

# 复合材料火灾适航风险性评估方法及应用

裴宇鑫<sup>1</sup>, 卢溢<sup>2\*</sup>, 王志<sup>3</sup>, 岳宁<sup>2</sup>

(1. 民机机载系统工程中心, 上海 201100; 2. 中国航空综合技术研究所, 北京 100028;  
3. 沈阳航空航天大学 安全工程学院, 沈阳 110136)

**摘要:** **目的** 研究复合材料在火灾适航风险性评估的方法。**方法** 采用单项指标对复合材料进行火灾危险性分析, 所得结果缺少可信度, 选取 9 个指标作为火灾评估参数, 结合试验数据进行分析, 量化复合材料的火灾危险性, 直观地体现每种材料在不同危险方面的差距。**结果** 提出了一种适合于民机上的复合材料火灾适航风险评估的方法, 该方法能够较为全面地评估民机复合材料的火灾危害指数。**结论** 该方法将为复合材料的防火适航审定提供基础数据和理论支撑, 有助于复合材料的适航符合性设计和符合性验证。

**关键词:** 复合材料; 火灾; 危险性影响分析; 层次分析法; 适航

中图分类号: V259

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)11-0092-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.012

## Method and Application of Fire Airworthiness Risk Assessment for Composite Materials

PEI Yuxin<sup>1</sup>, LU Yi<sup>2\*</sup>, WANG Zhi<sup>3</sup>, YUE Ning<sup>2</sup>

(1. China Civil Aircraft Airborne System Engineering Center Co., Ltd., Shanghai 201100, China; 2. AVIC China Aero-polytechnology Establishment, Beijing 100028, China; 3. School of Safety Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study methods for assessing the fire airworthiness risk of composite materials. The results obtained from the fire hazard analysis of composite materials using single indicators lacked credibility. Nine indicators were selected as fire assessment parameters, and combined with experimental data for analysis, the fire hazard of composite materials was quantified, intuitively reflecting the difference in different hazards of each material. A fire airworthiness risk assessment method for composite materials on civil aircraft was proposed. This method could assess the fire hazard index of composite materials on civil aircraft. This will provide basic data and theoretical support for the fire and airworthiness certification of composite materials, and contribute to the airworthiness design and verification of composite materials.

**KEY WORDS:** composite materials; fire; hazard impact analysis; analytic hierarchy process; airworthiness

复合材料自身的可燃和释烟性增加了飞机火灾的危险性和复杂性。复合材料中的树脂基体暴露于高

温环境时, 伴随着材料热解, 内部分子链交联、氧化, 力学性能迅速降低, 释放出高温高热、烟雾和毒气<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2024-05-24; 修订日期: 2024-07-31

Received: 2024-05-24; Revised: 2024-07-31

引文格式: 裴宇鑫, 卢溢, 王志, 等. 复合材料火灾适航风险性评估方法及应用[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 92-99.

PEI Yuxin, LU Yi, WANG Zhi, et al. Method and Application of Fire Airworthiness Risk Assessment for Composite Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 92-99.

\*通信作者 (Corresponding author)

火灾风险评估是火灾科学领域中的一个核心环节,它通过结合定性和定量的分析方法,全面地审视火灾的潜在危害<sup>[3-5]</sup>。在进行风险评估时,首先需要可能对导致火灾的各种因素进行详尽的分析,这包括但不限于建筑物的结构、使用的材料以及建筑内部的火源和燃料负荷等。随后,通过这些分析,可以辨识出关键的危险源,并进一步评估这些危险源在发生火灾时可能带来的影响,如人员伤亡、财产损失和环境破坏等。

在此基础上,评估者还需要确定火灾的风险等级,这一过程通常涉及到将火灾的概率与其潜在后果相结合,从而形成一个系统的风险评估模型。在实际的应用场景中,为了更加精准地评估这些风险,一些研究者采用了模糊综合评价法<sup>[6]</sup>。这种方法利用模糊数学的基本原理,尤其是隶属度理论,将传统的定性评价指标量化为可操作的定量数据。通过这种转换,研究者能够以数学模型的形式,更精确地描述和计算火灾风险。层次分析法是一种被广泛应用的决策方法,特别在火灾风险评估领域备受青睐。它被用于评估各种场景下的火灾风险,涵盖了建筑火灾、森林火灾以及港口火灾等多个领域。这种方法通过将问题分解成多个层次,并对各个层次进行比较和权衡,帮助决策者更准确地评估风险,并制定出相应的防范和应对策略。除此之外,其他的一些如内容分析法和危险指数法也得到了应用<sup>[7-14]</sup>。

复合材料火灾表征方法和评价指标较多,主要包括热解温度、氧指数、燃烧速度、热释放速率、点燃时间、燃烧速度、质量损失速率、烟释放速率、总烟释放量、烟密度、有毒气体浓度等<sup>[15-16]</sup>。如何提炼和综合运用这些性能指标,构建复合材料火灾危险性的综合量化评价体系,以表明对适航规章的符合性具有重要现实意义<sup>[17-18]</sup>。

