基于有限元分析的笔记本纸浆模塑包装方案研究

张书炜,程旺^{*},韦明堂,张倩,张湘钰,黄梦凯

(合肥联宝信息技术有限公司,合肥 230071)

摘要:目的 设计出一款低重量、高栈板量的笔记本电脑纸浆模塑(简称纸塑)包装方案,预估及验证 新方案在跌落测试中对电脑的保护性。方法 结合现有内翻和外翻纸塑方案各自结构的优势,设计出一 种 V 型纸塑方案。基于跌落试验工况建立跌落仿真模型,通过 ANSYS/LS-Dyna 进行仿真分析,得到产 品跌落加速度曲线和纸塑开裂变形图,并进行测试验证。结果 V 型方案在端面、顶面和短棱跌落的加 速度均低于原内翻方案,各工况下 V 型方案无明显开裂,仿真分析与跌落测试结果高度一致。结论 V 型方 案可在跌落测试中对电脑提供充分保护,满足落地条件,具有巨大的经济价值。有限元分析结果精度较 高,可为各机型纸塑包装的开模定形提供依据,降低修模风险。

关键词:纸浆模塑;仿真分析;加速度;纸塑开裂;跌落试验

中图分类号: TB485.3; TB482.2; TB487 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2025)03-0238-07 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.028

Molded Pulp Package for Laptop Computer Based on FEA

ZHANG Shuwei, CHENG Wang^{*}, WEI Mingtang, ZHANG Qian, ZHANG Xiangyu, HUANG Mengkai

(Hefei LCFC Information Technology Co., Ltd., Hefei 230071, China)

ABSTRACT: The work aims to design a low-weight and high-pallet molded pulp package for laptop computer to estimate and verify the protection of the new scheme for the computer in the drop test. Combined with the advantages of the structures in the existing inward and outward package schemes, a V-shaped molded pulp scheme was designed. Based on the drop test conditions, a drop simulation model was established. Through ANSYS/LS-Dyna simulation analysis, the product drop acceleration curve and the molded pulp cracking stress diagrams were obtained. The V-shaped scheme had lower drop acceleration on the side face, top surface, and short edges compared to the original inward scheme. The V-shaped scheme had no cracking under various test conditions. The simulation results were highly consistent with the drop test results. The V-shaped scheme can provide full protection for the computer in the drop test, meet the landing conditions, and has great economic value. The results of finite element analysis have high accuracy, which can provide a basis for the opening and setting of molded pulp packaging of various models and reduce the risk of mold repair. **KEY WORDS:** molded pulp; simulation analysis; acceleration; cracking; drop test

现有笔记本电脑包装缓冲件多为发泡塑料和纸 塑制品。纸塑是以纸张(如废弃瓦楞纸板、报纸边等) 或其他天然植物纤维为原料经制浆、模塑成型和干燥 整型等工艺过程制成的纸制品。纸塑制品具有优良的 防震、抗压、无污染、可自然降解、多种颜色选择、 可叠加性,以及便于运输等特性^[1]。随着限塑和节能 减排的影响,纸塑缓冲件的占比逐年提升。纸塑制品 的缓冲性能是基于制品结构的变形和单元结构之间 的相互作用,因此制品的结构参数将影响制品的缓冲 性能^[2]。但因制模和修模周期长、费用高,无法通过 传统反复设计和测试的方法为纸塑定型。

有限元分析可模拟电脑和包装的整个跌落测试 过程,通过分析电脑部件和纸塑的应力、应变,机器 的 g 值, 以及纸塑的开裂情况等, 预测纸塑对电脑的 保护效果,为纸塑的定型提供依据。张业鹏^[1]运用 ANSYS/LS-Dyna 软件,对3种典型纸塑空腔进行了 动态冲击仿真分析,给出了典型结构的使用范围。何 艳萍^[2]从产品包装的具体要求出发,设计一种现在常 用的两头折叠式纸塑衬垫。傅妍等[3]通过对纸塑缓冲 机理的分析,总结出纸塑的缓冲结构设计要素,并对 纸塑制品在运输包装中的缓冲结构进行了优化设计。 宋姝妹^[4]通过试验分析和计算机模拟,对组合式纸塑 衬垫的静态和动态缓冲性能进行了对比研究。程生等[5] 在研究汽车动力电池包底部球击失效过程中,基于 GISSMO 材料断裂准则,采用 ANSYS/LS-Dyna 软件 预测动力电池包动力学分析中裂纹产生、材料失效问 题。Otroshi等^[6-9]对GISSMO的损伤参数进行了研究, 将元素删除与元素尺寸和实验获得的载荷降相关联。

