

打印机缓冲包装设计及其力学性能仿真分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2021.05.009

常 江

哈尔滨商业大学

轻工学院

黑龙江 哈尔滨 150028

摘 要: 为了研究纸浆模塑材料对打印机储运过程中的缓冲作用和力学性能,以打印机为研究对象,设计了打印机的缓冲单元,利用有限元分析软件对打印机缓冲单元静态堆码和动态冲击的力学性能进行了仿真分析。结果表明:打印机堆码单元的静态载荷为 744.8 N 时,缓冲单元最大应力出现在瓦楞纸箱上,最大应力为 0.47 MPa,小于瓦楞纸板的极限应力 2.38 MPa。打印机的缓冲单元以角接触跌落时的动态冲击最大,瓦楞纸箱的最大应力为 6.25 MPa,超过了其极限应力,但下衬垫和打印机的最大应力分别为 0.38 MPa 和 0.11 MPa,小于纸浆模塑材料和 ABS 的极限应力 2.00 MPa 和 49.00 MPa。瓦楞纸箱吸收了冲击过程中产生的能量,对内装物起到了很好的保护作用。因此,利用纸浆模塑设计的缓冲衬垫,能够对打印机起较好的保护作用,提高了储运的安全性,更重要的是符合了可持续发展的绿色包装设计理念。

关键词: 打印机;纸浆模塑;缓冲衬垫;静态堆码;跌落仿真

中图分类号: TB482.2

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2021)05-0060-08

引文格式: 常 江. 打印机缓冲包装设计及其力学性能仿真分析 [J]. 包装学报, 2021, 13(5): 60-67.

0 引言

随着信息技术和互联网技术的快速发展,网购已经成为当代消费者的主要消费形式。伴随着电商物流的兴起,合理和轻质化的缓冲包装需求量也在逐年增大。打印机作为现代家庭和办公场合的刚需产品,购买量和运输量也在急剧增加。在流通和储运过程中,不同运输方式产生的振动和冲击,会对打印机的核心部件造成较大伤害而影响其使用性能^[1-4]。因此,设计合理的、轻质的、符合绿色包装设计理念的缓冲包装应运而生。纸浆模塑材料是近几年新兴起的环保型缓冲包装材料,由于这种材料具有可循环利用、可降解和可再生的优点,符合可持续发展的现代包装

设计理念,逐渐地成为了研究热点。

基于有限元的仿真分析方法,可以减少重复性的检验程序。仿真分析结果可以直观地反映缓冲结构的应力分布状态,从而有针对性地进行缓冲结构优化,提高缓冲包装设计的效率和可靠性^[5-7]。唐杰等^[8]研究了纸浆模塑材料对吊灯灯罩的缓冲效果,在 1 m 的高度跌落所产生的最大冲击力小于材料的极限应力,缓冲结构起到了有效的保护作用。华琪^[9]利用纸浆模塑材料设计了一种可一纸成型的笔记本缓冲包装衬垫,突破了传统的分段式缓冲衬垫结构,为纸浆模塑在缓冲包装领域的应用开辟了新的方向。田金琛等^[10]利用纸浆模塑材料制成了缓冲衬垫,并利用有限元仿真分析方法证实了纸浆模塑对包装件

收稿日期: 2021-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51802061)

作者简介: 常 江(1982-),男,山西平遥人,哈尔滨商业大学副教授,哈尔滨商业大学博士生,硕士生导师,主要从事新型缓冲包装材料和缓冲包装性能研究, E-mail: kahnannie@163.com

具有较好的缓冲效果。张伟等^[11]研究了电子枪的纸浆模塑缓冲包装,利用最小二乘法得出了缓冲包装的经验公式,为纸浆模塑的缓冲包装设计及推广提供了理论基础。荣人慧等^[12]构建了纤维模塑缓冲包装材料的力学指标体系,为该类材料的应用和推广提供了有力的数据支持。王章莘等^[13]利用纸浆模塑与瓦楞纸板的复合材料对陶瓷碟的缓冲包装进行了设计和力学分析,结果发现在一定的跌落高度下,所设计的缓冲包装具有一定的保护作用。综上所述,纸浆模塑材料经过加工改良后,能够较好地应用在产品缓冲包装领域,提高了包装材料的环保性。

综上所述,本文采用绿色环保的纸浆模塑包装材料对打印机的运输缓冲单元进行了结构设计,并对设计的缓冲包装结构进行了静力和跌落仿真分析,以检验所设计的缓冲包装结构对打印机的保护作用。

1 打印机缓冲包装设计参数确定

1.1 打印机的技术参数

选择惠普 HP2676 型一体机为设计对象,具体技术参数如表 1 所示。

表 1 打印机技术参数

Table 1 The technical parameters of printer

参数类别	参数具体情况
整体尺寸	426 mm × 304 mm × 150 mm
净质量	7.0 kg
极限应力	49.0 MPa
脆值	60.0 g
材质	ABS 塑料

