

现场发泡包装结构设计系统的开发与应用

杨婕^{1,2}, 季忠², 赵晓栋¹

(1. 浙江海洋学院, 舟山 316000; 2. 山东大学, 济南 250061)

摘要: 根据缓冲包装动力学理论, 开发了一套现场发泡包装结构优化设计系统, 以适应各种产品的缓冲包装设计。以卫生洁具为例, 使用该优化系统设计了该产品的缓冲包装结构, 并采用实体跌落实验证实了此种包装结构设计的良好缓冲效果。

关键词: 现场发泡材料; 局部缓冲包装; 优化设计; 卫生洁具

中图分类号: TB482. 2; TP391. 72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)01-0080-04

Development and Application of Structural Design System of Foam-in-place Packaging

YANG Jie^{1,2}, JI Zhong², ZHAO Xiao-dong¹

(1. Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China; 2. Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: According to kinetics theory of cushioning packaging, an optimal design system of foam-in-place packaging was developed and applied in cushioning packaging design for various products. Taking sanitary ware as an example, foam cushioning structure was designed by this system and the cushioning effect of the packaging was validated by drop test.

Key words: foam-in-place material; partial cushion packaging; optimal design; sanitary ware

缓冲包装设计的主要目的有两个: 一是设计产品的缓冲包装结构, 提高产品在运输过程中的安全性; 另一个是在保证产品无损伤的条件下, 使包装的成本降到最低^[1]。这就要求在进行缓冲包装设计时, 在缓冲包装能够满足缓冲要求的前提下尽量降低成本。缓冲包装能否满足缓冲要求是依靠各种约束校核来检验的, 而使材料成本最小可以通过在密度一定的条件下, 使缓冲衬垫的体积达到最小来实现。

本研究选择缓冲性能优良的新型环保材料——现场发泡材料^[2]作为缓冲包装, 并采用节省材料、具有良好包装效果的局部缓冲包装形式。以缓冲包装的体积为目标函数, 以需要改良的尺寸(衬垫面积、厚度)作为设计变量, 以特定环境下的缓冲衬垫所受的最大静应力等作为状态变量进行结构设计, 再对所得设计结果数据进行强度校核、局部缓冲角跌落校核、触底校核等多种校核。如果通过校核分析, 则优化设

计成功, 若不通过, 则需改变适当的参数, 重新进行优化设计。

1 缓冲包装结构优化设计流程

1.1 确定设计变量

将缓冲衬垫的结构尺寸中相对重要的材料的厚度(t)和面积(A)作为设计变量。现场发泡材料属于非线性弹性材料, 力学性质不规则, 属于不规则弹性体。但就整个跌落冲击过程而言, 产品与缓冲材料之间可以认为是组成了一个单自由度线性系统^[3]。产品在自由下落过程中, 触地冲击之前只受重力作用。当产品自由跌落到地面受到冲击的某一时刻, 产品触地已经停止, 由于惯性, 产品继续向下, 压缩缓冲衬垫, 使之变形, 缓冲衬垫此时对产品有反作用, 使产品向下运动的速度逐渐减小至零^[4]。这时全部势能转化为变形能, 缓冲衬垫变形量达到最大 d_m , 可推导出

收稿日期: 2010-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775131); 浙江海洋学院校级科研项目(X10M08)

作者简介: 杨婕(1982—), 女, 河北人, 硕士, 浙江海洋学院助教, 主要从事包装材料有限元模拟研究。

通讯作者: 季忠(1966—), 男, 博士后, 山东大学教授、博士生导师, 主要研究方向为塑性成形及多尺度数值模拟。

$d_m = \frac{2h}{G_m}$, 其中 h 为跌落冲击高度, G_m 为最大加速度。

则缓冲衬垫厚度 $t > d_m$ 。

静应力是衡量施加于缓冲材料上的压力值, 公式为: $\sigma_{st} = \frac{W}{A}$, 其中 W 为产品重量^[5]。在现场发泡材料的静应力-最大加速度曲线中, 可以根据产品脆值和衬垫厚度找到合适的静应力值。则衬垫面积可由下式求出: $A = \frac{W}{\sigma_{st}}$ 。

1.2 确定目标函数

以产品的总成本最低为最优目标(生产运输成本和包装费用), 表达式为 $H_T(X) = H_1(X) + H_2(X) = C_1 N + (A \cdot t \cdot C_2) N$, 其中 $H_1(X)$ 为产品生产运输费用, $H_2(X)$ 为包装费用, C_1 为单个产品的生产及运输成本, C_2 为包装材料的单价, N 为产品数量。

