文章编号:1673-0291(2015)04-0070-07 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291-2015.04.013

地铁站台上列车车厢内部火灾的数值模拟分析

郗艳红,顾丛汇
(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘 要:采用火灾动态模拟软件FDS对地铁站台上列车车厢内部火灾进行了数值模拟,分析了着火车厢车门关闭和开启时车厢内部烟气温度、扩散速度、质量分数和能见度的变化规律.结果表明:车厢门关闭和开启时,烟气充满两相邻车厢的时间分别为68 s和70 s;车厢内1.5 m高处烟气质量分数最大值分别为0.00 034和0.00 003;着火车厢内1.5 m高处的能见度分别为14 m和18 m.对站台上列车车厢内部着火时的烟气扩散规律进行研究,对于指导人员疏散、保证乘客安全和改进地铁列车火灾应急处置预案等提供参考.

关键词:地铁隧道;车厢火灾;温度;能见度;烟气质量分数
中图分类号:X913.4 **文献标志码**:A

Numerical simulation on carriage fire characteristics in subway platform

XI Yanhong, *GU Conghui*
(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: FDS (Fire Dynamics Simulator) software is used to analyze the carriage fire characteristics in a subway platform. On the basis of simulation, smoke temperature, diffusion velocity, concentration and visibility in the carriages under the situation of opening doors and closing doors are analysed. The results of the door with closing and opening show that carriages near to the fire compartment are filled with smoke is 68 s and 70 s respectively. And the maximum smoke mass fraction is 0.00 034 and 0.00 003 respectively above the height 1.5 m. Visibility is 14 m and 18 m, respectively. It is very important to guide the evacuation, ensure the safety of the passengers, improve the subway fire emergency response plans.

Key words: subway tunnel; carriage fire; temperature; visibility; smoke mass fraction

近年来,地铁车厢内部火灾层出不穷,如2003年韩国大邱地铁车厢火灾造成数百人死亡的惨剧,2011年广州地铁车厢内也发生了火情.国内外学者对地铁列车火灾研究的比较多[1-6],但是对车厢内部着火的情况研究较少[7].车厢内部着火后,火势发展迅速,燃烧蔓延较快,由火灾引发的烟气在列车车厢内会迅速蔓延,并且在短时间内充满整个车厢,造成重大人员伤亡和经济损失[7].

本文作者基于FDS软件,对站台上列车车厢内部着火时的烟气扩散规律进行研究,本研究对于指导人员疏散、改进地铁列车火灾应急处置预案、保证乘客的生命安全和减少财产损失,以及实际运营中的火灾防灾减灾都具有重要作用.

1 数值模拟方法验证

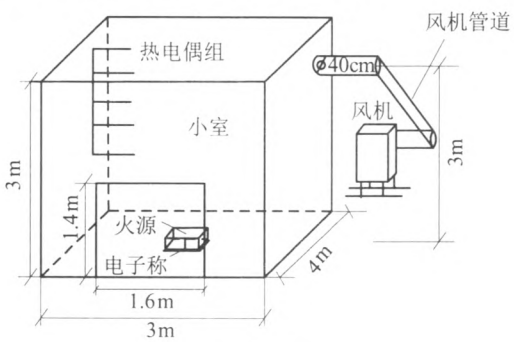
为了验证FDS软件对模拟列车火灾的可靠性,

收稿日期:2015-04-07
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014JBM081)
作者简介:郗艳红(1980—),女,河北唐山人,讲师,博士.研究方向为火灾安全控制及高速列车空气动力学.**email**:yhxi@bjtu.edu.cn.

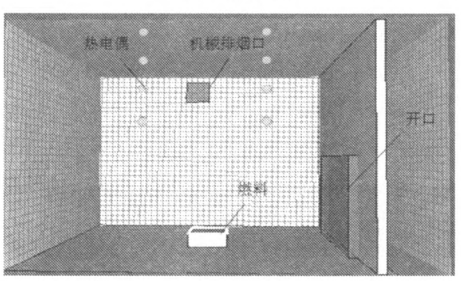
首先与中国科学技术大学游宇航[8]的小室火灾中的全尺寸烟气试验中火源热释放速率为 168 kW 的数据进行对比分析.

