吊灯灯罩纸浆模塑缓冲衬垫跌落仿真

唐杰,肖生苓,王全亮,陆新宗

(东北林业大学,哈尔滨 150040)

摘要:目的 验证纸浆模塑缓冲衬垫是否具有缓冲性能,能否有效保护产品不受损伤。方法 基于吊灯灯 罩与纸浆模塑衬垫之间的装配关系,以跌落冲击为环境载荷,采用 Ansys/LS-DYNA 软件进行高度为 1000 mm 的跌落仿真分析,获取纸浆模塑缓冲衬垫应力-应变云图、加速度响应曲线等动态特征和相关 参数,以此分析吊灯灯罩纸浆模塑衬垫在整个跌落过程中的作用。结果 纸浆模塑衬垫凸台发生了变形, 作用力由纸浆模塑衬垫向灯罩扩散;整个模型重心点的加速度小于最低点的加速度;整个模型重心点和 最低点速度与位移变化符合实际情况。结论 纸浆模塑缓冲衬垫通过结构的变形和破坏来吸收外界冲击 能量,以及延长作用力时间起到缓冲作用,能在物流过程中对产品进行有效保护。

关键词: Ansys/LS-DYNA; 纸浆模塑缓冲衬垫; 跌落仿真

中图分类号: TB485.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2017)11-0069-05

Drop Simulation of Molded Pulp Cushion Pad of Chandelier Lampshade

TANG Jie, XIAO Sheng-ling, WANG Quan-liang, LU Xin-zong (Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The work aims to verify whether the molded pulp cushion pad has buffer performance and whether it can protect products from damage. Based on the assembling relationship between the chandelier lampshade and molded pulp cushion pad, by taking the drop impact as the environmental load, the simulation and analysis on dropping at the height of 1,000 mm were carried out by Ansys/LS-DYNA software. And dynamic characteristics, such as the stress-strain nephogram, acceleration response curve and so on, as well as the related parameters of the molded pulp cushion pad were obtained, based on which the role of chandelier lampshade' s molded pulp cushion pad in the whole dropping process was analyzed. The molded pulp cushion pad convex platform was subject to deformation and the force was diffused from the molded pulp cushion pad toward the lampshade. The acceleration of barycenter point was less than that of the lowest point of the entire model; the change in speed and displacement of the barycenter point and the lowest point of the entire model accorded with the actual situation. Molded pulp cushion pad absorbs external impact energy through the structural deformation and destruction, and extends the time of force application, so as to play a buffer role in effectively protecting the product in the logistics process.

KEY WORDS: Ansys/LS-DYNA; molded pulp cushion pad; drop simulation

在包装材料家族中,缓冲材料占有半壁江山,是 应用范围最广、使用量最大的包装材料,其缓冲作用 的发挥,一是靠材料自身的缓冲功能实现对产品的保 护,二是依靠材料良好的缓冲结构设计来吸收外界能 量,减少振动、冲击对产品带来的破坏。 我国是制造大国,同时也是包装大国,新型包装 材料和产品不断涌现,给产品运输及保护带来了极大 的便利。纸浆模塑缓冲材料及包装制品近年来发展迅 速,具有原料可再生、可循环利用、缓冲效果好等优 点,属绿色包装环保材料。目前一些学者对纸浆模塑

收稿日期: 2016-12-21

基金项目:哈尔滨市应用技术研究与开发项目(2016RAXXJ004)

作者简介:唐杰(1991—),男,东北林业大学硕士生,主攻物流工程。

通讯作者:肖生苓 (1961—), 女,博士,东北林业大学教授,主要研究方向为物流工程与生物质材料。

制品的缓冲性能进行了相关研究,主要通过静态压缩 与动态冲击2个方面来分析其性能,其中在静态压缩 方面的运用相对成熟。然而纸浆模塑制品与传统的缓 冲材料在缓冲机理方面存在差异,人们对于其缓冲性 能的认识尚不够深入,这导致纸浆模塑制品在缓冲包 装设计中缺乏必要的理论依据,特别是一些中小企 业,在包装模塑产品的设计中还处于比较原始的经验 式设计,致使设计周期长、试验重复率及费用高。运 用 Ansys 软件对纸浆模塑包装制品进行仿真, 有利于 反复修改模型参数,优化结构设计,减少或避免实际 设计周期中不必要的破坏性试验,能更有效地提高缓 冲包装设计的精准性和经济性^[1]。吊灯是居家生活的 必需品,灯罩是对吊灯的装饰和保护。灯罩一般为亚 克力或有机玻璃制品,在物流运输和配送中易被损 坏。文中基于吊灯灯罩与纸浆模塑包装衬垫之间的装 配关系,以跌落冲击为环境载荷,采用 Ansys/LS-DYNA 软件对其进行高度为 1000 mm 的跌落仿真分 析,通过仿真获取纸浆模塑缓冲衬垫应力-应变云图、 加速度响应曲线等动态特征与相关参数,为优化产品 的设计提供理论依据^[2-3]。

