

加强筋对客机复合材料球面框结构屈曲性能影响

李中洋, 李东, 郭祥

(中航工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

[摘要] 本文针对客机复合材料球面框, 通过有限元计算, 对球面框上的加强筋对结构屈曲性能的影响展开深入研究。球面框球皮采用碳纤维层合板, 加强筋为填充 PMI 泡沫的帽形加强筋。建立有加强筋和无加强筋两种结构方案, 并建立有限元模型进行静力和屈曲分析计算。结果表明客机复合材料球面框的加强筋对球面框结构的屈曲性能和稳定性有一定的改善作用, 但对球面框结构的静强度改善作用不大, 增加加强筋后球面框的应变和位移变化较小。球面框结构设计时出于成本和制造工艺考虑可以不采用加强筋。

关键词: 复合材料球面框; 帽形加强筋; 屈曲分析

Effect of Stiffeners on the Buckling Performance of Composite Rear Pressure Bulkhead for Civil Aircraft

LI Zhongyang, LI Dong, GUO Xiang

(First Aircraft Institute of AVIC, Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] In this paper, the research on structure buckling performance due to stiffeners on the composite domed rear pressure bulkhead of civil aircraft is carried out. The dome skin adopts the CFRP laminate and the stiffeners are hat shape stiffeners with PMI foam core. According to establish two categories of structure with and without stiffeners, the static and buckling analyses by using of finite element analysis are carried out. The results show that the stiffeners on the composite domed rear pressure bulkhead have a positive influence on improving the buckling performance and stability of the structure, but the stiffeners contribute less on the improvement of static strength of rear pressure bulkhead. The strain and deflection of the rear pressure bulkhead are improved slightly. So it makes no sense to increase the stiffeners on the domed rear pressure bulkhead from the perspective of cost saving and manufacturing.

Keywords: Composite rear pressure bulkhead; Hat-shape stiffener; Buckling analysis

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.112

球面框是飞机结构中最重要部件之一, 是气密区与非气密区的分界面, 主要承受机舱内部的气密载荷^[1]。

圆柱形机身的气密框最好是一个球形的框。一个半球曲面可以带来最理想的膜应力, 并且最节省材料。实际上飞机的球面框是一个球冠, 而不是一个完整的半球。球冠外形与机身壁板的夹角是 60°, 这样的角度可以让结构最经济, 重量最轻, 这个角度被称之为子午圈角^[2]。60° 的子午圈角也会使得机身的空间得到有效的利用。材料为金属材料时, 球皮在子午圈角为 60° 时重量最轻^[3]。材料为复合材料时, 铺层选取为准各项同性层合板可以使得球皮应力和应变处处相等。考虑到复合材料铺层对称性和层合板的力学性能, 对于复合材料球面框来说, 为了能够选取到最佳的准各向同性铺层, 当铺层的角度和数量确定时, 子午圈角角度越小, 重量越轻。

在客机上, 为了满足气动外形和乘客、座位、客舱内部厨房等的要求, 机身截面一般不是一个圆柱形, 而是一个复杂的曲面。为了适应机身复杂的截面, 球面框的外形一般也会设计成一个比较复杂的曲面。但是, 一个规则的球冠外形被认为是球面框结构的最佳外形, 因为这样的外形理论上来说, 在气压载荷下应力和应变处处相等, 并且没有应力集中。为了装配规则球冠外形的球面框和机身结构, 需要设计一个辅助的环框^[4]。本文基于假设机身截面是个等直径的圆柱体而完成, 不讨论环框。

假定机身的直径是 3000mm, 本文通过将球面框球皮凸面增加带有 PMI 泡沫的帽形加强筋来分析加强筋对球面框结构屈曲性能的影响。

1 结构设计与材料

一般情况下, 飞机的后气密端框为金属框, 金属材

料虽然制造工艺较为成熟,但是存在抗腐蚀性能较差、重量较大等缺点。复合材料与金属材料相比,优点显著。复合材料具有较高的比强度,较好的抗腐蚀能力,优异的抗疲劳损伤能力,重量更轻。

