

第四届军品防护与包装发展论坛专栏

基于Ansys的拼装箱力学性能研究及优化设计

宋海燕¹, 杨帆¹, 王斌²

(1. 天津科技大学, 天津 300457; 2. 耐帆包装工程有限公司, 廊坊 065001)

摘要: **目的** 研究拼装箱有限元模型的建模方法和结构参数对力学性能的影响。 **方法** 以某胶合板拼装箱为研究对象, 采用有限元软件平台 Ansys 建立该拼装箱的有限元模型, 并通过跌落试验验证该模型应用于拼装箱力学性能仿真的可行性。在此基础上, 对拼装箱的3个设计参数(钢边的厚度、胶合板厚度、胶合板材质)分别进行动态跌落测试和静态堆码实验的仿真分析。其中钢边厚度分别是0.4, 0.8, 1.2 mm; 胶合板厚度分别是6, 8 mm; 胶合板材质为杨木、桦杨木和桦桉木。 **结果** 通过动态和静态数值仿真分析, 采用6 mm 桦杨木胶合板, 同时保持钢边为0.8 mm 厚度的镀锌钢为最优方案。 **结论** 采用 Shell 163 薄壳单元模拟钢边和胶合板, 并用 Solid 164 实体单元模拟托盘的拼装箱建模方案是可行的。结果应用于拼装箱优化设计中, 可得到满足要求且成本最低的方案设计。

关键词: 拼装箱; 力学性能; 优化; 跌落测试; 仿真

中图分类号: TB482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)03-0025-05

Mechanical Properties and Optimization Design of Splice Box Based on Ansys

SONG Hai-yan¹, YANG Fan¹, WANG Bin²

(1. Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
2. Nefab Packaging Engineering Co., Ltd., Langfang 065001, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the finite element modeling method of the splice box and the effect of structural parameters on the mechanical properties. Using the finite element software platform Ansys, the finite element model of the plywood splice box was established, and the feasibility of the model in simulation of mechanical property of splice box was verified by the drop test. On this basis, simulation analysis of the dynamic drop test and static stacking test was conducted by changing three design parameters of the splice box (steel strip thickness, plywood thickness and plywood material). The steel strip thickness was 0.4, 0.8, 1.2 mm; the plywood thickness was 6 and 8 mm respectively; the plywood materials were poplar, birch & poplar, birch & eucalyptus. The dynamic and static numerical simulation analysis revealed that the 6 mm birch poplar plywood together with galvanized steel with a steel edge of 0.8 mm thickness was the optimal solution. The splice box modeling method of using Shell 163 thin shell element to simulate steel and plywood, and Solid 164 solid element to simulate tray box was feasible. The results were applied to the optimization design of the splice box, and the design scheme meeting the requirements and with the lowest cost was obtained.

KEY WORDS: splice box; mechanical properties; optimization; drop test; simulation

随着我国经济发展,胶合板拼装箱以其巨大的优势在运输包装领域获得极大的发展,具有广阔的应用前景。如何设计出应用性强、成本低的拼装箱具有重

要的现实意义。将有限元仿真应用到拼装箱的设计中,对其产品包装进行跌落碰撞过程的数值模拟,分析位移、应力应变等,可获得对于产品来说安全,对企

收稿日期: 2015-08-22

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2015BAD16B05);天津食品安全低碳制造协同创新中心资助项目