对于同一种产品来说, 产品生产运输成本 $H_1(X)$ 是一定的, 为了达到最优目标需使 $H_2(X)$ 最小, 在确定使用某种包装材料的前提下, 优化的目标就是使缓冲包装衬垫的体积最小^[6], 即 $\min\{V(A, t)\} = A \cdot t$ 。

1.3 约束条件

1.3.1 强度校核

脆值 G 是跌落冲击时的临界加速度, 是产品所能承受的极限加速度与重力加速度 g 的比值, 是无量纲的纯数。通常将产品在跌落过程中产生的最大加速度 a 与重力加速度 g 的比值, 用 G_m 表示, 即 $G_m = a/g$, G_m 也称作产品最大加速度^[7]。只要产品跌落时最大加速度不超过产品脆值, 就不会破损。所以, 缓冲包装设计涉及的强度指标是最大加速度 G_m , 则包装件跌落冲击的强度条件为 $G_m < [G]$ 。

1.3.2 挠度校核

当设计的缓冲衬垫面积太小, 厚度太大时, 衬垫容易挠曲或变弯, 大大降低衬垫的负重能力。为了避免挠曲, 其中最小承载面积 A_{min} 与厚度 t 之比应符合克斯特那经验公式^[8]: $\frac{A_{min}}{(1.33t)^2} > 1$ 。采用全面缓冲结构时无需进行此项校核, 采用局部缓冲结构时, 缓冲衬垫要分为几块, A_{min} 是各分块中最小分块的面积。

1.3.3 角跌落校核

GB 8166 规定, 缓冲包装设计要按角跌落条件校核包装件的强度^[7], 即: $\frac{3lbh}{\sqrt{l^2 + b^2 + h^2}} > A$, 其中 l, b, h

分别为内装产品的长、宽、高。

1.3.4 触底校核

当包装箱内的产品有突出物时, 如果缓冲衬垫在产品跌落冲击下的最大变形超过突出物与箱底之间的间隙, 突出物就会与箱底碰撞, 可能导致产品破损, 因此需要对包装件进行触底校核^[7]。产品不致触底的条件为: $\frac{\epsilon_m t}{t-R} < 1$ 。其中 R 表示产品中突出物的突出尺寸, ϵ_m 为衬垫最大应变。

1.4 缓冲包装结构优化设计流程图和程序系统

根据上述优化流程制定现场发泡包装设计的优化流程, 见图 1, 并使用 Delphi 程序设计软件编辑缓冲衬垫面积优化设计程序系统, 见图 2。

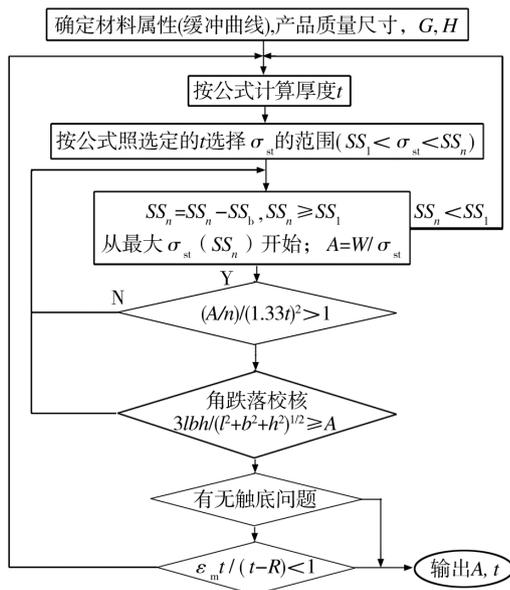


图 1 现场发泡包装优化设计流程

Fig. 1 Flow chart of optimal design for foam-in-place packaging



图 2 缓冲包装优化设计程序

Fig. 2 Optimal design program for cushioning packaging

在此程序系统中直接输入产品脆值、重量、标准

跌落高度、泡沫衬垫厚度、静应力及校核条件中涉及的参数,即可计算缓冲衬垫的最优面积,并可将设计结果保存为文本格式。

3 卫生洁具的现场发泡包装结构设计

3.1 卫生洁具产品信息

卫生洁具的顶部与底部的尺寸结构见图 3。产

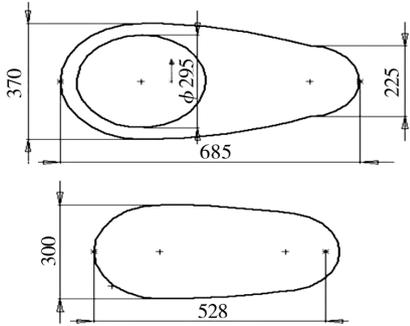


图 3 卫生洁具顶部与底部的结构尺寸(mm)

