

# 复合材料机身壁板和隔热隔音棉衍生 构型热释放速率性能试验研究

沈世元<sup>1\*</sup> 王天成<sup>2</sup> 张 诚<sup>1</sup> 徐俊伟<sup>1</sup> 赵华勇<sup>1</sup> 王 志<sup>2</sup>

(1. 上海飞机设计研究院 上海 201210; 2. 沈阳航空航天大学 安全工程学院 沈阳 110136)

**摘 要:** 以复合材料机身壁板本身和隔热隔音棉加上复材壁板的衍生构型为研究对象,依据 CCAR-25-R4 适航标准和热释放速率试验方法,测试分析了复材壁板本身以及隔音棉加上复材为整体组合构型的热释放速率特性,分析了不同因素对热释放速率特性的影响。结果表明:选用的复合材料机身壁板本身的热释放速率符合适航标准中规定的峰值热释放速率要求,但总放热量不满足适航要求;在复材壁板和隔热隔音棉的衍生组合构型中,隔热隔音棉的隔热作用抑制了后续复材壁板的分解,使衍生构型能够满足适航标准中规定的峰值热释放速率和总放热量要求,符合当前适航条款验证方法提出的符合性判据。复材壁板及其衍生构型的热释放速率符合适航标准中规定的峰值热释放速率要求。

**关键词:** 复合材料;组合构型;热释放速率

中图分类号: V214.8

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

热释放率(Heat Release Rate,简称 HRR)是指在规定的试验条件下,在单位时间内材料燃烧时向外释放的热量,单位为“瓦特”,是衡量火灾危害程度的一个重要参数之一。国内外多数科研人员通过数值模拟和理论分析针对热释放率相关领域进行研究。徐亮<sup>[1]</sup>针对热塑性装饰材料的火灾行为进行了热释放速率、质量损失速率和热解动力学等方面的研究。赵峰<sup>[2]</sup>在国内首次建立了一套较完整的公路隧道运营风险评估体系和评估方法,针对火灾模型提出了不同火灾的参数取值和热释放率增长曲线。孔得朋<sup>[3]</sup>基于拉丁超立方抽样(LHS)的 Monte Carlo 模拟分析,建立了分析热释放速率不确定性对可用安全疏散时间(ASET)影响的方法,并提出了一种火灾安全设计中火灾规模的定量计算方法和将安全系数与目标失效概率联系起来的方法。许彬

等人<sup>[4-5]</sup>是以欧洲标准火之一的正庚烷火(TF5)为主要研究对象,在全尺寸实验装置内对正庚烷火相关的热释放速率进行测量与研究。易亮等人<sup>[6]</sup>在一些柴油油池火试验数据的基础之上,分析了油池火初期增长过程以及影响油池火燃烧的因素。Welker<sup>[7]</sup>的研究表明,某些有机化学物质的燃烧速率与风速成反比,与油池直径成正比。Koseki 等<sup>[8]</sup>研究了燃烧区域特征尺度对热释放速率各种影响;Chatri<sup>[9]</sup>给出了可燃物质稳定阶段的热释放速率和油池特征尺度之间的相互联系。Huffman 等人<sup>[10]</sup>研究了火源间距离和燃烧速率之间的关系。上述专家分别从燃烧物种类和油池特征尺度等多方面研究了热释放率特性,但是尚未存在聚焦航空相关的材料或者部件进行的针对性研究。

本文开创性地研究了航空领域复合材料机身壁板本身和隔热隔音棉加上复材壁板的组合构型的热释放速率特性,验证了航空用复材壁板及其相应衍

\* 通信作者。E-mail: shenshiyuan@comac.cc

**引用格式:** 沈世元,王天成,张诚,等. 复合材料机身壁板和隔热隔音棉衍生构型热释放速率性能试验研究[J]. 民用飞机设计与研究,2021(4):85-89. SHEN S Y, WANG T C, ZHANG C, et al. Experimental study on heat release rate performance of composite airframe wall plate and thermal acoustic insulation blanket derived configuration[J]. Civil Aircraft Design and Research,2021(4):85-89(in Chinese).

