

地铁车站火灾的烟气流动状况研究

天津大学 铁道第三勘察设计院 那艳玲[☆]

铁道第三勘察设计院 黄桂兴

天津大学 涂光备

中国建筑设计研究院 于松波

摘要 以地铁火灾与烟气发展过程的数学模型为基础,建立 CFD 模拟的物理模型,对岛式无屏蔽门的地铁车站列车火灾进行了数值模拟。分析了火灾发生后的烟气流动规律及温度场和气流场的分布,并与实体燃烧试验的结果进行了对比。结果表明,如果方程模型选用恰当,边界条件设置合理,CFD 模拟火灾的结果是能够令人满意的。

关键词 地铁火灾 烟气流动规律 温度分布 CFD 模拟 燃烧试验

Smoke flow regularity in fire in underground railway stations

By Na Yanling[★], Huang Guixing, Tu Guangbei and Yu Songbo

Abstract Establishing a CFD physical model based on the mathematical model of developing process of fire and smoke in underground railway, numerically simulates the train fire in island station without shield. Analyses the temperature and air flow distribution and smoke flow regularity, and compares the simulation results with the results of combustion experiments. The results show that CFD simulation result for fire is accurate enough if only the equation model is correctly selected and the boundary conditions are accurately set.

Keywords underground railway fire, smoke flow regularity, temperature distribution, CFD simulation, combustion experiment

★ Tianjin University, Tianjin, China

①

0 引言

随着地铁与轻轨系统的迅速发展,行车速度和密度加大,车辆在隧道中的故障及互相撞击、货物的点燃和自燃及铁路轨道故障等各种原因造成的火灾事故将会给国家和人民带来极大的经济损失。由于隧道断面小,发生火灾时的温度高、热量不易散失,不仅给消防、扑救带来很多困难,而且还会对隧道本身造成不同程度的损坏。火灾的危害主要来源于热量、烟气及缺氧。火灾过程中,燃烧产生的热量可分为对流热和辐射热两部分,产生的烟气中包括完全燃烧产物(如 CO_2 , H_2O 等)和不完全燃烧产物(如 CO 、气态及液态碳氢化合物、硫化物、氯化物等化学物质)。火灾烟气中含有众多的有毒成分、腐蚀性成分以及颗粒物等,烟气的蔓延

速率和范围大大超过火势的蔓延。当前,随着各种新型合成材料的广泛应用,烟气窒息和中毒成为火灾中人员致死的主要原因。此外,由于高温烟气的迅速流动,其中可能会掺混着一定的未燃的可燃蒸气,很容易引起火势的进一步蔓延和扩大。燃烧产生的热量和烟气由于空间封闭得不到有效的排除,新鲜空气得不到及时补充,形成不完全燃烧,产生比完全燃烧更多的烟气。地铁内空间封闭,体积

①[☆] 那艳玲,女,1975 年 9 月生,博士研究生,工学博士,博士后
300142 天津市河北区中山路 10 号铁三院人事处博士后工
作站

(0) 13752453166

E-mail: nayanling@eyou.com

收稿日期:2005-08-02

一次修回:2006-03-20

二次修回:2006-04-25

相对较小,烟气很快可以充满整个地下空间,加剧了烟气的危害。由于地下空间采光条件比地面建筑差得多,主要是人工照明,因此,烟气的扩散不仅使人们呼吸困难,造成心理紧张,而且烟气中含有大量的固体颗粒,使人的视距下降、能见度大大降低,以至辨不清疏散方向^[1]。

因此,掌握地铁站火灾中的温度分布及烟气流动规律,不仅是确定地铁站的耐火性能和防火分隔及布置消防设施的关键,而且对构筑物各部位的材料选择和构筑物的结构设计等有着重要的意义。本文对地铁火灾的气流场、温度场以及烟气流动特性进行数值分析,为设计人员提供参考。

1 地铁火灾与烟气发展过程的数学模型

1.1 基本假设

采用双层区域模型来模拟地铁系统内火灾开始至人员离开车站这段时间内的烟气流动,为了简化模拟对象,根据公安部天津消防科学研究所关于地下商场实体燃烧的试验观察和结果分析^[2],提出了以下基本假设:

1) 在火灾发展初期(轰燃以前)有两个气层存在,即上部烟气层和下部冷空气层,各层内温度、气流密度、压力等物理参数均匀。从计算结果及试验中观察到的现象来看,这一假设是合理的,当火灾强度较大时,即使在强制排烟的条件下,地铁系统内的气体仍存在明显的分层现象;同层内气体温度、各成分浓度等参数差异不大,但不同层之间各参数存在明显的差异。