作者简介: 宋海燕(1977—),女,辽宁人,博士,天津科技大学副教授,主要研究方向为物流运输包装技术。

业来说可靠,对生产企业来说经济的包装解决方案,从而省去测试的风险与时间,为企业节省开发周期并且降低了成本。

国外, Y.Y.Wang等^[1-2]使用有限元方法模拟了电子产品包装件的跌落过程,并且对内部的电子产品进行了破损分析,找到最有可能发生破损的电子元件。N.J.Mills等^[3]通过有限元方法,测试和分析了聚乙烯泡沫在包装跌落时的缓冲情况。通过比较2种聚乙烯泡沫缓冲的设计,得出外层的瓦楞纸板箱对跌落的影响不大,而垫脚设计能更有效地减少峰值加速度对产品的影响。Macro Anghileri等^[4]通过采用有限元法、Euler法、ALE法、SPH法对水箱内的水晃动进行了模拟,研究水箱的跌落。结果显示采用有限元法能够最灵活地研究对于水箱结构破坏,而采用SPH模型来研究对于水晃动分析是最理想的,不过所需要的CPU计算时间较长。John Hoffmann^[5]研究了在不同产品重量、跌落高度以及堆码情况下怎样能设计出最优化的纸浆模塑产品的方法,以及纸浆模塑产品的缓冲和抗压的性能。Irving S等^[6]模拟包装物品的跌落并且通过使用LS-DYNA软件得到了峰值加速度。K.H.Low^[7-9]通过使用MSC.Patran软件,且基于Hertz's理论对整个模型进行了优化设计,模拟了带有缓冲包装的电视机的自由跌落过程,并提出了GL分析方法。

国内,熊建友等人^[10]对手机在人们使用的过程中可能会遇到的跌落情况进行了仿真,并应用Ansys/LS-DYNA动态有限元软件,采用量化指标模拟了产品受到冲击情况。华丽^[11]对洗衣机运输包装件进行跌落仿真,利用Ansys/LS-DYNA软件,把整个洗衣机模型设置成为一个研究对象,模拟洗衣机运输包装件在面跌落的情况下的应力、应变的规律,验证了洗衣机运输包装件进行三层的堆码放置是安全合理的。郭彦峰等^[12]使用VB语言、Matlab/Simulink仿真工具进行了Windows操作系统下缓冲包装系统仿真,研究了计算机仿真缓冲包装系统流程、仿真模型的建模理论及方法,使得缓冲包装结构及尺寸更加优化。邢亚从等^[13]应用电路板组件的跌落仿真设计,研究了冲击载荷以及不同边界条件下PCB板组件的动态响应。祖景平等^[14]使用CAE工具深入研究了分析有没有加强筋和有不同厚度的加强筋对手机壳体强度和刚度的影响,从动力学角度获得了手机壳体加强筋厚度设计的参考数据。孙德强等^[15]采用有限元分析了六边形蜂窝芯材异面类静态压缩载荷的数值模拟方法及相关力学行为。

文中针对某公司提供的胶合板拼装箱,基于有限

元软件Ansys/LS-DYNA进行动态跌落模拟,利用Ansys静力分析模块进行静态堆码实验模拟,分别从动态和静态承载能力两个方面对拼装箱进行优化设计,得到满足要求且成本最低的方案设计。

1 实验

1.1 材料

实验所用胶合板为桦桉木胶合板、桦杨木胶合板、杨木胶合板,由合作企业提供。编号1,2为桦桉木,厚度分别为8,6 mm,编号3,4为桦杨木,厚度分别为8,6 mm,编号5,6为杨木,厚度分别为8,6 mm。胶合板拼装箱由合作企业提供的标准胶合板拼装箱。

1.2 仪器与设备

仪器和设备:3369电子万能材料试验机,美国INSTRON公司;QR3000跌落试验机,美国Lansmont公司;TP3-ETC冲击、跌落瞬态数据采集和分析系统,美国Lansmont公司;WBZ-100压力试验机,济南瑞普机电技术有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 胶合板物理性能测试

按照GB/T 17657—1999《人造板及饰面人造板理化性能实验方法》中的相关要求,获得弹性模量与静曲强度。

1.3.2 拼装箱跌落试验

按照GB/T 4857.5—92《包装运输包装件跌落试验方法》以及GB/T 21599—2008《危险品包装跌落试验方法》中的相关要求,进行。跌落高度为1.8 m。

