

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-690-05

# 运行速度对高速列车火灾热释放速率的影响

刘方吉<sup>1</sup> 毕海权<sup>1</sup> 高慧翔<sup>2</sup> 曾清珣<sup>1</sup> 王菁<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031)

**【摘要】** 高速列车着火后继续行驶的安全性对列车火灾应急救援具有重要意义, 而列车运行速度是影响火势的关键因素。列车携带火源行驶时会形成迎风气流, 因此列车在行驶过程中的热释放速率和列车在静止状态下的热释放速率相差很大。以某型二等座车厢为研究对象, 运用 FDS 数值模拟方法, 对高速列车在 30km/h~80km/h 时速下运行时的热释放速率进行研究。研究表明: 列车火灾热释放速率峰值随着列车运行速度的提高而增大; 列车火灾增长速率总体上随着列车运行速度的提高而增大。

**【关键词】** 列车火灾; 运行速度; 热释放速率; 数值模拟

中图分类号 U292.91+4/U453.4 文献标识码 A

## Influence of Running Speed on the Fire Heat Release Rate of High-speed Train

Liu Fangji<sup>1</sup> Bi Haiquan<sup>1</sup> Gao Huixiang<sup>2</sup> Zeng Qingxun<sup>1</sup> Wang Jing<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. China Railway Eryuan Engineering Co., Ltd, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** The safety of high-speed trains to continue running after a fire is of great significance to train fire emergency rescue, and train running speed is a key factor affecting the fire. When the train carries a fire source, an upwind airflow is formed. Therefore, the heat release rate of the train during running is very different from the heat release rate of the train in a stationary state. This paper takes a certain type of second-class carriage as the research object and uses the FDS numerical simulation method to study the heat release rate of high-speed trains running at speeds of 30km/h to 80km/h. The research results show that the peak value of train fire heat release rate increases with the increase of train running speed; the train fire increasing rate generally increases with the increase of train running speed.

**【Keywords】** Train fire; Running speed; Heat release rate; Numerical simulation

## 0 引言

近年来, 随着我国经济的持续快速发展, 高速列车的安全运营越来越受到人们的重视。由于高速列车内部空间封闭、人员密集, 一旦发生火灾, 极易造成群死群伤事故, 产生严重后果。因此, 世界各国对列车防火安全都提出了很高的要求。高速列车着火后, 应急救援原则是尽可能将高速列车行驶至安全地点再组织乘客疏散逃生。高速列车继续行

驶时产生的空气流场必然会对着火车厢内火灾燃烧过程产生影响, 一方面, 空气流动可以为客室内的燃烧提供更多的新鲜空气; 另一方面, 高速行驶的列车产生的空气流场也可能会带走较多热量, 增加火灾燃烧区域的热量损失, 进而降低可燃物的燃烧速率。因此, 列车着火后继续行驶, 既有风险, 又具有一定的合理性, 其关键在于列车的运行速度对着火列车安全性的影响。

作者简介: 刘方吉 (1995-), 男, 硕士, E-mail: 690883375@qq.com

通讯作者: 毕海权 (1974-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2021-01-07

热释放速率是描述列车火灾过程最重要的参数, 它体现了火灾中能量释放的多少, 是决定列车火灾危险性的重要因素。火灾热释放速率是可燃物燃烧时单位时间内释放出的热量<sup>[1]</sup>, 大部分可燃物燃烧时, 热释放速率随时间发生变化<sup>[2]</sup>。在火灾现场中, 它能够表征火灾的大小, 预测火焰蔓延速度<sup>[3]</sup>、热量及烟气产生量, 提供可用于安全疏散的时间以及扑灭火灾可采取的最有效方法等信息, 同时, 火灾热释放速率也是比较火灾行为以及评价火源对附近其他可燃物影响最可靠的数据。在火灾数值模拟中, 火场的能见度<sup>[4]</sup>、温度场、氧气浓度、烟气层高度、火羽流的卷吸特性<sup>[5]</sup>等参数都是以火灾热释放速率为基础进行计算的。在消防工程设计中确定火灾热释放速率的变化规律可以定量评估分析建筑物的火灾危险性。在消防性能化设计<sup>[6]</sup>中的关键步骤是火灾场景的设定以及定量分析火灾发生过程, 这些都是以热释放速率随时间变化为基础而展开的, 热释放速率设定越接近实际情况, 计算得到的结果越准确可靠。因此, 在我国铁路事业高速发展的情况下, 进行高速列车热释放速率<sup>[7]</sup>研究具有非常重要的现实意义。