本研究通过总结对比现有笔记本电脑用纸塑结构的优劣,提出一种全新的缓冲结构。经过有限元仿 真,预测在特定试验条件下纸塑包装对产品的保护性 和纸塑包装材料开裂情况,为开样品模提供科学依 据。最后通过对样品的跌落测试,进一步验证了新结构的优势,有限元模型的准确性,为新结构的量产打 下了基础。

1 笔记本电脑用纸浆模塑

现有笔记本电脑用纸塑总体分外翻、内翻、礼盒 等,如图1所示,各方案优劣势如下。

1)外翻因各腔室结构简单、纸塑总体宽度较小, 从而有利于货柜栈板量的提升,单台机器运输成本较低。因外翻方案受拔模斜度的影响,限制了纸塑的高度,导致机器在2个纸塑间有大面积悬空,纸塑对机 器的保护较小,机器在跌落测试中易变形,一般用于 质量<1.5 kg 的机型。

2)采用内翻结构的机器,2个纸塑的折耳间距 可控,电脑两端悬空较少,对电脑的保护效果优于外 翻方案,多用于质量<2 kg的机型。因结构受窄位的 影响,限制了纸塑的总体宽度,货柜的栈板量低于外 翻结构,单台机器的运输成本较高。同时窄面区域的 凸台有2层纸塑起缓冲作用,导致大面跌落测试时, 机器的g值一般大于外翻方案。

3) 礼盒式又分翻盖式或上下盖分离式,可对电脑 进行全面覆盖,保护性能最优,多用于重机型。因礼盒 的面积较大,而模具的面积有限,量产时多为一模一穴 或一模两穴,生产效率较低,导致制造成本较高。因礼 盒质量更大,进一步增加了采购成本。同时礼盒的宽度 最大,栈板量无竞争优势,单机运输成本最高。

因上述方案各有劣势,亟需一款低悬空、高保护性, 低宽度、高栈板量、低运输价格,小质量、低采购成本 的纸塑。基于外翻方案的低宽度,以及内翻方案的大保 护面积,新方案(命名为 V 型方案)采用内翻设计, 同时采用外翻方案主体型腔结构,如图 2 所示。

V形方案优劣势如下。

1)采用内翻设计,2个纸塑的折耳间距可控, 满足高保护性的要求。

2)同时采用开放式型腔设计,6个面独立受力, 连续跌落时,工况之间互不影响,能有效降低纸塑的 溃缩和破裂,防护性能优于内翻结构。

3)纸塑总体刚度低于外翻和内翻方案,可降低 电脑在大面跌落测试的 g。

4)如图 3 所示的 V 型方案,去除内翻方案窄位 结构,可降低方案整体宽度,增加栈板量。

5) V型方案宽度较小,量产模具可增加模穴数, 生产效率与外翻和内翻方案持平或更优。

以某机型为例,经有限元分析及综合考虑,最终 采用内翻方案。为了进一步增加机器栈板量,降低纸 塑质量,准备采用 V 型方案作为下一代机型备选方 案,3 种纸塑特性和栈板量设计参数见表 1。若采用



图 1 纸浆模塑种类 Fig.1 Types of molded pulp



图 5 截面小息图 Fig.3 Schematic diagram of cross section

表 1 不同方案特性和栈板量 Tab.1 Characteristic and pallet parameters of different schemes

方案	厚度/mm	宽度/mm	质量/g	栈板量/台
外翻	1	69	68	99
内翻	1	76	76	90
V 型方案	1	73	66	108

 Ⅴ型方案,纸塑质量比内翻方案降低 3.9%,栈板量 比内翻方案增加 20%,可大幅降低单机运输成本。为 了进一步预测 Ⅴ型方案对机器的保护性能,减少修 模风险,特引进有限元分析,进一步研究 Ⅴ型方案。

以上述机型的跌落测试为研究对象,对比机器采用内翻和 V 型方案的 g,纸塑的开裂情况,为 V 型方案的开模定型提供依据。

2 建立有限元模型

2.1 模型简化

进行跌落测试时,为控制风险,一般先采用 ABS 材质的仿制模进行测试,待测得仿制模的 g 值满足设 计要求,且纸塑的开裂在可接受范围内,再使用真机 进行跌落测试。该仿制模为使用 ABS 制造的模型, 保留整机的外观特征,通过开孔增加钢块配重或者开 槽去除材料,保证模型质量与真机一致。为了缩减建 模工作量,加快分析速度,快速完成 V 型方案的设 计迭代,本研究采用仿制模进行跌落分析。整体包装 件由外纸箱、纸塑缓冲衬垫、产品、附件盒以及附件 组成。建模时,首先用 Creo 软件对笔记本电脑的几 何模型进行简化处理,主要对仿真分析结果影响较小的一些小零件或结构工艺特征进行简化,如<0.1 mm的倒角、圆孔、圆角、凸台等。

