

# 复合材料机身火焰蔓延适航问题研究

黄少麟\*, 张柱国

中国民航上海航空器适航审定中心, 上海 200335

**摘要:** 大型运输类飞机机身大量采用复合材料将带来新的防火安全问题。本文首先介绍了 A380、B787 和 A350 飞机复合材料机身火焰蔓延专用条件差异, 通过回顾隔音隔热材料火焰蔓延试验要求的立法历程, 介绍了专用条件和符合性验证试验方法的介绍, 分析了这些飞机的专用条件存在差异的原因。最后还归纳了复合材料火焰蔓延问题的后续研究方向, 并对相关规章修订进行了展望, 可供复合材料机身的设计和验证参考使用。

**关键词:** 复合材料; 机身; 火焰蔓延; 适航; 符合性验证

中图分类号: V214.8 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 08-0027-04

复合材料由于比强度高、比刚度高和可设计性强等优势, 为设计更先进更经济的民用飞机带来了机遇。目前, 复合材料在民用运输类飞机上的应用已经由方向舵等次承力结构到机身、机翼等主承力结构上。B787 和 A350 飞机的复合材料用量超过了 50%, 机身(包括后压力框)、机翼和尾翼都采用了复合材料。然而, 复合材料不同于金属材料的可燃性带来了新的防火安全问题, 虽然现有适航规章中包含有内饰材料防火方面的安全要求, 并提供了标准的燃烧试验方法, 但这些要求和试验方法并不能直接用于机体结构。基于上述飞机大量应用复合材料的新颖或独特设计特点, 针对防火方面的可能不安全特征, 当前的适航规章没有提出适当的或足够的安全要求, 美国联邦航空局 (FAA) 和欧洲航空安全局 (EASA) 对 A350 和 B787 飞机的复合材料机身提出了火焰蔓延特性方面的专用条件<sup>[1,2]</sup>, 以提供与适用适航规章等效的安全水平。

A380 飞机作为机身一部分的后压力框也采用复合材料, 但并未发现其型号合格证数据单 (TCDS) 中有关于复合材料后压力框在火焰蔓延方面的专用条件或类似要求。同样是复合材料机身设计, B787 和 A350 飞机有火焰蔓延方面的专用条件, 而 A380 飞机却没有。本文针对复合材料机身火焰蔓延问题进行阐述。

## 1 火焰蔓延试验要求的引入

适航规章中内饰材料防火方面的要求在过去不断得到

修订, 陆续增加或修订了本生灯试验、座椅垫油灯试验、货舱衬垫抗烧穿试验、热释放率和发烟特性试验等方面的要求。但是, 20 世纪 90 年代仍发生过多起飞机火灾事故, 如 1998 年 9 月, 瑞士航空的一架 MD-11 飞机在加拿大起火并导致 229 人丧生, 后续的事故调查表明正是由于隔音隔热材料在驾驶舱和前部客舱的顶部区域起火最终导致了该事故的发生。类似隔音隔热材料在飞行中起火的事件, 在国内航班上也发生过。这些事件中不明火焰沿着隔音隔热材料蔓延, 由于这些隔音隔热材料位于飞机内饰板和铝合金蒙皮之间的不可接近区域, 难以发现直到难以扑灭。

虽然隔音隔热材料当时需要满足适航规章 25 部附录 F 第 I 部分的本生灯试验要求, 但在这些事件中, 导致火灾的点火源大多数情况下都是由诸如电气短路、导线摩擦产生跳火等引起的。事故调查方为此建议基于真实的火灾情况改进内饰材料的燃烧标准, 防止这种不可接近区域安装的材料蔓延火焰。最终 FAA 于 2003 年 9 月发布了 25-111 修正案, 要求机身的隔音隔热材料必须满足 25 部附录 F 第 VI 部分规定的火焰蔓延试验要求, 或其他经批准的等效试验要求, 以减小客舱火灾及其严重程度, 尤其是那些起源于安装有隔音隔热材料的不可接近区域的火灾。

## 2 复合材料机身火焰蔓延专用条件

铝合金等常规金属材料应用在飞机上的服役经验及

收稿日期: 2016-06-29; 录用日期: 2016-07-15

\* 通讯作者: Tel.: 021-22321423 E-mail: huangshaolin\_hd@caac.gov.cn

引用格式: HUANG Shaolin, ZHANG Zhuguo. Flame propagation airworthiness issue of composite fuselage[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(08): 27-30. 黄少麟, 张柱国. 复合材料机身火焰蔓延适航问题研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(08): 27-30.