本文在以某型二等座车厢为研究对象, 采用美国国家标准与技术研究室发布的 FDS 火灾动态模拟软件, 对高速列车在不同时速 30km/h~80km/h 运行时的热释放速率大小进行研究。

## 1 数值计算模型

### 1.1 数值模型

如图 1 和图 2 所示分别为某型二等座车厢客室断面和平面布局。车厢尺寸为 24.175m×3.257m×3.890m, 座椅采用 2+3 布置, 定员 85 人, 两侧墙上设置 6 个紧急逃生窗, 如图 3 车辆侧视图所示。

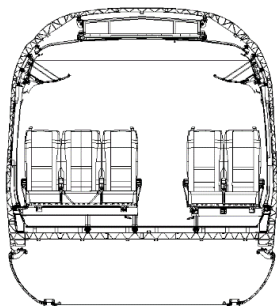


图 1 客室断面图

Fig.1 Section map of the passenger compartment

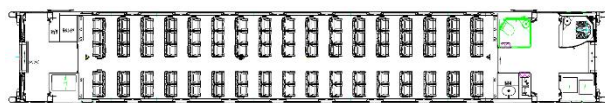


图 2 客室平面布局

Fig.2 Layout of the passenger compartment

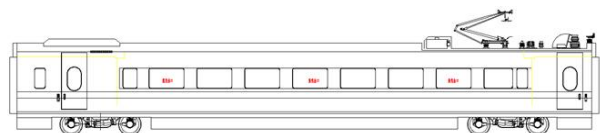


图 3 车辆侧视图

Fig.3 Side view of the vehicle

高速列车内部构成极其复杂, 拥有大量零部件。其可燃烧的部分主要包括木地板、座椅、侧墙板、顶板、间壁、电子线路等。本文主要建立了车厢内部空间的物理模型。最终, 运用 FDS 建立的高速列车仿真模型如图 4 所示。

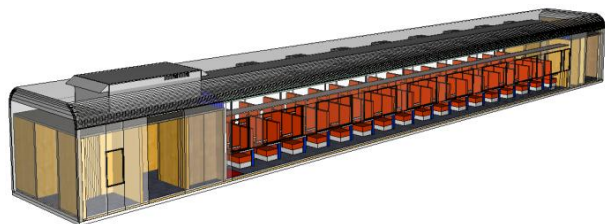


图 4 列车客室火灾数值计算模型

Fig.4 Numerical calculation model of the train compartment fire

### 1.2 材料参数



图 5 锥形量热仪结构及外形

Fig.5 Cone calorimeter schematic structure and actual view

锥形量热仪 (cone calorimeter) 是 20 世纪 80 年代早期美国国家标准与技术研究院开发的一种基于耗氧原理的实验室尺度材料燃烧行为测试仪器, 如图 5 所示。锥形量热仪具有精度较高、参数

测定值受外界因素影响小、与大型实验结果相关性好等优点，被广泛应用于火灾科学领域的研究。锥形量热仪可以检测到燃烧样品的多个性能参数，如点燃时间（TTI）、热释放速率（HRR）、热释放速率峰值（PHRR）、热释放速率峰值对应时间（T）、总释热量（THR）、质量损失速率（MLR）、比消光面积（SEA）、有效燃烧热（EHC）以及相关燃烧气体的毒性和腐蚀性等<sup>[8]</sup>。因此，本文采用符合ISO5660国际标准的锥形量热仪作为材料燃烧特性测试的标准实验方法。



