

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-510-07

高速列车典型材料火灾危险性分析

王子豪¹ 毕海权¹ 宋磊² 王菁¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中车唐山机车车辆有限公司 唐山 063035)

【摘要】 基于 ISO 5660 标准采用锥形量热仪对高速列车典型位置的非金属可燃材料进行了燃烧试验, 得到了非金属材料在额定辐射照度下的点燃时间、热释放速率、热释放总量和 CO 产量等参数。并根据试验结果采用层次分析法分析了不同可燃材料的火灾危险性。研究结果表明: 在 25kW/m² 辐射强度下材料的火灾危险性排序为: 聚氨酯高回弹泡沫>麻纤维>涤纶; 在 35kW/m² 辐射强度下材料的火灾危险性排序为: 三元乙丙>硅橡胶>复合防寒材; 在 50kW/m² 辐射强度下材料的火灾危险性排序为: 芳纶蜂窝复合板>胶合板+纸蜂窝>交联聚烯烃。研究为后续高速列车内装材料的选型以及车厢内消防安全的设计提供了理论依据。

【关键词】 高速列车; 锥形量热仪; 火灾危险性; 层次分析法

中图分类号 TU298.4 文献标志码 A

Fire Hazard Analysis of Typical Materials for High-Speed Trains

Wang Zihao¹ Bi Haiquan¹ Song Lei² Wang Jing¹

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

2. CRRC Tangshan Co., Ltd, Tangshan, 063035)

【Abstract】 In this paper, the combustion test of non-metallic combustible materials at typical positions of high-speed trains is carried out by using a cone calorimeter based on the ISO 5660 standard, and the ignition time, heat release rate, total heat release and CO yield of non-metallic materials at rated irradiance are obtained. According to the test results, the fire hazard of different combustible materials was analyzed by analytic hierarchy process. The results show that the fire hazard of the materials at 25kW/m² radiation intensity is as follows: polyurethane high-resilience foam > hemp fiber > polyester; The fire hazard of the materials at 35kW/m² radiant intensity was as follows: EPDM > silicone rubber > composite cold-proof materials; The fire hazard of the materials at 50kW/m² radiant intensity is ranked as follows: aramid honeycomb composite panel > plywood + paper honeycomb > cross-linked polyolefin. This study provides a theoretical basis for the selection of interior materials for subsequent high-speed trains and the design of fire safety in carriages.

【Keywords】 High-speed trains; Cone Calorimeter; Fire Hazard; AHP

0 引言

近年来,我国高速列车持续快速发展并取得了令人瞩目的成绩,由于高速列车内部空间封闭、人员密集,一旦发生火灾,产生的热量和有毒烟气难以及时

排除,会对乘客的生命造成极大的威胁^[1]。内装材料作为车厢内部火灾的主要危险源,针对典型内装材料火灾危险性的研究对于预防列车火灾、控制火灾蔓延具有重要意义。目前许多专家学者对材料的火灾危险

作者简介: 王子豪 (2000-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1292841162@qq.com

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

收稿日期: 2025-01-25

性进行过研究。美国国家标准与技术研究院（NIST）采用锥形量热仪对列车用单一材料及组合材料的燃烧行为进行了测试，证明了锥形量热仪对列车用单一材料和组合材料的燃烧行为的测试结果能够反映真实火灾下的燃烧特性^[2]。Babrauskas 等人^[3]提出热释放速率是火灾危险性分析中最重要的指标。Duggan^[4]运用锥形量热仪对列车上大量非金属材料进行了试验，研究发现对车辆内部不同朝向的表面材料进行测试时应采用不同的辐射照度，朝向为上、侧、下时对应的辐射照度分别为 25kW/m²、35kW/m² 和 50kW/m²。付钧泽等^[5]选取火势增长指数、放热指数、发烟指数以及毒气生成速率指数对 PE 和 PP 的火灾危险性进行了综合分析。周远龙^[6]采用锥形量热仪和燃点测定仪对高铁列车内装材料的热释放速率、燃点、一氧化碳产量、烟雾产量等参数进行了试验。任细运^[7]对环氧树脂在不同外部条件下的燃烧参数进行了研究，并研究了不同阻燃特性的环氧树脂燃烧特性。目前针对料燃烧特性的研究主要集中在对不同外部干扰下内装材料的燃烧特性差异研究和对材料添加阻燃剂前后燃烧特性研究等方面，而针对高速列车内装材料的火灾危险性及量化结果研究很少涉及。因此，本文以国内某型号高速列车为例，对车内主要的内装材料进行统计，随后运用锥形量热仪对材料进行燃烧试验，分析了几种典型可燃材料的燃烧特性，最后基于试验结果运用层次分析法综合评估了不同材料的火灾危险性。

