

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.08.039

民用飞机后压力框破裂风险分析初探

刘会星*, 刘艳, 郭忠宝

上海飞机设计研究院, 上海 201210

摘要: 民用飞机在巡航时发生后压力框破裂 (APBR), 瞬间产生的冲击波可能破坏后机身关键结构与系统, 影响继续安全飞行和着陆。将 APBR 视为空气介质压力容器的爆炸, 讨论了 APBR 冲击影响的工程计算方法, 提出了 APBR 风险分析方法和风险减缓的设计措施, 为飞机系统安全性设计及其适航符合性验证提供理论支持。

关键词: 后压力框破裂; 特定风险分析; 安全性; 冲击波; 峰值超压

中图分类号: V215 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 08-0039-04

民用飞机的后压力框 (也称为球面框) 是机身客舱的后端框, 是全封闭的气密端框, 要承受客舱的增压、负压载荷和蒙皮传递的机身拉压载荷。如果飞机在高空巡航时后压力框破裂, 增压客舱的高压气体向后机身释放, 瞬间在后机身形成超压冲击波, 可能导致部分结构和系统损坏或失效, 影响飞行安全。1985 年 8 月 12 日, 日本航空公司一架波音 747 发生后压力框破裂。在后机身形成的高压破坏了垂直安定面, 4 套独立的液压系统全部失效, 飞机失控坠毁, 导致 520 人死亡。

在压力框失效方面, 李涛^[1]分析了后压力框破裂 (APBR) 对液压系统的影响, 并将后压力框破裂的危害视为圆锥形空气喷流模型。研究发现, 该模型来源于轮胎爆破分析中的空气喷流模型^[2-4], 且文献 [1] 未提供冲击压力的计算方法。由于轮胎和后压力框的材料属性和结构特点等不同, 因此, 将轮胎爆破分析的喷流模型用于后压力框破裂分析的方法或可商榷。Salam 等^[5]从应力腐蚀的角度分析了后压力框的失效机理。Breard 等^[6]利用计算流体力学 (CFD) 计算分析了驾驶舱突然释压时的峰值压力和内外部流场。目前, 国内外有关后压力框破裂影响分析的资料较少。本文讨论了后压力框破裂冲击影响的工程计算方法, 提出了风险分析方法和风险减缓的预防设计措施。

1 后压力框破裂的危险性

导致后压力框破裂的直接作用力是其两侧压差形成的压力。飞机巡航时发生后压力框破裂, 增压舱的高压空气高

速涌入后机身, 在后机身前段形成高压冲击, 如图 1 所示。虽然后机身的通气阀或其他释压装置能够释放后机身压力, 但在后压力框破裂的瞬间, 高速气流仍然会对其附近区域产生较大的压力冲击, 可能会导致部分结构和系统损坏或失效, 影响飞行安全。

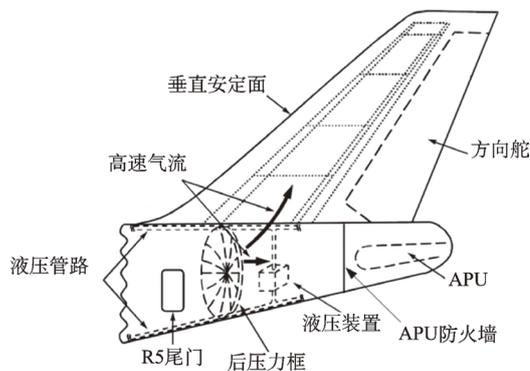


图 1 APBR 示意图
Fig.1 Sketch of APBR

从事调查^[7]可知, 后压力框破裂可能造成的直接或间接危险包括: (1) 在后机身前段形成超压冲击波, 破坏结构和系统 / 设备, 导致后机身关键结构损坏或丧失以及关键系统失效, 失去飞行控制。(2) 引起客舱快速释压, 压力下降过快会导致机组和乘客不适或受伤。(3) 冲击波造成结构、系统 / 设备的损坏和危险源组合, 可能导致次生危险。后机身安装有燃油系统、液压系统、辅助动力装置 (APU)、

收稿日期: 2017-06-02; 退修日期: 2017-06-09; 录用日期: 2017-07-15

* 通讯作者. Tel.: 13917658256 E-mail: liuhuixing888@163.com

引用格式: LIU Huixing, LIU Yan, GUO Zhongbao. Preliminary study on risk analysis of Aft Pressure Bulkhead Rupture for civil aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (08): 39-42. 刘会星, 刘艳, 郭忠宝. 民用飞机后压力框破裂风险分析初探 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (08): 39-42.

