

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.12.020

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

倪延强, 于全蕾, 赵震, 李旭光, 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:为研究4种不同典型结构的轨道车辆车体用碳纤维复合材料的火灾危险性,引入多种测试方法,依据其在傅里叶变换红外烟气毒性测试系统、NBS烟密度箱、火焰蔓延测试仪和锥形量热仪中的试验数据,运用层次分析法,建立了以毒性指数作为毒性危险指标、烟密度峰值作为烟气危险指标、火焰蔓延最远距离作为火焰蔓延危险指标以及平均热释放速率峰值和热释放总量作为放热危险指标的火灾危险性综合评价模型,并依据该模型对碳纤维复合材料进行了火灾危险性综合评价。结果表明,多腔结构碳纤维复合材料的火灾危险性综合指数为0.342,聚甲基丙烯酸酯(PMI)泡沫夹层结构碳纤维复合材料的火灾危险性综合指数为0.312,聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)泡沫夹层结构碳纤维复合材料的火灾危险性综合指数为0.250,层压板结构碳纤维复合材料的火灾危险性综合指数为0.169,火灾危险性排序为:多腔结构碳纤维复合材料>PMI泡沫夹层结构碳纤维复合材料>PET泡沫夹层结构碳纤维复合材料>层压板结构碳纤维复合材料,该评价方法弥补了单项指标评价的不足,可较为全面、合理地反映轨道车辆复合材料的火灾危险性。

关键词: 轨道车辆;碳纤维复合材料;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(2023)12-0125-06

Fire Hazard Assessment of Carbon Fiber Composite Materials for Rail Vehicle Body Based on Analytic Hierarchy Process

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

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

Abstract: In order to study the fire hazard of carbon fiber composite materials for the body of rail vehicles with four different typical structures, a variety of test methods were introduced and experimental data from fourier transform infrared spectrometer smoke toxicity testing system, NBS smoke density box, flame spread tester, and cone calorimeter were selected. By using analytic hierarchy process, a comprehensive evaluation model for fire hazard was established, with toxicity index as the toxicity hazard indicator, smoke density peak as the smoke hazard indicator, the farthest flame spread distance as the flame spread hazard indicator, and the peak average heat release rate and total heat release amount as the heat release hazard indicator. According to this model, the fire hazard of carbon fiber composites were evaluated, the results show that the fire hazard index of multi-cavity structure carbon fiber composite is 0.342, that of PMI foam sandwich structure carbon fiber composite is 0.312, that of PET foam sandwich structure carbon fiber composite is 0.250, and that of laminate structure carbon fiber composite is 0.169. The fire hazard ranking is as follows: multi-cavity carbon fiber composite > PMI foam sandwich structure carbon fiber composite > PET foam sandwich structure carbon fiber composite > laminate structure carbon fiber composite. This model makes up for the deficiency of single index evaluation, and reflects the fire hazard of composite materials for rail vehicles more comprehensively and reasonably.

Keywords: rail vehicles; carbon fiber composite materials; analytic hierarchy process; fire hazard

随着轨道交通的快速发展,对轨道车辆轻量化
的需求也越来越高^[1-2]。碳纤维复合材料作为一种

高性能轻量化复合材料,在轨道车辆上得到一定的
研究和应用^[3]。但就目前的应用宽度和广度而言,

通信作者:倪延强,工程师,主要从事轨道交通车辆防火技术研究工作

收稿日期:2023-10-28

引用格式: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 Yanqiang, Yu Quanlei, Zhao Zhen, 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.

其仍然受到了很大的限制。这主要是受限于碳纤维复合材料的工艺成本较高、生产效率较低等问题,除此之外,其防火阻燃性能也是一个重要的考察因素。与传统的车体金属材料相比,碳纤维复合材料自身具有可燃性,一旦起火,火势会迅速扩大,同时释放大量的热,产生有毒烟气,对人员生命和财产安全产生严重威胁,火灾危险性较大^[4]。

