

复合材料机身壁板和隔热隔音棉 衍生构型发烟性能研究

沈世元^{1*} 王天成² 宋 杨¹ 韩 峰¹ 冯梓鑫¹ 王 志²

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 沈阳航空航天大学, 辽宁沈阳 110136)

摘 要: 回顾了国内外复合材料热特性相关领域的研究,梳理了这些研究的相似点和不同点,并指出了研究方向存在的空缺和不足,尤其是在适航层面研究的部分缺失。试验件为复材壁板和隔音棉相关衍生结构,并根据 CCAR-25-R4 和 GB/T10671-2008 固体材料产烟的比光密度试验方法,系统测试了复合材料、隔热隔音棉及其组合衍生构型的发烟特性,分析了隔热隔音棉对发烟特性的影响,探讨了现有适航条款及符合性验证方法的适用性。结果表明:复合材料机身壁板和隔热隔音棉衍生构型能够满足当前适航条款验证方法提出的符合性判据,隔热隔音棉有效降低了复材壁板的烟比光密度和烟气释放速率。

关键词: 复合材料;衍生结构;防火适航;发烟特性

中图分类号: TB332

文献标识码: A

OSID:



0 引言

复合材料已成为研制大型民用飞机的一个技术制高点。为了在激烈的民机市场竞争中获胜,国外的民用航空公司在复合材料的用量上展开了激烈竞争,其在大型客机或者宽体客机设计中所使用的复合材料结构所占结构比重很高。复合材料热稳定性优异,并且在比模量、比强度、抗疲劳特性等方面具有各种优势^[1-3]。先进复合材料在机体结构中的应用不仅可以显著减重,还可以大大提升飞机结构的其他性能。发展复合材料技术对于发展我国自有知识产权的复材品牌,推动我国航空航天等高精尖技术产业的发展也具有重要意义^[4-5]。由于复材的可燃性,将会进一步增加飞机火灾的危险性和复杂性^[6-8],因此,材料和结构必须通过严格的防火适航审查,并深入考察复合材料用于机身结构时的发烟等问题^[9-12]。

研究认为,事故发生时,乘客难以获救的原因主要是由于飞机火灾事故中碳纤维环氧复合材料在燃烧过程中释放出大量的热以及舱内材料燃烧造成的缺氧、毒气和烟雾的综合作用使旅客窒息死亡。飞机起飞或着陆坠毁时客舱外部燃油溅入或发动机着火进入撞毁的机体,这种火上加油加速了机体内燃烧着的材料引起不可收拾的爆燃,致使旅客失去了生还的机会^[13]。另外,由于飞机各舱室之间的连通状态,复合材料在燃烧过程中产生的大量烟尘和毒气会很快充斥整个机舱,飞机的高密闭性又使烟雾很难消散,令烟尘充满飞机内人员肺部,最终造成窒息身亡。上述情况无一不对材料燃烧的发烟特性研究提出了更高的要求,对复材燃烧及发烟特性的研究已迫在眉睫。国外适航标准对于舱内材料的防火符合性判据均较为完善;中国在适航条款方面的工作起步较晚,现行一套方法基本源于 FAA 或者 EASA 标准,存在完善空间^[14]。

* 通信作者。E-mail: shenshiyuan@comac.cc

引用格式: 沈世元,王天成,宋杨,等. 复合材料机身壁板和隔热隔音棉衍生构型发烟性能研究[J]. 民用飞机设计与研究,2022(1):174-179. SHEN S Y, WANG T C, SONG Y, et al. Research on smoke performance of composite airframe wall plate and thermal acoustic insulation blanket derived configuration[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(1):174-179(in Chinese).

