民机部件 APU 门运输用瓦楞纸包装箱的优化设计

许美娟，赵书凯，贾大炜，王呈呈，崔明慧
（中航沈飞民用飞机有限责任公司，沈阳 110016）

摘要：目的 针对民机大型部件运输用传统木制包装箱结构重、成本高等问题，使用质量小、成本低的新型瓦楞纸材料研制民机大型部件运输用包装箱。**方法** 以 APU 门为例，使用有限元软件 MSC.Patran/Nastran 计算 APU 门包装箱的强度，加载侧向载荷，使用木质材料和瓦楞纸板材料进行对比。**结果** 同样的结构强度，瓦楞纸箱相比木制包装箱减重 60%，瓦楞纸箱的侧向结构需要优化。**结论** 瓦楞纸板用作民机大型部件的包装箱材料是可行的，且有很大的质量与成本优势，但设计中应全面考虑出现的各种载荷。

关键词：民机；有限元；包装箱；瓦楞纸板；优化
中图分类号：TB484.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2016)11-0083-05

Optimal Design of the Corrugated Board Packaging Box for Civil Aircraft Component APU Door

XU Mei-juan, *ZHAO Shu-kai*, *JIA Da-wei*, *WANG Cheng-cheng*, *CUI Ming-hui*
(AVIC SAC Commercial Aircraft Co., Ltd., Shenyang 110016, China)

ABSTRACT: Targeting at the high weight and cost of traditional wooden packaging box for civil aircraft components, new corrugated board packaging box with lower weight and cost was designed. Taking the APU door as an example, the finite element software MSC. Patran/Nastran was used to calculate the strength of APU door packaging box. The analysis of the packaging box was done by lateral load, and the comparative analysis of wood and corrugated board was carried out. It was shown that the corrugated board had 60% weight reduction as compared to wooden packaging box with the same strength, but the optimization of the packaging box should be done by lateral load. It was emphasized that corrugated board packaging box could be used for civil aircraft components, but the design load of the packaging box should be considered comprehensively. It can be used as a reference for the design of corrugated board packaging box for civil aircraft components.

KEY WORDS: civil aircraft; finite element; packaging box; corrugated board; optimization

随着航空产业的发展，很多民用飞机都采用转包生产的合作方式进行研制，随之而来的就是海量的航空产品的运输。现代运输方式有铁路运输、公路运输、水上运输、航空运输等。航空产品的运输包装箱的设计要考虑适用性、美观、坚固和环保。产品的包装与运输方式相关，如水上运输需要考虑产品的防潮性。可选择的包装箱的材料有钢、木材、纸箱等。

公司转包生产初期航空产品采用全实木包装，但随着产量的增加，加上木材资源的短缺，制造成本更加昂贵，因此开始研究瓦楞纸箱包装。瓦楞纸箱有良好的抗压强度和防震性能，能承受一定的压

收稿日期：2015-12-02
作者简介：许美娟（1984—），女，河北石家庄人，硕士，工程师，主要研究方向为飞机结构强度。

力、冲击和振动[1—2]，并且适合印刷、易于成形、质量较小、利于环保、成本低廉。瓦楞纸板是包装行业应用范围最广的包装材料，可应用在工业产品和各类民用商品等诸多领域，一直以来，对食品和电子产品等包装使用瓦楞纸板的研究较多[3—5]，而国内航空产品使用瓦楞纸箱的相关研究很少[6]。瓦楞纸箱用作航空产品运输包装的关键是构型设计，某飞机下舱面的瓦楞纸箱包装设计成功，已投入使用并申请了专利[7]。这里研究民用飞机 APU 门包装箱从木制变为瓦楞纸箱的可行性，进行了质量和强度的对比，并对瓦楞纸箱结构进行了优化设计。

1　APU 门包装箱设计方案介绍

APU 是辅助动力装置的简称，为飞机提供必需的动力源和气源。APU 舱一般位于飞机后机身收缩段，APU 舱门位于收缩段底部。APU 门为双曲外形，较复杂，在运输过程中要保证舱门曲面不能变形，以免影响安装。某飞机 APU 门结构见图 1，APU 门的质量为 17.5 kg，尺寸约为 1700 mm×1000 mm×350 mm。

图 1　APU 门结构
Fig.1 Structure of APU door

APU 门的木制包装箱方案，将木制材料改为瓦楞纸板作为瓦楞纸箱的初始结构，见图 2。底部包括 6 个瓦楞纸板下卡支架，3 个 EPE（发泡聚乙烯）支撑，侧部 2 个围筒（粘贴 EPE 垫块），顶部 6 个 EPE 压块。