1 吊灯灯罩纸浆模塑衬垫缓冲性能

吊灯灯罩纸浆模塑材料属于非线性硬弹性缓冲 材料。通常三次函数和正切函数作为非线性硬弹性材 料衬垫的压力-变形曲线,其数学模型分别为 $p = k_0 x + rx^3$, $p = \frac{2k_0 d}{\pi} \tan \frac{\pi x}{2d}$ (p 为压力; k_0 为材料初始 弹性系数;r 为材料非线性常数;d 为材料极限变形 量;x 为材料变形量)。为了使问题求解简单,理论 上非线性硬弹性缓冲材料通常取三次函数作为数学 模型^[4-5]。纸浆模塑材料制品强度较小,时常发生弹 塑性变形和屈曲,微观上表现为纤维的伸展或滑移。 通常纸浆模塑缓冲制品的结构由多个凸台组成。典型 凸台结构一般包含 4 个侧面、1 个底面和 1 个顶面, 其中,凸台高度和顶面边长是缓冲模型中最重要的 2 个参数。吊灯灯罩装卸、搬运过程中,纸浆模塑衬垫 主要通过各凸台结构的变形和破坏,以及延长载荷作 用时间来实现缓冲效果^[6]。

2 灯罩纸浆模塑材料参数的获取

实验原料为废旧瓦楞纸板,清洁处理后裁切为 5 mm×25 mm的碎片,清水浸泡12 h。瓦力打浆机 进行疏解、打浆,获得打浆度分别为35,40,45, 50°SR的纸浆。根据纸浆模塑工艺制备出4种不同打 浆度的纤维模塑材料,其应力-应变曲线见图1。

由图 1 可知,不同打浆度的纸浆模塑材料其应力-应变曲线存在着差异,主要表现在屈服应力的不同。 根据 $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ (其中 σ 为应力, ϵ 为应变, E 为弹性模 量),可获得不同打浆度灯罩纸浆模塑材料的弹性模量^[7]。材料密度均为 0.272 mg/mm³,厚度均为 3 mm, 定量均为 800 g/m²,具体情况见表 1。



图 1 不同打浆度纸浆模塑材料应力-应变曲线 Fig.1 Stress-strain curve of pulp molded materials with different beating degree

表 1 不同打浆度灯罩纸浆模塑材料参数 Tab.1 Parameters of lampshade pulp molded materials with different beating degree

打浆度/(°SR)	弹性模量/MPa	屈服应力/MPa			
35	206	0.1907			
40	216	0.2035			
45	220	0.2548			
50	207	0.2980			

由表1可知,随着打浆度的提高,纸浆模塑材料的屈服应力不断增加,而弹性模量先增后减。为了获得具有良好的抵抗外界变形能力的材料,综合比较纸浆模塑材料的各项性能,当打浆度为45°SR时,材料性能较好。在以下模拟仿真中,取打浆度为45°SR的纸浆模塑材料作为试样材料进行分析,验证纸浆模塑材料是否具有良好的缓冲性能,同时可否满足保护产品的要求。

3 跌落仿真有限元模型

3.1 实体模型的建立

Ansys 软件的实体建模功能相对薄弱,对规模庞 大、结构复杂,尤其同时包含大量不规则的曲线和曲 面时,在使用 Ansys 软件建立实体模型时往往非常复 杂,因此选择常用的商业软件 UG 进行建模,通过 UG 与 Ansys 的专用接口将模型导入 Ansys 软件中, 以实现模型后续的分析与处理。考虑到模型网格划分 以及避免运算不收敛等现象,在模型导入 Ansys 软件 之前需要将其尽可能地简化^[8—9]。简化过程中应注 意:模型简化必须保证简化后的模型在尺寸、形状和 刚度方面不发生明显变化;仔细分析模型中的细小结 构,如小孔、沟槽、倒圆角等,只有当这些特征对仿 真结果影响不大、甚至毫无影响的情况下才能删除。

3.2 有限元模型的建立

模型导入 Ansys 软件中首先要考虑的是模型的 尺寸与单位问题。模型在 UG 中的长度单位为 mm, 力的单位为 N,时间单位为 s,在 Ansys 软件中相应 的应力单位为 MPa,密度为 t/mm³。

