

高速铁路隧道火灾列车继续运行疏散模式 CFD 分析

谢雄耀^{1,2}, 丁良平^{1,2}, 李永盛^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 我国高速铁路火灾疏散问题日益引起广泛关注。首先分析了隧道内列车火灾疏散模式及安全疏散准则, 然后采用 CFD(计算流体力学)方法模拟了 CRH(中国高速铁路)动车组在铁路隧道发生列车火灾时, 采用继续运行疏散模式时温度场变化以及烟气扩散规律。计算结果表明: 列车在隧道内继续运行疏散过程中, 列车活塞风的作用主导了烟气的运动轨迹, 烟气的逆流效应几乎不存在, 上游车厢基本不受影响, 下游车厢内的流场温度和烟气浓度随时间增加而增长, 并且在火灾达到最大规模时会趋于稳定。在继续运行疏散过程中, 火灾规模和列车运行速度对下游车厢烟气流场的分布有较大影响, 是影响人员安全疏散的两个主要因素。

关键词: 高速铁路; 隧道; 火灾; 安全疏散

中图分类号: U 459.3

文献标识码: A

CFD Simulation on Evacuation of a High-Speed Train Continue-to-Roll During Long Tunnel Fires

XIE Xiongyao^{1,2}, DING Liangping^{1,2}, LI Yongsheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Evacuation of high-speed train fires in tunnels is becoming a wide concerned issue. The paper first presents different modes of evacuation during train tunnel fires and discussion on the safety criteria of evacuations for passengers. Based on the computational fluid dynamics(CFD), a simulation test was made of the spread of gas temperature and smoke with time in tunnels and the railcars when a train continued rolling after a fire. The results show that the wind caused by the moving train controls the track of the gas and smoke of the fire. All the gas and smoke move downstream instead of moving upstream, so the upstream railcars are safe when the

train continues rolling for evacuation, and the gas temperature and smoke in downstream railcars keep up increasing with time. The fire heart rease rate(HRR)and train velocity have important effects on the rate of gas and smoke spread in the downstream railcar during the evacuation.

Key words: high-speed railway; tunnel; fire; evacuation

随着我国高速铁路建设, 长大隧道越来越多, 长大隧道的长度不断刷新记录, 仅目前在建的客运专线中, 长度大于 10 km 的特长隧道就有 8 座^[1], 分别是石太线的太行山隧道(约 27.8 km)和南梁隧道(约 11.5 km)、合武线的大别山隧道(约 13.5 km)和金寨隧道(约 10.8 km)、温福线的霞浦隧道(约 13.1 km)、武广线的大瑶山一号隧道(约 10.1 km)、广深港线的狮子洋隧道(约 10.8 km)及厦深线的大南山隧道(约 12.7 km)。客运专线列车运行速度的加快也使得在隧道内发生火灾的可能性增加, 一旦列车在高速铁路隧道内发生列车火灾, 其疏散救援较非隧道区将更加困难, 严重的还会造成极其恶劣的社会影响。因此, 高速铁路隧道安全运营的相关课题已成为近期研究的热点^[2-9], 高速铁路隧道防灾救援的设计日趋重要。

采用计算机模拟预测隧道火灾规律是一种有效的方法, 相比较现场试验和模型试验, 这种方法具有参数设定的任意性、预测结果的可再现性等优点, 节约资金, 可以方便地对不同的影响因素、不同的火灾过程进行研究。近年来对隧道火灾的研究主要采用计算流体力学(CFD)方法^[10-12], 模拟各种隧道火灾过程的热特性及烟气流动状况。

本文采用 Fluent 软件^[10]的标准 $k-\epsilon$ 紊流模型模拟 CRH 1 型动车组在铁路隧道发生列车火灾时, 采用继续运行疏散模式烟气扩散规律。

收稿日期: 2009-10-06

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA11Z118); 国家自然科学基金资助项目(40874074, 50808137)

作者简介: 谢雄耀(1972—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为隧道及地下工程。E-mail: xiexiongyao@tongji.edu.cn

1 列车火灾疏散模式及安全疏散准则

1.1 列车火灾疏散模式

高速铁路隧道的疏散模式主要可以分为两类:(1)继续运行疏散方式.此种逃生方式又可以细分为拉出洞外和驶到“定点”车站^[13-14]。(2)停车疏散方式.由于隧道内发生列车火灾,火灾发展迅速,而且隧道内空间狭小不易排除火灾烟气,使得人员的逃生变得十分困难.故世界各国大都规定:列车在隧道内发生火灾后如果能拉出洞外尽量拉出洞外或者驶到“定点”车站再进行人员疏散.