APU 门拟采用海路、路联运的方式，考虑 APU 门的质量、运输环境和运输时间，瓦楞纸箱体围板和顶盖采用 7 层三瓦楞纸板以增加强度，使其边压强度满足 GB/T 6544—2008[8]和 GB/T 6543—2008[9]中相应的标准和规定。底部 6 个下卡支架，3 个 EPE 支撑，见图 2a，下卡支架采用双瓦楞纸板，厚度为 10 mm，EPE 支撑厚度为 40 mm，主要承受 APU 门垂向载荷。底部采用木制底盘加固结构，既加强承重能力，也方便运输操作。使用双层侧围板，加强对内部产品的保护，防止跌落冲击使产品损坏。插板为双瓦楞纸板，厚度为 15 mm，EPE 侧挡板厚度为 40 mm。顶部 6 个 EPE 压块，见图 2b，防止结构垂向与侧向晃动，侧向最小厚度 60 mm，垂向厚度 140 mm。

a　底部　　b　顶部

图 2　APU 门包装箱方案
Fig.2 The scheme of APU door packaging box

包装箱设计完成后，进行了跌落、振动、堆栈、戳穿和耐破试验，试验结果显示包装箱结构安全。为验证内部结构设计的可靠性，建立包装箱有限元模型进行强度分析。

使用有限元建模软件 MSC.Patran 建立包装箱的有限元模型。MSC.Patran/Nastran 是 1 款具有高度可靠性的结构有限元分析软件。MSC. NASTRAN 的整个研制及测试过程是在 MSC 公司的 QA 部门、美国国防部、国家宇航局、联邦航空管理委员会(FAA)及核能委员会等有关机构的严格控制下完成的，几十年来，MSC.NASTRAN 已经成为了大部分国际大企业的工程分析工具，应用领域包括航空航天、汽车、军工、船舶等。大部分的 CAD/CAM 系统都竞相开发了其与 MSC.NASTRAN 的直接接口。MSC.NASTRAN 能有效地求解大模型，其稀疏矩阵算法速度快而且占用磁盘空间少。使用 MSC.Patran/Nastran 建立包装箱的有限元模型并求解，其优势在于操作的灵活性与便捷以及结果的可靠性。

包装箱的有限元模型见图 3。EPE 结构使用六面体实体单元模拟，木制材料或瓦楞纸板材料使用二维壳元。

2　方案分析

2.1　定义材料

EPE 材料只需要考虑密度 ρ，弹性模量 E 和泊

松比 μ[10—12]，其中 ρ=0.0239 g/cm^3，E=0.0314 MPa，μ=0.3。包装箱主体使用 2 种材料进行对比，松木和瓦楞纸。松木和瓦楞纸的材料参数见表 1[13—14]，其中 L 是指材料的纵向（平行于工作方向），LT 是指材料的长横向（垂直于工作方向），ST 是指材料的短横向（垂直于工作方向的零件尺寸最短的方向）。

表 1　松木和瓦楞纸的材料属性

Tab.1 Material properties of pine and corrugated board

材料	密度/（g·cm^{-3}）	弹性模量/MPa			剪切模量/MPa		
		L	LT	ST	L	LT	ST
松木	0.550	16272	1103	573	676	1172	66
双瓦楞纸	0.0504	361.7	349.1		112.42	93.525	0.8166

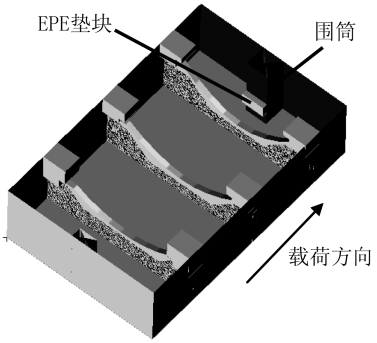


图 3　APU 门包装箱的有限元模型

Fig.3 The finite element model of APU door packaging box

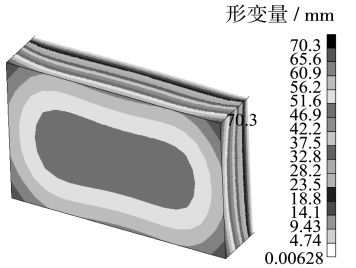
2.2　定义载荷

传统的包装箱的强度校核考虑包装箱的整体强度和刚度，进行承载验证，堆栈安全性验证和跌落安全性验证，包装箱的主要承载方向为垂向，忽略了可能存在的其他方向的载荷。这里谈及的瓦楞纸板包装箱除了满足上述提到的安全性验证之外，还定义了 1 个侧向载荷，载荷方向如图 3，假设在 APU 门侧向受到 1g 的过载，设计系数取 3，安全系数 1.5。此载荷作用在围筒（粘贴 EPE 垫块）上，假设为均布载荷。