2) 在火灾的发展过程中,一方面机械排烟系统或自然排烟系统排除高温烟气;另一方面,来自隧道或出入口的冷空气补充至下层冷空气层,所以下部冷空气层的压力和温度变化不大。

3) 上部烟气层和下部冷空气层均为理想气体,忽略气体的可压缩性和黏性,烟气的物性参数不随温度的变化而变化。

1.2 基本方程^[2-3]

1) 能量守恒方程

$$\frac{d}{d\tau}[(y_c - y)\rho_U T_U A c_p] = q_U + pA \frac{dy}{d\tau} \quad (1)$$

式中 τ 为时间, s; y_c 为顶棚高度, m; y 为距底部的高度, m; ρ_U 为上部烟气层平均密度, kg/m³; T_U 为上部烟气层平均热力学温度, K; A 为防烟分区面积, m²; c_p 为烟气的比定压热容, kJ/(kg · K);

q_U 为流入上部烟气层的热量及烟气层与周围环境总的换热量之和, W/m², 由四部分组成: 从挡烟垂壁下方流出的烟气所携带的热量 q_{CU} , 由烟气羽流带入上部烟气层的热量 q_{PL} , 由排烟系统排出的烟气携带的热量 q_{VE} , 以及烟气层与周围环境的总的换热量 q_{HT} , 即 $q_U = q_{CU} + q_{PL} + q_{VE} + q_{HT}$; p 为环境大气压力, Pa。

2) 质量守恒方程

$$\frac{d[(y_c - y)\rho_U A]}{d\tau} = m_U \quad (2)$$

式中 m_U 为流入上部烟气层的质量流量, kg/s, 由三部分组成: 从挡烟垂壁下方流出的烟气的质量流量 m_{CU} , 由烟气羽流带入上层烟气的质量流量 m_{PL} , 以及通过排烟系统排出的烟气的质量流量 m_{VE} , 即 $m_U = m_{CU} + m_{PL} + m_{VE}$ 。

3) 理想气体状态方程

$$\frac{p_U}{R} \approx \frac{p}{R} = \text{const} = \rho_U T_U = \rho_A T_A \quad (3)$$

式中 p_U 为上部烟气层压力, Pa; R 为气体常数, $R = 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; ρ_A 为环境空气密度, kg/m³; T_A 为环境空气热力学温度, K。

由式(3)可得

$$T_U = \frac{T_A \rho_A}{\rho_U}$$

由式(1)和式(3)可得

$$\frac{dy}{d\tau} = -\frac{q_U}{pA + A c_p \rho_A T_A} \quad (0 < y < y_c) \quad (4)$$

由式(1)和式(2)可得

$$\frac{d\rho_U}{d\tau} = \frac{m_U + \rho_U A \frac{dy}{d\tau}}{(y_c - y)A} \quad (0 < y < y_c) \quad (5)$$

ρ_U 在 $\tau = 0$ 时的初值由下式确定:

$$\rho_U|_{\tau=0} = \rho_A T_A c_p \frac{m_U}{q_U} \quad (6)$$

求解 ρ_U 需要知道 $\tau = 0$ 时的 $d\rho_U/d\tau$, 为简便起见, 设 $\tau = 0, y = y_c$ 时, $d\rho_U/d\tau = 0$, 即将式(5)转换为以下的分段函数形式:

$$\frac{d\rho_U}{d\tau} = \begin{cases} \frac{m_U + \rho_U A \frac{dy}{d\tau}}{(y_c - y)A} & 0 < y < y_c \\ 0 & y = y_c \end{cases} \quad (7)$$

式(4), (7)即为防烟分区内烟气发展的控制方程, 通过求解这个方程组, 可以得到烟气层的温度、

密度和烟气层随时间的变化,以及通过排烟系统排出和流向其他防烟分区的烟气流量。

2 模拟地铁站火灾计算时间的确定

由于火灾的燃烧过程是一个非稳态过程,各参数的变化与时间有关。我们关心的只是车站发生火灾时的通风状况、温度变化及烟气流动规律,所以模拟时只考虑从着火开始至人员安全疏散为止这个时间段,把这个时间段作为计算时间。

根据文献[4],计算用的乘客疏散路线取站台某端距车站出口最长的路线,但不得超过 91.4 m (不计入垂直距离)。乘客对不同建筑结构的通行速度和通行能力见表 1。

表 1 通行速度和通行能力

建筑结构	通行速度/(m/min)	当量通道通行能力/(人/min)
平行坡道	61.0	50
上升通道	15.2	35
下降通道	18.3	40
转栅形闸口	61.0	25
单开门	61.0	50