在复合材料火灾适航风险性研究方面,杨晓光等<sup>[19]</sup>针对飞机货舱衬板材料展开了深入的探索,重点研究了酚醛树脂/玻璃纤维复合材料在火灾条件下的危险性。通过设置不同的火灾环境条件,并利用锥形量热仪和烟密度分析方法,分析了该复合材料的燃烧特性,并进行了全面的火灾危险性评估。结果显示,随着热辐射强度的增加,火势增长指数(FGI)、放热指数(THRI)以及发烟指数(TSPI)均呈现上升趋势,火灾性能指数(FPI)则呈现下降趋势。这表明在严峻的火灾条件下,该复合材料的火灾危险性显著增加。Zong 等<sup>[20]</sup>基于层次分析法对聚丙烯(PP)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的火灾危险性进行了评价,选取火焰高度、火焰蔓延速率和有毒气体生成速率作为基本评价指标参数,建立了火灾风险综合评价模型。评价结果表明,PP的火灾危险性大于PMMA。刘晨等<sup>[21]</sup>将氰化氢(HCN)总浓度视为特殊毒性危害的指标,而CO和CO<sub>2</sub>浓度被认为是一般毒性危害

的指标。此外,他们还综合考虑了热危害的指标和烟危害的指标,针对火灾烟气中不同毒性气体对火灾风险的影响进行了详细细分。为了确定这些指标的重要性,研究者采用了层次分析法来计算它们的权重。最终,他们对热塑性聚氨酯及其纳米复合材料的火灾危险性进行了综合评价。任细运<sup>[22]</sup>基于层次分析法,以点燃时间(TTI)、极限氧指数(LOI)等4个参数为引燃危险性指标,热释放速率峰值(PHRR)、总热释放量(THR)等5个参数为热危险性指标,总烟释放量(TSP)、CO含量等4个参数为非热危险性指标,构建了环氧树脂及其阻燃复合材料火灾危险性评价模型,综合定量地比较了材料的火灾危险性。朱光伟等<sup>[23]</sup>在单体燃烧试验方法(SBI)、锥形量热仪法、极限氧指数法对不同密度及不同阻燃剂含量的聚苯乙烯保温材料燃烧性能试验的基础上,综合评价了聚苯乙烯保温材料的燃烧性能,并应用层次分析法对密度及阻燃剂含量对其燃烧性能的影响进行了综合评价。该评价体系对分析聚苯乙烯保温材料燃烧性能的密度及阻燃剂含量对其燃烧行为影响具有指导意义。还有许多研究者<sup>[24-28]</sup>从不同领域分析防火分析方法,对火灾进行危险性评估,有助于火灾安全管理,可有效预防火灾事故的发生。

目前关于飞机上复合材料的火灾特性已有较多的研究,但是考虑到民机复合材料的火灾适航风险性的研究仍然较少。本文结合民机的适航特性,采用层次分析法确定相关指标权重,对民机上复合材料的防火适航性进行综合评估,有助于为复合材料的防火适航审定提供基础数据和理论支撑。

## 1 复合材料火灾危险性影响分析

### 1.1 对人员影响

火灾所产生的烟雾不仅仅是一种视觉上的威胁,更是对人类生命和健康的重大危害。烟气是由多种成分组成的复杂混合物,包括完全燃烧的可燃物、未燃烧的气态可燃物、固体和液体的不完全燃烧产物以及冷凝微小颗粒物。特别是其中的一氧化碳等有毒气体对人体健康构成严重威胁,可能导致缺氧甚至中毒。此外,火灾烟气还会释放出强烈的热辐射,加剧火势蔓延的速度,使得环境温度迅速上升到人体组织难以忍受的地步<sup>[29]</sup>。

1) 一氧化碳。火灾产生的主要有害气体为一氧化碳,这是导致死亡和受伤的主要原因之一。不同浓度的一氧化碳对人体的影响见表1。

2) 二氧化碳。可燃物完全燃烧释放出的二氧化碳,浓度过高也会导致伤亡和受伤。不同浓度的二氧化碳对人体的影响见表2。

3) 烟气温度。烟雾的温度对呼吸空气的温度有直接影响,当空气被火灾所产生的高温烟雾包围时,

表1 不同CO浓度对人体的影响

Tab.1 Effects of different CO concentrations on human body

CO 质量分数/%	对人体影响
0.02	2~3 h 开始轻微头痛
0.05	轻微头痛, 心跳加快
0.08	血压下降, 出冷汗, 可能昏迷
0.32	5~10 min 出现头痛, 眩晕
1	1~3 min 失去意识, 5 min 死亡

