

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-621-08

非着火车厢空调运行对火灾时人员疏散影响研究

张华锦 毕海权

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 地铁火灾是地铁运营中危险性最大的事故。车厢内着火时, 火灾烟气将会通过贯通道蔓延到非着火车厢内, 因此需要对火灾烟气加以控制。空调系统作为地铁车厢内环境调控的重要系统, 空调运行对火灾时车厢内温度场和烟气流动具有重要影响。目前已有规范明确规定火灾时着火车厢内空调控制方法, 而针对非着火车厢空调系统在火灾时的控制存在空白。以某地铁为例, 通过 FDS 建立三节地铁车厢, 计算行李起火情况下相邻车厢空调运行对车厢内烟气流动的影响。将火灾的计算结果导入疏散计算中, 建立耦合火灾烟气流动的人员疏散, 分析了相邻车厢空调运行对人员接触温度、能见度、FED 值的影响, 研究结果表明: 火灾时, 相邻车厢空调系统运行可降低相邻车厢内人员接触温度、FED 值, 提高人员能见度, 相邻车厢空调系统运行时有利于提高相邻车厢人员疏散过程中的安全性。

【关键词】 地铁车辆火灾; 空调系统; 人员安全疏散; 数值模拟
中图分类号 TU298.4 文献标志码 A

Study on The Influence of Air Conditioning Operation on Fire Evacuation in Non-fire Carriage

Zhang Huajin Bi Haiquan

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Subway fires are the most dangerous accidents in subway operations. In the event of a fire in the train, the fire smoke will spread to the non-burning car through the throughway, so it is necessary to control the fire smoke. As an important system for environmental regulation in subway cars, the operation of air conditioning has an important impact on the temperature field and smoke flow in the train during fire. At present, there are specifications that clearly stipulate the control method of air conditioning in the fire compartment during fire, but there is a gap in the control of the air conditioning system in the non-fire compartment during the fire. In this paper, we take a subway as an example, and use FDS to build three subway cars, and calculate the influence of air conditioning operation in adjacent cars on the flue gas flow in the carriage under the condition of baggage fire. In this paper, the calculation results of the fire are introduced into the evacuation calculation, the personnel evacuation coupled with the fire smoke flow is established, and the influence of the air conditioning operation of the adjacent carriage on the contact temperature, visibility and FED value of the personnel is analyzed, and finally it is concluded that the operation of the air conditioning system of the adjacent carriage is conducive to improving the safety of the personnel evacuation process of the adjacent carriage during the fire.

【Keywords】 Subway Vehicles Fire; Air conditioning system; Personnel safety; Numerical simulation

作者简介: 张华锦 (1999-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1441773712@qq.com

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

收稿日期: 2024-04-06

0 引言

地铁给城市交通带来便利的同时,运营的安全问题也愈发凸显。地铁火灾是地铁运营中危险性最大的事故,火灾烟气中有毒气体人吸入后会中毒,同时火灾烟雾会造成人员能见度下降,人在烟气围困下容易产生恐慌情绪,人员的安全逃生更加困难。

目前国内外学者对车辆火灾和火灾时人员疏散开展了大量研究,研究方法主要为实验和数值模拟。杜红兵、戚宜欣等人^[1]利用缩尺寸试验研究方法,研究了发生火灾时车厢内烟气的流动特性及温度场分布规律。Mariano La'zaro^[2]通过全尺寸燃烧实验和数值模拟结合的方式,研究了当车辆发生火灾时,车辆的空调系统与排烟系统运行对车厢内烟气控制效果。赵轶、邢文典、程友鹏等^[3-5]利用 FLUENT 和 FDS 研究了车辆火灾车厢内烟气控制策略。苟琦林^[6]基于 FDS 研究了行李架对高速列车客室火灾的影响。张昊等^[7]通过在地铁站台进行火灾实体试验,研究了空调送风对火灾烟气流速、烟气温度的影响,发现空调运行降低了烟气温度和上升速度,引燃火源产生的烟气难以上升至吊顶。刘辰^[8]利用 Pathfinder 研究了地铁车厢内结构对人员疏散的影响,揭示了车门数量及宽度、扶手设计方案、座椅排列方式对人员疏散过程的影响规律,提出了有利于地铁车辆疏散时的设计建议。李盎等^[9]通过数值模拟研究了人员移动载荷对车厢火灾和人员疏散的影响。王松等^[10]研究了隧道火灾时人员紧急疏散。李琦等人^[11]开展了火灾时隧道内三节车厢的疏散研究,研究表明当着火车厢为中间车时,人员疏散难度更大,火灾时风险更高。

