

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-431-07

基于 AHP-EWM 组合赋权的列车材料火灾危险性评价

朱柏岭¹ 毕海权¹ 牟志成² 王 菁¹ 周远龙¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中车大连机车车辆有限公司 大连 116045)

【摘 要】 列车材料火灾危险性评价能够为提高材料防火性能提供参考, 从而降低列车火灾风险。层次分析法作为一种便利、易于理解的半定量方法被广泛应用于列车材料的火灾危险性评价。但由于其存在较强主观性, 有必要引入更客观的方法进行评价。基于级差最大化法对层次分析法和熵权法计算得到的权重进行组合, 再使用组合后的权重计算得到列车材料的火灾危险性。结果表明, 列车材料的火灾危险性从小到大依次为: 69t 保温棉-聚酯纤维、聚酯纤维、弹性支撑橡胶、硅酸盐、碳纤棉、铝蜂窝+HPL 板材、胶合板+纸蜂窝、聚酯玻璃钢、芳纶蜂窝复合板、玻璃钢。

【关键词】 列车材料; 火灾危险性; 层次分析法; 熵权法; 组合赋权

中图分类号 U298.4 文献标志码 A

Fire Hazard Assessment of Train Materials Based on Combined Weighting of AHP-EWM

Zhu Bailing¹ Bi Haiquan¹ Mou Zhicheng² Wang Jing¹ Zhou Yuanlong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. CRRC Dalian Co., Ltd, Dalian, 116045)

【Abstract】 The evaluation of fire hazard for train materials can provide references for improving material fire resistance, thereby reducing train fire risks. As a convenient and easy-to-understand semi-quantitative method, the Analytic Hierarchy Process (AHP) is widely used in the fire hazard evaluation of train materials. However, due to its strong subjectivity, it is necessary to introduce a more objective evaluation method. Based on the maximum difference method, this paper combines the weights calculated by AHP and the entropy weight method, and then uses the combined weights to calculate the fire hazard of train materials. The results show that the fire hazard of train materials in ascending order is: 69t insulation cotton-polyester fiber, polyester fiber, elastic support rubber, silicate, carbon fiber cotton, aluminum honeycomb + HPL plate, plywood + paper honeycomb, polyester glass fiber reinforced plastic, aramid honeycomb composite plate, and glass fiber reinforced plastic.

【Keywords】 Train materials; Fire hazard; Analytic Hierarchy Process(AHP); Entropy Weight Method(EWM); Combined weights

0 引言

列车火灾的发生具有高度的不确定性, 需要从根源上进行预防, 一种预防角度是从提升列车材料

防火性能入手。通过改善材料引燃时间, 能够降低火灾发生可能。不仅如此, 降低材料被引燃以后的热危害性和释放的烟气毒性, 也能为人员安全疏散

作者简介: 朱柏岭 (2001-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1206722870@qq.com

通讯作者: 毕海权 (1974-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2025-11-25

提供更多时间，并减少财产损失。

如何判断列车材料防火性能的优劣需要科学、准确的材料火灾危险性评价方法。在对列车材料的火灾危险性进行评价研究时应用较广的是层次分析法（AHP）。倪延强等人^[1]采用 AHP 从毒性危险、烟气危险、火焰蔓延危险以及放热危险评价了轨道车辆车体用碳纤维复合材料火灾危险性。王升^[2]在高速列车车厢内火灾燃烧特性研究中采用 AHP 对几种高速列车典型材料进行了评价。除此之外，研究材料火灾危险性还有别的方法。ZOU 等人^[3]采用分析网络法（ANP）和信息加权法（IW）评价了飞机碳纤维/环氧复合材料的火灾危险性。另外，他们还用 ANP 和标准间相关性方法（CRITIC）从热分解特性、热量和 CO₂ 危险以及烟雾和一氧化碳危害评价了复合材料的火灾危险性^[4]。LIU 等人^[5]从着火、热量和烟雾危害三个方面采用 AHP-熵权法（EWM）得到了组合权重，采用 TOPSIS-GRA 法实现了不同老化条件下护套火灾隐患的综合评价。于志金等人^[6]采用组合赋权灰色关联法从燃烧特性、生烟特性、烟气毒性与火焰蔓延特性等几个方面评价了多种木质板材的火灾危险性。苑春苗等人^[7]通过搭建小尺寸试验平台，从质量损失、火焰蔓延速率和温度等方面，采用熵值法与加权秩和法对典型织物覆盖下软质聚氨酯泡沫的火灾危险性进行了评价。

