

# 基于欧盟标准的车辆材料防火指标分析

刘小霞 张建敏 张丽博 傅振亮

(中车唐山机车车辆有限公司, 063035, 唐山//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 介绍了欧盟 EN 45545 标准实施背景。基于火焰蔓延、点燃性、热释放速率、烟密度及烟毒性等五项材料防火性能指标,对 EN 45545-2:2013、DIN 5510-2:2009 及 BS 6853:1999 中的材料测试标准进行了对比分析,以了解 DIN 5510-2:2009、BS 6853:1999 与 EN 45545-2:2013 中材料防火性能水平差异,为轨道交通车辆材料防火优化提供了设计依据。

**关键词** 轨道交通车辆;材料;防火指标;测试方法

**中图分类号** U231.96; U270.4; F65

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.01.009

## Analysis of Fire Protection Index of Vehicle Materials Based on EU Standard

LIU Xiaoxia, ZHANG Jianmin, ZHANG Libo, FU Zhenliang

**Abstract** The background information to implement EN 45545 standard in EU is briefly introduced. Based on five material fire protection indexes, as in flame spread, flammability, heat release rate, smoke density and smoke toxicity, the material test standards in EN 45545-2:2013, DIN 5510-2:2009 and BS 6853:1999 standards are compared and analyzed. The differences of expected fire protection performance in EN 45545-2:2013, DIN 5510-2:2009 and BS 6853:1999 standards are introduced to provide a design reference for rail transit vehicle fire protection improvement.

**Key words** rail transit vehicle; material; fire protection index; test method

**Author's address** CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China

随着复合材料的大量使用,材料防火性能研究倍受重视,并快速发展;同时,通过长期研究实践,发展出了一系列评价材料防火性能的测试方法。其中,最具有代表性且最全面的是欧盟提出的 FIRST(Flame, Ignition, Release, Smoke, Toxicity)概念。该概念由美国 FST(Flame, Smoke, Toxicity)发展而来。

德国、英国和法国等欧盟国家的防火标准各不相同,在车辆材料防火指标及其测试标准方面要求均有差别。欧洲委员会为了统一防火标准,根据国际铁路联盟(UIC)和不同欧洲国家现行防火标准,于2013年正式发布了EN 45545系列标准。根据欧盟铁路互联互通技术规范 TSIs(EU) No. 1302/2014要求,在过渡期内,仍允许执行 DIN 5510:2009<sup>[4]</sup>、BS 6853:1999<sup>[5]</sup>等欧盟成员国标准,但从2018年起,所有欧盟 TEN(全欧交通网络)的车辆防火要求均执行 EN 45545-2:2013<sup>[2]</sup>标准。

目前,我国轨道交通车辆防火主要执行 TB/T 3237—2010《动车组用内装材料阻燃技术条件》、TB/T 3138—2018《机车车辆用材料阻燃技术要求》、DIN 5510:2009 或 BS 6853:1999 等标准。然而,由于 EN 45545-2:2013<sup>[2]</sup>的应用,我国轨道交通车辆厂商需要尽快掌握 EN 45545 系列标准及其与现有标准的差异性。因此,本文对 EN 45545-2:2013 标准中材料测试方法及要求同现有标准进行对比分析,以便为轨道交通车辆材料优化设计提供理论支撑。

## 1 火焰蔓延性指标

火焰蔓延是材料防火性能评价的基本指标。EN 45545-2:2013、DIN 5510-2:2009 和 BS 6853:1999 标准将车内材料按不同安装位置分成水平朝上表面和非水平朝上表面两大类,而 TB/T 3237—2010 和 TB/T 3138—2018 并未对材料进行分类。

### 1.1 水平朝上表面类材料

针对地板及地板布等水平朝上表面材料,EN 45545-2:2013、DIN 5510-2:2009 和 BS 6853:1999 均采用了测试标准 ISO 9239-1:2010:2010《地板对火反应试验 第1部分 使用辐射热源测定燃烧性能》。ISO 9239-1:2010 标准将样品暴露在辐射热源条件下,并将传播距离转换为临界辐射热通量

