, 由于 EPE 缓冲衬垫的黏弹性特性, 产品加速度响应较大, 致使易损件前半部分曲线呈现不对称波动。随后, 易损件的加速度响应以固有频率做正弦波衰减振动。

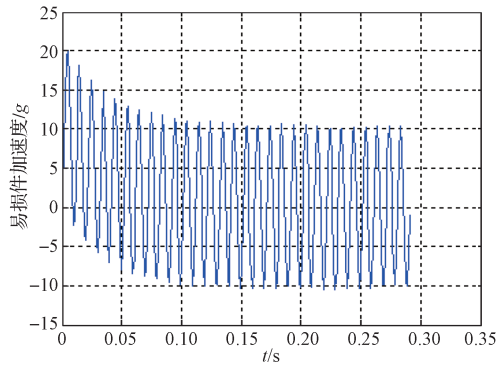


图2 易损件加速度响应曲线

Fig. 2 Acceleration response curve of a critical component

易损件的加速度对 EPE 缓冲衬垫的面积和厚度的响应曲线如图 3 所示。由图 3a 可知, 面积一定时, 随着厚度的增加, 易损件加速度响应先快速衰减, 达到一定值后衰减趋势变缓。由图 3b 可知, 厚度一定时, 随着面积的增加, 易损件加速度响应逐渐增大; 易损件的面积 - 加速度响应曲线随厚度增大由非线性变化逐渐呈现线性变化趋势, 且随着厚度的增加斜率逐渐降低。

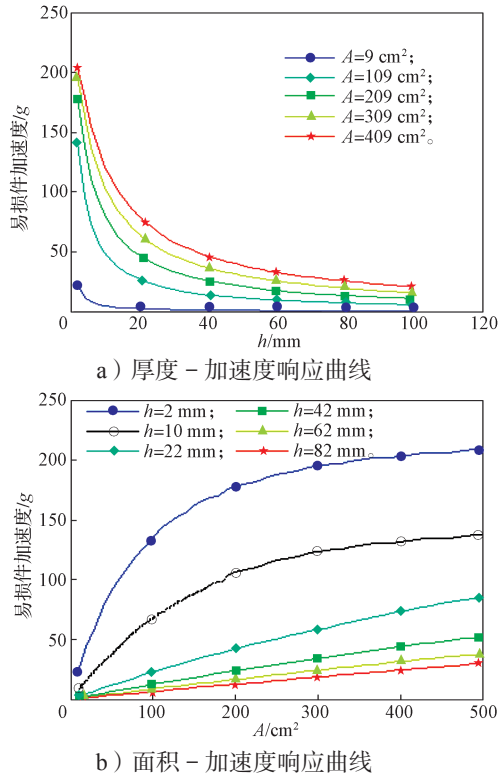


图3 易损件加速度与 EPE 缓冲衬垫的面积和厚度的响应曲线

Fig. 3 Acceleration response curve of a critical component with area and thickness of the EPE

以优化目标条件为前提, 设计中不能单一增加衬

垫厚度或改变面积来降低易损件的加速度响应。当 EPE 缓冲衬垫的面积 A 和厚度 h 符合特定关系时, 易损件的最大加速度响应处于较小的范围内。本研究选用 b_0 作为初始厚度修正项, $b_1 A$ 作为厚度线性项, $b_2 A^2 + b_3 A^3 + b_4 A^4$ 作为厚度非线性项, 则 h - A 关系为

$$h = b_0 + b_1 A + b_2 A^2 + b_3 A^3 + b_4 A^4, \quad (8)$$

式中, $b_0 \sim b_4$ 为待识别参数。应用最小二乘法求解参数, 得: $b_0 = 0.036\ 68$; $b_1 = -1.8889$; $b_2 = 225.19$; $b_3 = -3885$; $b_4 = 14\ 020$ 。

运用混合罚函数, 取初始点 $x = [0.005, 0.015]^T$, 罚因子 $\mu_0 = 2$, 缩小系数 $c = 0.5$, 精度 $\delta = 1.0 \times 10^{-5}$, 所得到的优化解 $V = (0.0329, 0.096, 20.0089)$ 。运用式 (8) 求解 h - A 关系为 $(0.0329, 0.096\ 359)$, 相对误差为 0.37%。

图 4 为 EPE 衬垫的 A 和 h 共同作用对易损件加速度的影响。由图可知, 最优值出现在某一较小衬垫面积和适当厚度的优化组合下。这是由于易损件的线弹性和 EPE 的黏弹性两种效应叠加的效果。