Fig. 3 The structural dimension of sanitary ware top and bottom

品质量为 18.6 kg,脆值 G 约为 60,则根据跌落高度标准确定产品跌落高度为 61 cm。纸箱尺寸为:长 74 cm、宽 45 cm、高 45 cm。

3.2 卫生洁具缓冲包装设计

产品跌落着地后,缓冲衬垫变形的最大变形量

$$d_m = \frac{2h}{G} = 2.03 \text{ cm}。$$

缓冲衬垫厚度 $t > d_m$,并由于纸箱尺寸限制选择初始厚度为 2.5 cm。

静应力-最大加速度曲线见图 4,其中厚度为 2.5

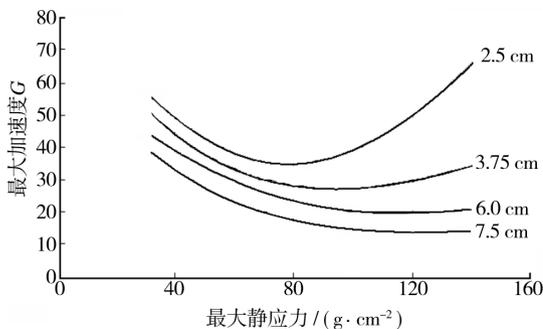


图 4 不同厚度的现场发泡材料的静应力-最大加速度曲线

Fig. 4 σ_{st} - G_m curve of foam-in-place material with different thickness

cm 的曲线可知,脆值为 60 的衬垫静应力范围为 35~135 g/cm^2 。

为了达到减少材料消耗的目的,可采用棱垫式局部缓冲包装结构^[7]。将上述参数输入缓冲衬垫面积优化设计程序系统中,可得缓冲衬垫最优面积为 226 cm^2 ,则棱垫式缓冲衬垫各部分面积为 113 cm^2 。进而设计出缓冲衬垫尺寸结构,见图 5 和 6。

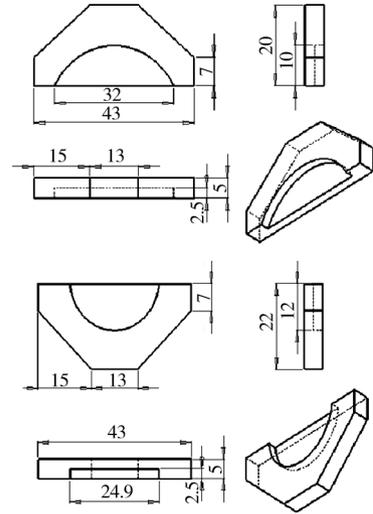


图 5 卫生洁具底部缓冲包装结构尺寸(cm)

Fig. 5 The structural dimension of cushioning packaging of sanitary ware bottom

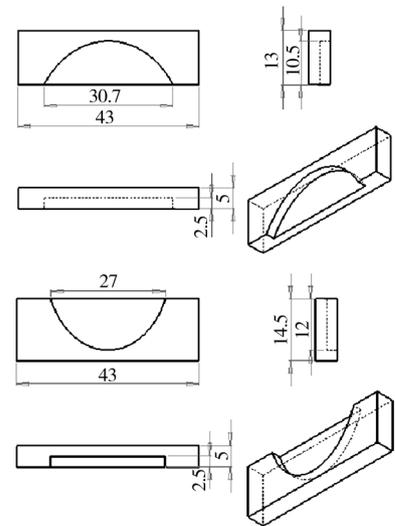


图 6 卫生洁具顶部缓冲衬垫结构尺寸(cm)

Fig. 6 The structural dimension of cushioning packaging of sanitary ware top

4 卫生洁具包装件跌落测试实验

利用 DT-315 垂直跌落试验机、加速度传感器及数据采集分析系统,测试了现场发泡材料包装的卫

生洁具在不同跌落方向下的冲击情况,见图7。包装



图7 现场发泡材料包装后的卫生洁具

Fig.7 Sanitary ware packaged with foam-in-place material

件以左面、后面、底面、边以及角跌落方式下所达到的最大加速度 G_m 随时间的变化情况见图8,每幅图中3条曲线分别表示 X, Y, Z 3个坐标轴方向的最大加速度值 G_m 。

