

航空涂料防火性能指标评价体系构建的研究

董利辉, 何迎双, 郑秋雨, 王天明
(沈阳航空航天大学安全工程学院, 沈阳 110000)

摘要: 为了选择和应用一种合适的航空涂料以延长飞机的使用寿命和保持飞机运行的良好状态, 提出了一种针对航空涂料防火性能的指标评价体系。该指标体系在解析既有航空涂料防火性能评判标准的基础上, 从涂料的热稳定性、燃烧特性和烟毒特性 3 个方面设计评价指标框架, 并概述了 14 个航空涂料防火性能的二级指标。同时基于层次分析法理论对航空涂料防火性能各评价指标进行权重分配, 评价方法具有一定的客观性和准确性, 可以为航空涂料模糊优选提供指标依据。

关键词: 航空涂料; 防火性能; 层次分析法; 指标评价体系

中图分类号: TQ637, V255+5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)04-0005-04

Research on the Construction of Evaluation System of Aviation Coating Fire Performance Indexes

DONG Li-hui, HE Ying-shuang, ZHENG Qiu-yu, WANG Tian-ming
(College of Safety Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110000, China)

Abstract: In order to select and apply a suitable aerospace coating to prolong the service life of an airplane and keep the airplane in good operating condition, an index evaluation system for the fire resistance of aerospace coatings is proposed. On the basis of analyzing the existing aviation coating fire performance evaluation standards, the index system designs the evaluation index framework from the three aspects of thermal stability, combustion characteristics and smoke and toxicity characteristics of coatings, and outlines 14 secondary indexes of aviation coating fire performance. At the same time, based on analytic hierarchy process, the evaluation indexes of aviation coatings fire performance are assigned weights, and the evaluation method has certain objectivity and accuracy, which can provide the indexes for the fuzzy selection of aviation coatings.

Key words: aviation coatings; fire performance; analytic hierarchy process; index evaluation system

0 引言

由于航空航天、装备等领域的特殊性, 对涂料的一些特性提出了更高的要求, 例如: 耐腐蚀、耐油性(专用液压油)、耐气候及抗冻融循环等。在发生火灾时, 防火涂料通过一系列化学反应使得热量消耗, 依此有效降

低基材的温度, 以阻止或减缓火势扩散^[1], 因此如何选择一种合适的航空涂料, 对于飞机使用寿命的延长和运行良好状态的保持具有重要的意义。

目前, 世界各国都很重视新型防火涂料的研究和应用, 并加大了研究和开发力度, 而对与防火涂料密切相关的阻燃剂研究更是成绩斐然, 这又促进了新型防火涂料的开发研究^[2]。从 20 世纪 70 年代开始, 国外研究防火涂层, 使其使用在飞机上, 飞机结构的防火涂料在早期主要为不发泡的饰面型防火涂层, 但饰面型防火涂层存在防火能力较弱的缺点, 为此 20 世纪 40 年代末期研究者开始研制有机膨胀型防火涂层, 此类涂

收稿日期: 2024-09-19

基金项目: 辽宁省教育厅项目 LJKQZ20222292。

作者简介: 董利辉(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事系统可靠性、有害气体传播及控制等方面的研究工作。E-mail: 20180018@sau.edu.cn。

料的主要特点是防火性能和理化性能均优于无机防火涂料,涂层遇火时能形成具有良好隔热性能的海绵状膨胀泡沫碳化层,能更有效地保护基材。从20世纪80年代开始,飞机上使用的大部分防火涂料为膨胀型防火涂料^[3-4]。飞机客舱使用了大量高分子材料,这些材料必须进行阻燃处理以通过适航要求。