1)定义单元类型与实常数。shell 163 是 4 节点 的二维结构薄壳单元,具有膜和弯曲特征,可施加法 向和平面载荷,同时支持显示动力学分析所有非线性 特征,吊灯灯罩纸浆模塑缓冲衬垫属于薄壳结构,故 采用此单元。吊灯灯罩纸浆模塑缓冲衬垫厚度设定为 3 mm,剪切因子为 5/6,节点设定为 3。灯罩选用 solid 164 三维显示实体单元,该单元用于动力显示分析, 没有实常数,支持所有许可的非线性特征^[10]。

2)定义材料模型。此次模拟中存在纸浆模塑缓 冲衬垫和吊灯灯罩 2 种不同的材料,由于性能的不 同,因此在 Ansys/LS-DYNA 软件中纸浆模塑缓冲衬 垫选择双线性随动硬化材料模型,而灯罩选用非线性 塑性硬化材料模型。纸浆模塑缓冲衬垫和灯罩材料模 型参数见表 2。

表 2 纸浆模塑缓冲衬垫和灯罩材料模型参数 Tab.2 Pulp molding cushioning pad and lampshade material model parameters

模型	弹性模 量/MPa	泊松比	密度/ (t·mm ⁻³)	屈服极 限/MPa	剪切模 量/MPa
纸浆模塑 缓冲衬垫	220	0.01 ^[11]	2.72×10 ⁻¹⁰	0.2548	108.91
吊灯灯罩	3530	0.38	1.19×10 ⁻⁹	75	1278.99

3)划分网格。模型网格划分是有限元仿真分析 中十分重要的一步,其划分是否合理对仿真结果的准 确性乃至求解过程的收敛性至关重要。网格单元节点 数划分过多会加重计算机的计算量使求解时间变长, 从而降低工作效率;单元节点数划分过少又会导致仿 真计算结果的精确度过低,无法保证计算结果的准确 性。该仿真主要分析纸浆模塑缓冲衬垫的缓冲性能, 因此纸浆模塑缓冲衬垫单元网格设定为5,灯罩按自 由网格划分。

4)生成 PART 与定义接触。PART 是一种具有某种特定属性的单元集合,借助其可以快捷地给模型中同一物体的不同部位或者不同物体之间定义接触,因此在定义接触之前需要通过 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Parts Options 选择 Create all parts 选项来生成 PART^[12]。接触类型选取得是否恰当直接关系到模拟质量的好坏,因此在定义灯罩与缓冲衬垫之间的接触时,考虑到模型之间接触的复杂性,一般设定为面面接触类型中的自动接触。根据产品与缓冲衬垫之间摩擦的实际情况,设定动、静摩擦因数均为0.1。

4 跌落参数设置

通过 Ansys/LS-DYNA 软件中跌落测试程序模 块,可快速地进行跌落参数设置。点击 Main Menu> Drop Test>Set up 命令,会弹出 Drop Test Set-up 对话 框,在该对话框内选择 Basic 选项卡即可进行相关参 数设置。重力加速度选择 9810 mm/s²。根据产品跌落 要求,以对象的最小竖向坐标点为参考点,整个模型 跌落高度设置为 1000 mm,但为了减少计算量,把 995 mm 的高度距离根据能量守恒的原则转化成相应 的初速度,因此将实物包装跌落试验的高度设置为 5 mm。接着运用 Set Orientation 里的 Rotate 对包装件 进行面跌落方向定位。为了缩短分析时间,在 Solution Time 中选择接近与刚性平面碰撞的时刻开始进行求 解计算,同时为了保证物体与平面碰撞后程序还能继 续运行,在 Runtime after impact 中输入 0.06。最后将 时间历程和结果文件的输出步数均设置为 100^[12–13]。

设置跌落初始时刻初速度时,因灯罩包装件是在 静止状态下跌落,笔者所关心的是包装件触地时的应 力变化,同时为了减少计算量,避开了 5 mm 之前 995 mm 高度的冗长计算过程,所以跌落初始时刻初速度为 -4418.36 mm/s^[14–15]。点击 Target,程序自动形成一 个刚性目标面。目标面的边长根据跌落测试对象的实 际情况计算得出,其厚度一般取该边长的 1/20。接着 设定以测试对象最低点下方为刚性目标面的中心位 置,在 Material Properties 栏中设定目标面的密度 为 7.85×10⁻⁹ t/mm³,弹性模量为 206 GPa, 泊松比为 0.1^[10]。根据实际需要,在接触特性 Contact 栏中设定 刚性目标面与被测物体之间的动、静摩擦因数均为 0.2。完成跌落参数设置后,单击 Status 标签,即显 示程序数据检查的一个摘要,程序数据检查无误后可 进行跌落测试求解计算。

