

轨道车辆地板耐火性能分析研究

张建敏¹ 郭会生² 刘小霞¹ 陈淑娟² 王丽娟¹

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 063035, 唐山; 2. 天津中车唐山轨道车辆有限公司, 300300, 天津 // 第一作者, 高级工程师)

摘要 轨道交通防火安全承载着广大旅客的生命和财产安全, 通常以标准的形式强制实施。对于列车车下火灾及蔓延, 地板耐火隔断的设置及其耐火性能极为重要。系统介绍了 NFPA 130、EN 45545-3 和 BS 6853 的轨道车辆地板组件耐火要求。以实际项目为例, 对符合最严格的 NFPA 130 要求的地板耐火组件材料及结构进行了试验验证。优化改造后的地板耐火组件的测试结果满足标准要求。

关键词 轨道车辆; 地板组件; 耐火测试; 耐火要求

中图分类号 U270.38

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.09.009

Research on Fire Resistance Performance of Railway Vehicle Floor Assembly

ZHANG Jianmin, GUO Huisheng, LIU Xiaoxia, CHEN Shujuan, WANG Lijuan

Abstract Railway vehicle fire safety is responsible for the lives and belonging safety of mass passengers, which is usually enforced in the form of standards. For fire spreading under train, the fire-resistive partition of floor and its fire resistance performance is substantial. Fire resistance requirements of railway vehicle floor assembly of NFPA 130, EN 45545-3 and BS 6853 are systematically introduced. Based on actual projects, test is conducted on the floor fire-resistive assembly material and structure that meet the strictest requirements of NFPA 130 for verification. The floor fire-resistive assembly after optimization and reconstruction meets standard requirements from test results.

Key words rail vehicle; floor assembly; fire resistance test; fire resistance requirement

First-author's address CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China

目前国际上轨道车辆防火标准体系包括 NFPA 130^[1]、EN 45545^[2]、BS6853^[3]、DIN 5510^[4]等, 以及法国、澳大利亚、中国等国家的轨道车辆防火标准。其中对结构耐火提出明确要求的只有欧盟的 EN 45545、英国的 BS 6853 和美国的 NFPA 130。轨道车辆结构耐火设置的目的在于有效限制火灾的蔓延, 为

乘客疏散到临近安全空间争取时间; 保证车辆在必要的运行能力下运行到指定位置再进行疏散。

国内车辆耐火结构采用英国 BS 6853 和欧盟 EN 45545 标准的较多。近几年, 因北美轨道车辆项目持续火热, 带动车辆地板耐火结构符合北美标准 NFPA 130 的相关要求也日益增多。

1 轨道车辆地板耐火隔断组件及耐火结构判定要求

1.1 地板耐火隔断组件

地板耐火隔断组件的作用是阻挡车下火灾, 包括车体底架下面电气设备着火和外部环境火灾。地板耐火隔断组件包含车体底架及其带有的各种贯穿结构, 例如防寒材、地板、地板布及其附属结构, 以及座椅、扶手、设备柜等与地板接口结构。

1.2 地板耐火隔断判定依据

轨道车辆地板耐火隔断的判定要求包括耐火完整性 E 、隔热性 I 及高温情况下的承载能力 R 。

1) 完整性 E : 在标准耐火试验条件下, 当建筑分隔构件一面受火时, 在一定时间内防止火焰和烟气穿透或在背火面出现火焰的能力。

2) 隔热性 I : 在标准耐火试验条件下, 当建筑分隔构件一面受火时, 在一定时间内防止其背火面温度超过规定值的能力。

3) 承载能力 R : 承重构件承受规定的试验载荷, 其变形的大小和速率均未超过标准规定极限值的能力。

极限弯曲变形量 D :

$$D = L^2 / (400 d)$$

极限弯曲变形速率 ε :

$$\varepsilon = dD/dt = L^2 / (9\,000 d)$$

式中:

L ——试件的净跨度, mm;

d ——试件截面上抗压点和抗拉点间的距离, mm。

表 1 为轨道车辆国际三大防火标准体系对地板耐火测试的判定依据。

表 1 不同标准体系的轨道车辆地板耐火隔断判定依据

性能指标	要求	不同标准的判定依据		
		NFPA 130	EN 45545	BS 6853
完整性 <i>E</i>	裂缝和开口小于给定的尺寸(ϕ 25 mm 的探棒不能伸入炉内, ϕ 6 mm 的探棒伸入炉内移动距离小于 150 mm)	无	有	有
	非暴露面不能出现持续燃烧的火焰(小于 10 s)	无	有	有
	火焰或者热气不会导致棉垫燃烧	有	有	有
隔热性 <i>I</i>	满足非暴露面平均温升 <i>A</i> 要求限制和单点温升 <i>S</i> 要求限制	$A \leq 139\text{ }^{\circ}\text{C};$ $S \leq 181\text{ }^{\circ}\text{C}$	$A \leq 140\text{ }^{\circ}\text{C};$ $S \leq 180\text{ }^{\circ}\text{C}$	$A \leq 250\text{ }^{\circ}\text{C};$ $S \leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$
承载能力 <i>R</i>	极限弯曲变形量 <i>D</i> 及极限弯曲变形速率 ε	有	无	无

