

# 飞机结构防火设计与失火修理研究

王 哲\*

(航空工业一飞院, 西安 710089)

**摘 要:** 为做好飞机结构防火设计与失火修理, 给出了飞机结构防火设计原则及要求, 飞机防火材料选取不易着火或防火材料, 总体布置上避免油气混合, 并合理布置探测系统。如果万一发生飞机失火, 提供了失火修理原则及要求, 提出失火修理方法及流程: 失火后, 需要对飞机着火点、着火区、着火原因进行分析界定, 检查过火区范围及程度, 确定修理方案, 尽快开展修理工作, 降低事故等级, 满足飞机结构完整性及功能使用要求, 保证飞行安全。

**关键词:** 飞机结构防火设计; 防火材料; 失火修理; 检查

中图分类号: V228.6; V267

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

火灾是影响飞机安全飞行的重要原因, 严重威胁飞机和乘客的安全。仅 2019 年上半年, 旅客机就发生近 10 起飞机失火事件。2019 年 4 月 17 日, 俄罗斯乌塔航空公司一架波音 737 飞机右侧发动机失火, 机舱乘客恐慌, 着火降落。2019 年 5 月 5 日, 俄罗斯一架载有 78 人的客机在莫斯科谢列梅捷沃机场迫降时起火, 飞机被大火和浓烟迅速吞噬, 猛烈燃烧的画面震惊全球, 这起事故造成 41 人罹难。2018 年 1 月 12 日, 尼日利亚一架 ATR72 飞机在机库维修时着火, 如图 1 所示。



图 1 ATR72 飞机地面失火

飞机上的各种管路系统, 液压管路、燃油管路等, 盛装油液, 在飞机颠簸、撞击的时候, 冲击力有可

能造成管路磨损破坏, 油液外泄, 若遇到金属片摩擦高温、火化, 有可能点燃泄漏油液, 引起着火燃烧或爆炸。另外, 飞机上各种电气系统、受撞击变形也很可能造成电线短路, 引发火情。某飞机燃油管路异常磨损密封失效、漏油, 异常磨损产生的高温引燃漏出的燃油, 造成失火, 舱内烧伤情况如图 2 所示。

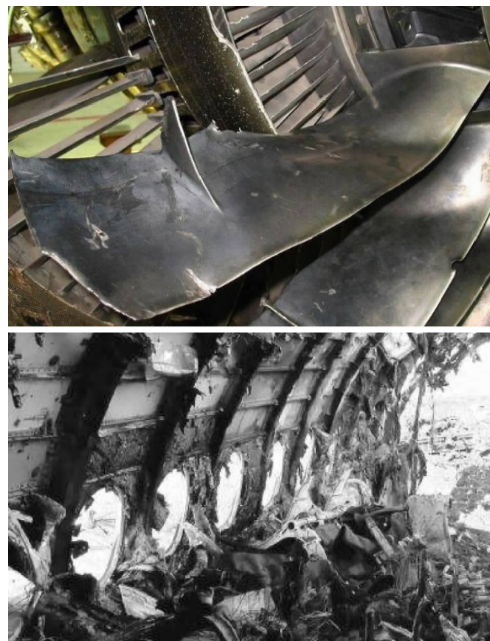


图 2 舱内烧熔及烧伤

\* 通信作者. E-mail: zhewangttt@126.com

引用格式: 王哲. 飞机结构防火设计与失火修理研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(3):1-6. WANG Z. Fire protection design and fire repair of the aircraft structure[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(3):1-6 (in Chinese).