目前的研究报道对碳纤维复合材料的火灾危险性研究不多,主要集中于航空航天领域,在轨道交通领域未见报道。陈松华等^[5]选取3种典型通用航空碳纤维复合材料,通过锥形量热仪测试得到的热释放速率、质量损失速率等火反应特性参数,运用层次分析法建立了火灾危险性综合评价模型,得出泡沫夹芯复合材料的火灾危险性最高。李禄超等^[6]建立了包含4个火灾危险性评价指数的火灾评价体系,以层次分析法为基础,结合锥形量热仪试验数据对3种碳纤维复合材料的火灾危险性进行了综合评价。上述研究采用层次分析法进行火灾危险性的分析,层次分析法是一种有效的将定性与定量分析结合起来的多元决策方法^[7-9],对于在实际火灾过程中的烟、热、毒耦合相互作用的复杂危险情况比较适用。舒中俊等^[10]选取锥形量热仪实验数据,运用层次分析法确定了4个方面权重指标,对16种商用塑料的火灾危险性进行了评价和分析。冯俊峰等^[11]运用层次分析法,建立了以火势增长指数、放热指数、发烟指数、毒性气体生成速率指数以及火焰蔓延指数为因素的铺地材料火灾危险性综合评价模型,对几种典型的铺地材料进行了火灾危险性综合评价。刘晨等^[12]以静态管式炉、稳态管式炉和锥形量热仪中的相关实验数据为基础,进一步细分了火灾烟气中不同毒性气体对于火灾风险的影响,并运用层次分析法综合评价了热塑性聚氨酯及其复合材料的火灾危险性。

大多数关于材料基于层次分析法的火灾危险性的研究报道,主要依据锥形量热仪的各种实验数据,然后加权计算特定指标得到。近期的研究报道逐渐开始通过引入多种测试表征手段^[11-12],增加其他权重指标,从而使得火灾危险性分析的全面性得以加强。采用多种综合考量与测试表征相结合的方式,对材料的燃烧行为和火灾危险性进行全面的综合评价,是一种发展趋势。

对轨道车辆来说,EN 45545-2-2020作为指导铁路车辆制造的一项重要防火通用标准^[13],涵盖材料防火测试的多种试验方法,主要包括烟室法测定

烟密度、锥形量热仪法测定热释放速率、火焰横向蔓延法测试火焰蔓延性、烟室法和傅里叶变换红外光谱(FTIR)法测定毒性气体等,其中毒性气体的测定范围较广,包含燃烧产生烟雾中的CO、CO₂、NO_x(NO、NO₂)、HCN、HF、HCl、HBr、SO₂共计8种有毒气体。火灾危险性分析是一个复杂多因素耦合相互作用的过程,单一测试方法大多只能反映出材料的某一种火灾特性,不能较好反映材料真实的火灾情况,引入多种测试方法可以提高火灾危险性评价的全面性和准确性。EN 45545-2-2020标准中提到的多种测试方法在材料燃烧特性以及火灾危险性评价方面研究报道很少,考虑到其与实际车辆材料选型息息相关,可为轨道车辆火灾危险性综合评价提供新思路。

以轻量化轨道车辆为研究对象,选取4种典型结构的车体用碳纤维复合材料,结合EN 45545-2-2020标准,避免单一测试方法的局限性,通过引入4种测试方法,依据其在傅里叶变换红外烟气毒性测试系统、NBS烟密度箱、火焰蔓延测试仪和锥形量热仪中的相关试验数据,以毒性指数作为毒性危险指标,以烟密度峰值作为烟气危险指标,以火焰蔓延最远距离作为火焰蔓延危险指标,以平均热释放速率峰值和热释放总量作为放热危险指标,运用层次分析法建立碳纤维复合材料的火灾危险性综合评价模型,通过计算各指标权重,对其火灾危险性进行综合评价。

1 试验部分

1.1 主要原材料

层压板结构碳纤维复合材料(CFRP-层压板):由聚丙烯腈(PAN)基碳纤维和环氧树脂组成的T700环氧织物预浸料,铺贴后经热压罐固化成型工艺得到,厚度为4.0 mm。

聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)泡沫夹层结构碳纤维复合材料(CFRP-PMI夹层):“三明治”夹层结构,上下面板为T700环氧织物预浸料组成的层压板结构,中间夹层结构为PMI-C75泡沫,总厚度分别为50 mm和25 mm,其中上下面板厚度各为2.0 mm。

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)泡沫夹层结构碳纤维复合材料(CFRP-PET夹层):“三明治”夹层结构,其中上下面板为T700环氧织物预浸料组成的层压板结构,中间夹层结构为PET-C100泡沫,总厚度分别为50 mm和25 mm,其中上下面板厚度各为2.0 mm。

