

# 电磁炉包装件的振动特性仿真分析

张沙, 钱怡

(江南大学, 无锡 214122)

**摘要:** 考虑到泡沫衬垫材料的非线性特性, 应用有限元软件 ANSYS Workbench 的瞬态动力学模块, 对电磁炉包装件在运输过程中的振动特性进行了计算机仿真, 得到了包装件的加速度及缓冲衬垫的动态应力-应变云图, 并通过定频振动试验, 验证了仿真结果的准确性。

**关键词:** 材料非线性; 仿真分析; 振动试验; 加速度

**中图分类号:** TB485.1; TB487 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)23-0056-05

## Simulation Analysis of Vibration Characteristics of Induction Cooker Package

ZHANG Sha, QIAN Yi

(Jiangnan University, Wuxi 214122)

**Abstract:** Considering the nonlinearity of foam cushion, ANSYS Workbench finite element analysis software was applied to simulate the dynamic behavior of induction cooker package in transportation. Acceleration of the packaging and dynamic stress and strain of the foam cushion were obtained. The accuracy of the simulation was verified by fixed frequency vibration test.

**Key words:** material nonlinearity; simulation analysis; vibratory test; acceleration

包装件在运输过程中会受到来自运输工具的激励而产生振动, 振动激烈时会导致内部产品的损伤。防振包装的作用就是合理选择具有良好能量吸收性或耗散性的材料作为衬垫材料, 减小传递到产品上的加速度<sup>[1]</sup>。目前大多数针对包装衬垫防振设计的研究主要是通过对产品进行振动试验, 测得内装产品在振动外力作用下的动态力、加速度、位移等<sup>[2]</sup>, 以检验缓冲效果和设计的合理性。由于这种试验对产品具有很大的破坏性, 需多次重复, 成本较高<sup>[3]</sup>, 因此探寻缓冲包装件的仿真试验方法是现代设计的趋势。无论对机械设计还是包装结构设计, 都有重要的价值。目前包装衬垫的振动仿真研究主要是谐波响应分析, 但是这种方法不能考虑材料的非线性<sup>[4]</sup>。文中通过计算机仿真分析, 并考虑到材料的非线性特性, 将正弦加速度激励作为包装件在运输过程中的输入信号, 分析包装件的动态响应, 为缓冲包装设计优化打下基础。

## 1 电磁炉包装件的振动模拟分析

### 1.1 材料性能的确

利用 ANSYS Workbench 对电磁炉包装件进行有限元分析时, 涉及到材料的弹性模量和泊松比等参数, 为此, 根据 GB 8168—2008, 在室温 22 °C 时对 EPS 泡沫衬垫材料进行试验<sup>[5]</sup>, 得到材料的  $\sigma$ - $\varepsilon$  曲线, 见图 1。由

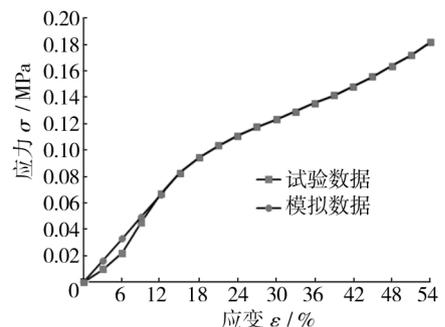


图1 EPS泡沫衬垫材料的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of EPS material

收稿日期: 2012-08-08

作者简介: 张沙(1986-), 女, 河北人, 江南大学硕士生, 主攻运输包装。

图1可见 $\sigma$ - $\varepsilon$ 关系呈非线性特征,所以可采用多段线性塑性模型描述泡沫缓冲衬垫的力学性质,应力在0.15 MPa以下为材料线弹性部分,应力在0.15~0.54 MPa段为材料非线性塑性部分。在Workbench中定义材料特性时,泡沫衬垫在弹性阶段的弹性模量 $E$ 为0.55 MPa,泊松比为0.3,密度为20 kg/m<sup>3</sup>;非线性塑性阶段的应力-塑性应变关系由表1中的12个数据描述。

表1 EPS泡沫材料的应力-塑性应变数据

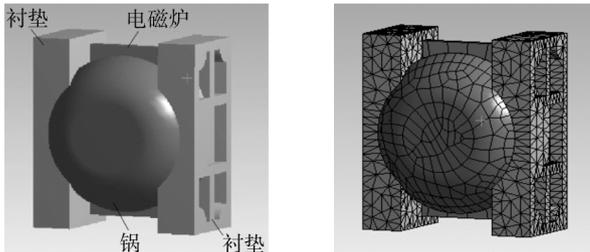
Tab.1 Stress-plastic strain data sheet of EPS material