尤其飞机结构内部起火,密闭狭小的空间内温度会迅速升高,里面的气体也会迅速膨胀,极易造成爆炸。另外,高温对发动机舱也是极大的威胁,一旦发动机舱遇火燃烧,爆炸就难以避免<sup>[1]</sup>。

火灾造成的烟雾毒性大,易使人窒息<sup>[2]</sup>,飞机机舱密闭,很难散发,空气不易流通,内部可燃物大多为有机物质,在燃烧过程中会形成有毒气体和烟雾。

因此,预防飞机火灾并积极开展防火研究十分重要。在结构设计上做到材料选取、布置不易着火,出现火警能够及时探测,并能有效熄火。在飞机客舱、货舱、驾驶舱、发动机短舱等舱段总体布局设计、隔离设计、通风冷却设计及排漏设计上,还应重视防火设施配置、火警线、灭火器、货舱烟雾或火警探测系统、材料等要求。防火性是指设备、附件和结构件能承受标准火焰(1 100 ℃)热作用 5 min 的能力。耐火性是指设备、附件和结构件能承受标准火焰(1 100 ℃)热作用 15 min 的能力。

失火燃油泄漏,摩擦打火或短路引起明火,遭受闪电着火、货物自燃或助燃材料燃烧等引起飞机结构着火,失火后需要对飞机着火点、着火区、着火原因进行分析界定,检查过火区范围及程度,确定修理方案以及防止着火的措施,按照流程去开展修理工作,尽快恢复,减低事故等级,保证飞机安全。

## 1 防火设计

发动机区、货舱区、驾驶舱区等应从选材、布局上进行防火设计,常用措施有隔离、排放、通风、报警、灭火等。探测系统是用来探测着火、过热及烟雾,提供视觉和音响报警信号,向空勤人员发出警告的设施,以便及时采取灭火措施。灭火系统的功能是贮存灭火剂并向火区提供灭火的设施,其目的是达到消除火情而不致造成严重的后果<sup>[3]</sup>。

### 1.1 防火设计原则

1) 从飞机结构布置上,对燃料、火源和助燃剂三个基本要素进行隔离或分离;

2) 飞机结构所选用的材料如高温区域附近的结构材料,分别或同时满足阻燃、耐火或防火要求;

3) 对飞机结构进行潜在的着火危险区域进行安全性分析,确定危险源。对该区域进行防火设计,以避免潜在着火危险,降低着火造成的灾难。同时即使着火发生,应有措施降低着火造成的灾难。

### 1.2 防火设计要求

1) 按照飞机各个区域的环境温度要求,布置飞

机上各个系统及设备,以减少潜在故障下发生过热、烟雾或着火的可能性。

2) 在驾驶舱及货舱内布置的手提式灭火器与机身舱的容量应该相匹配。

3) 在货舱、盥洗室内应该布置烟雾探测系统,在驾驶舱设置相应的烟雾警告灯。对于设置火警、过热及烟雾探测系统的区域内发生的火情,应提供相应的告警信息<sup>[4]</sup>。

4) 应该在有易燃材料、易燃油液及油气、火源的区域采用隔离设计,火区与非火区应隔离和封严,使可燃液体和点火源分离在不同区域。

5) 雷电防护,可燃液体渗漏排放口不应布置在雷击区内。

6) 在可能出现易燃油液和油气泄露的所有舱内,应该设计有通风措施,利用气流来阻止易燃物、腐蚀性气体及易爆气体-空气混合物在飞机舱内的聚积<sup>[5]</sup>。

7) 在飞机内可能存在热源和火源的所有舱和其他区域,应该设计有冷却措施,确保在任何使用条件下都不会超过飞机内已确立的所有温度极限。包括所安装设备的温度、任何附属设备的温度、支撑结构温度及舱体温度。最典型的区域包括发动机舱、APU 舱及电子电气设备舱等。

8) 在飞机内可能出现危险的油液泄露的所有舱内,应设有排漏措施,消除易燃物或腐蚀性油液的泄露物堆积,并且阻止易燃物、腐蚀性油液聚积在飞机舱内。

### 1.3 防火材料

防火材料选取按结构或系统所处的区域、以及防火和耐火的的要求,分别或同时满足阻燃、耐火或防火要求选取。金属材料选用钛合金、不锈钢、高温合金;非金属材料选用防火织绸布、防火涂料、硅橡胶、XG-5 隔热(隔热毡)预制型微孔弹性隔热材料,JC170 无碱玻璃纤维布,FXV-6 室温固化高温粘结剂等。非金属材料选取还应满足无毒环保要求。