现以天津赤路地铁车站为例,计算疏散时间。

2.1 车站概况

该车站地下 1 层为站厅层,层高 5.4 m,站厅层与地面层之间有 3 个出口通道,每个通道设置 1 部步行楼梯、1 台自动扶梯和 1 部垂直升降电梯;地下 2 层为站台层,层高 4.95 m,站台全长 120 m,站台层与站厅层之间有 2 个通道,每个通道设 1 部步行楼梯和 1 台自动扶梯,宽度分别为 2.1 m 和 1.2 m,站台层设 1 部垂直电梯,站台一端设有 1 部可直接通至地面的事故步行楼梯,宽度为 1.2 m。自站台端头至第 1 部步行楼梯或自动扶梯的最远距离为 40.8 m。从站厅与站台之间的楼梯口至站厅层与外界楼梯口之间的距离为 78 m。

2.2 通道基准值规定

以 559 mm 作为一个当量通道宽度计算,在一个或多个当量通道宽度基础上另加 305 mm,可以将其作为 0.5 个当量通道计算。

2.3 出口疏散通行能力

车站使用负荷为 1 800 人。

1) 从站台层至站厅层的通行能力

3.5 个当量通道×2 部步行楼梯×35 人/min=245 人/min

2 个当量通道×2 部自动扶梯×35 人/min=140 人/min

2 个当量通道×1 部事故步行楼梯×35 人/min=70 人/min

通行能力为 455 人/min。

2) 从站厅层至地面层的通行能力

3.5 个当量通道×3 部步行楼梯×35 人/min=368 人/min

2 个当量通道×3 部自动扶梯×35 人/min=210 人/min

通行能力为 578 人/min。

2.4 疏散总时间

从站台端头按最长路线步行至楼梯口或自动扶梯口所需时间为 $\tau_1 = 40.8 \text{ m} / (61 \text{ m/min}) = 0.669 \text{ min}$,从站台层至站厅层所需时间为 $\tau_2 = 4.95 \text{ m} / (15.2 \text{ m/min}) = 0.326 \text{ min}$,从站厅按最长距离步行至站厅层楼梯口或自动楼梯口所需时间为 $\tau_3 = 78 \text{ m} / (61 \text{ m/min}) = 1.279 \text{ min}$,从站厅层至地面层所需时间为 $\tau_4 = 5.4 \text{ m} / (15.2 \text{ m/min}) = 0.355 \text{ min}$ 。

在站台层楼梯口等候时间为 $\tau'_1 = 1\,800 \text{ 人} / (455 \text{ 人/min}) = 3.956 \text{ min}$,因在站台层楼梯口等候而增加的时间为 $\tau'_1 - \tau_1 = 3.287 \text{ min}$ 。

站厅层的使用负荷=车站使用负荷-从事故步行楼梯直接疏散至地面的人员数,即 $n = 1\,800 \text{ 人} - (70 \text{ 人/min} \times 3.956 \text{ min}) = 1\,523 \text{ 人}$ 。

在站厅层楼梯口等候的时间为 $\tau'_2 = 1\,523 \text{ 人} / (578 \text{ 人/min}) = 2.635 \text{ min}$,因在站厅层楼梯口等候而需增加的时间为 $\tau'_2 - (\tau'_1 - \tau_1) = -0.652 \text{ min}$,说明不需要增加等候时间。

因此,等候时间为 3.287 min。

总疏散时间为 $\tau_z = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + 3.287 \text{ min} = 5.916 \text{ min} \approx 6 \text{ min}$ 。

根据以上计算,疏散时间为 6 min。在本文的地铁车站火灾模拟中,取计算时间为 6 min。这与《地铁设计规范》[5]规定的“在高峰小时客流量发生火灾时,6 min 内应将一列车和站台上候车的乘客及工作人员撤离站台”是相符的。

3 岛式无屏蔽门地铁车站列车火灾的数值模拟

地铁车站发生火灾有三种情况:站台发生火灾,站厅发生火灾,列车在站台发生火灾。站台又有岛式与侧式、有无屏蔽门之分,着火的位置也不确定。对于不同的情况,火灾发生的情况差别很大。由于篇幅所限,不能将各种火灾情况的计算结

果一一展示,下面以岛式无屏蔽门的地铁车站列车火灾为例,对列车第四节车厢发生火灾的情况进行数值计算。每节列车长度为 19.4 m。当列车在车站发生火灾时,通风情况与站台发生火灾相同,站台送风及站厅排风全部停止,送风机全部用于站厅加压送风,排风机全部用于站台机械排烟。采用瞬态模拟,共生成网格 195 535 个,节点 231 980 个,模拟时间段为开始发生火灾至人员从站台全部疏散到外部地面,历时 6 min。火灾强度取 10.5 MW。两个楼梯口间距为 51 m,火源中心距最近的楼梯口 10 m。物理模型如图 1 所示。

