

Research Article

The Analysis of The Heat Release Rate Determination of a Subway Train

Daxi Sun¹, Chenxia Jia^{2, *}

¹Department of Mechatronics and Information Engineering, Sichuan University of Architectural Technology, Deyang, China

²School of Intelligent Construction and Environmental Engineering, Chengdu Qingong Polytechnic University, Chengdu, China

Abstract

Accurately determining the heat release rate (HRR) of metro trains serves as a core prerequisite for investigating metro tunnel fire behaviors and carrying out fire safety design of urban rail transit. To clarify the reasonable range of HRR for metro tunnel fire research, this paper selects a typical Type-B metro train as the research subject. After comprehensively sorting out and counting all combustible materials inside the middle carriage as well as their respective mass parameters, two research methods including Fire Dynamics Simulator (FDS) numerical simulation and HRR statistical calculation are adopted to analyze the thermal output characteristics of a fire originating in the middle carriage of a single train. A refined geometric model matching the actual carriage structure is built with practical boundary conditions and fire working conditions to simulate the complete fire evolution from initial ignition to full combustion. The calculation results indicate that the peak heat release rate of the Type-B metro middle carriage reaches 17.6 MW. The research conclusions can offer reliable theoretical references and basic data for flame retardant design of metro vehicles, ventilation and smoke exhaust system design of tunnels, as well as the establishment of tunnel fire emergency disposal schemes.

Keywords

Heat Release Rate, Numerical Simulation, Oxygen - consumption Method, Mass Loss Rate Method

地铁车体火灾火源功率确定分析

孙大玺¹, 贾琛霞^{2*}

¹四川建筑职业技术大学机电与信息工程系, 德阳, 中国

²成都轻工职业技术大学智能建造与环境工程学院, 成都, 中国

*Correspondence: Chenxia Jia (chenxiajia@163.com)

Received: 15 June 2026; Accepted: 14 July 2026; Published: 13 August 2026



Copyright: © The Author(s), 2026. Published by Science Publishing Group. This is an **Open Access** article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

摘要

科学合理确定地铁列车火灾火源功率,是开展地铁隧道火灾动力学演化规律分析、消防系统设计及安全防控研究的核心前提与关键技术基础。针对当前 B 型地铁列车火源功率取值缺乏精准量化依据的问题,本文以典型 B 型地铁列车为研究对象,在系统梳理并核定列车中部车厢内部各类可燃物种类、材料属性及实际装载用量的基础上,采用火灾动力学模拟(FDS)数值计算与火源功率统计分析相结合的方法,开展列车车厢火灾发展特性与热释放速率规律研究。通过构建真实车厢几何模型、设置合理火灾场景与边界条件,模拟火灾从引燃、发展至充分燃烧的全过程,量化分析火灾热释放速率变化特征。研究表明:B 型地铁列车中部车厢火灾稳定燃烧阶段的火源功率极大值为 17.6 MW,该数值可作为该车型火灾安全设计的关键热释放速率参考值。研究成果可为地铁车辆防火阻燃设计、隧道通风排烟系统优化及火灾应急救援方案制定提供科学依据与数据支撑。

关键词

火源功率,数值模拟,耗氧法,质量损失法

1. 引言

地铁作为重要的城市交通工具,为人们出行提供了便利。由于城市地面布局的限制,地铁常常在地下隧道内运行。由于地铁隧道的相对密封性,一旦地铁在隧道内发生火灾将比在地面上发生火灾容易造成更加严重的后果[1, 2]。地铁车体火源功率直接决定着地铁隧道火灾发展的速度和规模,是评价火灾危险性的重要参数。科学合理确定地铁列车的火源功率是地铁隧道火灾研究的关键问题。地铁隧道火灾火源功率的确定是基于隧道内可燃物的种类、用量、特性及分布情况等具体情境。已有的关于地铁车体火源功率方面的研究成果[3-6],均是针对某一特定工况展开的。实际火灾发生时,往往是某一可燃物先被点燃,热辐射作用下再引燃其周围其它可燃物,进而导致火势蔓延扩大。可燃物搭配形式复杂多样,故实际发生火灾的火源功率会随着起火原因、火源性质、发生火灾的位置、火场布置等现场情况而变化。因此合理确定地铁车体火灾火源功率的取值区间,对隧道火灾方面的研究有重要的参考价值。

