

运行地铁列车应急排烟模式的研究

詹文元

(深圳市地铁集团有限公司 运营分公司, 广东 深圳 518100)



作者简介：詹文元（1978-），男，工程师，现从事地铁车辆维修管理与研究工作。

摘 要：通过初生婴儿的头围确定车门开度的上限值，利用气体动力学与燃烧学理论建立了地铁列车在隧道发生火灾时的数值分析模型，采用 FLUENT 软件模拟了地铁列车在不同速度、不同开门方案下，排烟所需时间及车厢内外压强分布。结果表明，列车车门开度 0.07 m、车速为 30 km/h 时，能够快速、有效地排出烟雾。在深圳地铁“世界之窗 - 赤湾”2 号线对数值分析结果进行了试验验证。试验结果与数值分析结果吻合，表明该应急排烟模式的数值分析方法具有较高精度。

关键词：地铁车厢火灾；应急排烟；数值模拟；试验分析； $k-\varepsilon$ 模型

中图分类号：U298.4；U231 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2012)03-0058-04

Research of Emergency Smoke Exhausting in Running Subway Train

ZHAN Wen-yuan

(Operation Filiale, Shenzhen Metro Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518100, China)

Abstract: Taking head circumference of infants as the higher limit, numerical models of subway train getting fire in tunnel were established based on gas dynamics and combustion theory with the software FLUENT. Smoking-exhausting required time and pressure inside and outside of the train with different speed and opening door scheme was simulated, which showed that the smoke inside the railway carriage could be rapidly exhausted when the door opening degree was 0.07 m and the speed was 30 km/h. Experiment result in the Window of the world and the chiwan 2 Line of Shenzhen metro was consistent with numerical approach, which indicated numerical analysis for emergency smoke-exhausting mode was reliable with high accuracy.

Key words: subway vehicle fire; emergency smoke; numerical simulation; experimental analysis; $k-\varepsilon$ model

0 引言

由于地铁火灾带来的人员伤害、财产损失和社会影响等一系列问题，世界上众多国家都开始了对地铁火灾的研究。目前国内外研究地铁火灾的主要方法包括全尺寸试验、小尺寸模型试验和计算机数值模拟^[1-4]。上世纪 70 年代，瑞士、英国、日本、奥地利等国先后进行了大量的隧道实际尺寸火灾试验，研究在不同条件（如通风方式、通风的大小、火灾负荷等）下火灾的持续时间以及有效减低火灾所造成的损失的方法^[4]。韩国 Park^[5]等人通过对双层地铁车站进行现场实测，并以实测的速度值作为数值模拟的边界条件，研究了车站发生火灾时的通风和烟气流动特性。中国安全生产科学研究院的钟茂华和史聪灵等人^[6]制造了一个 1:10 的地

铁模型，分析了站台与站厅连接处风速和地铁发生火灾时的排烟模式。大连交通大学^[2]运用 FLUENT 软件模拟地铁列车中部着火，在不同火灾功率下列车继续运行和停留在隧道中 2 种情景进行了模拟研究。西南交通大学^[8]利用通风网络模型对深圳地铁隧道火灾进行了模拟，得到了控制隧道内烟气不发生逆流的临界风速值。广州大学^[9]运用 PHOENICS 软件对地铁隧道火灾的烟气特性和临界风速随火灾的变化关系进行了模拟研究，得出临界风速随火灾强度的变化关系曲线。

目前对地铁列车在运行中发生火灾时的排烟模式鲜有报道。本文利用气体动力学与燃烧学理论建立了地铁列车在隧道发生火灾的数值分析模型；通过婴儿头围确定列车车门开度，并利用 FLUENT 软件模拟了地铁列车在不同速度和车门开度下，排烟所需时间及车厢内外压强分布。列车在车门开度 0.07 m、列车速度为 30 km/h 时能够快速、有效地将车厢内部的烟雾排出到

收稿日期：2011-06-30；收修改稿日期：2012-02-20

车外。在深圳地铁“世界之窗-赤湾”2号线对数值分析结果进行了实车试验。试验结果与数值分析结果吻合,表明该应急排烟模式的数值分析方法具有较高精度,列车在发生火灾时,车速为30 km/h,车门开度0.07 m时,排出车厢内烟雾是可行的。

1 理论基础

列车在发生火灾时,列车内烟气处于三维非稳态湍流流动和传热状态,同时燃烧与湍流之间存在着强烈的相互作用,故文中选用PDF燃烧模型和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[10-11]进行计算。

1.1 燃烧模型

燃烧模型采用的是混合分数模型^[10]

$$Z = \frac{sY_F - (Y_O - Y_O^\infty)}{sY_F' + Y_O^\infty} \quad s = \frac{\nu_O M_O}{\nu_F M_F} \quad (1)$$