1.1　模型及边界条件

试验及数值模拟模型如图 1 所示,其中划分网格数目为 324 000 个.热电偶布置在小室的左侧壁上,从上至下依次距顶棚 0.05 m、0.35 m、0.35 m 和 0.4 m,分别记为测点 1～测点 4.



(a)试验装置



(b)数值模拟模型

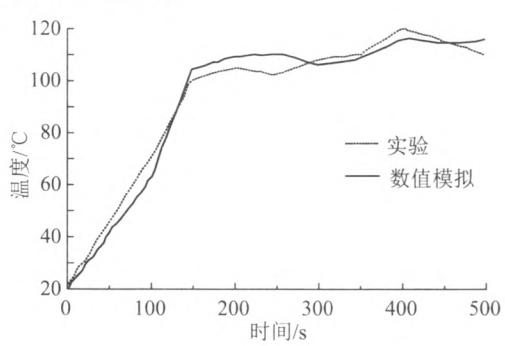
图 1　试验装置图

Fig. 1　Experimental device

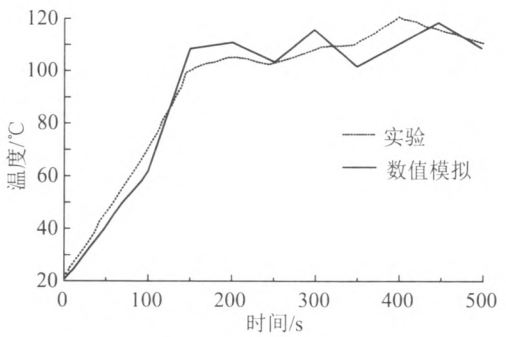
以模型试验中小室机械排烟风量为 1.03 m^3/s 为例,风口大小为 0.4 m×0.4 m,室内初始温度为 21 ℃,小室前侧开口设置为压力边界,且为一个标准大气压.

1.2　数值模拟与试验结果对比

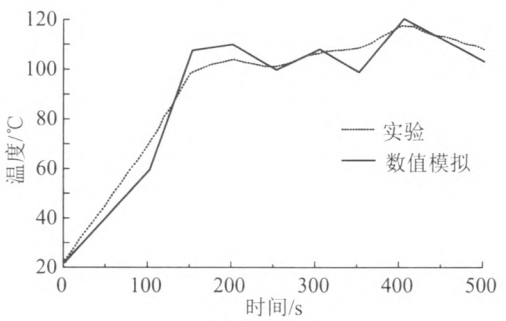
试验与数值模拟的温度时变曲线如图 2 所示.由图 2 可知,各测点的温度增长趋势相同,相对误差约为 6%,满足工程上的误差范围,说明数值模拟方法和结果是可信的.



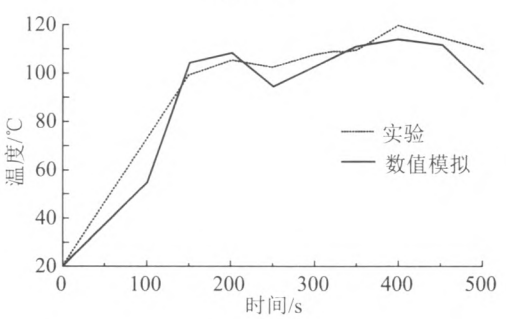
(a)测点 1



(b)测点 2



(c)测点 3



(d)测点 4

图 2　测点 1～测点 4 温度对比曲线

Fig. 2　Time-varying of temperature at different measuring points

2　地铁火灾烟气流动数值模拟

2.1　几何模型

选取北京某静止在站台的地铁列车火灾为研究对象,截取 4 个隧道段为出入口,两出入口端部之间的总长为 160 m,列车按照 6 辆编组,全长 120 m,宽为 2.8 m,高为 3.8 m.地下车站模拟的俯视图如图 3 所示.列车停靠在站台上,将列车及站台处网格加密,总网格数约为 76 万个.