大尺寸试验表明,在不可接近区域的火焰不会沿着这些金属机身蔓延,但是对于复合材料机身,上述结论就不一定成立了。基于对安装在不可接近区域隔音隔热材料火焰蔓延特性的认识,针对 B787 和 A350 飞机采用复合材料机身的特点且复合材料可能具有不同于常规金属材料的可燃性,认为这些复合材料机身在有点火源的情况下也需要保证不能蔓延火焰。复合材料机身作为一种新颖或独特设计,当前的适航规章没有提供适当的或足够的安全要求,FAA 和 EASA 均针对这些飞机的复合材料机身制定了火焰蔓延方面的专用条件,要求必须表明具有抵御火焰蔓延的能力,如果试验中观察到除点火源以外的燃烧产物,也必须对其进行评估。

### 3 符合性验证试验方法

由于该专用条件与隔音隔热材料的火焰蔓延试验要求比较类似,因此,通过介绍隔音隔热材料的火焰蔓延试验的制定历程来介绍该专用条件的符合性验证试验方法。

进行隔音隔热材料的火焰蔓延试验,最能代表真实情况的是进行大尺寸的燃烧,但是进行大尺寸试验成本代价太大。为此,FAA 利用 B707、DC-10 等窄体和宽体飞机机身段,铺覆隔音隔热材料进行了很多的大尺寸、中尺寸和小尺寸的燃烧试验<sup>[3]</sup>,如图 1 所示。

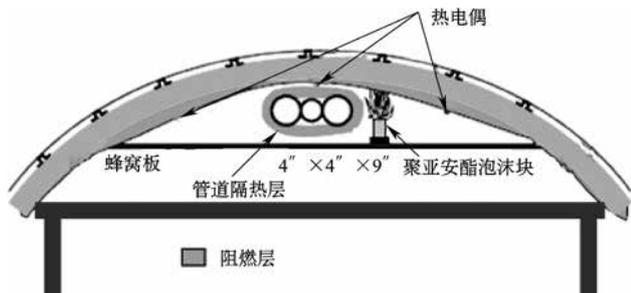


图 1 B707 飞机机身铺覆的隔音隔热材料的火焰蔓延试验  
Fig.1 Flame propagation test of thermal/acoustic insulation materials within B707 fuselage

经过诸多试验后的比较,FAA 最终制定了 25 部附录 F 第 VI 部分的辐射板试验,该试验方法和前述的大尺寸和中尺寸燃烧试验具有很好的相关性,而且该标准的试验方法成本相对较低,可重复性强。

借鉴隔音隔热材料的火焰蔓延试验方法的制定,对于复合材料机身火焰蔓延试验,最能代表真实情况的也将是进行大尺寸的燃烧试验。值得说明的是,在 FAA 的隔音隔热材料燃烧试验中,采用的点火源最终确定使用浸有 10mL 庚

烷的  $0.10\text{m} \times 0.10\text{m} \times 0.23\text{m}$  的聚亚安酯泡沫块,点燃后可以燃烧 3min 左右。因此,FAA 基于对各种潜在点火源的评估,确定上述浸有庚烷的聚亚安酯泡沫块作为点火源具有代表性,可以用于复合材料机身大尺寸的火焰蔓延试验。

同样,采用大尺寸燃烧试验方法虽然可行并具有代表性,但往往也伴随着成本的大幅提高。经研究,FAA 技术中心提出了一种燃烧试验装置<sup>[4]</sup>,如图 2 所示。

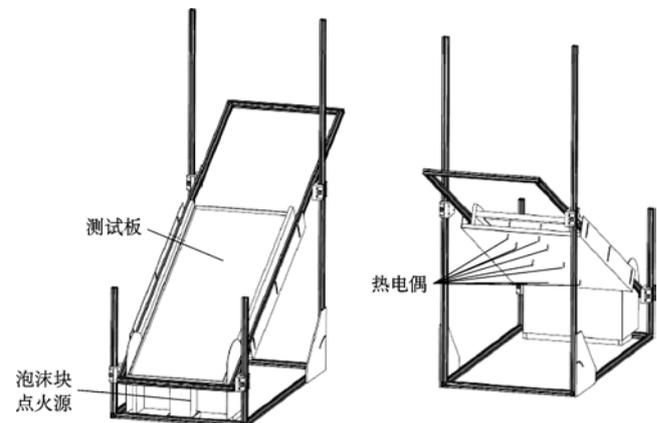


图 2 复合材料火焰蔓延试验装置示意图  
Fig.2 General view of flame propagation test apparatus for composite materials

据悉,FAA 初步制定了一种垂直辐射板试验方法,可以用于复合材料的火焰蔓延试验,与大尺寸燃烧试验具有较好的相关性。但要作为一种重复性好、相关性强的可接受的标准试验方法,还需要做进一步的研究。

