航空产品包装运输设计的研究

崔明慧，赵书楷
（中航沈飞民用飞机有限责任公司，沈阳 110034）

摘要：详细介绍了在民用航空领域飞机产品运输时的方式、包装设计种类以及它们各自的优缺点，对飞机产品在包装设计过程中应注意的方面进行了详细而深入的研究，阐述了产品包装逐步向环保、节能方向发展的设计过程，尤其介绍了目前采用的高强度新型环保包装箱的设计思路和应用前景，从成本和实用性等方面做了详细的阐述，在民用航空运输领域有较大的实用参考价值。

关键词：熏蒸；瓦楞纸板；运输托架；木质包装箱
中图分类号：TB485.3；V271 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2013)19-0118-05

Package and Transport Design of Aviation products

CUI Ming-hui, *ZHAO Shu-kai*
(AVIC SAC Commercial Aircraft Company Limited, Shenyang110034, China)

Abstract: Various package categories mainly used in civil aviation field when aviation products were being transported in different ways were introduced starting with package design of aviation products. The advantages and disadvantages of the package design categories were analyzed. The aspects needed to be focused in packaging design process were studied. Environmental protection and energy saving trends of aviation products package design were introduced. The design thoughts and application prospects of high strength and environment-friendly package were introduced from the aspects of cost saving and practicality.

Key words: fumigation; corrugated board; transport pallet; wooden containers

在当今民用航空领域，航空产品的制造和装配已经不再局限于一个公司或一个国家内，以空客 A380 飞机为例，英、法、德等国的航空制造企业都参与飞机部段的设计和制造，最后在总装工厂进行装配试飞。波音公司的波音 737，787 飞机也转包到多个国家进行部段的生产，飞机制造国际化的特点导致了一个新学科的产生，那就是航空产品的包装运输设计。航空产品作为极度精密的大部件设备，具有质量大、形状复杂等特点，对环境要求较高，在包装运输过程中存在颠簸、冲击、风力、温湿度等诸多方面的问题，都需要通过专业的包装设计解决，下面就航空产品在运输及包装上的特色及设计应用加以论述。

1 航空产品的包装运输方式

当前航空产品常用的运输包装有木质包装箱、金属托架包装箱、瓦楞纸板包装箱等。航空产品包装方式的选择，首先取决于产品的运输形式，运输形式一般分为陆运、海运和空运，产品需要跨国运输时 3 种运输方式都会涉及。

体积相对较小、质量较轻的飞机部件产品适合空运。空运过程中产生的冲击和振动主要发生在飞机的起降过程中，冲击加速度为 1 ~ 2 g，恶劣条件下可能达到 14 g[1]。空运过程中产生的振动主要来源于气流和发动机振动，其中发动机的振动对舱内包装物的影响较大，主要为单振动高频率。由于空运时机舱内的空间有限，空运产品外包装箱的体积要求十分严格，这样的产品通常采用普通瓦楞纸包装箱发运。瓦楞纸箱经济实用，对飞机电缆、小型备件等都可使用，包装时可在内部填充固定泡沫，外部用打包带固定。

体积相对较大、质量较大的飞机部件产品通常采用陆路或海路运输。陆路运输产生的冲击主要取决

收稿日期：2013-05-03
作者简介：崔明慧(1970-)女，辽宁沈阳人，高级工程师，主要研究方向为飞机制造及其包装运输的设计。

于路面状况、车速等因素，正常运行时表现为水平冲击，遇障碍时表现为垂直冲击。由于在大型货车等交通工具上没有外围遮蔽设施，陆路运输的航空产品尤其需要考虑防雨、防潮、防风的要求，可采用内部真空包装和外部防雨布等多种方法，以预防飞机部件的腐蚀。根据沿途具体环境条件，公路运输时还应满足相应的防风标准，否则容易造成箱体损坏。

海路运输的航空产品通常是随箱放入货轮的集装箱内发运的，通常表现为 2 个级别的震动：较平静水域稳定航行时的低强度振动；大风浪或紧急操作时的高强度振动[1]。由于货轮航行时存在 6 个方向的运动，每分钟可能摆动 7 ~ 8 次，摆动角度可能达到 40°，受到的冲击和振动是其他运输方式的 50 倍，采用集装箱运输会大大减少产品损坏的风险。同时由于会在海上长时间颠簸，在防潮、防水等条件上也有较高的要求。