5 仿真结果与分析

运算后,通过后处理来查看各个时刻模型的变化 情况。通过对结果的分析与评价来判断模型的合理 性。纸浆模塑包装件从 1000 mm 高处自由跌落等效 应力云图见图 2。

整个模型刚刚与地面接触时的应力情况见图 2a; 冲击力向灯罩表面扩散时的应力情况见图 2b;纸浆 模塑缓冲衬垫下缓冲凸台相继发生变形的情况见图 2c,应力此时不增反降;纸浆模塑缓冲垫变形停止时 的应力情况见图 2d,此时整个模型应力最大, 为 79.9209 MPa。由图 2 可知当整个模型与地面接触 时,整个模型瞬时受到来自地面的作用力,接着作用 力由纸浆模塑衬垫向灯罩表面不断扩散。当纸浆模塑 受到的作用力大于其所能承受的最大作用力时,纸浆 模塑衬垫就会相继发生变形。随着变形的增加,其所 接触的面积会在一定程度增大,因此一段时间内,应 力值会减小(见图 2c)。当跌落所产生的冲击能量全部由整个模型吸收后,纸浆模塑衬垫不再发生变形,此时应力值表现为最大(见图 2d)。综上所述,吊灯灯罩纸浆模塑缓冲衬垫通过结构变形与破坏来吸收外界冲击能量,以及延长载荷作用时间来达到缓冲目的。



Fig.2 Equivalent stress nephogram of the entire modelat different times

灯罩单独跌落时的等效应力云图见图 3,可以看出,其最大值为 104.651 MPa,比纸浆模塑包装件整 个模型的最大应力值(79.9209 MPa)高出 24.7301 MPa。 整个模型最低点与重心点的加速度-时间曲线见图 4,



图 4 整个模型最低点与重心点加速度-时间曲线 Fig.4 Acceleration-time curve of barycenter and lowest nephogrampoint of entire model

可以看出,整个模型重心点的加速度值远小于最低点的加速度值。由图 3—4 可以说明,当整个模型受到来自地面的作用力时,由于纸浆模塑衬垫通过自身的变形,吸收大量的能量,只有部分的冲击能扩散到灯罩表面,同时变形延长了作用力的时间,减少了最大冲击力。综上所述,纸浆模塑缓冲衬垫在产品跌落过程中,起到了良好的缓冲作用,有效地防止了产品在跌落过程中的损坏。

整个模型从 1000 mm 高处自由跌落的位移-时间 曲线和速度-时间曲线见图 5。由图 5a 可知, 整个模 型位移取向上为正,当整个模型与地面接触时,整个 模型最低点向下位移不再变化,整个模型重心点继续 向下移动,这说明纸浆模塑衬垫发生了变形。由图 5b 可知, 整个模型最低点接触地面时, 速度瞬间变 为零,之后速度反向增加;整个模型重心点速度开始 增加,之后不断减少,直至反向速度增加。这是由于 灯罩在惯性力作用下继续向下运动,纸浆模塑缓冲衬 垫在灯罩冲击作用下产生压缩变形;在开始变形阶 段,灯罩受到的合力方向仍然向下,其速度值继续增 大;当合力为零时,灯罩速度达到最大值,随着地面 对灯罩的力不断增大,合力方向向上,灯罩速度开始 下降,直至速度值为零,此时纸浆模塑缓冲衬垫变形 达到最大值;之后包装件进入恢复阶段,存储在纸浆 模塑缓冲衬垫内的能量逐渐释放,变形逐渐恢复,在 合力的作用下开始向上加速运动,速度方向向上,其



图 5 模型重心与最低点位移-时间曲线和速度-时间曲线 Fig.5 Displacement-time curve and speed-time curve of barycenter andlowest point of entire model

值不断增大。综上所述,整个模型从 1000 mm 高处 自由跌落,整个模型最低点与重心点位移、速度随时 间变化曲线符合实际情况,表明吊灯灯罩纸浆模塑缓 冲衬垫起到了良好的缓冲效果。

6 结语

纸浆模塑衬垫与传统的缓冲材料在缓冲机理方 面存在较大差异,利用 Ansys/LS-DYNA 软件对吊灯 灯罩纸浆模塑包装件进行了跌落仿真实验分析,获得 了以下结论:通过采用吊灯灯罩纸浆模塑包装件自由 跌落的等效应力云图以及对包装件重心点与最低点 加速度-时间曲线、位移-时间曲线进行分析,验证了 纸浆模塑缓冲衬垫是通过结构变形与破坏来吸收外 界冲击能量,以及延长载荷作用时间来起到缓冲作 用;灯罩单独跌落比纸浆模塑包装件整体跌落最大应 力值高出 24.7301 MPa,说明纸浆模塑衬垫具有良好 的缓冲作用,能在物流运输中有效地保护被包装件。