本文首先调研了地铁B1型车体一节车厢内可燃物的种类、数量、设置位置等基础数据,接着通过数值模拟方法研究确定了地铁车体火灾发生时火源功率。最后,基于车厢内所有可燃物的燃烧特性,从统计角度保守估计一节地铁车厢的火源功率,从而为地铁火灾研究的发展提供参数保证。

2. 火源功率的测定原理

火源功率是指单位时间内释放的热量,也称为热释放速率。火源功率受火灾荷载、材料的燃烧性能、通风条件

等因素的影响。火源功率的测定原理主要有质量损失法和耗氧法。

质量损失法是指利用测得的质量损失率和燃烧热值来计算可燃物的火源功率方法,可以由式(1)得到。

$$Q = \Phi \times \dot{m} \times \Delta H \quad (1)$$

式(1)中, Q 是火源功率; Φ 是燃烧效率因子; $\dot{m}$ 是可燃物质量燃烧速率; ΔH 指可燃物热值,是燃料在完全燃烧情况下确定。燃烧效率因子 Φ 受火灾现场气流速度、温度、布局等多种因素的影响。可燃物质量燃烧速率 $\dot{m}$ 是指燃烧样品在燃烧过程中质量随时间的变化率,它反应了材料在一定火强度下的热裂解、挥发及燃烧程度。试验中可以通过数据采集系统直接测定试样的质量损失,并换算为试样的质量损失率。

耗氧法是基于氧耗原理的火源功率测定方法。Burgessand Wheeler发现在低燃限附近一摩尔燃料的燃烧热几乎相同。氧热原理几乎适用于所有固体,燃烧消耗1kg氧气约放出13.1MJ热量。所以在实际测试中,测定出燃烧体系中氧气的变化,就可换算出材料的燃烧放热即火源功率。

$$Q = E(m_{O_{2,\infty}} - m_{O_2}) \quad (2)$$

式(2)中, E 是耗氧燃烧热值,约为13.1MJ/kg,不同材料间的耗氧燃烧热值 E 偏差为5%; $m_{O_{2,\infty}}$, m_{O_2} 为测定末时和初始时氧气的质量。

随着计算机仿真的发展运用,火源的火源功率也有通过建立数学模型的方式获取。目前常用的火源模型包括 t^2

模型、 t^2 稳定模型、双 t^2 模型、双 t^2 稳定模型等。火灾研究及工程应用中，一般采用 t^2 模型描述火灾变化规律， t^2 火通常不考虑火灾的前期酝酿期，如阴燃阶段，即认为火灾从有效燃烧时算起，于是火源功率公式可以简化为：

$$Q = at^2 \tag{3}$$

式(3)中， a 为火灾增长系数，kW/s； t 为火灾持续时间。NFPA[7, 8]分类中， t^2 火又进一步分为慢速型、中速型、快速型和超快速型四种类型。各自的火灾增长系数分别未0.002931、0.01127、0.04689、0.1878。

3. 地铁车厢物理模型及火灾载荷分析

B型地铁列车的尺寸为19.0m*2.8m*3.8m，车厢材质[9]为经防腐处理碳素结构钢，外壁涂漆。车厢外侧墙、端墙板间以及内外顶板间均敷设矿棉。图1是地铁中段一节车体的内部照片。车厢内顶板、内侧墙板均用外露表面喷漆的铝板。地板表面铺设3mm厚橡胶地板布，其下是18mm厚蜂窝铝地板，中间通过聚氨酯胶粘贴。车窗采用中空玻璃。司机前窗和门玻璃均为钢化玻璃。地铁车厢内沿着客室侧墙长度方向布置座位42个，材质为聚酯玻璃钢。