\* 国家重点研发计划课题(2016YFB1200403)

$Q_{CHF}$ ,以评价样品火焰传播能力。TB/T 3237—2010 和 TB/T 3138—2018 分别采用燃烧等级(A、B、C 级)和燃烧难易来评价火焰传播能力。

EN 45545-2:2013 标准对 HL(火灾风险等级)不同的车辆有不同的火焰蔓延性能要求:HL1 级车辆的  $Q_{CHF} \geq 4.5 \text{ kW/m}^2$ ,HL2 级车辆的  $Q_{CHF} \geq 6 \text{ kW/m}^2$ ,HL3 级车辆的  $Q_{CHF} \geq 7.5 \text{ kW/m}^2$ 。DIN 5510-2:2009 标准要求:防火 1 级车辆的  $Q_{CHF} \geq 2.5 \text{ kW/m}^2$ ,防火 2-4 级车辆的  $Q_{CHF} \geq 4.5 \text{ kW/m}^2$ 。BS 6853:1999 标准对各等级(Ia、Ib 和 II 级)车辆要求一致,均为  $Q_{CHF} \geq 7.5 \text{ kW/m}^2$ 。

TB/T 3237—2010 标准采用 UIC 564-2:1991《关于国际运营的铁路旅客列车或相同车辆的防火和灭火措施的规定》中测试方法,基于燃烧时间及

其表面积来确定燃烧等级,一般要求车辆使用材料应达到 A 级。TB/T 3138—2018 标准采用 45° 燃烧,基于火苗、发烟现象来确定燃烧难易等级;一般要求材料达到难燃级别。

由上述分析可见,对最高防火等级的车辆,EN 45545-2:2013 要求最高、BS 6853:1999 次之、DIN 5510-2:2009 最低;对中等防火等级的车辆,BS 6853:1999 要求最高。而 TB/T 3237—2010 标准和 TB/T 3138—2018 标准的测试方法较独特,无法与其他防火标准进行直接比较。

1.2 非水平朝上表面类材料

针对墙板及顶板等非水平朝上表面类材料,EN 45545-2:2013、DIN 5510-2:2009 和 BS 6853:1999 采用的测试方法及评价指标如表 1 所示。

表 1 非水平朝上表面火焰蔓延测试方法及评价指标

防火标准	测试方法			评价指标
	测试标准	点火源	辐射热流要求	
EN 45545-2:2013	ISO 5658-2:2002	丙烷气体	有(见图 1)	$Q_{CHF}$
DIN 5510-2:2009	DIN 53438:1984 ,DIN 54837:2007	丙烷气体	无	可燃性等级(S1—S5)
BS 6853:1999	BS 476-7:1997	丙烷气体	有(见图 2)	防火阻燃等级(Class1—Class4)

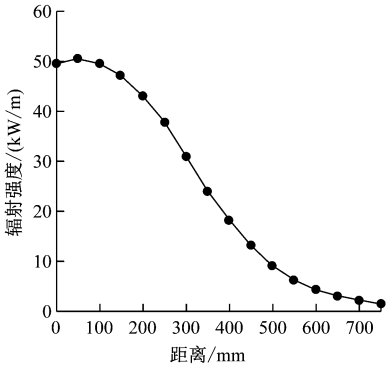


图 1 ISO 5658-2:2002 标准的辐射热流要求

ISO 5658-2:2002《防火试验-火焰蔓延 第 2 部分 建筑和交通部件横向火焰蔓延》将传播距离转换为 CFE(临界辐射热通量),以评价样品的火焰蔓延能力。DIN 54837:2007《铁路车辆材料部件试验-使用气体喷枪测试燃烧性能》通过试样损毁长度和续燃时间来评价样品火焰蔓延能力。BS 476-7:1997《建筑材料和结构燃烧试验 第 7 部分 测定产品火焰蔓延分类的试验方法》采用试验开始后 1.5 min 和整个测试期间火焰前端传播距离来评价样品火焰蔓延能力,并按照表 2 进行防火阻燃等级划分。