图6 样品材料实验测试

Fig.6 Experimental test of sample materials

所用实验样品面积尺寸均为10cm×10cm，厚度为车体的真实厚度。实验过程中除了样品顶面露置在空气中外，其余各面均用铝箔包覆。实验前，将样件放置在23℃、相对湿度50%环境下调节48小时至质量恒定（质量变化小于0.1g）。如图6所示，在实验进行时，对样品照射加热，使其燃烧。

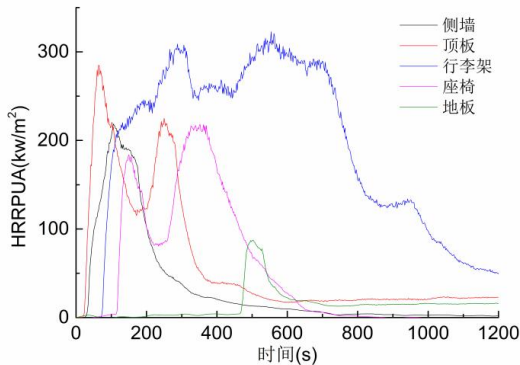


图7 主要可燃材料单位面积热释放速率曲线

Fig.7 Heat release rate curve of main combustible materials per unit area

高速列车客室内装材料比较复杂，同一部件不同区域材料组成也不尽相同，例如，侧墙采用的防

寒材在不同部位可能选用不同材料。为简化计算模型，本文主要考虑座椅、侧墙板、顶板、地板及间壁等占比较大、对客室火灾蔓延有重要作用的可燃材料。锥形量热仪测试得到主要可燃材料单位面积热释放速率曲线如图7所示。

### 1.3 网格尺寸与计算域

本文采用的是FDS湍流模型中的大涡模拟，网格尺寸应小到足以包含大涡运动的湍流尺度。但是，受计算机资源限制，过小的网格尺寸会导致计算时间增长，过大的网格尺寸不能保证计算结果的精确性。在进行火灾数值模拟之前，需要对网格尺寸进行评估分析。

在火灾模拟中，需要精确的模拟出火灾场中的温度分布、蔓延情况及热释放速率变化等关键参数，因此，模拟的网格需要足够精细。FDS软件用户指南给出了火灾特征直径的估计值 $D^*$ ：

$$D^* = \left[ \frac{Q}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right]^{2/5} \quad (1)$$

式中， $D^*$ 为火源特征直径，m； $Q$ 为总热释放速率，kW； $\rho_\infty$ 为环境空气密度，此处取1.204kg/m<sup>3</sup>； $C_p$ 为环境空气比热，此处取1.005，kJ/kg·K； $T_\infty$ 为环境空气温度，K； $g$ 为重力加速度，m/s<sup>2</sup>。

由式(1)可知，影响火灾特征直径 $D^*$ 的关键参数为火灾热释放速率 $Q$ 。火灾特征直径 $D^*$ 随火灾热释放速率增大而增大。

许多学者对网格尺寸的选取进行了研究，如胡隆华<sup>[9]</sup>在隧道火灾研究中心将网格尺寸取在0.1~0.12 $D^*$ 之间。YZ Li<sup>[10]</sup>在利用FDS对瑞典SP全尺寸地铁列车火灾实验进行数值计算研究中将网格尺寸取为0.1m，计算值与实验结果比较相符。参考以上研究，本文决定将网格尺寸设为0.08m。

高速列车燃烧过程中，车厢内热烟气与车厢周围新鲜空气相互交换，故计算区域也是影响列车火灾数值计算的一个重要因素。为保证计算结果的准确性，需将开口处的计算区域向外延展适当距离。王升<sup>[11]</sup>通过对不同计算区域扩展量时我国高速列车火灾热释放速率的计算表明，当列车外计算区域扩展至1.5m后，继续扩展计算区域对火灾热释放速率的影响较小。本文参考其研究结果来确定高速列车客室火灾计算区域的设置。如图8所示为本文高速列车火灾数值计算模型计算区域设置示意图。