图1 B型地铁列车内部布置。

B型地铁车体所使用的可燃物品主要包含地板布、电缆、灯罩、保温材料、密封胶条等，制作这些物品所用的材质主要为橡胶、低烟无卤辐照交联阻燃聚烯烃、PC板、福乐斯、三元乙丙橡胶等。用经查阅相关技术资料获得了地铁车体的主要可燃物及其单位热值，并列于表1中，经计算得到整节车厢完全燃烧总放热量11 899.26MJ。通过对表1中的数据进行观察发现其中地板布、折棚、电缆和线卡的放热量占总放热量的比重比较大，它们的放热量总和占到了全车总放热量的68.1%。

表1 地铁车体的主要可燃物。

部件	材料	热值 (kJ·kg ⁻¹)	整车用量 /kg	完全燃烧总放热 /MJ	燃烧放热量占总体放热量百分比/%
灯罩	PC 板	27634	12.2	337.13	2.8
地板布	橡胶	13160	240	3158.4	26.5
聚氨酯胶（地板布下）	聚氨酯聚合物	21149	20	422.98	3.6
风道、空调机组保温材料	福乐斯	16948	39.7	672.84	5.7
折棚	硅橡胶	23444	52.6	1233.15	10.4
吊环	尼龙 66	29995	8.2	245.96	2.1
连接框、前档、后档密封胶条、装饰胶条等	三元乙丙橡胶 EPDM	16517	47.9	791.16	6.6
车下（电线卡、线管卡、接头）	改性聚酰胺	28540	60	1712.4	14.4
电缆	低烟无卤辐照交联阻燃聚烯烃	17367	115	1997.21	16.8
车体油漆（底漆）	亮克威泽油漆	11235	70.6	793.19	6.7
车体油漆（面漆）	亮克威泽油漆	18192	29.4	534.84	4.5
总计				11899.26	100

4. 基于 FDS 数值模拟实验的地铁车体火源功率确定分析

随着计算机仿真的发展运用,火灾模拟的方法被广泛应用于各类火灾研究中。其中,火灾动态模拟仿真(FDS)软件其中比较成熟的一款[10-14]。FDS软件的流体动力学模型,数值求解热驱动下低速流动的N-S方程,其核心算法为显式预估校正方案,时间和空间采用二阶精度,湍流采用Smagorinsky形式的大涡模拟,在足够细的网格下能实施直接模拟,采用拉格朗日粒子法追踪洒水和燃料喷雾模型。在燃烧模型方面,FDS采用混合物燃烧模型。该模型假设燃烧混合控制,燃料和氧气反应速度无限快。主要反应物和生成物的质量分数通过“状态关系”从混合物分数中得到,通过简单分析和测量的结合得到经验表达式。辐射传热传递通过求解非扩散气体的辐射输运方程得到,求解采用有限体积法。



图2 B型地铁车厢模型。

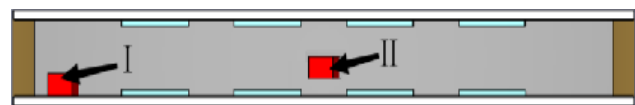


图3 火源位置示意图。

为研究引火火源位置和火源功率不同时,B型地铁车体的燃烧的火源功率,建立了地铁车体三维模型,如图2所示。火源的面积为 0.5 m^2 ,设置位置见图3。在图3中,火源I:火源功率 $20\text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,设置于车厢前部;火源II:火源功率 $25\text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$,设置于车厢中部。数值模拟结果见图4和图5。