2 各标准体系的地板耐火隔断要求

各标准体系对地板耐火隔断的设置及性能要求是不同的:EN 45545 地板耐火隔断区域的设定依据危险源辨识结果,对车下安装有大功率设备、内燃机、加热设备等区域,要求进行地板耐火设计;BS

6853 和 NFPA 130 对耐火区域没有特殊要求,根据实际车辆结构选择有贯穿孔等耐火完整性比较薄弱的区域进行测试;NFPA 130 还考虑到地板组成的承载情况。

表 2 为各标准体系对地板隔断耐火区域设置及性能要求。

表 2 不同标准体系的耐火隔断布置及要求

标准	区域要求	样件尺寸	测试依据	运行类别	要求
EN 45545	地板下部安装有技术柜,含高功率电源、牵引电路的区域	宽:整个横截面	EN 1363-1 ^[5]	1、2、4	E15
		长:目标区域两侧各长 1 m	EN 1364-2 ^[6]	3	E15 I15
	地板下安装有绝缘液的牵引变压器或电抗器的部位	宽:整个横截面	EN 1364-2	1、2	E15
		长:目标区域两侧各长 1 m	EN 1364-2	3、4	E15 I15
	地板下装有内燃机(包括加热设备、油箱及其管道)的部位	宽:整个横截面	EN 1364-2	1、2	E15
		长:目标区域两侧各长 1 m	EN 1364-2	3、4	E15 I15
BS 6853	地板下区域(未被 1-3 包含)	宽:整个横截面	EN 1364-2	1、2、3、4	无要求
		长:目标区域两侧各长 1 m	EN 1364-2	1、2、3、4	无要求
BS 6853	未详细规定。根据地板结构,选择耐火能力相对薄弱区域地板	1 m×1 m	BS 476-20 ^[7]	所有类别	E20 I20
NFPA 130	未详细规定。根据地板结构,承重情况等选择耐火能力相对薄弱的区域	宽度为整个横截面,长度至少 3.7 m	ASTM E 119 ^[8]	AGT	E20 I20
				其他车辆	E30 I30

3 各标准体系测试要求差异

EN 45545、BS 6853 和 NFPA 130 除前面所述的在地板耐火隔断区域的设置、测试方法和性能要求的不同之外,在升温条件、测试压力和承重等方面也存在一些差异。

3.1 测试炉内的升温要求

EN 45545(测试标准 EN 1363-1^[5])规定的温升曲线与 BS 6853(测试标准 BS 476-20^[7])一致,以公式的形式计算得出各时间点的温度;而 NFPA 130(测试标准 ASTM E119^[8])中对炉内温度要求按时间点列表给出。

EN 1363-1 与 BS 476-20 升温曲线计算公式:

$$\theta = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20$$

式中:

θ ——炉内平均温度, $^{\circ}\text{C}$

t ——时间,min

ASTM E119 规定的各时间点的温度详见 ASTM E 119 附录 x1。

图 1 对比了各测试标准在测试开始后第一个小时内各时间点炉内温度情况。

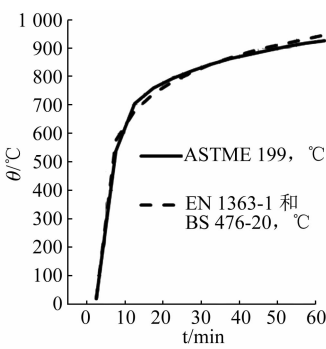


图 1 各测试标准在测试开始后第 1 个小时内各时间点炉内温升曲线对比图

由图 1 中可见,在前 30 min,ASTM E 119 的炉内温度略高于 EN 1363-1 和 BS 476-20 的,而后期相比则略低。

3.2 测试炉内压力

地板耐火测试中,炉内压力沿高度方向存在着线性梯度关系,并随炉内温度不同而有细微区别:EN 1363-1 规定样件水平面以下 100 mm 处压力为 20 Pa;BS 476-20 规定测试样件水平面以下 100 mm 处压力为 0~2 Pa;ASTM E119 未规定炉内压力的具体要求,通常维持轻微的负压。