式中: Y_F 为燃料的质量分数; Y_F' 为燃烧源处质量分数; Y_O^∞ 为初始环境中氧气的质量分数; s 为引入的系数; M_O 和 M_F 分别为氧气和燃烧的相对分子质量; ν_O 和 ν_F 分别为氧气和燃烧化学反应的计算系数。

燃烧过程中产物浓度的空间和时间变化为

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \rho K \nabla Z \quad (2)$$

式中: $Z(x,t) = Z_f = \frac{Y_O^\infty}{sY_F' + Y_O^\infty}$ 为火焰面出的混合分数; ρ 为烟雾浓度。

1.2 标准 $k-\varepsilon$ 模型^[11]

湍动能 k 方程为

$$\rho \frac{dk}{dt} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

湍动耗散率 ε 方程为

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: $G_k = u_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 为平均速度梯度引起的湍

动能; $G_b = \beta g_i \frac{u_i}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$ 为浮力影响引起的湍动能;

$Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2$ 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响;

$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 为湍流粘性系数; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数;

σ_k , σ_ε 分别为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数; Pr_t 为普朗特数; g_i 为重力加速度在 i 方向上的分量;

$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$ 为热膨胀系数; $M_t = \sqrt{k/a^2}$ 为湍动马赫数;

$a = \sqrt{\gamma RT}$ 为声速。

2 数值模拟

2.1 模型及边界条件

图1为单节列车车厢模型,车厢几何参数为深圳地铁A型车尺寸,列车总计6节车箱,总长140 m,高3.8 m,宽3.09 m,底板高1.1 m,每节车厢10扇车门,车门高1.8 m,车门宽1.4 m。为了建模与计算方便,车厢的玻璃窗户以及车厢里面的椅子、扶手等均忽略不计。由于列车车体结构复杂,难以运用结构化网格解决任意形状和车体任意连通区域的网格划分,文中采用混合网格划分技术对模型进行网格划分,并运用FLUENT动网格技术,定义车体为刚体运动,包裹车体内外25 mm的区域为模拟边界层网格,通过边界型函数来控制车体的运动。本文模拟在列车中部位置发生火灾,火灾功率大小为2 MW,燃烧半径为0.5 m时,列车分别以30 km/h、45 km/h、60 km/h和80 km/h的速度在隧道中运行确定最佳的开门方案。由于深圳地铁列车运行车速不超过80 km/h,故地铁隧道及车厢内部的气体均可看作不可压缩的气体^[10]。定义列车时速为进口速度,离列车尾部后方200 m处的大气压为标准大气压压力。

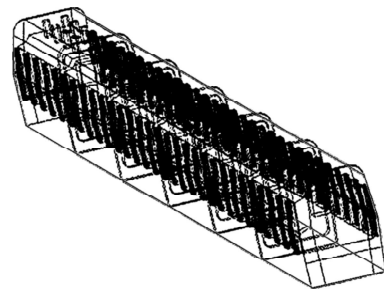


图1 单节列车车厢模型

2.2 列车车门开度大小

列车车门开度的确定,主要以保证乘客安全为前提。在各种乘客中初生婴儿头部直径最小,故以初生婴儿头部直径为计算标准。由文献^[12]中查出1~12个月大小的婴儿头部直径在11~15 cm左右,为确保安全,车门的开度不应大于11 cm。

文中通过对车门开度分别为0.07 m,0.08 m,0.09 m和0.10 m进行了数值计算。计算结果显示,列车在相同车速下,车厢内外压强分布相同,数值大小不同。限于篇幅,文章只给出了速度为30 km/h、门开度为0.07 m时车厢的内外压强分布(图2)。图2显示车厢内部的压强基本一致,外部压强越靠近后面越小,且在车厢外部,前面压强大于车厢内部的压强,旅客受到正压;后面的压强小于车厢内部的压强,旅客受到负压。以半岁婴儿^[10]为标准计算不同车门开度下列车前部和后部高速气流对其身体形成的压力,结果如表1。表1中显示列车后部负压值随着车门开度的增加而增大,即速度越大,旅客在列车最后一节车厢承受的负压就越大。为保证乘客安全,取车门开度为0.07 m。

表1 不同车门开度下列车前后车厢的压强大小

项目	不同车门开度下的数据			
	0.07 m	0.08 m	0.09 m	0.10 m
列车前部压强差 / Pa	102.6	266.5	373.2	497.2
列车后部压强差 / Pa	-224	-564.3	-896.2	-1 378.2