表2 不同CO<sub>2</sub>浓度对人体的影响Tab.2 Effects of different CO<sub>2</sub> concentrations on human body

CO <sub>2</sub> 质量分数/%	对人体影响
2~7	刺激呼吸中枢, 呼吸加深加快
8	呼吸不畅, 身体机能出现障碍
>8	意识消失, 呼吸麻痹而死亡

呼吸道吸入的空气也会受到加热, 导致呼吸系统受到影响。过热的空气不仅会对呼吸道产生不利影响, 还可能引发热烧伤和皮肤灼伤, 特别是对于暴露在高温环境中的人体, 对过热空气的耐受时间非常有限。人体对烟气温度的耐受时间见表3。

表3 人对烟气温度耐受时间

Tab.3 Human tolerance time to flue gas temperature

温度/°C	耐受时间/min
<60	>30
100	12
180	1

4) 热辐射。热辐射是指单位时间内单位面积所接收到的热辐射能量。当火灾发生时, 释放的热辐射能量会迅速传播到周围环境中, 包括人体表面。然而, 人体对于热辐射的承受能力是有限的。过高的热辐射会导致人体产生热量过多, 超过了身体自身散热的能力, 进而造成热量积聚和热伤害。人体的耐受极限见表4。

表4 人对热辐射耐受时间

Tab.4 Human tolerance time to thermal radiation

热辐射强度/(kW·m <sup>-2</sup> )	耐受极限/s
<2.5	>300
2.5	30
10	4

## 1.2 对飞行器的影响

火灾对飞行器造成的破坏范围广泛, 不仅会影响到关键零部件, 还可能造成机身和内饰等部分的损毁。特别是飞机内通常储存大量的燃料油, 中型飞机可能储存几十吨, 而大型飞机甚至可达150 t之多。一旦燃料油箱发生破裂或爆炸, 引发的火灾将迅速蔓

延, 火势更是猛烈。这种情况下, 火势不仅危及飞机内部结构, 还可能对周围环境造成严重威胁, 增加灭火和救援的难度。

研究火灾对民机的影响, 还需要考虑民机的制造材料与结构。民机中含有大量低熔点金属, 如镓铝合金、镓铋合金等, 它们在特定结构部分的应用中发挥着重要作用, 不仅常常用作电气连接件中的焊料, 同样也用作装置中的保险丝、熔断器等热敏组件。一旦发生火灾, 低熔点金属所在的电气连接、保险丝等部件会迅速响应, 但这也可能导致整个电气系统的功能失效。同时, 这些金属可能会迅速熔化, 形成液态金属。液态金属可能沿着电气线路或设备间隙流动, 增加火势蔓延的风险。此外, 飞机内部的装饰材料也是至关重要的, 地毯、帘幕、座套等纺织品构成了客舱的舒适性, 但它们的可燃性较高, 一旦起火将迅速释放大量热量和有毒气体。同样, 许多内部部件和装饰材料采用的塑料制品虽然经过阻燃处理, 但仍具有可燃性。在火灾发生时, 机舱的封闭性使得烟气和热量无法迅速散发, 导致机舱内温度迅速升高, 可能对飞机内部零部件造成严重损坏, 影响飞行安全。

航空燃油的火灾是飞行安全中的一大威胁, 具有极高的破坏性和快速传播的特点。火焰在燃油表面迅速蔓延, 其传播速度可达213~214 m/min, 火焰边缘的温度更是高达2 000 °C以上, 给飞机和乘客带来了巨大的危险。大火可以在短短1~2 min内形成, 迅速蔓延至整个航空器。

## 2 火灾适航风险性评估方法

### 2.1 定性分析方法

1) 预先危险性分析 (PHA) 通常在新项目建设之前或在现有项目的改造和现场规划阶段应用的系统性方法。在飞机火灾评估中, PHA 用于识别飞机特定区域或系统中的火灾危险, 并对潜在的火灾后果进行初步评估。这种方法要求设计、操作人员及安全技术人员应对飞机制造材料、机载设备、制造工艺的危险性有一定的深入了解。

2) 安全检查表 (SCL) 是一种标准化工具, 按照相关规范、法律和行业标准, 对飞机设施和项目进行系统检查。其重点是不断完善检查表, 严格执行检查内容。该表必须包括整个设施的所有检查点, 尤其是要注意一些最重要的火灾隐患。另外, 在进行安全检查时, 除了关注特定的检查点外, 还需要考虑与之相关的其他潜在危险因素。

3) 危险性与可操作性研究 (HAZOP) 通过使用引导词识别工艺过程中的偏差, 如温度、压力和流量等参数。在飞机火灾评估中, HAZOP 需要对飞机制造工艺有很深的了解, 然后再深入分析造成偏差的原因、后果以及相应对策。HAZOP 能够科学地确定故障对每