根据对列车火灾事故的统计可知,列车火灾的起火位置可以分为车厢外部和车厢内部.车厢内部发生的火灾一般容易被发现并能得到及时控制,而且一般情况下不会影响列车继续运行至邻近车站或者拉出洞外;而车厢外部产生火灾则不易发现且不易得到控制.据统计近几十年来不完全统计国内外

的 55 件隧道列车火灾事故,由于电气设备故障列车火灾平均每场死亡人数为 121 人^[15].高速列车电气设备复杂,列车与隧道内设备的接触易产生不良变化而引发火灾,加上铁路不断提速,由于机械故障或操作不当使得列车脱轨的可能性也比较大,这些都使得发生列车火灾的可能性大大增加.

本文在研究高速铁路隧道发生列车火灾采用继续运行疏散模式时,以我国 CRH 系列动车组为例进行分析.表 1 罗列了 CRH 系列动车组公开的一些技术参数.从中可以看到,除早期 CRH1 型动车组没有气密性外,CRH2,CRH3,CRH5 型均有气密性考虑,气压从 4 kPa 降到 1 kPa 时间大于 50 s,国内动车组车厢两端的防火设计,确保在 15 min 内火灾不会蔓延到邻车.据此本文的研究基于以下假定:针对起火位置在车厢外部的情形进行研究;假设列车上只有一节车厢发生火灾;假设火灾发生后,乘客及时安全疏散到相邻车厢,并且保证起火后 15 min 不蔓延到相邻车厢.

表 1 CRH 系列动车组参数

Tab.1 Parameters of China railway high-speed

型号	编组	编组定员/人	最高运营速度/(km·h ⁻¹)	编组重/t	长度/m	车体型式	气密性	中间车辆长度/mm	车辆宽/mm	车辆高/mm
CRH1	2(2M+1T)+(1M+1T)	670	200	420.4	213.5	不锈钢	无	26 600	3 328	4 040
CRH2	4M4T 或 6M2T	610	250(可提升至 300)	345.0	201.4	中空铝合金	>50 s 从 4 kPa 降到 1 kPa	25 000	3 380	3 700
CRH3	4M4T	601	350	425.0	200.0	中空铝合金	>50 s 从 4 kPa 降到 1 kPa	24 775	3 260	3 890
CRH5	(3M+1T)+(2M+2T)	606+2(残疾人)	250	451.0	211.5	中空铝合金	>40 s 从 4 kPa 降到 1 kPa	25 000	3 200	4 270

1.2 列车火灾达到危险状态的判定标准

在隧道中,影响人员疏散的一些指标包括:温度、能见度、烟雾浓度等.人体在高温条件下,很快出现疲劳和脱水现象,当热的强度超过人所能承受的极限时,人就会死亡.统计结果表明,在火灾中 85% 以上的死亡者是死于烟气的影响.其中大部分是吸入了烟尘及有毒气体,主要是一氧化碳(CO)昏迷后致死的.工程上一般根据某种有害燃烧产物的浓度是否达到了危险临界浓度来判定危险状态^[16],比如常用在人员疏散路径上,人眼特征高度以下的空间 CO 浓度达到 2.500×10^{16} 作为临界值,相应地,烟气的临界体积浓度为 2.08%,能见度小于 10 m.故本文将烟气温度和浓度作为判定参数,将列车火灾达

到危险状态的判定标准为:车厢底板以上 1.5 m 平面上的平均温度超过 80 °C,烟气浓度超过 2.08%.

2 隧道列车火灾三维数值计算模型

2.1 RANS 方程及湍流模型

在火灾发生过程中风速、温度、浓度的分布是随时间变化的,因此隧道内的烟气流动为湍流运动.鉴于不考虑烟气的可压缩性不会影响到计算结果的精度,本文将隧道内的烟气流动定义为三维不可压非稳态湍流运动及传热过程.考虑平均密度变化的湍流流动动量可用 Reynolds 时均 Navier-Stokes 方程(Reynolds-Averaged Navier-Stokes,简称 RANS)表

示^[17-18],如下式所示.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial(\mu \partial u_i / \partial x_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x} + S_i \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; t 是时间; u_i 是速度矢量在 x, y 和 z 方向的分量; p 是流体微元体上的压力; S_i 为动量守恒方程的广义火源项; μ 为动力粘度.