生构型(带隔热隔声层等内饰材料)是否符合 CCAR25 附录 F 第 IV 部分中规定的客舱材料热释放速率要求,并通过飞机相关部件热释放速率方面的研究,指导大型民用客机的客舱设计。

## 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 IV 部分开展热释放速率实验。实验件包括复合材料壁板和复合材料壁板+隔热隔音棉组合件,其中隔热隔音棉前后分别包覆耐火蔓延包覆层和耐火烧穿包覆层保护膜。将所有试样置于接近  $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $55\% \pm 10\%$  相对湿度的环境中 24 h;用厚度为 0.03 mm 的单层铝箔包住试样,使试样朝向光泽面。试验之前,应预先裁剪铝箔,使其能包覆试样的底面和侧面,并将多余的铝箔废弃处理。铝箔不应该超过试样上表面 3 mm。用铝箔包覆试样之后,将试样放进安装架,并盖上定位架。

### 1.2 试验前准备

(1)检查二氧化碳过滤器和水分过滤器。

(2)按规定要求调节辐射锥下表面和试样上表面之间的距离。

(3)接通辐射锥电源和风机电源。

(4)调节环境排气流量至  $(0.024 \pm 0.002)\text{ m}^3/\text{s}$ 。

(5)按标定程序进行标定。

在试验间歇期间和升温期间,建议在称重设备上方放置一层隔热层以阻断热通量,避免过多的热量传递到称重设备。

### 1.3 实验方法

实验设备采用 FTT-0242 锥型量热仪,它是一种基于燃烧过程中释放的热量与燃烧过程中耗氧量直接相关的火灾测试工具,可以测量热释放速率、有效燃烧热、热失重速率、点燃时间等参数;实验方法采用 BS ISO 5660-1:2015、GB/T 16172-2007 建筑材料热释放速率试验方法,按工况(热打火,辐射热通量  $35\text{ kW}/\text{m}^2$ )分别测试复合材料壁板和“复合材料+隔热隔音棉”两种构型的热释放速率和总发热量。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。全部按工况(热打火,辐射热通量  $35\text{ kW}/\text{m}^2$ )进行试验。所有锥形试验按隔热隔音层置于复材壁板上方进行试验。

锥形量热仪如图 1 所示,它是一种基于燃烧过



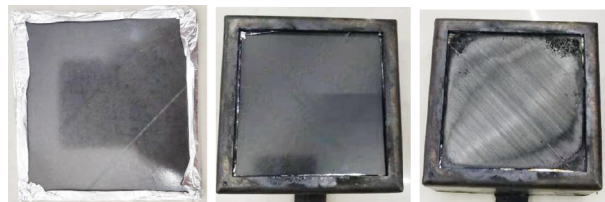
图 1 锥形量热仪

程中释放的热量与燃烧过程中耗氧量直接相关的火灾测试工具。符合 BS ISO 5660-1:2015、GB/T 16172-2007 等国内外标准,可以测量热释放速率、有效燃烧热、热失重速率、点燃时间等参数。烟密度箱如图 5.1(b)所示,它是一个具有固定容积( $914\text{ mm} \times 610\text{ mm} \times 914\text{ mm}$ )的封闭箱体,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。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合材料壁板

复材壁板热释放速率试验前后的对比形貌分别如图 2 所示。实验点火 149 s 时产生火焰,并开始持续燃烧,整个燃烧过程平均持续 205 s,并在 355 s 时火焰熄灭,随后直到试验结束再无明火现象。试验结束后,复材表面有明显烧蚀痕迹,但材料的结构形貌保存较完整。



(a) 试验前 (b) 安装状态 (c) 试验后

图 2 复材壁板材料实验前后对比图

复材壁板的热释放速率曲线如图 3 所示。在初始阶段,热释放速率持续上升;当热释放速率到达一定值后,曲线开始呈下降趋势,直到试验结束。分析认为:复材壁板在刚受到热辐射时,材料没有达到燃

