

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.01.015

# 民航客机后压力框结构设计 技术分析与研究

## Analysis and Research on the Rear Pressure Bulkhead Design for Civil Aircraft

罗腾腾 / LUO Tengting

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

后压力框结构是飞机非常重要的结构部件,主要承受客舱机身的气密载荷。研究了大量机型后压力框结构形式,分解了相关设计要求,概括了相关设计方案,深入探讨了该结构部件的相关设计特点和发展趋势。

**关键词:**后压力框;飞机;球皮结构

**中图分类号:**V223

**文献标识码:**A

[Abstract] Rear pressure bulkhead (shortened form is RPB) is very important component of aircraft structures and withstand the cabin pressure load. This paper researches a great number of RPB structure, analyzes the design requirements related to the aircraft's RPB. The RPB structure design was summarized. The design features and development trend about RPB structure were discussed.

[Keywords] rear pressure bulkhead (RPB); aircraft; dome structure

## 0 引言

后压力框结构主要承受飞机客舱内的气密载荷,是机身内部一个封闭式的气密端框,承受地-空-地循环气密载荷,是机身中重要的耐疲劳承力结构,疲劳问题需要重点考虑。一般情况下,后压力框结构站位是飞机部段的一个重要工艺分离面,也是中后机身与后机身的机身对接面。

## 1 中后机身与后机身工艺分离面

由于飞机总体设计、部段生产装配和部段运输等相关要求,以空客和波音为代表的主流飞机机型中后机身与后机身的工艺分离面均在后压力框处(A320、A340、波音737、波音747、波音767、波音777),以A350、A380、波音787为代表的先进远程宽体客机工艺分离面(中后机身和后机身的机身分

段)同样也在后压力框处,如图1所示,它们的成功经验对他国研制宽体远程客机具有较好的借鉴意义。

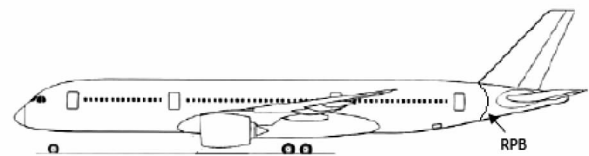


图1 后压力框结构位置示意图

## 2 后压力框结构设计要求

后压力框结构需满足以下设计要求:

1) 后压力框结构需满足机身气密载荷,包括限制增压载荷、极限增压载荷、限制负压载荷、极限负压载荷。

2) 后压力框的球皮结构如果为复材,其材料的

选取要满足 25.853 适航条款中关于客舱内部设施材料阻燃的要求。

3) 如果后压力框结构与垂尾前梁结构相互连接,那么后压力框一共要承受三种载荷:一为突风和偏航时垂尾安装接头传来的集中拉、压载荷和垂尾前梁腹板传来的剪力;二为客舱的增压及负压载荷;三为蒙皮传递的机身拉压载荷。

### 3 后压力框结构连接形式

后压力框结构从球皮结构的连接形式区分为以下两种设计方案:

1) 球皮结构通过“Y”型材零件或接头零件直接与机身蒙皮相连接,这种连接形式称为后压力框球皮结构外接方案;

2) 球皮结构通过“Y”型材零件直接与框结构连接,再通过中后机身相关角撑结构与机身蒙皮相连接,这种连接形式称为后压力框球皮结构内接方案。

#### 3.1 球皮结构内接方案

空客飞机 A320、A340、A350 和 A380 都采取了后压力框球皮结构内接方案,如图 2 所示,这种连接方案传力路径较长,航向传力路径先到“Y”型材再到“J”型框,通过中后机身角撑最后到中后机身蒙皮上,一般而言重量都较重,但是相关的球皮结构比较好设计,很多的系统通过孔可以布置在高度较高的、结构较强的“J”型框上,可以大幅度减少在球皮结构上的开孔以及减轻相关开口加强重量,国内相关民机的后压力框结构也吸取和借鉴了相关设计经验。