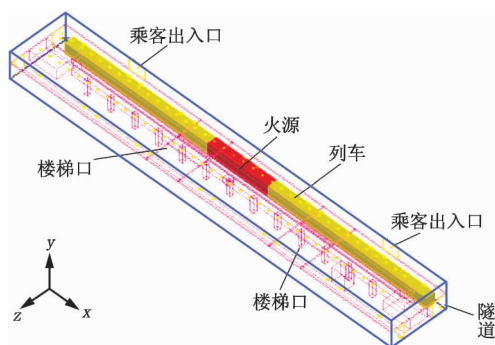


图 1 物理模型

3.1 温度场

列车着火是火源位于车站墙壁附近的一种情况。火灾发生后,火羽流上升撞击顶棚后贴附顶棚运动。烟气及热量迅速蔓延至楼梯口,一部分由楼梯口上升至站厅层,并迅速扩散;另一部分由楼梯口向两侧扩散。虽然站厅的加压送风与站台的机械排烟作用可以减少烟气和热量向站厅的扩散,但是不可避免地,站台层和站厅层会受到热气流与烟气的影响,致使温度升高,烟气浓度加大。楼梯口受到站厅送风的影响,温度有所降低,表现为楼梯口两侧的烟层温度高于中间楼梯口处;受到火源的影响,火源侧墙壁的温度迅速升高,墙壁对车站的热辐射作用增强。近火源楼梯口断面、过火源断面、远火源楼梯口断面温度分布分别如图 2~4 所示。

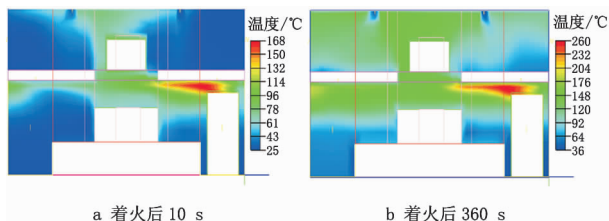


图 2 近火源楼梯口断面垂直温度场分布

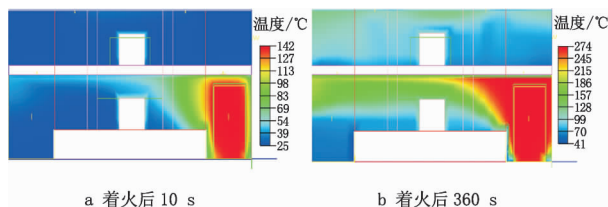


图 3 过火源断面垂直温度场分布

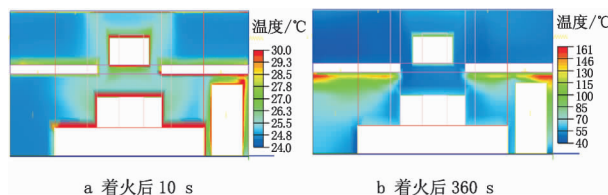


图 4 远火源楼梯口断面垂直温度场分布

示。沿列车方向垂直温度分布如图 5 所示。从图中可以看出,站台层烟气分层明显,而站厅层没有明显的分层。

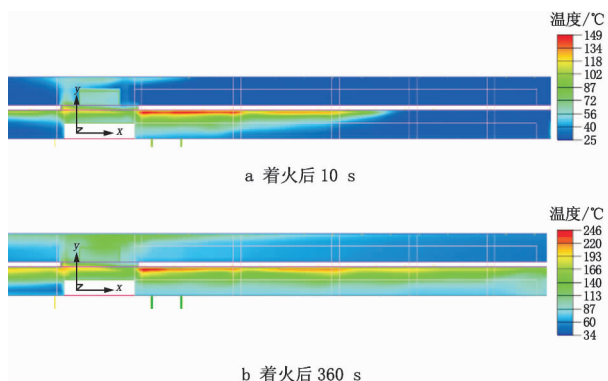


图 5 沿列车方向垂直温度剖面图

3.2 气流场

火灾发生后,站厅层只送风不排风,站台层只排风不送风。图 6 为离火源较近的楼梯口断面的气流分布图。着火 10 s 时,火羽流尚未对此断面产生影响,事故送、排风系统刚刚启动,所以此断面的气流分布还很均匀,站台层楼梯口有速度约为 0.7 m/s 的向下气流。随着火灾的持续,车站内气流受到火羽流及车站送排风系统的影响,到火灾发生 360 s 时,站台层楼梯口处的向下气流速度为