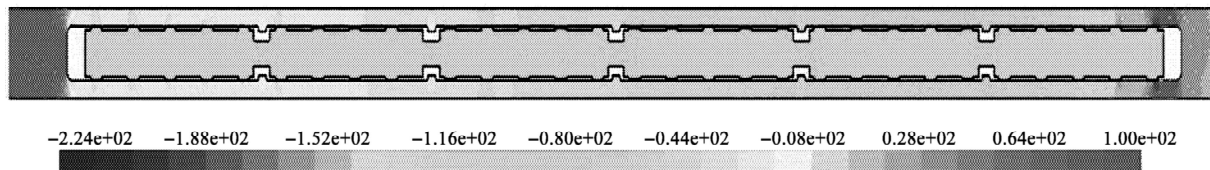


图2 30 km/h 速度时列车车厢内外压强分布图

因此确定车厢内部气体交换一次的时间只需考虑车速和车门开启的数量两个因素。因为在打开相同数量的车门情况下,车速越大,交换一次气体需要的时间就越少,故取列车在正常运行时遇特殊情况下的最低速度30 km/h来确定车厢内部烟雾在不同的开门方式下排净所需时间。提出了列车车厢车门开度为0.07 m前提下,车厢客室车门开门数量的4种方案:

方案1:列车车门全部开;

方案2:隔1对车门打开1对车门;

方案3:隔2对车门打开1对车门;

方案4:隔4对车门打开1对车门。

由于列车每节车厢空调循环气量可以忽略不计,因此列车交换一次气体所需的时间即为车门缝隙排烟时间。通过以30 km/h的列车运行速度下对以上4种开门方案分别进行数值分析,提取列车气体流量和烟雾排净所需时间如表2。表2显示,方案1的气体流量最大、烟雾排净时间最短,车厢内烟雾排净只需10.9 s,排烟时间是方案2的1/2,方案4的1/4,故选用方案1作为应急排烟模式的开门方案。

表2 不同方案的列车排烟时间

参数	方案1	方案2	方案3	方案4
瞬时流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	65.61	28.83	25.13	17.71
时间 / s	10.9	24.8	28.5	40.4

2.4 列车运行速度

由于列车排烟时的气体速度随着列车运行速度的增加而增大,大的气流速度将使车厢外面后部的压强减小,从而在车厢后部形成大的负压,因此列车应急排烟模式必需考虑列车运行速度对排烟时间和车厢后部压强的影响。通过将列车所有客室车门打开0.07 m的开度,列车在30 km/h、45 km/h、60 km/h和80 km/h 4种速度下进行数值分析,得到列车在不同的运行速度下的气体流量、排烟时间以及列车第6节车厢后部内外压强差(表3)。由表3可知,列车烟雾排净时间与列车运行速度成反比;列车气体流量与车速成正比;第6节车厢后部内外压强差与列车运行速度成反比。列车运行速度越大,排烟时间越短,但是越高的列车运行速度将会在第

2.3 列车开门方案

深圳地铁车辆每节车厢空调循环气量为3 200 m^3/h ,车厢内腔容积为114.95 m^3 。空调循环气量与车速和打开车门数量多少无关,且其对排烟时间的影响很小,

6节车厢后部产生较大的负压,给乘客的安全带来严重的影响,且列车以30 km/h的速度运行,全部车门开度为0.07 m时,车厢内部气体完全交换1次所需的时间只需10.9 s,完全满足运行中的排烟要求。故在列车发生火灾时,确定应急排烟模式的列车运行速度为30 km/h。

表3 不同速度下列车车门处空气流量及排出时间

速度 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	30	45	60	80
流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	65.91	85.44	131.79	174.10
时间 / s	10.9	8.4	5.4	4.1
车厢后部压强差 / Pa	-224	-463	-795	-1 210

3 排烟试验

根据数值分析结果,在深圳地铁2号线进行了实车现场试验。列车客室车门全部打开为0.07 m开度,通过气体压强测量仪分别测量在30 km/h、45 km/h、60 km/h、80 km/h的不同速度下,列车前部和后部车厢内外的压强差,结果如表4。表4显示,在速度达到45 km/h时,列车后部车厢将形成440 Pa的负压,这足以将小物品吸出车外,在没有防备心理情况下,可以将小孩推倒,且发生火灾时旅客容易产生恐慌,极易出现踩踏事故,故列车在运行过程中,综合考虑到乘客的安全,列车车门全部打开的开度取0.07 m。对比表2、表3和表4发现,数值解与试验结果相吻合,这说明选用混合分数燃烧模型和标准k-ε湍流模型建立地铁列车在隧道发生火灾时的数值分析模型分析列车的排烟情况是有效的。

表4 各种车速下试验测量数据

速度 / $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	排烟时间 / s	车厢内外压强差 / Pa	
		列车前部	列车后部
30	11.6	90	-210
45	9.4	150	-440
60	6.7	430	-790
80	4.5	800	-1 114