国内外学者对碳纤维/环氧复合材料燃烧性能开展了一定研究。Duy^[15]等学者研究了相关材料中碳纤维占比对燃烧发热试验性能指标的影响;Mari-a^[16]等人研究了不同组分状态下环氧物质等的阻燃特性;冯青^[17]对比研究了环氧 5228A 树脂及碳纤维/环氧 5228A 树脂复合材料层合板在 3 种湿热环境(水煮、70℃ 水浸、70℃ 和 85% 相对湿度)中的相关表现,考察了该条件对复合材料相关力学性能的影响,并从吸湿特性、物理化学特性、树脂力学性能、湿应力等方面分析了不同湿热环境下复合材料性能衰减的机制;张艳萍^[18]以碳纤维/环氧树脂复合材料为研究对象,分别采用对应测试分析方法,研究了热氧老化物理机制机理。分析结果如下:在热氧老化条件下,复合材料的失重率遵循以时间为自变量的一定函数关系。上述工作主要集中在复合材料热行为和对火反应性能方面,对其发烟特性的测试分析较少,特别是针对复材机身壁板及其衍生结构发烟特性的研究鲜有报道。

本文研究了复合材料壁板、隔热隔音棉及其组合构型的发烟特性,验证了某型号飞机构型所用的复材壁板衍生构型(带隔热隔声层等内饰材料)是否符合 CCAR-25-R4 附录 F 第 V 部分中规定的烟密度要求,并通过飞机内饰发烟特性方面的考量,为国内大型客机的内饰设计提供参考。

1 实验部分

1.1 实验件

本文选取某型号飞机复材壁板件和隔热隔音棉衍生构型作为实验构型,依据 CCAR-25-R4 附录 F 第 V 部分开展发烟特性实验。实验件包括复合材料壁板、隔热隔音棉和复合材料壁板+隔热隔音棉组合件。试验前的要求如下:

- 1) 放置环境温度接近 $21 \pm 2^\circ\text{C}$;
- 2) 放置环境相对湿度须达到 $55 \pm 10\%$;
- 3) 放置时长约 24 h。

1.2 试验前准备

实验采用 FTT-0062 烟密度箱,封闭箱体容积为 $914\text{ mm} \times 610\text{ mm} \times 914\text{ mm}$ 。烟密度箱如图 1 所示,在其中可以让平板样品承受散射热源的燃烧,并对所产生烟雾的比光学密度(DS)加以测量。准直射光束垂直向上穿过试验箱,并使用光电倍增管对光照强度加以测量。相对光照强度的变化可连续记

录。实验件在施加明火的工况下产生烟气,当光束在烟气中穿过后,测量光束的减弱率并通过仪器自带的软件对烟密度和透光率进行计算。具体准备步骤如下:

- 1) 用毛刷清扫烟箱内壁、电炉及支架;用酒精脱脂棉球清洁光窗。
- 2) 接通总电源,校准交流输出电压达 220 V,通过加热电源及排风机调节箱内温度为 $35 \pm 5^\circ\text{C}$ 。
- 3) 采用有焰模式,调节丙烷气和空气流量分别为 $(50 \pm 3)\text{ cm}^3/\text{min}$ 和 $(500 \pm 20)\text{ cm}^3/\text{min}$,点燃燃烧器的六个火焰口。
- 4) 将“空”试验件盒置于试验位置。
- 5) 打开箱门、排气孔,打开进气孔。
- 6) 接通光源,预热 10 min 后,将透光仪表调节到满刻度,即 100%。



图 1 烟密度箱

1.3 实验方法

1) 将“空”试验件盒从炉前推开,立即将被测试件推至试验位置,关闭箱门,同时开启计算机、打印机。

2) 当透光率仪表指针开始移动时,表示已有烟产生,应立即关闭进气孔。

3) 试验时间一般为 20 min,达到最小透光率时持续 3 min 终止试验;若试验进行 20 min 仍未达到最小透光率,根据需要可适当延长试验时间,并在报告中注明。