各测试方法之间无法直接比较,但 ISO 5658-2:2002 与 BS 476-7:1997 较为相似。当材料防火阻燃

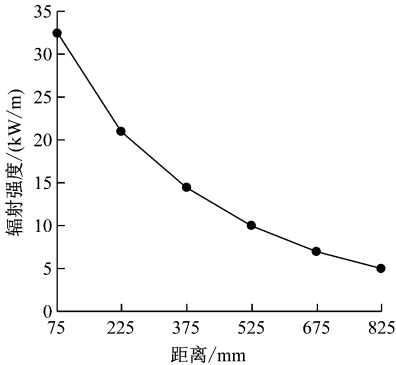


图 2 BS 476-7:1997 标准的辐射热流要求

等级按 BS 476-7:1997 标准达到 Class 1 时,材料着火后 1.5 min 的火源传播距离和最终平均火源传播距离相差  $\leq 165 \text{ mm}$ ;参照 ISO 5658-2:2002 标准的方法,将其转化为  $Q_{CHF}$ ,约为  $25 \text{ kW/m}^2$ 。对于大多数材料而言,BS 6853:1999 标准要求材料防火阻燃等级达到 Class 1,EN 45545-2:2013 要求  $Q_{CHF} \geq 20 \text{ kW/m}^2$ 。可见,对于火焰蔓延性能,BS 6853:1999 标准要求略高于 EN 45545-2:2013 标准要求。

2 点燃性指标

点燃性主要考核非金属材料在空气中的易燃程度,也是材料防火性能评价的基本指标。TB/T

表 2 BS 476-7:1997 中的防火阻燃等级划分要求

防火阻燃等级	1.5 min 的火焰传播距离/mm		整个测试的火焰传播距离/mm	
	平均限值	任意 1 个样品限值	平均限值	任意 1 个样品限值
Class 1	≤165	≤165 + 25	≤165	≤165 + 25
Class 2	165 < • ≤215	165 + 25 < • ≤215 + 25	165 < • ≤455	165 + 25 < • ≤455 + 25
Class 3	215 < • ≤265	165 + 25 < • ≤265 + 25	455 < • ≤710	165 + 25 < • ≤710 + 25
Class 4	> 265	> 265 + 25	> 710	> 710 + 25

3237—2010 标准和 TB/T 3138—2018 标准根据不同材质的材料采用不同的测试标准,通过考核氧指数  $I_o$  来评价样品点燃性能;EN 45545-2:2013、DIN 5510-2:2009、BS 6853:1999 均采用了 ISO 4589-2:2017《塑料-通过氧指数测定燃烧性 第 2 部分 环境温度试验》测试标准,通过考核  $I_o$  来评价样品点燃性能。此外,EN 45545-2:2013 还采用了 ISO 2592:2000《燃点和闪点测试-克利夫兰开口杯法》、ISO 2719:2016《闪点测试-宾斯基马丁闭口杯法》、EN 60695-2-11:2014《防火试验-第 2-11 部分 基于灼热/发热丝的试验方法 最终产品灼热丝燃烧试验》等测试标准,通过燃点、闪点及灼热丝温度等指标来评价样品的点燃性能。

本文以 ISO 4589-2:2017 为基准,对 EN 45545-2:2013、DIN 5510-2:2009、BS 6853:1999 等 3 个防火标准的防火要求进行对比分析。根据 EN 45545-2:2013 标准要求,HL1 和 HL2 等级车辆的材料  $I_o \geq 28\%$ , HL3 等级车辆的材料  $I_o \geq 32\%$ 。根据 BS 6853:1999 标准要求,II 等级车辆的材料  $I_o \geq 28\%$ , Ia 及 Ib 等级车辆的材料  $I_o \geq 34\%$ 。根据 DIN 5510-2:2009 标准,所有等级车辆的材料均  $I_o \geq 28\%$  (含电气小零件)。TB/T 3237—2010 标准和 TB/T 3138—2018 标准均要求车辆材料  $I_o$  至少大于 28%,甚至达到 35%。

