

民用飞机辅助动力装置进气系统防火 适航条款解读及试验研究

滕攀* 蓝天 张发富 张强

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘要: 民用飞机辅助动力装置(简称 APU)安装在飞机后机身 APU 舱内。APU 舱作为民用飞机适航审查过程中的指定火区,需要经过严格的防火密封性验证。确保 APU 舱火区内可能发生的火灾危险不会传播到飞机的其他区域,影响到 APU 系统乃至整个飞机的安全运行。APU 系统通过进气系统穿越 APU 舱防火墙与外界大气连通,为 APU 正常工作提供新鲜空气。进气系统穿越防火墙对 APU 舱的防火密封能力提出了很大考验。民用飞机适航审定也对 APU 进气系统防火性能提出了详细的适航条款要求。从 APU 进气系统防火适航条款解读入手,通过某型民用飞机 APU 进气系统防火适航审定实例,对进气系统防火从设计角度进行了研究,并且对适航审查时需要重点关注的防火密封区域进行了试验研究。

关键词: APU;进气系统;防火;适航;试验研究

中图分类号: V228

文献标识码: A

OSID: 

0 引言

民用飞机辅助动力装置(简称 APU)虽然是一个小型涡轮发动机系统,但是却隶属于机载设备。它的主要作用是向飞机电源系统提供电力,向空调系统提供压缩空气,为驾驶舱和客舱提供舒适的环境^[1-2]。APU 系统还拥有在地面引气起动主发动机,以及保证在发生空中停车后提供引气起动主发动机的能力。APU 系统是现代民用飞机不可或缺的部分。

APU 系统一般位于飞机后机身,布置在 APU 舱内。根据 CCAR25.1181 条对飞机上指定火区的认定,APU 舱是指定火区,所以需要采取确实可行的措施防止 APU 舱可能出现的着火情况蔓延到飞机其他区域^[3-7]。根据原 CCAR25 部 E 部分和 CS25 部 J 部分要求,局方以问题纪要的形式在附录 APU 草案中提出 APU25.1191 条“防火墙”和 APU25.1193 条“APU 舱”要求^[8-9],APU 舱通常都通过前防

火墙、后防火墙、周向防火墙和 APU 舱门组成一个完整的防火封闭区域,确保与飞机的其他区域做到物理隔离。APU 进气系统通过贯穿 APU 舱防火墙连通外界新鲜空气,为了防止 APU 舱火区内可能出现的着火情况通过 APU 进气系统或者进气系统与 APU 舱防火墙的接口位置蔓延到飞机其他区域,APU 进气系统防火适航审定和相关试验研究尤为关键。

1 进气系统防火条款研究

民用飞机火区是指在正常运行条件下,预期可能出现易燃液体或蒸汽,且存在危险点火源的区域。APU 系统本质上是一台小型涡轮发动机系统,所以 APU 系统所处的 APU 舱在任何情况下都是指定火区。

根据 FAR 发布的咨询通告 AC20-135《动力装置安装和推进系统部件的防火试验方法、标准和准则》中定义,防火能力是指材料或部件具有能像钢

* 通信作者. E-mail: tengpan@comac.cc

引用格式: 滕攀,蓝天,张发富,等.民用飞机辅助动力装置进气系统防火适航条款解读及试验研究[J].民用飞机设计与研究,2022(1):145-150. TENG P, LAN T, ZHANG F F, et al. Research on airworthiness provisions for fire proof on APU inlet system of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(1):145-150(in Chinese).

一样或者优于钢,在 $2\,000\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 150\text{ }^{\circ}\text{F}$ 的火焰下承受 15 min,仍能保持其预期设计功能的能力。针对此咨询通告,民用飞机适航审定时将“防火”定义为在指定火区内,材料或零部件至少能够经受 $2\,000\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 150\text{ }^{\circ}\text{F}$ 的火焰,并在至少 15 min 内保持完整的设计功能。民用飞机针对火区提出防火要求的目的是确保火区内的材料、零部件能够包容或者阻断火情,阻止非火区受火情影响,并且给予机组或者民航机防火系统足够的时间,对发生的火情采取恰当处置措施。