3.3 承重要求

针对地板耐火隔断测试的承重要求,仅 NFPA 130 要求测试过程中需要承受实际载荷,即:车辆在 AW3(超载)状态下的地板组件上所承受的人员、座椅、电气柜及地板下其他设备的质量。

综上所述,在 EN 45545-3、BS 6853、NFPA 130 规定的对于地板耐火隔断的耐火性能要求中,NFPA 130 的综合要求最高(时间长、隔热性能要求高、高温下承载能力要求高),EN 45554-3 和 BS 6853 则次之。

4 案例分析

基于前述结论,NFPA 130 对地板隔断组件的耐火性能要求最高,基于该标准的要求,中车唐山机车车辆有限公司对某一研制项目地板进行了实际测试验证。以该项目为案例,对地板耐火组件的设计、试制、组装及测试进行分析。

4.1 地板样件

根据 ASTM E 119,地板样件尺寸长×宽×高为 4 500 mm×3 040 mm×600 mm。样件上包含车辆地板上各种贯穿孔(线缆及管路通过)及其封堵结构。

4.2 测试结果

根据 NFPA 130 和 ASTM E 119 标准,对地板样件进行了完整性、隔热性及高温变形量的测试。在第 22 分钟时火焰从背火面冒出,试验失败。

4.3 测试失败原因分析

在本次试验中,地板样件背火面出现了持续火焰,说明地板内部存在可燃物或者非金属材料分解出可燃气体。经分析,试验失败的主要原因为:防寒材变色且性状发生变化,估计参与了燃烧;地梁上面的胶热解/燃烧;线槽尼龙安装座的热解/燃烧。

由本次试验,可得出以下结论:

1) 样件内部可燃物较多,包括防寒材内可燃混

合物、地板粘接胶、线槽安装座等。高温下热解出可燃气体在空腔内积聚,达到一定压力后通往外界,遇到空气发生闪燃。

2) 试验样件隔热性较差。背火面平均温升在第 22 分钟时已达到 92 ℃。

3) 试验样件在高温下负载变形的能力尚可。

4.4 样件结构分析及优化方案

基于地板样件试验失败原因分析,样件整改的目标即为尽量减少地板内部的可燃物含量,提高隔热性能,优化方案为:

1) 不锈钢车体底架有较好的刚度,通过车体静强度试验后则无需考虑高温负载而特意增加刚度,所以本研制项目的钢结构车体底架结构无需更改。

2) 防寒材由玻璃棉更换为燃点更高的材料。安装时尽量减少分缝且与车体密贴,尽量减少热量传递。

3) 尽量减少地板内部的可燃物,并尽量减少内部可燃气体的产生和释放。

4) 通过工艺措施控制车内非金属材料的使用量,例如胶粘剂的使用及控制等。

4.5 地板样件优化改造后测试情况

对优化改造后的地板耐火样件进行了完整性、隔热性及变形量的测试和判定。第二次测试判定情况及判定结果如表 3 所示。由表 3 可知,样件测试满足标准要求。

表 3 地板耐火样件优化改造后的测试结果

性能指标	判定依据	判定结果
完整性 <i>E</i>	各孔、洞、缝隙处,棉垫测试无燃烧现象	通过
隔热性 <i>I</i>	背火面温升要求: $A \leq 139\text{ }^{\circ}\text{C}$; $S \leq 181\text{ }^{\circ}\text{C}$	通过
变形量 <i>R</i>	极限弯曲变形量: $D = L^2/400\text{ }d$	通过

5 结语

NFPA 130 要求地板组件耐火时间为 30 min。通常的做法是,测试 30 min 后,如果试验结果依然符合标准的判定要求,试验会持续进行直至试验失败。此时炉内温度至少为 843 ℃。钢制地板底架(碳钢或不锈钢)具有较好刚度,对样件高温下的变形具有良好作用;但由于铝合金材质的熔点较低,对于铝合金车体,底架需要防火膨胀材料的保护。

本文研究分析了国际上轨道车辆防火标准的地板耐火测试要求及判定依据,结合具体项目对符合 NFPA 130 要求的地板耐火样件测试进行分析,研究结果可为车辆地板设计及制造提供借鉴。

(下转第 45 页)

道交通的便利性加成,上盖平台的物业开发价格较一般房地产开发项目更高。目前广州在售的几个上盖开发项目,其售价均在 4 万元以上。所以,达到申报建设地铁要求的城市,其上盖平台物业开发的房价一般都会大于盈亏平衡点,具有良好的经济效益。从容积率盈亏平衡点来看,房价在 30 000 元/ m^2 时,对应的容积率为 0.8~1.7,如全是多层建筑,就属于环境一流的住宅项目。以广州地铁 6 号线萝岗上盖开发项目为例,该项目目前房价定价为 40 000 元/ m^2 左右,容积率为 2.14,远大于容积率盈亏平衡点。