2.2 网格划分及单元类型

本次案例首先把电脑外观面缝合成一个密闭腔体,然后使用四面体网格生成实体单元,用于模拟电脑。抽取纸塑和瓦楞纸采的抽取中面,并采用二维shell单元(壳单元)进行划分。为增加纸塑的缓冲效果,在电脑下端设有如图 4a 所示的凸台和实体支撑柱。支撑柱主体厚 5 mm,为纤维堆积而成,主体与凸台间通过倒圆角过渡。为提高分析效率,同样采用壳单元模拟限位柱,对不同区域的单元赋予不同厚度,如图 4b 所示的凸台与限位柱网格不同颜色代表不同的厚度。在跌落的仿真求解计算中,网格的划分质量将对计算效率和精度有较大影响,因此高质量的网格划分是确保仿真精度的前提条件,待网格划分完成,检查网格质量,最小尺寸>0.2 mm、长宽比<5、最小角度 15°、最大角度 140°、skewness 0.1^[10-12]。



a 凸台与限位柱几何

b 凸台与限位柱网格

图 4 凸台与限位柱 Fig.4 Boss and limit pillar

2.3 材料参数设定

因采用 ABS 的仿形模进行跌落分析,主要材质 有 PC/ABS、瓦楞纸等,材料均简化成线弹性材料或 简单弹塑性材料,具体的参数设置见表 2。

表 2 产品及包装件主要材质参数 Tab.2 Materials parameters of product and package

材料	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服应力/ MPa
ABS	1 180	2 700	0.37	35
瓦楞纸	225	200	0.34	—

纸塑的制造工艺一般分干压和湿压 2 种, 文中提 及的纸塑件采用干压工艺生产, 具有成本低、强度较 低、易开裂的特点。简单的线弹性材料模型无法模拟 纸塑的开裂问题, 因此, 纸塑缓冲的材料属性对整个 跌落仿真分析起到至关重要的作用。本研究使用海达 公司生产的电脑伺服式万能材料试验机, 对纸塑材料

加速度g

• 241 •

进行准静态拉伸试验,测得干压纸塑的应力应变,其 曲线如图 5 所示。

纸塑开裂长度是跌落试验的判定标准之一;准确 预测纸塑的破坏,对设计方案的定型评估具有十分重 要的作用。本研究采用可考虑材料在不同受力状态下 不同失效应变值、非线性应变路径成形及非线性损伤 积累方式的 GISSMO 模型,作为失效本构模型,综合 考虑材料在不同应力三轴度下的累积损伤。



图 5 纸塑应力-应变曲线 Fig.5 Stress-strain curve of molded pulp

2.4 跌落工况设定

笔记本电脑质量一般为 0.8~3.5 kg,根据公司跌 落测试标准,总质量在 0~10 kg 的机器,使用 910 mm 高度进行 1 角 3 棱 6 面的跌落测试。在跌落测试中, 一般测得大面跌落时机器的 g 值最大;顶面、底面以 及短棱跌落时,纸塑主体易开裂;端面跌落时,纸塑 折耳部位易开裂。研究取端面、顶面、短棱跌落进行 仿真计算,其余跌落工况不再考虑。建立的跌落仿真 模型如图 6 所示,图中隐藏了瓦楞纸箱的模型。

3 CAE 分析结果

3.1 加速度对比

本次案例中,采用 LS-Dyna 作为求解器。为了提高计算效率,计算时忽略模型自由下落的过程。根据 速度 v,重力加速度 g 和自由落体高度 h 之间的关系 $v=\sqrt{2gh}$,求出机器从 910 mm 的高度落下,与地面 接触瞬间的冲击速度为 4 223 mm/s,并赋予模型初始 速度^[13]。面跌计算 12 ms,棱跌计算 20 ms,提取 Dummy 模型上某个固定点的加速度,得如图 7 所示 的跌落加速度曲线,其最大加速度值见表 3。从表 3 可知,3种工况下,V型方案的最大加速度均小于内 翻方案,V型方案对电脑的保护更好。