点之前,有较少的热释放,随着热量的积累,达到复材壁板的燃点之后,复材开始燃烧,并且释放出大量的热,达到热释放速率峰值,随着材料中可燃物的减少,热释放缓慢降低,在600 s之后逐渐趋于平缓。测得的热释放速率以及总放热量分别为 59.88 kW/m<sup>2</sup> 和 283.76 kW·min/m<sup>2</sup>。

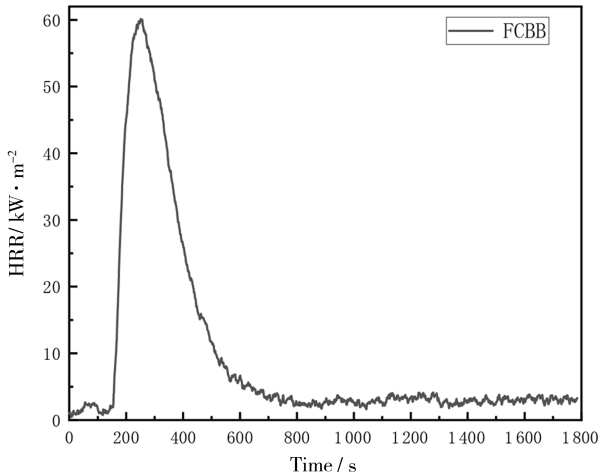


图3 复材壁板热释放速率均值曲线图

### 2.2 复合材料壁板+隔热隔音棉

隔热隔音棉与复材壁板尺寸一致,将隔热隔音棉覆于复材壁板之上制备成组合件,考核组合件的热释放速率性能。按照包覆层面向热源的情况分为两种工况:耐火焰蔓延包覆层面向热源(工况1)和耐火焰烧穿包覆层面向热源(工况2),试验前后对比形貌如图4和图5所示。