个设备和整个系统的影响, 但未能充分考虑人为因素。

## 2.2 半定量分析方法

1) 火灾安全评估系统 (FSES) 起源于美国, 在 20 世纪 70 年代开始兴起, 是一种主要应用于公共建筑和其他住宅区的动态决策方法。然而, 近年来, FSES 也逐渐被引入飞机火灾安全评估中。通过这一系统, 可以对飞机客舱、货舱、引擎舱等关键区域的火灾安全设施进行全面评估。FSES 根据不同的火灾情景区分危险因素和安全因素, 通过对消防安全概况的考察来解决潜在风险。该调查方法允许消防专家为每个风险因素和安全因素分配相对权重, 从而形成综合的安全评估。最终, 通过计算 13 个参数的数值, 得出整体安全水平。

2) 火灾风险指数法最初是专门为北欧木屋的火灾安全性评估而开发的。然而, 其灵活性和有效性使得这一方法也开始应用于飞机火灾风险评估之中。通过火灾风险指数法, 可以全面考量飞机不同部位的火灾风险, 特别是机舱材料、货物以及电气系统等容易引发火灾的部件。具体应用中, 这种方法结合飞机的特殊材料和结构, 评估火灾蔓延速度、火源位置及易燃性材料的分布, 以确定最适合的预防措施和应急响应策略。这种既有效又简单的评估工具在飞机火灾安全性保障中发挥了重要作用, 能够指导工程师和安全人员更好地进行火灾风险管理。

## 2.3 定量分析方法

1) 火灾动力学模拟 (FDS)。该方法更适用于环境相对密闭, 人口密度大的场合, 如飞机客舱和货舱。FDS 是一种用于计算模拟火灾中流体运动的数值软件。它的核心算法方程是 N-S 方程, 主要被用来计算和描述火灾中的烟气和热传递过程。在飞机火灾安全评估中, FDS 可用于模拟火灾发生时的烟气扩散、温度分布和有毒气体的生成。这些模拟结果对于设计飞机内部的防火系统、制定紧急疏散计划和优化飞机内部材料的选择至关重要。FDS 因其高精度而受人们青睐, 遗憾的是它只能被用来建立立方体模型和模拟感温温度探测器。

2) 事件树是一种时序逻辑的事故分析方法, 建立在概率论和运筹学基础之上, 按事故发展的时间顺序进行分析。在飞机火灾安全评估中, 事件树可以帮助分析从火灾初始阶段到可能的严重后果之间的链条。通过逻辑推理, 事件树能够识别出火灾发生的潜在原因和条件, 并评估不同预防措施的效果。这种方法有助于飞机设计者和运营商理解火灾事故的潜在路径, 从而采取相应的预防措施。

## 2.4 层次分析法 (AHP)

AHP 是一种融合定量和定性分析的多目标决策

方法。在飞机火灾安全评估中, AHP 可以用来综合评估飞机设计和运营中的各种火灾安全因素。通过将复杂问题分解成多个层次, AHP 允许决策者根据客观数据和个人经验对不同的火灾安全措施进行比较和排序。这种方法的优势在于能够处理目标体系中的非序列关系, 同时确定各因素的相对重要性, 为飞机火灾安全决策提供全面的支持。

AHP 在飞机火灾评估体系中的基本步骤如下: 将飞机复合材料火灾适航风险评估这一复杂问题分解成若干层次; 在每一层中, 根据上一层要素, 再由专家对同一层次的各要素进行两两比较, 以确定各指标的相对重要性; 构造判断矩阵, 将比较结果转化为矩阵形式; 求解矩阵的特征向量, 确定各指标的权重。

## 3 复合材料火灾危险性评估方法应用

### 3.1 火灾危险性评估流程

本文采用 AHP 确定各个指标的权重, 再将每种材料在各个指标所得的分数与相应的权重相乘, 进行综合评估, 应用 AHP 的流程如图 1 所示。

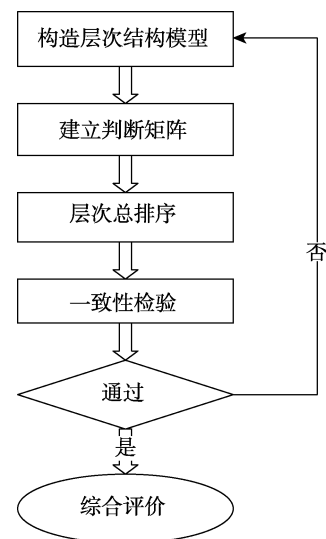


图 1 层次分析法流程

Fig.1 Flowchart of analytic hierarchy process

其中, 判断矩阵的标度及含义见表 5。一致性的检验指标  $C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ , 其中  $n$  为判断矩阵的阶数,  $\lambda_{\max}$  为最大特征值。平均随机一致性指标为  $R_1$ 。当随机一致性比率  $C_R = C_1/R_1 < 0.1$  时, 可以认为矩阵具有达到标准的一致性。如果检测不合格, 需要对判断矩阵中的数值进行修改, 直至计算出该矩阵具有良好的 consistency。1~9 阶的随机平均一致性指数见表 6。

