

民用飞机球面框结构设计研究

Research of Civil Aircraft Aft Pressure Bulkhead Structure Design

钱 敏 / Qian Min

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

摘 要:

球面框是民用飞机增压舱的端框,其设计应重点放在以损伤容限安全为基本准则,从球面框的受力分析出发,介绍了一种典型的薄板加筋铆接式球面框结构,以期对球面框的设计起一定的参考和借鉴作用。

关键词:球面框;结构设计;民用飞机

[Abstract] The aft pressure bulkhead is the last frame of pressure cabin in civil aircraft, and its design principle is based on damage-tolerance rule, this paper introduced a typical aft pressure bulkhead structure to provide reference for the design of aft pressure bulkhead structure.

[Key words] The Aft Pressure Bulkhead; Structure Design; Civil Aircraft

0 引言

民用飞机机身内必须增压,以保证旅客有个良好、舒适的环境,球面框正是增压舱的后气密端框。球面框作为重要的耐疲劳承力构件,在设计中必须谨慎对待。其设计应重点以损伤容限安全为基本准则,采用柔性结构设计方法,力求通过合理的应力水平控制、恰当的结构布置及选材和周密的细节设计,获得一个重量轻、安全可靠、耐久性高的球面框结构。本文介绍了一种现代民用飞机所广泛采用的、典型的薄板加筋铆接式球面框结构。

1 受力分析

球面框主要承受机身客舱内的气密载荷(包括正压和负压)。

从材料力学可知,若取球体作为压力容器,整个球面厚度上均为张力,因此用球面框作气密舱端框比用平面框承受气密载荷要有利得多。

从受力特性看,球面框最好做成半球形,即球面半径与机身半径一致。此时球面上的均匀拉力正好全部、直接地传给机身蒙皮。但半球形状使机身容积利用率低,在球面前、后都较难安放有效载重,工艺上制作也较复杂。故采用球面的一部

分——球亏面,此时球面半径 R 大于机身半径 R_c 。

假设增压舱的最大使用压差为 ΔP ,根据适航条款的要求,球面框的最大设计压差为 $1.33 \times 1.5 \times \Delta P = 2\Delta P$ 。

假设球面半径为 R ,由锅炉公式可知:

球皮承受的拉力(膜应力) $F = 2\Delta P \times R / 2 = \Delta P \times R$,如图 1 所示。

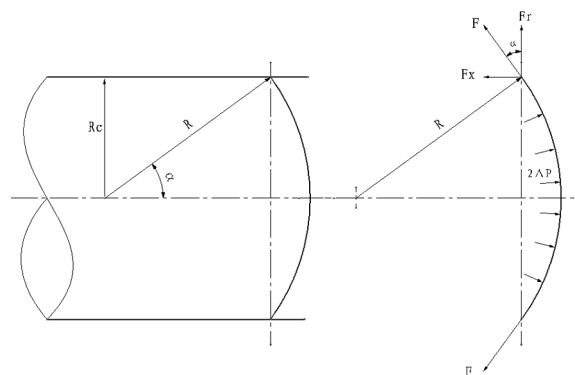


图 1 球面受力分析

F 可分解为航向分量 F_x 和环向分量 F_r 。

$F_x = F \sin \alpha$,由机身壁板承受。为此,在球皮周边需要设计一个“ ∇ ”形状的受力构件,与机身蒙皮相连的一边传递 F_x ,另一分叉用于连接球皮。