1 燃烧试验

1.1 试验材料

通过分析车厢内发生火灾后主要的燃烧部位，得到本次燃烧试验的部件主要有高速列车地板、顶板、间壁、侧墙、座椅、车门、车窗和电缆等。本文参照标准 EN 45545 对材料进行燃烧试验，该规范中指出，不同位置材料进行测试时的辐射照度不同，具体辐射照度如表 1 所示。

表 1 不同位置采用的辐射强度

Table 1 Radiation intensity used at different locations

朝向	辐射强度/(kW/m ²)
水平朝下表面	50
垂直表面	35
水平朝上表面	25

将地板和座椅部位典型材料标记为 A 组，采

用 25kW/m² 辐射强度进行测试。侧墙和门窗材料为 B 组，采用 35kW/m² 辐射强度进行测试。电缆、间壁和顶板材料为 C 组，采用 50kW/m² 辐射强度进行测试。具体分组情况和材料属性如表 2 所示。

表 2 高速列车典型部件测试材料

Table 2 Test materials for typical components of high-speed trains

部位名称	材料成分	尺寸	编号
地板	麻纤维	19.5mm	A-1
	涤纶	3mm	A-2
座椅	聚氨酯高回弹泡沫	120mm	A-3
侧墙	复合防寒材	5mm	B-1
窗胶条	硅橡胶	2mm	B-2
门胶条	三元乙丙	8mm	B-3
电缆	交联聚烯烃	7.3mm ²	C-1
间壁	胶合板+纸蜂窝	22mm	C-2
顶板	芳纶蜂窝复合板	18.4mm	C-3

1.2 试验装置及方法



图 1 锥形量热仪实物图

Fig.1 Conical calorimeter physical picture

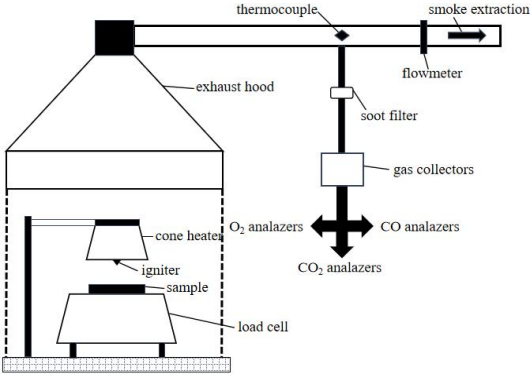


图 2 锥形量热仪原理图

Fig.2 Conical Calorimeter Schematic

为客观真实的评价火灾中材料的燃烧性能,二十世纪 80 年代初美国国家标准与技术研究院基于耗氧原理设计了锥形量热仪(Cone Calorimeter,简称 CONE),由于该仪器中材料样品的燃烧环境接近于真实燃烧环境,因此 CONE 的试验结果与大尺度燃烧试验结果之间相关性较好,经过不断改进,CONE 现已成为材料火灾燃烧特性研究的理想仪器。CONE 的实物及原理如图 1 和图 2 所示,其主要由锥形加热器、电子秤、排烟系统以及气体分析仪组成,其中锥形加热器作为引火源可以设置不同辐射照度,电子秤用于记录材料质量变化,排烟系统用于排除燃烧生成的烟气,气体分析仪可以对燃烧时烟气中的氧气、一氧化碳和二氧化碳等气体含量进行测量。