影响涂料耐火性能的因素很多,对防火涂料耐火性能的判断指标也不同,对于钢结构防火涂料的防火性能判定条件是以36b热轧工字钢和HN400×200热轧H型钢在三面受火的情形下失去承载能力或达到规定的平均温度(538℃)共同确定^[5];建筑物外保温材料(如岩棉、聚苯板等)防火性能的影响因素考虑了可燃性、热负荷承受能力、在受热环境下是否易分解出大量的有毒气体^[6],即考虑了建筑物外保温材料的燃烧特性、热释放率、烟气毒性^[7];也有研究防火涂料的防火性能(环氧防火涂料)与烟密度进行联系^[8]。而对比不同材料的防火性能,常规的单一参数评价往往只能说明材料在某一方面的优劣情况,而全面评价某种航空涂料的防火性能优劣,仅仅通过单一的某个或某些参数来确定,显然是不科学的。而实际应用中,不同涂料性能之间的优劣大多数情况下并不是绝对的高低之别,而是会存在差异性的优势和劣势,这为单参数评价涂料防火性能的方法带来了极大困扰。为此本文基于层次分析法综合各指标对航空涂料防火性能指标评价体系的构建进行了研究。

1 层次分析法

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)最早由美国运筹学科学家、匹兹堡大学教授 T L SATTY 提出,用于解决多目标、多准则、多方案的决策方法。将决策目标分解为多级因子,并通过定性指标模糊量化的方法确定每个影响因子间的相对重要性并计算权重^[9-10]。按照问题的本质及所要达到的目的,将问题划分为多个要素,依据要素间的交互作用与隶属度,在划分“目标层”、“中间层”和“计划层”3个层级的基础上,将各个层面要素在不同层面上的权重进行量化表示,并运用数理分析的方式,求出各个层面要素的权重。最终,得出了该层次在总体指标上的优先次序,并将其用于优选方案。

1.1 基于层次分析的基本原理及步骤

1.1.1 构造层次分析结构

AHP 是一种将各种决策因素进行指标性分解,并构建不同目标、准则和方案的评估结构模型的方法。通过定量和定性分析决策,AHP 能够综合比较不同层次的目标难题,解决难以通过定量分析描述的问题,为组织决策提供参考。

1.1.2 构建判断矩阵、检验判断矩阵

建立起层次分析模型后,每一个层次的要素之间可以进行成对的比较,形成一个比较判断矩阵,AHP 主要涉及人们对每个层次中每个因素的相对重要性的判断。这些判断通过适当的标度转化为数值,形成判断矩阵。判断矩阵反映了该级别与前一级别的相关因素之间的相对重要性的比较,是层次分析法的基本信息,也是计算相对重要性的重要依据。构造准则层的判断矩阵,比较同一级别中的不同因素,并根据每个指标因素,将比较结果的值分配给结果重要性的级别。根据为每个评价指标获得的判断矩阵 A_i ,对判断矩阵进行归一化,其中 X_{ij} 表示指标元素 X_i 相较于指标元素 X_j 的重要度得分:

$$\vec{X}_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (1)$$

使用根方法获得判断矩阵的最大特征向量 β 和最大特征根 γ_{\max} ,并利用式(2)进行重要度指标权重分析:

$$A_L \cdot \beta = \gamma_{\max} \cdot \beta \quad (2)$$

在构建了各级指标的判断矩阵后,有必要进行一致性检测。构建判断矩阵时不需要一致性,但判断矩阵是计算排名权重向量的基础,因此需要判断矩阵的一般一致性。在决策过程中,使用一个混乱的判断矩阵可能会导致决策的失误,因此,需对设定好的权重进行一致性检验的计算,使其满足其一致性要求,最终得到权重矩阵。

