

# 古瓷瓶文物的运输包装设计

张璐, 丁毅

(陕西科技大学, 西安 710021)

**摘要:** 以一宣德窑古瓷瓶为例, 进行文物运输包装设计, 并利用 ANSYS 有限元分析软件对 EPE 缓冲衬垫进行了仿真测试, 从物理性方面验证包装的可行性, 从而为文物的运输提供一种新的包装方案。

**关键词:** 文物; 缓冲包装; ANSYS; 静压; 跌落测试; 优化设计

**中图分类号:** TB482; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)07-0025-04

## Transport Packaging Design for Ancient Porcelain Vase

ZHANG Lu, DING Yi

(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Antique transport packaging design was carried out with an instance of ancient porcelain vase made by Xuande Kiln. Simulation test was carried out on EPE cushioning using ANSYS/LS-DYNA software. The feasibility of the packaging was verified physically. The purpose was to provide a new transport packaging scheme for antique.

**Key words:** antique; cushioning packaging; ANSYS; static compression; drop test; optimal design

随着文博事业的发展, 文物在馆际之间的展览交流与出国展览活动与日俱增, 为了保证馆藏文物在转移运输中安全无恙, 文物的运输包装就成为了一个非常重要的研究内容。文物的运输包装着重于物理防护和化学防腐两方面, 本次设计针对防震缓冲, 在现有文物缓冲包装的基础上取长补短, 采用 ANSYS 对其进行仿真分析, 以得到更优的包装效果。

### 1 产品分析

宣德窑古瓷瓶, 见图 1, 基本参数: 总质量为 7.3

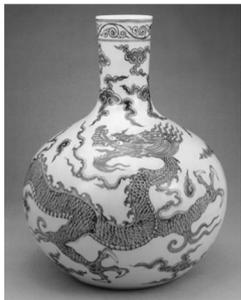


图 1 宣德窑古瓷瓶

Fig. 1 An ancient porcelain vase of Xuande Kiln

kg; 总高为 420 mm; 口径为 95 mm; 底径为 165 mm。古瓷瓶因年代久远且属于陶瓷制品, 极易破碎, 所以包装在储运过程中起到了非常重要的作用。

### 2 流通环境分析

产品在流通过程中要经过装卸搬运、运输和储存环节, 其包装件要根据流通环境要求来设计<sup>[1]</sup>。通常文物在运输过程中会遇到跌落、振动、冲击、湿度、温度、静压力、静电、大气压力等等<sup>[2]</sup>。

考虑古瓷瓶特有的易碎性和珍贵性, 搬运过程中不会使用叉车堆垛, 因此与相邻货物发生碰撞的可能性很小。着重考虑运输时受到路面颠簸、发动机震动等产生的振动冲击对包装件的影响。由文献[1]中汽车运输的振动频率谱线可知, 汽车运输随机振动功率谱密度在 2 Hz 左右和 10 Hz 左右各有一个较大峰值, 所以公路运输的包装件其固有频率应避免这 2 个频率值。

包装件质量超过 60 kg 时, 通常需要较强的劳动力才能搬运。该产品质量为 7.3 kg, 而且文物属于贵重物品, 因此采用人工装卸搬运。

### 3 缓冲衬垫的初步设计及校核

#### 3.1 缓冲材料的选定

由于文物属于贵重物品,根据各种缓冲材料的性能(见表1)和流通环境的要求,最终选用缓冲性能较好的EPE做缓冲材料,设计缓冲衬垫<sup>[3]</sup>。EPE即发泡聚乙烯,主要特点如下:①柔软性和韧性介于EPS和开孔结构的PU,拉伸强度高,不会像EPS那样易掉渣;②缓冲性能好,能耐多次冲击,动态变形小,且承载范围宽,吸收能量大,其防振缓冲性能明显地优越于聚苯乙烯泡沫塑料;③抗静电性能好,体积电阻率为 $6 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{mm}$ ;④吸水性小,聚乙烯泡沫塑料质量轻,且具有良好的耐低温性能和抗化学腐蚀性能。

表1 几种缓冲材料性能比较

Tab.1 Performance comparison of several cushioning materials

性能	塑料			
	聚乙烯	软聚氨酯	蜂窝纸板	聚苯乙烯
相对密度	0.03~0.04	0.02~0.06	0.03~0.05	0.016~0.03
机械强度	强	弱	很强	弱
吸水性	极小	较大	大	较小
最高使用温度/℃	85	120	150	80
耐药品性	极好	好	好	差
柔软性	较硬	软	较硬	硬
耐气候性	好	差	差	差
耐冲击特性	好	不好	很好	不好
环保性	否	否	好	否