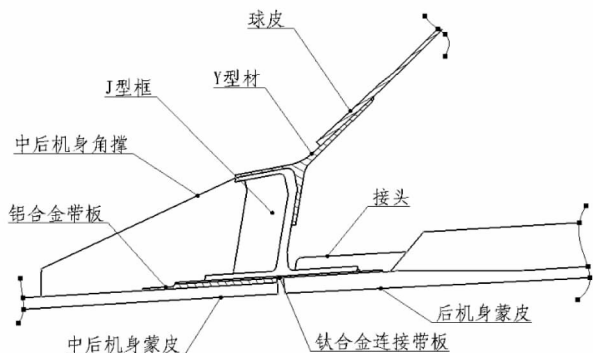


图 2 球皮结构内接方案

#### 3.2 球皮结构外接方案

波音飞机 B737、B747、B767 和 B777 都采取了后压力框球皮结构外接方案,如图 3 所示,这种连接

方案传力路径较短,一般而言重量都较轻,但是相关的球皮结构比较难以设计,所有的系统通过孔均布置在球皮结构上,球皮结构上的开孔数量众多以及相关开口加强重量也不少。

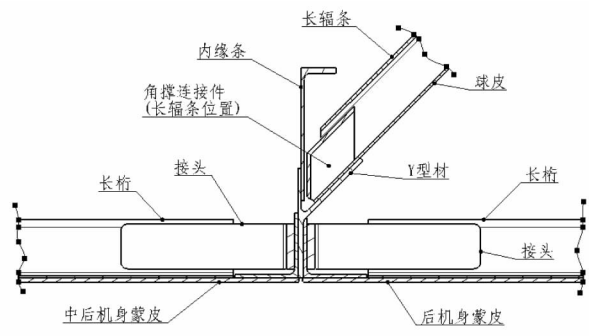


图 3 球皮结构外接方案 1

另一种后压力框球皮结构外接方案如图 4 所示,这种连接方案与波音的设计风格稍有不同,波音的设计特点是通过机身的前后对接接头传走球皮结构所受气密载荷的航向分量,而此方案是通过“Y”型材直接与机身蒙皮相连接传走球皮结构所受气密载荷的航向分量。波音设计方案的“Y”型材容易成型,而此方案的“Y”型材成型难度相当大,尤其是在机身截面不规则、曲率变化较大时。

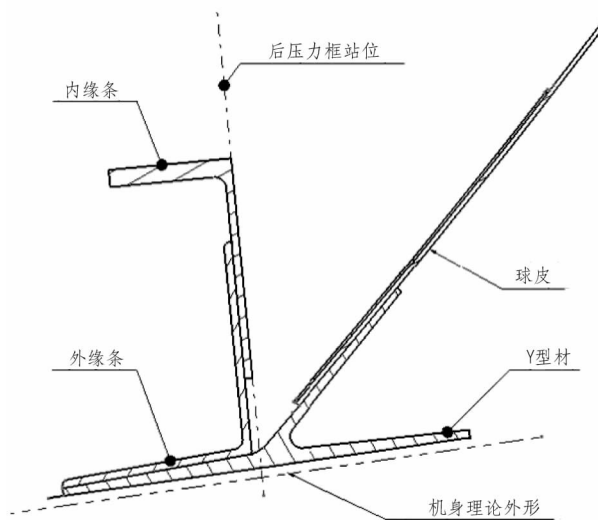


图 4 球皮结构外接方案 2

#### 3.3 两种方案重量比较

以图 2 和图 4 两种典型后压力框结构进行重量对比分析,两种结构方案的重量差异主要表现在中后机身角撑组件(1)、铝合金框(2)、钛合金“Y”型材(3)和球皮(4),如图 5 红圈位置所示。