### 3.2 火灾危险性评估指标

火灾对人-物-环系统的危害主要取决于燃烧放出

表5 判断矩阵标度及含义  
Tab.5 Judgment matrix scale and its meaning

标度 $a_{ij}$	说明
1	$i$ 与 $j$ 因素一样重要
3	$i$ 比 $j$ 因素略微重要
5	$i$ 比 $j$ 因素明显重要
7	$i$ 比 $j$ 因素强烈重要
9	$i$ 比 $j$ 因素极端重要
2、4、6、8	以上判断之间的中间状态对应的标度

表6 1~9阶随机平均一致性指数(800次)  
Tab.6 1st to 9th order random average consistency index (800 times)

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_1$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

的热量即燃烧危险和燃烧产物中的有毒有害气体,又叫烟气危险。这2种危险又取决于燃烧是否容易发生,即引燃危险。燃烧危险主要指的是由于材料燃烧释放出的热能对生命、财产和建筑结构造成的损害,热能向环境传递的方式主要有3种:辐射、对流和传导。在火灾安全方面,烟气危险是指材料燃烧产生的烟雾和有毒气体对生命和环境造成的潜在损害。对于复合材料,其火灾危险实质上涵盖了材料的潜在燃烧危险、烟气危险以及引燃危险等多个方面,需要综合考虑和评估以确保安全。根据锥形量热仪、垂直水平燃烧测试仪、高温氧指数测试仪的数据选取了9个火灾风险评估指标。

### 3.2.1 烟气危险

1) 毒性气体生成速率指数  $C_1$ 。常用CO生成速率来表示一般毒性气体的生成速率,这里将其对数值用来表示火灾产生的烟气中毒性气体生成速率指数,计算公式为:

$$C_1 = \lg(Y_{CO} \times v_{MLR} \times 10^3) \quad (1)$$

式中:  $Y_{CO}$  为一氧化碳产率;  $v_{MLR}$  为质量损失速率。 $C_1$  反映了单位时间内物质产生有毒气体的速度,数值越大,表示物质在单位时间内燃烧产生的有毒气体就越多。

2) 发烟指数  $C_2$ , 数值近似等于材料在一定时间内的总发烟量的对数值,选取前5 min为测试时间,其表达式为:

$$C_2 = \lg(S_{EA} \times v_{MLR} \times 30) \quad (2)$$

式中:  $S_{EA}$  为比消光面积。 $C_2$  反映了某一特定时期单位面积的物料的总发烟量,发烟指数的计算结果越大,表示物料在指定的时间段中所产生的烟雾量越大。

3) 二氧化碳生成速率  $C_3$ , 其数值为  $CO_2$  生成速

率,为后续对比,打分时参照毒气生成速率指数,将其对数值作为最后打分值。计算公式为:

$$C_3 = \lg(Y_{CO_2} \times v_{MLR} \times 10^3) \quad (3)$$

这个指数反映了单位时间内物质产生窒息性气体的速度,数值越大,表示物质在单位时间内燃烧产生的窒息性气体就越多,人员越容易在火场中有窒息危险。

### 3.2.2 燃烧危险

1) 火势增长指数  $C_4$ 。数值上近似等于材料热释放速率的峰值( $v_{pHRR}$ )与到达峰值所用时间  $t$  的比值。计算公式为:

$$C_4 = v_{pHRR} / t \quad (4)$$

这个指数数值越大,火灾危险越大。为简化计算,只取单个最高峰值。

2) 放热指数  $C_5$ 。在数值上近似为所选时间内放热量总和的对数值。其表达式为:

$$C_5 = \lg(v_{HRR} \times 0.30) \quad (5)$$

式中:  $v_{HRR}$  为热释放速率。 $C_5$  反映了材料在燃烧过程中的放热性能,数值越大,表明所选材料放热性能越强。

3) 有效燃烧热  $C_6$ 。在数值上为所选时间内有效燃烧热(EHC),为后续对比,打分时参照放热指数,将其所选时间内有效燃烧热总和的对数值作为最后打分值。计算公式为:

$$C_6 = \lg(Q_{EHC} \times 0.30) \quad (6)$$

数值越大,材料在实验选定时间内的有效燃烧热越大,火灾温度越高,对人员损伤严重,火灾危险性越大。

### 3.2.3 引燃危险

1) 点燃时间  $C_7$ 。为后续对比,打分时参照放热指数,将其点燃时间( $t_i$ )与环氧树脂基体点燃时间( $t_{EP}$ )的比值的对数取相反数作为最后打分值。计算公式为:

$$C_7 = -\lg(t_i / t_{EP}) \quad (7)$$

$C_7$  越小,材料热稳定性越强,越不易燃,火灾危险性越低,未点燃时取最大值300 s。

2) 氧指数  $C_8$ 。为后续对比,打分时参照放热指数,将其氧指数( $O_i$ )与环氧树脂基体氧指数( $O_{EP}$ )的比值的对数取相反数作为最后打分值。计算公式为:

$$C_8 = -\lg(O_i / O_{EP}) \quad (8)$$

$C_8$  越小,材料点燃所需氧气浓度越高,越不易燃,火灾危险性越低。为简化计算,取20℃时氧指数值。

3) 平均垂直烧焦距离  $C_9$ 。为后续对比,打分时参照放热指数,将其平均垂直烧焦距离( $L_i$ )与环氧树脂基体平均垂直烧焦距离( $L_{EP}$ )的比值的对数取相反数作为最后打分值。计算公式为:

$$C_9 = -\lg(L_1 / L_{EP}) \quad (9)$$

$C_9$  越大, 材料燃烧扩散能力越差, 火焰越不易蔓延, 对人员损伤越低, 火灾危险性越低。为简化计算, 当其未燃烧时取 1 mm。

### 3.3 复合材料火灾危险评估指标权重

#### 3.3.1 构建判断矩阵

据统计, 超过 70% 的火灾伤亡是因为可燃物燃烧释放烟雾造成的。烟雾中的二氧化碳一旦聚集到一定浓度, 将使人员窒息, 一旦飞机起火, 将严重威胁乘客生命安全和财产安全。因此, 在火灾风险评估时, 烟气的毒性、发烟量和二氧化碳生成量是尤为重要的评估指标。同时, 飞机在航行前会携带大量燃料, 因此火灾可能会在极短时间内迅速蔓延成为全面火灾, 造成严重后果。

考虑到火势增长的潜在危险, 在火灾危险评估中具有相当高的重要性。放热危险和有效燃烧热也被纳入火灾危险性评估的考量因素之一则是因为其会对人员安全造成伤害。此外, 引燃危险则取决于可燃物是否被点燃, 因此考虑到点燃时间、氧指数以及平均垂直烧焦距离等因素, 也被用于火灾危险性的综合评估中。

结合 9 个指标, 通过专家打分法, 首先将因素进行分层, 然后将各因素之间进行两两比较, 得出重要程度。接着, 整理这些比较结果, 见表 7。根据综合分析得出标准值形成判断矩阵  $A$ 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 9 \\ \vdots & & \vdots \\ 1/9 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

表 7 判断矩阵的标准值  
Tab.7 Ratio scale value of element in judgment matrix

指数	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$
$C_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C_2$	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8
$C_3$	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7
$C_4$	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6
$C_5$	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5
$C_6$	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4
$C_7$	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3
$C_8$	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
$C_9$	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1

#### 3.3.2 求解特征向量和最大特征根

各行元素的几何平均值为:

$$b_j = (\prod_{i=1}^n a_{ij})^{1/n}, i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

对  $b_j$  进行归一化处理, 求得最大特征值所对应的特征向量:

$$w_j = \frac{b_j}{\sum_{k=1}^n b_k}, j=1,2,\dots,n \quad (12)$$

则特征值最大值为:

$$\lambda_{\max} = \sum_{k=1}^n \left[ \frac{(AW)_k}{nW_k} \right] = 9.401 \quad (13)$$

#### 3.3.3 判断矩阵一致性检验

一致性检验指标  $C_I=0.050$ , 查询表 6 可知  $R_I=1.46$ , 则  $C_R=0.034$ 。由此可知, 判断矩阵符合一致性要求, 可以使用其特征向量作为权重向量, 由判断矩阵最大特征根对应的特征向量可得到复合材料火灾危险评估各因素的权重值。每个指标权重值再乘以上一级对应危险的权重值, 得到最终各个指标的权重分布, 见表 8。

表 8 复合材料火灾危险评估指标权重分布结果  
Tab.8 Weight distribution results of composite material fire hazard assessment indicators

A	烟气危险 $B_1$	燃烧危险 $B_2$	引燃危险 $B_3$	总权重值
$C_1$	0.687	—	—	0.445 382 10
$C_2$	0.186 5	—	—	0.120 907 95
$C_3$	0.126 5	—	—	0.082 009 95
$C_4$	—	0.648 3	—	0.148 914 51
$C_5$	—	0.122	—	0.028 023 40
$C_6$	—	0.229 7	—	0.052 762 09
$C_7$	—	—	0.739 6	0.090 231 20
$C_8$	—	—	0.093 8	0.011 443 60
$C_9$	—	—	0.166 6	0.020 325 20

将实验所得相关数据值代入式 (1) ~ (9) 中, 计算出各种材料的各个火灾危险性评估指数得分。将复合材料的各个危险指数数值与权重值相乘并累加, 即可得到火灾危险指数值。