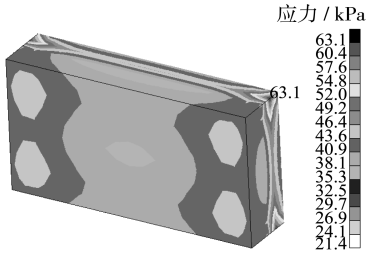
2.3　计算结果

用 MSC.NASTRAN 求解，得到了载荷工况下的应力计算和变形结果。载荷是加载在侧向的 EPE 垫块上，因此 EPE 和围筒的变形和应力是重点关注区域。松木包装箱的计算结果见图 4，瓦楞纸板包装箱的计算结果见图 5。

通过计算可以看出，采用瓦楞纸箱的变形与应力结果与松木包装箱的结果相近，对 2 种包装箱进行质量分析，得到松木包装箱为 52 kg，瓦楞纸包装箱为 21 kg。瓦楞纸板包装箱比松木包装箱减重 60%。



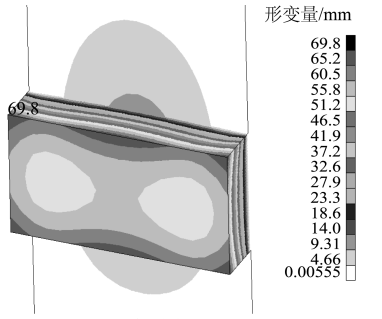
a　变形结果



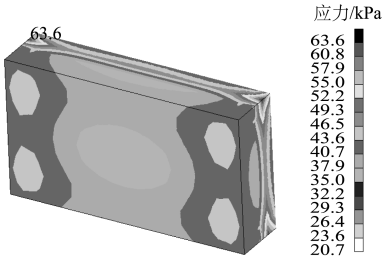
b　应力结果

图 4　松木包装箱的计算结果

Fig.4 The calculation results of pine box



a　变形结果



b　应力结果

图 5　瓦楞纸板包装箱的计算结果

Fig.5 The calculation results of corrugated board box

2 种包装箱的变形结果显示，侧向载荷作用下 EPE 垫块的变形约为 56 mm，变形过大，瓦楞纸围筒变形约 9 mm。该结果说明产品与结构之间出现缝隙，不能起到保护产品的作用。因为这里所使用的载荷为极限载荷，1*g* 的过载，设计系数取 3，安全系数 1.5，远大于包装箱设计时考虑的载荷，在实际运输中，考虑所有运输方式，包括航空运输，这个载荷是非常合理的[6]。该包装箱设计侧向承载相对其他方向较弱，只有 1 个 EPE 垫块，需要优化。EPE 越厚，吸收能量越多，考虑 EPE 的蠕变性，EPE 的厚度需要优化，厚度改为 100 mm[10,15]，瓦楞纸围筒用纸板实芯填充[16]。

优化后的 APU 门瓦楞纸板包装箱的计算结果见图 6。EPE 垫块的变形约为 1 mm，瓦楞纸围筒无变形，包装箱起到了较好保护产品的作用。

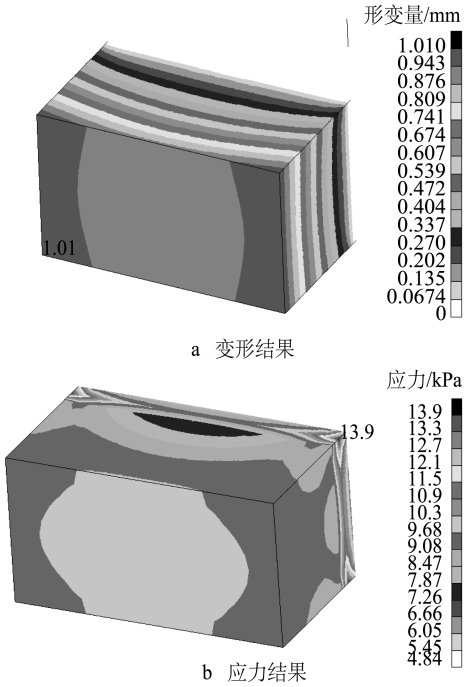


图 6　优化后瓦楞纸板包装箱的计算结果

Fig.6 The calculation results of the optimized corrugated board box

优化后的 APU 门瓦楞纸板包装箱已投入使用，1 年约 400 架次，客户反映良好，为公司节约成本 200 余万元。

3　结语

使用新型高强度瓦楞纸板包装箱是民机大型部件运输的新趋势，既节省原料成本、运输成本、人工成本，又缩短包装周期，低碳环保，产生一定的经济效益。这里基于有限元分析，研究将 APU 门包装箱从木质材料变为瓦楞纸板箱的可行性，使用松木和瓦楞纸板 2 种材料进行计算对比，结果显示得到同样的结构强度，瓦楞纸板包装箱可减重 60%，显示出瓦楞纸板包装箱的巨大优势。定义的载荷为传统计算可能忽略的侧向载荷，在该载荷下包装箱的侧向承载需要加强。航空产品包装箱初始设计时要综合考虑各个方向的载荷。

参考文献：

[1] 张晶，钟慧敏，钱江，等. 一种基于复合纸板的新型重型纸质包装箱[J]. 包装工程, 2015, 36(3):22—26.
ZHANG Jing, ZHONG Hui-min, QIAN Jiang, et al. A New Type of Heavy Paper Packaging Box Based on Composite Cardboard[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3):22—26.