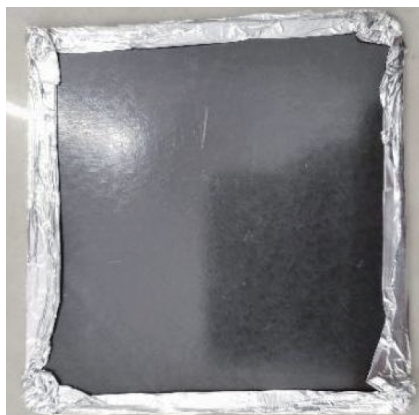
依据 CCAR 25.853 和 GB/T10671-2008 固体材料产烟的比光密度试验方法,全部采取有焰燃烧模

式分别测试复合材料壁板、隔热隔音棉和“复合材料+隔热隔音棉”三种构型的烟密度,其中组合件的考核区为隔热隔音层与复材壁板接缝处,每种构型取三次平行实验结果的算术平均值作为实验结果。

2 结果与讨论

2.1 复合材料壁板

复材壁板有焰模式烟密度实验前后的对比形



(a) 实验前



(b) 安装状态



(c) 实验后

图 2 复材壁板材料实验前后对比图

发烟参数如表 1 所示。复材壁板在 4 min 后的 3 个实验件烟比光密度平均值为 58.36, 20 min 内最大烟比光密度平均值为 183.60。复材壁板的烟比光密度均小于 CCAR-25-R4 附录 F 第 V 部分提出的 4 min 后烟比光密度不得超过 200 的接受准则。这表明复材壁板通过了烟密度特性测试,符合 CCAR25.853 和 GB/T10671-2008 固体材料产烟的比光密度试验方法中规定的烟密度要求。

表 1 复合材料壁板发烟参数

实验件名称	20 min 内最大比光密度 (Dm)	达到最大比光密度时间 (tDm)/min	4 min 内的最大比光密度 (⁴ Dm)	实验件的质量损失 /%
复合材料壁板	183.60	16.43	58.36	14.87

2.2 隔热隔音棉

隔热隔音棉有焰模式烟密度实验前后的对

貌如图 2 所示,实验后复材壁板有明显的火焰烧蚀痕迹,表层有碳化现象,但整体结构均保持相对完整。实验中,复材壁板平均在 1 s 后开始产烟,在 1 s ~ 192 s 内,平均透光率从 100% 降到了 48.65%,平均烟密度从 0 升到了 43.69,此后烟密度上升速度和透光率下降的速度都趋于平缓,4 min 时的平均烟密度为 58.36,并在 16.43 min 达到平均烟密度峰值 183.60,实验件平均质量损失达到了 14.87%。

比形貌如图 3 所示。实验后隔热隔音棉包覆层暴露在火焰下的部分烧蚀缺损严重,火焰口附近的芯体玻璃纤维棉有多个局部烧蚀孔洞,但没有明显收缩或炭化,整体结构保持相对完整。实验中隔热隔音棉 1 从 1 s 后开始产烟,在 1 s ~ 35 s 内,透光率从 100% 降到了 88.88%,烟密度从 0 升到了 7.0,此后透光率和烟密度的变化速度都趋于平缓,4 min 时的烟密度为 8.54,并在 19.94 min 达到烟密度峰值 12.99,实验件质量损失达到了 19.13%。

发烟参数如表 2 所示。隔热隔音棉在 4 min 后的 3 个实验件烟比光密度平均值为 8.54, 20 min 内最大烟比光密度为热辐射模式下为 12.99,均远小于 CCAR-25-R4 附录 F 第 V 部分提出的 4 min 后烟比光密度不得超过 200 的接受准则。这表明隔热隔音棉通过了烟密度特性测试,符合 CCAR25.853 和 GB/T10671-2008 固体材料产烟的比光密度试验方法中规定的烟密度要求。