多腔结构型材碳纤维复合材料(CFRP-多腔):拉

挤型材结构,采用环氧树脂 T700 碳纤维布拉挤固化成型得到,其中板材厚度为 2.0 mm,总厚度分别为 50 mm 和 25 mm。

4 种结构的碳纤维复合材料试样均与实际装车产品材料成分及结构组成一致,试样厚度符合 EN 45545-2-2020 中各方法的要求。

1.2 主要仪器及设备

火焰蔓延测试仪:SFT 型,昆山莫帝斯科燃烧技术仪器有限公司;

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;

傅里叶变换红外烟气毒性测试系统:ACF5000 型,瑞典 ABB 公司。

1.3 测试与表征

(1)火焰蔓延试验。

按照 ISO 5658-2-2006 进行测试,试样尺寸为 800 mm×155 mm×相应厚度,取 3 次测试的算术平均值记录结果。

(2)烟密度试验。

按照 ISO 5659-2-2017 进行测试,试样尺寸为 75 mm×75 mm×相应厚度,热辐射通量为 50 kW/m²,在无引燃条件下持续 10 min,取 3 次测试的算术平均值记录结果。

(3)毒性气体试验。

按照 ISO 5659-2-2017 和 EN 17084-2018 进行测试,试样尺寸同烟密度试验,热辐射通量为 50 kW/m²,在无引燃条件下持续 10 min,取 3 次测试的算术平均值记录结果。

(4)热释放速率试验。

按照 ISO 5660-1-2015 进行测试,试样尺寸为 100 mm×100 mm×相应厚度,热辐射通量为 50 kW/m²,测试持续 20 min,取 3 次测试的算术平均值记录结果。

1.4 试验结果

(1)火焰蔓延试验结果。

在引燃条件下,通过火焰在试样垂直表面的横向蔓延燃烧行为,测试得到平均持续燃烧热(Q_{sb})、火焰蔓延最远距离(L)、火焰临界熄灭热通量(CFE)等火焰蔓延性能,通常火焰蔓延最远距离越大,CFE 值越低,则说明火焰燃烧传播越容易。4 种试样的测试结果见表 1。由表 1 可知,CFRP-PMI 夹层的火焰蔓延距离最短,CFE 值最大,表明其火焰蔓延性能最优;而 CFRP-多腔的火焰蔓延距离最长,可达

462 mm,表明一旦发生火灾,其会迅速燃烧,并扩大火焰蔓延范围,存在较大的火灾风险。

表 1 火焰蔓延试验结果

项目	是否引燃	L/mm	$Q_{sb}/(MJ \cdot m^{-2})$	$CFE/(kW \cdot m^{-2})$
CFRP-层压板	是	357	4.7	23.2
CFRP-PMI 夹层	是	341	2.8	24.7
CFRP-PET 夹层	是	383	3.2	20.5
CFRP-多腔	是	462	5.3	12.2

(2)烟密度试验结果。

烟密度峰值($D_s \max$)为在 10 min 测试时间内烟密度箱内的最大烟雾比光密度,反映可燃物燃烧时的烟气浓度,4 种试样的测试结果见表 2。由表 2 可知,CFRP-层压板的 $D_s \max$ 最小,表明其烟密度性能最优。

表 2 烟密度试验结果

项目	$D_s \max$
CFRP-层压板	196
CFRP-PMI 夹层	494
CFRP-PET 夹层	425
CFRP-多腔	589

(3)毒性气体试验结果。

通过 FTIR 仪分析测定试样燃烧产生烟雾中的 CO, CO₂, NO_x (NO, NO₂), HCN, HF, HCl, HBr, SO₂ 共计 8 种有毒气体的含量,以美国职业安全与健康研究所的 IDLH 值为基准浓度,根据定义的固定火灾模型,以有毒气体的实测浓度与基准浓度之间的比值计算得到毒性指数(X),计算公式如式(1)所示。

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

式中: c_i —烟室内第 i 种气体的浓度,mg/m³;

C_i —第 i 种气体的基准浓度,mg/m³。

4 种试样的 X 测试结果列于表 3,由表 3 可知,CFRP-层压板的 X 最小,表明其毒性性能最优。此外,四者在 4 min 和 8 min 时的 X 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。