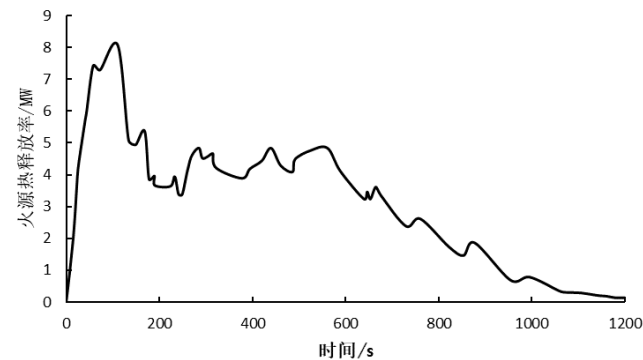


图4 模型车燃烧热释放效率(20MW火源,位于车厢前部)。

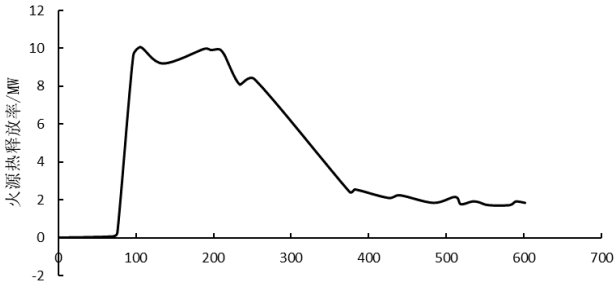


图5 模型车燃烧热释放效率(25MW火源,位于车厢中部)。

从图4可以看出,当火源位于地铁列车前端时,燃烧发生了116s时,热释放速度达到了最大 8.07 MW 。从图5可以看出,火源位于列车车厢中部时,燃烧发生了105s,热释放速率达到了最大 10.05 MW 。由此可见,引火火源规模相同的情况,火源位置不同时,引燃其他可燃物的顺序不同,火源蔓延的趋势也不同,火源热释放速率结果也差别很大。

5. 基于氧热法地铁车体火源功率统计法分析

地铁车体的主要可燃物的燃烧特性实验是研究的基础。表1列出了B型地铁车体所用的主要可燃物及其热工性质。可燃材料火源功率的测试可以通过锥形量热仪进行测量,如图6所示。地铁列车中的可燃物遵循氧热原理。锥形量热仪测量材料火源功率的原理是:利用锥形量热仪测将材料燃烧或分解释放的所相有产物收集起来并经过排气管道排出,气体经过充分混合后,精确的测出气体的流速和氧气的浓度,通过计算可以获得燃烧过程中消耗的氧气的量,运用氧热原理,那么就可以计算得到材料火源功率。



图6 锥形量热仪外观图。

由于可燃材料火源功率是火灾研究的基础,大量基于可燃物的燃烧试验在大量不同的实验室展开,试验数据见

诸文献资料[15]。B型地铁车厢内的主要可燃物的用数量及其的燃烧特性参数，列于表2中。

表 2 B 型地铁车体主要可燃物使用数量及燃烧特性参数。

部件	材料	火源功率/(kw·m ⁻²)	单车面积/m ²
灯罩	PC 板	553	15.2
地板布	橡胶	286	53.2
聚氨酯胶（地板布下）	聚氨酯聚合物	423	53.2
风道、空调机组保温材料	福乐斯	151	87.4
折棚	硅橡胶	125	76.9
吊环	尼龙 66	877	9.2
连接框、前档、后档密封胶条、装饰胶条等	三元乙丙橡胶 EPDM	417	41.2
车下（电线卡、线管卡、接头）	改性聚酰胺	913	0.9
电缆	低烟无卤辐照交联阻燃聚烯烃	240	2.3
车体油漆（底漆）	亮克威泽油漆	250	197.6
车体油漆（面漆）	亮克威泽油漆	157	197.6

火源功率统计法对地铁轰然时的火源功率进行计算，已有研究结论证明该方法用于对整车火源功率进行快速计算是可行[16, 17]。火源功率统计法，首先需要确定整车所有燃物材料的表面积和燃烧性能参数，整节车体的最大火源功率应为车体所使用的可燃物的火源功率总值峰值之和，即17.6MW。