#### 3.2 缓冲衬垫尺寸设计

通过对包装件在流通环境中实测的大量现场数据的数理统计分析,估算产品脆值:

$$G_c = \alpha m^{-\beta} \quad (1)$$

其中: $G_c$ 为包装件经受到的最大加速度( $g$ ); $m$ 为包装件的质量( $\text{kg}$ ); $\alpha, \beta$ 为经验参数。其中 $\alpha, \beta$ 有3种数据:强烈冲击现象 $\alpha=801, \beta=0.704$ ,中等冲击现象 $\alpha=203, \beta=0.306$ ,较弱冲击现象 $\alpha=53.2, \beta=0.100$ ,此处选用中等冲击现象。文物质量 $m=7.3 \text{ kg}$ ,则 $G_c=110.5 \text{ g}$ ,由于古瓷瓶年代久远,取安全系数 $n=1.9$ 。计算许用脆值:

$$[G] = G_c/n \quad (2)$$

得文物的许用脆值 $[G]=58 \text{ g}$ 。跌落高度 $H=90 \text{ cm}$ ,瓶底受力面积 $A=\pi R^2=21\,371.6 \text{ mm}^2$ ,则衬垫的最大应力为:

$$\sigma_m = G_m/A = 0.198 \text{ MPa} \quad (3)$$

选择缓冲材料:发泡聚乙烯(EPE),其 $C-\sigma_m$ 曲线见图2,可查得缓冲系数 $C=2.5$ ,则衬垫厚度为:

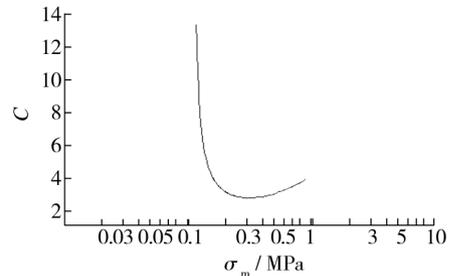


图2 EPE缓冲材料的 $C-\sigma_m$ 曲线

Fig. 2 The  $C-\sigma_m$  curve of EPE cushioning material

$$h = CH/G = 3.7 \text{ cm} \quad (4)$$

#### 3.3 缓冲衬垫校核

##### 3.3.1 挠度校核

衬垫尺寸的面积与厚度之比超过一定厚度时,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 $T$ 之比应符合以下规定:

$$A_{\min}/(1.33T)^2 > 1$$

式中: $T$ 为厚度( $\text{cm}$ ); $A$ 为面积( $\text{cm}^2$ );代入数值有 $213.7/(1.33 \times 3.7)^2 = 8.8 > 1$ ,符合克斯特那经验公式,通过挠度校核。

##### 3.3.2 跌落姿态校核

包装件在角跌落冲击时,一个角触地,那么冲击力就通过外包装容器的角分散给组成此角3个面的缓冲衬垫上,其反作用力又通过缓冲衬垫的3个面再传递给产品。在角冲击时,由于包装件有3个面参与缓冲,由于传递到每一个缓冲衬垫上的冲击力很难确定,因此就需要找到一个角冲击时等效于面冲击跌落时的等效面积,然后进行校核设计<sup>[4]</sup>。衬垫示意图3,图中阴影部分为跌落时投影面积。

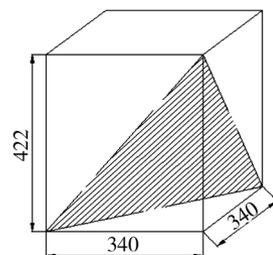


图3 衬垫角跌落示意( $\text{mm}$ )

Fig. 3 Schematic diagram of angle drop of cushion pad

包装件跌落时,衬垫 3 个面投影面积之和为:

$$A_e = 1168 \text{ cm}^2$$

角跌落静应力为:

$$(\sigma_{st})_e = mg/A_e = 7.3 \times 9.8 / 1168 = 0.062 \times 10^5 \text{ Pa}$$

(5)