CCAR25 部附录 APU 草案对于 APU 进气系统防火的适航审定提出了明确的条款要求和符合性验证思路。APU 进气系统防火相关的适航条款为 APU25.1103(b)(2) 条和 APU25.1191(b)(3) 条,如表 1 所示。

表 1 APU 进气系统防火适航条款

条款号	条款内容
APU25.1103(b)(2)	在 APU 舱内的进气系统管道必须是防火的,必须在 APU 舱上游有足够长的一段距离,以防止热燃气回流烧穿辅助动力装置管道并进入飞机的任何其它隔舱或区域(热燃气进入这些地方会造成危害)。用于制造进气系统管道其它部分和辅助动力装置进气增压室的材料,必须能经受住很可能出现的最热状态
APU25.1191(b)(3)	防火墙和防火罩应满足下列要求:其构造必须使每一开孔都被紧密配合的防火套圈、衬套或防火墙接头封严

对于 APU 进气系统防火条款要求,主要包含以下几点内容:

1) 处于 APU 舱防火墙内部的进气管道必须是防火的,防止火焰烧穿进气管道,通过管道蔓延到舱外非火区;

2) APU 舱防火墙外的进气管道必须在 APU 舱外有足够长的一段距离,防止 APU 本体产生的热燃气通过管道回流,并烧穿 APU 舱外的进气管道蔓延到其他区域;

3) APU 舱防火墙内部的进气管道穿过防火墙接口位置需要进行防火密封,防止火焰从接口位置蔓延到 APU 舱外;

4) APU 舱防火墙外的进气管道与防火墙接口

位置需要进行防火密封,防止火焰从接口位置蔓延到其他区域。

为满足进气系统防火适航条款的要求,民用飞机 APU 进气系统在飞机后机身舱内的布局主要有两种形式,如图 1 和图 2 所示。图 1 布置方式适用于飞机后机身较大或者选用的 APU 本体较小的情况。考虑到空间利用以及经济性问题,通常将后机身舱沿高度方向上分隔为后附件舱和 APU 舱,APU 舱只通过防火墙将 APU 本体包裹,形成了一个密闭的火区。APU 进气道组件位于 APU 舱防火墙外,穿过后附件舱以及飞机外蒙皮与外界大气连通。APU 进气系统防火设计时需要明确可能发生的火情主要来自于 APU 本体的热燃气回流。热燃气回流进入进气管道,可能由内而外烧穿进气管道组件,进而蔓延到后附件舱或其他无防火墙密封隔离的非火区。

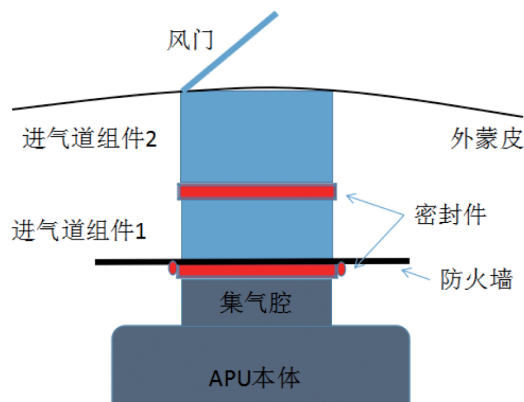


图 1 防火墙隔离 APU 本体的布局示意

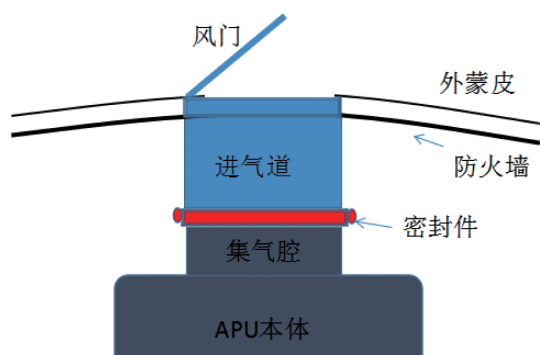


图 2 防火墙隔离 APU 进气系统的布局示意

图 2 布置方式适用于飞机后机身较窄或者选用的 APU 本体较大情况,飞机后机身舱只规划了 APU 舱。APU 本体以及进气系统都被 APU 舱防火墙包裹,防火墙直接作为飞机内蒙皮隔离整个 APU 舱,