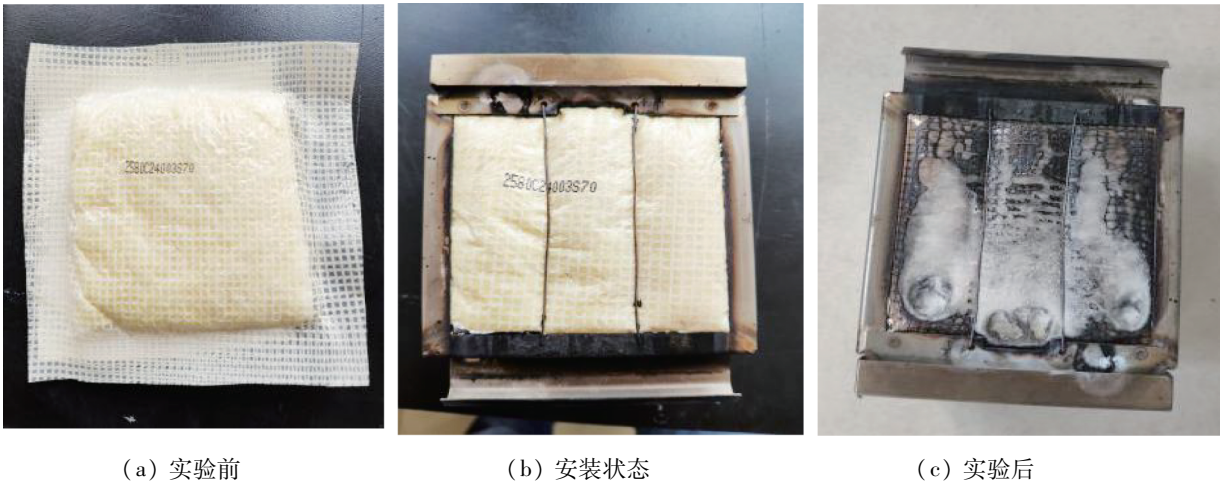


图 3 隔热隔音棉实验前后对比图

表 2 隔热隔音棉发烟参数				
实验件名称	20 min 内最大比光密度 (Dm)	达到最大比光密度时间 (tDm)/min	4 min 内的最大比光密度 (⁴ Dm)	实验件的质量损失 /%
隔热隔音棉	12.99	19.94	8.54	19.13

2.3 复合材料壁板 + 隔热隔音棉

将隔热隔音层覆于复材壁板上半部制备成组合件,考核区为隔热隔音层与复材壁板接缝处。组合件的有焰模式烟密度实验前后的对比形貌如图 4 所示。在火焰冲击下,上半部分的隔热隔音棉包覆层部分破损,芯体玻璃纤维棉有火焰烧蚀痕迹,但没有明显收缩或碳化,经络结构未发生破坏;下半部复合材料有明显烧蚀痕迹,表层有碳化痕迹,但整体结构

仍保持相对完整。实验中,从 1 s 后开始产烟,在 1 s ~ 42 s 内平均透光率从 100% 降到了 90.91%,平均烟密度从 0 升到了 5.53,此后透光率和烟密度的变化近似呈线性变化,4 min 时的平均烟密度为 8.97,并在 19.97 min 达到平均烟密度峰值 83.73,实验件平均质量损失达到了 9.6%。

发烟参数如表 3 所示。组合件在 4 min 后的 3 个实验件烟比光密度读数平均值为 8.97,20 min 内最大烟比光密度为 83.73。烟比光密度均远小于 CCAR-25-R4 附录 F 第 V 部分提出的 4 min 后烟比光密度不得超过 200 的接受准则。这表明复材壁板 + 隔热隔声层组合件通过了烟密度特性测试,符合 CCAR25.853 和 GB/T10671-2008 固体材料产烟的比光密度试验方法中规定的烟密度要求。