1.2 跌落高度的确定

根据内装物的质量 7.0 kg,包装箱通常采用公路或者铁路运输,装卸时可一人抛掷或者两人搬运,结合跌落标准,确定了高度为 80 cm 的角跌落方式进行仿真分析。

2 缓冲单元结构设计

2.1 缓冲衬垫结构设计

设计的打印机缓冲衬垫选用纸浆模塑材料,采用热压方式制模,脱模斜度为 2°,圆角尺寸为 5 mm,厚度为 3 mm,底部采用中空结构。利用结构的变形吸收流通中由于冲击和振动产生的能量,以达到缓冲的效果^[14-15]。缓冲衬垫结构如图 1 所示,图中数据

单位为 mm。

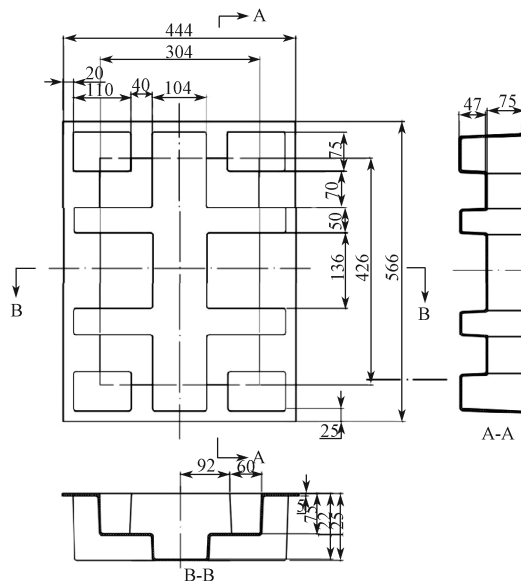
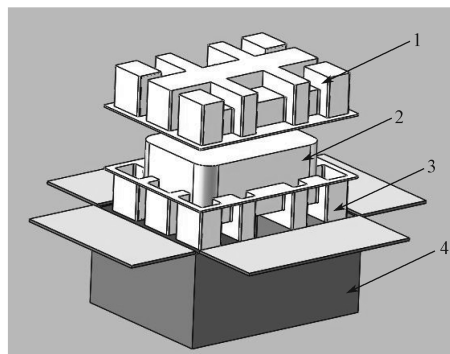


图 1 缓冲衬垫结构图

Fig. 1 Structure of buffer pad of printer

2.2 缓冲单元的立体模型

打印机缓冲单元由上衬垫、打印机、下衬垫和瓦楞纸箱 4 部分组成,外包装瓦楞纸箱选择 AB 瓦楞纸板。根据缓冲衬垫结构设计结果,利用 Solidworks 软件建立了缓冲单元的立体模型,如图 2 所示。



1—上衬垫; 2—打印机; 3—下衬垫; 4—瓦楞纸箱

图 2 缓冲单元的立体模型

Fig. 2 The space model of buffer unit

3 缓冲单元的力学仿真分析

根据所建立的打印机运输单元立体模型及各部件的结构特点,利用有限元分析软件的仿真分析要求,对打印机运输单元进行仿真分析。

3.1 材料参数设置及网格划分

3.1.1 材料参数设置

将缓冲单元立体模型导入 ANSYS 中,根据模型

中各部分作用及材料进行参数设置。根据文献资料研究表明,运输包装所用材料包括 ABS 塑料、纸浆模塑、瓦楞纸板,参数设置如表 2^[16-17]所示。

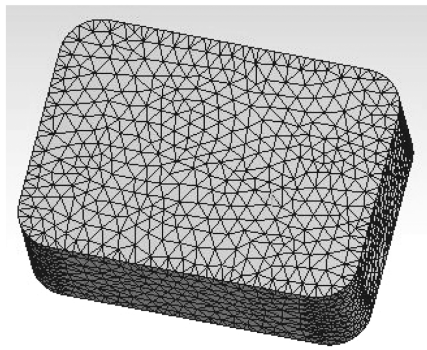
表 2 缓冲单元各部分材料参数设置

Table 2 The parameter setting of materials of each part of buffer unit

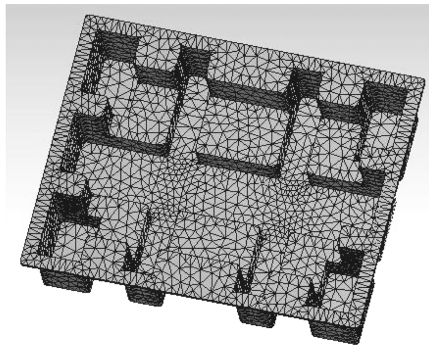
材料	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量 / MPa	泊松比	极限应力 / MPa
ABS 塑料	1 050	2 170	0.39	49.00
纸浆材料	100	505	0.01	2.00
瓦楞纸板	200	738	0.34	2.38
刚性地面	2 300	30 000	0.18	

