

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.03.022

轨道车辆用高分子保温材料燃烧行为研究与火灾危险性评价

赵震,于全蕾,李旭光,倪延强,黄国斌

(中车青岛四方车辆研究所有限公司,山东青岛 266031)

摘要:选取三种典型的轨道车辆用高分子保温材料,借助NBS烟密度箱、傅里叶变换红外烟气毒性测试系统、锥形量热仪和火焰蔓延测试仪,分别从产烟、气体毒性、热释放以及火焰蔓延4个方面对材料的燃烧行为进行了分析研究,测得材料的烟密度最大值、毒性指数最大值、最大平均热释放速率、放热总量、火焰蔓延最远距离等燃烧特征参数,运用层次分析法建立了适用于轨道车辆高分子保温材料的火灾危险性评价模型,解决了单方法评价不充分的难点,填补了轨道交通高分子材料火灾危险性评价的空白。结果表明,橡塑海绵的火灾危险性最高,聚对苯二甲酸乙二醇酯泡沫次之,三聚氰胺泡沫的火灾危险性最低。

关键词:轨道交通车辆;高分子保温材料;燃烧行为;层次分析法;火灾危险性

中图分类号: TQ328.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)03-0125-05

Fire Behavior and Fire Hazard Evaluation of Thermal Insulation Polymer Materials for Rail Transit Vehicles

Zhao Zhen, Yu Quanlei, Li Xuguang, Ni Yanqiang, Huang Guobin

(CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266031, China)

Abstract : Three kinds of typical thermal insulation polymer materials for rail transit vehicles were selected, the fire behavior of the materials were analyzed and studied from four aspects of smoke generation, gas toxicity, heat release and flame spread with the help of NBS smoke density box, Fourier infrared toxicity test system, cone calorimeter and flame spread tester. Meanwhile, the fire reaction characteristic parameters such as maximum smoke density ($D_{s,max}$) the maximum of specific optical density, the conventional index of toxicity, the maximum average rate of heat emission, total heat release and the farthest distance of flame spread, etc were measured. The analytic hierarchy process (AHP) was used to establish a fire hazard evaluation model suitable for thermal insulation polymer materials for rail vehicles to overcome the deficiency of single test method evaluation and fill the gap in fire hazard evaluation of rail transit polymer materials. The results show that the rubber-plastic sponge has the highest fire hazard, followed by poly(ethylene terephthalate) foam and melamine resin foam has the lowest fire hazard.

Keywords : rail transit vehicles ; thermal insulation polymer materials ; fire behavior ; analytic hierarchy process ; fire hazard

轨道车辆无论是在静止还是运行过程中,热传递每时每刻都在以热传导、热辐射和热对流这3种传递方式同时进行^[1],为了避免由于车辆热传递给乘客带来的不适,降低车辆的能量损耗,提高能量利用率,必须在车体适当的位置铺设隔热保温材料。保温材料包括无机保温材料和高分子保温材料,高分子保温材料有着无机材料无可替代的物理性能,

不仅能够起到节能减排保温隔热的作用,同时也可以减少配重使列车轻量化,提高车辆运行速度。然而在阻燃性能方面,无机材料大多可归为不可燃材料,火灾危险性较低,而高分子保温材料大多属于易燃物,在燃烧时会释放大量的热以及烟雾毒气,其作为一种在车内大面积连续铺设的火灾固定载荷,一旦发生火灾,火势容易迅速蔓延至整个车厢,对人员

通信作者: 赵震,硕士,主要研究方向为轨道交通用非金属材料火灾安全性

收稿日期: 2022-01-13

引用格式: 赵震,于全蕾,李旭光,等. 轨道车辆用高分子保温材料燃烧行为研究与火灾危险性评价[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(3):125-129.

Zhao Zhen, Yu Quanlei, Li Xuguang, et al. Fire behavior and fire hazard evaluation of thermal insulation polymer materials for rail transit vehicles[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):125-129.