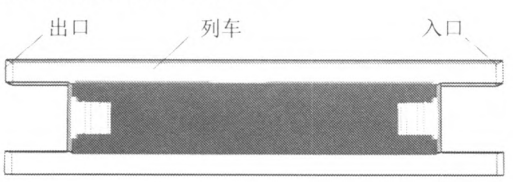


图 3　车站模拟俯视图

Fig. 3　Top view of station

2.2 边界条件

设置车站内 4 个出入口处的压强均为一个标准大气压,列车静止在站台上,环境初始温度为 20 ℃.

设置火源热释放速率为 5 MW,火源平方增长,在 t =163.2 s 时刻火源的热释放速率达到最大值,之后保持恒定.其中,火源尺寸为 0.5 m×0.5 m,位于第四节车厢内部,如图 4 所示,燃料种类为正庚烷.采用笛卡尔坐标系,X、Y、Z 分别代表车厢的长度、宽度和高度方向.

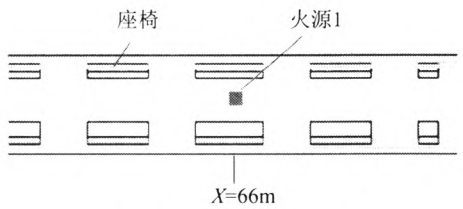


图 4 火源位置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fire source location

3 模拟结果与分析

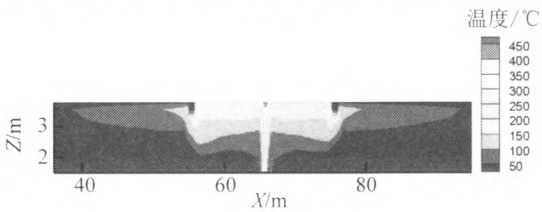
设置两种车厢门开启情况:①车厢门封闭;②车厢门在 t =50 s 时开启.

3.1 车厢内部的温度分布

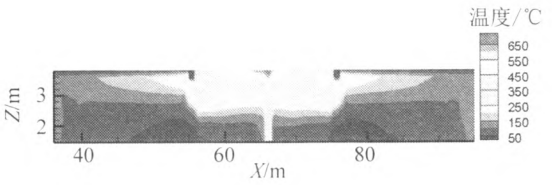
当着火车厢门处于关闭/开启状态时,着火车厢与相邻两车厢保持连通,车厢中心截面处温度扩散过程分别如图 5 和图 6 所示.

由图 5 可知,火源燃烧 68 s 后,烟气到达第二节车厢和第四节车厢的端部,燃烧 96 s 后,第三、四、五节车厢内充满烟气,火源燃烧持续时间为 217 s;火源熄灭后,着火车厢内部烟气温度为 400 ℃,高温烟气集中在第四节和第五节车厢内,因此这两节车厢内部温度高于着火车厢.

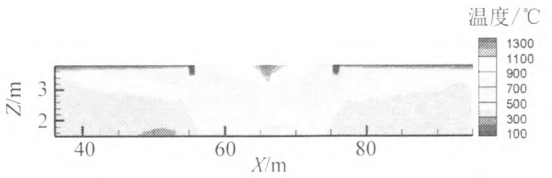
由图 6 可知,火源燃烧 70 s 后,烟气到达第二节和第四节车厢的端部,燃烧 103 s 后,第三、四、五节车厢内充满烟气,由图 6(a)和图 6(b)可知,车厢门开启前,着火车厢内最高温度达到 170 ℃,距离车底面 1.5 m 处温度为 100 ℃;车厢门开启后,车厢内温度降低,距离车底面 1.5 m 处温度为 80 ℃.