地铁车辆发生火灾后,人员需立即疏散到相邻车厢。由于地铁车辆不同车厢之间无防火门,火灾烟气将从着火车厢蔓延到其他车厢,因此需对着火车厢内产生的火灾烟气加以控制。空调系统作为车厢内环境调控的重要系统,空调是否运行对车厢内温度场和烟气分布具有重要影响。地铁的不同车厢之间空调系统相互独立,两者送风过程互不影响,火灾时空调系统可单独控制。着火车厢内空调系统的控制可依据相关规范:《城市轨道交通车辆防火要求》CJ/T 416-2012 中 5.9.6 规定,火灾探测报警系统应与空调系统联动控制,火灾报警后,应停止有关部位的空调送风;而非着火车厢空调系统火灾

时控制策略相关规范中并无明确要求,相关研究也存在空白。本文通过数值模拟的方法,分析火灾时非着火车厢内空调系统运行对人员疏散安全的影响,为相关规范和应急策略提供参考。

1 模型设置

1.1 火灾模型设置

(1) 模型设置

在 FDS 内,根据某地铁车厢实际结构建立地铁列车火灾数值计算模型,车厢尺寸为 22.80m×3.08m×2.10m。地铁车厢内主要包含顶板、侧墙板、座椅、拉环等部件,单节地铁车厢结构如图 1 所示。为研究相邻车厢与着火车厢内火灾时车厢内烟气流动,本文设置地铁车辆火灾模型共包含三节车厢。地铁车辆火灾数值计算模型如图 2 所示。本文采用 FDS 中 HRRPUA 法进行火灾数值计算,在数值计算中,通过锥形量热仪和燃点材料仪器测试得到顶板、侧墙、地板、座椅等地铁车辆主要部件材料的输入参数。

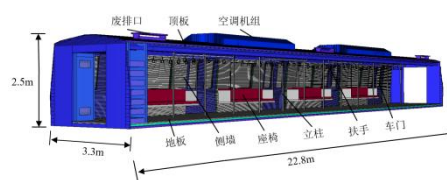


图 1 单节地铁车辆火灾计算模型

Fig.1 Calculation model of single subway vehicle fire

(2) 火源设置

由于我国地铁存在严格的安检,人为纵火的可能性发生较小,因此本文火源设置起火原因为行李起火,火源功率参考 EN45545^[12]中点火模式 5,其中火灾发生前 2min,热释放速率为 75kW,随后热释放速率增加到 150kW 并稳定燃烧 8min。列车火灾时疏散的相关研究表明^[11]:当火源位于中间车厢时,人员疏散过程更困难。而在着火车厢内,发生行李起火的典型位置包括车厢端部角落和车厢中部,若车厢中部发生火灾时,烟气可向着火车厢两端迅速蔓延,烟气蔓延范围更大,火灾烟气影响的人员数量更多,因此火源位于中部地板时火灾危险性更大。因此本文设置火源位置位于中间车厢的中部地板。

(3) 网格设置

FDS 湍流模型采用大涡模拟,网格尺寸应小到

足以包含大涡运动的湍流尺度。因此为保证数值计算准确性, 在进行火灾数值模拟之前, 需要对网格尺寸进行评估分析。FDS 软件用户指南^[13]中给出了特征直径的计算公式:

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

式中: D^* 为特征直径, m; Q 为火灾热释放速率, kW; ρ_∞ 为环境密度, kg/m^3 ; T_∞ 为环境温度, K; c_p 为定压比热, kJ/kg ; G 为重力加速度, m/s^2 。

保证火源功率满足特征尺寸计算要求即可满足整车火灾计算要求, 带入本文火源功率, 得到特征直径为 0.45m。以往车辆火灾研究表明^[5], 当计算网格尺寸选取 $0.05D^* \sim 0.15D^*$ 时, 火灾模拟计算结果与火灾实验结果能较好的吻合, 因此本文网格尺寸为 0.06m, 总的网格计算量为 580 万。

(4) 边界条件设置

地铁火灾发生在隧道时, 其火灾风险更高, 因此本文中地铁车辆火灾场景设定于隧道内。模型四周边界条件采用 Inert 热惰性边界, 两端采用可热质交换的 OPEN 开放边界。初始车内环境温度设置为 20°C , 压力值为标准大气压。着火车辆在人员疏散前火灾发展时间越长, 火灾风险越高, 越容易造成人员伤亡。因此考虑地铁车辆刚离开上一地铁站后着火, 站间距取 2km 计算, 车辆以 $1.0\text{m}/\text{s}^2$ 加速达到 $80\text{km}/\text{h}$ 后匀速行驶, 靠近下一站后以

$1.2\text{m}/\text{s}^2$ 减速后, 则着火地铁在 109s 后抵达下一车站, 此时打开非着火车厢的单侧车门疏散乘客。

(5) 空调系统设置

本文中空调系统的机组形式为车顶单元式机组, 送风类型为下送下回, 单个机组空调模式下送风量为 $5000\text{m}^3/\text{h}$, 经计算后得到车厢送风口风速为 $0.83\text{m}/\text{s}$, 送风温度设置为 20°C 。车厢内发生火灾时, 车辆空调系统回风阀关闭, 送风为全新风模式, 以防止空调回风吸入烟气后将烟气送入非火灾区域。

1.2 疏散模型设置

(1) 模型设置

地铁车辆疏散模型参照火灾计算模型 1:1 建立, 模型共包含三节车厢, 模型内包含地板、扶手、座椅、立柱、电气柜等结构。车门的净宽度为 1.4m, 着火车厢内人员的疏散过程为人员首先向相邻车厢移动, 随后 109s 时地铁车门开启, 人员从非着火车厢车门离开地铁车厢则视为完成疏散。将火灾计算结果导入疏散模型后, 最终得到耦合火灾烟气流动计算的地铁疏散模型。本文分析空调运行对火灾时人员疏散安全影响时, 分别取着火车厢中部、着火车厢端部、相邻车厢中部、相邻车厢两端共计 5 个典型区域进行分析。为减少计算结果受选取人员的随机性影响, 采用各区域内 10 名人员在疏散过程中的接触温度、能见度和 FED 值的平均值进行分析。

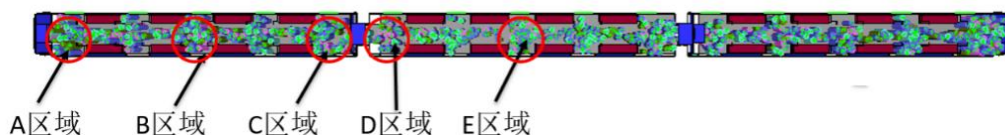


图 2 地铁疏散模型

Fig.2 Subway evacuation model

(2) 人员参数设置

在本文研究中, 待疏散人员总数设置如下: 地铁单节车厢在标准乘客状况下 (即额定乘客容量 AW2) 乘客总数为 305 人, 三节车辆待疏散人员总数为 915 人。在地铁火灾疏散模拟研究中, 不同年龄、性别的人员比例对疏散效率的影响是一个重要的考量因素。年龄和性别差异会导致人员在疏散过程中的行为特征和能力有所区别, 从而影响整体的疏散速度和安全性。根据王驰^[14]对地铁人员组成的