表 5 不同结构形式下沉式盖板在不同容积率下的房价 BEP
单位:元/ m^2

项目名称		不同容积率下的房价 BEP		
		容积率 1.5	容积率 2.0	容积率 2.5
盖上加开发 核心 筒落地	下沉式双层盖板	30 630.42	24 722.82	21 178.25
	下沉式单层盖板	24 113.39	19 835.05	17 268.04
	半下沉式单层盖板	20 027.94	16 770.95	14 816.76
盖上加开发全 转换	下沉式双层盖板	33 444.17	26 833.13	22 866.50
	下沉式单层盖板	27 264.32	22 198.24	19 158.59
	半下沉式单层盖板	23 178.86	19 134.15	16 707.32

表 6 不同形式下沉式盖板在不同房价下的容积率 BEP

项目名称		不同房价下的容积率 BEP		
		房价 20 000 元/ m^2	房价 25 000 元/ m^2	房价 30 000 元/ m^2
盖上加开发核心 筒落地	下沉式双层盖板	2.7	2.0	1.5
	下沉式单层盖板	2.0	1.4	1.1
	半下沉式单层盖板	1.5	1.1	0.8
盖上加开发全 转换	下沉式双层盖板	3.1	2.2	1.7
	下沉式单层盖板	2.3	1.7	1.3
	半下沉式单层盖板	1.9	1.3	1.1

(上接第 41 页)

参考文献

[1] NFPA. Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems; NFPA 130; 2017[S]. USA Quincy; NFPA, 2017.

[2] EN. Fire Protection on Railway Vehicles; Fire Resistance Requirements for Fire Barriers; EN 45545; 2013[S]. EN; Brussels, 2013.

[3] BSI. Code of Practice for Fire Precautions in the Design and Construction of Passenger Trains; BS 6853; 2002[S]. London; BSI, 2002.

[4] DIN. Preventive Fire Protection in Railway Vehicles; DIN 5510; 2009[S]. DIN; FSF 2009.

4 结语

随着国内城市轨道交通建设的快速发展,车辆基地上盖物业开发作为地铁项目可持续发展的新模式,已经在北京、上海、广州、深圳等城市开展起来。本研究对下沉式车辆基地上盖平台的建设成本和上盖物业开发的盈亏平衡进行分析,测算出半下沉式单层盖板、下沉式单层盖板、下沉式双层盖板三种不同的下沉式车辆基地上盖平台的建设成本较地面单层盖板的费用分别增加 25%、50%~60%、100% 以上,为以后下沉式车辆基地上盖平台建设的前期研究提供指标参考。通过房价和容积率盈亏平衡点分析,得出上盖平台开发建设具有良好的商业价值和经济效益的结论。本研究可为下沉式车辆基地实施综合开发提供经济效益可持续的理论支撑。

参考文献

[1] 广州地铁设计研究院有限公司. 广州市轨道交通 6 号线萝岗车辆段上盖平台土地整理项目工程可行性研究报告[R]. 广州:广州地铁设计研究院有限公司, 2014.

[2] 广州地铁设计研究院有限公司. 广州市轨道交通 22 号线工程陈头岗车辆段初步设计文件[R]. 广州:广州地铁设计研究院有限公司, 2017.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范: GB 5017—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.

[4] 广州地铁集团有限公司. 广州地铁 22 号线工程招标文件[R]. 广州:广州地铁集团有限公司, 2017.

[5] 喻祥, 宋聚生. 地铁车辆段上盖综合体设计探索——以深圳市前海湾车辆段上盖综合体为例[J]. 新建筑, 2013 (3): 158.

[6] 周小伟, 张雄. 深圳地铁 3 号线横岗双层车辆段经济分析[J]. 铁道工程学报, 2012 (3): 107.

(收稿日期: 2020-07-28)

[5] EN. Fire Resistance Tests Part 1; General Requirements; EN 1363-1; 2012[S]. EN; Brussels, 2012.

[6] EN. Fire Resistance Tests for Non-Loadbearing Elements Part 2; Ceilings; EN 1364-2; 1999[S]. EN; Brussels, 1999.

[7] BRI. Method for Determination of the Fire Resistance of Elements of Construction; BS 476-20; 2014 [S]. London; BSI, 2014.

[8] ASTM. Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials; ASTM E119; 2016 [S]. New York City; ASTM, 2016.

(收稿日期: 2019-09-05)