目前，火灾危险性研究仍然是重点。AHP 在列车材料火灾危险性评价中有易于理解、方便使用的优点。然而，这种方法也存在依赖人为经验的问题，比较主观。因此，本文采用 AHP-EWM 组合赋权来进行评价。选取的权重组合方法级差最大化法可解释且具有合理性。同时，本文在评价指标选取上也相对丰富。研究结果可为改善列车材料防火性能提供参考。

1 燃烧试验

1.1 实验装置及标准

锥形量热仪（Cone Calorimeter，简称 CONE）是 1982 年由美国国家标准与技术研究院（NIST）的 Babrauskas 等人研制出的实验仪器，其燃烧环境与真实的燃烧环境相似，可表征出材料的燃烧特性，在评价材料、材料设计和火灾预防等方面具有重要的参考价值^[8]。

本文实验装置采用 CONE，试验标准参照国际标准化组织提出的 ISO-5660-1 规范^[9]和美国材料与试验学会提出的 ASTM E1354 规范^[10]。通过气体分析仪测得排气管道中的氧气、一氧化碳和二氧化碳含量，并通过烟密度计测得碳烟颗粒的影响，最终获得样件的燃烧特性。

1.2 试验材料

本文材料主要来源于高速列车，选取了一些具有代表性的部位的材料，例如地板、侧墙、顶板材料等。实验首先需要将不同的列车材料制备成长宽 100 mm×100 mm 的样品，并保留其原有厚度。将样品进行编号（见表 1），列出了其在车厢中的对应部位。需要指出，列车材料多为复合材料，实际成分往往更复杂。本文对样品材料成分的描述依赖于已知的主要成分，目的侧重于区分列车材料的不同类型。在实验开始前，按照上述规范要求 23℃、相对湿度 50% 的环境中存放 48h，调节至质量保持恒定（变化≤0.1g 或≤0.1%）。为减少测试过程中样品除顶面外其它方向的受热影响，仅暴露样品顶面，将其它方向表面用铝箔进行包覆，提高测试结果的可靠性。

表 1 列车典型可燃材料

Table 1 Typical combustible materials in trains

样品编号	部位	主要材料成分
Y1	地板	弹性支撑橡胶
Y2	侧墙防寒材	69t 保温棉-聚酯纤维
Y3	客室卷帘	聚酯纤维
Y4	车窗玻璃	硅酸盐
Y5	卫生间间壁	铝蜂窝+HPL 板材
Y6	间壁板	胶合板+纸蜂窝
Y7	侧墙板	聚酯玻璃钢
Y8	车顶防寒材	碳纤棉
Y9	边顶板	玻璃钢
Y10	平顶板	芳纶蜂窝复合板

1.3 试验结果

样品材料的燃烧特性涉及多方面^[11,12]。点燃时间是指材料表面受热到进入持续燃烧的时间。热释放速率是指材料点燃以后单位面积单位时间释放的热量。质量损失速率是指燃烧过程中，样品质量随时间的变化率。一氧化碳生成速率是指燃烧过程

中消耗单位质量样件生成的一氧化碳量。比消光面积是指挥发单位质量材料所产生的烟量。具体试验结果如表 2 所示。

表 2 样品的燃烧特性

Table 2 Combustion characteristics of samples

特性参数	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
点燃时间/s	149.0	150.0	68.0	195.0	38.0	31.0	19.0	4.0	15.0	21.0
热释放速率峰值时间/s	238.0	206.0	100.0	1028.0	122.0	58.0	106.0	16.0	64.0	64.0
热释放速率峰值/(kW/m ²)	88.2	71.6	48.4	202.8	242.2	188.7	218.6	76.5	285.1	210.5
热释放总量/(MJ/m ²)	33.4	10.7	5.7	137.3	47.6	89.6	39.8	9.1	73.2	78.2
平均质量损失速率/[g/(m ² ·s)]	3.5	0.8	0.5	6.2	5.9	6.5	3.7	0.7	4.6	4.4
质量损失速率峰值/(g/s)	0.103	0.065	0.041	0.088	0.191	0.179	0.122	0.079	0.175	0.192
平均 CO 生成速率/(kg/kg)	0.030	0.112	0.088	0.036	0.080	0.027	0.178	0.142	0.260	0.092
平均比消光面积/(m ² /kg)	342.9	321.2	191.6	232.5	14.2	162.5	447.9	274.9	919.0	193.8