1.3.3 拼装箱压力试验

按照GB/T 4857.5—92《包装运输包装件压力试验方法》中的相关要求,进行。

1.3.4 拼装箱有限元模型建立及验证

1.3.4.1 拼装箱有限元模型建立

首先建立三位实体模型,连接钢边和胶合板厚度方向的尺寸相对于长度和宽度而言很小,只需建立面并用Shell 163单元来模拟即可。托盘顶板、垫块以及托盘底板较厚,用Solid 164单元模拟,箱内货物用Mass 166单元模拟。然后采用映射网格划分方法,箱体采用四边形网格单元,钢边的网格划分采用四边形单元,托盘采用六面立方体网格单元。

1.3.4.2 接触关系设置

连接钢边和胶合板之间的连接效果通过 Ansys/LS-DYNA 的绑定约束来实现,而局部连接舌结构复杂,故需要对其进行简化,采用节点耦合(CP命令)来模拟连接舌的固定效果。

1.3.4.3 拼装箱跌落仿真边界条件的设定

初始跌落高度为 1.8 m,初始速度为 0,转化定义为初始速度 5.93 m/s,最低点距离地面 0.01 m。模拟时间为 100 ms,重力加速度设置为 9.81 m/s。对于跌落分析定义的接触关系,定义为自动单面接触。采用 4 个均匀分布在底部胶合板上的 Mass 166 单元来模拟箱体内部的货物,每个质量单元的质量为货物总质量的 1/4。

1.3.5 钢边厚度仿真分析及优化设计

选取 8 mm 厚度桦桉木胶合板箱,对 0.4, 0.8, 1.2 mm 等 3 种不同厚度的镀锌钢边进行仿真分析,通过动态跌落分析和静态堆码分析来确定合适的钢边厚度。根据金属材料手册,镀锌钢材的弹性模量为 200 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 250 MPa,切线模量为 100 GPa,采用 BISO 双线性各向同性强化本构模型来模拟其塑性行为。

1.3.6 胶合板厚度、材质仿真分析及优化设计

对 3 种材料分别取 2 种厚度的胶合板进行优化仿真,从胶合板的材料和厚度两方面考虑优化设计。对动态跌落高度为 1.8 m,45 度棱跌落工况进行仿真,同时对各个方案中箱体的抗压能力进行仿真,并且模拟堆码状态时的受力情况,根据 Von Mises 屈服准则判定优化方案的可行性。仿真方案见表 1,各方案均为 45 度棱跌落、平压承载。

表 1 仿真分析及优化设计方案

Tab.1 Simulation analysis and optimization design scheme of plywood material

优化方案	胶合板材料	箱体厚度/mm
1	桦桉木	6
2	桦杨木	8
3	桦杨木	6
4	杨木	8
5	杨木	6

2 结果与讨论

2.1 胶合板物理性能测试

通过胶合板物理性能测试,得到了 6, 8 mm 厚度

的桦桉木、桦杨木、杨木胶合板的密度、弹性模量和静曲强度,见表 2。该材料属性数据为建立正确的有限元模型提供了真实的数据依据,使得仿真模拟结果更加真实可靠。

表 2 胶合板物理性能测试结果

Tab. 2 Test results for physical properties of plywood

树种	厚度/mm	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa
桦桉木	8	626.3	6428	55.1
桦桉木	6	627.1	6371	53.9
桦杨木	8	597.5	5524	47.7
桦杨木	6	580.1	5386	46.8
杨木	8	567.4	4718	38.8

2.2 有限元模型建立及验证

建立的有限元模型见图 1。基于图 1 的有限元模型,利用 Ansys/LS-DYNA POST26 时间历程后处理器,可以获得测试节点(与实际实验固定加速度传感器位置相同)的加速度-时间曲线,得到测试节点最大加速度为 1080 m/s²,约 110g,而实际实验测得最大加速度为 121g,误差为 9.1%。此外,实验和仿真计算所得的响应曲线波形基本一致,说明建立的模型可用于后续优化设计。