燃烧试验中样品的尺寸均为 10cm×10cm,厚度为车体的真实厚度。试验过程中除了样品顶面露置在空气中外,其余各面均用铝箔包覆。进行试验前,将样件放置在 23℃、相对湿度 50%环境下调节 48 小时至质量恒定(质量变化小于 0.1g)。为提高测试数据的准确性,进行燃烧试验时,每组试验进行 3 次,最终结果取三次测试的平均值。以顶板材料为例,三次重复试验结果如图 3 所示,三次对比试验的差异性较小,其中三条曲线的峰值最大差异约为 2.3%。

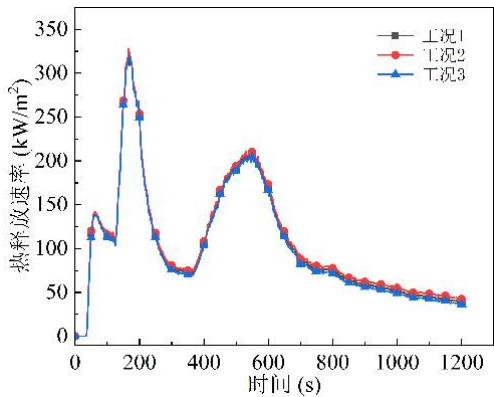


图 3 重复试验对比图

Fig.3 Comparison of repeated experiments

2 结果分析

A 组的材料主要集中在高速列车的座椅以下区域,采用 25kW/m²辐射强度对 A 组的材料进行试验,试验结果如表 3 所示。

表 3 辐射强度 25kW/m²下样品的燃烧特性

Table 3 Combustion characteristics of samples at a radiation intensity of 25kW/m²

样品	A-1	A-2	A-3
点火时间/s	56	103	105
热释放速率峰值时间/s	76	140	352
峰值热释放速率/(kW/m ²)	25.9	36.2	218.4
热释放总量/(MJ/m ²)	2.6	2.8	61
平均质量损失速率/(g/m ² ·s)	2.7	0.3	6.7
平均 CO 生成速率/(kg/kg)	0.091	0.082	0.133
平均比消光面积/(m ² /kg)	423.38	1793.5	417.4

B 组的材料主要集中在高速列车的侧墙,采用相对较高的 35kW/m²辐射强度对 B 组的材料进行试验,具体试验结果如表 4 所示。

表 4 辐射强度 35kW/m²下样品的燃烧特性

Table 4 Combustion characteristics of samples at a radiation intensity of 35kW/m²

样品	B-1	B-2	B-3
点火时间/s	95	39	59
热释放速率峰值时间/s	154	84	176
峰值热释放速率/(kW/m ²)	299.3	312.9	191.5
热释放总量/(MJ/m ²)	0.2	72	102.4
平均质量损失速率/(g/m ² ·s)	3.5	1.8	3
平均 CO 生成速率/(kg/kg)	0.264	0.291	0.087
平均比消光面积/(m ² /kg)	343.9	845.6	786307

C 组的材料主要集中在高速列车的顶部,采用 50kW/m²辐射强度对 C 组的材料进行试验,具体试验结果如表 5 所示。

表 5 辐射强度 50kW/m²下样品的燃烧特性

Table 5 Combustion characteristics of samples at a radiation intensity of 50kW/m²

样品	C-1	C-2	C-3
点火时间/s	42	31	26
热释放速率峰值时间/s	178	200	166
峰值热释放速率/(kW/m ²)	206	231.4	325.8
热释放总量/(MJ/m ²)	110.5	134.7	126.3
平均质量损失速率/(g/m ² ·s)	5.1	7.2	8.8
平均 CO 生成速率/(kg/kg)	0.088	0.033	0.031
平均比消光面积/(m ² /kg)	65.6	54.2	41.3