2 火灾危险性评价方法

2.1 层次分析法

AHP 是将评价对象进行分层次, 并且确定对应权重的一种决策分析法。它主要以专家打分、文献调研等经验总结的方式确定权重, 再通过客观数据进行计算, 是一种半定量的方法。AHP 的一般步骤为: (1) 建立层次结构模型, (2) 构造判断矩阵, (3) 计算权重, (4) 一致性检验。主要公式可参见文献[13]。通过 AHP 能够得到权重 $w_a=(w_{a1}, w_{a2}, \dots, w_{an})^T$ 。

2.2 熵权法

EWM 是计算数据信息熵值, 是通过数据提供的信息量的大小来确定权重的方法。它只依靠客观数据确定权重, 是一种定量分析方法。EWM 的一般步骤为: (1) 构造标准化数据矩阵, (2) 计算信息熵, (3) 计算权重。主要公式可参见文献[14,15]。通过 EWM 能够得到权重 $w_b=(w_{b1}, w_{b2}, \dots, w_{bn})^T$ 。

2.3 级差最大化法确定组合权重

AHP 和 EWM 两种方法各有优缺点。AHP 原理和步骤相对简单, 易于决策者理解和使用。缺点如前文所述, 依赖人为决策经验, 具有较强的主观性, 且指标重要度的数值难以精确。EWM 客观性较强, 理论基础坚实, 能有效反映指标数据的差异程度。但缺乏主观意识的指导, 无法全面反映数据的真实情况, 它只受到样本数据的影响, 且无法反映各个指标之间的关系[16]。

因此, 使用级差最大化法将两种方法结合起来

确定组合权重 c , 如图 1 所示。

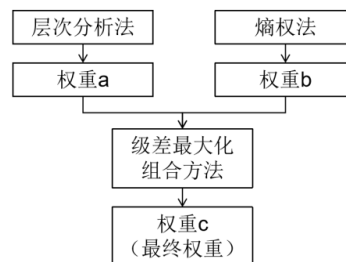


图 1 构建组合权重

Fig.1 Constructing combined weights

级差最大化法是以评价结果的区分度最大为目标函数, 以指标权重的合理取值区间为约束条件建立优化模型, 其求得的组合权重并不是由主观权重和客观权重直接相加或者相乘计算得到, 组合模式是合理的且可解释, 方法步骤为[17]:

(1) 数据正逆向化

$$x'_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq k} (x_{ij})}{\max_{1 \leq i \leq k} (x_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq k} (x_{ij})} & (\text{正向}) \\ \frac{\max_{1 \leq i \leq k} (x_{ij}) - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq k} (x_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq k} (x_{ij})} & (\text{负向}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个评价对象第 j 个属性的值。

(2) 组合权重合理区间的确定

确定第 j 个属性的组合权重的合理区间为 $[w_j^-, w_j^+]$, w_{ij} 为第 i 种赋权方法下第 j 个属性权重。

$$\begin{cases} w_j^+ = \max \{w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{ij}\} \\ w_j^- = \min \{w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{ij}\} \end{cases} \quad (2)$$

(3) 计算标准化矩阵 X 、评价结果 Z 及方差

s^2

$$X = [x'_{ij}]_{n \times k} = \begin{bmatrix} x'_{11} & \cdots & x'_{1k} \\ \vdots & x'_{ij} & \vdots \\ x'_{n1} & \cdots & x'_{nk} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= [x'_1, x'_2, \cdots, x'_k]$$

$$Z = w_c X = (w_c x'_1, w_c x'_2, \cdots, w_c x'_k) \quad (4)$$

$$s^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (w_c x'_i - w_c \bar{x}')^2 \quad (5)$$

$$= \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k w_c H w_c^T$$

(4) 约束条件限定及优化模型

$$\max \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k w_c H w_c^T \quad (6)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n w_j = 1 \\ w_j^- \leq w_j \leq w_j^+ \end{cases} \quad (7)$$

采用 Matlab 在约束条件下进行求解^[18], 满足约束条件的 $w_c = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n)^T$ 即为求得的组合权重。

3 列车材料火灾危险性评价

3.1 评价指标

选取评价指标时主要从两方面进行考虑, 一方面是对人体伤害较大的烟气因素, 另一方面是材料的引燃、蔓延和热因素, 参考前人指标选取经验^[2,11,12,19], 本文在锥形量热仪试验条件下选取的评价指标相对更全面合理。