3.1.2 缓冲单元网格划分

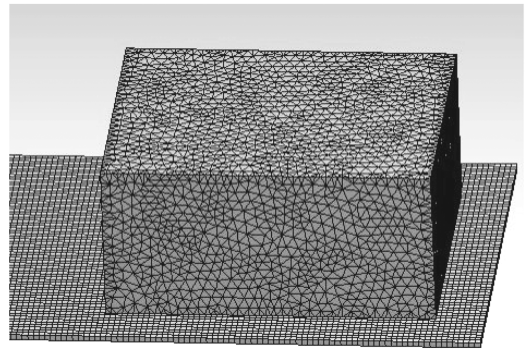
缓冲单元网格的划分是有限元分析中至关重要的一步。在打印机的仿真分析实验中,参与计算的是网格划分后的每一小块与节点,而不是整体模型,网格单元节点过多会使得计算机的运算量过大,导致卡顿;网格单元节点过少就无法保证运算结果的准确性。由此可见其网格划分是否合理对仿真分析结果的准确性,乃至求解过程的收敛性至关重要^[18]。利用 ANSYS 对打印机运输包装的网格划分结果如图 3 所示。



a) 打印机



b) 缓冲衬垫



c) 缓冲单元

图 3 打印机缓冲单元网格划分

Fig. 3 The grid division of buffer unit of printer

3.2 缓冲单元力学性能分析

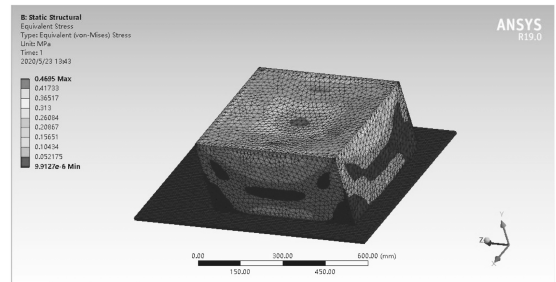
根据打印机运输单元各部件的参数设置和网格划分结果,结合储运条件,对运输单元进行静态堆码和动态跌落的力学仿真分析。

3.2.1 运输包装静态仿真分析参数设置

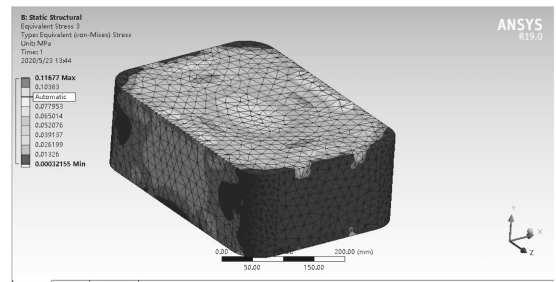
缓冲单元瓦楞纸箱外尺寸为 $583\text{ mm} \times 460\text{ mm} \times 276\text{ mm}$,仓库最大有效堆码为 6 层,纸箱总质量为 7.6 kg ,安全系数取 2,根据凯里卡特公式,得出堆码单元最大静压力为 744.8 N 。

3.2.2 静态力学性能结果与分析

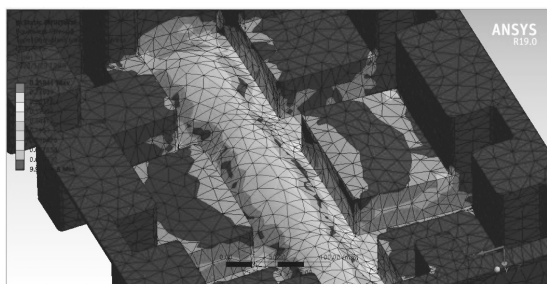
利用 ANSYS 进行有限元分析时,对运输包装整体施加 744.8 N 的径向载荷,得到运输包装各部件的静态应力云图如图 4 所示。



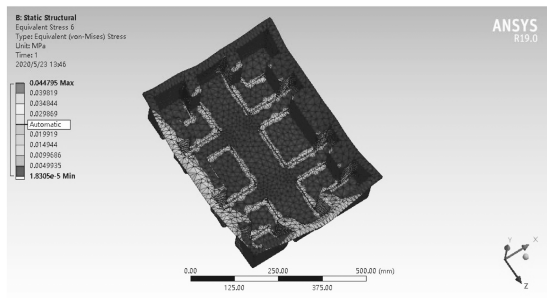
a) 缓冲单元



b) 打印机



c) 上衬垫



d) 下衬垫

图4 缓冲单元各部件静态应力分布云图

Fig. 4 The cloud diagram of static stress distribution of each component of buffer unit