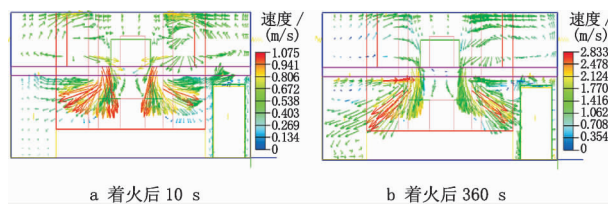


图 6 近火源楼梯口垂直气流分布

1.8 m/s 左右,站台的气流方向逆着人员疏散方向,有利于人员逃生。《地铁设计规范》^[5] 19.1.39 条规定,地下车站站台发生火灾时,应保证站厅到站台的楼梯口处具有速度不小于 1.5 m/s 的向下气流。此楼梯口的向下气流为 1.8 m/s,大于 1.5 m/s,满足规范的要求。

4 地铁火灾实体燃烧试验

为了进一步验证 CFD 模拟应用于地铁火灾模拟的可靠性以及进一步了解地铁车站发生火灾后的烟气流动状况,笔者对在深圳地铁进行的实体燃烧试验的结果与 CFD 模拟结果进行了比较。由于篇幅有限,本文只列出了几个典型断面来说明地铁火灾的烟气流动状况。图 7 记录了实体燃烧试验现场的火源与烟气流动状况。由于本次试验是在



图 7 实体燃烧试验

已建成的地铁车站内进行的,基于安全性和不损坏已有装修及电缆等诸多因素,不可能完全还原真实的地铁火灾强度及规模,但是在本次试验中可以清晰地观测到地铁车站发生火灾后的烟气流动状况。从图 7,8 可以看出,站台层烟气分层非常明显,而站厅层的分层很不明显。这一现象在计算机模拟结果中是同样存在的(如图 2,3 所示)。这是因为烟气在通过扶梯口向站厅层扩散时卷吸、掺混空气并被冷却造成的。计算机模拟所得到的分层现象较实际火灾明显,主要是由于试验过程中空气的扰



图 8 楼梯口烟气分层情况

动现象较多,而计算机模拟则不存在试验的密封性及空气的扰动等因素的干扰。

5 结语

地铁车站火灾发生后,火羽流上升撞击顶棚后贴附顶棚运动。烟气及热量迅速蔓延至楼梯口,一部分由楼梯口上升至站厅层,另外一部分由楼梯口向两侧扩散,并由楼梯口迅速向站厅层扩散。站台层和站厅层受到热气流与烟气的影响,温度升高,烟气浓度加大。从 CFD 模拟结果与试验结果的比较可以看出,如果方程模型选用恰当,边界条件设置合理,CFD 模拟方法用于火灾模拟的结果是能够令人满意和信服的。

参考文献

- [1] 周竹虚. 地下空间的火灾特点[J]. 消防技术与产品信息, 1999(9): 42-43
- [2] 公安部天津消防科学研究所. 地下大型商场火灾蔓延规律和烟气流动特性研究报告[R], 2001
- [3] 范维澄, 王清安, 姜冯辉. 火灾学简明教程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995
- [4] 晨佳. 地铁车站火灾时疏散能力计算[J]. 地下工程与隧道, 1992(4): 33-35
- [5] 北京城建设计研究总院. GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003

· 书讯 ·

建筑节能技术与实践丛书 《建筑环境系统模拟分析方法——DeST》

计算机模拟技术已成为预测、分析和评价建筑热湿环境的主要手段,广泛应用于建筑及空气调节系统设计、运行管理、故障诊断等方面,并取得了极大的成功。

本书以清华大学建筑技术科学系开发的建筑环境模拟软件——DeST 为基础,对建筑环境的模拟方法进行了系统、全面的介绍和论述。全书共分 4 篇 15 章,分别介绍了 DeST(Designer's Simulation Toolkits)的发展历史、主要特点和可应用的领域;建筑物本体热状况的动态逐时模拟方法及其验证过程;建筑热环境控制系统的全工况模拟方

法;建筑模拟软件在实际工程中的应用。本书的附录中还补充介绍了 DeST 的软件结构,以更好地指导读者使用 DeST。

本书可供建筑节能技术研究的科研工作者、住宅和公共建筑节能设计的工程技术人员使用。对从事建筑环境计算机模拟软件设计的软件设计者也有很好的参考价值。该书由江亿院士主编,清华大学 DeST 开发组著。由中国建筑工业出版社出版发行。

(姚荣华)