### 4 专用条件存在差异原因

前面提到 B787 和 A350 飞机具有复合材料机身火焰蔓延方面的专用条件,而 A380 飞机却没有复合材料后压力框火焰蔓延方面的相关的要求,分析认为原因如下:

(1) 基于审定基础的差异。A380 飞机于 2001 年再次申请型号合格证时,关于隔音隔热材料火焰蔓延要求的 25-111 修正案尚未发布(但修正案发布前的立法提案通告(NPRM)已经在征求意见),A380 飞机的审定当局(欧洲联合航空局(JAA)或 EASA)参考该 NPRM,认为从使用中的类似飞机得到的经验表明安装的隔音隔热材料可能产生不安全状况,为此制定了隔音隔热材料火焰蔓延方面的专用条件。隔音隔热材料火焰蔓延要求是来自航空安全事故,但当时未有大量使用复合材料的飞机,且尚未有明显的航空安全事故与复合材料参与火焰蔓延有关。因此,A380 飞机没有该复合材料后压力框的火焰蔓延的专用条件。

而 B787 和 A350 飞机申请型号合格证较晚,其审定基础需要包括 25-111 修正案,其大量应用复合材料是一个跳跃式的前进,作为一个绝对新颖或独特的设计,随着对复合材料防火安全认知的继续深入和相关研究工作的不断开展,基于对金属材料 and 复合材料燃烧特性方面的差异,认为需要考虑复合材料机身飞行中火焰蔓延问题,以提供与不可接近区域隔音隔热材料火焰蔓延等效的安全水平。因此,对 B787 和 A350 飞机制定了复合材料机身火焰蔓延的专用条件。这也体现在随后申请型号合格证的庞巴迪 LJ-200 飞机上,该飞机也采用复合材料机身,FAA 对其制定了类似专用条件。

(2) 基于符合性指导材料的差异。A380 飞机复合材料适航审定过程中,使用的是发布于 1984 年的咨询通告 AC20-107A,该咨询通告中并无关于火焰蔓延方面的相关指导(当然也可能通过对 AC20-107A 的适当裁剪使用,该复合材料火焰蔓延安全问题已经得到合适处置,可以保证等效的安全水平),故无该专用条件。而 B787 和 A350 飞机复合材料适航审定过程中,使用的是发布于 2009 年的咨询通告 AC20-107B,该咨询通告的第 11. (b) .4 节明确飞行中火焰在不可接近区域蔓延时将是灾难性的,需要防止飞行中的火焰蔓延,且不应产生危险量的毒性产物,故对其制定该专用条件。

(3) 基于复合材料使用量和点火源认知的差异。A380 飞机在机身上的用量相对 B787 和 A350 飞机较小,另外从潜在点火源角度考虑,认为 A380 飞机后压力框附近存在潜在点火源的可能也较小,故无该专用条件。对于 B787 和 A350 飞机,潜在点火源存在于飞机上的很多区域,难以确定具体在哪些位置,也没有证据说明安装有隔音隔热材料对防止复合材料机身的火焰蔓延是有利的,需要明确火焰蔓延要求,故对其制定该专用条件。

## 5 后续研究方向

归纳复合材料机身火焰蔓延问题,需要进行如下方面的研究工作:

(1) 复合材料燃烧特性研究。例如,常规铝合金在 660℃ 左右的大火下会熔化,但东丽公司的 BMS8-276 复合材料在 300~500℃ 的大火下会开始燃烧,但即使在燃烧中仍能保持结构完整性。碳纤维本身不会发生燃烧,复合材料的燃烧特性主要取决于所用树脂材料<sup>[4]</sup>。

(2) 复合材料火焰蔓延的影响因素研究。复合材料的

燃烧性也取决于蒙皮厚度、蒙皮外侧热消散率(如飞行中蒙皮外部气流)等因素。例如,对于 350℃ 增韧环氧树脂预浸料制造的复合材料板来说,经试验研究认为:对于薄板(厚度 1.02~2.54mm),在静态空气情况下可以传播火焰,外部热消散能力严重影响其火焰蔓延特性;对于厚板(厚度 3.30~9.40mm),在静态空气下具有足够的防止火焰蔓延的能力,而且基本不会受到外部热消散率的影响<sup>[5]</sup>。