生命和财产安全产生严重威胁^[2],是火灾发生的重大危险源,因此轨道车辆用高分子保温材料的燃烧行为与火灾危险性值得重点关注。

目前高分子保温材料燃烧性能的研究大多集中在建材领域,对聚氨酯泡沫以及聚苯乙烯泡沫等材料的研究较多^[3-7],其研究手段也大都基于锥形量热法^[8-9],然而材料的燃烧行为是多因素综合影响的过程,仅采用单个测试方法有时会很片面,不能贴近材料真实的燃烧情况,应采用多种测试表征与综合考量相结合的方式对材料的燃烧行为进行全面的评价。层次分析法(AHP)是定性分析与定量分析相结合,多目标、多准则的决策方法^[10],可用于聚合物材料的火灾危险评价。舒中俊、吴芸等运用AHP对铺地材料、保温材料、碳纤维复合材料等高分子材料的火灾风险进行了评估排序,在材料的火灾危险评估方面取得了进展^[11-15],然而对于轨道车辆用高分子材料的火灾危险性综合评估仍处于空白,因此笔者选取了3种典型的轨道车辆用高分子保温材料,分别为橡塑海绵(RPS)、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)结构泡沫和三聚氰胺泡沫(MRF)作为研究对象,依据目前国内外通用的轨道车辆非金属材料防火检测标准EN45545-2:2020《铁路应用—铁路车辆防火—第二部分:材料和部件的防火性能要求》^[16],采用4种不同的测试方法分别从热释放、烟密度、毒性气体以及火焰蔓延多个方面对3种高分子保温材料的燃烧行为进行研究,并基于AHP法建立高分子保温材料火灾危险性评价体系,对其火灾危险性进行综合评价,从而为轨道车辆用高分子保温材料的选材应用以及该类材料未来的发展方向提供合理的建议。

1 实验部分

1.1 原材料

MRF:由三聚氰胺甲醛树脂微波发泡制成的三维网状软质热固性泡沫塑料,常熟市军友塑料制品有限公司;

RPS:以丁氰橡胶和聚氯乙烯为主要原料发泡制成的软质弹性闭孔保温节能材料,常熟市军友塑料制品有限公司;

PET结构泡沫:江苏越科新材料有限公司。

1.2 仪器

NBS烟密度试验箱:FTT0064型,英国FTT公司;

锥形量热仪:FTT0242型,英国FTT公司;

傅里叶变换红外(FTIR)烟气毒性测试系统:

ACF5000型,加拿大ABB公司;

火焰蔓延测试仪:IMO型,昆山莫帝斯燃烧技术仪器有限公司。

1.3 测试方法

(1) 烟密度。

按照ISO 5659-2:2017《塑料烟生成第2部分单室法测定烟密度试验方法》(50 kW,无引燃,10 min)测试,样品尺寸为75 mm×75 mm×10 mm。

(2) 毒性指数。

按照EN17084:2018《铁路应用—铁路车辆防火—材料和部件的毒性试验》(50 kW,无引燃,10 min)测试,样品尺寸同烟密度测试。

(3) 热释放速率。

按照ISO 5660-1:2015《对火反应试验热释放、起烟和质量损失率第1部分:热释放速率(锥形量热仪法)和产烟率(动态测量)》(50 kW,10 min)测试,样品尺寸为100 mm×100 mm×10 mm。

(4) 火焰蔓延。

按照ISO 5658-2:2006/Amd.1:2011《对火反应试验-火焰传播-第2部分:火焰在建筑物和运输工具垂直表面的横向蔓延》(20 min)测试,样品尺寸为855 mm×100 mm×10 mm。

2 结果与讨论

2.1 热释放速率

图1为3种材料的热释放速率随时间变化曲线。可以看出MRF最快达到热释放速率峰值,其次是PET泡沫,RPS达到峰值所用时间最长,MRF和RPS的峰值相差不大分别为30 kW/m²与23 kW/m²,而PET泡沫的峰值却可以达到269 kW/m²,高于前两者10倍左右,说明燃烧时PET泡沫有着巨大的放热危险,MRF与RPS的放热危险较低。

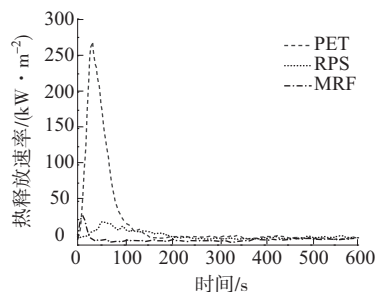


图1 高分子保温材料热释放速率与时间的关系

2.2 烟密度

图2为3种保温材料的烟密度随时间变化曲线。可以看出,MRF的发烟程度较低首先在50 s左右达到第一个烟密度峰值为49,随后在300 s后

烟密度重新开始缓慢上升在 600 s 内达最大值为 72。而 RPS 产烟速率很快,在 55 s 就达到了烟密度峰值为 211, PET 泡沫产烟稍慢但烟密度峰值是三者之中最大的为 258,从产烟特性方面判断 RPS 与 PET 泡沫二者均具有很大潜在火灾安全隐患。