由图4可知,当缓冲单元承受静态载荷时,瓦楞纸箱的静压力由内向外逐渐扩散,最大静应力集中在纸箱的中心。根据应力分布云图,瓦楞纸箱的最大静应力为0.47 MPa,小于其极限应力2.38 MPa;缓冲衬垫的最大静应力出现在下衬垫,最大静应力为0.45 MPa,未超过纸浆模塑材料的极限应力2.00 MPa。因此,所涉及的缓冲单元能够满足堆码强度要求,静态力学性能良好,起到了较好的保护作用。

3.3 缓冲单元跌落仿真分析

3.3.1 初速度和跌落时间的确定

包装件在运输和装卸过程中极易出现跌落,导致包装件破损,因此,对缓冲单元进行跌落仿真分析十分必要。本次跌落仿真分析选择角跌落的自由落体运动,跌落高度为80 cm。根据自由落体速度与位移间的关系,可以计算出跌落初始状态的初速度和所需要的跌落时间。为了减少分析时间,将跌落初始状态选在距离接触面1 cm (H'')的位置。在跌落开始瞬间缓冲单元已经获得一定的初速度,即打印机缓冲单元在经过79 cm (H')的初速度为零的自由落体过程中的末速度。根据自由落体的性质,可以得到跌落仿真分析开始瞬间,打印机缓冲单元的初速度 v_0 和接触时间 t 的计算公式^[16]:

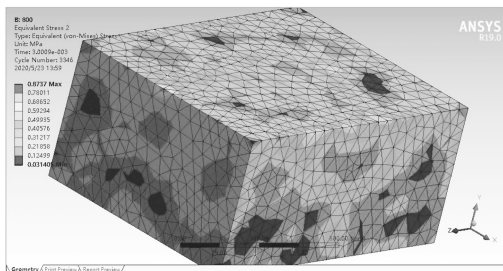
$$v_0 = \sqrt{2gH'}, \quad H'' = v_0 t + \frac{1}{2}gt^2。$$

根据已知条件求得初速度 $v_0=3.93$ m/s, 跌落时间 $t=2.03$ ms。

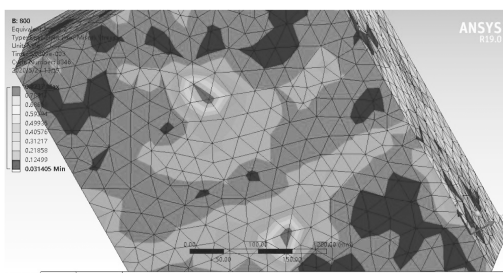
3.3.2 打印机缓冲单元的跌落仿真分析

1) 面跌落仿真分析

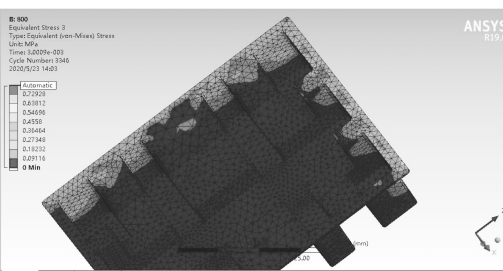
将所建立的缓冲单元模型在高度 $H''=1$ cm, 初速度 $v_0=3.93$ m/s 的条件下跌落,使缓冲单元的下底面与地面接触,得到了缓冲单元中各个部件的应力分布云图如图5所示。



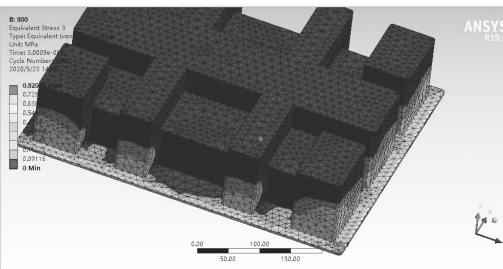
a) 缓冲单元(一)



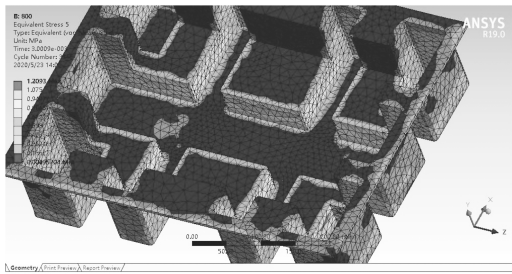
b) 缓冲单元(二)



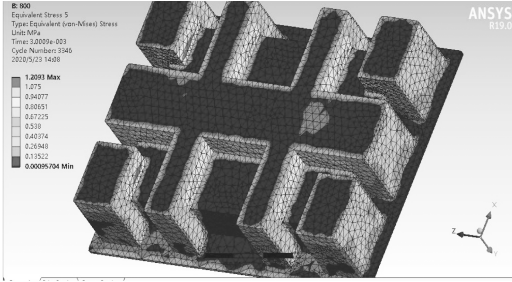
c) 上衬垫(一)