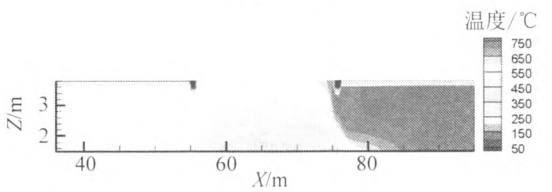
(a) t =68 s



(b) t =96 s



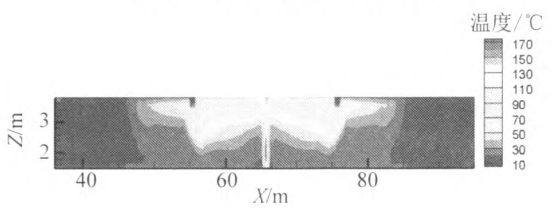
(c) t =150 s



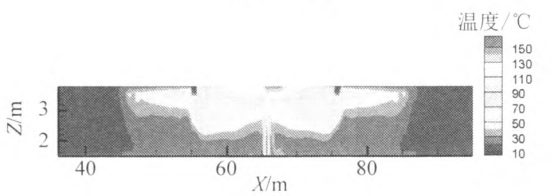
(d) t =217 s

图 5 车厢门关闭时车厢中心截面处温度扩散规律

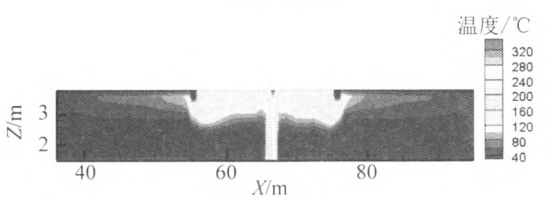
Fig. 5 Temperature diffusion process at center section when the door is closed



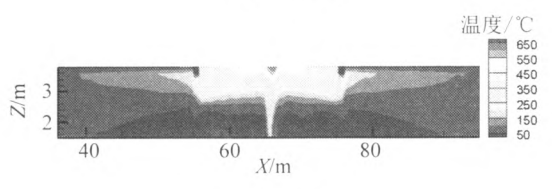
(a) t =49 s



(b) t =51 s



(c) t =70 s



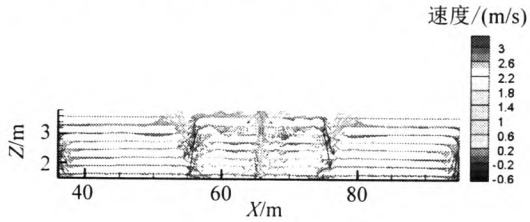
(d) t =103 s

图 6 车厢门开启时车厢中心截面处温度扩散规律

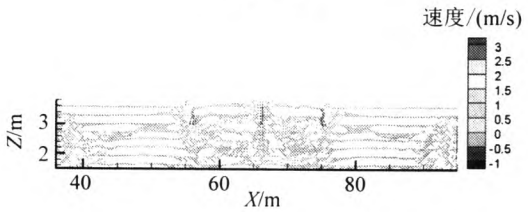
Fig. 6 Temperature diffusion process at center section when the door is opened

3.2　烟气速度分布规律

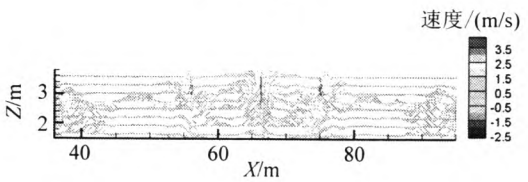
当着火车厢门处于关闭/开启状态时,车厢中心截面处速度矢量图分别如图 7 和图 8 所示.



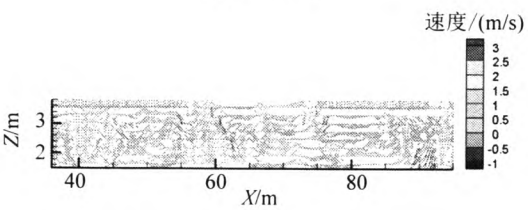
(a) t =68 s



(b) t =96 s



(c) t =150 s



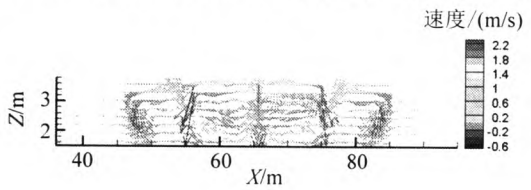
(d) t =217 s

图 7　车厢门关闭时车厢中心截面处速度矢量图

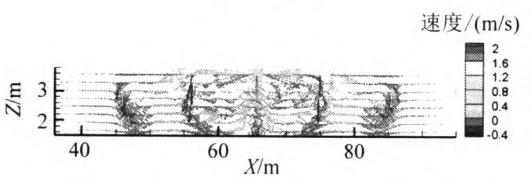
Fig. 7　Speed changing process at center section when the door is closed