(1) 烟气因素

毒气产率指数 ($ToxPI_{40min}$): 表征一氧化碳毒性造成的危险, 其值越小越好。其中 COY 为一氧

化碳生成速率, MLR 为质量损失速率。表达式为:

$$ToxPI_{40min} = \log(COY \times MLR \times 10^3) \quad (8)$$

发烟指数 ($TSPI_{40min}$): 表征碳烟造成的致盲和其它危险, 其值越小越好。其中 SEA 为比消光面积。表达式为:

$$TSPI_{40min} = \log(SEA \times MLR) \quad (9)$$

(2) 引燃、蔓延和热因素

点燃指数 (TI): 表征材料是否容易被点燃, 其值越小越好。其中 TTI 是材料的点燃时间。表达式为:

$$TI = \log(1 / TTI) \quad (10)$$

质量损失速率峰值 ($PMLR$): 点燃后的单位时间内质量损失的最大速率。反映材料热解剧烈程度, 与材料产生可燃挥发分的速率高度相关。其值越小越好。

火灾性能指数 (FPI): 表征材料在火灾中的火蔓延速率快慢, 其值越大越好。其中 $PHRR$ 为材料的峰值热释放速率。表达式为:

$$FPI = \frac{TTI}{PHRR} \quad (11)$$

火灾增长指数 (FGI): 表征材料火灾增长速度的快慢, 其值越小越好。其中 T_{PHRR} 为热释放速率峰值出现的时间。表达式为:

$$FGI = \frac{PHRR}{T_{PHRR}} \quad (12)$$

放热指数 ($THRI$): 表征材料火灾释放热量大小, 其值越小越好。其中 HRR_{40min} 为试验中前 40min 内热释放总量。表达式为:

$$THRI = \log(HRR_{40min}) \quad (13)$$

对锥形量热仪的试验数据按照上述公式进行处理计算, 最终得到样品的评价指标数值如表 3 所示。

表 3 样品的评价指标数值

Table 3 Evaluation indicator values of the samples

指标名称	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
毒气产率指数 $ToxPI$	2.02	1.95	1.65	2.34	2.67	2.25	2.82	2.00	3.08	2.61
发烟指数 $TSPI$	3.08	2.41	1.98	3.16	1.92	3.02	3.22	2.28	3.63	2.93
点燃指数 TI	-2.17	-2.18	-1.83	-2.29	-1.58	-1.49	-1.28	-0.60	-1.18	-1.32
质量损失速率峰值 $PMLR$	0.103	0.065	0.041	0.088	0.191	0.179	0.122	0.079	0.175	0.192
火灾性能指数 FPI	1.69	2.09	1.40	0.96	0.16	0.16	0.09	0.05	0.05	0.10
火灾增长指数 FGI	0.37	0.35	0.48	0.20	1.99	3.25	2.06	4.78	4.45	3.29
放热指数 $THRI$	1.52	1.03	0.76	2.14	1.68	1.95	1.60	0.96	1.86	1.89

3.2 危险性分析

3.2.1 权重计算

首先分别计算层次分析法权重和熵权法权重, 然后通过级差最大化法将两种权重组合起来求得组合权重。

(1) AHP 权重

构建的评价体系如图 2 所示, 在层次分析法中需要对指标的重要性进行排序, 研究经验表明^[11,12], 火灾中烟气危害性最大。烟气因素中毒气产率指数危害大于发烟指数。在引燃、蔓延和热因素中, 危害从大到小依次为点燃指数、质量损失速率峰值、火灾性能指数、火灾增长指数和放热指数。

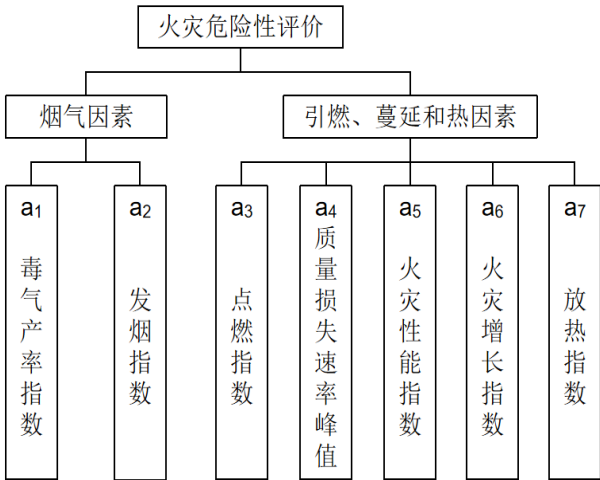


图 2 危险性分析计算模型

Fig.2 Hazard assessment model

构建权重判断矩阵:

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得到层次分析法权重 $w_a=(0.350, 0.237, 0.159, 0.106, 0.070, 0.046, 0.032)^T$, 并进行一致性检验 $CR=0.024<0.1$ 发现满足条件。

(2) EWM 权重

熵权法无需对指标进行人为排序, 仅依靠数据

计算各指标的熵值大小。通过正逆向化、非负平移 ($\varepsilon=0.01$)^[20]、计算比重变换值处理等一系列步骤后, 求得各指标熵值 $e=(0.914, 0.904, 0.930, 0.837, 0.697, 0.894, 0.876)^T$ 。随后计算信息效用值并最终求得各指标权重 $w_b=(0.091, 0.101, 0.074, 0.172, 0.320, 0.112, 0.131)^T$ 。

(3) 级差最大化法组合权重

如前文所述, 首先用不同方法获得的指标权重确定每个指标的权重合理区间, 然后以 s^2 最大作为目标函数进行迭代求解。通过级差最大化法求得组合权重 $w_c=(0.189, 0.101, 0.074, 0.172, 0.32, 0.112, 0.032)^T$ 。求得的每个指标的组合权重落均在合理区间内, 具有合理性。权重计算结果如表 4 所示。

表 4 权重计算结果

Table 4 Calculated weights

指标名称	AHP 权重 w_a	熵权法权重 w_b	组合权重 w_c	合理区间
<i>ToxPI</i>	0.350	0.091	0.189	[0.091,0.350]
<i>TSPI</i>	0.237	0.101	0.101	[0.101,0.237]
<i>TI</i>	0.159	0.074	0.074	[0.074,0.159]
<i>PMLR</i>	0.106	0.172	0.172	[0.106,0.172]
<i>FPI</i>	0.070	0.320	0.320	[0.070,0.320]
<i>FGI</i>	0.046	0.112	0.112	[0.046,0.112]
<i>THRI</i>	0.032	0.131	0.032	[0.032,0.131]

3.2.2 评价结果

通过将非负平移后的指标数据乘以权重后得到评价结果分数 (得分越高越好), 如表 5 所示。从各评价方法计算结果来看, 组合赋权得分的方差最大, 表明评价结果最有区分度。结合前文所述, 组合权重均落在合理区间内。达到了组合评价目的, 即兼顾了主客观权重也使得评价结果区分度最大。

通过组合权重计算结果, 可知材料危险性从小到大依次为: 69t 保温棉-聚酯纤维、聚酯纤维、弹性支撑橡胶、硅酸盐、碳纤棉、铝蜂窝+HPL 板材、胶合板+纸蜂窝、聚酯玻璃钢、芳纶蜂窝复合板、玻璃钢。

表 5 样品评价结果

Table 5 Sample evaluation results

评价方法		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	得分方差
AHP	得分	0.671	0.832	0.932	0.564	0.482	0.412	0.284	0.568	0.085	0.312	0.066
	排名	3	2	1	5	6	7	9	4	10	8	
EWM	得分	0.702	0.900	0.871	0.531	0.309	0.224	0.282	0.398	0.088	0.180	0.084
	排名	3	1	2	4	6	8	7	5	10	9	
组合赋权	得分	0.731	0.899	0.871	0.582	0.304	0.267	0.262	0.389	0.069	0.194	0.087
	排名	3	1	2	4	6	7	8	5	10	9	

4 结论

本文通过锥形量热仪试验获得了列车材料燃烧关键参数，并将其转换为了评价指标。然后运用 AHP-EWM 级差最大化组合赋权的方法获取了指标权重，对列车材料火灾危险性进行了评价。主要结论如下：

（1）选取的评价指标具有代表性且相对丰富，能够对列车材料火灾危险性进行有效评价。用毒气产率指数和发烟指数考虑了烟气因素。用点燃指数、质量损失速率峰值、火灾性能指数、火灾增长指数、放热指数考虑了引燃、蔓延和热因素。

（2）AHP 和 EWM 计算权重各有特点，使用级差最大化方法能够将其合理组合并应用于列车材料火灾危险性评价。级差最大化法的优势在评价结果中得到了充分体现，即兼顾了主客观方法使组合权重落在合理区间内，并让评价结果达到了区分度大的目标。

（3）通过组合权重计算火灾危险性，得到的列车材料火灾危险性从小到大依次为：69t 保温棉-聚酯纤维、聚酯纤维、弹性支撑橡胶、硅酸盐、碳纤棉、铝蜂窝+HPL 板材、胶合板+纸蜂窝、聚酯玻璃钢、芳纶蜂窝复合板、玻璃钢。

参考文献：

[1] 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.