电气线路互联系统 (EWIS) 等系统,存在蓄压器、燃油、电流等危险源。次生危险如:蓄压器爆破所释放冲击能量会进一步破坏周围系统与结构;EWIS 电线断开,电火花接触泄漏的燃油,会引起火灾等。

由于民机系统安全性评估中将快速释压作为单独的特定风险项进行分析,因此,本文以后压力框破裂时冲击波的影响分析为主。

2 后压力框破裂的分析方法

根据 SAE ARP 4761^[8] 的特定风险分析流程,首先确定风险影响范围以开展安全性分析和设计工作。后压力框破裂的危险区域为后压力框后部距离 S 范围内的区域, S 根据不同机型的系统布置和工程经验而定,如图 2 所示。

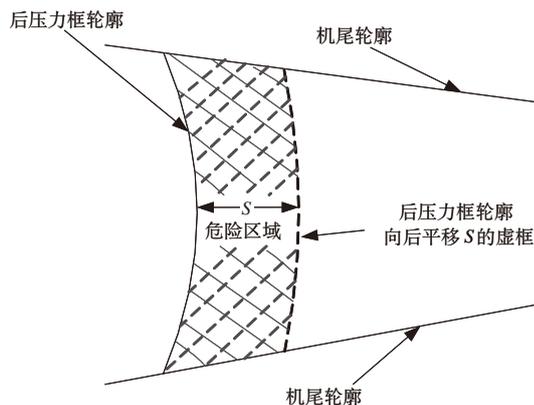


图 2 APBR 的危险区域
Fig.2 Risk zone of APBR

2.1 受影响的结构和系统设备

(1) 主结构件:为了防止丧失结构完整性,应识别危险区域内的主结构件并确定其安装位置,进而评估后压力框破裂对主结构件的冲击影响。

(2) 关键系统/设备:后压力框破裂风险的关键系统/设备定义为安装在危险区域内、失效可能导致灾难性和危险失效状态的系统/设备。应根据系统功能危险性评估,识别危险区域内的关键系统/设备并确定其安装位置。

(3) 含有增压能源设备/部件:具有增压能量的设备/部件(如蓄压器、增压气瓶等)的失效可能会快速释放自身能量,可能进一步破坏周围结构或系统。应识别危险区域内含有增压能源的设备/部件并确定其安装位置。

2.2 冲击波的影响分析

识别了危险区域内的主结构件或设备及其安装位置后,需评估后压力框破裂对主结构件或设备的冲击影响。后压力框破裂可视作气体介质压力容器的爆炸。爆炸冲击波的破坏作用常用超压峰值准则来衡量,而超压峰值取决于冲击距离、

TNT 当量和传播介质。冲击波波阵面上的超压与产生冲击波的能量成正比,与距离成反比。本文假设后压力框破裂的开口尺寸和形状与释压速度相关,而与峰值超压无关。

有 4 种方法估算后压力框破裂的爆炸能量:Brode 方程、等熵膨胀、等温膨胀和热力学有效性方法^[9, 10],计算公式分别如下:

$$E = \frac{(P_2 - P_1)V}{\gamma - 1} \quad (1)$$

$$E = \left(\frac{P_2}{\gamma - 1} \right) \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \quad (2)$$

$$E = P_2 V \cdot \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (3)$$

$$E = P_2 V \cdot \left[\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) - \left(1 - \frac{P_1}{P_2} \right) \right] \quad (4)$$

式中: E 为爆炸能量,单位为 MJ; p_1 为周围环境压力,单位为 MPa; p_2 为增压舱的爆炸压力,单位为 MPa; V 为增压舱的容积,单位为 m^3 ; γ 为空气的绝热指数,取 1.4。通常将爆炸能量乘以 0.5 用于计算峰值超压^[9]。

冲击波峰值超压常用比例距离 Z 表示为^[11]:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{m^{\text{TNT}}}} \quad (5)$$

式中: R 为冲击距离,即结构件或设备到后压力框的距离; m^{TNT} 为 TNT 当量, $m^{\text{TNT}} = E/Q^{\text{TNT}}$; Q^{TNT} 为 TNT 的爆炸当量能量,一般取平均值 4686kJ/kg。

冲击波峰值超压可用经验公式计算^[12]:

$$P_{so} = \begin{cases} \frac{0.084}{Z} + \frac{0.27}{Z^2} + \frac{0.7}{Z^3} & Z \leq 1 \\ \frac{0.076}{Z} + \frac{0.255}{Z^2} + \frac{0.65}{Z^3} & 1 \leq Z \leq 1.5 \end{cases} \quad (6)$$