塑性应变	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
应力/MPa	0.083	0.104	0.111	0.176	0.123	0.129
塑性应变	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2	
应力/MPa	0.135	0.142	0.156	0.164	0.172	

## 1.2 有限元建模

### 1.2.1 建立模型

按照包装件结构的实际尺寸,在PRO/E里建立三维实体模型(见图2a),包装件尺寸为330 mm×165



a 包装件三维实体模型

b 泡沫衬垫网格划分模型

图2 电磁炉包装件的有限元模型

Fig.2 Finite element model of induction cooker package

mm×390 mm,整体质量为4 kg。通过相关接口,将PRO/E模型导入到ANSYS Workbench中进行有限元建模。相对于泡沫缓冲衬垫,电磁炉、锅的变形极小,故设它们为均质刚体,准确输入各部件密度以保证包装件质量的真实性。

采用Workbench默认的三维实体单元SOLID186单元建立有限元模型,单元网格为全四面体单元划分,刚体部件网格粗糙,细化泡沫衬垫主要受力区域网格,最终得到图2b所示的结构有限元模型。

### 1.2.2 定义接触与边界条件

考虑到电磁炉与衬垫上下、左右两侧接触部位的实际接触情况,定义电磁炉与衬垫上下两侧的接触为绑定接触,与衬垫左右两侧的接触定义为法向不分离

接触<sup>[6-7]</sup>。由于主要研究对象是电磁炉,所以其它部件与衬垫的接触均定义为绑定接触。衬垫固定于振动台面。

### 1.2.3 载荷与边界条件

对衬垫与振动台接触的底面施加固定约束。根据公路路况,汽车运输时,振动频率大部分集中在50 Hz以下,加速度范围为1~3 g<sup>[8-9]</sup>。根据下式(弧度制)设置加速度激励<sup>[10]</sup>。

$$a = A \sin(2\pi ft)$$

式中: $a$ 为激励加速度(m/s<sup>2</sup>); $A$ 为激励加速度幅值(m); $f$ 为激励频率(Hz); $t$ 为时间(s)。

包装件工作频率为25 Hz,为了与振动台输出加速度激励对应,便于检验测试结果,设置结果如下(非弧度制)

$$a = 4.8 \sin(2 \times 180 \times 25 \times t) + 0.8$$

上式描述的加速度与时间关系可用图3a所示的曲线表示。

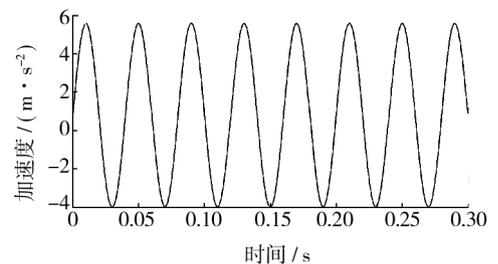
## 1.3 仿真分析

设置总分析时间为0.3 s,初始时间步和最大时间步均为2.5 ms,最小时间步为25 μs。泡沫塑料衬垫的阻尼比通常为0.1~0.3<sup>[9]</sup>,设置25 Hz时Beta阻尼比为0.3。

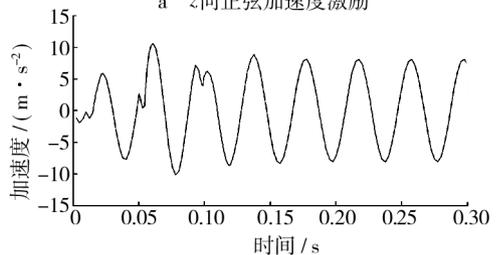
## 1.4 结果分析

### 1.4.1 加速度

分析得到电磁炉 $z$ 向加速度曲线见图3b。从图



a  $z$ 向正弦加速度激励



b 电磁炉 $z$ 向加速度曲线

图3 正弦加速度曲线

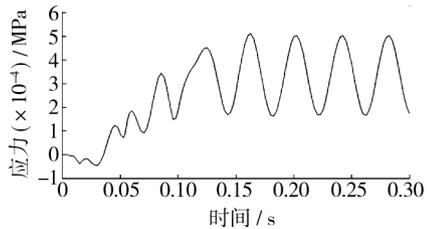
Fig.3 Sine acceleration curve of the packaging