形成一个密闭的火区。APU 进气系统位于 APU 舱防火墙内部,进气系统防火设计时,需要明确可能发生的火情通过进气系统从 APU 舱内蔓延到 APU 舱外需由外到内烧穿进气系统。

目前大多数主流民用飞机 APU 进气系统在飞机后机身舱内都以图 2 所示的布局方式进行设计。本文将针对该类型进气系统的防火性能开展适航研究。

2 进气系统防火审定案例分析

以某国产民用飞机 APU 进气系统防火适航审定为基准,对 APU 进气系统防火适航符合性进行分析研究。该国产民用飞机 APU 进气系统在 APU 舱内的布局方式与现代大中型主流机型一致,如图 3 所示,其中 APU 舱由前防火墙、后防火墙、周向防火墙以及 APU 舱门构成完整的防火密封区域。APU 进气系统贯穿周向防火墙与外界连通。如图 4 所示,APU 进气系统主要由进气风门、进气道、作动器以及柔性密封件等部件组成。

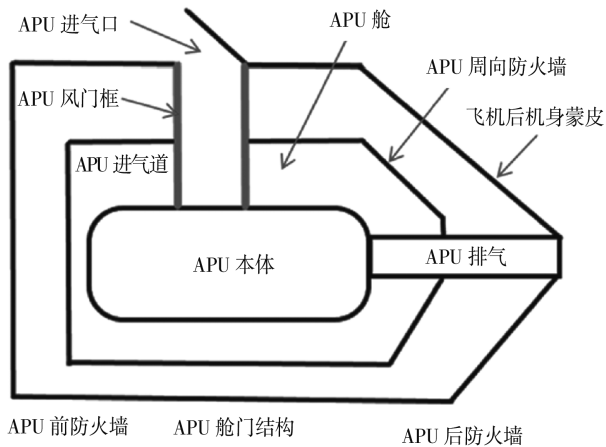


图3 APU系统安装和APU舱防火墙示意图

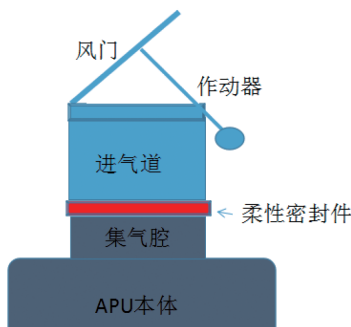


图4 APU进气系统构架图

该民机 APU 进气系统管道位于 APU 舱防火墙内,由进气道、本体集气腔和接口柔性密封件三部份组成,所以认为不存在 APU25. 1103 (b) (2) 条款描述的热燃气在防火墙外进气管道中回流烧穿管道从而对飞机非火区造成危害的情况。进行防火设计时要求所有的进气系统管道部件必须是防火的,不会被火焰烧穿,防止火焰通过进气管道蔓延到 APU 舱外。同时进气系统各部件的接口以及进气系统与 APU 舱周向防火墙的接口需要满足 APU25. 1191 (b) (3) 条接口结构防火密封要求。

考察进气系统管道防火时需要从管道自身材料和特定防火结构设计两方面进行适航研究。目前该型 APU 进气道和集气腔采用了通过 FAR 咨询通告 AC20-107B 验证,具有良好耐高温性能的复材进行制造。相对于传统的金属材料管道,耐高温复材管道具有重量轻,抗疲劳损伤能力强,且防火优越等优势,是目前民用飞机 APU 进气管道设计的重要选择。

除进气道和集气腔采用具有防火性能的复材外,如图 5 所示,进气道和集气腔之间的柔性密封件为织物增强的硅橡胶材料^[10]包裹着不锈钢板材,其中不锈钢板材具有良好的防火性能。柔性密封件处于 APU 本体集气腔和进气道安装接口位置,外围通过包裹防火毯的方式进行防火隔热保护,减小柔性密封件的受火面积和热通量,确保 APU 舱着火情况下火焰不会通过柔性密封件烧穿蔓延。柔性密封件接口位置还要求在实际装机情况下进行防火鉴定试验来表明适航符合性。