$F_r = F \cos \alpha$,机身壁板不能承受。为此,在球面

框站位处设计一个周边受压的环框,这个环框相当于一个受到自身平衡的均布径向压力的圆环。如图2所示。

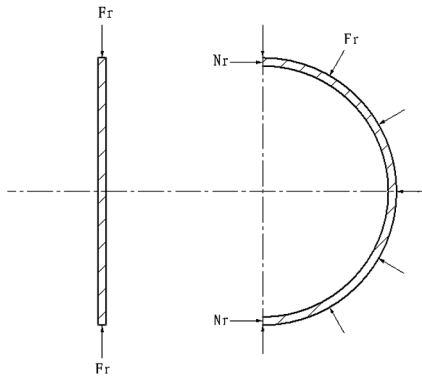


图2 环框受力分析

2 结构设计

典型的球面框结构采用金属铆接半硬壳式结构,通常包括球皮、框缘条、辐条、顶环、顶盖、齿形加强板、止裂带等零件,如图3所示。

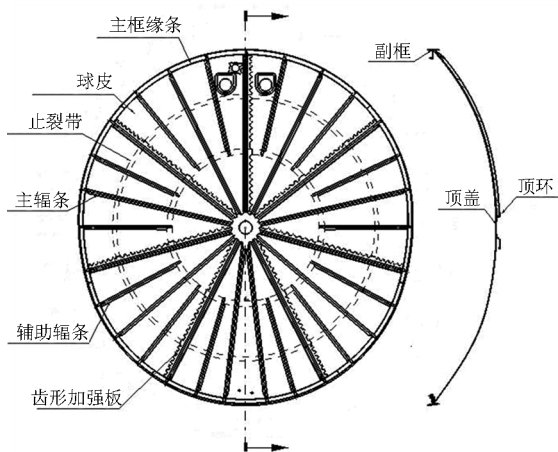


图3 球面框结构图

2.1 球皮

球皮是球面框最主要的抗疲劳承力零件,主要功能是以曲面的切向张力(膜应力)平衡舱内增压气体作用在该曲面上的法向正压力。球皮必须设计成能满足损伤容限安全的柔性结构,且应具有光滑的球面外形,以期获得处处均匀的表面膜应力。

疲劳是球皮设计所要考虑的危险情况,球皮的厚度主要由应力水平控制,具体的应力控制水平需根据民机的设计服役目标和细节设计来选取,在初步设计时按此要求进行优化,并不断迭代调整应力水平,以得到最佳的结构参数、最小的重量。

假设球皮许用应力为 $[\sigma]$,根据锅炉公式,球皮

$$\text{厚度 } \delta = \frac{F \times R}{2[\sigma]} = \frac{2\Delta P \times R}{2[\sigma]}$$

根据损伤容限的设计要求,同时考虑板材供应规格和制造工艺等因素,球皮应适当分块。图示球皮共分为七块,每块球皮都呈扇面状,相互间以搭接形式实现连接。在每条搭缝处都设置有辐条,用于限制搭缝处球皮的翘曲变形。球皮的搭接宽度按抗疲劳要求设计,一般布置三排铆钉,如图4所示。

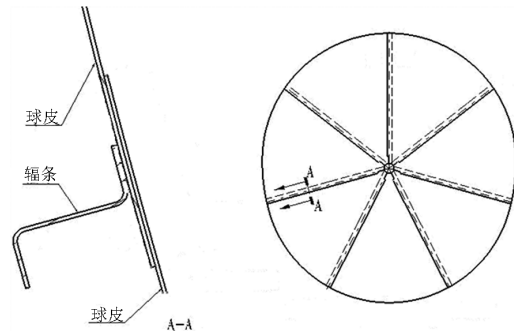


图4 球皮分块及搭接

为保证球皮分块和搭接设计能够实现,在球皮顶点处设计一个圆形的开孔,用顶盖零件封堵,孔边用“Z”形环状顶环零件加强,如图5所示。

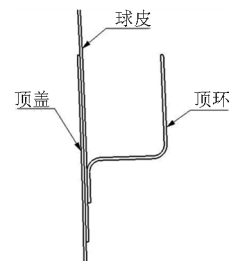


图5 顶盖及顶环

2.2 框缘条

球面框的框缘条由“ ∇ ”形的主框缘条和“ $]$ ”形的副框组成,框缘条直接铆接在机身蒙皮上,典型结构形式如图6所示。

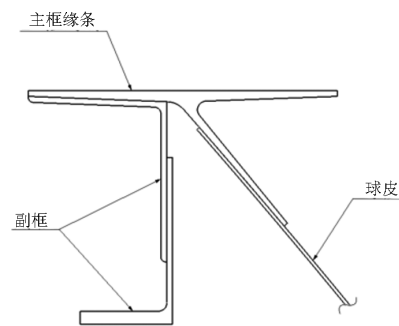


图6 框缘条

主框缘条用来固定球皮,平衡和传递由球皮张力所产生的航向分力 F_x ,连接机身长桁以及传递机身扭矩。主框缘条一般采用挤压型材拉伸而成,各段缘条间利用对接板(或角材)达到相互间的等强度连续。

副框用来平衡球皮张力所产生的法向分力 F_r 。在球皮张力的法向分量作用下,其缘条总是处于环向压缩的工作状态,因此,其设计条件主要是局部压损强度。为了改善其工艺性,副框设计为由副框外缘条和副框内缘条两部分铆接而成。副框内外缘条的分段设计主要考虑装配工艺,分段尽可能少。