陆路或海路运输通常采用密闭的木质包装箱进行包装，内加塑料膜抽真空后封口。木质包装箱是指用木质原料制成的封闭包装容器，根据使用材料的不同，可以分为原木箱、胶合板箱和竹席木板箱，组合时可采取榫接，也可采用钉子连接。某型飞机尾段的木质包装箱见图 1。

图 1　飞机尾段包装箱

Fig. 1 Container for tail section of airplane

金属托架运输也是航空产品包装运输的常见方式，可反复循环使用，一般用于超大型飞机部段的运输，在陆地运输时可直接推上卡车，海运时推入集装箱内，外围没有固定的遮蔽物，只需用防风布全面包裹。金属托架包装箱是比较实用的一种运输方法，按产品的特点通过焊接、铆接将钢材制造成运输托架，可通过局部拆卸对其二次利用，很大程度上节约了包装制造的费用，比较适合陆地及海运。重复利用的金属托架包装箱也有一定的弊端，因为反复使用虽可节省经费，但却需要付回程时的运费以及装卸维护人员的人工费。某型飞机机身运输托架见图 2，采用不锈钢管材制成。

图 2　飞机机身运输托架

Fig. 2 Transport pallet for airplane fuselage

2　航空产品包装特点及发展趋势分析

早在 20 世纪 80 年代，我国就开始从事国外飞机部段的转包生产，初期的包装均以木质包装箱为主，木箱的缓冲性好，设计严密的木质包装箱可减少运输途中的振动并防止箱内产品的损坏。传统的木质包装箱安装工艺比较复杂，材料成本也很高，随着原木价格的不断上涨，木质包装箱的价格占所要运输的航空产品价格比例过高，而且在美国、加拿大、欧盟等国，为杜绝虫害，进口的木质包装箱都需进行熏蒸处理并出具官方证书。熏蒸是指用熏蒸剂通过蒸气来毒杀木材中的害虫及其虫卵的技术过程。熏蒸过程不但耗时长而且花费成本高，由于熏蒸证书的有效期一般为 21 d，处理过的木质包装箱要尽快发运，并必须与其他未处理的木料隔离单独存放，这些条件都在一定范围内制约了航空产品的紧急发运，大大增加了运输的成本。据统计每个航空类木质包装箱的最终成本都在数万元左右。包装设计除了要保证产品运输的可靠性和安全性外，还应具有良好的经济性，即包装箱的低成本控制。瓦楞纸包装箱因其具有经济实用、绿色环保等特点成为众多行业包装时的首选，对形状简单、质量相对较轻的航空产品可以使用瓦楞纸箱来运输。普通瓦楞纸板的瓦楞齿形分为 V 形、U 形和 UV 形等 3 种，V 形瓦楞的粘合剂用量少，但弹性差，受冲击变霰后不容易恢复。U 形瓦楞的着胶面积大，粘结牢固且富有弹性，抗冲击能力强。UV 形瓦楞的抗压强度高，恢复力强，为目前实际应用的首选[2]。瓦楞纸包装箱的优点是材料费和加工费较低，箱体可成批生产，组装简单并可回收和再生，但对于需要经过长途陆运、海运且形状复杂、体积较大的飞机部件来说，普通瓦楞纸箱就显得过于单薄，无法满足航空产品运输时强度和刚度的要求。

要兼顾包装的可靠性和经济性,使两者达到最佳的平衡点,就需要不断地改进包装方法和包装工艺。目前国内外研发的新型瓦楞纸在强度和实用性上有了很大的突破,例如超强瓦楞纸板 X-PLY,将 3 层加强瓦楞纸芯以纵横交替的方式排列粘接,制成 7 层瓦楞结构,其强度、抗弯度得到大幅提高。某些军用航空产品上也采用了类似的包装材料,因为它质量轻,可折叠,运输和储存方便,同时具有良好的机械性能,通过了高温、高湿、低温储存、温度循环和严于军标要求的淋雨试验以及跌落、堆码、连续碰撞和斜面冲击等试验[3]。近年来民用航空制造企业采用了一种专利型的高强度轻型瓦楞纸作为包装箱的新原料,其厚度在 10 ~ 15 mm 之间,由 2 ~ 3 个 A 形瓦楞组成,这种瓦楞纸制成的包装箱具有良好的缓冲性和抗冲击性,表面平整且承压力高,耐候性能也十分出色。目前由这种材料制作的包装箱已投入生产并使用,某型民用飞机壁板部件之前采用的木质包装箱成本约为 2 万元,经改用高强度轻型瓦楞纸箱后成本仅为原来的 1/7,从运输重量的角度比较,相当于木制包装箱的 1/10。由此可以看出,这种材料在合理设计的前提下可以成为航空产品运输领域的新选择,是今后包装设计的一个发展趋势。