(a) 试验前 (b) 安装状态 (c) 试验后

图4 组合件工况1实验前后对比图

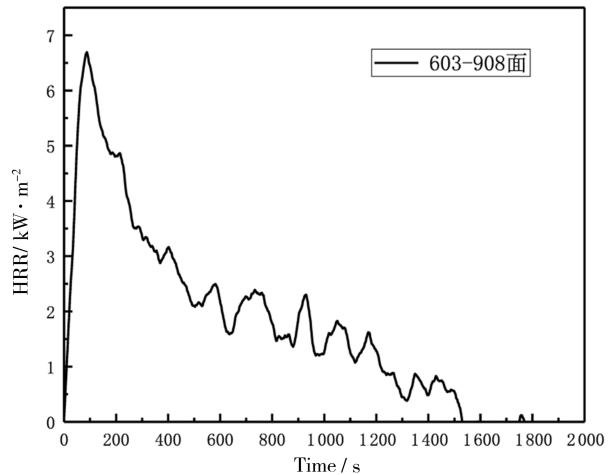


(a) 试验前 (b) 安装状态 (c) 试验后

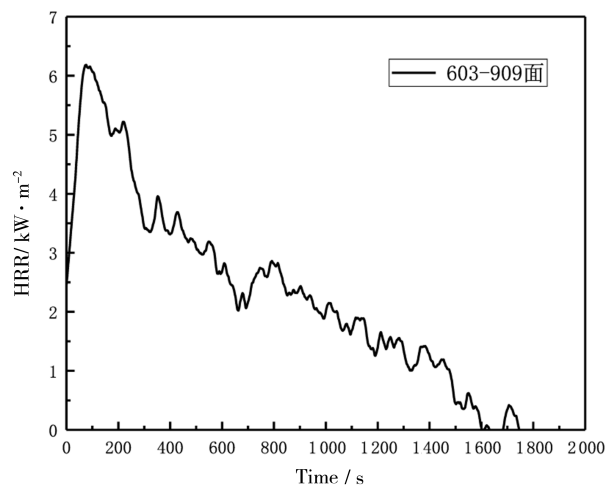
图5 组合件工况2实验前后对比图

工况1,点火器移到材料上方3 s~5 s时,隔音棉表面耐火焰蔓延包覆层被点燃,发生闪燃现象,持续2 s~4 s,然后火焰熄灭,之后一直到试验结束再无明火现象,在持续的热辐射过程中,材料表面颜色逐渐变红,并且有轻微膨胀的现象发生。试验结束之后,表面耐火焰蔓延包覆层被完全烧毁,四周形成的残炭,隔热隔声层中的棉芯裸露在外。工况2,点火器移到材料上方时,隔音棉表面的包覆层出现膨胀现象,随即在6 s~31 s被点燃,发生燃烧现象,持续25 s~26 s,然后火焰熄灭,之后一直到试验结束再无明火现象,在持续的热辐射过程中,材料表面颜色逐渐变红,并且有轻微膨胀的现象发生。试验结束后,耐火焰烧穿包覆层基本完整,仅出现局部孔洞,形貌如图5(c)所示。

热释放速率曲线如图6所示,两种工况都是热



(a) 工况1



(b) 工况2

图6 热释放速率均值曲线图

释放率先持续上升,当热释放速率到达一定值后开始呈下降趋势。工况 1 表面的耐火焰蔓延包覆层可燃,包覆层及隔音棉可燃成分受热分解释放热量,可分解部分消耗殆尽后热释放过程结束。工况 2 中隔音棉可燃成分受热分解产生可燃烟气,达到一定压力后突破耐火焰烧穿包覆层后被点燃,出现峰值后开始下降,受包覆层阻挡的影响,热释放速率的衰减速度要小于工况 1。在 30 min 的实验中,两种工况后续均未再出现峰值,可认为由于隔音棉的隔热作用,抑制了后续复材壁板的分解。表 1 是组合件两种工况的热释放速率参数表。

表 1 组合件构型热释放速率参数

组合件工况	HRR 峰值/ kW · m <sup>-2</sup>	THR/ kW · min · m <sup>-2</sup>
工况 1 (耐火焰蔓延包覆层面)	6.64	13.9
工况 2 (耐火焰烧穿包覆层面)	6.16	10.0

### 3 结论

(1)复材壁板峰值热释放速率以及总放热量均值分别为 59.88 kW/m<sup>2</sup> 和 283.76 kW · min/m<sup>2</sup>。峰值热释放速率低于适航标准要求的 65 kW/m<sup>2</sup> 限值,但总放热量值高于适航标准中总放热量 65 kW · min/m<sup>2</sup> 的限值。这表明:复材壁板的热释放速率符合适航标准中规定的峰值热释放速率要求,但总放热量不满足适航标准要求。

(2)铺设隔音隔热棉后,复材壁板在隔热隔声层的保护作用下没有发生热解燃烧,实验中产生的热释放主要来源于隔热隔音棉本身和包覆膜。两种铺设工况产生的峰值热释放速率和总放热量都远低于适航标准要求的 65 kW/m<sup>2</sup> 和 65 kW · min/m<sup>2</sup> 的限值。由于耐火焰蔓延包覆层可以被点燃,增加了热释放量,因此当耐火焰蔓延包覆层面向辐射锥时,试样的峰值热释放速率均略大于耐火焰烧穿包覆层面向辐射锥时的峰值。这表明:复材壁板 + 隔热隔声层组合件衍生构型能够满足适航标准中规定的峰值热释放速率和总放热量要求。对于结论(1)和结论(2)的可视化描述,如图 7 所示。