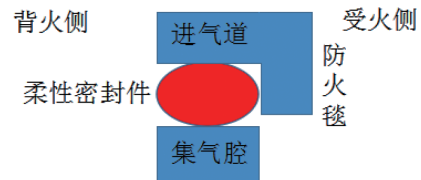


图5 柔性密封件安装示意

APU 进气系统穿过 APU 舱周向防火墙时,主要有两个区域存在 APU25. 1191 (b) (3) 条所描述的对防火墙开口情况,分别是作动器穿过防火墙接口位置和 APU 进气口穿过防火墙接口位置。

如图 6 所示,作动器整体包裹着不锈钢防护罩,能够有效阻止火焰直接作用在作动器上,起到一定的防火作用。作动器通过钢制支架固定在风门框

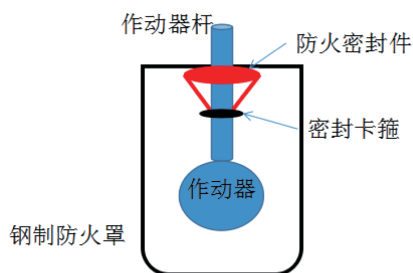


图 6 作动器系统防火设计

上。作动器支架是钢制防火罩的一部分,钢制防火罩的设计能够保证满足 APU 舱内防火要求。作动杆是钢制材料制成,同时其外部由防火密封件包裹并通过防火卡箍密封固定。作动杆和防火密封件紧密组合保证作动杆穿过防火墙时满足 APU 舱内的防火密封要求。

APU 进气口穿过防火墙接口位置使用防火板与后机身结构紧固连接,并在缝隙处涂防火密封胶,接口处还设计有防火毯进行包裹,该接口位置同样需要模拟实际装机状态进行防火鉴定试验来表明适航符合性。

3 防火鉴定试验研究

针对 APU 进气系统柔性密封件接口区域和 APU 进气口穿越防火墙接口区域分别规划防火鉴定试验。试验区域如图 7 所示,试验模拟实际装机状态进行。注意试验时两处试验区域需要分别进行试验,并且规划的试验区域需要确保暴露在火焰下,

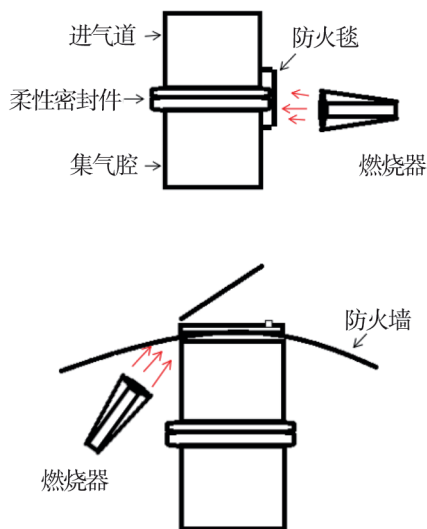


图 7 APU 进气系统防火鉴定试验区域

试验区域火焰暴露面外的延伸区域可以选择使用防火材料进行包裹,以免影响试验结果。试验成功的判据为 AC20-135 要求的 15 min 试验过程中:1) 火焰不得烧穿试验件;2) 试验件背面不能出现燃烧,可以接受背面出现小量的闪光;3) 对于面向火一侧的试验件发生燃烧现象,火焰应当能够自熄。为了观测和记录试验过程中受火面和背火面的现象,需要提前布置好摄像头拍摄整个试验过程。

试验过程中为了模拟 APU 机上工作时带来的振动和背火侧气流真实情况,选择参考 ISO2685《飞机指定火区内机载设备防火试验程序》采用振动幅值不小于 0.4 mm,频率为 40 Hz ~ 60 Hz 的要求模拟振动状态。APU 系统应当在火情探测、自动停车、灭火剂的激活使用前具有 5 min 的受火能力,能够正常工作,所以可以选择试验的前 5 min 内使用风机模拟 APU 正常工作时进气流量。注意风机模拟的进气流量需要小于 APU 进气系统实际工作时最小进气流量,确保试验在严苛的条件下进行。