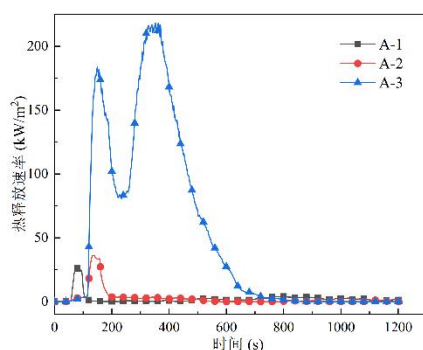
(1) 点燃时间

点燃时间是评价火灾早期火灾危险性的重要指标。由表 3 可以看出在 A 组中,样件 A-1 在 56s

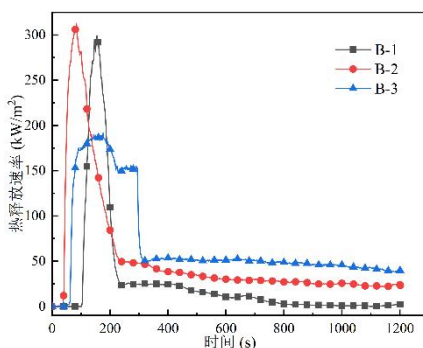
左右被引燃,样件 A-2 的点燃时间是 103s,样件 A-3 点燃时间是 105s,因此在 A 组中,A-1 更易被点燃,即火灾早期危险性更高。B 组中样件 B-2 的点燃时间较短,相对件 B-1 和 B-3 有较大的点燃危险。同理,C 组中 C-3 早期被点燃的危险性较大。

(2) 热释放速率

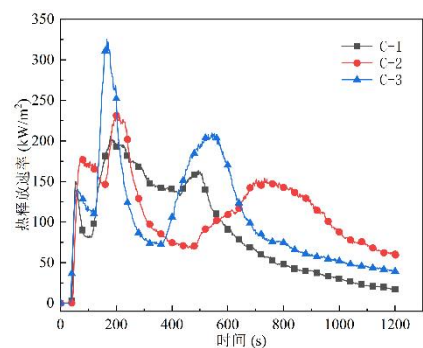
热释放速率的大小体现了火灾中能量释放的多少,是影响高速列车火灾危险性的重要因素^[8]。



(a) A 组



(b) B 组



(c) C 组

图4 热释放速率曲线

Fig.4 Heat release rate curve

图4给出了三组样品在不同辐射强度下热释放速率随时间变化的曲线。A组中A-3材料的热释

放速率的峰值较高,峰值热释放速率为218.4kW,出现时刻约为352s。A-1和A-2的热释放速率峰值出现时间虽然较早,但峰值远小于A-3。B组样品的峰值热释放速率出现的时间都较早,但样件B-3的峰值热释放速率较小,显示了其较好的防火性能。C组中C-3热释放速率峰值出现的时间较早且峰值最大,样件C-1和C-2的热释放速率峰值出现稍晚且热释放速率峰值也较低。

(3) 热释放总量

热释放总量是指在预先设置的热辐射强度下,材料从被点燃到完全熄灭时所释放出的热量总和。一般情况下其值越大,火灾的热危害性越高。从试验中可以得出三组中样件A-3、B-3、C-2的热释放总量是同组最大的,分别是61MJ/m²、102.4MJ/m²、134.7MJ/m²,在同组中火灾的热危害性最大。

(4) 质量损失率

质量损失速率是材料的热分解燃烧速率。在真实的情况下,质量损失率越大的物质其火焰的传播速度也越快。在火灾评估中本文采用质量损失10%到90%区间的平均质量损失率,样品A-3、B-1、C-3与同组材料相比具有较大的质量损失率,在火灾场合火焰传播快,潜在火灾危害更高。

(5) 比消光面积

比消光面积表示单位质量可燃物的分解、挥发及产生烟的能力,反映燃烧过程中产烟量的多少。烟雾内部丰富的颗粒物质会导致高度的消光作用,使车厢内的能见度大大下降,从而影响车厢内人员的疏散^[9]。样品A-2、B-3和C组C-2的样品平均比消光面积高于同组其他材料,说明了这些材料燃烧会产生更多的烟气,在发生火灾后对人员的疏散影响更大。