列车火灾燃烧模型采用 Fluent 软件的体积热与质量源(VHMS)多组分传递模型.它仅考虑火引起的热与质量传递.VHMS 使用体积能量源作为热释放率(HRR),质量源作为燃料.此外,消耗的氧气明确被计算为质量损耗.随机反应可以用 VHMS 来模拟.

在继续运行疏散模式下,由于车厢不可能完全密闭,存在一定的渗透性,火源下游车厢内的流场会受到影响,本文采用 Fluent 软件的多孔跳跃边界条件来模拟这种渗透性.

对于隧道衬砌壁面,认为烟流是不可渗透的.对于未燃烧车厢的壁面条件,因为更关心的是下游车厢内的烟气流场分布,所以下游车厢壁面条件采用多孔跳跃边界条件,上游车厢受火源影响小,为了节省计算时间,壁面边界条件被认为是一般的墙边界条件,并认为烟流是不可渗透的.

对于隧道衬砌壁面的速度分量,根据不同的模拟工况而异.若是模拟着火列车在隧道内停车工况,则壁面的速度为 0;若是模拟着火列车在隧道内继续运行的过程,本文假设列车相对静止,改变进口风速来模拟活塞风,隧道壁面移动的速度则为列车的运行速度,方向与列车运行方向相反.

关于隧道衬砌壁面的热边界条件设置,有的学者将隧道衬砌壁面简化为绝热壁面或者恒温壁面,这样的假设不太合理.本文假设隧道衬砌的外表面是恒温的(温度边界),假设衬砌内为一维热传导,通过计算可以得到衬砌内表面的温度.

2.2 计算假定

运行疏散列车火灾数值计算基于以下基本假设:整条列车都在隧道里;不考虑隧道横断面沿着隧道纵向的变化,不考虑列车横断面的变化,不考虑隧道坡度和弯曲;列车与空气之间的摩擦系数以及隧道壁面与空气的摩擦系数恒为定值;忽略隧道内电缆等设备及轨道对通风气流的影响.

2.3 火灾热释放速率

经验表明火灾的初期以及稳定阶段前期是逃生的最佳时机,由于只是考虑疏散过程中火灾的发展,所以本文在模拟中不考虑到火灾的衰减阶段.

燃烧车辆不同,隧道火灾的热释放速率有明显

差异.EUREKA 499 测试了不同车辆火灾的最大热释放速率和隧道内最高温度(见表 2).

表 2 不同车辆的火灾最大热释放速率和最高温度^[19]

Tab.2 Maximum momentary rates of heat release and maximum temperatures with the burning of different vehicles^[19]

	车辆类型			
	小轿车	货车	载重车辆	旅客列车
最大热释放速率/MW	3~5	15~20	50~100	15~20
高温/°C	400~500	700~800	1 000~1 200	800~900

在隧道火灾场景描述中,常采用 t^2 模型来描述火灾热释放速率随时间的变化,如式(2)所示,即火灾初期热释放速率与 t^2 成正比关系,经过时间 t_0 ,热释放速率稳定于最大值,表达式如下:

$$Q = \begin{cases} \alpha t^2 & t \leq t_0 \\ Q_{\max} & t > t_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q 为火源热释放速率,MW; Q_{\max} 为火源热释放速率的最大值; α 为火灾发展速率, $\text{MW} \cdot \text{s}^{-2}$; t 为火灾发展时间,s; t_0 为临界时间.

由于本文考虑列车厢外着火,列车继续运行时氧气充分,且我国 CRH2,CRH3 以及 CRH5 均为铝合金车体,故考虑列车火灾的发展速率为超快速增长, α 取 $1.876 \times 10^{-4} \text{ MW} \cdot \text{s}^{-2}$,考虑到列车火灾规模受到列车风影响^[20],将热释放速率取为 10,15,20,25,30 MW 进行计算,如图 1 所示.