试验开始前需要对燃烧器进行火焰调节,燃烧器需要满足 AC20-135 中规定火焰温度达到 $2000\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 150\text{ }^{\circ}\text{F}$,热流密度不小于 $10.6\text{ W}/\text{cm}^2$ ($9.3\text{ BTU}/\text{ft}^2\text{-sec}$) 的要求。对燃烧器进行火焰调节时,将图 8 所示热电偶耙和热流量计布置在距离燃烧器喷口表面 102 mm,测量目标点垂直高于燃烧器中心面 25.4 mm 位置,距离的公差要求在 $\pm 10\%$ 以内。其中热电偶耙要求至少由 7 根热电偶以间距 $25\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$ 排成一列,本试验使用的热电偶耙由 9 根热电偶组成。火焰调节过程中,需要火焰至少持续 3 min,热电偶耙上每一根热电偶的温度都在 $2000\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 150\text{ }^{\circ}\text{F}$ 内。

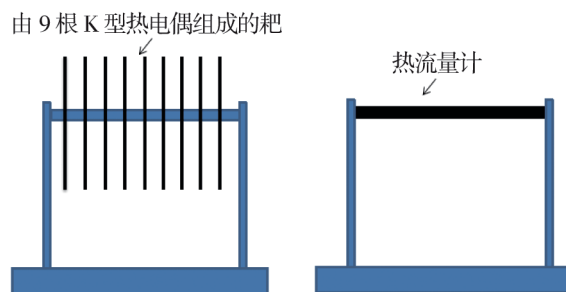


图 8 校准燃烧器使用的热电偶耙和热流量计

试验开展时注意被试区域与燃烧器的相对位置关系,应与校准燃烧器时热电偶耙、热流量计与燃烧器的相对位置关系保持一致,确保试验过程中试验

区域受到的温度和热通量满足试验要求。本文两次防火鉴定试验热量要求均为不小于4 748 kJ。

对柔性密封件接口试验区域进行鉴定试验。调节燃烧器得到的火焰温度在2 024 °F ~ 2 044 °F之间,热量在4 850 kJ到4 900 kJ之间,温度和热量均达到试验要求。试验过程中摄像头拍摄的受火面和背火面画面。在试验要求的15 min内背火面未出现燃烧现象。试验完成后观察受火面,受火面结构保持完整,未出现烧穿现象,使用热电偶和热流量剂再次对燃烧器火焰的温度和热通量进行测定,在保证相对位置关系不变的情况下,测得燃烧器火焰温度在2 000 °F ~ 2 020 °F之间,满足试验要求,试验成功。

对试验结果进行分析研究。该防火试验区域一方面柔性密封件选用以硅橡胶为基体,能够在高温火焰下形成耐火陶瓷炭层,防止火焰穿透,另一方面柔性密封件外面包裹有防火毯,防火毯安装后会在缝隙处添加防火胶进行密封保护,防火毯的存在避免了柔性密封件与火焰的直接接触,并且还能起到隔热的作用,确保了柔性密封件接口位置能够满足防火要求。

对APU进气口穿过防火墙接口区域进行鉴定试验。调节燃烧器得到的火焰温度在2 015 °F ~ 2 034 °F之间,热量在5 720 kJ到5 760 kJ之间,温度和热量均达到试验要求。试验过程中摄像头拍摄的受火面和背火面画面。在试验要求的15 min内背火面未出现燃烧现象。试验完成后观察受火面,受火面结构保持完整,未出现烧穿现象,使用热电偶和热流量剂再次对燃烧器火焰的温度和热通量进行测定,在保证相对位置关系不变的情况下,测得燃烧器火焰温度在2 024 °F ~ 2 045 °F之间,满足试验要求,试验成功。

对试验结果进行分析研究。该防火试验区域有防火毯包裹,并用防火胶对缝隙进行密封,防火毯保护进气管道端口,并且延伸到周向防火墙上,最大限度地阻止火焰温度和热通量对穿过防火墙接口位置的直接影响。进气系统与周向防火墙位置还设计有左右两块钢制的防火板进行紧密安装,确保火焰不会烧穿进气口穿过防火墙区域,满足防火要求。