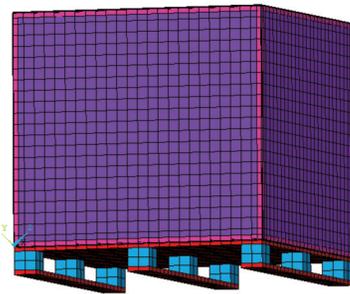


图 1 拼装箱有限元模型

Fig.1 The finite element model of the splice box

2.3 钢边厚度仿真分析及优化设计

分别对 0.4, 0.8, 1.2 mm 厚钢边拼装箱进行仿真计算,结果见图 2。随着钢边厚度的增加,拼装箱的承载能力,包括放置于拼装箱内部物体的动态跌落载重,以及放置于拼装箱上表面的堆码静态载重均明显提高。0.4 mm 厚度的钢边承载能力低,当采用 0.8 mm 厚度钢边时,动态载重及堆码静态载重能力分别提高了 350% 和 100%,当钢边厚度从 0.8 mm 提高到 1.2 mm 时,动态及静态载重能力分别提高 44% 和 33.8%。可

见,0.8 mm 钢边相比0.4 mm 钢边优势极其明显,而1.2 mm 钢边成本较高,且效率提升并不高,所以综合考虑承载能力及成本因素,选择0.8 mm 钢边作为拼装箱的钢结构连接件。在某些特殊场合,比如多层堆叠的情况,需要使用1.2 mm 厚度的钢边才能保证最底层拼装箱的强度要求。

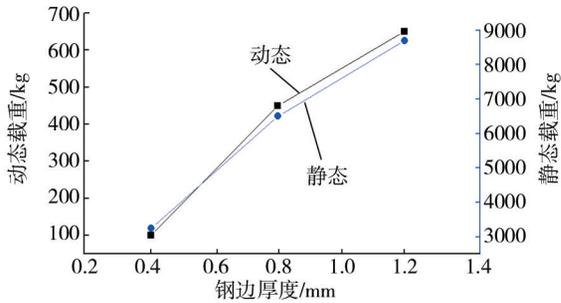


图2 不同钢边厚度的拼装箱仿真计算结果

Fig.2 The simulation results of splice box with different steel strip thickness

2.4 胶合板厚度、材质仿真分析及优化设计

2.4.1 跌落冲击仿真

1.8 m 高度跌落,在0.8 mm 厚度钢边所能承受的450 kg 动态载荷的情况下,跌落过程中应力最大时刻拼装箱的等效应力云图见图3,各方案的跌落仿真结果分析见表3。

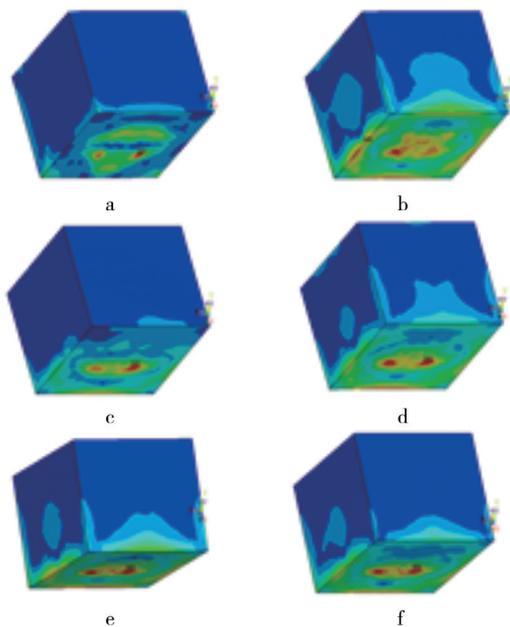


图3 拼装箱跌落冲击等效应力

Fig.3 Equivalent stress contours of the splice boxes at drop impact

由图3和表4可以看出,杨木胶合板的强度较低,

表3 各优化方案跌落仿真结果

Tab.3 Results of drop simulation of different optimization schemes

方案	胶合板材质	箱体厚度/mm	Mises 等效应力/MPa	屈服强度/MPa
原方案	桦桉木	8	25.8	55.1
优化方案1	桦桉木	6	30.9	53.9
优化方案2	桦杨木	8	34.3	47.7
优化方案3	桦杨木	6	40.4	46.8
优化方案4	杨木	8	41.9	38.8
优化方案5	杨木	6	44.9	37.9