图 7 加速度曲线 Fig.7 Acceleration curves

表 3 加速度对比 Tab.3 Comparison of acceleration

方案	端面跌落 g	顶面跌落 g	短棱跌落 g
内翻方案	128.6	111.8	62.4
V 型方案	112.7	109.2	57.9

3.2 纸塑应力及开裂对比

各工况下纸塑的 Von-Mises 应力云图如图 8 所 示,红色区域应力>12 MPa。通过 GISSMO 模型模拟 出纸塑的开裂情况,根据该模型,应力最大的位置不 一定是破裂失效的位置。在端面跌落中,如图 8a 所 示的内翻方案纸塑折耳开裂约 24 mm,其值低于公司 单处开裂的标准值,判定为通过跌落测试。如图 8b 所示的 V 型方案设有 2 个缓冲凸台,缓冲效果优于 内翻方案,纸塑无明显开裂。在顶面跌落中,内翻方 案和 V 型方案均无明显开裂,如图 8c 和图 8d 所示。 在短棱跌落中,内翻方案纸塑开裂约为 18 mm,开裂 位置如图 8e 所示。如图 8f 所示的 V 型方案拐角区域 同样使用限位柱,纸塑无明显开裂。

因采用不同厚度的网格模拟限位柱与主体间的 圆角,导致限位柱与主体连接区域有如图 7b 所示的 几毫米开裂,分析结果与实物有一定偏差,此处开裂 予以排除。

进一步统计 2 种方案在各跌落工况的缓冲高度 和电脑最小离地间距,得表 4 的纸塑压缩率对比数 据。从表 4 可知, V 型方案的初始缓冲高度均小于内 翻方案,所需纸箱的体积低于内翻方案,证实了 V 型方案可提升栈板量。另外, V 型方案纸塑的压缩率 低于内翻方案,且各跌落工况下 V 型方案无明显开 裂,说明 V 型方案纸塑的结构强度优于内翻方案。 此机型质量为 1.55 kg, V 型方案主体采用 1 mm 的纸塑,在单工况跌落分析中几乎无开裂;可进一 步降低纸塑厚度,达到纸塑减重的目的。V 型方案采 用小凸台作缓冲结构,凸台四周均可设限位柱,从 而增加纸塑的缓冲性能,并开发应用在重机型上^[14]。 另外, V 型方案在易开裂区域的结构面积较小,无大 裂纹形成的空间,进一步增加了应用在重机型上的 可行性。

4 仿真与实物测试结果对比

通过样品模具制造的V型方案样品如图9a所示, 进行整机的跌落试验。试验采用如图9b所示的跌落 机,该设备是CY-206翻板式跌落试验机,数据采集 设备由莱斯蒙特公司的Test Partner 3信号采集分析 系统和 PCB Piezotronics公司356A24三向压电加速 度传感器组成,测试过程中,加速度传感器紧贴于 Dummy 模背面。参考 GB/T 4857.5—1992《包装运 输包装件跌落试验方法》^[15]依次进行1角3棱6面 的跌落,完成测试,对产品的外观和功能进行检查, 并取端面、顶面和短棱的跌落加速度试验数据与仿真 数据进行对比。

完成跌落试验,纸塑无明显开裂,易开裂区域结 果如图 9c 所示。试验采集的端面、顶面和短棱的跌 落加速度曲线如图 10 所示,图 10 只保留加速度峰值 区域的测试数据,以便对比。其峰值分别为 103.2g、 120.3g 和 61.4g,与仿真计算的加速度峰值误差分别 为 9.21%、9.22%和 5.70%。误差可能是因为在试验 中的 Dummy 模开有配重孔,仿真模型与实际包装件 有一定差异。但综合考虑加速度曲线的脉宽和整体趋 势,该仿真模型能较好地反映整个实际跌落过程。因 此,综合考虑该模型是有效并可靠的。



图 8 纸塑应力云图 Fig.8 Stress cloud map of molded pulp

表 4 纸型压缩举刈比 Tab.4 Comparison of molded pulp compression ratios						
跌落工	况	缓冲高度/ mm	最小离地 间距/mm	压缩率/ %		
端面跌落	内翻	29.6	15.9	46.3		
	V 型	28.7	17.1	40.4		
顶部跌落	内翻	32.9	15.2	53.8		
	V 型	28.7	15.9	44.6		
短棱跌落	内翻	44.5	15.4	65.4		
	V 型	41.6	17.2	58.7		





b 测试 c 纸塑局部测试图







5 结语

以模型号笔记本电脑用纸塑缓冲包装结构件为研究对象,对新旧设计方案进行了详细说明,并使用ANSYS/LS-Dyna 对笔记本 Dummy 模进行跌落对比分析。分析结果表明,新一代纸塑方案可有效降低电脑受到的跌落冲击g值,纸塑几乎无开裂,有进一步降低纸塑厚度,以及应用到重机型的开发空间。采用样品模生产的纸塑包装对电脑进行跌落测试,并与仿