由图 7 可知,烟气流动到第三节和第五节车厢端部所用的时间较长,火焰上方烟气流动速度大,最大速度达到 3.5 m/s,烟气到达端部时车厢内烟气层厚度为 0.8 m,当三节车厢内充满烟气时,靠近车厢顶部区域烟气流动速度大于烟气下层区域运动速度,第三节和第五节车厢的端部下方烟气流动相对剧烈;火源熄灭时,火焰偏转角不定,因而火灭后车厢内烟气流动随机性较大、相对复杂.

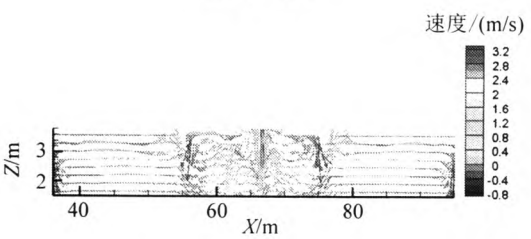
由图 8(a)、(b)可知,车厢门开启前,着火车厢内烟气流动速度为 0.2 m/s,火源正上方烟气流动速度最大,为 2.2 m/s. 车厢门开启后,由于车厢内压强大于站台内压强,着火车厢内烟气向车厢外部溢出,车厢内压强降低,第三和第五节车厢内压强大于着火车厢内压强,从而使得烟气迅速向着火车厢运动,着火车厢内烟气迅速向站台流动,烟气向上方运动速度减慢,火焰上方最高速度为 2 m/s. 由图 8(c)知,火源燃烧 70 s 后,烟气到达第三节和第五节车厢的端部,着火车厢内烟气流动速度为 0.5 m/s,第三和第五节车厢内烟气流动速度为 0.2 m/s. 随着火源的热释放速率增长,三节车厢内烟气流动速度也增加,火源燃烧 103 s 后,烟气充满三节车厢.



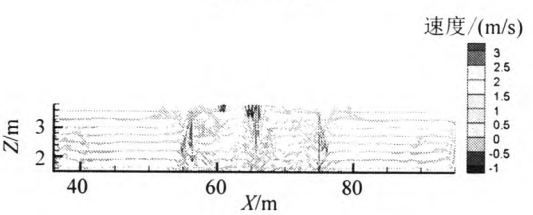
(a) t =49 s



(b) t =51 s



(c) t =70 s



(d) t =103 s

图 8　车厢门开启时车厢中心截面处速度矢量图

Fig. 8　Speed changing process at center section when the door is opened

3.3　烟气浓度分布规律

当着火车厢门处于关闭/开启状态时,车厢中心截面处烟气质量分数分别如图 9 和图 10 所示.

由图 9 可知,当火源处于增长阶段,车厢内烟气质量分数持续增加,在相同时刻下,当烟气刚到达第三节和第五节车厢的端部时,车厢内烟气质量分数最大值为 0.00 034,火源从燃烧到熄灭的时间为 217 s,此时车厢内烟气质量分数为 0.00 045.