6. 结论

本文以国内主流 B 型地铁列车单节中部车厢为研究对象，系统统计车厢内部地板布、电缆、保温材料、密封胶条等全部可燃物的材质类型、使用质量、燃烧热值及单位面积热释放参数，完整核算车厢总火灾荷载，明确地板布、电缆、折棚与线束卡件为控制车厢总放热量的核心可燃构件，四类材料总放热量占车厢完全燃烧总放热的 68.1%。分别采用 FDS 火灾动力学数值模拟与基于耗氧原理的可燃物热释放速率统计计算两种方法开展耦合分析：FDS 仿真结果表明，起火位置直接决定车厢火灾峰值热释放速率，中部车厢起火工况下火灾蔓延更快、峰值放热显著高于端部起火；依托锥形量热仪试验数据与氧热法理论建立可燃物放热叠加统计模型，保守核算得到单节 B 型地铁中部车厢充分燃烧阶段峰值热释放速率可达 17.6 MW。

两种方法相互印证，形成一套可复用的地铁车厢火灾热释放速率定量测算流程，解决了现有研究中火源热释放

速率取值工况单一、缺乏整车可燃物量化支撑的问题。研究得到的 17.6 MW 峰值热释放速率可作为 B 型地铁隧道火灾仿真、通风排烟系统设计、车辆内饰阻燃选材、区间火灾应急疏散预案编制的标准化基础参数，同时为同类城市轨道交通车辆火灾危险性评估、防火规范优化提供数据支撑与参考思路。

参考文献

[1] 于伟, 陈肖, 梁秋彦, 等. 基于缩尺试验的地铁区间隧道火灾顶板下烟气纵向及竖向温度分布规律 [J]. 城市轨道交通研究, 2026, 29(5): 48-56. <https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.20250899>

[2] 孙勇, 田鑫, 刘彦彤, 等. 系列化中国标准地铁主要部件对车辆火灾热释放速率的影响研究 [J]. 机车电传动, 2022 (2): 15-20. <https://doi.org/10.13890/j.issn.1000-128X.2022.02.003>

[3] 王盟, 徐宇工, 胡仁, 等. 地铁列车中可燃物热释放速率的测定 [J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(9): 47-49.

[4] 陈斯, 苏钊颐, 陶涛, 等. 多区域地铁车厢火灾烟气蔓延特性的数值仿真研究 [J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(7): 5-10.

[5] Na Z, Dan Z. Impact of the heat release rate to the flow characteristics of fire smoke in subway tunnel under the effect of piston wind [C]// IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation. IEEE, 2016.

- [6] Lei Wenjun, Li Angui, Tai Chuanmin. The Effect of Heat Release Rate on the Environment of a Subway Station [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 3717-3720.
- [7] National Fire Protection Association. Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways [S]. Massachusetts: National Fire Protection Associations, 2010.
- [8] National Fire Protection Association. NFPA 130-2023 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems [S]. Quincy: NFPA, 2023.
- [9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 38262-2019 客车内饰材料的燃烧特性 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [10] 李景瑞, 符凌. 计算机房火灾危险性与烟气蔓延的 FDS 模拟及规律研究 [J]. *华北科技学院学报*, 2020, 17(01): 63-70.
- [11] 袁东升, 卢晓通, 钟福平. 基于 FDS 的老旧商场火灾模拟及疏散方案 [J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(4): 25-31.
- [12] Verda V, Borchellini R, Cosentino S, et al. Expanding the FDS Simulation Capabilities to Fire Tunnel Scenarios Through a Novel Multi-scale Model [J]. *Fire Technology*, 2021, 57(3): 2491-2514.
- [13] Wang B. Comparative Research on FLUENT and FDS's Numerical Simulation of Smoke Spread in Subway Platform Fire [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26(1): 1065-1075.
- [14] Wu Z, Peng M, Zhou Y, et al. Study on the smoke evolution mechanism of a subway tunnel with a multi-door carriage fire under longitudinal ventilation [J]. *Fire and Materials*, 2024, 48(3): 380-393. <https://doi.org/10.1002/fam.3190>
- [15] 全国消防标准化技术委员会. 建筑材料火源功率试验方法: GB/T 16172—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 姚小林, 陈俊敏. 旅客行李对高速客车车厢火源热释放速率的影响研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(2): 51-56.
- [17] 陈贻来. 单个小汽车火灾热释放速率影响因素分析 [J]. *消防科学与技术*, 2010, 29(5): 379-382.