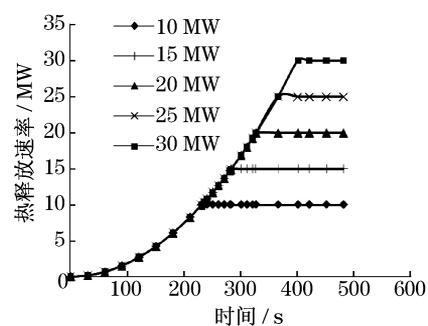


图 1 继续运行模式热释放速率示意图

Fig.1 Heat release with time on the carry-to-roll mode for the burning railway coaches

2.4 等效风速

在模拟继续运行逃生模式时,假定列车静止采用设置隧道内进口风速来模拟列车的运动,如图 2 所示,图中 v_m 为等效活塞风速度, v_{train} 为火车行驶速度(下文以 v_t 表示).本文称之为“等效活塞风方

法”,采用该模型来模拟分析继续运行疏散模式下的最不利疏散情形,最不利情形就是列车在行驶到隧道中部时列车中部的车厢发生火灾。

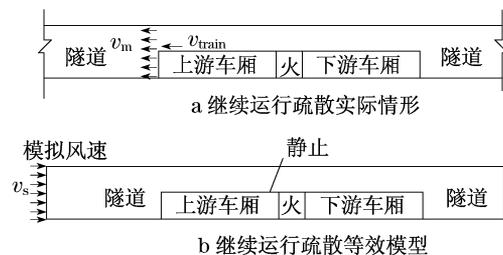


图2 继续运行疏散模式等效活塞风方法示意图

Fig.2 Diagram of equivalent piston wind on the mode of the carry-to-roll evacuation of railway cars

模拟隧道进口风速 v_s 可以根据式(3)进行计算,方向与列车运行方向相反.

$$v_s = v_{\text{train}} - v_m \quad (3)$$

列车在隧道内运行产生的活塞风速可以按照式(4)~式(8)计算:

$$v_m = v_t / (1 + \sqrt{\epsilon_m / K_m}) \quad (4)$$

$$\epsilon_m = 1.5 + \lambda(L_T - l_T) / d \quad (5)$$

$$K_m = N l_T / (1 - \beta)^2 \quad (6)$$

$$\beta = f_T / F \quad (7)$$

$$N = (0.5\beta + \beta^2) / l_T + (\lambda_l \beta) / (d(1 - \beta)) \quad (8)$$

式(4)~式(8)中, v_m 为列车运行产生的活塞风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_t 为列车运行速度,本文拟计算列车发生火灾后以 20, 40, 60, 80, 120, 160, 200, 250, 300 和 350 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度逃生; ϵ_m 为活塞风阻力系数; λ 为隧道壁面与空气摩擦系数(达西系数),取为 0.045; L_T 为隧道计算长度, m ; l_T 为列车长度, m , 动车组长度一般为 200m 左右; d 为隧道断面当量直径, m ; K_m 为活塞作用系数; N 为列车阻力系数; β 为阻塞比; f_T 为列车断面面积 m^2 ; F 为隧道断面面积; λ_l 为列车与空气摩擦系数,取为 0.03.

2.5 其他参数

常温下空气参数取 Fluent 软件默认参数:密度 $1.22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 比热容 $1006.43 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 热传导系数 $0.024 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 粘度 1.5×10^{-5} . 重力加速度为 $9.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 通风空气温度:取 300 K (27°C).

烟气参数为:密度为 $1.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 比热容 $900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 热传导系数 $0.018 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 粘度 1.5×10^{-5} .

隧道衬砌的热力学参数为:密度为 $2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 热传导系数 $0.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 比热容

$835 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 发射率为 0.94. 列车车体表面发射率取 0.85, 热传导系数 $1.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. 环境初始温度定为 300 K (27°C).

3 温度烟气流场扩散规律

为总结列车在继续运行疏散时隧道以及车厢内的流场随时间变化的特点,以列车在断面面积为 58 m^2 的高速铁路隧道中,热释放速率在火灾发展 400 s 上升到 30 MW 趋于稳定,着火列车以 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度继续运行为背景工况进行模拟.