真结果进行对比,表明此款笔记本电脑的有限元建 模、分析以及新的纸塑方案能为实际生产提供可靠依 据。纸塑 V 型方案已申请专利,适用产品范围由 0~2 kg 提升到 0~4 kg,防护性能优异。V 型方案可在 2024 年 10 多款机型上全面落地,其中 7 款纸塑已打样并 通过真机振动和跌落测试,其余款式纸塑正根据机型 开发节点推进。与内翻方案相比,V 形纸塑宽度平均 减小 12%,质量减少 5%,栈板装载量提升 7.0%~ 19.0%,采购成本和物流成本大幅降低。预计可在 2024 年减碳 3 078 t,节省物流费 216 万美元。

参考文献:

- 张业鹏. 纸浆模塑包装结构的缓冲性能及其可靠性研 究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
 ZHANG Y P. Study on Cushioning Performance and Reliability of Pulp Molded Packaging Structure[D].
 Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [2] 何艳萍. 笔记本电脑纸浆模塑缓冲包装结构设计及测 试[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
 HE Y P. Structural Design and Test of Pulp Molding Cushioning Packaging for Notebook Computer[D].
 Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- [3] 傅妍,杨延梅. 纸浆模塑在运输包装中的缓冲结构优 化设计[J]. 包装与食品机械, 2007, 25(1): 22-25.
 FU Y, YANG Y M. The Optimal Design on Cushioning Structure of Molded Pulp Products in Transport Packaging[J]. Packaging and Food Machinery, 2007, 25(1): 22-25.
- [4] 宋姝妹. 组合式纸浆模塑结构的缓冲性能及其计算机 模拟[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
 SONG S M. Cushioning Performance of Combined Pulp Molding Structure and Its Computer Simulation[D].
 Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [5] 程生, 吕希祥, 韦助荣. 基于 LS-DYNA 动力电池包 底部球击失效分析[J]. 南昌大学学报(工科版), 2023, 45(3): 282-287.

CHENG S, LYU X X, WEI Z R. Failure Analysis of Power Battery Pack Bottom Ball Hit Based on LS-DYNA[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2023, 45(3): 282-287.

- [6] OTROSHI M, ROSSEL M, MESCHUT G. Stress State Dependent Damage Modeling of Self-Pierce Riveting Process Simulation Using GISSMO Damage Model[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2020, 1: 100015.
- [7] HEIBEL S, NESTER W, CLAUSMEYER T, et al. Influence of Different Yield Loci on Failure Prediction with Damage Models[J]. Journal of Physics: Conference

Series, 2017, 896: 012081.

- [8] XIAO Y, HU Y M. Numerical and Experimental Fracture Study for 7003 Aluminum Alloy at Different Triaxialities[J]. Metals and Materials International, 2021, 27(8): 2499-2511.
- [9] LEE S K, LEE J S, SONG J H, et al. Fracture Simulation of Cold Roll Forming Process for Aluminum 7075-T6 Automotive Bumper Beam Using GISSMO Damage Model[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 751-758.
- [10] 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 J, XIAO S L, WANG Q L, et al. Drop Simulation of Molded Pulp Cushion Pad of Chandelier Lampshade[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 69-73.
- [11] 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 Q, HUANG Y W. Drop Simulation Based on Molded Pulp Cushion of Tablet PC[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(4): 485-490.
- [12] 廖泽顺. 纸浆模塑成型工艺及模具结构优化设计[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.

LIAO Z S. Pulp Molding Process and Die Structure Op-

timization Design[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016.

- [13] 程旺,张谷峰,王海波,等.基于落球实验的冰箱钢板门护板优化设计与分析[J].安徽建筑大学学报,2020,28(6):90-95.
 CHENG W, ZHANG G F, WANG H B, et al. Optimal Design and Analysis of Refrigerator Steel Door Baffle Based on Falling Ball Experiment[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2020, 28(6): 90-95.
- [14] 付志强, 李芸, 杜昱雯, 等. 纸浆模制波状结构缓冲性 能的仿真影响因素[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 34-39.
 FU Z Q, LI Y, DU Y W, et al. Influence Factors of Simulation on Testing the Cushioning Performance of Molded Pulps with Bi-Wave Structure[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(21): 34-39.
- [15] 黄雪,李建华,熊才启,等.包装 运输包装件 跌落 试验方法:GB/T 4857.5—1992[S].北京:中国标准出 版社,1992.
 HUANG X, LI J H, XIONG C Q, et al. Packag-

ing-Transport Packages-Vertical Impact Test Method by Dropping: GB/T 4857.5-1992[S]. Beijing: Standards Press of China, 1992.