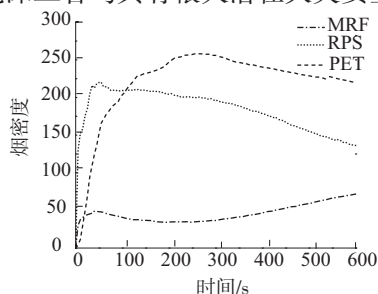


图2 高分子保温材料烟密度与时间的关系

2.3 毒性指数

采用 FTIR 对 NBS 烟箱中燃烧产物的有毒气体和蒸汽进行取样分析,检测 CO, CO₂, HCN, SO₂, 氮氧化物 (NOX), HF, HCl 以及 HBr 8 种毒性气体的含量,根据定义的火灾模型以及气体的实测结果与基准浓度之间的比例共同计算得出毒性指数 (CIT_G),见公式 (1)。表 1 示出 3 种材料燃烧时第 4 min 与 8 min 的 CIT_G,从表 1 可看出,无论是 4 min 还是 8 min, RPS 的毒性指数均为最高,具有最大的火灾毒性危险, PET 泡沫次之, MRF 毒性指数最小,且三者 4 min, 8 min 的毒性差别不大,说明在产烟过程中毒性气体成分一直在持续释放。

$$CIT_G = 0.0805 \times \sum_{i=1}^{i=8} \frac{c_i}{C_i} \quad (1)$$

式中: c_i ——烟室内第 i 种气体的浓度实测值, mg/m³;

C_i ——第 i 种气体的基准浓度, mg/m³。

表1 毒性指数实验结果

材 料	燃烧时间 /min	
	4	8
PET	0.039	0.045
MRF	0.020	0.016
RPS	0.084	0.10

2.4 火焰蔓延

在外加热辐射与引燃条件作用下,研究火焰在材料垂直表面的横向蔓延行为,以评估列车发生火灾时其火焰传播对火势发展的影响,结果见表 2。其中 MRF 表现出最优异的阻燃性能,热辐射与点燃条件共同作用下未能被引燃,没有发生火焰传播。而 RPS 与 PET 泡沫则被迅速引燃,并可在材料表面持续燃烧 3 min 以上,其火焰传播最远距离 (D)

分别为 350 mm 与 400 mm,假设一旦发生火灾,这两种材料会迅速燃烧,扩大火焰蔓延范围并加剧火势的发展,存在极大的火灾风险。

表2 火焰蔓延实验结果

材料	D /mm	CFE/(kw · m ⁻²)	TTI/s	TTE/s
PET	400	18.20	24	193
MRF	0	50.49	0	0
RPS	350	23.88	2	190

注: CFE 为熄灭时的临界辐射通量; TTI 为引燃时间; TTE 为熄灭时间。

2.5 火灾危险性综合评价

虽然采取了 4 种不同的测试方法对材料的燃烧特征分别进行了研究,但每种测试方法大多只能反映出材料的某一种火灾特性,燃烧性能之间的相互对比常常出现依据不同参数比较结果不一致的情况,而在实际火灾中火势的发展是动态的、多参数相互影响的过程,所以对材料的火灾危险评价也应该是多角度多参数相结合,因此笔者通过引入 AHP,建立层次结构模型来对高分子保温材料的火灾危险进行全面综合的评价。

AHP 由美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代提出^[17],它将与决策相关的元素分解成目标、准则、指标、方案等层次,通过数字处理与人的经验和主观判断共同作用,是一种定性定量相结合的多准则、多目标的火灾风险评估方法,主要包括建立层次结构模型、构造判断矩阵、计算权重向量及一致性检验等 4 个步骤。

(1) 层次结构模型。

首先将高分子保温材料的火灾危险性作为目标层,其火灾危险性主要体现在材料的烟雾危险、放热危险以及火焰蔓延危险三方面,其可作为基准层。烟雾危险包含的烟密度与气体毒性指数可作为烟雾危险的指标层,同理热释放速率、放热总量与火焰蔓延性能可作为放热危险与火焰蔓延危险的指标层,因此建立层次结构模型,其模型图如图 3 所示。