方案4和方案5的跌落仿真结果的等效应力均超过了材料的屈服应力,表明箱子在此种跌落条件下将会很不安全,因此使用杨木胶合板作为替换材料不能满足要求;方案2和方案3的桦杨木拼装箱在跌落仿真结果中,等效应力未超过材料的屈服强度,因此可以成为替代的材料,虽然方案2和方案3在强度方面均满足跌落要求,但从成本考虑,箱体厚度为6 mm 时可以比8 mm 厚度箱体节省约33%的材料消耗,因此认为方案3优于方案2;方案1是将桦桉木胶合板厚度由8 mm 变为6 mm,依然可以满足跌落的强度要求。

表4 各优化方案堆码仿真结果

Tab. 4 Results of stacking simulation of different optimization schemes

方案	胶合板材料	箱体厚度/mm	等效位移/mm	Mises 等效应力/MPa	屈服应力/MPa
原方案	桦桉木	8	1.68	22.5	55.1
优化方案1	桦桉木	6	2.46	32.7	53.9
优化方案2	桦杨木	8	1.72	23.6	47.7
优化方案3	桦杨木	6	2.32	34.2	46.8
优化方案4	杨木	8	1.92	28.2	38.8
优化方案5	杨木	6	2.78	35.7	37.9

此次优化设计的目的是为了寻找满足同等跌落强度条件下可以替代桦桉木的廉价材料,以节约成本。原方案拼装箱的材料是桦桉木,箱体厚度为8 mm,但桦桉木胶合板的价格较高,市场上同体积桦桉木胶合板的价格较桦杨木胶合板贵约50%,因此采用桦杨木胶合板替代桦桉木胶合板制作拼装箱可以大大降低成本。综合考虑,最优的解决方案是优化方案3,即以6 mm 桦杨木胶合板替代8 mm 桦桉木胶合板。

2.4.2 静压仿真

在25 kN 堆码静态载荷作用下,胶合板的等效最大

应力云图见图4,各方案的仿真结果分析见表4。可以看出,5种优化方案的等效应力均未超过材料的屈服应力,因此认为各个方案均满足堆码要求,从变形量看出,箱体越厚变形越少,最大变形量为2.78 mm。从优化方案1到优化方案5,胶合板的屈服强度逐渐减小,但最大 Mises 应力却逐渐增大,其中优化方案5中6 mm厚度的杨木胶合板最大 Mises 应力接近屈服强度,无法保证拼装箱具有足够的强度,因此排除优化方案5。

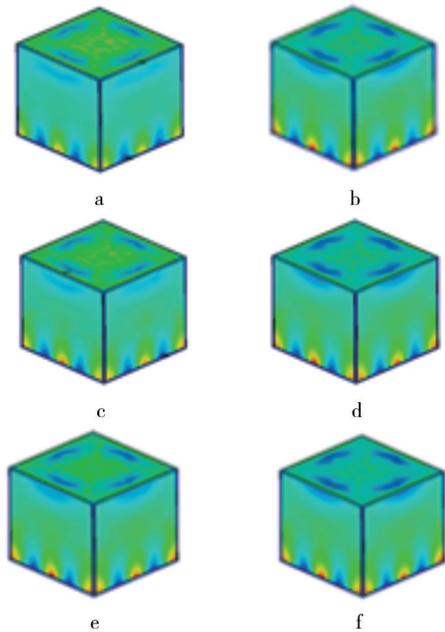


图4 拼装箱静压等效应力云图

Fig.4 Stress contours of the splice boxes

3 结语

1) 利用有限元软件 Ansys 对桦桉木胶合板拼装箱的跌落试验和堆码实验进行了仿真分析。数值仿真结果与试验结果对比表明二者差异在可接受范围内,说明文中采用 Shell 163 薄壳单元模拟钢边和胶合板、并用 Solid 164 实体单元模拟托盘的建模方案是可行的。