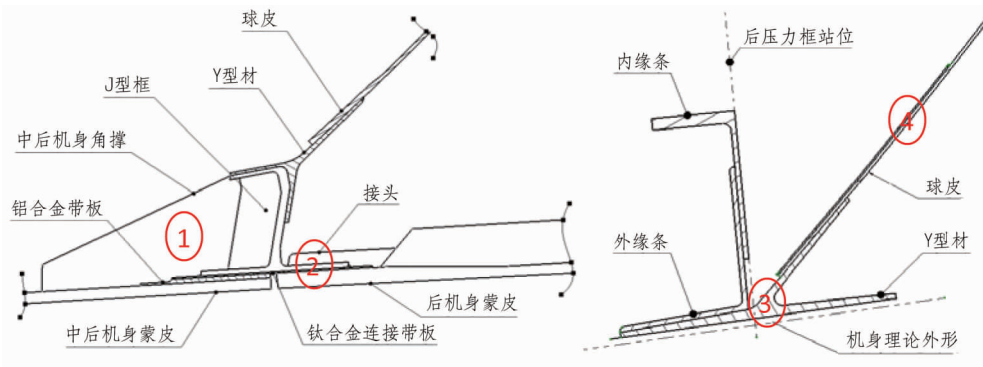


图5 两种方案重量差异

以后压力框站位机身直径3 000mm、框高150mm为例,其余厚度尺寸保持一致,经初步设计和分析重要零组件重量差异见表1。

表1 后压力框两种方案重量对比分析 (单位:kg)

	铝合金框	斜撑组件	复材球皮结构	钛合金“Y”型材	紧固件
内接	28.2	36.45	28.5	19.5	1.2
外接	34.3	0	33.4	27.6	0
差异	-6.1	36.45	-5.1	-8.1	1.2
总计			18.35		

从表1可以得出内接方案比外接重量重。总的来说,后压力框球皮结构内接方案传力路径较复杂、重量较重,后压力框球皮结构外接方案传力路径简单直接、重量较轻,采取何种设计方案要统筹平衡各方面约束条件、综合考虑。

## 4 后压力框结构设计

一般情况下,后压力框站位是后机身与中后机身的机身对接面,后机身与中后机身的蒙皮是断开、不连续的,无论后压力框采取后压力框球皮结构内接方案还是后压力框球皮结构外接方案,后压力框结构均是由框、“Y”型材和球皮结构组成,都包括“Y”型材、接头、框(或由外缘条和内缘条共同组成)和球皮结构。

### 4.1 “Y”型材

“Y”型材主要承受疲劳载荷,一般而言,“Y”型材使用抗疲劳性能较好的钛合金材料。其中在图4球皮结构外接方案2中,球皮结构与机身理论外形的夹角 $\theta$ (也就是“Y”型材的夹角 $\theta$ )是后压力框结构重要的设计驱动要素,球皮结构与“Y”型材

的连接需要一定的安装空间,后机身蒙皮与“Y”型材的连接也需要一定安装空间,理论上来说,“Y”型材夹角 $\theta$ 为 $45^\circ$ 最佳,“Y”型材上下两侧的安装空间均同时考虑到了,但是也与球皮理论外形设计、厚度、安装位置有关。在重量增加最小的情况,后压力框设计中“Y”型材夹角 $\theta$ 实际上会做一定的调整。

相反,在后压力框球皮结构内接方案中,由于“J”型框高度较高,安装空间不存在任何问题,“Y”型材夹角 $\theta$ 的设计反而显得没有那么重要。

### 4.2 接头

由于中后机身蒙皮与后机身蒙皮在后压力框站位处断开、不连续,那么各自的长桁也在此处断开,为保证长桁航向上的传力连续性,因此,设计了连接长桁端头的接头,以保证飞机结构在后压力框站位处的航向传力性能。接头一般是钛合金材料的机加件。

### 4.3 框

框有3种形式:(1)由整体机加的铝合金框组成;(2)由铝合金型材钣金零件内外缘条组成;(3)由“Y”型材零件以外缘条形式参与组成(波音787)。

### 4.4 球皮结构

理想的球皮外形是一个规则球面,在机身舱内增压载荷作用下,球皮表面产生张力、无应力集中出现,此时球皮结构具有较好的抗疲劳性能。然而,大多数情况下飞机后压力框站位的机身横截面并不是正圆(一般情况下是由两个及两个以上的圆组成)。所以,空客为了简化球皮结构的设计,采取了后压力框球皮结构内接方案,球皮的理论外形为正球冠设计;此外,也可以调整好压力框站位的机身截面形状,并对球皮外形进行修形,获得