(6) CO释放速率

相关文献表明,火灾中70%~75%的人员伤亡是由于吸入了大量烟气及毒性气体导致^[10],其中CO是所有碳氢化合物燃烧过程中最常见的毒性气体,且高铁列车部件材料很少包含氯元素和氮元素,因此CO通常被认为是最重要甚至唯一具有毒性研究意义的气体^[11]。从试验结果可以看出样件A-3、B-2、C-1平均CO生成率为0.113kg/kg、0.291kg/kg、0.088kg/kg,在同组中CO产量较高,火灾发生时对人员的毒害作用更高。

3 火灾危险性评价

点燃时间、热释放速率、热释放总量、CO 产率、质量损失率、比消光面积等都是评价材料火灾危险性的重要参数,但各参数只反映材料火灾危险性的某一方面,而列车的火灾危险性是上述多种因素共同作用下的结果,因此在进行车辆火灾危险性分析时需要综合多方面的因素。层次分析法(AHP)是美国运筹学家于 20 世纪 70 年代提出的一种定性与定量相结合的系统分析方法,该方法把数学处理、人员经验以及主观判断相结合,能够有效地分析目标体系层次间的非序列关系,有效地确定各因素的重要性,进而对多因素系统进行综合评价^[12]。

3.1 评价指标

现有文献对火灾危险性的评价指标进行了相关研究, Petrella^[13]提出综合 *PHRR/TTI* 和 *THE* 两个指标评价火灾热危险性,但忽略了烟气危险性。Hirschler^[14]提出按热释放速率的峰值、点燃时间(对数值)和发烟指数(比消光面积的对数值)将材料分为 5 个火灾危险递增的等级,但并没有考虑烟气毒性,舒中俊^[15]综合上述研究成果,提出了将火势增长指数、放热指数、发烟指数和毒性气体生成速率指数作为火灾危险性的评价指标,但忽略了点燃时间参数的影响。因此,在前人研究基础上,本文将材料火灾危险性分为材料燃烧的热危险性和材料燃烧烟气危险性两个方面,最终确定较为全面的五个指标评价车辆火灾危险性。

(1) 热危险性

点燃指数(*TI*): 对材料点燃时间(*TTI*)处理后的对数。点燃指数越大,材料越不易燃烧,造成的危害越小。表达式为:

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

火势增长指数(*FGI*): 材料热释放速率的峰值(*PHRR*)与峰值出现的时间的比值。材料的火势增长指数能够反映材料火灾增长速度的快慢,火灾增长指数越大,火灾危险越大。表达式为:

$$FGI = PHRR/T \quad (2)$$

放热指数(*THRI*): 试验中前 40min 内总热释放量(*HRR*_{40min})。热释放指数越大,材料单位时间内释放的热量越大,火灾危险越大。表达式为:

$$THRI = \log(HRR_{40min}) \quad (3)$$

(2) 烟危险性

发烟指数(*TSPI*_{40min}): 试验前 40min 内发烟量总和(比消光面积 *SEA* 与质量损失率 *MLR* 的乘积)的对数值。发烟指数越大,在规定时间内材料燃烧的产烟量越高。表达式为:

$$TSPI_{40min} = \log(SEA \times MLR) \quad (4)$$

毒气产率指数(*ToxPI*_{40min}): 将试验前 40min 内 CO 的生成速率(*COY*)与质量损失速率(*MLR*)的乘积作为毒性气体生成速率指数。表达式为:

$$ToxPI_{40min} = \log(COY \times MLR \times 10^3) \quad (5)$$

对锥形量热仪的试验数据按照上述公式进行处理计算,最终得到三组样品的五个评价指标如表 6~8 所示。

表 6 A 组的材料评价指标数值

Table 6 Values of material evaluation indicators for group A

样品	<i>THRI</i>	<i>FGI</i>	<i>TI</i>	<i>TSPI</i>	<i>ToxPI</i>
A-1	0.41	0.34	-1.75	3.06	2.39
A-2	0.45	0.26	-2.01	2.73	1.39
A-3	1.79	0.62	-2.02	3.45	2.95

表 7 B 组的材料评价指标数值

Table 7 Values of material evaluation indicators for group B

样品	<i>THRI</i>	<i>FGI</i>	<i>TI</i>	<i>TSPI</i>	<i>ToxPI</i>
B-1	-0.70	1.94	-1.97	3.08	2.97
B-2	1.86	3.73	-1.59	3.18	2.72
B-3	2.01	1.09	-1.77	6.37	2.42