3中看出电磁炉 $z$ 向加速度最大值为10.6 m/s<sup>2</sup>,最小

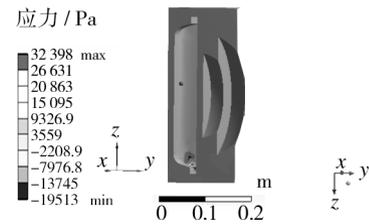
值为 $-10.2 \text{ m/s}^2$ 。

#### 1.4.2 z 向应力

同时衬垫与电磁炉接触上侧区域某点 z 向应力随时间变化的情况及泡沫衬垫 z 向应力最大时刻的应力分布云图见图 4。振动开始时, z 向应力较小, 振



a 泡沫衬垫某点 z 向应力随时间变化曲线



b 泡沫衬垫 z 向应力最大时刻应力分布云图

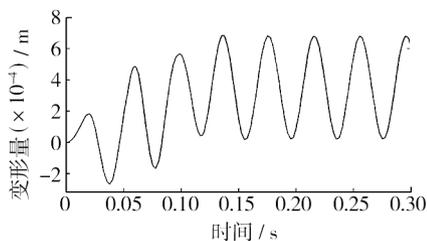
图 4 泡沫衬垫 z 向应力结果

Fig. 4 z axis normal stress of foam cushion

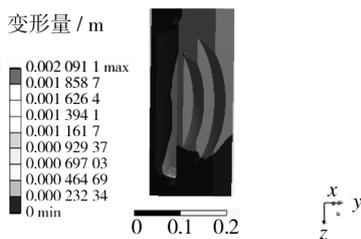
动稳定后 z 向应力也稳定地呈正弦规律变化。从图 4b 可以看出泡沫衬垫中拉、压应力并存, 最大拉应力出现区域是电磁炉与衬垫接触的下侧区域。

#### 1.4.3 变形

泡沫衬垫与电磁炉接触上侧区域某点变形量随时间变化的情况及变形最大时刻的变形云图见图 5,



a 泡沫衬垫某点变形随时间变化曲线



b 泡沫衬垫变形最大时刻变形云图

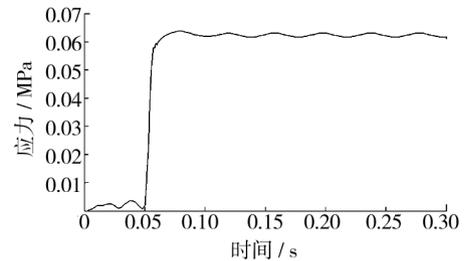
图 5 泡沫衬垫变形情况

Fig. 5 Deformation of foam cushion

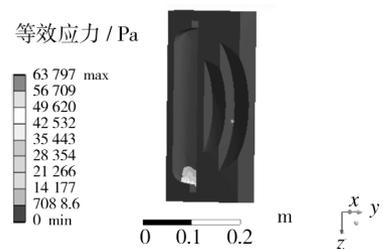
云图显示最大变形也发生在电磁炉与衬垫接触的下侧区域, 最大变形为  $0.0021 \text{ m}$ , 变形很小, 与实际情况相符。

#### 1.4.4 等效应力

泡沫衬垫最大等效应力随时间变化的情况及衬垫等效应力最大时刻的应力分布云图见图 6, 可以看



a 最大等效应力随时间变化曲线



b 最大等效应力分布云图

图 6 泡沫衬垫等效应力结果

Fig. 6 Equivalent stress of foam cushion

出衬垫最大等效应力出现区域是电磁炉与衬垫接触下侧, 最大应力为  $0.0638 \text{ MPa}$ , 没有超过材料的屈服极限。图 6b 显示开始阶段衬垫最大等效应力较小, 当振动稳定后, 最大等效应力基本保持在  $0.0062 \text{ MPa}$ 。

## 2 定频振动试验

振动台采用美国 MTS 公司生产的 MTS322 振动试验机, 2 个传感器分别放置在与振动台垂直的电磁炉面以及振动台面上, 把被包装物加上缓冲垫放入瓦楞纸箱, 然后正立放置于振动台, 在离试件合适的位置分布 4 根固定杆, 以限制包装件在水平方向的跳动。设定振动台频率为  $25 \text{ Hz}$ , 振动稳定时, 采集传感器输出信号, 采集时间为  $0.2 \text{ s}$ 。