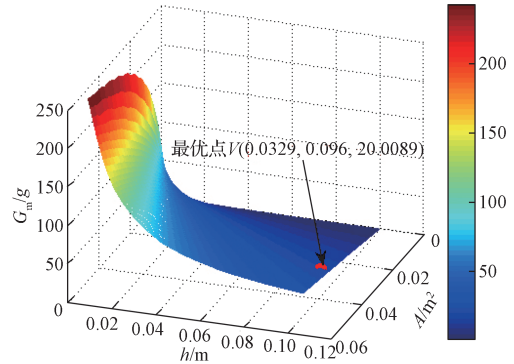


图4 易损件无量纲最大加速度响应图

Fig. 4 Dimensionless maximum acceleration response graph of a critical component

3 结论

本研究基于 EPE 缓冲材料本构模型, 建立了含线弹性易损件产品在 EPE 缓冲包装中的冲击动力学方程, 分析了 EPE 缓冲材料的结构尺寸对易损件的影响, 建立了 EPE 优化设计厚度和面积之间的关系, 并利用最小二乘法估计参数, 运用建立的混合罚函数求得最优值。结果表明, 小幅度改变缓冲衬垫的结构尺寸对易损件加速度产生较大影响; 较小的衬垫面积及适当厚度的优化组合为 $(0.0329, 0.096\ 359)$, 相对误差为 0.37%。综合考虑缓冲包装设计经济性和安全性, 应选择合适的衬垫面积及厚度。本研究为 EPE 缓冲包装设计提供有效的方法。

参考文献:

- [1] DROZDOV A D, CHRISTIANSEN J D. Modeling the Elastic Response of Polymer Foams at Finite Deformations[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 171: 105398.
- [2] LU F D, HUA G J, WANG L S, et al. A Phenomenological Constitutive Modelling of Polyethylene Foam Under Multiple Impact Conditions[J]. Packaging Technology and Science, 2019, 32(7): 367-379.
- [3] JOODAKY A, BATT G S, GIBERT J M. Prediction of Cushion Curves of Polymer Foams Using a Nonlinear Distributed Parameter Model[J]. Packaging Technology and Science, 2020, 33(1): 3-14.
- [4] 张 炜, 薛 飞, 卢富德, 等. 考虑易损件物品 -EPE 缓冲系统冲击响应分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 116-119.
- [5] 周园园, 陈安军. 矩形脉冲激励下悬挂减振系统易损件冲击特性[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(5): 71-74, 118.
- [6] 霍银磊, 姬喜龙. 含悬臂梁式易损件及弹性约束的产品跌落冲击分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(21): 283-289.
- [7] 贺 志, 向 红, 范小平. 家电产品运输包装发展动态与趋势[J]. 包装学报, 2025, 17(1): 23-30.
- [8] 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.
- [9] 卢富德, 雷树锋, 肖宁建, 等. 简支梁式关键部件在蜂窝纸板缓冲作用下的冲击响应研究[J]. 包装学报, 2018, 10(1): 20-26.
- [10] 卢富德, 滑广军, 王丽姝, 等. 梯形聚乙烯泡沫结构动态压缩响应有限元分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(14): 234-238.
- [11] 伍 瑾, 卢富德, 王 彪, 等. 易损件在连续跌落冲击载荷作用下的动力学响应[J]. 振动与冲击, 2023, 42(20): 275-279.
- [12] 王明淇, 卢富德. 多层 A 楞瓦楞纸板面内冲击响应特性研究[J]. 包装学报, 2025, 17(1): 80-87.
- [13] 魏 娜, 周云令, 陈志强, 等. 准静态压缩下“EPE/瓦楞纸板”缓冲系统能量吸收的研究[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2024(5): 123-133.
- [14] 何争辉, 付志强, 黄利强, 等. 不同温度下 EPE 振动特性有限元分析[J]. 塑料, 2023, 52(4): 111-115, 159.

(责任编辑: 李玉华)

Optimization Design of EPE Buffer with Linear Elastic Critical Components

XUE Fei¹, WANG Zhaoxia²

(1. Hangzhou Taixin Automation Co., Ltd., Hangzhou 311200, China;
2. Zhejiang Great Shengda Packaging Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract: The buffering characteristics of the coupled linear elastic cushioning packaging system for vulnerable parts are analyzed, and the influence of structural dimensions of EPE cushioning materials on the impact characteristics of packaging system considering vulnerable parts is studied based on the dynamic constitutive model of EPE cushioning material drop buffering. The method is to establish a nonlinear product packaging system dynamic model containing critical components, and use the least squares method to establish the relationship between the thickness and area of the EPE and the acceleration variation of the vulnerable parts. Based on the two principles that the response acceleration of vulnerable parts is less than the vulnerability degree and the amount of buffer material is the most economical, an optimized design mixed penalty function is constructed and the optimal solution is obtained. The results show that the thickness and area of the EPE buffer material have a significant impact on the acceleration of the vulnerable parts. The optimal value occurs under an optimized combination of a certain smaller liner area and an appropriate thickness, and the relative error of the relationship between the established EPE thickness and area is within 0.37%. This design method can effectively reduce the volume of buffer packaging and provide a way to verify the rationality of the structural dimensions of EPE buffer materials.

Keywords: critical components; foam polyethylene; cushioning packaging; drop impact