

APU 转子爆破对防火墙影响的研究

Study on the Effect of APU Rotor Bursting on the Firewall

何周理 何林锋 李 萍 / He Zhouli He Linfeng Li Ping

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

摘 要:

APU 是安装在民用飞机上的辅助动力装置,是飞机上重要的部件,因此必须考虑 APU 转子爆破时小碎片对飞机安全的影响。通过有限元软件 LS-DYNA,分别模拟了 APU 转子爆破时小碎片对 APU 防火墙以及 3 种不同厚度加强板的冲击计算。根据数值计算结果,选择合适的加强板方案,既能防止防火墙碰撞区被小碎片击穿,同时付出的重量代价又较小。通过对 APU 防火墙增加加强板,确保 APU 转子爆破时飞机的安全性,满足 AC20-128A 的设计要求。

关键词: APU; 转子爆破; 小碎片; 防火墙; 冲击

中图分类号: V228.4

文献标识码: A

[Abstract] Auxiliary power unit is an important part which is installed on the civil aircraft. It is necessary to consider the security of aircraft while APU rotor bursts. This paper simulates the impact of small fragment onto the APU-firewall, and calculates three different thickness of reinforce-plate with finite element software. According to the result of numerical calculation, an appropriate reinforce-plate thickness was chosen, which can prevent the small fragment, while the aircraft weight need increase small. By reinforcing the impact zone of APU-firewall, the security of the aircraft is ensured while APU rotor bursts, and the design requirements for AC20-128A is met.

[Key words] APU; rotor burst; small fragments; firewall; impact

0 引言

辅助动力装置 (Auxiliary Power Unit, 以下简称 APU) 是安装在飞机上的机载辅助发动机,用于产生并提供一种单一类型的动力或辅助电源、气源或其他动力的组合。

在民用飞机设计中,APU 及相关结构需满足 CCAR 25^[1] 及 AC20-128A^[2] 中的设计要求。尽管目前民用飞机的 APU 是按照 TSO C77b^[3] 的相关规定进行设计,满足“转子包容性”的要求。但是对于满足“转子包容性”要求的 APU 而言,仍会有一些小碎片在 APU 非包容性转子爆破发生时飞出 APU 机匣,并对飞机安全造成影响。由于非包容性转子损坏起因的多样性,难以预料所有可能的失效原因并为影响区域提供保护。

1 APU 转子小碎片抛射模型

在民用飞机结构设计中,APU 通常布置于飞机后机身的非气密舱,后机身的非气密舱内大部分为非重要的结构件和系统件,所以仅需考虑转子爆破时小碎片对重要的结构件或系统件的影响。某型飞机的 APU 及 APU 防火墙构型如图 1 所示,APU 防火墙将 APU 覆盖住使之与飞机的其它部分隔离,达到防火、隔热的效果。图 2 为 APU 的剖面示意图,沿着轴线分别为负载压气机转子、动力段压气机转子、一级涡轮转子及二级涡轮转子四个部分。

根据文献[4]、[5]中提供的小碎片飞散角,通过 CATIA 软件,分别以负载压气机转子、动力段压气机转子、一级涡轮转子及二级涡轮转子的转动中心为起点,以各自转动平面为基准,分别向前后 $\pm 15^\circ$ 展开,形成四个扇形面。将扇形面沿 APU 转动轴旋转 360° ,