表 8 C 组的材料评价指标数值

Table 8 Values of material evaluation indicators for group C

样品	<i>THRI</i>	<i>FGI</i>	<i>TI</i>	<i>TSPI</i>	<i>ToxPI</i>
C-1	2.04	4.90	-1.62	2.52	2.65
C-2	2.13	7.46	-1.49	2.59	2.38
C-3	2.10	12.53	-1.41	2.56	2.44

3.2 计算分析

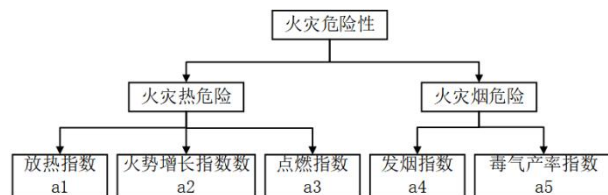


图 5 材料火灾危险性评价模型

Fig.5 Material fire hazard assessment model

根据层次分析方法以及所选取的火灾危险性

评价指标，建立高速列车材料的火灾危险性评价模型如图 5 所示。

在实际火灾场景中，大量研究表明^[16-18]，烟气对人员造成的危害大于热量造成的危害，在烟气危害中，毒气产率指数的危害性大于发烟指数；在热危害中，点燃指数的危害大于火势增长指数，火势增长指数大于放热指数的危险性。因此，参考前人对火灾危险性评价指标的相关研究，按照 1-9 标度法对各指标之间的相对重要度进行描述，进而构建指标权重判断矩阵 A 。矩阵中各个数字的具体含义如表 9 所示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/4 & 1/5 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/4 \\ 3 & 2 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 1/2 \\ 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

表 9 指标重要性标度及含义

Table 9 Indicator importance scale and meaning	
标度	含义
1	两个元素相比，具有同样重要性
3	两个元素相比，前者比后者稍重要
5	两个元素相比，前者比后者明显重要
7	两个元素相比，前者比后者强烈重要
9	两个元素相比，前者比后者极端重要
2、4、6、8	上述相邻判断的中间值

采用方根法计算矩阵的特征向量 w ：

$$w = w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

计算得到 $w=(0.062,0.097,0.160,0.263,0.418)^T$ ，在计算单准则下的权重向量时，还必须进行一致性检验，检验依据为：

首先计算矩阵 A 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ ：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

根据最大特征值计算一致性指标 CI ：

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (8)$$

最后计算随机一致性指标 CR ：

$$CR = CI / RI \quad (9)$$

式中： n 为矩阵阶数； RI 为随机平均一致性指标； RI 的取值见表 10； CR 的值越大则表明矩阵 A

的一致性越不佳，一般认为当 $CR<0.1$ 时，认为所构建的矩阵已经满足一致性要求，否则需要对构建的矩阵进行调整，重新进行上述计算步骤，直至满足上述要求。

表 10 平均随机一致性指标 RI

Table 10 Average random consistency indicator RI						
矩阵的阶数	1	2	3	4	5	6
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26

计算得到最大特征值 $\lambda_{\max}=5.068$ ， $CI=(5.068-5)/4=0.017$ ， $CR=0.017/1.12=0.015<0.1$ ，计算结果满足一致性校验的要求，所求特征向量 w 可作为权重向量。

结合表 6 中给出的具体试验数据，进行材料火灾危险性的综合评价。每个评价指标值与其对应的对总目标的权重乘积相加，就可得到每种材料的火灾危险性数值 R ，分值越高说明火灾危险性越高。

$$R = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (10)$$

表 11 材料火灾危险性数值

Table 11 Material fire hazard values	
样品	R
A-1	1.58
A-2	1.03
A-3	1.99
B-1	1.88
B-2	2.19
B-3	2.63
C-1	2.11
C-2	2.29
C-3	2.81