[2] 刘继飞，韩雪山，陈志强. 外包装瓦楞纸箱对缓冲性能的影响研究[J]. 包装工程, 2015, 36(1):111—115.
LIU Ji-fei, HAN Xue-shan, CHEN Zhi-qiang. Influence of Outer Box Corrugated Paperboard on Cushioning Properties[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1):111—115.

[3] 徐雪萌，任宁，唐静静. 高强度冷冻防潮瓦楞纸箱研制[J]. 包装工程, 2015, 36(13):32—34.
XU Xue-meng, REN Ning, TANG Jing-jing. High-strength and Moisture-proof Corrugated Box for Refrigeration[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(13): 32—34.

[4] 薛琼，费伟民，滑广军，等. 戴尔笔记本电脑缓冲包装结构设计[J]. 包装工程, 2015, 36(21):43—46.
XUE Qiong, FEI Wei-min, HUA Guang-jun, et al. Cushion Packaging Structure Design for Dell Notebook[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(21):43—46.

[5] 吴萍，高铭悦. 易碎品容器的瓦楞纸板包装设计研究[J]. 包装工程, 2015, 36(1):74—79.
WU Ping, GAO Ming-yue. Packaging Design of Corrugated Paperboard for Fragile Container[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1):74—79.

[6] 崔明慧，赵书楷. 航空产品包装运输设计的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(19):118—122.
CUI Ming-hui, ZHAO Shu-kai. Package and Transport Design of Aviation Products[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(19):118—122.

[7] 中航沈飞民用飞机有限责任公司. 一种运输用纸制包装箱:中国, 201320436735.X[P]. 2014-01-22.
AVIC SAC Commercial Aircraft Company Limited. A Kind of Paper Packaging Box for Transport: China, 201320436735. X[P]. 2014-01-22.

[8] GB/T 6544—2008，瓦楞纸板[S].
GB/T 6544—2008, Corrugated Fiberboard[S].

[9] GB/T 6543—2008，运输包装用单瓦楞纸箱和双瓦楞纸箱[S].
GB/T 6543—2008, Single Corrugated Boxes and Double Corrugated for Transport Packaging[S].

[10] 丁毅, 杨鹏. 运用 Pro/MECHANICA 进行 EPE 缓冲衬垫的静态和动态压缩分析[J]. 包装工程, 2009, 30(6):36—37.
DING Yi, YANG Peng. Analysis of Static and Dynamic Compression of EPE Cushion with Pro/MECHANICA[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(6):36—37.

[11] 孙聚杰, 温时宝. EPE 静态压缩应力-应变曲线模拟[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(1):37—39.
SUN Ju-jie, WEN Shi-bao. Simulation of Stress-strain Curve for EPE Static Compression[J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(1):37—39.

[12] 路冰琳. 发泡聚乙烯缓冲材料的静态压缩缓冲曲线研究[J]. 包装工程, 2007, 28(2):42—44.
LU Bing-lin. Research on Static Compression Cushion Curve of EPE Polyethylene Foaming Material[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(2):42—44.

[13] 孟超莹. 瓦楞形状对瓦楞纸板力学性能的影响分析[D]. 武汉:武汉理工大学, 2010.
MENG Chao-ying. Analyze the Influence of Corrugated Shape on Mechanical Properties of Corrugated Board[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2010.

[14] 刘伯. 瓦楞纸板力学性能的有限元分析[D]. 西安:西安理工大学, 2004.
LIU Bo. The Finite Element Analysis of the Mechanical Properties of Corrugated Paperboard[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.

[15] 张波涛, 叶梁玉, 刘朝阳, 等. EPE 缓冲包装优化设计[J]. 包装工程, 2006, 27(6):211—212.
ZHANG Bo-tao, YE Liang-yu, LIU Zhao-yang, et al. Analysis of Optimal Design and Manufacturing of EPE Cushion Packaging[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(6):211—212.

[16] 张琴, 许莉钧, 张丽, 等. 瓦楞纸箱尺寸的优化设计[J]. 包装工程, 2012, 33(7):58—61.
ZHANG Qin, XU Li-jun, ZHANG Li, et al. Optimal Design of Corrugated Box Dimension[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7):58—61.