2) 拼装箱钢结构连接件,即钢边的厚度对拼装箱整体强度有较大影响,0.4 mm 的钢边强度低,难以胜任一般工况的强度要求,而将钢边厚度由 0.4 mm 提高到 0.8 mm 之后,拼装箱动态承载能力和静态承载能力分别提高了 2.5 倍和 1 倍。将钢边厚度进一步提高至 1.2 mm 后承载能力增幅不明显,成本却显著增加,因此一般工作环境下 0.8 mm 厚度的钢边是最佳选择。

3) 从动态、静态实验和动态、静态数值模拟两个方面综合分析,考虑了拼装箱的强度因素和成本因

素,最终为合作企业提出以下优化方案:用 6 mm 厚度桦杨木胶合板替代原方案的 8 mm 厚度桦桉木胶合板,同时保持钢边材料为 0.8 mm 厚度的镀锌钢不变。

参考文献:

- [1] WANG Y Y, LU C, LI J, et al. Simulation of Drop Impact Reliability for Electronic Devices[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 41: 667—680.
- [2] Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products[C]// JEDEC Solid State Technology Association, Arlington, 2003.
- [3] MILLS N, MASSO-MOREU Y. Finite Element Analysis (FEA) Applied to Polyethylene Foam Cushions in Package Drop Tests [J]. Packaging Technology and Science, 2004, 18(1): 29—38.
- [4] ANGHILERI M, CASTELLETTI L, TIRELLI M. Fluid-structure Interaction of Water Filled Tanks during the Impact with the Ground[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(3): 253—254.
- [5] HOFFMANN J. Compression and Cushioning Characteristics of Moulded Pulp Packaging[J]. Packaging Technology and Science, 2000, 13(5): 211—220.
- [6] IRVING S, LIU Y. Free Drop Simulation of Portable IC Package Implicit Transient Dynamics FEM[C]// Proceedings Electronics Components and Technology Conference, 2004, 4: 1062—1066.
- [7] LOW K H, WANG Yu-qi, K H H, et al. A virtual Boundary Model for a Quick Drop-impact Analysis of Electronic Components in TV Model[J]. Advances in Engineering Software, 2004(35): 537—551.
- [8] LOW K H, YANG A, HOON K H, et al. Initial Study on the Drop-impact Behavior of Mini Hi-Fi Audio Products[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(9): 683—693.
- [9] LOW K H. Drop-impact Cushioning Effect of Electronics Products Formed by Plates[J]. Advances in Engineering Software, 2003, 34(1): 31—50.
- [10] 熊建友, 辛勇. Ansys/LS-DYNA 在跌落仿真中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2003, 7(2): 46—49.
XIONG Jian-you, XIN Yong. Application of Ansys/LS-DYNA in Drop Simulation[J]. Computer Aided Engineering, 2003, 7(2): 46—49.
- [11] 华丽, 钱静. 洗衣机运输包装件的跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2008, 29(4): 61—62.
HUA Li, QIAN Jing. Dropping Simulation Analysis of the Transport Package of Washing Machine[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(4): 61—62.
- [12] 郭彦峰, 王宏涛, 付云岗, 等. 缓冲包装件整体性能与成本体系评价系统的研究[J]. 包装工程, 2007, 28(11): 78—80.

(下转第 35 页)