4 结论

从APU系统安全和飞机安全角度出发,现代民用飞机对于APU进气系统防火的适航审定要求越来越严格。APU进气系统防火在设计阶段应从以下两方面考虑:一方面进气系统使用的材料应具备

防火性能,现代先进民用飞机大多采用防火能力优越的复材制造进气管道;另一方面进气系统与APU本体以及APU舱的接口区域需要进行防火研究,特别是对于存在密封件接口和穿越防火墙接口的位置,通常通过防火鉴定试验表明防火符合性。本文从具体适航条款出发,通过某国产民机APU进气系统防火审定案例分析和对关键接口位置的防火鉴定试验研究,明确了民用飞机APU进气系统防火设计要点和验证措施,对我国民机APU进气系统防火设计具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 邓智亮. 民用飞机辅助动力装置进气系统设计概述[J]. 科技创新导报, 2015, 12(20): 72-73.
- [2] 李东杰. 大型民机辅助动力装置关键技术[C]//中国航空学会. 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会论文集. [S.l. : s. n.], 2007.
- [3] 陈韡, 张发富, 王晗, 等. 民用飞机辅助动力装置进气道防火适航设计与验证研究[J]. 现代制造技术与装备, 2019(6): 55-57.
- [4] 李丽. 民用飞机防火系统适航试验研究[J]. 航空科学技术, 2013(4): 55-57.
- [5] 张旭, 冯雅静, 王志, 等. 适航防火条款的建立与对比[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(9): 1309-1311.
- [6] 李森, 陈西锋. 民用飞机短舱防火试验件设计及验证[J]. 航空科学技术, 2017, 28(9): 74-78.
- [7] 刘钊, 徐燕, 丁晨. 民用涡扇发动机短舱防火设计[J]. 科技创新与应用, 2020, 312(20): 71-72.
- [8] 张强, 银未宏, 李博. 民用飞机辅助动力装置适航标准及验证方法研究[J]. 装备制造技术, 2015(7): 201-203.
- [9] 白杰. 运输类飞机适航要求解读 第4卷: 动力装置[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [10] 刘丽萍, 冯志力, 刘嘉. 航空橡胶密封材料发展及应用[J]. 军民两用技术与产品, 2013(6): 13-16.

作者简介

滕攀 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 民用飞机辅助动力装置进排气系统。E-mail: tengpan@comac.cc

蓝天 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 民用飞机辅助动力装置进排气系统。E-mail: lantian@comac.cc

张发富 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 民用飞机辅助动力装置安装系统。E-mail: zhangfafu@comac.cc

张强 男, 硕士, 研究员。主要研究方向: 民用飞机辅助动力装置系统集成与本体性能。E-mail: zhangqiang@comac.cc

Research on airworthiness provisions for fire proof on APU inlet system of civil aircraft

TENG Pan* LAN Tian ZHANG Fafu ZHANG Qiang

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

Abstract: Auxiliary power unit (APU) system is installed in the APU cabin at the rear fuselage of the aircraft. As the designated fire area in the airworthiness review process of civil aircraft, APU cabin needs to undergo strict fire tightness verification to ensure that the fire risk that may occur in the fire area of APU cabin will not spread to other areas of the aircraft, thus affecting the safe operation of APU system and even the whole aircraft. The APU system communicates with the outside atmosphere by the APU inlet system through the APU cabin firewall, and provides fresh air for the normal operation of the APU. The inlet system passing through the firewall puts a great challenge on the fireproof and sealing ability of the APU cabin. Civil aircraft airworthiness certification also puts forward detailed airworthiness requirements for the fire protection of APU inlet system. Starting from the interpretation of APU inlet system fire airworthiness provisions, through a civil aircraft APU inlet system fire airworthiness certification example, the fire performance of the inlet system was studied from the design point of view, and the fire sealing areas that need to be focused on in airworthiness review were tested.

Keywords: APU; inlet system; fireproof; airworthiness; experimental research

* Corresponding author. E-mail: tengpan@comac.cc