调研结果, 设置地铁疏散过程中人员比例如表 1 所示。本文基于《中国成年人人体尺寸》(GB 10000-88) 和《中国未成年人人体尺寸》(GBT 26158-2010) 中的肩宽数据, 以第 50 百分位数人体最大肩宽数值的均值, 作为疏散模拟中人员肩宽的输入条件。人员移动速度参考王驰^[14]在北京地铁二号线的地铁疏散实测数据。不同年龄和性别的人员参数设置结果如表 1 所示。

表 1 地铁疏散中的人员设置

类别	比例	移动速度/(m/s)	肩宽平均值/cm
成年男性	50%	1.25	43.1
成年女性	40%	1.05	39.7
老年男性	2%	0.76	43.1
老年女性	3%	0.76	39.7
青少年男性	3%	0.76	38.0
青少年女性	2%	0.76	37.2

1.3 人员安全判断标准

(1) 接触温度

人员接触空气温度过高会导致热冲击（中暑）和烧伤。在空气温度达到或高于 100℃时，人一般只能忍受几分钟，但是人员一般无法呼吸 65℃的空气^[15]。美国有轨列车及铁路客运体系标准 NFPA 130^[16]中指出，人员身体接触到的烟气温度不得高于 70℃。本文设定接触温度的安全标准为，人员特征高度处接触温度应低于 65℃。

(2) 能见度

能见度是影响人员疏散的重要因素之一，当烟气层降至人员高度后，在低能见度的条件下，人员行走速度下降。澳大利亚《消防工程师指南》规定，火灾情况下，小空间应保证的最低能见度为 5m，大空间为 10m。NFPA 130^[16]及我国《地铁设计规范》^[17]规定火灾时逃生环境内的烟气能见度不得低于 10m。本文研究对象为地铁车厢，属于密闭狭长空间，因此设定人员疏散路径上能见度低于 5m 时则达到影响人员安全疏散的危险标准。

(3) FED 值

当 CO、CO₂ 对人员健康有主要威胁作用的气

体浓度达到一定阈值时，将引发人体产生不适，轻则眩晕、呕吐，严重为丧失活动能力甚至死亡。Pathfinder 将额外计算 FED 值（失效计量分数）来衡量 CO、CO₂、O₂ 的体积分数变化对人体产生的影响，计算公式如公式（2），FED 值对人体影响^[18]如表 2。

$$FED_{tot} = FED_{CO} \times VCO_2 + FED_{O_2} \quad (2)$$

式中：FED_{CO} 为 CO 浓度积累与时间的函数。

表 2 FED 值对人体影响

FED 值	对人体威胁严重程度
FED < 0.3	轻微损害身体机能
0.3 < FED < 0.7	中等损害身体机能
0.7 < FED < 1	严重损害身体机能
1 < FED	丧失疏散能力，死亡

2 计算结果

2.1 车厢内温度分布

疏散过程车厢内温度分布计算结果如表 3 所示。109s 时，此时地铁车门即将打开，车厢内已积攒大量高温、有毒有害烟气，相邻车厢空调系统关闭时，部分烟气已经通过贯通道蔓延到相邻车厢，相邻车厢顶部空间温度上升至 30℃；相邻车厢空调开启时，火灾产生的烟气主要集中于着火车厢内部，少量烟气蔓延到相邻车厢与贯通道连接处。200s 时，相邻车厢人员已疏散完成，着火车厢人员逐渐通过贯通道向相邻车厢疏散，空调运行时，相邻车厢内烟气温度和烟气分布范围更小。240s 时，大多数人员已经完成疏散，此时空调运行时，相邻车厢除靠近着火车厢区域外，温度均保持在 20℃。