### 1.4 飞机结构防火设计

飞机结构包括机翼、机身、尾翼、短舱、起落架结构等。机翼里燃油箱,短舱里发动机等都有着火的危险区,起落架舱一般含有液压管路和部件,因而存在出现易燃液体或蒸气的可能性,且存在由刹车片制动而产生的点火源,但通常采取措施将点火源与易燃液体或蒸气隔离,从而视为易燃液体泄漏区。

非危险区是指与易燃液体或其蒸气隔绝的区域。通常为机身的增压区域,包括驾驶舱、客舱、电子电气设备舱、货舱等。

按规定,飞机上有几个区域为火区,一般为发动机短舱,APU 辅助动力装置短舱和油箱区。火区与飞机的其他区域都有防火墙隔离。防火墙把整个火区都包围起来。在火区内,有灭火瓶和烟雾探测器。一旦烟雾探测器发现有烟雾积聚,就会报警,同时飞机会自动启动灭火瓶,对封闭的火区进行灭火。

位于火区内的结构应至少满足阻燃要求并能承受正常运行条件下舱内最高环境温度。尽量不使用吸液材料,位于可能渗漏的易燃液体系统组件附近的吸液材料应加以包覆或处理,以防止吸收危险量的液体。火区必须采用防火墙与飞机其他区域隔离任何穿透防火墙的管路、电缆接头应采用防火密封封严,防火墙、穿越防火墙的所有接头均应满足防火要求。

飞机防火,总体布置上,应避免油气混合,注重易燃区设备布置,划分好火区;设计过程和装配完成后应开展区域性安全分析、检查;防火材料的选择上,金属材料钛合金或不锈钢重量重,可以选用铝合金,表面涂防火涂料;设计好防火墙、隔热垫等,用来隔离火区<sup>[3-5]</sup>。

**隔热垫设计:**按照温度场,没有火焰区域,铺设隔热垫,隔热垫可选用 XG-5 隔热毡与无碱布用 FXY-6 胶粘接而成。因结构需要在隔热垫上开孔、开缝或开缺口的位置不允许有毛边,必须用无碱布包覆封口,封口处的无碱布搭接宽度为 20 mm。隔热垫与金属结构表面的粘贴及隔热垫端头与结构对缝处的粘贴均用 FXY-6 胶, FXY-6 胶在隔热垫和金属结构件上分别涂,且要涂均匀,不允许漏涂而出现未粘贴上的部位。