由计算结果可知，在 25kW/m^2 辐射强度下材料火灾危险性排序为聚氨酯高回弹泡沫>麻纤维>涤纶，在 35kW/m^2 辐射强度下材料火灾危险性排序为：三元乙丙>硅橡胶>复合防寒材，在 50kW/m^2 辐射强度下材料火灾危险性排序为：芳纶蜂窝复合板>胶合板+纸蜂窝>交联聚烯烃。

4 结论

通过对高速列车典型部位非金属材料进行燃烧试验，得到了高速列车不同部件材料的燃烧参数，随后选取火灾危险性分析指标并运用层次分析法构建火灾危险性分析模型，最后将材料燃烧参数

带入分析模型中对材料的火灾危险性进行了综合评价, 最终可以得出以下结论:

(1) 基于层次分析法计算指标权重并结合试验建立多指标体系的评价方法能够对典型高速列车材料的火灾危险性进行相对有效的综合评估。

(2) 通过理论分析和试验测试得到的 *TI*、*FGI*、*THRI*、*TSPI* 和 *ToxPI* 五个指标能够很好地量化高速列车材料的火灾危险性。

(3) 通过计算得到高速列车典型位置非金属材料火灾危险性: 在 25kW/m^2 辐射强度下材料火灾危险性排序为聚氨酯高回弹泡沫>麻纤维>涤纶, 在 35kW/m^2 辐射强度下材料火灾危险性排序为: 三元乙丙>硅橡胶>复合防寒材, 在 50kW/m^2 辐射强度下材料火灾危险性排序为: 芳纶蜂窝复合板>胶合板+纸蜂窝>交联聚烯烃。

参考文献:

- [1] 苟琦林, 毕海权, 李盎. 基于 FDS 的行李架对高速列车客室火灾影响的研究[J]. 制冷与空调, 2019, 33(2): 103-107.
- [2] Schartel B, Hull TR. Development of fire - retarded materials—interpretation of cone calorimeter data[J]. Fire and Materials: An International Journal, 2007, 31(5): 327-354.
- [3] Babrauskas V, Peacock RD. Heat release rate: the single most important variable in fire hazard[J]. Fire Safety Journal, 1992, 18(3): 255-272.
- [4] Duggan Gary J. Usage of ISO 5660 Data in UK Railway Standards and Fire Safety Cases[C]. Rapra Technology. Fire hazards, testing, materials and products. Shawbury: Rapra Technology Limited, 1997: 3.
- [5] 付钧泽. PE 和 PP 阻燃塑料的热解规律及火灾危险性研究[D]. 北京: 中国人民公安大学, 2022.
- [6] 周远龙. 高速列车火灾热释放速率研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [7] 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.
- [8] 刘方吉, 毕海权, 高慧翔, 等. 运行速度对高速列车火灾热释放速率的影响[J]. 制冷与空调, 2021, 35(5): 690-694.
- [9] Börger K, Belt A, Schultze T, et al. Remote sensing of the light-obscuring smoke properties in real-scale fires using a photometric measurement method[J]. Fire Technology, 2024, 60(1), 19-45.
- [10] Alarifi A, Phylaktou H N, Andrews G E. What Kills People in a Fire? Heat or Smoke?[C]. North Pacific Fisheries Commission: 9th SSC Proceedings. Birmingham: The University of Leeds, 2016.
- [11] Prockop LD, Chichkova RI. Carbon monoxide intoxication: an updated review[J]. Journal of the neurological sciences, 2007, 262(1-2): 122-130.
- [12] Li L J, Li F, Zhang Z J. Fire risk assessment of fire retardant polyurethane thermal insulation materials for exterior walls of buildings based on analytical hierarchy process[J]. Advanced Materials Research, 2013, 785: 191-198.
- [13] Petrella RV. The assessment of full-scale fire hazards from cone calorimeter data[J]. Journal of fire sciences, 1994, 12(1): 14-43.
- [14] Hirschler M M. Poly (vinyl chloride) and its fire properties[J]. Fire and Materials, 2017, 41(8): 993-1006.
- [15] 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.
- [16] 任小男. 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物及其纳米复合材料的热解的蔓延特性及毒性研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2016.
- [17] 付强. 典型电缆燃烧性能研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2012.
- [18] 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.