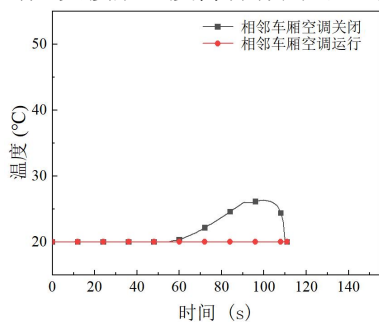
表 3 疏散过程中车厢内温度分布

Table 3 Temperature distribution in the carriage during evacuation

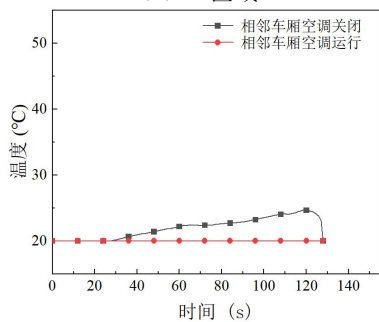
时间	空调状态	计算结果	温度示意图
109s	空调关闭		
	空调运行		
200s	空调关闭		
	空调运行		
240s	空调关闭		
	空调运行		

2.2 接触温度

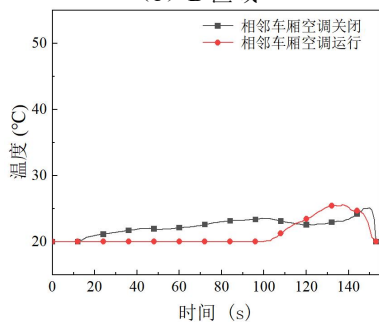
图 3 为耦合火灾后人员接触温度计算结果。A、B、C、D 区域人员均在 150s 前完成疏散, E 区域人员需等相邻车厢人员完成疏散后才能进行疏散, 因此该区域人员完成疏散时间更长, 平均完成疏散时间为 250s。其中, A、B 区域相邻车厢空调运行时, 人员接触温度始终保持在 20℃, 相邻车厢空调关闭时, 人员接触温度略有上升, 人员最大接触温度在 25℃左右; C 区域在 100s 前, 空调运行能使人员接触温度保持在 20℃, 随后由于着火车厢内烟气向相邻车厢蔓延, 人员接触温度逐渐上升。D、E 区域人员前期在着火车厢内时, 人员接触温度迅速上升, E 区域人员接触温度最高达 60℃, 随后人员向相邻车厢移动后, 接触温度逐渐下降; 在 D、E 区域, 疏散前期相邻车厢空调运行时人员接触温度均有下降, 疏散后期随着火源烟气的累积, 空调运行对人员接触温度降低作用可忽略。