随着复合材料在航空工业的大范围使用,复合材料球面框也成为了新的发展趋势。目前的客机中,复合材料球面框一般采取两种结构形式。波音 787 和 CS100 飞机的复合材料球面框仅是一整块球皮,在球皮的碳纤维铺层之间增加了一层网状结构,此网状结构的作用是止裂,并且能对球皮起到一定的加强作用。此类复合材料球面框表面没有加强筋结构。A340、A350 和 A380 飞机的复合材料球面框则是在一整块球皮上增加了帽形加强筋,在帽形加强筋的中间填充有 PMI 泡沫。带有 PMI 泡沫的帽形加强筋二次胶结或者共固化在球皮的凸面或者凹面,对球皮进行加强。帽形加强筋的数量根据球面框直径大小以及球皮上开孔的位置和数量而定。

对于复合材料来说,冲击载荷对结构的损伤超过了疲劳问题,成为结构的最大威胁。复合材料结构最关键的损伤是结构的分层,结构的疲劳不是复合材料结构关注的最主要问题^[5]。因此,在复合材料球面框球皮上不需要像金属球面框一样考虑环向和径向的止裂结构。这也允许了复合材料球面框球皮在制造过程中,可以不分块,将球皮设计和制造成一块整球皮结构。球皮在制造时将 NCF 叠层块铺覆于模具上,注入树脂,将带 PMI 的帽形加强筋与球皮同时固化,固化后再在球皮上开圆孔^[6]。

根据经典板理论,球面框球皮的厚度可由公式(1)得出^[1]:

$$t = \frac{PR_c}{2f_c} = \frac{PR_c}{2f_\phi} \quad (1)$$

在进行结构初步设计时,对于客舱气压载荷下的复合材料结构而言,进行初步结构设计时,此处可采取平均应力不大于 140MPa^[7]。因此,此处 $f_c=f_\phi=140\text{MPa}$ 。

f_c 为球皮的切向应力, f_ϕ 为球皮的径向应力, P 为客舱内部气密载荷, R_c 为球面框球皮曲面半径, t 为球皮厚度。

本文复合材料球面框结构具体参数见表 1。

本研究采用了 CFRP 复合材料 Hexcel 8852 IM7 来设计球面框球皮,Hexcel 8852 IM7 是一种广泛应用在航空结构上的性能卓越的碳纤维复合材料,它有较好的抗冲击能力。Hexcel 8852 IM7 属性见表 2。

由于球面框外形采用规则的球冠和机加环框方案,理论上来说,规则的球冠球皮上的应力处处相等。因此,在设计的时候选用了准各向同性铺层,以保证球皮的受

表1 球面框特征值

参数	数值
机身半径 R_r/mm	3000
球面框半径 R/mm	1732.051
球面框高度 H/mm	866.025
球面框球皮厚度 t/mm	1.048
气密载荷(正) $\Delta P/\text{kPa}$	60
负载荷 $\Delta P'/\text{kPa}$	-7
子午圈角 $\Phi/^\circ$	60

表2 Hexcel 8852 IM7材料属性

参数	数值
单层名义固化厚度 t/mm	0.131
层合板名义密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.57
0° 拉伸强度 X_t/MPa	2724
90° 拉伸强度 Y_t/MPa	111
0° 拉伸模量 E_1/GPa	164
90° 拉伸模量 E_2/GPa	12
剪切模量 G_{12}/GPa	5.8
0° 压缩强度 X_c/MPa	1690
90° 压缩强度 Y_c/MPa	250
层间剪切强度 S/MPa	120
泊松比 ν	0.28
纤维体积比 $V_f/\%$	60