图 3 给出了列车车厢外着火后以 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度继续行驶时烟气浓度在隧道纵断面不同时刻变化云图,对应时刻从起火阶段到火灾发展到 1.69, 6.08, 10.81, 16.89, 24.31 MW 以及火灾进入稳态阶段 30 MW. 图 4 给出了着火后列车以 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度继续行驶时,在火源中心下游 15 m 处隧道横断面烟气温度随时间变化云图,中间矩形部分表示车厢内温度,矩形外面是隧道内温度.

从图 3 烟气浓度场分布可知,列车活塞风的作用主导烟气的运动轨迹,烟气的逆流效应几乎不存在,除了在火源区域形成一定的漩涡以外,其他区域的烟气均是沿着列车活塞风的方向高速运动.

从图 4 可知,火灾发展初期,火灾下游车厢外部的温度场和烟气场以车厢为中心成层分布,分层现象明显,最高温度和最大烟气体积分数所处位置在车厢两侧靠近隧道底板附近.随着火灾发展,温度最高点和烟气体积分数最大点有慢慢向上漂移的现象,240 s 后,最大值出现在车厢顶部附近.

随着热释放率的上升,温度不断升高.当热释放速率到达稳定值时,隧道内的温度场会趋于稳定.随着烟气释放率的上升,隧道内烟气体积分数不断上升,隧道内烟气逐渐向下游车厢内渗透,下游车厢内温度与烟气浓度逐渐增加.

4 继续运行安全疏散影响因素分析

影响车厢内人员安全的直接原因是下游车厢流场温度或者烟气浓度达到最危险状态,而影响下游车厢流场的因素有火灾规模、列车运行速度、隧道断面面积.其中,影响下游车厢内人员安全的控制指标是下游车厢内人眼高度处的平均温度和最大烟气浓度.下面以达到准稳态阶段时最大烟气浓度为指标,对比分析各影响因素对烟气流场的影响.

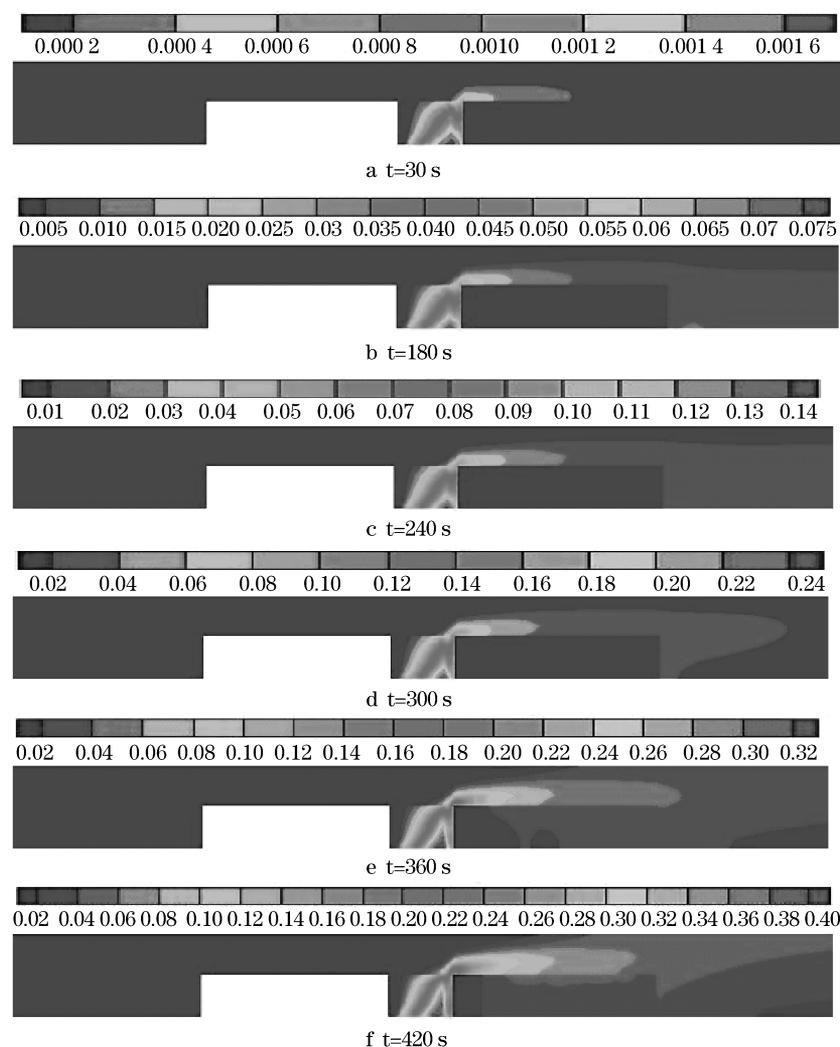


图 3 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 行驶时隧道内纵断面 ($X=0$) 烟气浓度随时间变化云图 (单位: 10^{-6})