- [2] 姚恺,吴雪艳,高欣宝,等. 弹药包装对保障能力的影响分析研究[J]. 包装工程,2007,28(3):112—114.
YAO Kai, WU Xue-yan, GAO Xin-bao, et al. Analysis of the Influencing of Ammunition Package on Logistic Ability[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(3): 112—114.
- [3] 刘朝,史光梅. 抗事故密闭体系结构中木材层的非傅里叶热传导[J]. 工业加热,2006,35(2):16—19.
LIU Chao, SHI Guang-mei. Non-Fourier Heat Conduction in Wood Slab of Accident-resistant Packaging Container[J]. Industrial Heating, 2006, 35(2): 16—19.
- [4] 周本权,李明海,陈均,等. 火灾环境下密封容器内木材热解试验研究[J]. 航天器环境工程,2010,26(Z1):139—141
ZHOU Ben-quan, LI Ming-hai, CHEN Jun, et al. Test Research on Wood pyrogenation in Sealed Container[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 26(Z1): 139—141.
- [5] 陈军文,崔利海. 基于弹药能力发展的包装需求与对策分析[J]. 包装工程,2009,30(10):62—63.
CHEN Jun-wen, CUI Li-hai. Analysis of Packaging Demands and Countermeasures Based on Ammunition Capability Development[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(10): 62—63.
- [6] 王保乾. 有效载荷抗事故密闭体系的环境和环境试验[J]. 环境技术,1995(4):7—12.
WANG Bao-qian. Environment and Environmental Tests of Accident-Resistant Container for Payload[J]. Environmental Technology, 1995(4): 7—12.
- [7] JAMES B, JARVIS, RAMARAO I. Heat Conduction in Layered Composite Materials[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 3, 57(5): 1569—1573
- [8] 林强,邱志平. 复合材料夹芯结构非线性热传导分析[J]. 复合材料学报,2007,24(6):147—152.
LIN Qiang, QIU Zhi-ping. Nonlinear Heat Transfer of Sandwich Composite Structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(6): 147—152.
- [9] YANG C Y. Direct and Inverse Solutions of the Two-Dimensional Hyperbolic Heat Conduction Problems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(6): 2907—2918.
- [10] MOHSEN T, SEYFOLAH S. Analytical and Numerical Solutions of Hyperbolic Heat Conduction in Cylindrical Coordinates[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2011, 25(2): 240—253.
- [11] ALIFANOV O M, ARTIUKHIN E A, Rumiantsev S V. Extreme Methods for Solving Ill-Posed Problems With Applications to Inverse Heat Transfer Problems[M]. New York: Begell House Publishers, 1995.
- [12] JIANG F M, SOUSA A C M. Analytical Solution for Hyperbolic Heat Conduction in a Hollow Sphere[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2005, 19(4): 595—598.
- [13] COLIN BAILEY. Computer Modelling of the Corner Compartment Fire Test on the Large-scale Cardington Test Frame[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 48: 27—45.
- [14] SALEH A, AL-NIMR M. Variational Formulation of Hyperbolic Heat Conduction Problems Applying Laplace Transform Technique[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35(2): 204—214.
- [15] 王逢瑚,李鹏,陶毓博. 木材单板热压导热数学模型和可视化数值解的研究[J]. 材料热处理学报,2005,26(1):90—93.
WANG Feng-hu, LI Peng, TAO Yu-bo. Study on Mathematical Model and Visualized Numerical Solution of Heat Conduction for Hot-pressing Single-ply Wood[J]. Transactions of materials and Heat Treatment, 2005, 26(1): 90—93.

(上接第29页)

- GUO Yan-feng, WANG Hong-tao, FU Yun-gang et al. Research on Unitary Performance and Cost Evaluation System of Cushioned Package[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(11): 78—80.
- [13] 邢亚从. 基于 Ansys 的电路板组件的跌落仿真[J]. 科技信息, 2007(1): 76—77.
XING Ya-cong. Drop-impact Simulation of PCB Assembly[J]. Science Information, 2007(1): 76—77.
- [14] 祖景平,薛澄岐. 手机跌落破坏仿真分析研究[J]. 中国制造业信息化,2006,5(11):68—73.
ZU Jing-ping, XUE Cheng-qi. Research on Simulation Analysis of Cell Phone Drop[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2006, 5(11): 68—73.
- [15] 孙德强,孙玉瑾,郑波波,等. 六边形蜂窝芯异面类静态压缩力学行为的仿真分析[J]. 包装工程,2014,35(1):18—22.
SUN De-qiang, SUN Yu-jin, ZHENG Bo-bo. Simulation Analysis of the Out-of-plane Quasi-static Compression of Hexagonal Honeycomb Cores[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(1): 18—22.