除上述包装形式之外,近年来还流行直接使用集装箱对航空产品进行包装运输的方法,一般的集装箱都用于大型海运项目随船运输,具有大而规则的容积,强度和刚度可以满足反复周转使用的要求,大型航空产品使用的直装式集装箱多为钢制集装箱,采用焊接和螺栓连接,结构十分坚固。集装箱可以是顶开式,航空产品采用机械吊装进行装卸,也可以是侧开式的,产品采用叉车进行装卸。航空产品通过专用工装或托架固定在集装箱内后,直接由飞机的装配现场通过公路和海路运到国外,节省了专门包装以及拆卸转移的费用,运输安全性也较高,尤其适合陆路海路联运的项目。侧开式集装箱见图 3。

图 3 侧开式集装箱

Fig. 3 Side open container

3 航空产品包装箱的设计要素

航空产品包装箱的设计,首先应由产品的实际特征确定包装形式,不论是金属托架还是木质包装箱或新型高强度瓦楞纸包装箱,都应从整体设计、抗压及防振设计、内部结构设计、包装工艺设计等几个方面入手,考虑运输中的冲击和振动,包装箱的堆积压力,防风、防蚀等问题。

3.1 整体设计

首先根据航空产品的质量大小、拟采用的运输方式及运输环境的要求,确定包装的形式。对于外形复杂、质量大、且防潮、防锈的要求较高的产品,一般采用全封闭框架式木制包装箱。设计时首先考虑重量的分布、产品的重心位置等,尽可能降低产品的重心以确保运输安全。

对于形状重心较规则的产品,如果运输经过地点环境较好、运输时间较短,可考虑采取高强度瓦楞纸箱运输,瓦楞纸箱体围板和顶盖通常采用七层三瓦楞的箱板以加强箱体的整体强度。箱体的边压强度是衡量瓦楞纸包装箱性能的重要指标,在 GB/T 6543—2008[4]中有相应的标准和规定。瓦楞纸包装箱外围材质的强度计算,根据凯里卡特公式,通过瓦楞纸箱的边压强度和周长计算纸箱的抗压强度为:

$$BCT = ECT \times (4aXz/Z)^{2/3} \times Z \times J$$

式中:BCT 为瓦楞纸箱的抗压强度;ECT 为瓦楞纸板的边压强度;aXz 为瓦楞常数;Z 为瓦楞纸箱的周长;J 为纸箱常数。

设计时使用包装箱侧围板卡槽连接式支撑结构,可提高箱体的抗压强度,也可为箱内产品提供支撑,同时还应对侧围板的抗张强度、耐破强度和戳穿强度进行计算[5]。对于质量、体积较大的产品还可采用底盘加固结构,一方面可加强承重能力,提高箱体的整体强度,另一方面也便于叉车运输操作,设计时应考虑运输叉车上叉齿的高度和地面防水要求。为确保航空产品在长途海运过程中的防水防潮性能,可采取箱体外表面贴防水膜的方法。瓦楞纸箱外周长与抗压强度的变化关系见图 4。

3.2 抗压和防振设计

在运输过程中,外形规则的包装箱在高度允许的范围内可多层叠压,这样的包装箱通常承受 2 种外部载荷,一种为堆码载荷,一种为冲击和振动载荷。堆

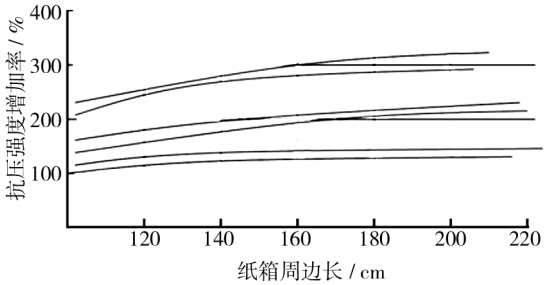

图 4　瓦楞纸箱外周长与抗压强度的变化关系

Fig. 4 Relationship between outer perimeter and compressive strength of corrugated case