Fig. 3 Concentrations of gas and smoke along the longitudinal tunnel variation with time when a burning train at the speed of $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (unit: 10^{-6})

4.1 火灾规模

本节仍以列车在断面面积为 58 m^2 的高速铁路隧道中,着火后火灾发展速率为 $1.876 \times 10^{-4} \text{ MW} \cdot \text{s}^{-2}$ 为例,研究火势达到最大 10, 15, 20, 25, 30 MW 时,高速铁路列车以不减速速度 $350, 250, 200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 或减速 $160, 120, 80, 60, 40, 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 继续运行疏散工况时下游车厢内烟气变化情况.

图 5 和图 6 为不同火灾规模条件下,速度恒定,火灾进入准稳态阶段后人眼高度平面的平均温度和最大烟气浓度与火灾规模的关系图.

由图 5,图 6 结果可以得到:

(1) 列车运行速度恒定,火灾发展规模越大,人眼高度处平均温度和最大烟气浓度也就越大.

(2) 当火灾规模小于 10 MW 并达到稳态时,下游车厢内人眼高度处温度低于 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,烟气浓度低于 2%. 这表明下游车厢内乘客在继续疏散过程中是安全的.

(3) 当火灾规模低于 20 MW 时,烟气浓度上升速度较慢,当烟气浓度大于 20 MW 时,烟气渗入下游车厢内速度加快,下游车厢内乘客受到火灾危险加大.

(4) 当火灾规模达到 25 MW 时,只有继续行驶速度达到 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上时下游车厢内烟气浓度低于 2.08%;当火灾规模达到 30 MW 时,需要继续行驶速度达 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上时下游车厢内烟气浓度是安全的.

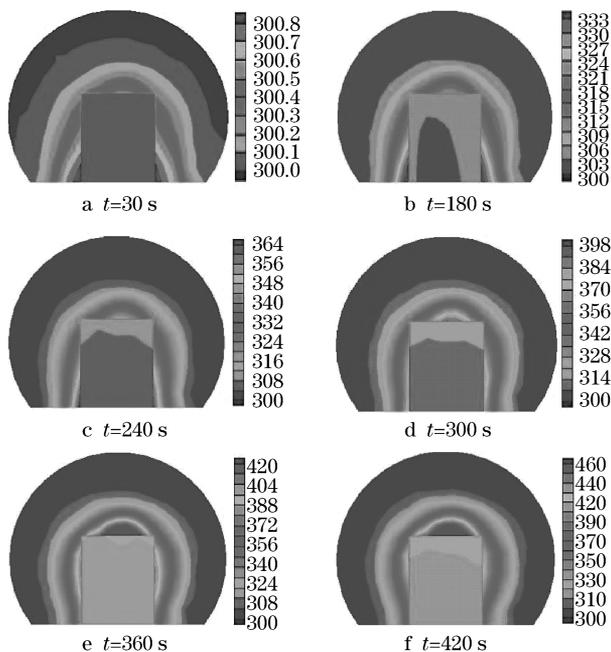


图 4 80 km · h⁻¹行驶时隧道火源中心下游 15 m 处,隧道横断面温度随时间变化云图(单位:K)

Fig. 4 Gas temperature variation with time in the cross section of 15 km from the centre of the burning in the tunnel when the burning train at 80 km · h⁻¹ (Unit:K)