力均匀。复合材料结构应该最少限度使用同方向的纤维^[3]。在结构的表面应多使用 $\pm 45^\circ$ 铺层,因为 $\pm 45^\circ$ 铺层对结构抗冲击和抗划伤能力有一定的改善作用^[8]。准各项铺层层合板每个铺层的角度为 π/N ,此处 N 大于等于 3,且每个角度的铺层都有对称铺层。对于给定材料的铺层,准各向同性铺层层合板各向的弹性属性相同^[9]。因此,球皮结构采用准各项同性铺层,铺层顺序 $[45/-45/0/90]_n$ 。

本研究中,帽形加强筋共 8 个,布置在球面框球皮凸面。帽形加强筋选取的材料以及材料的铺层顺序和厚度与球皮一致。帽形加强筋内部填充有 PMI 泡沫。PMI 泡沫是一种紧凑的刚度较好、重量较轻的泡沫。PMI 泡沫可以被看做是一种各向同性材料,添加在帽形加强筋里可以改善加强筋的刚度性能。一般情况下,PMI 泡沫被认为对结构的强度和刚度几乎没有贡献,但是实际上 PMI 泡沫起到了结构件的作用,增强了帽形加强筋的强度和刚度,因此可以有助于减少帽形加强筋铺层数量^[5]。

本研究采用了 ROHACELL 71MF 泡沫,这种泡沫夹心材料广泛应用在空客和波音飞机的复合材料球面框上。表 3 为 ROHACELL 71MF 泡沫材料的属性。

带有 PMI 泡沫的帽形加强筋结构通过二次固化与球面框球皮连接。作为结构初步设计。

对于帽形加强筋,可以定义^[7]:

$$a_{ratio} = \frac{b_w}{t_s}; b_{ratio} = \frac{b_f}{t_s} \quad (2)$$

$$a_{ratio} \in [18 \ 22] \text{ 且 } b_{ratio} \in [6 \ 8] \quad (3)$$

一般来说:

$$b_c = b_w - 2t \quad (4)$$

其中, b_c 为帽形加强筋上部宽度, b_w 为帽形加强筋侧部长度, b_f 为帽形加强筋与球皮贴合部分宽度。

根据以上公式可得表 4 所示的加强筋特征值。表 5 所示为帽形加强筋铺层顺序表。

表3 PMI泡沫ROHACELL 71WF材料属性

参数	数值
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3})$	75
压缩强度 X_c/MPa	1.7
拉伸强度 X_t/MPa	2.2
剪切强度 τ_s/MPa	1.3
弹性模量 E_t/MPa	105
剪切模量 E_s/MPa	42
断裂应变 $\delta/\%$	3.0

表4 加强筋特征值

参数	特征值
加强筋面板厚度 t_s/mm	1.048
加强筋高度 b_w/mm	25
加强筋下缘条宽度 b_f/mm	15
加强筋上缘条宽度 b_c/mm	20
加强筋上缘条厚度 t_c/mm	1.048
加强筋腹板厚度 t_w/mm	1.048
加强筋腹板与缘条夹角 $\alpha/(\text{°})$	65

表5 加强筋铺层顺序

部位	层合板种类	铺层顺序
腹板	准各项同性	[45/-45/0/90] _s
上缘条	最大值 $\pm 45^\circ$	[45/-45/0/-45/45/90/-45/45]
下缘条	最大值 $\pm 45^\circ$	[45/-45/0/-45/45/90/-45/45]

2 仿真分析与结果讨论

2.1 仿真分析

仿真分析通过在 CATIA 中完成三维建模,然后在 Hyperworks 里进行有限元建模。将球面框球皮和帽形加强筋简化为 2D 膜元,将 PMI 泡沫夹心采用 solid 单元划分。

静力分析是在球皮凹面加载 $2\Delta P=2 \times 8.7\text{psi}=120\text{kPa}$ 载荷。根据适航条例要求,球皮考虑承受负压 $\Delta P'=-0.5\text{psi}=-3.45\text{kPa}$,因此在球面框球皮结构屈曲分析时,在球皮凸面加载 $2\Delta P'=-0.5\text{psi} \times 2=-6.9\text{kPa}$ 载荷。由于本研究所选取的球面框球皮外形是一个规则的球冠外形,球皮上的帽形加强筋为 8 个,因此本结构为完全对称的结构。在进行有限元建模时,为了减少建模时间和运算时间,仅选取球面框球皮结构的 1/4 进行典型结构的研究。边界条件为球皮四周固支。