码强度、堆码时间是决定包装箱堆积压力的关键因素。航空产品使用的木质包装箱通常为框架式的，在受压过程中，堆码载荷会传递到框架的立木上，受力形式为轴向受压压杆。高强度瓦楞纸包装箱受的堆码载荷主要为侧壁承受的载荷。据分析，瓦楞纸箱的长宽比在 1.0 ~ 1.6 区间时，箱体抗压强度最好。一般的 A 型瓦楞纸箱抗平压系数较高，但缓冲性较差，对大型航空产品来说，包装箱都采用七层三瓦楞的材料以增加强度和缓冲性能。

瓦楞纸箱的堆码强度计算公式为：

$$P = k \times m \times (h/H - 1)$$

式中：k 为安全系数，由产品的储存周期和储存条件决定；h 为堆码高度（mm）；H 为纸箱高度（mm）；m 为产品质量（kg）[6]。此外瓦楞纸板的含水率对强度影响非常大，在相对潮湿的环境下长时间运输需考虑增加防潮层。以海运为例，一般运输周期都在几十天以上，纸箱堆积时间越长，其抗压保留强度越小。

产品在运输过程中受冲击和振动载荷的影响而使包装箱产生损坏的特性，称为易损性，定量描述这种特性的量值称为脆值。简单的说，脆值是指产品不发生物理损伤或功能失效所能承受的最大加速度值。

脆值 $G_C = A_C/g$

式中：A_C 为临界加速度，是产品受到冲击时即将发生损坏的最大加速度；g 为重力加速度。防振设计时通常采用许用脆值作为设计依据，许用脆值 $[G] = G_C/n$，其中 n 为安全系数。防振设计即缓冲包装设计，目的是防止和减轻冲击振动等机械性因素对产品造成的危害，将缓冲包装材料合理布置在包装容器和产品之间，吸收冲击能量，延长冲击作用时间，降低冲击加速度，同时把包装产品的振动控制在预定范围内[7]。缓冲包装材料的弹性是在力的作用下发生变形和恢复原状的特性，是一种应力-应变关系。在设计中常用的参数是缓冲系数，它等于缓冲材料应力与对应应变下的应变能之比。

$$C = FT/E = \sigma/e$$

式中：σ 为缓冲材料应力；e 为加载时的应变能；F 为外力（N）；T 为原始材料厚度；E 为缓冲材料在力的作用下的变形能。在设计过程中采用缓冲系数较小的材料，用量也会较少。

航空产品通常采用的缓冲材料主要有 EPE（聚乙烯泡沫塑料），EPS（聚苯乙烯泡沫塑料），EPU（聚氨酯泡沫塑料），EPC（聚乙烯共聚物泡沫塑料）等，这些材料在拉伸性、抗变形压缩强度、回弹性等方面各具特色，能够很好地起到缓冲防振的作用。它们的性能指标在坚固性、缓冲性、吸附能力、抗蠕变性和抗酸碱能力等方面都各有优势，可根据航空产品的具体状态如主结构材料、表面处理类型等进行选择。

3.3　内部结构设计

在进行内部结构设计时，首先要考虑产品运输时在三维方向上的稳定平衡。通过计算确定包装箱结构承力的大小及包装箱内部的装配方式。通常在木制包装箱内固定大型航空部件时，都需要工艺螺栓或销钉来固定产品与箱体，通过专用的托架、卡板、压板等工装将产品固定在箱内。瓦楞纸箱体的内部结构通常由挡板、插板、卡板、围筒和压块等部分组成，材质的选择则是根据具体的产品结构特点，选用不同厚度和规格的高强度瓦楞纸板、纸质模塑或胶合板材。如果产品的质量较大，可考虑采用胶合板与瓦楞纸相组合的结构加强支撑和固定作用。

3.4　包装工艺的设计

包装箱整体设计完成后，还应对航空产品的具体装箱工艺进行设计。根据航空产品的特点采取特定的防护措施，以产品在包装箱内稳固、表面质量无损、传动机构稳定平衡为原则，通常使用海绵缠绕产品中的传动机构以防震动和脱落。航空产品的主要成分为金属，如铝合金、不锈钢等材料。这些金属材料长期暴露在潮湿空气中，会吸附水蒸汽形成水膜引起腐蚀，水膜厚度小于 0.01 μm 时，可能引起轻微腐蚀，达到 1 μm 时腐蚀速度就会急剧上升[8]，因此对海运或途经潮湿多雨地区的包装物应使用专业防锈油对金属表面进行防锈处理，使用聚乙烯薄膜密封并抽真空以防止产品表面腐蚀。除此之外，还可使用辅助材料