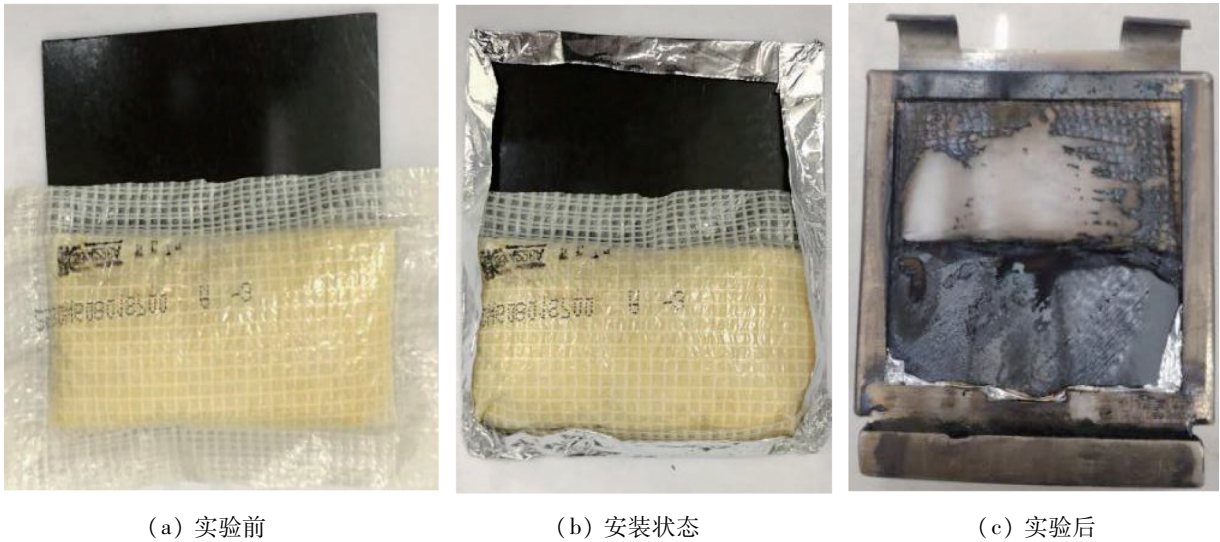


图 4 复合材料壁板 + 隔热隔音棉实验前后对比图

表 3 复合材料壁板 + 隔热隔音棉发烟参数

实验件 名称	20 min 内最 大比光密度 (Dm)	达到最大比 光密度时间 (tDm)/min	4 min 内的最 大比光密度 (⁴ Dm)	实验件的 质量损失 /%
复合材料 壁板 + 隔热 隔音棉	83.73	19.97	8.97	9.6

3 结 论

1) 烟密度实验表明,复材壁板、隔热隔音棉、复材壁板 + 隔热隔音棉组合结构在 4 min 后和 20 min 内的最大比光密度读数平均值均小于 CCAR-25-R4 附录 F 第 V 部分提出的 4 min 后烟比光密度不得超过 200 的接受准则。这表明三种构型均通过了烟密度特性测试,符合 CCAR25.853 和 GB/T10671-2008 固体材料产烟的比光密度试验方法中规定的烟密度要求。

2) 复材壁板的发烟量要远高于隔热隔音材料。铺设隔音隔热棉后,复材壁板的烟比光密度由 4 min 时的 58.36 降低到 8.97,20 min 内的峰值也从 183.60 降低到 83.73,这表明隔热隔音棉能够降低火焰的严酷程度,延缓了复合材料的热分解,从而降低了复材壁板的烟比光密度和烟气释放速率。

参考文献:

- [1] 杨乃宾. 新一代大型客机复合材料结构[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 596-604.
- [2] 陈绍杰. 复合材料技术与大型飞机[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 605-610.
- [3] 张晓虎, 孟宇, 张伟. 碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J]. 纤维复合材料, 2004, 1(50): 50-53.
- [4] 田恬. 从跟踪发展到自主创新,走出独特的国产碳纤维创新体系—访碳纤维专家徐樛华教授[J]. 科技导报, 2016, 34(8): 100-102.
- [5] 李建利, 赵帆, 张元, 等. 碳纤维及其复合材料在军工领域的应用[J]. 合成纤维, 2014, 3: 33-35.
- [6] 邹田春, 冯振宇, 陈兆晨等. 民机复合材料结构适航审定现状[J]. 材料导报, 2010, 24(11): 94-96.
- [7] 杜善义, 关志东. 我国大型客机先进复合材料技术应对策略思考[J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 2-10.
- [8] 刘友丹. 民机复材结构适航设计要求和符合性方法初探[J]. 航空标准化与质量, 2012, 1: 8-11.