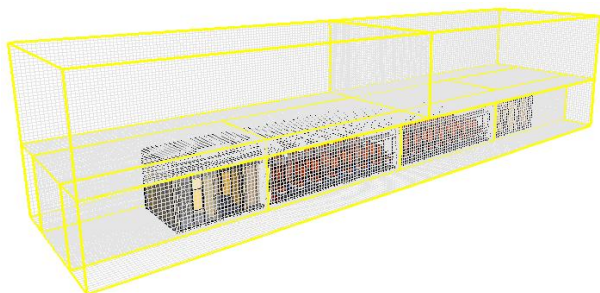


图 8 计算区域设置

Fig.8 Calculation locale

利用 FDS 中的 supply 边界即进口速度边界条件来模拟高速列车运行时从列车周围扰流的空气速度场。高速列车运行过程中车门均关闭, 为考虑空气流场与车厢内燃烧的相互作用, 考虑实际情况中可能出现乘客击碎列车逃生窗的情形, 将列车火源附近的逃生窗全部打开。

## 2 数值计算结果及分析

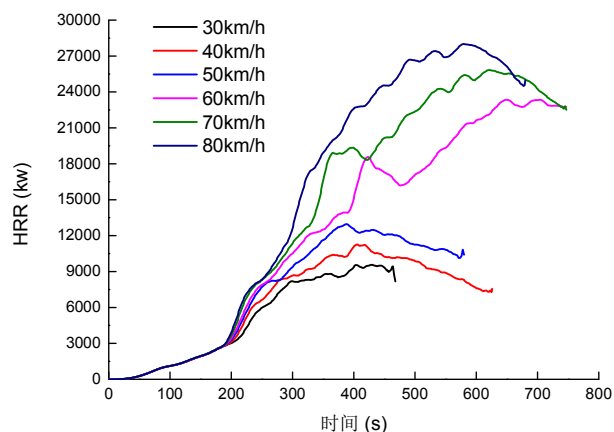


图 9 不同运行速度下列车火灾热释放速率图

Fig.9 Heat release rate diagram of train fire under different running speed

如图 9 所示为计算得到的各运行速度下列车客室火灾热释放速率曲线。从图中可以看出, 0~200s 时各运行速度下的热释放速率增长趋势几乎一致, 200s 之后各运行速度下列车热释放速率曲线可以明显地分为两类: 30km/h、40km/h、50km/h 时火灾热释放速率曲线较为接近, 60km/h、70km/h、80km/h 时的火灾热释放速率曲线也较为接近。以 80km/h 时的火灾热释放速率曲线为例, 火灾热释放速率曲线明显可以分为两个阶段: 初期增长阶段和快速增长阶段。0~200s 即为初期增长阶段, 火

灾热释放速率在这段时间内增长速度较慢, 热释放速率始终保持在较低水平, 200s 时热释放速率仅仅为 2.96MW。200s 后火灾逐渐进入快速增长阶段, 热释放速率急剧上升, 最终在 590s 左右达到峰值 28MW。同时热释放速率曲线表明列车客室火灾在快速增长阶段热释放速率近似呈线性增长, 增长速度极快。

如图 10 所示为不同运行速度下列车火灾热释放速率峰值以及相邻两运行速度间的热释放速率峰值增加率曲线。从图中可以看出, 30km/h~80km/h 运行速度下的列车火灾热释放速率峰值分别为 9.56MW、11.2MW、12.9MW、23.3MW、25.8MW 和 28MW。以 60km/h 为界线, 运行速度大于等于这一数值时的列车火灾热释放速率峰值超过了低于这一数值时的两倍。同时, 热释放速率峰值随着列车运行速度的提高而增大。从图 10 中还可以看出, 运行速度在 30km/h~50km/h 时, 火灾热释放速率峰值的增加率较低, 即这三种不同运行速度下热释放速率的峰值较为接近, 同样的规律在 60km/h~80km/h 这个运行速度区间内也有体现。但是, 当运行速度由 50km/h 提高到 60km/h 时, 火灾热释放速率峰值急剧增加。这和图 9 中热释放速率曲线明显分为两类的结论相符合。