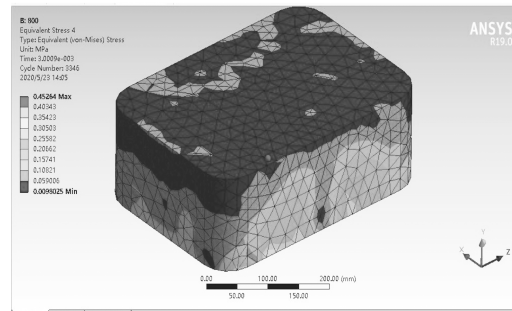
d) 上衬垫(二)



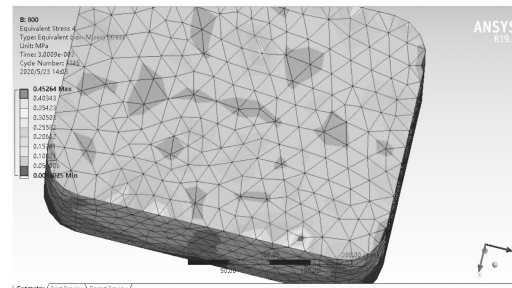
e) 下衬垫 (一)



f) 下衬垫 (二)



g) 打印机 (一)



h) 打印机 (二)

图5 打印机缓冲单元面跌落应力分布云图

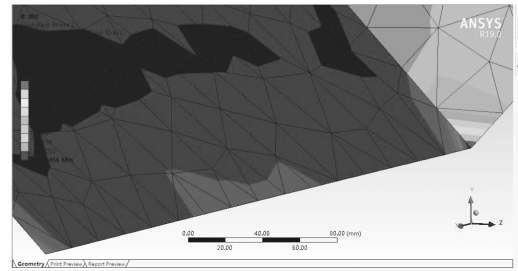
Fig. 5 Cloud diagram of surface drop stress distribution of printer buffer unit

由图5可知,打印机缓冲单元面跌落时,各个部件的最大等效应力分别为:打印机0.45 MPa,上衬垫0.82 MPa,下衬垫1.21 MPa,瓦楞纸箱1.76 MPa。最大等效应力出现在瓦楞纸箱下底面的中心位置和下衬垫的凹槽位置,但各部件的最大等效应力均

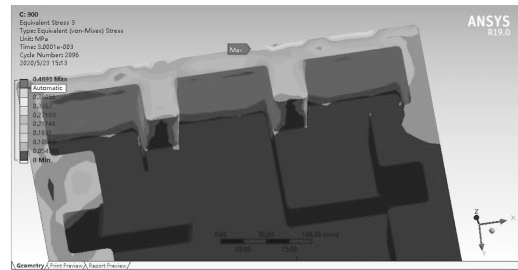
未超过其极限应力49.00, 2.00 MPa和2.38 MPa。因此,在跌落高度为80 cm时,所设计的缓冲单元起到了较好的缓冲效果,对打印机在运输过程中可能会产生的冲击和振动能起到较好的保护作用。

2) 棱跌落仿真分析

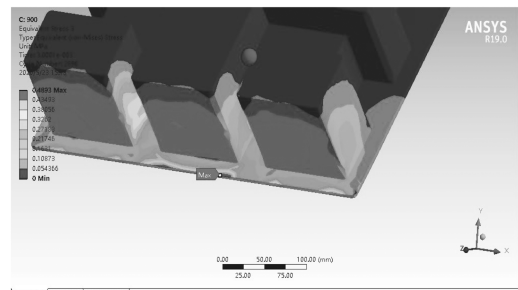
将所建立的缓冲单元模型在1 cm处以3.93 m/s的初速度跌落,使缓冲单元底面短边侧棱与地面接触,得到了打印机缓冲单元的跌落仿真应力分布云图,如图6所示。



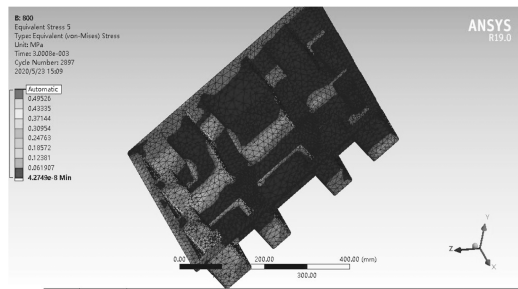
a) 缓冲单元



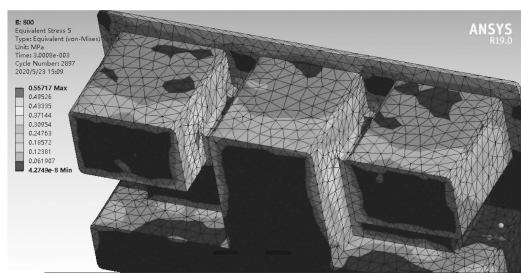
b) 上衬垫 (一)