## 4 结论

本文从复合材料火灾危险性影响分析、火灾危险性评估方法、复合材料火灾危险性评估方法应用等方面总结了复合材料火灾适航风险性评估的手段。采用单项指标对复合材料进行火灾危险性分析所得结果缺少可信用度, 选取 9 个指标作为火灾评估参数, 结合试验数据进行分析, 可以很好地量化复合材料的火灾危险性, 更为直观地体现每种材料在不同危险方面的差距。

基于典型复合材料的热解、燃烧及烟毒特性数据, 采用层次分析法确定各项指标的权重, 然后计算出各种材料的各个火灾危险性评估指数得分, 进而得到火灾危害指数值, 对火灾危险性进行综合评估。这项工作将为复合材料的防火适航审定提供基础数据

和理论支撑,有助于复合材料的适航符合性设计和符合性验证。

#### 参考文献:

- [1] 伍毅,陈莹隆. 民机内饰典型材料燃烧特性研究综述[J]. 中国民航飞行学院学报, 2023, 34(4): 17-20.  
WU Y, CHEN Y L. Literature Review of Combustion Characteristics of Civil Aircraft Interior Typical Materials[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2023, 34(4): 17-20.
- [2] 刘媛媛. 几起典型性火灾原因分析及思考[J]. 消防技术与产品信息, 2012, 25(10): 67-69.  
LIU Y Y. Cause Analysis and Thinking of Several Typical Fires[J]. Fire Technique and Products Information, 2012, 25(10): 67-69.
- [3] 王睿琛,张文文,龙腾腾,等. 火灾危险性评估方法研究综述[J]. 消防界(电子版), 2021, 7(5): 66-68.  
WANG R C, ZHANG W W, LONG T T, et al. Review of Fire Risk Assessment Methods[J]. Fire industry, 2021, 7(5): 66-68.
- [4] 王彦富,李玉莲,张彪,等. 基于逻辑树和贝叶斯网络的海洋平台火灾概率分析[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 66-72.  
WANG Y F, LI Y L, ZHANG B, et al. Probability Analysis on the Offshore Platform Fire Based on the Logic Tree and Bayesian Network Model[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 66-72.
- [5] DANZI E, FIORENTINI L, MARMO L. FLAME: A Parametric Fire Risk Assessment Method Supporting Performance Based Approaches[J]. Fire Technology, 2021, 57(2): 721-765.
- [6] 何顺法. 基于模糊综合评判的建筑火灾危险性研究[J]. 消防科学与技术, 2008, 27(8): 606-608.  
HE S F. Research on Fire Hazard of Building Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Fire Science and Technology, 2008, 27(8): 606-608.
- [7] 董君. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 科技资讯, 2015, 13(29): 218.  
DONG J. Analysis and Application Research on Weight Calculation Method of Analytic Hierarchy Process[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(29): 218.
- [8] 李天逸,冯达. 层次分析法在消防安全评估中的应用[J]. 今日消防, 2024, 9(1): 11-13.  
LI T Y, FENG D. Application of Analytic Hierarchy Process in Fire Safety Assessment[J]. Fire Protection Today, 2024, 9(1): 11-13.
- [9] 倪延强,于全蕾,赵震,等. 基于层次分析法的轨道车辆车体用碳纤维复合材料火灾危险性综合评价[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(12): 125-130.  
NI Y Q, YU Q L, ZHAO Z, et al. Fire Hazard Assessment of Carbon Fiber Composite Materials for Rail Vehicle Body Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12): 125-130.
- [10] 郑凯文. 事故树法与层次分析法在港口火灾事故分析中的应用研究[J]. 水上安全, 2023(7): 113-115.  
ZHENG K W. Study on the Application of Accident Tree Analysis and Analytic Hierarchy Process in Port Fire Accident Analysis[J]. Maritime Safety, 2023(7): 113-115.
- [11] 杜筱娟. 既有公共建筑改造后消防安全风险评价研究[J]. 消防界(电子版), 2023(14): 73-77.  
DU X J. Study on Fire Safety Risk Assessment after Renovation of Existing Public Buildings[J]. Fire Industry, 2023(14): 73-77.
- [12] 景阳. 基于层次分析法和模糊综合评价法的深部磷矿安全开采风险管控体系研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.  
JING Y. Study on Risk Management and Control System of Deep Phosphate Mining Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2023.
- [13] 贾鹏宇,陈世俊,昌雪玲,等. 基于修正层次分析法的固定顶储罐风险评估技术研究[J]. 水道港口, 2023, 44(1): 143-149.  
JIA P Y, CHEN S J, CHANG X L, et al. A Study on Modified Analytic Hierarchy Process for Risk Assessment of Fire and Explosion Accidents of External Floating Roof Tanks[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2023, 44(1): 143-149.
- [14] 陈凯. 基于模糊层次分析法的石油钻井生产风险评价研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.  
CHEN K. Study on Risk Assessment of Oil Drilling Production Based On Fuzzy Analytic Hierarchy Process[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [15] 杨菲,杜春贵,王玉婷,等. 二维材料在火灾预警中的应用研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(6): 49-54.  
YANG F, DU C G, WANG Y T, et al. Research Progress on Application of Two-Dimensional Materials in Fire Warning[J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(6): 49-54.
- [16] 尹含煜,王志,徐松,等. 玻璃纤维/环氧树脂复合材料燃烧特性研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(3): 146-150.  
YIN H Y, WANG Z, XU S, et al. Combustion Characteristics of Glass Fiber/Epoxy Resin Composites[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(3): 146-150.
- [17] 吴海涛,谢飞,武斌,等. 飞机可达区域材料火灾安全特性适航要求研究进展[J]. 航空维修与工程, 2024(3): 103-107.  
WU H T, XIE F, WU B, et al. Research Progress of Airworthiness Requirements for Fire Characteristics of Materials in Aircraft Inaccessible Areas[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2024(3): 103-107.
- [18] 王献,伊重瑾,杨勇. 基于分布式光纤光栅碳纤维复合材料的飞机火警定位[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2023, 45(6): 862-867.  
WANG X, YI C J, YANG Y. Airplane Fire Detection Using Distributed Fiber Optic Grating Carbon Fiber Com-