由图 10 知,车厢门开启前,着火车厢内烟气质量分数较低,火源处烟气质量分数最大值为0.000 065,车门开启后,由于火源功率处于增长阶段,因而着火

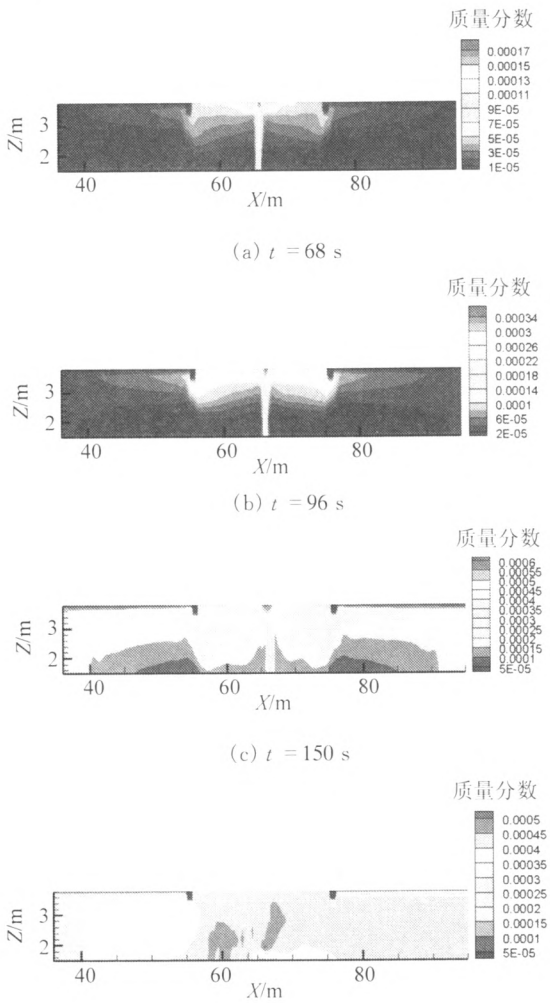
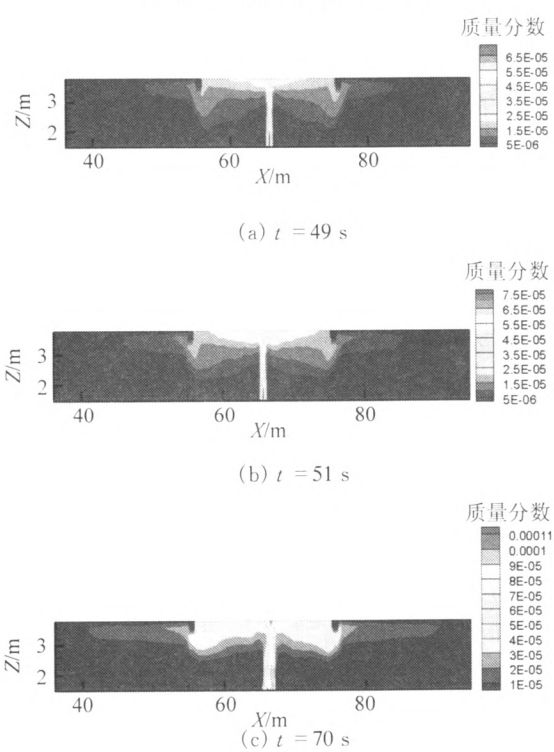
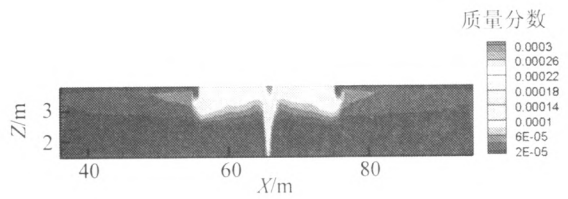


图 9 车厢门关闭时车厢中心截面处烟气质量分数

Fig. 9 Smoke mass fraction changing process at center section when the door is closed





(d) t =103 s

图 10 车厢门开启时车厢中心截面处烟气质量分数

Fig. 10 Smoke mass fraction changing process at center section when the door is opened

车厢内烟气量继续增加,烟气层厚度增加;火源燃烧70 s后烟气到达第三节和第五节车厢的端部,此时着火车厢内距车底面 1.5 m 处烟气质量分数 0.00 003,火焰上方烟气最大质量分数为 0.00 015.

3.4 烟气能见度的变化规律

当着火车厢门处于关闭/开启状态时,车厢中心截面处能见度分别如图 11 和图 12 所示.