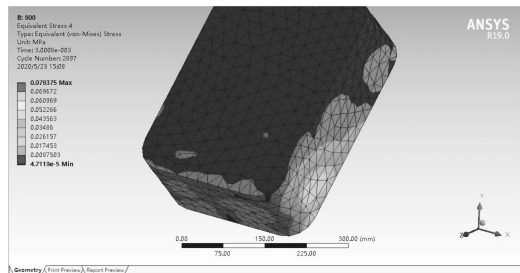
c) 上衬垫 (二)



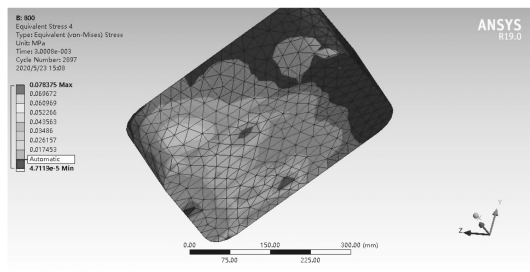
d) 下衬垫 (一)



e) 下衬垫 (二)



f) 打印机 (一)



g) 打印机 (二)

图6 打印机缓冲单元棱跌落应力分布云图

Fig. 6 The stress distribution of edge drop of printer buffer unit

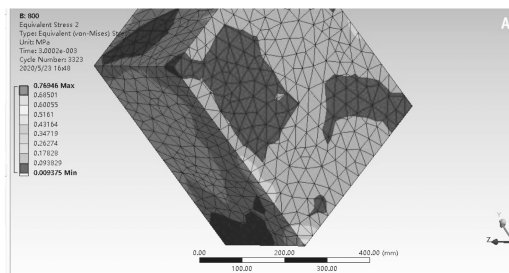
由图6可以看出,在棱跌落时,缓冲单元的最大等效应力出现在瓦楞纸箱与地面接触位置棱的两个端点处,最大等效应力为3.92 MPa,超过了瓦楞纸板的极限应力2.38 MPa,缓冲单元在棱跌落过程中产生了一定的变形。下衬垫的最大等效应力出现在与地面接触的侧棱位置的凹槽部位,最大等效应力为0.06 MPa;上衬垫的最大等效应力出现在衬垫与地面接触的侧楞上,凹槽位置应力较小,最大等效应力为0.44 MPa;上下衬垫在棱跌落时产生的最大等效应力均小于纸浆模塑材料的极限应力2.00 MPa。打印机的最大等效应力出现在底面的中下部分,特别是贴近棱的位置产生了较大的应力集中,其最大等效应力为0.08 MPa,远小于ABS材料的极限应力49.00 MPa。

综上所述,在棱跌落过程中,虽然瓦楞纸箱的最大等效应力超过了纸板材料的极限应力,但衬垫和打

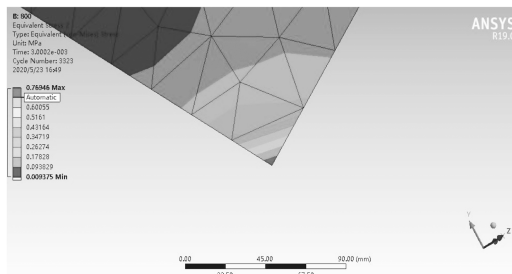
印机的最大等效应力都在安全范围内,特别是打印机的最大等效应力远远小于其材质的极限应力。因此,所设计的缓冲单元在跌落高度为80 cm的棱跌落时,具有较好的缓冲效果。

3) 角跌落仿真分析

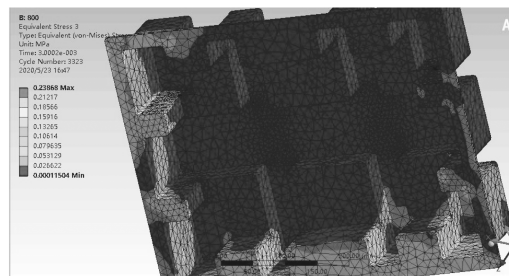
将所建立的缓冲单元模型,以3.93 m/s的初速度在距离接触点1 cm的位置跌落,使缓冲单元的角与地面接触,得到了角跌落状态下打印机缓冲单元各个部件的应力分布云图,如图7所示。



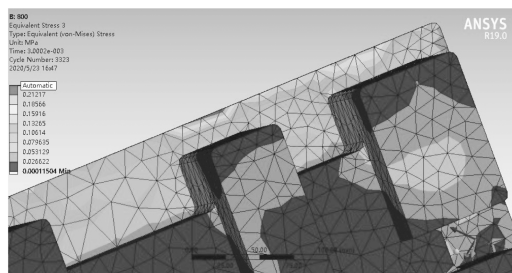
a) 缓冲单元 (一)



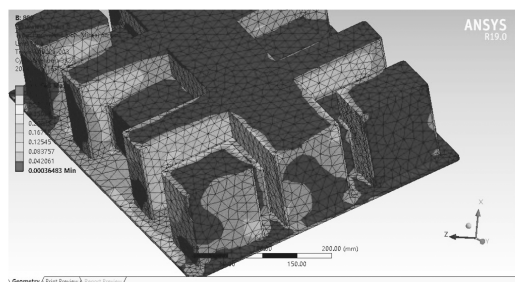
b) 缓冲单元 (二)