一致性检查可以使用一致性指数、一致性比率以及随机一致性指数来进行,其公式如下。

$$\text{一致性指标: } CI = (\gamma_{\max} - n) / (n - 1), \quad (3)$$

$$\text{一致性比率: } CR = CI / RI, \quad (4)$$

式中: CI 为平均随机一致性指标,无量纲; CR 为随机性一致性比率,无量纲; n 为判断矩阵阶数,无量纲; RI 为平均随机性一致性指标,无量纲。

1.1.3 构建指标评价体系

汇总各权重,构建指标评价体系。

2 构建航空涂料防火性能指标评价体系

2.1 指标构建原则

涂料防火性能评价指标构建可以采取以下原则^[10]。

1) 系统性与独立性相结合的原则:即各评价指标设计要具有本身的系统性,保证系统的完整性,同时能够独立运作,某一指标可以反映防火性能的一些方面;

2) 耦合原则:即各指标体系相互作用,彼此影响,联合共生,有机协调,某一指标在一些方面可以影响其他指标。如涂料的热稳定性在一些方面可以影响涂料的烟毒特性;

3) 可考核性原则:即要对确定的评价体系中的全

部指标应该是可以进行考核和评价, 这里是可以透过相关试验仪器测出指标的具体数据。

2.2 AHP 构建航空涂料防火性能指标评价体系

对于航空涂料而言, 其使用用途及使用环境相较于地面有着较大差异, 因而航空涂料的防火性能优劣的评价指标往往不能用地面防火涂料的标准来进行考虑。但是考虑到涂料防火功能的本质及使用用途, 那么其防火功能的好坏也就体现在 3 个方面: 一方面, 涂料自身是否具有较高的热稳定性和难燃特性; 其次, 火灾条件下, 航空涂料是否能对涂装的材料起到保护功能, 延缓其燃烧的时间, 降低其燃烧的概率; 最后, 材料在受热过程中是否会对环境及人体造成次生灾害的影响。因此, 选取涂料的热稳定性、燃烧特性和烟毒特性作为评价涂料防火性能的影响因素。

2.2.1 热稳定性

现代科学认为, 任何物质的着火过程均是剧烈的氧化还原反应在发生, 但研究发现固体材料的着火过程是一个相对复杂的过程, 尤其是高分子有机物质, 受热后会先经过热分解、热裂解, 生成的可燃气体再与氧气等物质发生剧烈的氧化还原反应而再次燃烧。因此, 材料阻燃性能优异与否与材料的热稳定性有着密不可分的关系, 材料受热后越容易分解, 其生成的可燃气体就越多, 也就越容易诱发火焰的生成。而描述材料热稳定性的参数也有很多, 其中受热后材料的开始分解温度在一定程度上描述了材料受热分解的时间早晚, 而残炭率能间接描述材料受热分解的程度, 表观活化能描述了材料受热分解的难易程度, 指前因子则描述了材料热分解的动力学特性。因此, 本文选用上述因素作为不同涂料的热稳定性的评定标准。对于相关涂料的热稳定性的测定可以采取热失重法、热分析(STA)技术及 TG 和差示扫描量热法合二为一, 分析仪器为热重-差热分析仪。

2.2.2 燃烧特性

固体材料热解会产生可燃蒸气, 其可燃蒸气在高温热源持续作用下, 需要经过一定时间的浓度积累和热量积累才会发生最终的着火, 而着火后材料的燃烧特性决定了其火焰的持续时间和扩展速度, 受热后越容易产生火焰, 燃烧后, 放出的热量越多以及质量损失越大, 则表明涂料阻碍火焰蔓延的能力就越弱。描述材料燃烧特性的参数有很多, 其中, 平均点火时间描述了材料从受热分解出可燃蒸气至蒸气被点燃的时间, 点燃时间越长, 则阻碍火焰生成的性能就越好。热释放速度表征了材料被点然后热量的释放快慢程度, 热释放速度越大, 意味着热释放速率在到达峰值时的时间越短, 那么火灾的充分发展期就会越靠前, 反之其阻碍火