另外,机身蒙皮、球皮、主框缘条和副框等四者的分缝位置应尽量相互交错,目的在于分散硬点、消除结构危险部位的重叠、减缓应力集中、改善结构的抗疲劳品质。

2.3 辐条

辐条铆接在球皮上,作为球皮上的加强筋,与球皮共同组成柔性的加筋壳式球皮结构,用以控制球皮变形,在负压作用下防止球皮失稳,同时阻止球皮裂纹的扩展,并辅助球皮平衡部分增压载荷。

辐条成放射状均匀布置在球皮上,与机身的长桁一一对应。这样可以获得比较均匀的球皮变形,并减小主框缘条的附加力矩。

辐条的设计应具有适当的柔度,可分主辐条和辅助辐条两种,两者相间布置。主辐条截面稍高,刚度稍大,内端铆接在顶环和顶盖上;辅助辐条截面稍低,刚度稍小,内端仅固定在球皮中央的止裂带上。主辐条和辅助辐条的外端则通过“L”形的辐条接头连接在主框缘上,如图7所示。

2.4 止裂带

球面框球皮内表面布置两圈止裂带(见图2)。基于损伤容限设计考虑,两圈止裂带同29根辐条一起,交叉布置,把球皮分割成相对均匀的多个小单元,每块单元的面积仅占球皮总面积的1.5%,可以有效地提高球皮的破损安全性能。止裂带的厚度一般与球皮相当。

3 抗疲劳细节设计

球面框承受地-空-地循环气密载荷,并且大量系统件需要穿过球面框,球面上的开孔众多,疲劳问题严重性不言而喻。通过选择具有良好疲劳性能的材料、控制球皮等疲劳关键区域的应力水平都可以提高球面框的疲劳性能,而具体的结构细节设计

也是决定球面框疲劳性能的重要因素。

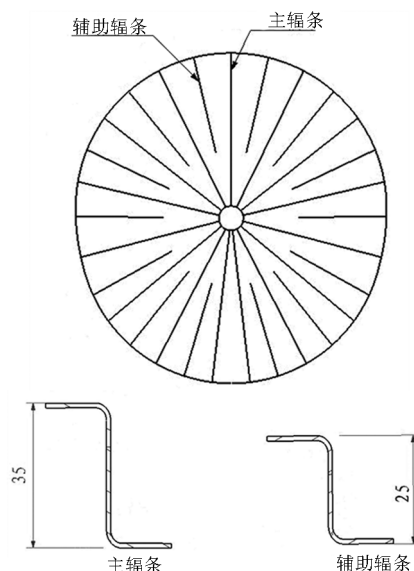


图7 辐条

(1) 采用齿形加强垫板

球皮搭接加强板以及开孔加强板均采用齿形加强垫板,与矩形加强垫板相比,齿形垫板齿上的铆钉传递的载荷比较小,所以收到了提高疲劳寿命的效果。如图8所示。

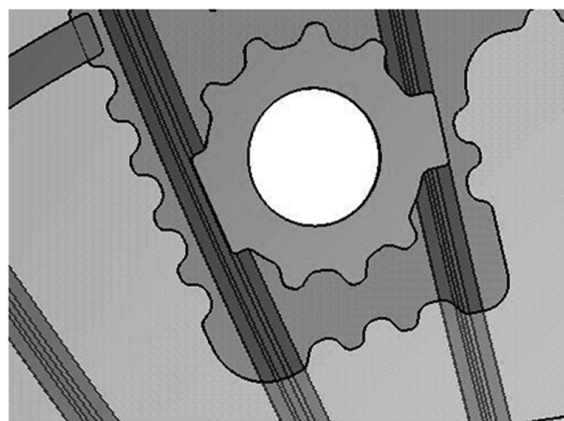


图8 齿形加强垫板

(2) 避免截面突变

在接头及开孔加强部位,截面的变化是缓慢合理的,避免了刚度突变,降低了此区的局部应力水平,减少了应力集中。如图9、图10所示。

(3) 采用提高疲劳寿命的工艺方法

尽量使用干涉配合紧固件,在主框缘条与副框、球皮相连接的表面采用喷丸强化,如图11所示,这将在结构表面产生残余压应力,有效地提高疲劳寿命。

(下转第34页)

耦,可以有效抑制这种高空驼峰型颤振。在进行飞机颤振分析时,若其速度阻尼特性中有驼峰型颤振分支,应特别关注该分支随高度变化特性,确保高空状态下安全。

参考文献:

[1] D. D. Liu, D. Sarhaddi, and F. M. Piolenc. Flutter preven-

tion handbook; a preliminary collection. NASA/TP-2006-212490/VOL2/PART2.