因此,根据增压舱的容积、压力和冲击距离,可得到某处的峰值超压。假设某结构件/设备在后压力框上的投影面积为 A ,则此结构或设备在后压力框破裂瞬间受到的冲击力 F 为 $F = P_{so} \cdot A$ 。通过对比冲击力和结构件/设备的极限载荷 L ,可判断结构件/设备是否被破坏。

2.3 分析示例

设某型飞机在 12192m 发生后压力框破裂,发生条件如表 1 所示。可见,不同公式计算得到的爆炸能量均较为接近。本例取用等熵膨胀公式计算的爆炸能量。

设某飞控作动器位于危险区域内,它距后压力框的距离 R 、在后压力框上的投影面积 A 如表 1 所示。如果该设备的极限载荷 L 小于 F ,则判断它将被冲击波所损坏。

表1 冲击影响分析示例
Table 1 A case of shock effect analysis

条件	$p_1=0.019\text{ MPa}, p_2=0.076\text{ MPa},$ $V=270\text{ m}^3$		$R=0.5\text{ m}, A=0.16\text{ m}^2$
结果	公式	爆炸能 E (MJ)	
1		38.5	$m^{\text{TNT}}=1.8\text{ kg},$
2		16.8	$z=0.412\text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3},$
3		28.5	$p_w=11.8\text{ MPa},$
4		13.1	$F=1888\text{ kN}$

3 预防和设计措施

为减缓后压力框破裂风险的影响,需在飞机设计阶段考虑后压力框破裂的风险。根据工程实践^[11],从总体设计和系统安装两个角度,提出降低后压力框破裂发生的可能性或限制其影响的预防与安装设计措施。

3.1 总体设计考虑

(1) 后压力框结构失效-安全设计:后压力框结构通常采用失效-安全设计。后压力框通常有若干径向的加强筋和周向的止裂带,在后压力框的隔框板出现裂纹时,止裂带将裂纹传播限制在单个分隔区内,单个分隔区内的承压板将出现开口,并可控地释放座舱压力。这样可防止整个圆顶突然分离而使后压力框后的区域暴露在极高的压差中。

在后压力框结构设计中,通过贯彻“破损-安全”设计原理,将后压力框破裂的开口限制在局部区域而不会整体断开,并评估可能出现的最大开口尺寸。后压力框破裂的开口尺寸直接影响在后机身形成压力的大小,进而影响对后机身释压能力的需求^[13]。

(2) 后机身释压装置:通过后机身设计通气门或其他释压装置,以及时释放后机身的压力。结构设计中通过采取分析、仿真或试验的手段,确保飞机有足够的压力释放后压力框破裂在后机身形成的压力。

(3) 避免APU非包容转子撞击:民用飞机的APU常安装在尾锥内。APU可能发生高能转子非包容失效,转子飞出后如果击中后压力框,将会破坏后压力框结构。因此,应通过设计措施避免APU转子失效破坏后压力框。

(4) 提供损伤检测方法与手段:通过提供全面、彻底的后压力框损伤检测手段,及时发现裂纹与损伤,为及时、合理地实施维修、剔除后压力框破裂隐患提供保障。

3.2 系统安装设计措施

(1) 冗余系统隔离:对于必须安装在危险区域内且有冗余的关键系统(如液压系统),通过隔离设计确保后压力框破裂不会造成冗余系统全部丧失。隔离要求为:危险区域

内互为冗余的系统在后压力框投影的最小间隔应大于 d , d 视后压力框破裂的失效模式和冗余系统安装情况而定。

(2) 防止火灾:后压力框附近可能含有可燃液体的系统(如燃油系统)和可能成为点火源的系统(如可能产生的电火花电子设备、电线,或者表面温度超过 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 的设备)。为防止后压力框破裂可能引起的火灾,一方面,含有可燃液体的系统应通过相关设计,尽可能地降低后压力框破裂造成可燃液体泄漏的可能性;另一方面,可能是点火源的系统应尽可能远离含有可燃液体的系统,且不能安装在含有可燃液体系统的正下方。通过梳理安装在危险区域、含有可燃液体的系统和可能成为点火源的系统,确认含有可燃液体系统和潜在点火源系统相互之间的安装位置满足上述要求。

根据以上方法,评估后压力框破裂风险对结构、系统和飞机的安全性影响,说明飞机与系统采取的安装与预防措施。如果影响可以接受,整理结论并形成风险分析报告以备适航局方审查;如果不可以接受,则对设计进行修改。