(3)对比研究了耐火焰蔓延包覆层和耐火焰烧穿包覆层两种包覆层面向热源时对热释放速率的影响。结果表明:由于耐火焰蔓延包覆层可以被点燃,

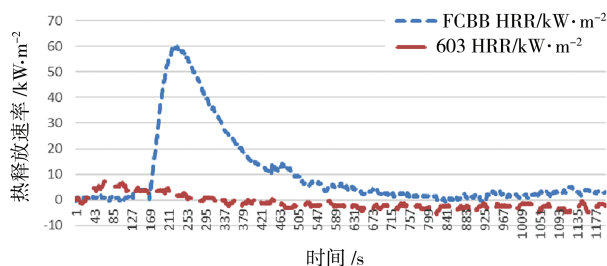


图 7 复材壁板单构型与隔热隔音棉衍生构型 HRR 对比

增加了热释放量,因此当耐火焰蔓延包覆层面向热源时,试样的峰值热释放速率和总放热量均略大于耐火焰烧穿包覆层面向热源时的峰值。

### 参考文献:

- [1] 徐亮. 典型热塑性装饰材料火灾特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2007.
- [2] 赵峰. 公路隧道运营风险评估及火灾逃生研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
- [3] 孔得朋. 火灾安全设计中参数不确定性分析及耦合风险的设计方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013.
- [4] 许彬,张永明,方俊,等. 正庚烷热释放速率测量与研究[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(3): 304-307.
- [5] 康泉胜,陆守香,陈兵. 小尺度庚烷池火燃烧速率实验研究[J]. 科学通报, 2010, 55(1): 87-93.
- [6] 易亮,霍然,张靖岩,等. 柴油油池火功率特性[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(2): 164-168.
- [7] WELKER J R, PIPKIN O A, SLIEPCEVICH C M. The effect of wind on flames[J]. Fire Technology, 1965, 1(2): 122-129.
- [8] KOSEKI H, MULHOLLAND G W. The effect of diameter on the burning of crude oil pool fires[J]. Fire Technology, 1991, 27(1): 54-65.
- [9] Chatris J M, QUINTELA J, FOLCH J, et al. Experimental study of burning rate in hydrocarbon pool fires [J]. Combustion and Flame, 2001, 126(1-2): 1373-1383.
- [10] HUFFMAN K G, WELKER J R, SLIEPCEVICH C M. Interaction effects of multiple pool fires[J]. Fire Technology, 1969, 5(3): 225-232.

### 作者简介

沈世元 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机绝热隔声设计,适航安全,民用飞机经济性相关方向。E-mail: shen-shiyuan@comac.cc

王天成 男,硕士。主要研究方向:防火防爆安全相关,民用航空相关方向。E-mail: tianchengwang@sau.edu.cn

张诚 女,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机经济性相关,适航相关方向。E-mail: zhangcheng3@comac.cc

徐俊伟 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机绝热隔声设计,适航安全,减振降噪相关方向。E-mail: xujun-

wei@comac.cc

赵华勇 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机绝热隔声设计,适航安全,减振降噪相关方向。E-mail: zhaohuayong@comac.cc

王志 男,博士,教授。主要研究方向:火爆防控及可靠性适航技术相关方向。E-mail: zhiwang@sau.edu.cn

## Experimental study on heat release rate performance of composite airframe wall plate and thermal acoustic insulation blanket derived configuration

SHEN Shiyuan<sup>1\*</sup> WANG Tiancheng<sup>2</sup> ZHANG Cheng<sup>1</sup> XU Junwei<sup>1</sup> ZHAO Huayong<sup>1</sup> WANG Zhi<sup>2</sup>

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

2. School of Safety Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China )

**Abstract:** In this paper, the composite material fuselage wall plate and its composed configuration with thermal acoustic insulation blanket were studied. Based on CCAR-25-R4 airworthiness standard and heat release rate (HRR) test method, the HRR characteristics of the composite fuselage panel and the composite fuselage panel were tested and analyzed, and the effects of different factors on the HRR characteristics were analyzed. The results show that the HRR of the composite fuselage panel meets the requirement of peak heat release rate specified in current airworthiness standard, but the total heat release does not meet the airworthiness requirements. The results show that the HRR of composite material fuselage wall plate and derivative configurations meet the requirements of peak heat release rate specified in airworthiness standard.

**Keywords:** composite material; composed configuration; heat release rate(HRR)

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