一个光滑的、曲率变化相对较小、受力均匀的球皮外形。

球皮在内压作用下,其环向应力、经向应力沿厚度均匀分布,且远小于膜应力,可忽略不计,在此基础上把球皮当作薄膜处理。在内压作用下,球皮

满足经典薄板和薄壳理论,如图 6 所示。根据薄壳理论:

$$N_{\theta} = N_{\psi} = PR/2t \quad (1)$$

其中  $P$  为球皮压力,  $R$  为球皮半径,  $t$  为球皮厚度。

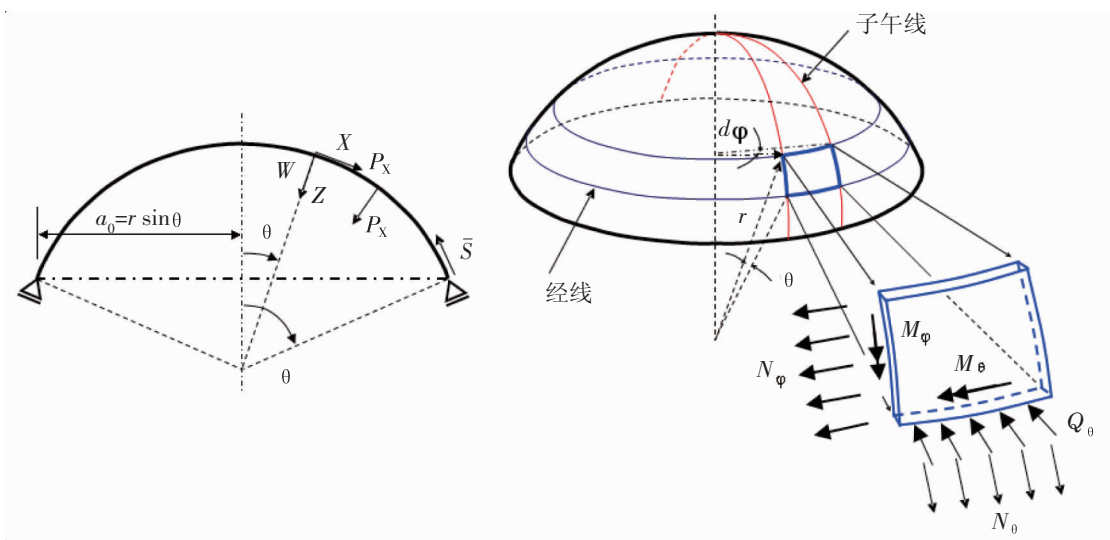


图 6 内压下的薄球皮

根据式(1),可以推算出球皮最小厚度

$$t = PR/2 [N_{\theta}] \quad (2)$$

球皮结构前期一般普遍使用金属结构,随着复合材料技术的发展,现在的主流机型基本上使用复材球皮结构,一是减轻了球皮结构重量,二是降低了装配工作量、提高了生产效率,现在国外大型客机后压力框球皮结构应用复合材料的机型有 A340、A380、波音 787、A350 等。其中, A340 后压力框球皮结构采用碳纤维预浸料和泡沫夹心通过热压罐工艺一次固化成型; A350 后压力框球皮结构采用无褶皱织物(non-crimp fabric, 简称 NCF)和泡沫夹心通过真空辅助液体成型工艺(VAP)一次固化成型; A380 球皮结构的材料为碳纤维环氧树脂基复合材料面板和聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫夹心加筋,利用了树脂膜熔浸成形(RFI)工艺和热压罐二次固化成型工艺;波音 787 后压力框使用中等模量碳纤维,利用真空辅助液体成型工艺 VARTM (Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding, 简称 VARTM)成型。国内最先进的大型客机也采

用了先进的设计理念和生产工艺,在球皮结构上使用了复合材料。

## 5 结论

随着复合材料技术的逐步发展,复合材料后压力框球皮结构在主流民用飞机上均有较大程度的应用,国内外最新机型基本上完全使用了复合材料球皮结构方案,这是新的工程设计和应用领域,在后压力框结构设计上有着较好的探索和研究意义。

### 参考文献:

- [1] 牛春匀. 实用飞机结构工程设计[M]. 北京:航空工业出版社,2008:174-189.
- [2] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,2001.
- [3] 牛春匀. 实用飞机复合材料结构设计与制造[M]. 北京:航空工业出版社,2010.