读取振动台上加速度传感器输出加速度响应波形(见图 7a), 将电磁炉上传感器输出加速度响应波形与仿真得到的加速度响应波形对比见图 7b。

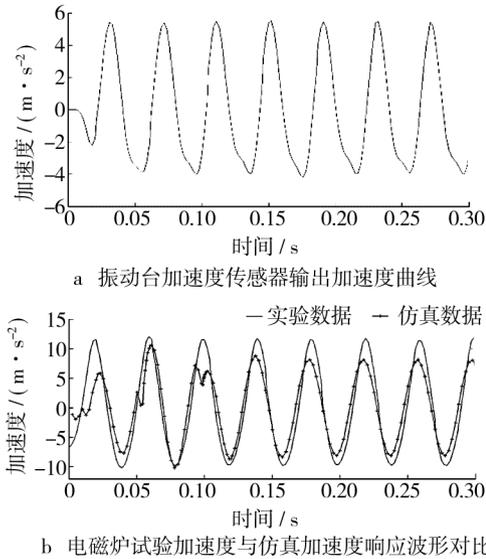


图7 传感器输出加速度响应波形

Fig. 7 Acceleration response curve of the sensor

从图7中可以看出试验测得电磁炉加速度最大值为  $11.5 \text{ m/s}^2$ , 最小值为  $-10 \text{ m/s}^2$ 。与模型模拟结果进行比较, 加速度峰值误差在 10% 以内, 并且加速度频率吻合。考虑到试验时电磁炉与衬垫接触间隙的存在、包装件形状、外包装箱的简化以及实验的误差, 可以认为所建有限元模型是可靠的。

### 3 模态分析

通过仿真分析和实验测试, 均可发现该包装方式不但没有降低加速度峰值, 反而加强了。为分析原因, 对结构作相同约束方式下的模态分析, 得到包装件的固有频率(见表2)。可以看出, 激励频率接近第三阶固有频率, 因此导致加速度峰值的增强。

表2 包装件的固有频率

Tab.2 Natural frequencies of induction cooker package

模态阶次	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	6.064	15.957	28.697	30.897	40.318	42.163

### 4 改变包装件约束方式后的振动模拟分析

为减小包装件的振动, 可通过施加绑扎约束的方式来改变结构固有频率。分析中将衬垫顶面施加固定约束, 对电磁炉包装件进行振动模拟分析, 得到电磁炉加速度曲线(见图8), 此时最大加速度降低到 5

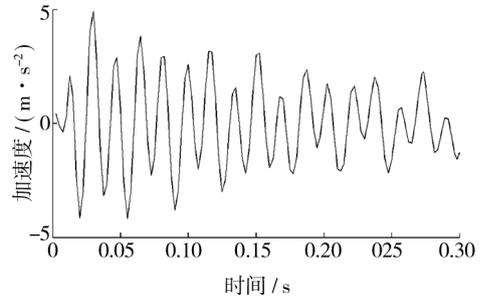


图8 改变约束后电磁炉的加速度曲线

Fig. 8 Sine acceleration curve of induction cooker after changing constraint

$\text{m/s}^2$ , 最小加速度降低到  $-4 \text{ m/s}^2$ 。可以看出电磁炉加速度峰值明显降低, 并且趋于稳定, 说明绑扎约束的方式对控制振动有效。如果激励频率远离结构固有频率, 则响应峰值下降得更明显。

### 5 结语

考虑到材料的非线性特性, 通过计算机模拟仿真, 分析了包装件振动的动态响应, 为非线性材料包装件的振动仿真分析提供了一种方法, 同时给出了减小包装件振动的简便措施。

1) 振动过程中, 衬垫材料中存在拉应力。这部分拉应力也起到了一定的吸能效果, 不能忽略, 所以设计缓冲衬垫时, 应该考虑拉应力的作用, 采用上下贯通的衬垫结构形式。

2) 运输过程中应采用捆扎等方式将货物进行适当固定, 增强包装件的约束, 减小振动影响。

#### 参考文献:

- [1] 孟宪文, 计宏伟. PC 主机运输包装件的防振缓冲性能评价[J]. 振动与冲击, 2007, 26(8): 162-164.  
MENG Xian-wen, JI Hong-wei. Anti-vibration Performance Evaluation of PC Host in Transportation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(8): 162-164.
- [2] 刘乘, 卢杰, 陈满儒. 运输包装件振动特性的计算机仿真[J]. 包装工程, 2002, 23(4): 20-22.  
LIU Cheng, LU Jie, CHEN Man-ru. Computer Simulation of Vibration Characteristics for The Product/Package in Transportation[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(4): 20-22.
- [3] 高德, 董静, 李军. 基于非线性有限元的瓦楞纸板动态冲