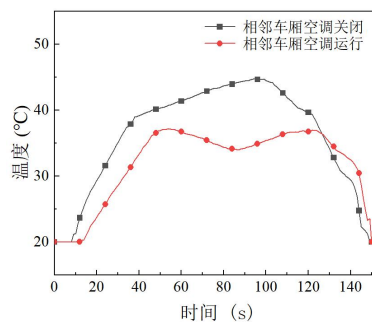
(a) A 区域



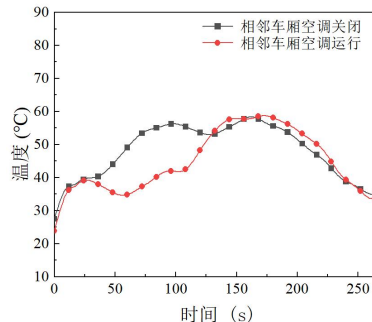
(b) B 区域



(c) C 区域



(d) D 区域



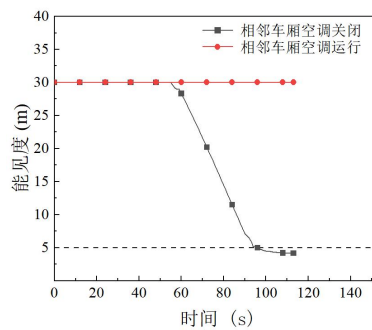
(e) E 区域

图 3 不同区域人员接触温度变化

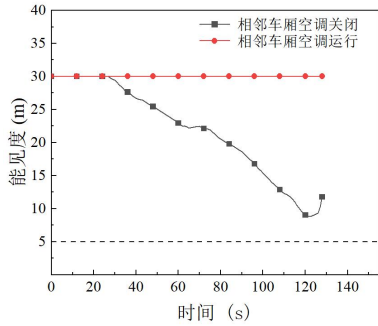
Fig.3 Change of contact temperature of personnel in different regions

2.3 能见度

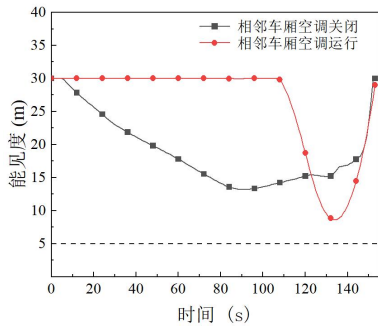
疏散过程中不同区域人员能见度变化计算结果如图 4 所示。相邻车厢空调运行时, A、B 区域的人员疏散过程中能见度始终保持在 30m, C 区域人员能见度在 110s 后逐渐下降, 130s 后随着人员靠近出口后能见度逐渐回升; 相邻车厢空调关闭时, A、B、C 区域人员疏散过程中能见度均出现下降, C 区域最靠近着火车厢其能见度下降时间最早, A 区域位于相邻车厢端部, 烟气撞击端墙后出现下沉, 因此 A 区域能见度较低, 90s 后该区域人员能见度下降至 5m 以下。D、E 区域位于着火车厢内, 相邻车厢空调运行对其能见度影响较小, D、E 区域人员在疏散过程中, 能见度均将至 5m 以下。