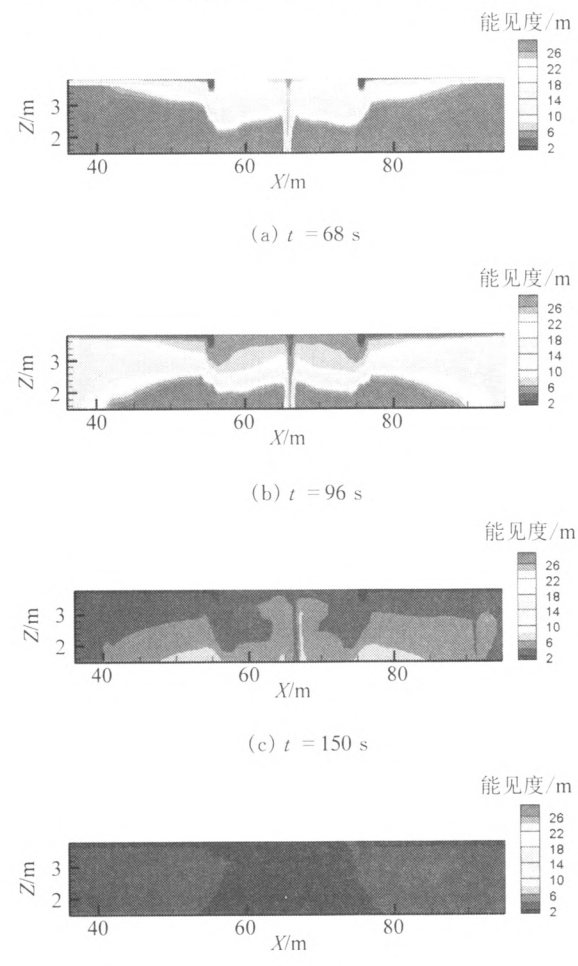
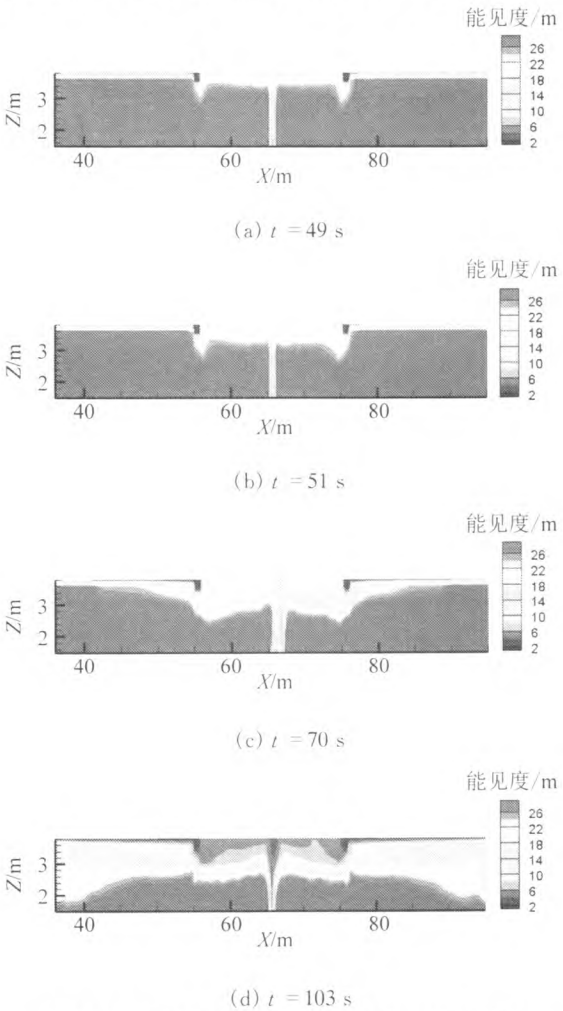


图 11 车厢门关闭时车厢中心截面处能见度

Fig. 11 Visibility changing process at center section when the door is closed

取距离车厢底面 1.5 m 处为人员疏散的高度标准,由图 11(a)可知,火源燃烧 66 s 后着火车厢内烟气能见度为 14 m,第三节和第五节车厢内烟气能见

度为 20 m;火源燃烧 98 s 后,着火车厢内距车底面 1.5 m 处的烟气能见度降低至 8 m,第三节和第五节车厢内烟气能见度为 16 m,由于烟气向上运动,从而火源附近处烟气浓度很低;随后由于车厢内处于封闭的状态,火源燃烧 236 s 后熄灭,大量烟气积聚在车厢内,使得着火车厢内烟气能见度为 2 m,第三节和第五节车厢内烟气能见度为 4 m.