(3) 复合材料燃烧产物研究。即使飞行中复合材料不会传播火焰,也需要考虑其在起火环境中的释放产物,尤其是毒性产物不会对乘员安全造成不利影响。

(4) 复合材料在燃烧环境下的结构强度特性研究。复合材料机身作为主要承力构件,需要考虑起火或在起火环境中的结构承载能力。

(5) 复合材料在燃烧环境下的抗烧穿能力研究。即使在飞行中复合材料机身不会传播火焰,也需要考虑在起火环境中抗烧穿能力,不会对飞机结构强度造成不利影响。

(6) 复合材料燃烧后的灭火能力研究。飞行中复合材料飞机燃烧或者迫降后的燃烧,需要考虑快速灭火,灭火剂的选用、灭火方式和灭火剂用量都将对快速灭火产生影响。

## 6 规章修订展望

随着 B787 和 A350 等飞机在机身上大量应用复合材料,FAA 已经委托航空立法咨询委员会(ARAC)就当前适航规章关于材料燃烧性方面的要求进行评审,以进一步改进规章的安全水平。目前,ARAC 已经提交建议报告给 FAA,报告中说明采用基于威胁的方法评估了当前材料燃烧要求,建议分为飞行中防火安全和坠撞后防火安全两个方面。对于飞行中的防火安全,其目的是确保火灾威胁不会直接伤害乘员,并使飞机能安全飞行和着陆,经对点火源的可能性、火情的可探测性、灭火的能力、是否接近乘员和飞行关键系统等参数的分析,将飞机分为客舱内的可接近区域、不可接近区域、废物箱包容区域和货舱区域,针对不同区域明确不同的材料试验方法。对于坠撞后的防火安全,假定一个有成员可以存活的坠撞后环境(燃油引起的地面大火),确保该可存活的状态足以保证到乘员全部安全撤离飞机,包括对滑梯等撤离设备的保护,限制火焰穿透进入客舱,限制舱内材料的火焰蔓延等方面的要求<sup>[6]</sup>。

在建议的规章中,要求机身内和机身本身的所有零件、组件和部件必须提供对飞行中和坠撞后两方面预期火灾威

胁的保护。该规章要求复合材料机身必须考虑飞行中火焰蔓延相关问题。目前, FAA 又委托 ARAC 进行该要求的成本收益比较研究, 相关要求的标准试验方法正在制定之中。可以预期, 不久的将来复合材料机身的火焰蔓延特性要求将正式纳入适航规章中, 而不再采用专用条件形式, 而试验方法也将是小规模的标准试验方法。

**AST**

### 参考文献

- [1] Federal Aviation Administration. 25-360-SC; Composite fuselage in-flight fire/flammability resistance[S]. TCDS T00021SE, 2012.
- [2] European Aviation Safety Agency. SC D-16; In flight fire-composite fuselage construction[S]. TCDS A.151, 2006.
- [3] T Marker. DOT/FAA/AR-99/44; Development of improved flammability criteria for aircraft thermal acoustic insulation[R]. Federal Aviation Administration William J. Hughes Technical Center, 2000.
- [4] Quintiere J G, Walters R N. DOT/FAA/AR-07/57; Flammability properties of aircraft carbon-fiber structural composite[R]. Federal Aviation Administration, 2007.
- [5] Ochs R I. DOT/FAA/TC-TN15/1; Evaluation of carbon fiber composite flammability; effect of sample thickness and external ambient conditions on inboard surface flame propagation[R]. Federal Aviation Administration, 2015.
- [6] Bolt C R. Materials flammability working group report[R]. Aviation Rulemaking Advisory Committee, Materials Flammability Working Group, 2012.

### 作者简介

黄少麟 (1968—) 男, 学士, 高级工程师。主要研究方向: 运输类飞机适航审定。

Tel: 021-22321423

E-mail: huangshaolin\_hd@caac.gov.cn

张柱国 (1982—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 运输类飞机适航审定。

Tel: 021-22321448

E-mail: zhangzhuguo\_hd@caac.gov.cn

## Flame Propagation Airworthiness Issue of Composite Fuselage

HUANG Shaolin\*, ZHANG Zhuguo

*China Civil Aviation Shanghai Aircraft Airworthiness Certification Center, Shanghai 200335, China*

**Abstract:** New fire safety issue would be introduced due to extensive use of composite on fuselage of large transport category airplane. Firstly this paper presented the difference of special conditions of composite fuselage flame propagation among A380, B787 and A350 airplanes. Then, through rulemaking history review of thermal/acoustic insulation material flame propagation test requirement, and introduction of special conditions and substantiation test method, analyzed the reason that the differences of these special conditions exist. Finally, subsequent research areas of composite flame propagation were summarized, and conclusion was provided with the future rulemaking of this issue. This paper could be a reference for the design and substantiation of composite fuselage.

**Key Words:** composite material; fuselage; flame propagation; airworthiness; compliance verification

Received: 2016-06-29; Accepted: 2016-07-15

\*Corresponding author. Tel. : 021-22321423 E-mail: huangshaolin\_hd@caac.gov.cn