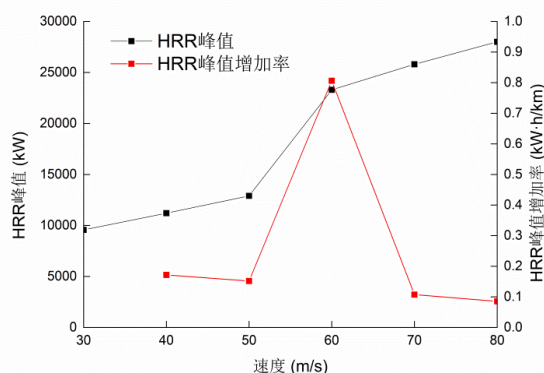


图 10 速度-HRR 峰值/HRR 峰值增加率

Fig.10 Sspeed-HRR peak/HRR peak increase rate

将热释放速率达到峰值的 20%~80% 这一阶段视为火灾快速增长阶段, 分别得到各运行速度下列车在火灾快速增长阶段的热释放速率增长速率如图 11 所示。从图中可以看出, 尽管 70km/h 时的火灾增长速率比 60km/h 时要低, 但列车火灾增长速率总体上随着列车运行速度的提高而增大。

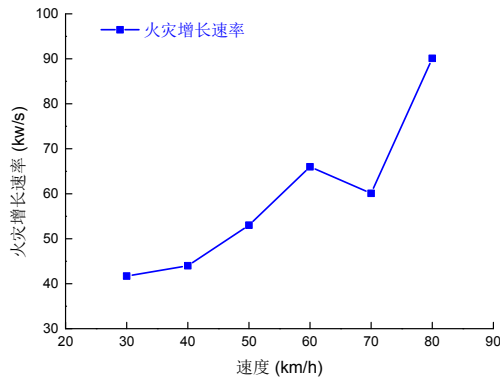


图 11 速度-火灾增长速率  
Fig.11 Speed-Fire growth rate

### 3 结论

通过对高速列车在 30km/h~80km/h 时速下运行时的热释放速率进行研究，可以得出以下结论：

(1) 列车在 30km/h~80km/h 时速下运行时的火灾热释放速率峰值分别为 9.56MW、11.2MW、12.9MW、23.3MW、25.8MW 和 28MW。

(2) 列车火灾热释放速率峰值随着列车运行速度的提高而增大。

(3) 运行速度在 30km/h~50km/h 时，列车火灾热释放速率的峰值较为接近，同样的规律在 60km/h~80km/h 这个运行速度区间内也有体现，当运行速度由 50km/h 提高到 60km/h 时，火灾热释放速率峰值急剧增加。

(4) 尽管 70km/h 时的火灾增长速率比 60km/h 时要低，但列车火灾增长速率总体上随着列车运行

速度的提高而增大。

### 参考文献：

- [1] 张山虎.动车组列车火灾安全分析与评估研究[D].成都:西南交通大学,2011:24-32.
- [2] 李娜,张艳,华宇东,等.外界风场对高铁车厢行李火灾发展的影响[J].中国安全科学学报,2020,30(12):141-147.
- [3] 张俊伟.基于 FDS 的纵向多窗口火焰蔓延模拟研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2016.
- [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] 赵媚.溢出火羽流卷吸理论研究[C].高等学校工程热物理全国学术会议,2013:11.
- [6] 谭采星.某商业综合体消防性能化设计探讨[J].工程技术研究,2020,5(11):205-206.
- [7] 管文鑫,朱国庆.通风因子对火灾热释放速率影响的数值模拟[J].消防科学与技术,2014,(8):853-856.
- [8] 王庆国,张军,张峰.锥形量热仪的工作原理及应用[J].现代科学仪器,2003,(6):36-39.
- [9] 胡隆华.隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D].合肥:中国科学技术大学,2006.
- [10] LI Y Z. CFD modelling of fire development in metro carriages under different ventilation condition[R]. SP Report, 2015:86.
- [11] 王升.高速列车车厢内火灾燃烧特性研究[D].成都:西南交通大学,2017:27-28.