**隔热层敷设方式:**将隔热层通过胶黏剂直接胶结在飞机结构上。其典型型式如图 3 所示。

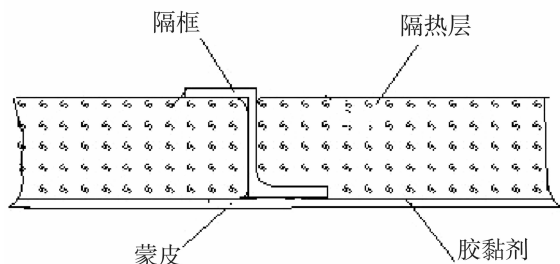


图3 隔热层胶结在飞机结构

隔热层也可以用锦丝搭扣带代替粘结,如图 4 所示。隔热层通过连接钉固定在飞机结构上,其典型型式如图 5 所示。

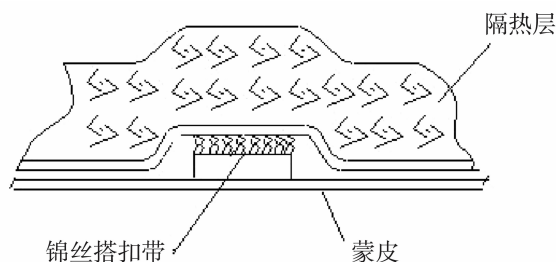


图4 隔热层锦丝搭扣带粘结

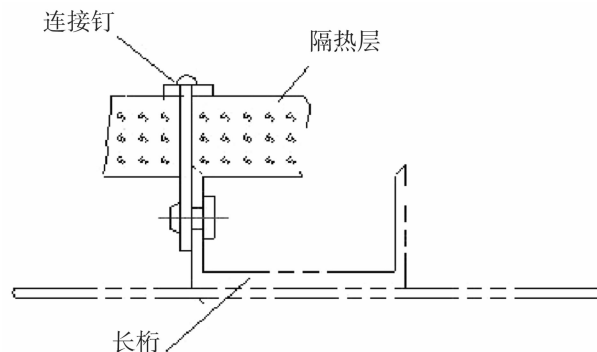


图5 隔热层通过连接钉固定在飞机结构

**发动机舱设计:**当两台发动机装在一起时,应在发动机舱设置防火隔墙,将相邻的两台发动机隔开,以阻止意外事故中火焰及可燃液体或炽热气体从一个隔舱进入另一个隔舱及整个机体的其他部位。飞机与发动机间的管接头及电缆接头应采用快卸式,所有穿过防火墙的油液管路和电器导线应有隔板连接件。安装在发动机舱中任何可能失火区域所有易燃液体管路,软管组件及发动机舱内的放气管,可采用不锈钢或其他耐火材料制造。所有管路和软管组件应能经受住 1 100 °C 的火焰不少于 5 min 而不泄露。接头和支架也应具有同等的耐火能力。

硅橡胶的工作温度大约为 -65 °C ~ 230 °C。由于火区的工作温度较高,因此一般选用硅橡胶材料,并添加织物包覆层增强其抗磨损性能。

## 2 失火修理

结构烧伤,会出现烧熔、起泡、发黑、变形等显著的外部现象,并且还会因受热而造成强度、硬度、刚度、塑性等机械性能变化。全面准确的定位烧伤情况,制定好检查方案、修复实施方案,是修复飞机结

构的前提,消除修复后隐患。

### 2.1 失火修理原则

1) 检查应遵循为结构修复服务目的,不留死角。以便保证修复部位与整个飞机结构同寿命,使用上不应有任何附加限制条件;

2) 应保证所有受损零件或零件受损部位全部被分解更换;

3) 为便于工艺实施,分解更换时可适当扩大分解更换的范围。

### 2.2 失火修理要求

1) 分解检查时应考虑后续的结构修复,不得造成二次损伤;

2) 检查应记录清楚烧熔、烧伤变形、过火情况,烧伤部位的颜色、硬度、漆层情况等;

3) 检查应全面、细致,形成清单;

4) 若检查没有问题的复合材料制件严禁碰撞冲击。

### 2.3 失火修理流程

飞机在烧伤过程中,在着火区形成有规律的温度场,金属结构经受不同温度、不同时间的加热过程,烧伤的程度各不相同。一般来说,在着火点附近,加热温度较高,热积累严重,金属结构往往烧熔、起泡甚至烧毁,材料性能严重下降,为严重烧伤区,离火区较远的区域只是烟雾熏过为轻微烧伤

区,火焰未经过区域为未烧伤区。界定好区域,以便更科学的修理,不同区域不同检测方法,检查强度、硬度、电导率、色泽等有无变化,结构有无损伤,确定合理的修理方案,保证等强度设计。失火修理流程如图 6 所示。

严重区,颜色变化,燃烧未到金属熔点,只过火,测量硬度的变化、或者强度的变化。颜色变化,黑色-烧过,黄色-过火,黑粉-烧损。

严重烧伤区、轻微烧伤区和未烧伤区,烧熔、起泡、变形等显著的外部损伤。

检查确定损伤范围,修理检查方案、修理方案、修理、检查、放飞。

### 2.4 修理检查

检查方式可分为常规目视检查和无损检测,目视检查是飞机结构损伤检查的最常用方法;有些情况下,如打开检修口盖、整流罩、隔热垫等以检查内部结构,还须借助其他光学工具进行,如手电筒、反光镜、放大镜和内窥镜等;当采用目视检查方法不能判断飞机结构的损伤时,如过火、颜色异常、裂纹等,可采用诸如色泽检测法、硬度检测法、涡流电导率检测法、拉伸试验等<sup>[2]</sup>。