2.2 结果讨论

表 6 为 $2\Delta P$ 载荷下有加强筋和无加强筋球面框应变和位移,表 7 为 $2\Delta P'$ 载荷下有加强筋和无加强筋球面框两阶屈曲值。

表6 $2\Delta P$ 载荷下有加强筋和无加强筋球面框应变和位移

参数	有加强筋	无加强筋
应变 $/\mu\epsilon$	961	888
变形 $/\text{mm}$	2.17	2.9

表7 $2\Delta P'$ 载荷下有加强筋和无加强筋球面框两阶屈曲值

屈曲值	有加强筋	无加强筋
1 阶屈曲值	3.84	3.54
2 阶屈曲值	3.86	3.55

根据表 6 所示的结构静力分析结果,复合材料球面框在无帽形加强筋时应变是 $888\mu\epsilon$,而增加了帽形加强筋之后为 $961\mu\epsilon$ 。帽形加强筋与球皮接触部位应变较大。此外,球皮顶部和球皮与机身连接部位应变较大。球皮的根部,即球皮与机身连接的部位为球皮结构关键部位,此区域由于球面框与机身对接件对球皮的约束,应力和应变都较大。复合材料球面框的位移在无帽形加强筋时为 2.9mm ,增加了帽形加强筋之后为 2.17mm 。

根据表 7 所示的结构屈曲分析结果,复合材料球面框结构在无帽形加强筋时 1 阶和 2 阶屈曲值分别为 3.54 和 3.55,增加了帽形加强筋之后 1 阶和 2 阶屈曲值分别为 3.84 和 3.86,屈曲值略有增加。无加强筋时,球皮结

构屈曲发生的部位在球皮的顶部。增加帽形加强筋之后,球皮的屈曲范围缩小,球皮结构屈曲发生的部位在球皮的侧部。

3 结论

根据复合材料球面框结构静力分析和屈曲分析可以得到以下结论:

(1) 球皮厚度保持不变的情况下,增加帽形加强筋之后,由于帽形加强筋约束了球皮的自由膨胀,反而使得帽形加强筋附近的球皮应变加大,但在材料许用应变范围内;由于帽形加强筋的约束作用,球皮结构整体位移有所减小;增加帽形加强筋后球皮的最大应变不减反增,对球面框结构的静强度贡献不大。

(2) 增加帽形加强筋之后,球皮的屈曲值略微增加,球皮的屈曲范围减小,但是在结构设计时屈曲值大于1即可接受,帽形加强筋对球面框屈曲性能改善很小。

(3) 帽形加强筋对球皮的结构稳定性和刚度的改善有一定的作用,但是作用不大,出于结构成本和制造考虑,可以取消帽形加强筋。

(4) 球皮根部与机身连接部位为球面框结构的薄弱区域,也是疲劳发生的区域,在进行结构设计时,需要采取一定的加强设计。

参考文献

- [1] NIU M C. Airframe stress analysis and sizing[M]. Hong Kong: Conmilit Press, 1999.
- [2] NIU M C. Airframe structural design: practical design information and data on aircraft structures[M]. Hong Kong: Conmilit Press, 1999.
- [3] CILLARES E V, HERNANDEZ I O. Aircraft pressure bulkhead assemble structure: US, 2010/0243806 A1[P]. 2010-09-30.
- [4] VENKATESH S, KUTTY M G, VARUGHESE B, et al. Design, development and certification of composite rear pressure bulkhead for a light transport aircraft[C]// Proceedings of 18th International Conference on Composite Materials, London, 2011.
- [5] NIU M C. Composite airframe structures: practical design information and data[M]. Hong Kong: Conmilit Press, 1992.
- [6] SCHIEBEL P, HERRMANN A S. Textiles preform technologies in the aviation sector chances and challenges for the automotive sector[C]// Proceedings of IFAI Advanced Textiles Conference, Berlin, 2008.
- [7] HOWE D. Aircraft loading and structural layout[M]. UK: Professional Engineering Publishing, 2004.
- [8] KAW A K. Mechanics of composite materials second edition[M]. New York: Talor & Francis Group, 2006.
- [9] Department of Defense. MIL-HDBK-17-3F Composite materials handbook volume 3 polymer matrix composites materials usage, design and analysis[S]. USA: Department of Defense, 2002.