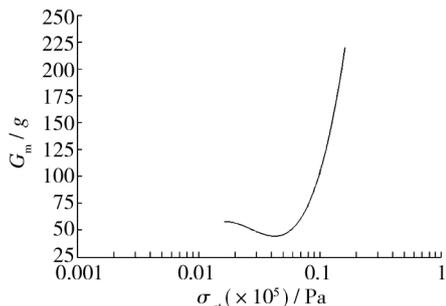


图 4 材料的  $G_m$ - $\sigma_{st}$  曲线

Fig. 4  $G_m$ - $\sigma_{st}$  curve of the material

由图 4 知,  $G_m < 58 \text{ g}$ , 小于产品脆值, 所以安全。

### 3.3.3 恢复性校核

缓冲材料在长时间的静压力作用下, 其塑性变形量会随时间的增加而增加, 这种蠕变使衬垫厚度变小, 缓冲能力下降, 所以设计衬垫尺寸应加一个蠕变补偿值, 即蠕变增量  $C_r$ 。

$$T_c = T(1 + C_r) \quad (6)$$

式中:  $T_c$  为修正后的厚度 (cm);  $T$  为原设计厚度 (cm);  $C_r$  为蠕变系数 (%) (取 10%)。则  $T_c = T(1 + C_r) = 3.7 \times (1 + 10\%) = 4.1 \text{ cm}$ 。

通过对缓冲衬垫进行产品挠度、跌落姿态、恢复性校核, 表明缓冲衬垫满足要求。经校核, 缓冲衬垫厚度  $h = 4.1 \text{ cm}$ , 其结构尺寸见图 5。

## 4 缓冲衬垫的跌落仿真模拟

应用 ANSYS/LS-DYNA 对包装件进行动态跌落仿真, 分析包装件的韧性、冲击强度, 再根据仿真结果分析影响包装件安全的主要因素, 验证包装设计的合理性, 从而避免大量实验, 显著提高产品研发速度<sup>[5]</sup>。由于文物的十分珍贵, 显然无法使用传统的实物性跌落试验, 因此, 计算机仿真跌落具有明显优势。

跌落仿真实验需要建立瓶子和衬垫包装件的模型, 对跌落过程中衬垫的响应情况进行分析, 所以将瓶子的实体模型及有限元模型都进行了简化, 将其看成一个形状规则的质量块。有限元模型采用了实体

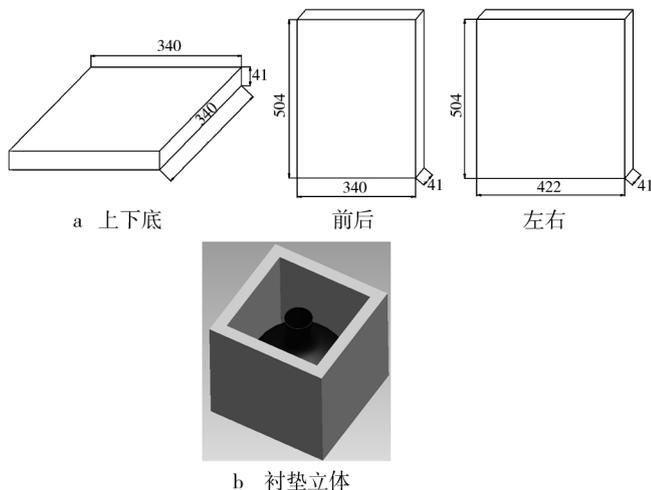


图 5 缓冲衬垫结构尺寸 (mm)

Fig. 5 Structural dimension of the cushion pad

单元, 3D Solid 164 模型。模型中个部分的材料属性见表 2, 然后设置跌落高度和系统阻尼进行仿真实验<sup>[6]</sup>。

表 2 有限元模型材料参数

Tab. 2 Material parameters of finite element model

材料名称	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松比	材料种类
青花瓷瓶	$2.3 \times 10^{-6}$	76 500	0.27	塑性随动强化
EPE 缓冲衬垫	$2.2 \times 10^{-8}$	0.0314	0.30	低密度泡沫

在 ANSYS/LS-DYNA 中, 可以利用 ANSYS 的后处理器 POST1 和 POST26 以及 LSTC 的后处理 LS-PREPOST 对计算的结果进行可视化处理。采用 LS-PREPOST 进行结果后处理, 它可以观察整个结构在一段时间内的分析结果。模拟跌落过程中的等效应力分布和加速度曲线见图 6 和 7。

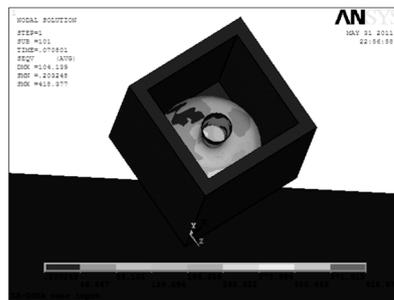


图 6 等效应力分布

Fig. 6 Cloud chart of equivalent stress distribution

按照通常跌落测试传感器的位置及瓶子易损区域, 选择了瓶子前偏下方的节点 2284, 并绘制其加速度响应曲线, 见图 7, 其值约为  $20 \text{ g}$ 。相比之前估计的