焰传播的能力就越强。此外, 燃烧后质量损失量及损失率表征了材料的火焰持续能力, 损失的质量越多, 表明材料被点燃后燃烧持续时间也就越长, 其抵抗火焰持续燃烧的能力也就越弱。因此, 本文选用点燃时间、热释放速率和质量损失率这几个因素作为涂料燃烧性能的评定标准, 对于涂料的燃烧特性可以采取锥形量热仪测定。

2.2.3 烟毒特性

火灾发生时, 材料的烟雾颗粒会遮挡视线, 阻碍火灾救援及人员疏散, 而材料燃烧生成物中的有毒气体还会对工作人员的生命安全带来极大的影响, 因此涂料防火性能的优劣还需要考虑材料燃烧过程中释放的烟气对环境的影响。材料发烟量越大, 生成的有毒有害气体量越多, 其危险程度也就越高。基于此, 本文选用材料燃烧时的烟释放速率、烟密度、有毒气体浓度等因素作为评定材料烟毒特性优劣的标准, 对于涂料的烟毒特性可以采取烟密度箱进行烟密度试验。

依照专家打分的判断标准, 对各判断矩阵进行设置, 并依据式(2)计算框架中各指标权重, 同时依据式(3)、(4)进行一致性检测, 其各指标权重见表 1~4。

表 1 一级指标权重指数

变量指标	热稳定性 A	燃烧特性 B	烟毒特性 C	权重
热稳定性 A	1	2	3	0.52
燃烧特性 B	1/2	1	3	0.33
烟毒特性 C	1/5	1/3	1	0.15

由表 1 可得: $\gamma_{\max}=3.05, RI=0.52, CI=0.0269, CR=0.05 < 0.1$, 故该一级指标具有一致性。

表 2 热稳定性因素权重

变量指标	开始分解温度	残炭率	stp1 表观活化能	stp1 指前因子	权重
开始分解温度	1	2	3	3	0.43
残炭率	1/2	1	3	5	0.34
stp1 表观活化能	1/3	1/3	1	2	0.14
stp1 指前因子	1/3	1/5	1/2	1	0.09

表 3 燃烧特性因素权重

变量指标	平均点燃时间	峰值热释放速率	均值热释放速率	质量损失百分比	峰值质量损失率	权重
平均点燃时间	1	3	2	3	5	0.40
峰值热释放速率	1/3	1	1/2	2	2	0.15
均值热释放速率	1/2	2	1	3	5	0.28
质量损失百分比	1/3	1/2	1/3	1	2	0.11
峰值质量损失率	1/5	1/2	1/5	1/2	1	0.06

由表 2 可得： $\gamma_{\max}=4.156, RI=0.9, CI=0.052, CR=0.058<0.1$, 该二级指标具有一致性。

由表 3 可得： $\gamma_{\max}=5.09, RI=1.12, CI=0.023, CR=0.02<0.1$, 故该二级指标具有一致性。

表 4 烟毒特性因素权重

变量指标	持续释烟时间	最大烟密度	烟雾遮蔽指数	CO 浓度	NO _x 浓度	权重
持续释烟时间	1	1/5	1/2	1/3	2	0.09
最大烟密度	5	1	3	2	5	0.41
烟雾遮蔽指数	2	1/3	1	1/3	3	0.15
CO 浓度	3	1/2	3	1	5	0.29
NO _x 浓度	1/2	1/5	1/3	1/5	1	0.06

由表 4 可得： $\gamma_{\max}=5.113, RI=1.12, CI=0.028, CR=0.025<0.1$, 故该二级指标具有一致性。

根据以上信息, 可以得到航空涂料防火性能评价指标体系及其权重占比情况, 见表 5。

表 5 航空涂料防火性能评价指标体系汇总

目标属性	一级指标	权重	二级指标	权重
航空涂料的防火性能评价	热稳定性	0.52	开始分解温度	0.43
			残炭率	0.34
			stp1 表观活化能	0.14
			stp1 指前因子	0.09
			平均点燃时间	0.40
	燃烧特性	0.33	峰值热释放速率	0.15
			均值热释放速率	0.28
			质量损失百分比	0.11
			峰值质量损失率	0.06
			持续释烟时间	0.09
	烟毒特性	0.14	最大烟密度	0.41
			烟雾遮蔽指数	0.15
			CO 浓度	0.29
			NO _x 浓度	0.06