表 3 毒性气体试验结果

项目	毒性指数	
	4 min	8 min
CFRP-层压板	0.04	0.06
CFRP-PMI 夹层	0.10	0.12
CFRP-PET 夹层	0.08	0.06
CFRP-多腔	0.06	0.08

(4)热释放速率试验结果。

热释放速率是评价材料燃烧性能的重要参数之一^[14],采用锥形量热仪进行热释放速率的测试,主要的测试参数有平均热释放速率峰值(MARHE)、热

释放速率峰值(pHRR)、热释放总量(THR)、点燃时间(t_i)等, MARHE 和 THR 数值越大, 说明其燃烧放热越多, 4 种试样的具体测试结果见表 4。

表 4 热释放速率试验结果

项目	t_i/s	pHR/(kW·m ⁻²)	THR/(MJ·m ⁻²)	MARHE/(kW·m ⁻²)
CFRP-层压板	35	82.4	38.1	48.1
CFRP-PMI 夹层	31	121.4	85.6	72.4
CFRP-PET 夹层	38	187.1	80.4	65.3
CFRP-多腔	62	108.2	12.4	50.8

注: MARHE 为时间 0 min 到 t min 内的平均热释放速率的最大值, 其中平均热释放速率通过热释放速率-时间曲线下的梯形面积得出。

2 火灾危险性综合评价

2.1 层次结构模型建立

层次分析法作为一种多目标分析方法, 其原理是将经验判断和数字分析有机结合起来, 按照不同属性和规律依次罗列相关因素, 通过确定各因素的重要性, 进而对多因素整体进行综合评价^[15]。层次分析法一般可分为三个步骤: 首先, 根据因素间的相互关系, 将因素按照不同层次聚集组合, 建立一个多层次的分析结构模型; 其次, 根据经验和主观判断, 就每一层次因素的相对重要性进行量化分析; 最后, 利用数学方法构造判断矩阵和求解矩阵, 并进行一致性检验, 若不满足一致性条件, 则修改判断矩阵, 直至满足为止。

笔者将碳纤维复合材料的火灾危险性作为目标层, 将毒性危险、烟气危险、火焰蔓延危险以及放热危险共 4 方面作为基准层, 以毒性指数作为毒性危险指标, 以烟密度峰值作为烟气危险指标, 以火焰蔓延最远距离作为火焰蔓延危险指标, 以平均热释放速率峰值作为放热危险指标, 以热释放总量作为放热危险指标, 建立的火灾危险层次结构模型, 如图 1 所示。

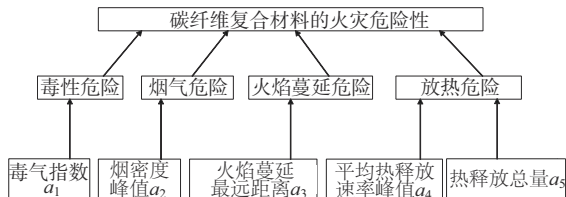


图 1 碳纤维复合材料火灾危险性层次结构模型

2.2 层次分析法计算

(1) 构建判断矩阵。

据统计表明, 火灾中 70%~75% 的死亡是由有毒气体及烟尘吸入导致的^[16]。轨道车辆的封闭性较高, 一旦起火, 车体结构和内饰结构中的可燃物被

引燃后, 大量有毒气体会迅速释放出来, 人员吸入后, 或因中毒很快身亡, 或因窒息很快身亡, 因此毒性危险和烟气危险在火灾危险性评价中具有相当高的重要度。同时, 轨道车辆车体较长, 材料一旦燃烧起火, 就会在整个表面迅速蔓延, 进而在短时间内发展为全面火灾, 因此火焰蔓延危险在火灾危险性评价中具有较高的重要度。此外, 材料在燃烧过程中也会释放出大量的热, 对人员安全也有很大影响, 因此放热危险在火灾危险性评价中具有一定的重要度, 放热危险包括 MARHE 和 THR 两个指标, 碳纤维复合材料的燃烧反应, 一般为持续性长时间燃烧, 在狭小空间内瞬时地 MARHE 对人体危害性更大, 因此 MARHE 相对于 THR 的重要度更大。基于上述轨道车辆的结构和运行特点, 并结合典型的火灾事故危险结果分析^[17], 一般可定性认为烟气毒性危险性 > 生烟危险性 > 火蔓延危险性 > 放热危险性。