形成的一个两端封闭,径向不封闭的模型,称之为 APU 转子小碎片抛射模型,如图 3 所示。

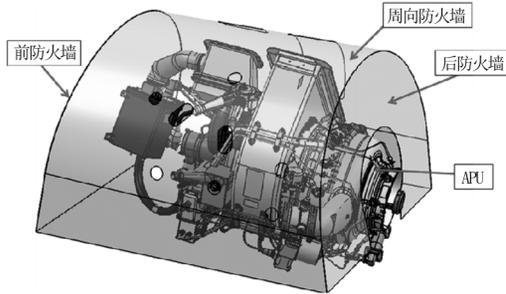


图 1 APU 及防火墙

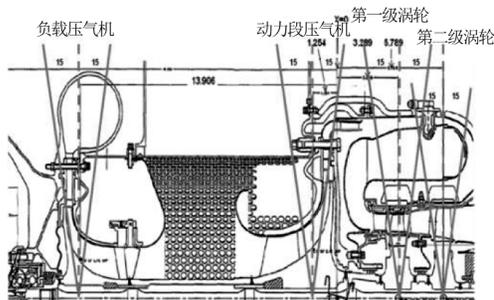


图 2 APU 剖面示意图

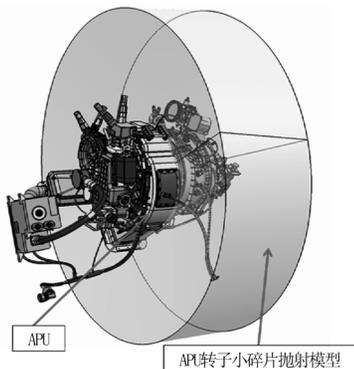


图 3 APU 转子小碎片抛射模型

将 APU 转子小碎片抛射模型与飞机尾段数模相结合,检查飞机数模中哪些重要的结构件或系统件处于小碎片抛射模型的范围内。如图 4 所示,周向防火墙上方的液压 1 号和液压 2 号管路处于 APU 转子小碎片抛射模型的范围内。并不是所有小碎片都会击中液压管路,而是与液压管路相交范围内的小碎片才可能击中液压管路,根据 APU 转子小碎片抛射模型与液压管路的相交确立周向防火墙上碰撞区,当 APU 转子发生时,小碎片可能击穿图 5 中的周向防火墙碰撞区,然后击中液压管路,影响飞机安全。下节将通过数值计算 APU 转子小碎片是否会击穿周向防火墙碰撞区。

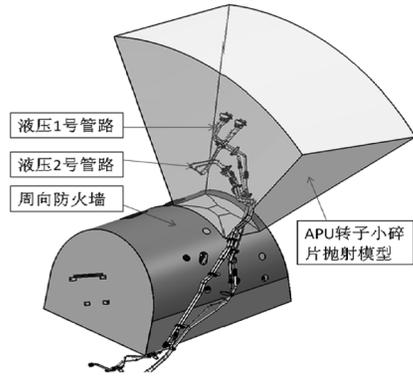


图 4 小碎片抛射模型与液压管路相交

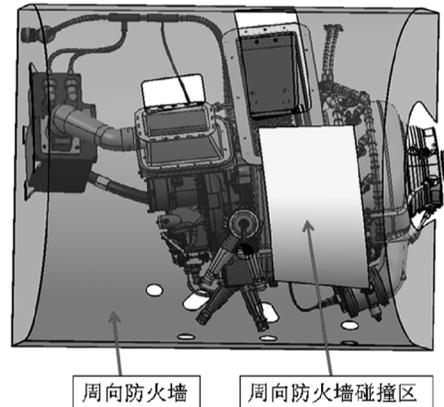


图 5 周向防火墙碰撞区

2 小碎片对周向防火墙的冲击

本文通过有限元前处理软件 HyperMesh 进行建模,通过 LS-DYNA 软件进行求解,模拟小碎片对周向防火墙的冲击,从而分析小碎片是否会击中液压管路。周向防火墙的初始厚度为 1.016mm;转子小碎片的尺寸及速度由 APU 供应商提供,具体数据如下:

$$\text{长} = 1.7\text{in} = 1.7 \times 25.4\text{mm} = 43.18\text{mm}$$

$$\text{宽} = 1.0\text{in} = 1.0 \times 25.4\text{mm} = 25.4\text{mm}$$

$$\text{高} = 0.06\text{in} = 0.06 \times 25.4\text{mm} = 1.524\text{mm}$$

$$\text{速度} = 1100\text{fps} = 1100 \times 0.3048\text{m/s} = 335.28\text{m/s}$$

在有限元建模中,防火墙、小碎片全部采用壳单元,有限元网格模型如图 6 所示。

为了提高求解效率,前、后防火墙采用粗网格,周向防火墙只针对碰撞区进行局部加密;对前防火墙、后防火墙以及周向防火墙的底部进行固支;小碎片与周向防火墙之间接触类型为 Nodes-to-Surface;防火墙、APU 转子小碎片的材料均为 Ti-6Al-4V 钛合金板。表 1 为该材料的具体参数。

表 1 材料性能参数

材料	$\rho(\text{t/mm}^3)$	$\sigma_b(\text{MPa})$	$E(\text{Gpa})$	μ	$e(\%)$
Ti-6Al-4V	4.428	813	110	0.31	15



图 6 有限元网格划分

通过 LS-DYNA 软件计算得到的结果可以看出,小碎片以速度 335.28m/s 与周向防火墙相撞后,周向防火墙被击穿,图 7 为防火墙碰撞区被小碎片击穿时的应力云图。图 8 为总能量变化曲线,通过曲线可知当小碎片击中周向防火墙后,小碎片的动能逐渐转化为周向防火墙及小碎片的内能。图 9 为小碎片的速度历程曲线,当小碎片击中周向防火墙后速度迅速降低,直至周向防火墙被击穿,小碎片仍然保持一定的速度继续前进。