3 涂料防火性能评价指标体系构建

基于以上分析, 对上述因素进行了分类, 确定一级指标为材料 A 热稳定性、B 燃烧特性、C 烟毒特性, 二级指标为: A1 开始分解温度、A2 残炭率、A3 stp1 表观活化能、A4 step1 指前因子、B1 平均点燃时间、B2 峰值热释放速率、B3 均值热释放速率、B4 质量损失百分比、B5 峰值质量损失率、C1 持续释烟时间、C2 最大烟密度、C3 烟雾遮蔽指数、C4 CO 浓度、C5 NO_x 浓度, 其指标体系各指标的内部关系见图 1。

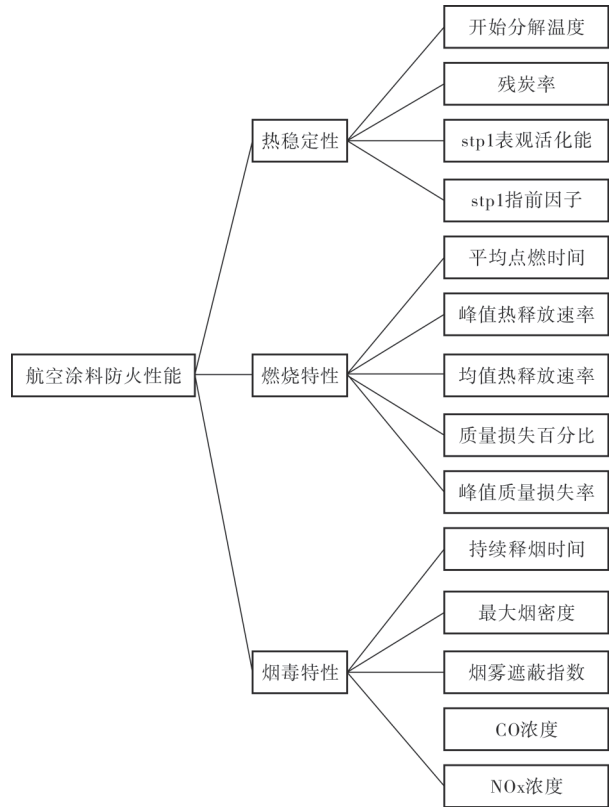


图 1 涂料防火性能指标评价体系

4 结语

本文从飞机防火涂料的 3 个主要性能指标即热稳定性、燃烧特性以及烟毒特性出发, 拓展二级指标, 从而构建了航空涂料防火性能指标评价体系。该航空涂料指标评价体系, 一能够直观了解飞机防火涂料的防火性能, 对其防火性能有更加直观的认识, 二可以通过涂料防火性能指标评价体系的的不同指标对不同涂料的防火性能进行模糊优选。同时本文仅是对涂料的 3 个主要防火性能的一级指标进行了初步探讨, 许多指标还需丰富完善, 需要在此基础上, 建立了更科学、更完善的评价指标体系, 为航空防火涂料的优良耐火性选择提供更好的依据。

参考文献:

[1] 王永强. 阻燃材料及应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[2] 查萌, 贺辉, 杨利. 防火涂料在飞机上的应用性能研究[J]. 现代涂料与涂装, 2017(7): 13-16.

[3] 覃文清, 李风. 材料表面涂层防火阻燃技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[4] 覃文清, 李风. 膨胀型防火涂料膨胀发泡层质量对防火涂料的影响[J]. 涂料工业, 2003(6): 12-14.

[5] 包光宏, 冯军. 国家标准 GB 14907—2018(下转第 13 页)