色泽检测法,铝合金罩光漆层的颜色,在温度升高时将发生变化。当温度 200 ℃ 以下,颜色基本不变。当温度 200 ℃ 以后,颜色为柠檬色。当温度 250 ℃ 以后转为金黄色,继而焦黄。400 ℃ 开始漆层烧毁。

钛合金目前使用最高温度为 600 ℃ 左右,在 300 ℃ 以上表面颜色稍稍变黄,随着温度升高,渐变黄色。400 ℃ 金黄色,500 ℃ 灰黄色,600 ℃ 为蓝色,900 ℃ ~ 1000 ℃ 黑灰色,出现剥落。

硬度检测法,金属材料硬度与强度有一定的对应关系,通过测量硬度可确定结构的强度,从而判定烧伤的程度<sup>[6-8]</sup>。

涡流电导率检测,金属材料电导率与受热温度、时间之间的关系,然后运用涡流探伤的原理检测飞机烧伤结构电导率的变化,从而确定结构烧伤的程度和范围。

针对飞机过火区域,检查按下列步骤进行:

- (1) 拆除待检查表面的隔热垫并清洗干净;
- (2) 目视观察确定该区域零件过火范围,根据检测区域退漆;
- (3) 对热影响区按 100 mm、200 mm、300 mm 三

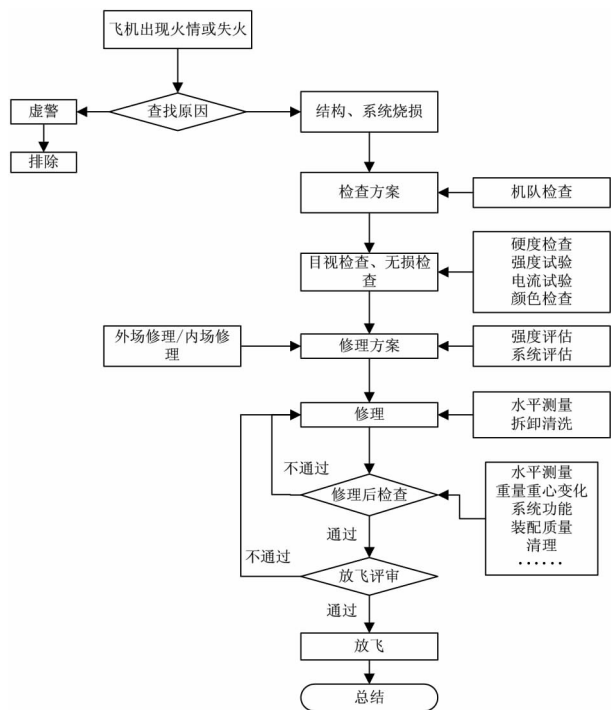


图 6 失火修理流程

个位置,在原位测试材料硬度及电导率。对不好确定的,可以切割取试片进行拉伸试验,看强度变化情况,变化大再进行切割取试片,变化小或没有变化,既是过火的修理与不用修理的分界线。

过火结构取试样,进行室温拉伸试验,测定试件弹性模量  $E$ 、屈服强度  $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度  $\sigma_b$ 、延伸率  $\delta$ 、断面收缩率。试验方法按 HB 5143-1996 执行。硬度测试,测定试片布氏硬度(HBS)。试验方法按 GB/T 231-2009 执行。

过火连接件如螺栓,试验测试拉伸强度和剪切强度等参数。拉伸试验方法按 GJB 715.23A-2008 执行。剪切试验方法按 GJB 715.26A-2008 执行。