[2] 王升.高速列车车厢内火灾燃烧特性研究[D].成都:西南交通大学,2017.

[3] ZOU B, QIAN Z, ZHANG Z, et al. Quantitative assessment of whether phosphorus-based flame

retardants are optimizing or degrading the fire hazard of aircraft carbon fiber/epoxy composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2024,279:111413.

[4] ZOU B, WANG X, LI J, et al. Harmonization of semi-objective ANP with explained CRITIC for quantitative evaluation of fire hazard risks for flame-retardant materials[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023,180:935-944.

[5] LIU H, WANG W, YAN L, et al. A Novel Fire Hazard Evaluation Method for Cable Sheaths Under Various Ageing Conditions[J]. Fire Safety Journal, 2025:104572.

[6] 于志金,宋佳妮,徐澜,等.基于组合赋权灰色关联法的木质板材火灾危险性研究[J].西安科技大学学报, 2024,44(1):34-42.

[7] 苑春苗,贺曹迪,原琪,等.典型织物覆盖下软质聚氨酯泡沫火焰蔓延特性研究[J].安全与环境学报,2022, 22(5):2352-2357.

[8] 王庆国,张军,张峰.锥形量热仪的工作原理及应用[J].现代科学仪器,2003,(6):36-39.

[9] ISO 5660-1:2015.对火的反应测试-热释放、产烟量及质量损失率[S].国际标准化组织,2015.

[10] ASTM E1354.耗氧量法测定材料及产品释热及可见烟雾释放速率方法[S].美国材料与试验协会,2014.

[11] 王子豪,毕海权,宋磊,等.高速列车典型材料火灾危险性分析[J].制冷与空调,2025,39(4):510-516.

[12] 张晓宇.低压环境下夹层结构飞机内饰壁板材料热解及燃烧特性研究[D].广汉:中国民用航空飞行学院, 2024.

[13] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7): 93-100.

- [14] 康巍,凌海风,褚德天,等.基于 AHP-熵权法的复杂山地环境无人机作战效能评估[J].计算机测量与控制,2025,33(10):320-329.
- [15] 闫美娇.基于 DEMATEL-熵权法的园林绿化招标项目风险管理研究[D].北京:北京化工大学,2025.
- [16] 邓起泉.基于熵值法-层次分析法的重庆市生态环境质量综合评价[D].重庆:西南大学,2022.
- [17] 李刚,李建平,孙晓蕾,等.主客观权重的组合方式及其合理性研究[J].管理评论,2017,29(12):17-26,61.
- [18] 余鹏,马珩,周福礼.基于级差最大化组合赋权 TOPSIS 灰关联投影法的区域碳效率动态评价[J].运筹与管理,2019,28(12):170-177.
- [19] 舒中俊,徐晓楠,杨守生,等.基于锥形量热仪试验的聚合物材料火灾危险评价研究[J].高分子通报,2006,(5):37-44,78.
- [20] 冯家兴,钟乐,梁绮雯,等.基于熵权-模糊综合评价法的农产品农药残留风险综合评价模型[J].仲恺农业工程学院学报,2026,(1):25-34.

(上接第 334 页)

- [18] Shi L, Liu Y, Si P, et al. Multi-mode solar photovoltaic energy utilization system for Plateau buildings in rural areas[J]. Energy Conversion and Management, 2024,311:118534.
- [19] Li J, Liu Y, Yi C, et al. Integrated PV-PCM electric film used in building envelope for solar heating: modelling, testing and application in Qinghai-Tibet plateau[J]. Renewable Energy, 2025,250:123252.
- [20] Katoch S, Chauhan SS, Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021,80:8091-8126.
- [21] Zhi Y, Gao D, Sun T, et al. Experimental investigation of a distributed photovoltaic heating system based on building envelope thermal storage[J]. Energy and Buildings, 2024,319:114586.
- [22] Lin C-W, Liu H-C, Chang Y-L, et al. Thermal analysis of boiling pot with single coil induction cooker[C]. Proceedings of the 21st InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm 2022). IEEE, 2022:593-598.
- [23] Liu H-C, Chang Y-L, Lin C-W, et al. Experimental and numerical multidisciplinary methodology to investigate the thermal efficiency of boiling pot on induction system[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 36:102199.