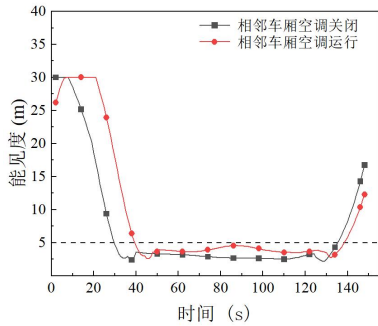
(a) A 区域



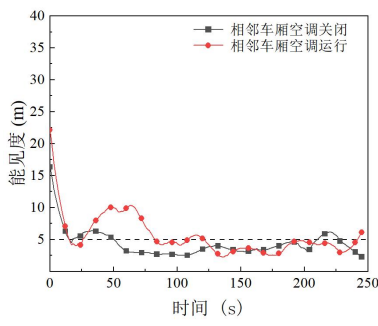
(b) B 区域



(c) C 区域



(d) D 区域



(e) E 区域

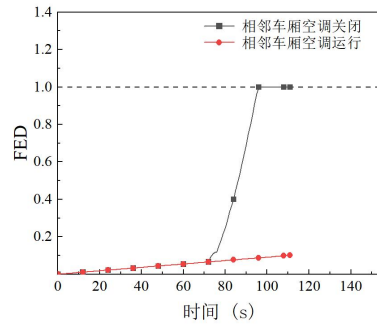
图4 不同区域人员能见度变化

Fig.4 Changes of personnel visibility in different regions

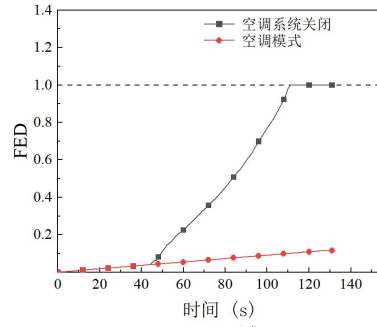
2.4 FED 值

图5为不同区域人员疏散中累积的FED值计算结果。在A、B、C区域，相邻车厢空调运行时人员FED值均在1.0以下，其中A、B区域FED

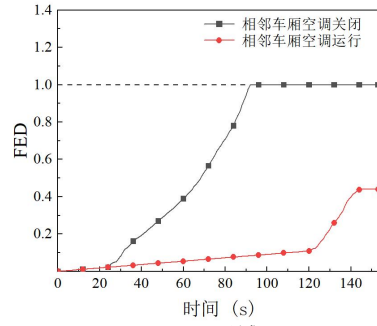
值在0.3以下，人体会因为吸入火灾烟气受到轻微伤害，C区域FED值为0.5，人员身体机能将会受到中等程度损害；相邻车厢空调关闭时，人员FED值均快速上升，100s前人员FED值均已超过1.0，人员无法安全疏散。C、D区域位于着火车厢内部，人员受火源产生的有毒有害烟气影响较大，相邻车厢空调运行和关闭时，人员FED值均迅速上升，50s前人员FED值已超过1.0。



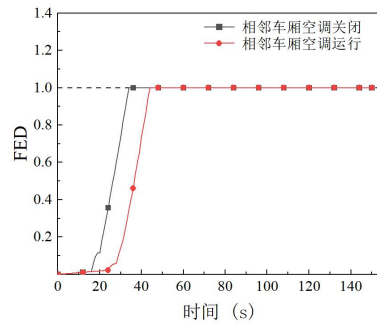
(a) A 区域



(b) B 区域



(c) C 区域



(d) D 区域

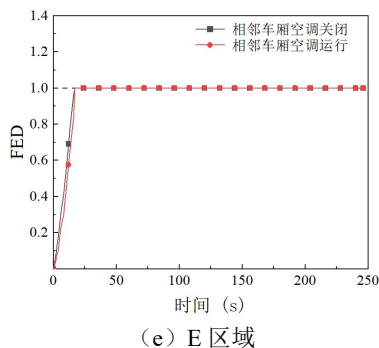


图 5 不同区域人员 FED 值计算结果

Fig.5 Calculation results of FED value for people in different regions

表 4 火灾时不同区域人员疏散安全性判断

Table 4 Safety judgment of evacuation in different areas during fire

区域	空调运行模式	必需安全疏散时间/s	温度危险临界时间/s	能见度危险临界时间/s	FED 危险临界时间/s	疏散安全性判断
A	空调关闭	115	—	97	96	危险
	空调运行	114	—	—	—	安全
B	空调关闭	130	—	—	111	危险
	空调运行	129	—	—	—	安全
C	空调关闭	153	—	—	92	危险
	空调运行	153	—	—	—	安全
D	空调关闭	149	—	30	34	危险
	空调运行	152	—	40	43	危险
E	空调关闭	249	—	19	16	危险
	空调运行	250	—	21	16	危险

3 结论

本文通过数值模拟的方法,对火灾时相邻车厢空调运行对车厢内人员疏散安全性进行分析,得到的主要结论如下:

(1) 相邻车厢空调运行时,火源产生的烟气在相邻车厢扩散的区域更小,相邻车厢在贯通道处存在高温烟气。相邻车厢空调关闭时,相邻车厢内顶部空间均出现烟气分布。

(2) 相邻车厢空调运行时,相邻车厢内人员的接触温度和烟气累积的 FED 值均下降,能见度得到提升,人员安全性提升;着火车厢内人员接触温度、能见度、FED 值受相邻车厢空调运行影响作用可忽略。

(3) 通过比较人员疏散的必需时间和火灾时各指标到达危险的时间可得,火灾时,相邻车厢空

2.5 人员安全性判断

在火灾情形下,人员的必需安全疏散时间必须少于接触温度、能见度和 FED 到达危险的时间,否则人员处于危险状态,无法完成疏散。表 4 为火源为 150kW 不同区域人员疏散安全性判断。相邻车厢空调运行时, A、B、C 区域人员可以安全疏散,相邻车厢空调关闭时, A、B、C 区域人员 FED 均不能满足安全疏散,人员会因吸入过量火灾有毒有害烟气而造成机体损伤。在着火车厢 D、E 区域,相邻车厢空调运行或关闭时,人员 FED 和能见度迅速达到危险标准,人员无法安全疏散。