采用 1~9 标度法(见表 5^[18]), 得到各评价指数之间的相对重要度标度值, 列于表 6。由表 6 可以得出碳纤维复合材料火灾危险性评价的判断矩阵 **A**, 如式(2)所示。

表 5 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	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 6 判断矩阵的相对标度值

指标	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

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

(2) 求解特征向量和最大特征根。

各行元素几何平均值 b_j 的计算公式如式(3)所示。

$$b_j = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} \quad (3)$$

对 b_j ($i=1, 2, \dots, n$) 进行归一化, 即求得最大特征值对应的特征向量 W_j , 如式(4)所示。

$$W_j = \frac{b_j}{\sum_{k=1}^n b_k} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

带入数据($n=5$)进行计算得到式(5)、式(6)、式(7):

$$b = \begin{pmatrix} 2.914 \\ 1.888 \\ 1 \\ 0.549 \\ 0.331 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$W = \begin{pmatrix} 0.436 \\ 0.283 \\ 0.150 \\ 0.082 \\ 0.050 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$AW = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1 & 2 & 4 & 6 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/5 & 1/4 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/6 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.436 \\ 0.283 \\ 0.150 \\ 0.082 \\ 0.050 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.212 \\ 1.429 \\ 0.751 \\ 0.415 \\ 0.250 \end{pmatrix} \quad (7)$$

求得判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 如式(8)所示。

$$\lambda_{\max} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{(AW)_k}{nW_k} \right) = 5.038 \quad (8)$$

(3)判断矩阵一致性检验。

式(9)为判断矩阵一致性检验的计算公式, 判定矩阵 A 满足一致性的条件为 $CR < 0.1$, 如果判定不一致, 则需要重新对矩阵 A 进行调整。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

RI 为随机一致性指标, 可由 1~9 阶随机平均一致性指数表查询得到, 当 $n=5$ 时, $RI=1.12$ 。 CI 为一致性检验指标, 计算公式见式(10)。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (10)$$

带入数据进行计算可得:

$$CR = 0.0085 < 0.1$$

由计算结果可知, 矩阵 A 满足一致性检验, 则可以使用特征向量 W 作为火灾危险性评价的权重指标, 见表 7。

表 7 火灾危险性评价指标权重值

指标	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
权重	0.436	0.283	0.150	0.082	0.050

2.3 综合评价

对火灾危险性评价涉及到的各指标试验值进行汇总, 列于表 8。

表 8 火灾危险性评价指标试验值

材料	X	$D_s \max$	L/mm	MARHE/ (kW·m ⁻²)	THR/ (MJ·m ⁻²)
CFRP-层压板	0.06	196	357	48.1	38.1
CFRP-PMI 夹层	0.12	494	341	72.4	85.6
CFRP-PET 夹层	0.08	425	383	65.3	80.4
CFRP-多腔	0.08	589	462	50.8	30.3

注: X 取 4 min 或 8 min 中的最大值。

首先对表 8 的试验值进行归一化处理, 随后将每个评价指标归一化后的数值与其对应的总目标权重值(见表 7)乘积相加, 便可以得到每种碳纤维复合材料的火灾危险性综合指数, 分值越高说明其火灾危险性越高, 计算得到的火灾危险性综合指数见表 9。

表 9 不同材料的火灾危险性综合指数

材料	火灾危险性综合指数
CFRP-层压板	0.169
CFRP-PMI 夹层	0.312
CFRP-PET 夹层	0.250
CFRP-多腔	0.342

由表 9 可知, 4 种结构碳纤维复合材料的火灾危险性综合指数: CFRP-多腔 > CFRP-PMI 夹层 > CFRP-PET 夹层 > CFRP-层压板, CFRP-多腔结构的火灾危险性综合指数最大, 远大于 CFRP-层压板结构, 两种夹层结构碳纤维复合材料的火灾危险性综合指数相差不大, CFRP-PMI 夹层结构略大于 CFRP-PET 夹层结构。因此, 火灾危险性从高到低依次为 CFRP-多腔、CFRP-PMI 夹层、CFRP-PET 夹层、CFRP-层压板。

3 结论

(1)依据 EN 45545-2-2020 标准, 通过引入 4 种测试方法, 建立了 4 种火灾危险性指标为毒性危险指标、烟气危险指标、火焰蔓延危险指标、放热危险指标。