总体来说,EN 45545 标准对不同材料点燃性的要求不同,其要求更全面更具体。若忽略测试条件不同,仅以  $I_o$  要求来看,BS 6853:1999 标准的要求高于 EN 45545-2:2013 标准的要求,其他防火标准要求基本一致。

3 热释放指标

材料热释放的大小直接反映材料燃烧快慢及其规模,对于火灾的发展至关重要。EN 45545-2:2013 标准首次要求按 ISO 5660-1:2002《对火反应试验-热释放、烟雾和质量损失率 第 1 部分 热释放速率(锥形量热仪法)》标准使用锥形量热仪进行热

释放测量,并将热释放指标纳入防火标准,将其作为材料防火性能考核指标之一。

根据 ISO 5660-1:2002 标准,先将试样置于规定的 0 ~ 100 kW/m<sup>2</sup> 的外部辐照度条件下,通过测量其燃烧时的氧气浓度和排气流量,运用耗氧原理计算材料燃烧过程中的热释放速率,同时还能测量材料引燃时间、质量损失等燃烧指标。

TB/T 3237—2010、TB/T 3138—2018、DIN 5510-2:2009 和 BS 6853:1999 等标准对材料的防火性能要求均未考虑热释放指标。将热释放指标作为材料考量因素,将会对现有车辆材料防火性能产生一定影响。从热释放指标来看,EN 45545-2:2013 标准对材料的防火要求相对更全面。

4 烟密度指标

材料烟密度是影响人员安全疏散的重要指标。TB/T 3237—2010、TB/T 3138—2018、EN 45545-2:2013、DIN 5510-2:2009 和 BS 6853:1999 等标准,采用了不同的测试方法来限定材料烟密度指标。具体的烟密度测试方法及评价指标如表 3 所示。

GB/T 8323. 2—2008《塑料 烟生成 第 2 部分 单室法测定烟密度试验方法》等同采用 ISO 5659-2:2006《塑料 烟生成 第 2 部分 单室法测定烟密度试验方法》。在 0.51 m<sup>3</sup> 的 NBS(美国国家标准局)规定烟箱中,将样品暴露在特定外加辐射情况下,使之产烟,然后根据式(1)计算材料烟密度。

$$D_s = 132 \lg\left(\frac{100}{T}\right)$$

(1)

$$D_{VOF4} = D_s(1) + D_s(2) + D_s(3) + \frac{D_s(4)}{2}$$

式中:

- $T$ ——透光率;
- $D_s(4)$ ——第 4 min 时的烟密度;
- $D_{s,max}$ ——当透光率  $T$  达到最小值时的烟密度;
- $D_{VOF4}$ ——前 4 min 内的特定烟密度累计值。

BS 6853:1999 要求将样品放在 27 m<sup>3</sup> 烟箱中

表 3 烟密度测试方法及评价指标

防火标准	测试标准 或方法	测试条件	评价指标
EN 45545-2:2013	ISO 5659-2:2006	50 kW/m <sup>2</sup> + 无焰或 25 kW/m <sup>2</sup> + 有焰	第 4 min 时烟密度 $D_s(4)$ 、前 4 min 烟密度累计值 $D_{VOF4}$ 、整个过程最大烟密度 $D_{s,max}$
BS 6853:1999	27 m <sup>3</sup> 烟箱法	1 L 酒精火源、0.5 kg 软木炭	明火阶段烟密度 $A_{0,ON}$ 、引燃阶段烟密度 $A_{0,OFF}$ 、整个过程最大烟密度 $A_{0,max}$
DIN 5510-2:2009	DIN 54837:2007	丙烷气体	未达到 SR1、SR1、SR2
TB/T 3237—2010	GB/T 8323.2—2008	引燃、无引燃	第 1.5 min 时烟密度 $D_s(1.5)$ 、第 4 min 时烟密度 $D_s(4)$
TB/T 3138—2018	GB/T 8323.2—2008		第 4 min 时烟密度 $D_s(4)$

进行测试。先将分解产生的烟尘收集在烟箱中,再通过烟尘对光的遮蔽性来分析材料的产烟密度  $A_0$ 。

$$A_0 = A_m \times V / (k \times l)$$

式中:

- $A_m$ ——测试箱中的烟密度;
- $V$ ——测试箱体积,取 27 m<sup>3</sup>;
- $l$ ——测试箱中光程,取 3 m;
- $k$ ——构成测试样品的数量。

根据材料试验时产烟模式不同, $A_0$  分为  $A_{0,max}$ 、 $A_{0,ON}$ 和  $A_{0,OFF}$ 进行考核。试验火源为软木炭,则材料会全部处于引燃状态产烟,此时按照整个过程  $A_{0,max}$ 来考核;试验火源为酒精,则材料会有两个产烟过程,此时考核明火状态产烟模式下的  $A_{0,ON}$ 和火源燃尽后阴燃状态产烟模式下的  $A_{0,OFF}$ 。

根据 DIN 54837:2007 标准要求,在排烟管道中设置测光系统,通过监测烟道的光衰减来评价样品在特定条件下的产烟性能。

DIN 5510-2:2009 标准要求对材料的烟密度与火焰蔓延性能同时测试。材料的烟密度与燃烧性能有很大关系。大部分可燃性等级为 S4 的材料,其阻燃性能较好,一般能达到 SR2 等级。

表 4 不同标准的标准烟箱法测试方法及评价指标

防火标准	测试标准	测试条件	气体收集时间	气体分析方法	评价指标
EN 45545-2:2013	ISO 5659-2:2006	25 kW/m <sup>2</sup> + 有焰或 50 kW/m <sup>2</sup> + 无焰	4 min 和 8 min	傅里叶红外分析法	毒性指数 $C_{IG,G}$
DIN 5510-2:2009	ISO 5659-2:2006	25 kW/m <sup>2</sup> + 有焰	4 min 和 8 min	傅里叶红外分析法	毒性指数 $F_{ED}$
BS 6853:1999	ISO 5659-2: 2006、EN 2824: 2012、EN 2825: 2010、EN 2826:2011	25 kW/m <sup>2</sup> + 有焰	烟密度最大值的 85% 时	传统化学方法分析,如离子色谱、光谱等	毒性指数 $R$
TB/T 3237—2010	GB/T 8323.2—2008	引燃、无引燃	1.5 ~ 4.0 min	红外分析、比色管、湿化学法	每种气体单独限值

毒性考核指标计算公式如下:

$$C_{IT,G} = 0.0805 \times \sum_{i=1}^{i=8} \frac{c_i}{C_i}$$

$$F_{ED}(t_{zul}) = \frac{(C_{IT,4} + 0.5C_{IT,8}) \times 4 + C_{IT,8} \times (t_{zul} - 8)}{30}$$

$$R = \sum_{i=1}^{i=8} \frac{c_i}{f_i}$$

式中:

$C_{IT,G}$ ——EN 45545-2:2013 中,气体收集时间为  $G$  时的毒性考核指标;

$F_{ED}(t_{zul})$ ——DIN55/0-2:2009 中的烟毒性指标;

$c_i$ ——测量的气体  $i$  的质量浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$C_i$ ——标准气体  $i$  的参考质量浓度(EN 45545-2:2013 标准),  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$f_i$ ——BS 6853:1999 标准中气体  $i$  的参考质量浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$t_{zul}$ ——DIN 5510-2:2009 标准规定的允许暴露时间, min。

EN 45545-2:2013 与 BS 6853:1999 标准规定的气体取样时间不同,气体分析方法不同,无法直接进行比较。EN 45545-2:2013 与 DIN 5510-2:2009 标准规定的测试方法较相似,只是测试条件和考核指标不同。EN 45545-2:2013 对墙板及顶板等处的大部分材料要求:HL2 等级车辆材料的  $C_{IT,G} \leq 0.9$ , HL3 等级车辆材料的  $C_{IT,G} \leq 0.75$ 。按照最高等级 HL3 的最低要求  $C_{IT,G} = 0.75$ ,计算 DIN 5510-2:2009 标准规定的毒性指标  $F_{ED}$ ,得到  $F_{ED} = 0.7$ ,而根据 DIN 5510-2:2009 标准,  $F_{ED} \leq 1$  即为合格。