(责编 海山)

(上接第111页)

2011(30):1618-1622.

[22] 黄绍服,曾永彬,朱狄,等. 阴极高速旋转对微细电化学钻孔加工精度的影响[J]. 重庆大学学报, 2010(33): 34-39.

HUANG Shaofu, ZENG Yongbin, ZHU Di, et al. Influence of high speed rotating cathode on the precision of micro-electrochemical drilling hole[J]. Journal of Chongqing University. 2010(33):34-39.

[23] 贾宝贤,边文凤,赵万生,等. 微细孔超声加工关键技术[J]. 机械工程学报, 2007(11): 212-216.

JIA Baoxian, BIAN Wenfeng, ZHAO Wansheng, et al. Key Technology in ultrasonic machining micro holes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007(11): 212-216.

[24] 安成明,殷国强,李剑中,等. 微细孔、阵列空及微细三维型腔的超声加工研究[J]. 电加工与模具, 2011(1): 23-27.

AN Chengming, YIN Guoqiang, LI Jianzhong, et al. Study of micro hole, hole array and 3D micro cavity machined by USM[J]. Electromachining & Mould, 2011(1):23-27.

[25] NATH C, LIM G C, ZHENG H Y. Influence of the material removal mechanisms on hole integrity in ultrasonic machining of structural ceramics[J]. Ultrasonics, 2012, 52(5): 605-613.

[26] KUAR A S, DOLOI B, BHATTACHARYYA B. Modeling and analysis of pulsed Nd:YAG laser machining characteristics during micro-drilling of zirconia (ZrO₂) [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(12-13): 1301-1310.

[27] ENDO T, TSUJIMOTO T, MITSUI K. Study of vibration-assisted micro-EDM: The effect of vibration on machining time and stability of discharge[J]. Precision Engineering, 2008, 32(4): 269-277.

[28] KAI E, MORITA Y, HATTORI Y. Electrical discharge machining of submicron holes using ultrasmall-diameter electrodes[J]. Precision Engineering, 2010, 34(1):139-144.

[29] WÜTHRICH R, HOF L A. The gas film in spark assisted chemical engraving (SACE)—A key element for micro-machining applications[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(7-8):828-835.

[30] XUAN D C, BO H K, CHONG N C. Micro-structuring of glass with features less than 100µm by electrochemical discharge machining[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4): 459-465.

[31] CHENG C P, WU K L, MAI C C, et al. Study of gas film quality in electrochemical discharge machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(8): 689-697.

[32] LIU H S, YAN B H, HUANG F Y, et al. A study on the characterization of high nickel alloy micro-holes using micro-EDM and their applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(3): 418-426.

[33] BHATTACHARYYA B, MALAPATI M, MUNDA J, et al. Influence of tool vibration on machining performance in electrochemical micro-machining of copper[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007,47(2): 335-342.

[34] ZHU D, ZENG Y B, XU Z Y, et al. Precision machining of small holes by the hybrid process of electrochemical removal and grinding[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2011,60(1): 247-250.

[35] SARWADE A. Study of micro rotary ultrasonic machining[D]. Lincoln: University of Nebraska, 2010.

[36] PATWARDHAN A, GU L, RAJURKAR K P. Micro rotary ultrasonic machining with different working fluids.ICOMM: 2011: 305-311.

(责编 海山)