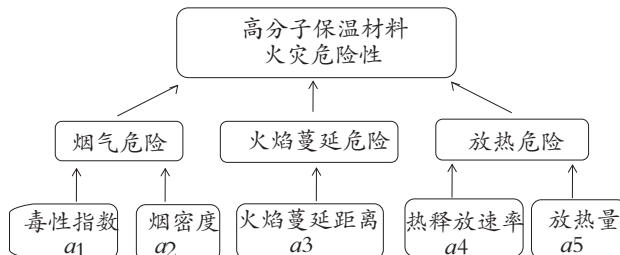


图3 高分子保温材料火灾危险性层次结构模型

以测得的烟密度最大值 ($D_{s,max}$) 和 CIT_G(4 min 或 8 min 中最高 CIT_G 值) 代表材料的烟气危险, D

代表其火焰蔓延风险,燃烧时最大平均热释放速率(MARHE)和总放热量(THR)代表其放热危险,详细实验结果见表3。

表3 高分子保温材料实验数据

材料	$D_{s,max}$	CIT_G	D/mm	MARHE/ (kW·m ⁻²)	THR/ (MJ·m ⁻²)
PET	258	0.045	400	162.1	13.1
MRF	72	0.020	0	22.2	0.4
RPS	211	0.1	350	11.8	2.1

(2) 构造判断矩阵。

基于轨道列车封闭结构和运行环境的特点并结合典型的火灾事故危险后果分析^[18],一般认为烟气毒性危险性>生烟危险性>火蔓延危险性>燃烧危险性。根据上述几个评价方面,按照9标度法两两比较,由此可建立高分子保温材料火灾危险评价的判断矩阵 A 。判断矩阵的标度及含义见表4。按照表4的标度,将火灾危险评价因素重要性两两对比,确定相互之间的相对重要性标度见表5。

表4 判断矩阵的标度及含义

标度(a_{ij})	含义
1	i 比 j 因素相同重要
3	i 比 j 因素稍微重要
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值
倒数 $1/a_{ij}$	因素 i 与 j 比较判断 a_{ij} ,则因素 j 与 i 比较判断 $a_{ji}=1/a_{ij}$, $a_{ii}=1$

表5 判断矩阵的相对标度值

标度	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
a_1	1	2	3	5	7
a_2	1/2	1	2	4	6
a_3	1/3	1/2	1	2	3
a_4	1/5	1/4	1/2	1	2
a_5	1/7	1/6	1/3	1/2	1

由此可得高分子保温材料火灾危险评价的判断矩阵 A 如式(1):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1 & 2 & 4 & 6 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/5 & 1/4 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/6 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(3) 计算特征向量。

各行元素几何平均值为: $b_j = (\prod_{i=1}^n a_{ij})^{1/n}$

将 $b_j(j=1,2,\dots,n)$ 归一化,即求得最大特征值对应的特征向量 W_j : $W_j = \frac{b_j}{\sum_{i=1}^n b_k} (j=1,2,\dots,n)$

带入 $n=5$ 数据进行计算得:

$$b=(2.914, 1.888, 1, 0.549, 0.331)^T;$$

$$W=(0.436, 0.283, 0.150, 0.082, 0.050)^T;$$

$$AW=(2.212, 1.429, 0.751, 0.415, 0.25)^T;$$

其对应的判断矩阵最大特征根如式(2):

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} = 5.051 \quad (2)$$

(4) 判断矩阵一致性检验。

判断矩阵一致性检验依据如下, CR 为矩阵一致性比率,当 $CR < 0.1$ 时,判定矩阵 A 具有满意的一致性。 CI 为一致性检验指标如式(3)。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.013 \quad (3)$$

$n=5$ 时查表得随机一致性指标 $RI=1.12$,1000次重复进行随机判断矩阵特征值的计算后取算术平均值得到的1~9阶 RI 值。

排序一致性检验,如式(4)。

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0.012 < 0.1 \quad (4)$$

因此判断矩阵具有较好的一致性,可使用其特征向量作为权重向量,即可得到5个火灾危险性评价参数的权重值见表6。

表6 火灾危险性评价因素权重值

项目	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
W_j	0.436	0.283	0.150	0.082	0.050

首先将表3实验数据归一化处理,每个评价指标归一化的实验值与其对应的总目标权重乘积相加,就可以得到每种材料的火灾危险综合指数,分值越高说明火灾危险性越高,每种材料的火灾危险综合指数(THFI)见表7。

表7 高分子保温材料火灾危险综合指数

材料	THFI
PET	0.44
MRF	0.10
RPS	0.46

3种材料的火灾危险综合指数分别为:PET泡沫为0.44,MRF为0.10,RPS为0.46,可以看出MRF的火灾危险性最小,PET泡沫火灾危险性略低于RPS,RPS的火灾危险性最大。

4 结论

(1) PET泡沫、RPS和MRF的燃烧特征参数各有高低,各项燃烧特征参数相互比较不能准确判断材料火灾危险性大小。

(2) 基于层次分析法建立了高分子保温材料火

灾危险性评价体系, PET 泡沫、RPS 和 MRF 的火灾危险综合指数分别为: 0.44, 0.46, 0.10, 3 种材料火灾危险性由高到低为: RPS > PET 泡沫 > MRF。