从测试经验来看,  $25 \text{ kW}/\text{m}^2$  + 有焰模式与  $50 \text{ kW}/\text{m}^2$  + 无焰模式两种测试条件相比,大多数情况下后者产生的 8 种气体浓度相对高。因此,若不考虑测试条件差异,对于 HL2 等级和 HL3 等级的车辆材料,EN 45545-2:2013 标准的要求略高于 DIN 5510-2:2009 标准要求。

TB/T 3237—2010 标准只规定了每种气体的限值,而不对其进行综合评价,无法与其他标准进行比较。

## 5.2 基于质量的管式炉分解法

对于一些用量较少的材料(如密封胶、线圈等),EN 45545-2:2013 和 BS 6853:1999 标准规定,采用 NF X 70-100:2006 标准规定的管式炉分解法来评价材料烟毒性。根据 NF X 70-100:2006 规定,将约 1 g 样品放在石英舟上,将石英舟置于一定温度的石英管中,然后通  $120 \text{ L}/\text{min}$  干燥空气,测试

40 min,根据不同的气体采取不同的方式收集和分析气体,最终折算成相应毒性指标  $C_{NLP}$ 。

$$C_{NLP} = \rho_0 \times \sum_{i=1}^{i=8} \frac{Y_i}{C_i}$$

式中:

$Y_i$ ——测量的气体  $i$  的质量浓度;

$\rho_0$ ——折算气体质量浓度,取  $1 \text{ g}/\text{m}^3$ 。

其中,  $C_i$  在 BS 6853:1999 标准中也作为气体参考质量浓度。EN 45545-2:2013 与 BS 6853:1999 标准相比,样品分解的产烟方式和计算方式均一致,但  $C_i$  取值不同。相比 EN 45545-2:2013 标准,BS 6853:1999 标准对各种气体的限定浓度比较低。从这角度来看,BS 6853:1999 标准的要求高于 EN 45545-2:2013 标准要求。

## 6 建议

1) 防火技术标准的制定与实施是减少火灾发生、保障列车运行安全的基础。经比较,我国防火标准对材料防火性能指标要求不够全面。因此,我国应借鉴欧盟标准理念,结合现有车辆实际情况及未来防火技术发展需求,形成适应我国轨道交通发展的防火标准体系。

2) 2018 年,泛欧铁路网已开始强制实施欧盟标准 EN 45545-2:2013。近年来,我国远销国外的轨道交通车辆日益增多,为了避免出现“EN 45545-2:2013 防火墙”,建议基于 EN 45545-2:2013 标准,对现有轨道交通车辆材料进行符合性测试,并开展材料防火优化设计研究,为执行 EN 45545-2:2013 标准的轨道交通车辆项目进行技术储备。

## 参考文献

- [1] 欧洲标准委员会. 轨道交通 铁道车辆的防火保护 第 1 部分 总则: EN 45545-1:2013 [S]. 布鲁塞尔: 欧洲标准委员会, 2013.
- [2] 欧洲标准委员会. 轨道交通 铁道车辆的防火保护 第 2 部分 材料和零部件防火性能要求: EN 45545-2:2013 [S]. 布鲁塞尔: 欧洲标准委员会, 2013.
- [3] 德国标准化研究所车辆标准委员会. 铁路车辆预防防火 第 1 部分 防火等级、防火技术措施及验证: DIN 5510-1: 1988 [S]. 柏林: 德国标准化研究所车辆标准委员会, 1988.
- [4] 德国标准化研究所车辆标准委员会. 铁路车辆预防防火 第 2 部分 材料部件燃烧特性-分类、要求和检验方法: DIN 5510-2: 2009 [S]. 柏林: 德国标准化研究所车辆标准委员会, 2009.
- [5] 英国运输防火技术委员会. 旅客列车设计和结构防火实施法规: BS 6853: 1999 [S]. 伦敦: 英国运输防火技术委员会, 1999.

(收稿日期: 2018-03-21)