- posite Materials[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2023, 45(6): 862-867.
- [19] 杨晓光, 贾旭宏, 徐松涛, 等. 酚醛树脂/玻璃纤维型飞机货舱衬板复合材料火灾危险性评价[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(3): 367-370.  
YANG X G, JIA X H, XU S T, et al. Fire Hazard Evaluation of Phenolic Resin/Glass Fiber Aircraft Cargo Lining Composite Material[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(3): 367-370.
- [20] ZONG R W, REN J, LIU X P, et al. Study of Downward Flame Spread and Fire Risk Evaluation of the Thermoplastic Materials[J]. Procedia Engineering, 2018, 211: 590-598.
- [21] 刘晨, 宗若雯, 陈海燕, 等. 基于层次分析法的热塑性聚氨酯及其纳米复合材料火灾危险性综合评价[J]. 火灾科学, 2019, 28(3): 177-184.  
LIU C, ZONG R W, CHEN H Y, et al. Fire Hazard Assessment on Thermal Polyurethane and Its Nanocomposites with AHP Analysis[J]. Fire Safety Science, 2019, 28(3): 177-184.
- [22] 任细运. 阻燃环氧树脂的燃烧特性及其潜在火灾危险性评价的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.  
REN X Y. Study on Combustion Characteristics of Flame Retardant Epoxy Resin and Its Potential Fire Risk Assessment[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [23] 朱光伟, 赵静波, 洪川, 等. 基于层次分析法的挤塑聚苯板燃烧性能评价体系研究[J]. 消防界(电子版), 2021(8): 40-42.  
ZHU G W, ZHAO J B, HONG C, et al. Study on Evaluation System of Combustion Performance of Extruded Polystyrene Board Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Fire Industry, 2021(8): 40-42.
- [24] 张宾. 火灾危险性评估在实际工程中的应用[J]. 消防科学与技术, 2005, 24(3): 307-310.  
ZHANG B. Application of Fire Risk Assessment in Practical Engineering[J]. Fire Science and Technology, 2005, 24(3): 307-310.
- [25] 何延治, 杨海荣. 火灾危险性评估在建筑防火设计中的应用[J]. 建筑设计管理, 2006, 23(6): 55-56.  
HE Y Z, YANG H R. Application of Fire Risk Assessment in Building Fire Protection Design[J]. Architectural Design Management, 2006, 23(6): 55-56.
- [26] 徐松. 民用飞机复合材料防火及烟毒特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2023.  
XU S. Study on Fire Prevention and Smoke Toxicity Characteristics of Civil Aircraft Composite Materials[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2023.
- [27] 李禄超, 王志, 徐艳英, 等. 碳纤维环氧复合材料火灾危险综合评价[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 62-66.  
LI L C, WANG Z, XU Y Y, et al. Comprehensive Evaluation of the Fire Risks Faced by the Typical Epoxy Resin/Carbon Fiber Composites[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 62-66.
- [28] 罗时标. 层次分析法在公众聚集场所火灾风险评估中的应用初探[J]. 上饶师范学院学报, 2010, 30(3): 97-106.  
LUO S B. Investigation Application the Fire Risk of the Public Assembly Area by Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Shangrao Normal University, 2010, 30(3): 97-106.
- [29] 许晨晨. 高原机场飞行区航空器地面事故火灾风险评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.  
XU C C. Study on Fire Risk Assessment Method of Aircraft Ground Accident in High Altitude Airport Flight Area[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.