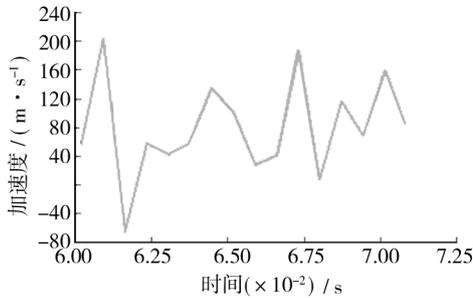


图7 加速度响应曲线

Fig. 7 The response curve of acceleration

脆值(产品的脆值为  $58\text{ g}$ , 模拟实验得到的瓶子的最大加速度值基本满足要求。

对 EPE 缓冲衬垫的力学性能进行研究, 并对影响模拟结果的因素进行分析, 对模拟过程及参数设置进行了改进, 然后在结构单元模拟的基础上进行了动态模拟跌落的实验。通过合理的计算和客观的实验, 在 ANSYS/LS-DYNA 中对缓冲衬垫进行模拟实验, 节约了大量成本, 为下一步的包装提供了理论依据。

## 5 外包装箱设计

通过 ANSYS/LS-DYNA 对 EPE 缓冲衬垫进行了仿真跌落试验, 最终得出加速度为  $20\text{ g}$ , 起到了缓冲效果, 达到了包装保护效果, 但由于产品价格较贵, 特此再设计蜂窝纸板外包装箱, 一方面为了能更好的保护产品, 再次, 方便运输装卸。根据国家标准和相关资料, 最终选用芯纸定量为  $120 \sim 180\text{ g/m}^2$ , 面纸定量为  $200 \sim 500\text{ g/m}^2$  厚度为  $10\text{ mm}$ , 边长为  $8\text{ mm}$ , 幅面宽度为  $800\text{ mm}$ , 长度为  $800\text{ mm}$  的蜂窝纸板来包装<sup>[7]</sup>, 其具体尺寸根据相关尺寸数据来确定, 而边缘则用护角连接。整体装配图见图 8。

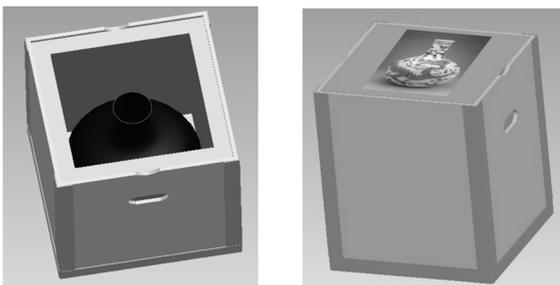


图8 整体装配图

Fig. 8 General assembly drawings

## 6 小结

传统小型文物的包装多是以木盒囊匣为主, 设计提出了一种新型的文物包装方案, 减轻了包装质量, 节约包装成本; 利用 ANSYS 软件对包装件进行有限元分析, 验证了缓冲衬垫设计的合理性, 相比较传统的包装设计过程, 增强了科学性。

### 参考文献:

- [1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2006.  
PENG Guo-xun. Logistics Transport Package Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2006.
- [2] 苏远, 吕勇, 赵德坚. 公路运输环境的测试[J]. 包装工程, 2007, 28(9).  
SU Yuan, LYU Yong, ZHAO De-jian. Measurement of Transportation Environment on Truck[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(9).
- [3] 王建清. 包装材料学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.  
WANG Jian-qing. Packaging Materials[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2004.
- [4] 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.  
SU Yuan, TANG Bo-sen. Theoretical Foundation and Application of Cushioning Package[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [5] 胡名玺, 陈煜, 杜振杰, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的包装件跌落仿真[J]. 包装工程, 2007, 28(11): 53-54.  
HU Ming-xi, CHEN Yu, DU Zhen-jie, et al. Simulate of Packaging Drop Based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(11): 53-54.
- [6] 何涛, 杨竞, 金鑫. ANSYS/LS-DYNA 非线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工程出版社, 2007.  
HE Tao, YANG Jing, JIN Xin. ANSYS/LS-DYNA Nonlinear Finite Element Analysis Guiding Tutorial[M]. Beijing: Mechanical Engineering Press, 2007.
- [7] 戴宏民. 新型绿色包装材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.  
DAI Hong-min. New Type of Green Packaging Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.