- [9] BURNS L A, FEIH S, MOURITZ A P. Composite properties of carbon-epoxy laminate in fire[J]. J Aircraft, 2010, 47: 528-533.
- [10] FEIH S, MOURITZ A P. Tensile properties of carbon fibres and carbon fibre-polymer composites in fire[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2012, 43(5): 768-772.
- [11] 陈昭. 航空发动机部件防火试验的影响因素分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
- [12] 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): 1909-1311.
- [13] 郭玉瑛. 我国民机舱内材料的阻燃技术[J]. 航空科学技术, 1995(6): 17-19.
- [14] MARIA W P, DOROTA W, WERONIKA G, et al. Functionalization effect on physico-mechanical properties of multi-walled carbonnanotubes/epoxy composites[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22(1): 48-59.
- [15] DAO D Q, THOMAS R, JOCELYN L, et al. Thermal degradation of epoxy resin/carbon fiber composites: Influence of carbon fiber fraction on the fire reaction properties and on the gaseous species release[J]. Fire & Materials, 2014, 40(1): 27-47.
- [16] MARIA W, DOROTA W, WERONLKA G, et al. The effect of the surface modification of carbon nanotubes on their dispersion in the epoxy matrix[J]. Polish Journal of Chemical Technology, 2011, 13(2): 62-69.
- [17] 冯青, 李敏, 顾轶卓, 等. 不同湿热条件下碳纤维/环氧复合材料湿热性能实验研究[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 16-20.
- [18] 张艳萍, 熊金平, 左禹. 碳纤维/环氧树脂复合材料的热氧老化机理[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2007, 34(5): 523-526, 539.

作者简介

沈世元 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 适航研究、防火安全、成本工程。E-mail: shenshiyuan@comac.cc

王天成 男, 硕士。主要研究方向: 防火防爆安全等。E-mail: tianchengwang@sau.edu.cn

宋 杨 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 适航研究、四性安全、成本工程。E-mail: songyang@comac.cc

韩 峰 男, 硕士, 研究员。主要研究方向: 客舱安全、隔音降噪、适航相关。E-mail: hanfeng@comac.cc

冯梓鑫 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 客舱安全、隔音降噪、适航相关。E-mail: fengzixin@comac.cc

王 志 男, 博士, 研究生导师。主要研究方向: 防火防爆安全, 适航安全。E-mail: zhiwang@sau.edu.cn

Research on smoke performance of composite airframe wall plate and thermal acoustic insulation blanket derived configuration

SHEN Shiyuan¹* WANG Tiancheng² SONG Yang¹ HAN Feng¹ FENG Zixin¹ WANG Zhi²

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: This article reviews recent studies of scholars in the field of thermal properties of composites at home and abroad, sorts out the similarities and differences of these studies, points out the vacancies and deficiencies in the research area, especially in the airworthiness level. Taking the composite material fuselage wall plate and thermal acoustic insulation blanket derived configuration as the research object, the smoke performance of composite materials, thermal acoustic insulation blanket and their derived configuration were systematically tested according to the CCAR-25-R4 and GB/T10671-2008 airworthiness standard. The effect of the performance was compared and analysed, and the applicability of existing airworthiness provisions and compliance verification methods were discussed. The results show that the composite airframe wall plate and thermal acoustic insulation blanket derived configuration can meet the compliance criteria proposed by the current airworthiness verification method, and the thermal acoustic insulation blankets effectively reduce the smoke specific optical density and smoke release velocity.

Keywords: Composite Material; Derived Configuration; Fire resistance airworthiness; Smoke Performance

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