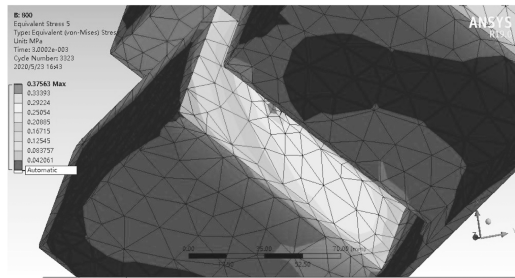
c) 上衬垫 (一)



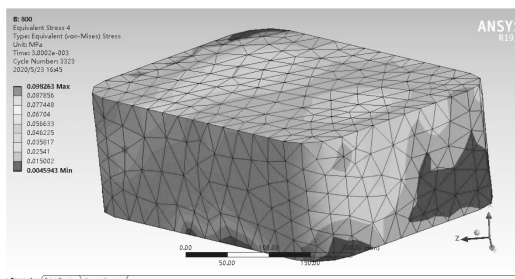
d) 上衬垫 (二)



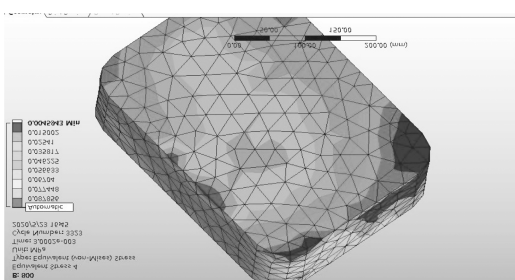
e) 下衬垫 (一)



f) 下衬垫 (二)



g) 打印机 (一)



h) 打印机 (二)

图 7 打印机缓冲单元角跌落应力分布云图

Fig. 7 The stress distribution of printer buffer unit with angle drop

由图 7 可以看出, 瓦楞纸箱的最大等效应力出现在与地面接触的位置, 应力值为 6.25 MPa, 超过了瓦楞纸板的极限应力 2.38 MPa。上衬垫的最大等效应力出现在接触角所对应的侧棱位置, 下衬垫的最大等效应力出现在接触角所在的凹槽底面, 其最大等效应力分别为 0.24 MPa 和 0.38 MPa, 均小于纸浆模塑的极限应力 2.00 MPa, 在角跌落过程中缓冲衬垫安

全可靠。打印机的极限应力出现在底面接触角位置所在的侧棱中下部, 打印机在角跌落时产生 0.11 MPa 的最大等效应力, 远小于 ABS 材料的极限应力 49.00 MPa, 体现出了极高的安全性。

因此, 综合应力分布云图呈现出的应力分布规律, 虽然瓦楞纸箱在角跌落过程中产生的最大等效应力大于其极限应力, 但是缓冲衬垫对打印机表现出了极好的保护作用。在角跌落过程中, 所设计的缓冲衬垫结构起到了缓冲作用, 能够很好地保护打印机。

4 结论

以打印机为研究对象, 设计了缓冲衬垫和缓冲单元结构。对堆码单元进行了静压仿真分析, 堆码单元各个部件的最大等效应力均小于材料的极限应力。在 80 cm 的跌落高度进行自由落体仿真分析, 分别以面、棱和角接触, 根据不同跌落状态的应力分布云图, 得到打印机缓冲单元在面跌落时, 上、下缓冲衬垫和打印机的最大应力值分别为 0.82, 1.21, 0.45 MPa; 角跌落时, 缓冲单元整体的等效应力最大为 6.25 MPa。与各部件材料的极限应力相比, 外包装瓦楞纸箱的最大等效应力 6.25 MPa 超过了瓦楞纸板极限应力 2.38 MPa, 但是打印机和上、下衬垫的最大等效应力均小于其材料的极限应力, 说明缓冲单元对打印机起到了较好的保护作用。为了提高外包装箱的强度和使用性能, 在设计时, 可以适当的增大纸板厚度或者选择缓冲性能更加优异的 AC 瓦楞纸板, 以提高和改善缓冲单元的缓冲效果, 提高储运的可靠性。

参考文献:

- [1] 李 杨, 陈 曲. 基于 ANSYS 的打印机全瓦楞缓冲包装设计 [J]. 包装学报, 2012, 4(2): 37-41.
LI Yang, CHEN Qu. Design of Full Corrugated Cardboard Cushioning Packaging for Printer Based on ANSYS[J]. Packaging Journal, 2012, 4(2): 37-41.
- [2] 徐红艳, 李志强, 樊 博, 等. 侧吸式油烟机包装件的跌落分析及优化设计 [J]. 包装工程, 2020, 41(9): 136-142.
XU Hongyan, LI Zhiqiang, FAN Bo, et al. Analysis and Optimization Design of Side Suction Range Hood Package Drop[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(9): 136-142.
- [3] 何 雯, 陈满儒. 薄型烟机包装实验室测试与跌落仿