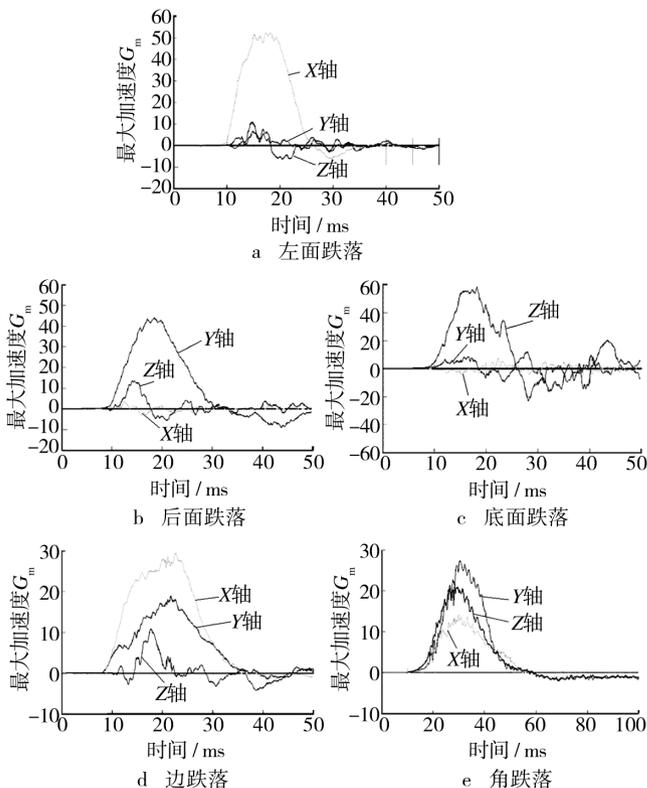


图8 包装件不同跌落方式下的加速度-时间曲线

Fig.8 $a-t$ curve of the packaged sanitary ware during side drop

图8a为左面跌落时的最大加速度 G_m 曲线。左面跌落必定会在 X 轴方向产生一个较大的最大加速度 G_m 值,在 Y 轴与 Z 轴方向 G_m 值较小。图中曲线所示 G_m 值在 52 左右,低于产品脆值 60;同样,在图8b与c中曲线所示 G_m 值均略低于产品脆值 60。

图8d为某边跌落方式时的最大加速度 G_m 曲线,图中2条曲线的 G_m 值大于第3条曲线的 G_m 值,是因为跌落过程中 X 轴与 Y 轴方向会受到较大分向冲击,而在 Z 轴方向的影响最小。图中曲线最大加速度 G_m 值约为 30,远低于产品的脆值。

图8e是角跌落时的最大加速度 G_m 曲线,由于是角跌落,冲击会平均分配到 X, Y, Z 3个方向,所以在3个方向 G_m 值均较小,最大值约为 27,低于该产品脆值。

5 结论

使用优化设计程序系统设计缓冲包装结构,可反复修改模型参数、优化缓冲包装结构及尺寸,避免不必要的破坏性试验,减少设计费用。将此系统用于采用现场发泡材料的卫生洁具缓冲包装结构设计中,并通过实体实验测试,证实了此设计程序的准确性和合理性以及现场发泡材料良好的缓冲性能,以期将其推广应用于各种产品的缓冲包装设计中。

参考文献:

- [1] 陈满儒,张波涛.基于ANSYS的产品缓冲包装的分析与设计[J].包装工程,2006,27(6):206-208.
- [2] 陈满儒.美国新型保护性包装技术简介[J].包装工程,2003,24(6):122-124.
- [3] 陈莘莘,吴若梅,向红.基于遗传算法的非线性包装系统优化设计[J].包装工程,2004,25(2):84.
- [4] 王章莘.纸浆模制品缓冲性能与结构设计的研究[D].武汉:湖北工业大学,2006.
- [5] 汤伯森,向红.包装动力学[M].长沙:湖南大学出版社,2001.
- [6] 彭彦平.产品结构及其包装的优化设计方法[J].包装工程,2003,24(5):4-5.
- [7] 苏远,汤伯森.缓冲包装理论基础与应用[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [8] 王宝霞.缓冲包装CAD系统的开发[D].西安:陕西科技大学,2006.