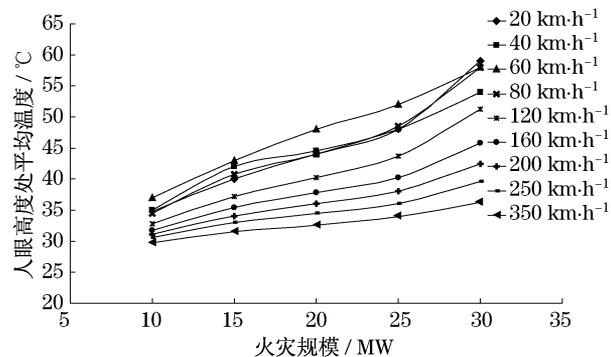


图 5 在运行速度恒定时,人眼高度平面烟气平均温度与火灾规模的关系

Fig. 5 Variation of average temperatures of gas and smoke at the height of a human eyes with fire HRR when a burning train running at a constant speed

4.2 列车运行速度

为了比较当火灾发展到稳态后,列车继续以不同速度行驶时温度与烟气变化情况,比较了各火灾规模下,不同速度行驶时温度与烟气场变化.图 7 是火灾规模恒定条件下人眼高度平面平均温度与运行速度的关系图,图 8 是火灾规模恒定条件下人眼高

度平面体积分数与运行速度的关系图.

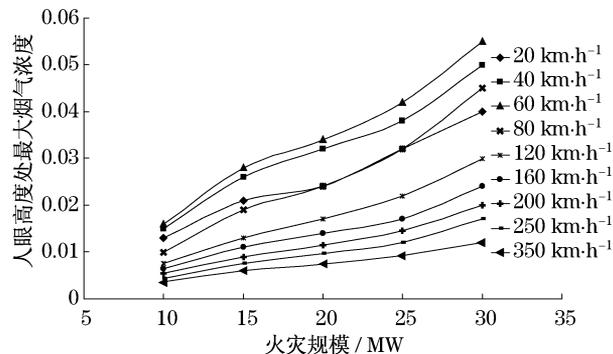


图 6 在运行速度恒定时,人眼高度平面最大烟气体积分数与火灾规模的关系

Fig. 6 Maximum volume fractions of gas and smoke variation with fire HRR when a burning train running at a constant speed

由图 7,图 8 结果可以得到:

(1) 当火灾发展到稳态之后,对于高速列车,如果减速运行,下游车厢内温度与烟气浓度均将上升,减速越快,下游车厢内烟气浓度上升速度越快,几乎所有情形在 60 km · h⁻¹左右达到极值.

(2) 列车行驶速度在 250 km · h⁻¹以上时,即使在火灾规模达到 30 MW 稳态时,继续行驶下游车厢人眼高度处温度不超过 40 °C,烟气浓度低于 2%,下游车厢乘客是安全的.

(3) 列车行驶速度在 200 km · h⁻¹时,即使在火灾规模达到 30 MW 稳态时,继续行驶下游车厢人眼高度处温度不超过 45 °C,烟气浓度低于 2.08%,下游车厢乘客是安全的.

(4) 当列车行驶速度低于在 160 km · h⁻¹时,如果对于火灾规模大于 30 MW 情形,下游车厢内烟气浓度将超过 2.08%,下游乘客安全将受到威胁.

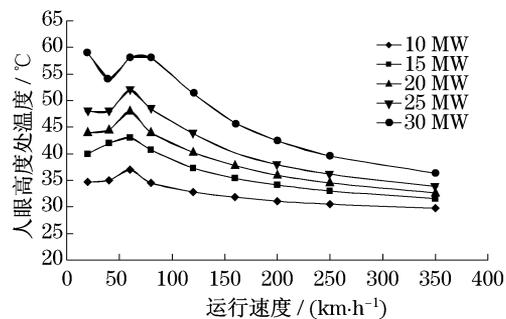


图 7 火灾规模恒定时人眼高度烟气平均温度随运行速度变化
Fig. 7 Variation of average temperatures of gas and smoke at the height of a human eyes with the speed of a train when a fire HRR keeping constant

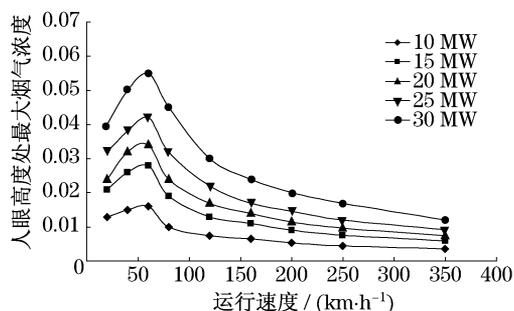


图 8 火灾规模恒定人眼高度最大烟气体积随运行速度变化

Fig. 8 Maximum volume fractions of gas and smoke variation with the speed of a train when a fire HRR keeping constant