- 真分析[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 125-130.
- HE Wen, CHEN Manru. Laboratory Test and Drop Simulation Analysis of Thin-Type Kitchen Ventilator Package[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(3): 125-130.
- [4] 仲 晨, 杨雅碧, 周丽娜. 电商物流包装的研究现状及其展望[J]. 包装学报, 2020, 12(5): 27-34.
- ZHONG Chen, YANG Yabi, ZHOU Lina. The Progress and Prospect of E-Commerce Logistics Packaging[J]. Packaging Journal, 2020, 12(5): 27-34.
- [5] GENG D W, XU W C. Study on Method of Simulating Dynamic Cushioning Performance of Molded Pulp Packaging Pad[J]. Advanced Materials Research, 2010, 174: 510-512.
- [6] 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 Yingwei. Drop Simulation Based on Molded Pulp Cushion of Tablet PC[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(4): 485-490.
- [7] 刘 武, 钟云飞. 三角瓦楞缓冲衬垫设计及缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2020, 41(11): 90-95.
- LIU Wu, ZHONG Yunfei. Design and Cushioning Performance of Triangular Corrugated Cushioning Insert[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(11): 90-95.
- [8] 唐 杰, 肖生苓, 王全亮, 等. 吊灯灯罩纸浆模塑缓冲衬垫跌落仿真[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 69-73.
- TANG Jie, XIAO Shengling, WANG Quanliang, et al. Drop Simulation of Molded Pulp Cushion Pad of Chandelier Lampshade[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 69-73.
- [9] 华 琪. 笔记本电脑用新型纸浆模塑衬垫的结构设计[J]. 安阳工学院学报, 2015, 14(6): 9-12.
- HUA Qi. Structural Design on Molded Pulp Cushion of Notebook PC[J]. Journal of Anyang Institute of Technology, 2015, 14(6): 9-12.
- [10] 田金琛, 钱 怡. 某包装件的有限元建模及动态性能研究[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(4): 1-4.
- TIAN Jinchen, QIAN Yi. Vibration Characteristic Experimental Research and Simulation Analysis of Stew Package[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(4): 1-4.
- [11] 张 伟, 郭彦峰, 郭 引, 等. 一种纸浆模塑包装制品的动态缓冲特性分析[J]. 中国造纸学报, 2015, 30(1): 46-49.
- ZHANG Wei, GUO Yanfeng, GUO Yin, et al. Dynamic Cushioning Analysis on a Kind of Moulded Pulp Structure[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2015, 30(1): 46-49.
- [12] 荣人慧, 肖生苓, 岳金权, 等. 纤维模塑包装材料力学性能指标体系的构建[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 24-29.
- RONG Renhui, XIAO Shengling, YUE Jinquan, et al. Construction of Mechanical Performance Index System of Fiber Molded Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 24-29.
- [13] 王章苹, 张 金. 基于陶瓷瓷碟包装的缓冲结构设计研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(22): 8420-8424.
- WANG Zhangping, ZHANG Jin. Research on Buffer Structure Design Based on Ceramic Dish Packaging[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(22): 8420-8424.
- [14] 王妮睿, 陈景华, 尤 飞, 等. 基于缓冲材料选择的打印机防护包装设计[J]. 包装工程, 2018, 39(7): 126-131.
- WANG Nirui, CHEN Jinghua, YOU Fei, et al. Protective Package Design of Printer Based on Buffer Material Selection[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(7): 126-131.
- [15] 刘 冰. 分体柜式空调机的纸质缓冲包装设计及其仿真分析[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- LIU Bing. Paper Cushion Packaging Design and Simulation Analysis of the Split-Floor Type Air-Conditioner[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [16] 董 静, 李 斌, 侯晓琳. 空调缓冲衬垫有限元分析及优化设计[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 90-94.
- DONG Jing, LI Bin, HOU Xiaolin. Finite Element Analysis and Optimization Design of Air-Conditioner Cushion[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 90-94.
- [17] 孙德强, 石 威, 李 彬, 等. 基于AnsysWorkbench的投影仪运输包装仿真分析[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 11-16.
- SUN Deqiang, SHI Wei, LI Bin, et al. Simulation Analysis of Projector Transport Packaging Based on Ansys Workbench[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 11-16.
- [18] 常 江, 巩 雪. 电饭煲运输包装设计及其跌落仿真分析[J]. 包装学报, 2019, 11(5): 38-43.
- CHANG Jiang, GONG Xue. Design of Transportation Packaging for Electric Cooker and Simulation Analysis of Drop[J]. Packaging Journal, 2019, 11(5): 38-43.

(责任编辑: 邓光辉)

(下转第74页)