综上所述,小碎片击穿周向防火墙后,仍然保持一定的速度前进,并且可能击中液压管路,对飞机安全产生影响,这是不符合 AC20-128A 中的安全要求的。

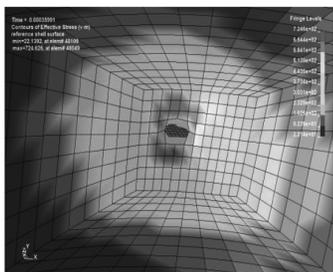


图 7 周向防火墙被击穿时的应力云图

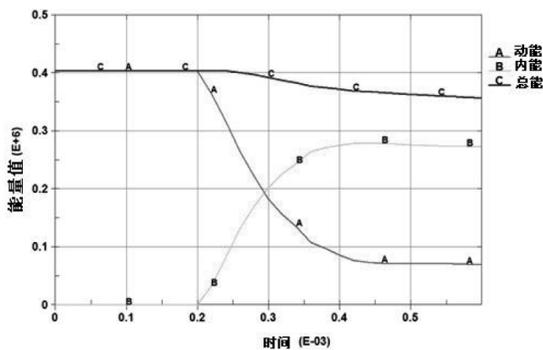


图 8 能量曲线

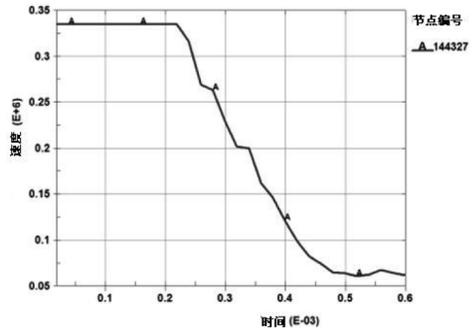


图 9 小碎片速度曲线

3 小碎片对加强板的冲击

通过 LS-DYNA 的数值计算结果已经表明,1.016mm 的周向防火墙碰撞区被小碎片击穿。为了保护液压管路不被小碎片击中,必须保证周向防火墙碰撞区不被小碎片击穿,因此需对周向防火墙进行加强。考虑到重量是民机极为重要的一个参数,所以必须设计合适的加强板,使得周向防火墙既不被击穿,而增加的重量又最小。

分别设计 0.813mm、1.016mm、1.6mm 三种不同厚度的加强板对周向防火墙进行加强,加强板的大小与周向防火墙碰撞区的大小相同,加强板安装在周向防火墙碰撞区内侧,加强板的材料同样为 Ti-6Al-4V,材料性能如表 1 所示。加强板与壁板的接触类型为 Surface-to-Surface 类型,小碎片与加强板的接触类型为 Nodes-to-Surface 类型。

通过 LS-DYNA 的数值计算结果显示,当加强板厚度为 0.813mm 时,周向防火墙碰撞区被击穿;当防护板的厚度为 1.016mm 和 1.2mm 时,周向防火墙碰撞区没有被击穿,三种加强板的计算结果见表 2。

表 2 加强板计算结果

加强板厚	防火墙碰撞区的最大应力	是否被击穿	加强板重量
0.813mm	841MPa	是	0.55kg
1.016mm	784MPa	否	0.69kg
1.2mm	751MPa	否	0.82kg

当加强板厚度为 1.016mm 时,小碎片与周向防火墙碰撞区发生碰撞后的最大应力云图如图 10 所示,此时周向防火墙碰撞区的最大应力为 698MPa,没有超过钛合金的最大破坏应力,所以周向防火墙碰撞区没有被小碎片击穿。小碎片的速度曲线如图

(下转第 61 页)

[3] 沈青,吕甘雨. 借助边界有限元的局部方法[R]. 力学所报告,1987,9.

[4] 吕甘雨,沈青. 分析计算航天飞机气动系数的边界元局部方法[J]. 航空学报,1992(2):815-816.

[5] 陈钦豪,陈洪. 气动系数插值在捕获轨迹试验中得应用[J]. 气动实验与测量控制,1991(4):54-85.

[6] 李迎九,曾仕伦,等. 一种从自由飞行实验中提取空气动力学系数的新方法[J]. 南京航空航天大学学报,1997(4):331-333.

[7] 李鹏,顾宏斌,等. 三次样条插值法在气动导数计算中的应用[J]. 飞行力学,2008(2):74-76.