该仿真过程也存在不足之处:在建立模型时,为 了减少计算量,对模型进行了适当的简化与修改,无 法完全模拟实验中包装件跌落响应全过程;只讨论单 一高度的跌落情况,具有一定的局限性。

参考文献:

- WANG Yu, GENG Dong-wei. Analogue Study on Parameters of Paper Pulp to Buffering Properties[J]. Scientific Research, 2010(1): 5-7.
- [2] GENG Dong-wei, XU Wen-cai. Study on Method of Simulating Dynamic Cushioning Performance of Molded Pulp Packaging Pad[J]. Advanced Materials Research, 2010(4): 510—512.
- [3] LI Wen-biao, WU Xiao-ming. Drop Simulation of Molded Cushion for Largr-size LCD[C]// 2011 International Conference on Environment and Transportation Engineering, 2011: 84–87.
- [4] 李宏卫, 王军. 三次型非线性包装系统跌落冲击响应 分析[J]. 包装工程, 2015, 36(19): 18—22.
 LI Hong-wei, WANG Jun. Dropping Shock Response Analysis of a Cubic Nonlinear Packaging System[J].
 Packaging Engineering, 2015, 36(19): 18—22.
- [5] 包俊青,周棋彬,周洋,等.三次非线性包装系统跌落冲击响应分析的一种近似方法[J].包装工程,2016,37(1):61—64.
 BAO Jun-qing, ZHOU Qi-bin, ZHOU Yang, et al. A Simple Approximate Method for Dropping Shock Re-

sponse of a Cubic Nonlinear Packaging System[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(1): 61—64.

[6] 王宏涛. 纸浆模塑制品缓冲性能研究[M]. 西安: 西

安理工大学, 2007.

WANG Hong-tao. The Research of Molded Pulp Cushion Performance[M]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2007.

[7] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2012.

PENG Guo-xun. Logistics Packaging Design[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2012.

- [8] 许佳佳. LCD TV 纸浆模塑衬垫的性能研究及其虚拟 仿真[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
 XU Jia-jia. Research on Molded Paper Pulp Cushion Property of LCD TV and Virtual Simulation for Package
 [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [9] 华丽. 洗衣机运输包装的跌落仿真及可靠性探讨[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
 HUA Li. Dropping Simulation and Reliability Discussion of Washing Machine's Transport Package[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [10] 张红松, 胡仁喜, 康士廷, 等. Ansys14.5/LS-DYNA非 线性有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业 出版社, 2013.
 ZHANG Hong-song, HU Ren-xi, KANG Shi-ting, et al. Ansys14.5/LS-DYNA Nonlinear Finite Element Analysis of Examples of the Tutorial[M]. Beijign: Mechanical Industry Press, 2013.
- [11] 杜江毅, 王章苹, 陈轶萌. 基于 Ansys 的纸浆模塑制 品缓冲性能的仿真分析[J]. 湖北工业大学学报, 2006, 21(4): 121—123.
 DU Jiang-yi, WANG Zhang-ping, CHEN Yi-meng. The Cushioning Property of Pulp Molding Products Based on Ansys Simulation Analysis[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2006, 21(4): 121—123.
- [12] 华琪,黄颖为.基于平板电脑纸浆模塑缓冲衬垫的跌落仿真[J].西安理工大学学报,2013,29(4):485—490.
 HUA Qi, HUANG Ying-wei. Drop Simulation Based on Molded Pulp Cushion of Tablet PC[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(4):485—490.
- [13] MA Heng-jie, GAO Qiang. Drop Simulation Analysis of a Large Screen Mobile Phone[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(7): 275–278.
- [14] 王春霖, 张丽强, 王振林. 基于 Ansys 的啤酒瓶跌落 仿真应力分析[J]. 包装工程, 2006, 27(4): 23—25.
 WANG Chun-lin, ZHANG Li-qiang. WANG Zhen-lin. Stress Analysis of the Glass Beer Bottle by Dropping Simulation Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(4): 23—25.
- [15] 王俊丽,陈喜春. 缓冲包装的跌落仿真[J]. 包装工程, 2007, 28(9): 8—10.
 WANG Jun-li, CHEN Xi-chun. Drops Silnulaiton of Cushion Packaging[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(9): 8—10.