### 2.5 修理

按照失火检查结果,对损伤严重的结构进行换件,过火的清理掉烧伤区,补强设计,轻微过火的重新喷涂底漆、面漆。

用工装对结构定位、维形,以便修理过程结构不变形、不错位,保证水平测量符合飞机总体要求。

制定修理方案,编制零件清单,零件制造尽量使用原机工装、夹具,修理分离面的划分尽量与原结构一致,可以少使用额外的对接加强件,防止刚度突变。另外,零件、组件要便于外场运输。

对新加强的结构进行分析、评估,剩余强度满足要求。

修理过程问题处理,现场状态的变化或更改做好记录,对要用的零件做好标记。

重新按修理后的结构恢复系统,如火警探测的布置、隔热垫的铺设、电缆的布置、设备及导管的固定等。

修复后应对残留物进行清理,如碎片、液体、残渣、油污等。

修复完成后应进行水平测量,通电检查、结构检查、各系统检查,排故后保证运行正常<sup>[6-9]</sup>。

## 3 结论

飞机着火无论在地面,还是在空中均时有发

生,是飞机损伤的主要形式之一,而且造成的损失往往比较严重。在设计阶段做好防火,防患未然,出现火情能够发现,有通道有措施及时处置,从布局、材料、隔离、排漏、预警等过程注重设计。失火发生后如何去修理,抢救飞机,恢复功能和结构特性,制定修理原则、检查方案、修理检查(目视检查、详细目视检查、电导率测试、硬度及力学性能测试等手段<sup>[9]</sup>)、界定好修理边界、修理内容以及修理后分析验证,综合考虑安全性、经济性、飞机性能、结构、强度、寿命、工艺可实施性等因素,确保修理后飞机安全、功能正常。

### 参考文献:

- [1] 王哲. 飞机货舱防火设计要求研究[J]. 航空标准化与质量, 2014(5):13-15, 34.
- [2] 胡铁玉,刘秀娟,任广旭,等. 飞机结构烧伤检测技术研究[J]. 工程与试验, 2009(2):36-39.
- [3] 刘军,姜斯明,董光昆,等. 飞机结构烧伤后的检查与修理[J]. 航空维修与工程, 2016(8):64-67.
- [4] 胡曾艳,陈宇. 新型飞机发展对机场消防能力的挑战[J]. 科技资讯, 2014(32):231-232.
- [5] 刘秦智,王哲. 民用飞机结构密封设计技术要求研究. 航空标准化与质量[J]. 2017(1):15-18.
- [6] 陈勃,鲍蕊,张建宇. 飞机结构检修一体化的实现与分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(6):498-501.
- [7] 代永朝,郑立胜. 飞机结构检修[M]. 北京:航空工业出版社, 2006.
- [8] 尚金龙,顾振华,吴勇. 民航飞机维修故障分析及质量改进方法研究[J]. 科学技术创新, 2018(29):149-150.
- [9] 王磊,薛军,王智. 飞机结构故障分析与预测技术研究[C]. 南京:中国航空学会装备维修保障信息化研讨会, 2012.

### 作者简介

王哲 男,研究员。主要研究方向:飞机结构、机构设计与研究。E-mail: zhewangttt@126.com

## Fire protection design and fire repair of the aircraft structure

WANG Zhe \*

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

**Abstract:** In order to do a good job in the fire prevention design and fire repair of aircraft structure, the principles and requirements of fire protection design of aircraft structure were given. The materials that are not easy to ignite or fireproof were selected, and the oil-gas mixture was avoided in general layout, and the detection system was reasonably arranged. In case of aircraft fire, the principle and requirements of fire repair were provided, the fire repair method and the process were proposed. After the fire, it is necessary to analyze and define the ignition point, fire area and fire cause of the aircraft, check the scope and extent of the fire area, determine the repair plan, carry out repair work as soon as possible, reduce the accident level, meet the requirements of aircraft structural integrity and functional use, ensure flight safety.

**Keywords:** structure fireproof design; fireproof materials; fire repair; check

---

\* Corresponding author. E-mail: zhewangttt@126.com