4 结论

本文介绍了民用飞机后压力框破裂的危险性,讨论了后压力框破裂的风险分析方法及其冲击影响的计算分析方法,提出了减缓风险的设计与安装预防措施。示例表明,本文的分析方法在工程上是可行的,且分析结果较为合理。因此,本文的风险分析方法和设计措施有助于促进后压力框破裂的安全性设计及其适航取证工作。

AST

参考文献

- [1] 李涛. 民用飞机后压力框破裂对液压系统的危害分析[J]. 航空科学技术, 2013, 24(6): 23-26.
LI Tao. Hazard analysis of civil aircraft rear pressure bulkhead burst to hydraulic system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2013, 24(6): 23-26. (in Chinese)
- [2] Joint Aviation Authorities. JAA temporary guidance material, TGM/25/08 (issue 2), wheel and tire failure model [S]. 2002.
- [3] European Aviation Safety Agency. Notice of proposed amendment (NPA) 2013-02, protection from debris impacts [S]. 2013.
- [4] 谢孟恺, 周昌明, 范平. 轮胎爆破下飞机液压能源系统安全性分析方法[J]. 航空科学技术, 2015, 26(9): 46-49.
XIE Mengkai, ZHOU Changming, FAN Ping. Aircraft hydraulic system safety analysis method for tire burst [J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(9): 46-49. (in Chinese)

- [5] Salam I, Khan A N, Farooque M. Failure of the pressure bulkhead of a passenger aircraft-a case study [J]. *Key Engineering Materials*, 2012 (510-511): 206-213.
- [6] Breard C, Lednicer D, Lachendro N, et al. A CFD analysis of sudden cockpit decompression [C] //42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004; 1-10.
- [7] Aircraft Accident Investigation Commission. Aircraft accident investigation report [R]. Ministry of Transportation of Japan, 1987.
- [8] ARP4761 Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems; aerospace recommended practice [S]. SAE International, 1996.
- [9] 蒋军成, 潘旭海. 化工过程安全理论及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 164-170.
JIANG Juncheng, PAN Xuhai. Chemical process safety fundamentals with applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 164-170. (in Chinese)
- [10] 党文义, 刘昌华. 压缩气体容器物理爆炸计算模型 [J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34 (2): 104-107.
DANG Wenyi, LIU Changhua. Physical explosion calculation models of the pressurized gas vessels [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34 (2): 104-107. (in Chinese)
- [11] 傅智敏, 黄金印, 臧娜. 爆炸冲击波伤害破坏作用定量分析 [J]. *消防科学与技术*, 2009, 28 (6): 390-395.
FU Zhimin, HUANG Jinyin, ZANG Na. Quantitative analysis for consequence of explosion shock wave [J]. *Fire Science and Technology*, 2009, 28 (6): 390-395.
- [12] 杨鑫, 石少卿, 程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟 [J]. *爆破*, 2008, 25 (1): 15-19.
YANG Xin, SHI Shaoqing, CHENG Pengfei. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in the air [J]. *Blasting*, 2008, 25 (1): 15-19. (in Chinese)
- [13] 郭博智, 王敏芹, 阮宏泽. 民用飞机安全性设计与验证技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2015.
GUO Bozhi, WANG Minqin, RUAN Hongze. Safety design and verification in civil aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015. (in Chinese) (责任编辑 王潇一)
- 作者简介**
刘会星 (1985-) 男, 博士, 工程师。主要研究方向: 民用飞机系统安全性设计。
Tel: 13917658256
E-mail: liuhuixing888@163.com

Preliminary Study on Risk Analysis of Aft Pressure Bulkhead Rupture for Civil Aircraft

LIU Huixing*, LIU Yan, GUO Zhongbao

Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China

Abstract: When the Aft Pressure Bulkhead Rupture (APBR) occurred during the cruise phase of civil aircraft, the shock wave generated instantaneously may destroy the critical structure and systems of the aft fuselage, which may affect continued safe flight and landing. This paper treated the APBR as the explosion of air pressurized vessel, and discussed the engineering method to calculate the shock impact of the APBR. Moreover, proposed the analysis method of APBR risk and design measures for risk reduction, which can provide theoretical justification for system safety design and its airworthiness compliance verification.

Key Words: APBR; PRA; safety; shock wave; peak overpressure

Received: 2017-06-02; Revised: 2017-06-09; Accepted: 2017-07-15

*Corresponding author. Tel. :13917658256 E-mail: liuhuixing888@163.com