由此可见,火灾规模与列车在着火后继续行驶速度对着火下游车厢内温度与烟气浓度分布影响很大.火灾规模越大,越要求列车以更高速度行驶出隧道.然而,行车速度的增加使得着火后火灾发展到15,30 MW以至更高规模的概率增加,另一方面着火列车发生其他事故的概率增加.故列车不宜以过高的速度运行,可保持设计正常速度行驶出隧道后再停车疏散.按火灾热释放速率的超快发展速率,达到30 MW规模需历时6 min,据我国客运专线设计时速下限值 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 来计算,可保证列车着火后继续行驶12 km到洞外或“定点”车站.

5 结论

本文系统研究了由于电气故障、操作失误和机械故障导致的列车在隧道内发生车厢外部火灾继续疏散模式的烟气温度与浓度扩散规律,采用CFD方法模拟继续运行疏散模式下人员逃生的安全性,得到如下结论:

(1) 在继续运行疏散模式下,由于车厢不可能完全密闭,存在一定的渗透性,火源下游车厢内的流场会受到影响,采用Fluent软件的多孔跳跃边界条件可以有效模拟这类火灾烟气与温度的渗透性.

(2) 列车在隧道内继续运行疏散过程中,列车活塞风的作用主导了烟气的运动轨迹,烟气的逆流效应几乎不存在,除了在火源区域形成一定的漩涡以外,其他区域的烟气均是沿着列车活塞风的方向高速运动.

(3) 在继续运行疏散过程中,上游车厢基本不受影响,下游车厢内的流场温度和烟气浓度随时间增加而增长,并且在火灾达到最大规模时趋于稳定.

(4) 火灾规模和列车运行速度是影响人员安全疏散的两个主要因素.火灾规模和列车运行速度对下游车厢烟气流场的影响较大.

(5) 在继续运行疏散过程中,高速列车不应以低于 $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度减速行驶,宜保持原设计正常速度行驶出洞外或到定点车站再进行疏散.

参考文献:

- [1] 铁道部工程设计鉴定中心. 高速铁路铁路隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
Center for Project Design Appraisal of the Ministry of Railways of China. High speed railway tunnels [M]. Beijing: Chinese Railway Press, 2006.
- [2] Tanaka T. Solution to train fires [J]. Japanese Railway Engineering, 1975, 16(1): 4.
- [3] Ingason H, Gustavsson S, Dahlberg M. Heat release rate measurements in tunnel fires [R]. Boras: SP Swedish National Testing and Research Institute, BFRL Press, 1994.
- [4] Steinert C. Smoke and heat production in tunnel fires [C] // The International Conference on Fires in Tunnels. Boras: SP Press, 1994: 123 - 137.
- [5] Peacock R D, Averill J D, Madrzykowski D, et al. Fire safety of passenger trains phase III: evaluation of fire hazard analysis using full-scale passenger rail car tests [R]. [S. l.]: National Institute of Standards and Technology NISTIR 6563, BFRL press, 2004.
- [6] Ingason H. Model scale railcar fire tests [J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(4): 271.
- [7] 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.
DU Hongbing, QI Yixin, YUAN Xuzhong. An experimental investigation of smoke flowing properties in a running train [J]. China Railway Science, 1999, 20(3): 31.
- [8] 徐志胜, 周庆, 徐彧. 运行旅客列车隧道火灾模型实验及数值模拟 [J]. 铁道学报, 2004, 26(1): 124.
XU Zhisheng, ZHOU Qing, XU Yu. Fire model experiment and numerical simulation of passenger trains running in tunnels [J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(1): 124.
- [9] Tsai N T, Markos S H. Passenger rail car egress time prediction [R]. [S. l.]: Federal Railroad Administration RR06 - 04, US Department of Transportation, BFRL Press, 2006.
- [10] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis —— software CFD Principle and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [11] Kang K. Computational study of longitudinal ventilation control during an enclosure fire within a tunnel [J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2006, 16(3): 159.
- [12] Maele K V, Merci B. Application of RANS and LES field simulations to predict the critical ventilation velocity in longitudinally ventilated horizontal tunnels [J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(8): 598.

(下转第 1791 页)