(2)基于层次分析法, 建立了火灾危险性综合评价模型, 对轨道车辆车体用碳纤维复合材料的潜在火灾危险性进行较为全面、合理的量化评价。

(3)基于火灾危险性综合评价模型, 计算得到 4 种典型结构碳纤维复合材料的火灾危险性综合指数分别为: CFRP-多腔结构为 0.342, CFRP-PMI 夹层

结构为0.312,CFRP-PET夹层结构为0.250,CFRP-层压板结构为0.169。火灾危险性排序为:CFRP-多腔>CFRP-PMI夹层>CFRP-PET夹层>CFRP-层压板。

参考文献

- [1] 刘晓波,杨颖.轻量化高性能碳纤维复合材料车体研发关键技术[J].合成纤维,2013,42(10):29-34.
Liu Xiaobo, Yang Ying. Key technologies of lightweight and high-performance carbon fiber composite train carbody[J]. Synthetic Fiber in China, 2013, 42(10):29-34.
- [2] 章潇慧.先进复合材料轨道交通车辆轻量化发展与思考[J].新材料产业,2019(1):51-58.
Zhang Xiaohui. Lightweight development and reflection on advanced composite material rail transit vehicles[J]. Advanced Materials Industry, 2019(1):51-58.
- [3] 仇亚萍,沈真,陈海军,等.高速磁悬浮列车用碳纤维复合材料裙板的设计与分析[J].复合材料科学与工程,2021(2):95-101.
Qiu Yaping, Shen Zhen, Chen Haijun, et al. Design and analysis of carbon fiber reinforced composites skirt plate on high speed maglev trains[J]. Composite Materials Science and Engineering, 2021(2):95-101.
- [4] 徐艳英,张雷,王志,等.基于锥形量热法的典型碳纤维/环氧复合材料燃烧特性[J].复合材料学报,2017,34(8):1 674-1 682.
Xu Yanying, Zhang Lei, Wang Zhi, et al. Combustion characteristics of typical carbon fiber/epoxy composites based on the method of CONE [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(8):1 674-1 682.
- [5] 陈松华,徐艳英,王志,等.通用航空碳纤维复合材料火灾危险性评价[J].消防科学与技术,2019,38(12):1 645-1 648.
Chen Songhua, Xu Yanying, Wang Zhi, et al. Fire risk assessment of general aviation carbon fiber composites[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(12):1 645-1 648.
- [6] 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 res-in/carbon fiber composites[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 62-66.
- [7] 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.
- [8] 陈衍泰,陈国宏,李美娟.综合评价方法分类及研究进展[J].管理科学学报,2004,7(2):69-79.
Chen Yantai, Chen Guohong, Li Meijuan. Classification and research advancement of comprehensive evaluation methods[J]. Journal of Management Sciences in China, 2004, 7(2):69-79.
- [9] 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, 1988.
- [10] 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. Integrated assessing fire hazard of polymer based on data of cone calorimeter [J]. Chinese Polymer Bulletin, 2006(5):37-44.
- [11] 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. Research on fire hazard assessment of flooring materials[J]. Fire Technology and Products Information, 2011(12):36-39.
- [12] 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.
- [13] 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. Comparative and analysis of fire protection standards for railway vehicles in China and abroad[J]. Rolling Stock, 2017, 55(1):24-29.
- [14] 刘玲,刘义祥,邢政.基于锥形量热法的常见人造木质板材燃烧性能研究[J].今日消防,2022(2):1-4.
Liu Ling, Liu Yixiang, Xing Zheng. Study on the combustion performance of artificial wood-based board based on cone calorimeter[J]. Fire Protection Today, 2022(2):1-4.
- [15] 陈玉明.基于层次分析法的聚合物材料火灾危险性评估[J].消防技术与产品信息,2006(13):13-16.
Chen Yuming. Fire hazard assessment of polymer materials based on analytic hierarchy process[J]. Fire Technology and Products Information, 2006(13):13-16.
- [16] 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 of organic insulation materials based on AHP [J]. Fire Protection and Products Information, 2013 (8):103-106.
- [17] John R, Hall J. Whatever happened to combustion toxicity? [J]. Fire Technology, 1996, 32(4):351-371.
- [18] 于宝刚.基于AHP热塑性塑料火灾危险评价[J].塑料,2008,37 (5):105-107.
Yu Baogang. Fire hazard evaluation of thermoplastics based on AHP [J]. Plastics, 2008, 37(5):105-107.