参考文献

- [1] 韩晓明. 城市轨道交通车辆车体隔热材料及其应用[J]. 装备制造, 2013(1):57-64.
Han Xiaoming. Application of heat insulator on urban rail transit vehicles[J]. The Magazine on Equipment Machinery, 2013(1):57-64.
- [2] 孟凡帅, 刘小霞, 张蒙蒙. 高速动车组客室内装的防火性能研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(3):404-406.
Meng Fanshuai, Liu Xiaoxia, Zhang Mengmeng. Research on fireproof performance of high-speed EMU passenger interiors[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(3):404-406.
- [3] 吴楠. 常用有机保温材料燃烧性能研究[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(4):18-20.
Wu Di. Study on combustion performance of common organic thermal insulation material[J]. New Building Materials, 2014, 41(4):18-20.
- [4] 王红丽, 刘良旭. 保温高分子材料的研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2018, 35(1):98-102.
Wang Hongli, Liu Liangxu. Research progress of thermal insulation polymer materials[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2018, 35(1):98-102.
- [5] 宋京. 建筑外墙外保温隔热材料防火性能分析[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(9):125-126.
Song Jing. Analysis of external thermal insulation materials and fireproof performance of building exterior walls[J]. Building Technology Development, 2021, 48(9):125-126.
- [6] 张苗, 刘幸娜, 陈阵, 等. 辐射强度对建筑典型外保温材料燃烧性能影响的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(12):42-47.
Zhang Miao, Liu Xingna, Chen Zhen, et al. Experimental study on effects of radiation intensity on combustion properties of typical external insulation materials[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(12):42-47.
- [7] 卢明超, 李博, 李涛. 5 种典型有机保温材料的耐火性能分析及研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(7):244-247.
Lu Mingchao, Li Bo, Li Tao. Analysis and research on fire resistance of five typical organic insulation materials[J]. New Chemical Materials, 2019, 47(7):244-247.
- [8] 周巍, 姚斌. 基于锥形量热仪的几种防火布燃烧性能研究[J]. 火灾科学, 2018, 27(1):23-29.
Zhou Wei, Yao Bin. Research on combustion performance of several kinds of fireproof fabric using cone calorimeter[J]. Fire Safety Science, 2018, 27(1):23-29.
- [9] 李胜, 张广鑫, 王文博, 等. 基于锥形量热仪法对环氧树脂燃烧性能的研究[J]. 化学与粘合, 2019, 41(6):457-459.
Li Sheng, Zhang Guangxin, Wang Wenbo, et al. Research on the combustion performance of epoxy resin based on the cone calorimeter[J]. Chemistry and Adhesion, 2019, 41(6):457-459.
- [10] 许树柏. 实用决策方法: 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
Xu Shubai. Practical decision-making method: the principle of analytic hierarchy process[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1998.
- [11] 吴芸. 基于 AHP 的有机保温材料火灾危险性综合评价[J]. 消防技术与产品信息, 2013(8):103-106.
Wu Yun. Fire hazard assessment on organic thermal insulation material with AHP analysis[J]. Fire Technique and Products Information, 2013(8):103-106.
- [12] 冯俊峰, 蔡海宇, 舒中俊. 关于铺地材料火灾危险性评价的研究[J]. 消防技术与产品信息, 2011(12):36-39.
Feng Junfeng, Cai Haiyu, Shu Zhongjun. Study on fire hazard of flooring materials[J]. Fire Technique and Products Information, 2011(12):36-39.
- [13] 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.
Shu Zhongjun, Xu Xiaonan, Yang Shousheng, et al. Fire hazard assessment on polymer material based on the cone calorimeter[J]. Polymer Bulletin, 2006(5):37-44.
- [14] 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 Luchao, Wang Zhi, Xu Yanying, 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.
- [15] 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 Chen, Zong Ruowen, Chen Haiyan, et al. Fire hazard assessment on thermal polyurethane and its nanocomposites with AHP analysis[J]. Fire Safety Science, 2019, 28(3):177-184.
- [16] 于全蕾. 国内外轨道车辆防火标准对比分析[J]. 铁道车辆, 2017, 55(1):24-29.
Yu Quanlei. Comparison and analysis of fire protection standards for rail vehicles in china and abroad[J]. Rolling Stock, 2017, 55(1):24-29.
- [17] 叶义成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
Ye Yicheng, Ke Lihua, Huang Deyu. System comprehensive evaluation technology and application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [18] John R, Hall J. Fire Technology[J]. Fourth Quarter, 1996, 32(4):351-371.