[2] Robert G. Borst and Robert W. Stromet, E-6 Flutter Investigation and Experience, AIAA Guidance Navigation and Control Conference, Hilton Head SC, August 10-12, 1992.

[3] 杨永年,赵令诚. 非正常气动力及颤振[M]. 西安:西北工业大学,1982:91-99.

(上接第 23 页)

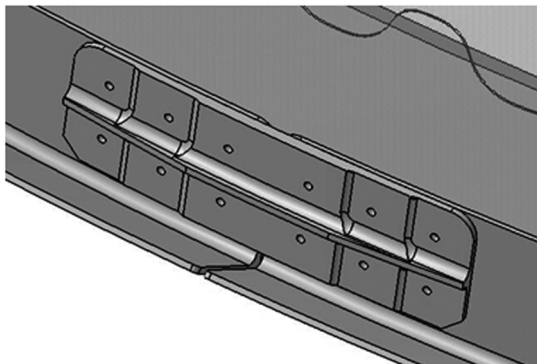


图 9 对接接头的设计

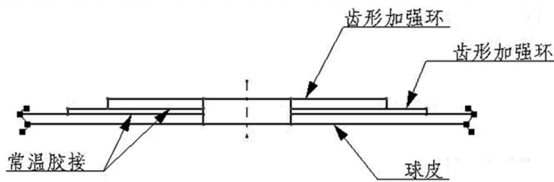


图 10 典型的球皮开孔加强

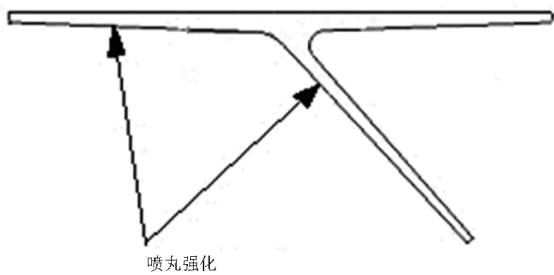


图 11 主框缘条喷丸强化

4 气密设计

球面框的密封采用机械密封辅以密封胶密封。

机械密封,即所有穿过气密线的紧固件均采用干涉配合,达到密封的目的。因此,凡是与球皮连接的铆钉,全部采用气密铆接,气密铆接的铆钉墩头均在球皮的凹面镦制。

另外,凡在球皮凹面安装的齿形加强板、齿形加强环、顶盖、止裂带等零件,均需辅以贴合面密封

及填角密封。

5 材料选择

根据球面框各零件的受力和使用特点,选择合适的材料。框缘及其接头应选择拉伸和屈服强度都比较高的材料,球皮、辐条应选择延伸率较好、裂纹扩展速率低、疲劳寿命长的材料。

常规的球面框结构材料选用情况如表 1 所示。

表 1 球面框主要结构材料选用情况

零件名称	材料	成形形式
球皮	2024-T42	薄板拉伸
辐条	2024-T42	板弯
主框缘条	7075-T73	挤压型材
副框	7075-T62	挤压型材
辐条接头顶环	2024-T42	板弯
齿形加强板顶盖止裂带	2024-T3	薄板
框缘条对接接头	7050-T7451	厚板机加

6 结论

本文从球面框的受力分析出发,介绍了一种典型的薄板加筋铆接式球面框结构,包括球面框各主要结构件的设计、抗疲劳设计、气密设计及结构选材。不过,如何能设计出一个重量轻、安全可靠、耐久性高的球面框结构,还需从更多的细节设计入手。

参考文献:

[1]《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第 9 册:载荷、强度和刚度[M]. 北京:航空工业出版社,2001.

[2]《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第 10 册:结构设计[M]. 北京:航空工业出版社,2000.

[3] 牛春匀. 实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M]. 北京:航空工业出版社,2009.

[4]《飞结构耐久性与损伤容限设计手册》编委会. 先进民机结构耐久性设计手册[M]. 第一飞机设计研究院,2004.