[8] 李寅,张峰. 攻角误差对拟合气动系数的影响[J]. 弹道学报,2001(4):69-70.

[9] 彭润艳,王正平. 估算飞机气动导数的多维最小二乘法研究[J]. 航空计算技术,2006,36(1):103-105.

[10] 王守觉. 神经网络的多维空间几何分析及其理论[J]. 电子学报,2002(1):1-3.

[11] 徐辉,张毅,等. 一种空气动力学系数拟合方法[J]. 弹箭与制导学报,2006(1):159-161.

[12] Barnes A G. Modeling Requirements in Flight Simulation[J]. Aeronautical Journal,1994,98(980):395-404.

[13] 黄礼耀,王国良. 某型飞机测压试验研究[J]. 洪都科技,2010,1:29-31.

[14] 王明,陈丽,等. 飞机舱门类部件气动载荷风洞试验研究[J]. 实验流体力学,2012(4):18-20.

[15] 陈坚强,张益荣. 基于 Richardson 插值法的 CFD 验证和确认方法的研究[J]. 空气动力学学报,2012(2):176-178.

[16] 赵永辉. 气动弹性力学与控制[M]. 北京:科学出版社,2007:251-252.

[17] 于哲峰,陈秀华等. 基于 PCL 的三维流体载荷向结构载荷转换方法[J]. 计算机辅助工程,2010(4):95-96.

[18] 阎惠芳,李社宗等. 常用相似形判据的检验和综合相似系数的使用[J]. 气象科技,2003(4):211-212.

(上接第 16 页)

11 所示,小碎片击中加强板后速度逐渐降低,速度降为零之后变为负值,说明小碎片被加强板反弹回去。

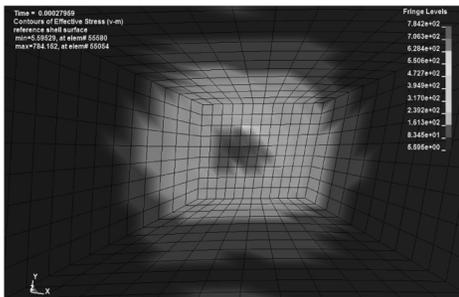


图 10 加强板 1.016mm 时的应力云图

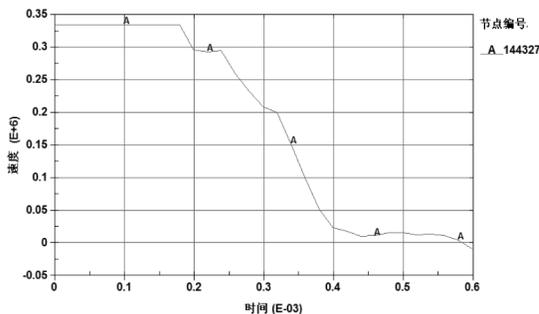


图 11 小碎片速度曲线

表 2 中三种厚度加强板的数值计算结果显示,当加强板厚度为 1.016mm 和 1.2mm 时,小碎片不能击穿周向防火墙碰撞区,保证了飞机的安全;从民用飞机经济性方面考虑,1.016mm 的加强板重量比 1.2mm 的加强板重量轻,所以 1.016mm 的加强

板方案即安全又经济。

4 结论

(1)在民用飞机设计时,必须考虑 APU 转子爆破的影响,应尽量避免将重要结构和系统设备布置在 APU 转子爆破的影响范围内。

(2)当无法避开 APU 转子爆破的影响范围时,可选择合适的加强板方案,并通过数值计算模拟小碎片对防火墙的冲击,校核防火墙的最大应力是否小于材料的破坏应力。最终使得 APU 防火墙满足 CCAR 25 中 25.903 及 AC20-128A 中转子爆破的相关要求。

参考文献:

[1] 中国民用航空局. CCAR25-R4 中国民用航空规章第 25 部:运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局,2011.

[2] AC20-128A Advisory Circular. Design considerations for minimizing hazards caused by uncontained turbine engine and auxiliary power unit rotor failure[S]. Boston: Federal Aviation Administration, 1997.

[3] TSO C77b Technology standard order. GAS Turbine Auxiliary Power Units[S]. Boston: Federal Aviation Administration, 2000.

[4] 艾林英. 发动机转子爆破碎片碰撞角度计算方法的研究[J]. 信息科技,2011,22:785-786.

[5] 杨万里. 转子爆破对飞机机体结构危害的风险量化方法研究[J]. 航空发动机,2012,38(3):29-33.