- 击响应的仿真研究[J]. 包装工程, 2006, 27(8): 10-11, 25.
- GAO De, DONG Jing, LI Jun. Research on Simulation of Dynamic Response of Corrugated Board with Nonlinear Finite Element[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(8): 10-11, 25.
- [4] 丁敏峰. 12.0 ANSYS 有限元分析完全手册[K]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- DING Min-feng. 12.0 ANSYS Finite Element Analysis Complete Manual[K]. Beijing: Electronics Industry Press, 2011.
- [5] GB 8168—2008, 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S].
- GB 8168—2008, Test Method of Static Compression for Package Cushioning Materials[S].
- [6] 浦广益. ANSYS Workbench12 基础教程与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- PU Guang-yi. ANSYS Workbench12 Basic Course and Example Analysis. [M]. Beijing: China Water Power Press, 2010.
- [7] 凌桂龙, 丁金滨, 温正. ANSYS Workbench 13.0 从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- LING Gui-long, DING Jin-bin, WEN Zheng. ANSYS Workbench 13.0 from the Entry to the Master [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [8] 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 Transportation Packaging Design [M]. Beijing: Printing Industry Press, 2006.
- [9] 汤伯森, 向红. 包装动力学[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2001.
- TANG Bo-sen, XIANG Hong. Packaging Dynamics [M]. Changsha: Hunan University Press, 2001.
- [10] 张义民. 机械振动[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- ZHANG Yi-min. Mechanical Vibration [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.

## · 简讯 ·

### Sino-Pack2013 有望成为国内最大型设备与制品包装展

2013年3月在广州, 第二十届中国国际包装工业展览会(简称: 中国国际包装展 Sino-Pack 2013), 中国(广州)国际包装制品展(简称: 中国国际制品展 Pack Inno2013), 及第十七届中国国际啤酒、饮料及液态包装工业展览会(简称: 中国国际饮料展 China Drink 2013)将联合呈现, 展会规模将扩增至4万平方米, 预计参展商数量突破500家, 买家超越60,000名。首届中国(广州)国际包装制品展将贯通整个包装领域, 真正做到中国最大规模的“设备与制品包装展”。

#### 超大规模, 庞大参展商阵容, 包装行业先锋展

2013年展会共设有: “综合包装机械馆”、“包装制品及材料馆”、“饮料、啤酒及液态包装馆”和“国际馆”, 四大主题展馆。新增“包装制品及材料馆”将迎来快消行业巨星级包装制品生产商, 其中包括精丽制罐、铭丰、东莞奇妙、南海利达, 材料领域佼佼者: 新乐华宝、南通三信、浙江众成、广东仕诚、辉隆等等, 独特的“香港设计品牌馆”为企业提升品牌设计力量, 让参观者从设备、制品、材料和设计一网打尽。

国际馆汇聚众多一线大牌企业, 包括全球自动化领域先锋、全球喷码巨头等; 更有美国展团、英国展团的最新设备展出。更多国内外知名企业纷纷参展。在往届展会的持续好评之下, 参展展商更是热情不减, 并有持续升温之势, 目前展位销售超过90%。

#### 以买家需求为先 将举办十场高端论坛与活动

在展会期间, Sino-pack 将同期举行一系列高端论坛, 包括“食品、饮料中的包装技术应用研讨会”、“2013(第二届)啤酒产业创新技术研讨会”、“物流包装工序演示专场”、“广东省食品行业协会研讨会专题”、“PMMI 包装论坛”、“自动化设备与机器人技术及应用论坛”、“现代包装设计与品牌管理”、“高端包装制品区”、“中国环保大奖赛·展示柜暨评选及包装设计专区”。演讲嘉宾均为来自全球包装业内精英和相关组织的领袖与专家。名额有限, 请立即登录官网预定席位: <http://www.ChinaSinoPack.com>。

#### 提前预登记 赢取精美礼品 实力买家突破6万人

上届展会共接待了海内外协会参观团近百家。同时还有50多家知名企业组团前来参观采购。如欲参观, 请立即登录官网预定席位: <http://www.ChinaSinoPack.com>。

主办方现已全面启动2013年展会实力买家邀请计划, 超过70家海内外参观团已达成参观意向。观众预登记已全面开放, 买家可登陆展会官网进行登记。为庆祝展会20周年, 主办方每个月都会从预登记观众中抽出部分幸运观众, 获得精美礼品, 详情请登陆 <http://www.ChinaSinoPack.com> 浏览查询。

(雅式展览服务有限公司供稿)