4 结语

通过对地铁列车在隧道发生火灾时的应急排烟模式进行了数值分析和实车现场试验,发现数值解和试验结果吻合得较好。数值分析发现,列车在发生火灾

时,全部车门开度0.07 m、车速30 km/h能够快速、有效地排出烟雾。数值分析与实车现场试验结果的一致性表明,利用气体动力学与混合分数燃烧学理论建立地铁列车在发生火灾的数值分析模型,采用FLUENT软件进行数值分析是正确的,利用该方法确定列车应急排烟模式具有较高精度。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 刘万福, 申海波, 王静萱, 等. 地铁模型实验测量与火灾模拟 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29 (6): 1074-1076.
- [3] Dong-Ho Rie. A study of optimal vent mode for the smoke control of subway station fire [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21:3-4.
- [4] 杨立中, 邹 兰. 地铁火灾研究综述 [J]. 工程建设与设计, 2005, 11: 8-12.
- [5] Won-Hee Park, Dong Hyeon Kim, Hee-Chul. Numerical Pre-

- diction of Smoke Movement in a Subway Station Under Ventilation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21:304-309.
- [6] 钟茂华, 史聪灵, 涂旭炜, 等. 深埋地铁岛式站点火灾模型实验研究—实验设计 [J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(1):3-9.
- [7] 王洪德, 林 琳, 赵 轶. 地铁隧道火灾事故通风方式数值模拟 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2010, 29 (2): 177-181.
- [8] 冯 炼, 刘应清. 地铁火灾烟气控制的数值模拟 [J]. 地下空间, 2002, 22(1):61-64.
- [9] 赵相相. 地铁隧道火灾烟气流动与控制规律研究 [D]. 广州：广州大学, 2006.
- [10] E John Finnemore, Joseph B Franzini. Fluid Mechanics with Engineering Applications [M]. 北京：清华大学出版社, 2003: 114-121.
- [11] 钟茂华, 史聪灵, 涂旭炜, 等. 深埋地铁车站火灾实验与数值分析 [M]. 北京：科学出版社, 2009:71-72.
- [12] 陈开元. 宝宝成长必读 [M]. 石家庄：河北科学技术出版社, 2006.

(上接第54页)

仿真运行曲线(电网线电流、列车牵引功率、机械功率、列车速度、加速度、运行时间对运行里程的曲线)如图5(上行线)和图6(下行线)所示。

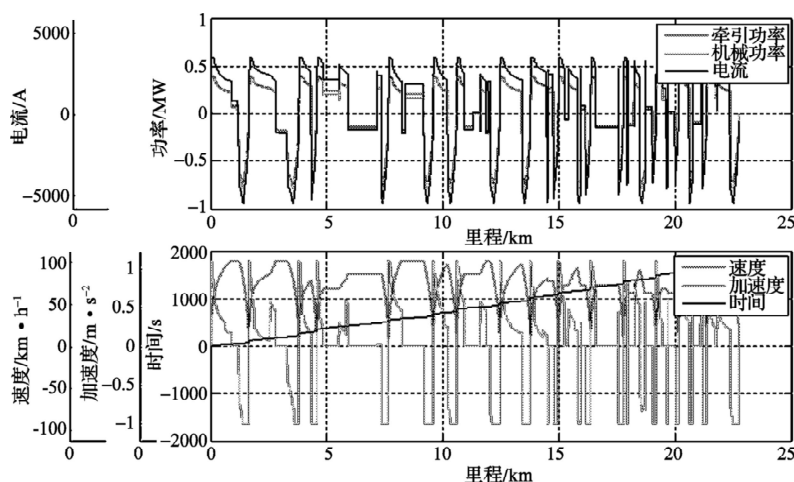


图6 下行线(礼嘉站至上新街站)的模拟运行曲线

5 结语

本文为国内首个DC1 500 V供电、最高速度达100 km/h的B型地铁列车重庆地铁6号线的牵引/电制动特性设计和性能计算仿真。该地铁列车已完成现场试验验证和运行考核,目前正在进行载客运营,运行情况良好,电传动系统性能稳定,列车动力性能及各项技术指标符合设计要求。

参考文献：

- [1] 丁荣军, 陈文光. 地铁车辆用交流传动系统的设计 [J]. 机车电传动, 2001(5).
- [2] 陈文光, 丁荣军. 国产化北京地铁列车牵引电传动系统设计 [J]. 机车电传动, 2006(4).

动态消息

《机车电传动》编辑部声明

为顺应网络环境下期刊出版的新要求,推进期刊网络出版传播,凡向本刊投稿并被本刊录用,在著作权法的框架内,该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权利在全世界范围内转让给本刊及本刊授权的相关数据库。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网、手机等进行网络出版或提供信息服务,根据本刊编辑部稿酬标准一次性支付作者著作权使用报酬(即稿费,包含印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬)。

《机车电传动》编辑部