调运行时,相邻车厢内人员到达危险时间延长,人员安全性提高。

综上所述,在地铁车厢内行李起火时,非着火车厢空调运行可提高相邻车厢内人员安全性。

参考文献:

[1] 杜红兵,戚宜欣,袁绪忠,等.运行列车车厢内火灾烟气特性与温度场分布的实验研究[J].中国铁道科学,1999,20(3):31-37.

[2] Lázaro M, Lázaro D, Cortabarría E, et al. Innovations for smoke management in passenger trains[J]. Journal of Fire Sciences, 2020,38(2):194-211.

[3] 赵轶.地铁火灾烟气数值模拟及通风控制[D].大连:大连交通大学,2009.

[4] 邢文典.八达岭长城站列车火灾危险性及人员安全疏

- 散研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [5] 程友鹏.高速列车车厢火灾烟气迁移规律及防控技术优化研究[D].成都:四川师范大学,2020.
- [6] 苟琦林,毕海权,李盎.基于 FDS 的行李架对高速列车客室火灾影响的研究[J].制冷与空调,2019,33(2):103-107.
- [7] 张昊,赵金勇,李金龙,等.空调通风工况地铁站台初期火灾烟气运动规律[J].消防科学与技术,2011,30(8):679-682.
- [8] 刘辰.基于安全疏散驱动的地铁列车旅客界面布局优化设计研究[D].成都:西南交通大学,2022.
- [9] 李盎,毕海权,秦萍,等.基于移动载荷引燃的高速列车火灾人员安全疏散研究[J].制冷与空调,2019,33(3):337-342.
- [10] 王松,王子云,梁园,等.某公路隧道火灾烟气流动和人员疏散模拟分析[J].制冷与空调,2015,29(4):374-379.
- [11] 李琦,王明年,于丽.长大铁路隧道火灾模式下人员疏散试验研究[J].中国铁道科学,2015,36(6):78-84.
- [12] 欧洲标准化委员会(CEN).铁路设施.铁路车辆的防火保护.第 5 部分:包括无轨电车,轨道导向的巴士和磁悬浮车辆在内的电气设备的消防安全要求: EN45545-5[S]. 2015.
- [13] McGrattan K, McDermott R, Hostikka S, et al. Fire Dynamics Simulator user's guide[M]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology(NIST), 2021.
- [14] 王驰.某地铁站火灾情况下人员安全疏散研究[D].北京:北京交通大学,2007.
- [15] 于恒.基于火灾动力学与人群疏散模拟的地铁车站火灾安全疏散问题研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [16] 李国辉.NFPA 130《有轨列车及铁路客运体系标准》[J].消防科学与技术,2018,37(1):121.
- [17] GB 50157-2013,地铁设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [18] 尹萍.基于 PyroSim 和 Pathfinder 的某散货船机舱火灾模拟及安全疏散研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.

(上接第 613 页)

- [37] 于乃云.室内空气品质评价与污染物控制[D].青岛:青岛科技大学,2015.
- [38] Buonanno G, Stabile L, Morawska L, et al. Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities[J]. Journal of Aerosol Science, 2019,40(3):256-269.
- [39] 高娜,金龙哲,李玲,等.矿井避险空间 CO₂ 吸收效率及阻力研究[J].中国矿业大学学报,2014,(6):1058-1062.
- [40] 任聪聪,苗洁莹.绿色建筑室内空气质量评估与改善技术[J].居舍,2024,(14):29-32.
- [41] 郑萍.自然通风对室内空气质量影响的研究[D].重庆:重庆大学,2006.