如干燥剂和除氧剂等,从内部环境上杜绝腐蚀的发生。叉车装卸和吊车起吊时,对箱体会造成额外的作用力,不论是木制包装箱还是瓦楞纸包装箱,都需要在接触部位加装加强筋和加强角板。在工艺设计时还应考虑运输途中风力的影响,强风可能会对包装箱造成巨大损害,使固定不当的产品和强度过低的包装箱箱体遭到破坏。在某型飞机后机身经过公路运往西雅图的途中,没有考虑到抵抗 8 级风的因素,导致箱体前壁板和顶盖完全损毁,部分机身蒙皮被破坏。由此,设计时应了解产品经过地区的自然状况,如需要应加固迎风方向的承力结构,在这样的地区禁止使用无外围防护的运输方式。

4 结语

大型航空产品在全球的运输需要安全可靠的运输载体来完成,不论是使用木制包装箱或金属托架,还是使用纸制包装箱,都要从安全可靠、环保等几个方面加以考虑,以加速生产过程,提高运输质量,降低物流成本为原则。一个合格的包装箱要具有安全性和可靠性,合理的设计是关键,因为包装箱参数的变化将直接影响到箱体的各种性能。在包装箱的结构设计中,要根据制造设备、生产工艺的不同以及航空产品的种类和特性来确定包装方案。包装设计时的成本考虑也是十分必要的,成本最小化是每个行业都在追求的目标,不断研究将新型材料应用于包装设计中,才能不断地缩减成本。新型高强度瓦楞纸板包装箱在成本和工艺性上有着明显的优势,以飞机舱门组件为例,使用这种包装箱后每年可节省 900 多万元包装费用,既降低了原材料成本及运输成本,同时也做到了绿色环保,经济效益十分可观,值得推广。

参考文献:

[1] 彭国勋. 物流运输包装设计[M]. 北京:印刷工业出版社,2006:64.
PENG Guo-xun. Logistics and Transport Packing Design [M]. Beijing:Printing Industry Press,2006:64.

[2] 王建清. 包装材料学[M]. 北京:中国轻工业出版社,2010:38.
WANG Jian-qing. Packaging Material[M]. Beijing:China Light Industry Press,2010.

[3] 肖衡,唐昆,张开敏,等. 我国军用器材防护包装技术发展探析[J]. 包装工程,2009,30(4):58-61.
XIAO Heng, TANG Kun, ZHANG Kai-min, et al. On the Development of China Military Equipment Packaging[J]. Packaging Engineering,2009,30(4):58-61.

[4] 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].

[5] 曾宗易,叶浩. 包装设计实用技术手册[M]. 北京:印刷工业出版社,2007:12.
ZENG Zong-yi, YE Hao. Packaging Design Practical Technical Manual[M]. Beijing:Printing Industry Press,2007:12.

[6] 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. Optimal Design of Corrugated Box Dimension [J]. Packaging Engineering, 2012,33(7):58-61.

[7] 曹国荣. 运输包装设计[M]. 北京:中国轻工业出版社,2011:14.
CAO Guo-rong. Transport Packing Design [M]. Beijing: China Light Industry Press,2011:14.

[8] 潘松年. 包装工艺学[M]. 北京:印刷工业出版社,2004:251.
PAN Song-nian. Packaging Technology[M]. Beijing: Printing Industry Press,2004:251.

(上接第 104 页)

ZHOU Liang, LI Bing-fa, SHAN Yun-fan, et al. A New Technique of Preventing from Falsifying Presswork Based on Watermark[J]. Information Technology,2005(9):31-34.

[11] 梁华庆,纽心忻,杨义先. 基于数字水印的证件防伪技术[J]. 信号处理,2004,20(2):143-146.
LIANG Hua-qing, NIU Xin-xin, YANG Yi-xian. Identification Document Protection Technology Based on Digital Watermarking[J]. Signal Processing,2004,20(2):143-146.

[12] 朱竹青,冯少彤,聂守平,等. 基于离散余弦变换的复制加密图像隐藏技术[J]. 中国激光,2009,36(1):177-181.
ZHU Zhu-qing, FENG Shao-tong, NIE Shou-ping, et al. Complex Valued Encrypted Image Hiding Technology Based on Discrete Cosine Transform[J]. Chinese Journal of Lasers,2009,36(1):177-181.