(a) t = 49 s

(b) t = 51 s

(c) t = 70 s

(d) t = 103 s

图 12　车厢门开启时车厢中心截面处能见度

Fig. 12　Visibility changing process at center section when the door is opened

由图 12 可知,车厢门开启前,着火车厢内烟气浓度较低,烟气能见度很高,烟气层厚度为 0.2 m.车门开启后,由于火源功率处于增长阶段,因而着火车厢内烟气量继续增加,烟气层厚度增加至 0.4 m;火源燃烧 70 s 后烟气到达第三节和第五节车厢的端部,此时着火车厢内距车底面 1.5 m 处烟气能见度为 18 m;火源燃烧 105 s 后车厢内烟气层厚度为 0.8 m.

4　结论

通过分析地铁列车车厢内部火灾后车厢内烟气温度、浓度、能见度和烟气流动规律可知:

1)车厢门关闭时,火源燃烧 68 s 后烟气充满两相邻车厢,火源熄灭后相邻车厢内部温度高于着火车厢;车厢门开启时,火源燃烧 70 s 后烟气充满相邻车厢,车厢门开启前距离车底面 1.5 m 处温度为 100 ℃,车厢门开启后,降低到 80 ℃.

2)车厢门关闭时,车厢内烟气质量分数最大值为 0.00 034,火源熄灭后车厢内烟气质量分数为 0.00 045;车厢门开启时,着火车厢内距车底面 1.5 m处烟气质量分数 0.00 003,火焰上方烟气最大质量分数为 0.00 015.

3)车厢门关闭时,火源燃烧 66 s 后,在距离车厢底面 1.5 m 处,着火车厢内烟气能见度为 14 m,相邻两车厢内烟气能见度为 20 m;火源熄灭后,着火车厢内烟气能见度为 2 m,相邻两车厢内烟气能见度为 4 m;车厢门开启时,火源燃烧 70 s 后烟气到达两相邻车厢,此时着火车厢内距车底面 1.5 m 处烟气能见度为 18 m;火源燃烧 105 s 后车厢内烟气层厚度为 0.8 m.

致谢:论文工作得到了北京市科委课题“深层地铁车站消防设计研究、仿真及应用”(Z131100004513010)的支持,在此致谢.

参考文献(References):

[1] Li Yanfeng, Bian Jiang, Li Junmei. Research on smoke flow in a tunnel fire of subway system[J]. Procedia Engineering, 2014,71:390 - 396.

[2] Harish R, Venkatasubbaiah K. Effects of buoyancy induced roof ventilation systems for smoke removal in tunnel fires[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014,42:195 - 205.

[3] 毛军.地铁火灾烟气流动规律及应急控制方法研究[D].北京:北京科技大学, 2008.
MAO Jun. Research on smoke flow regularity and emergency control in subway fire[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2008. (in Chinese)

[4] 毛军,郁艳红,樊洪明.隧道内列车着火的火焰顶棚射流温度特性研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(3):17 - 24.
MAO Jun, XI Yanhong, FAN Hongming. Temperature characteristics of flame ceiling jet generated by fire on train in subway tunnel[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(3): 17 - 24. (in Chinese)

[5] 郁艳红,毛军,樊洪明, 等.地铁列车着火后在隧道内行驶的安全速度的实验研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(3):25 - 30.

XI Yanhong, MAO Jun, FAN Hongming, et al. Safety velocity of on-fire train moving in subway tunnel[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(3): 25 - 30. (in Chinese)

[6] 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 - 128.
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 - 128. (in Chinese)

[7] 刘采峰,彭岚,刘朝.列车车厢内火灾烟气运动的数值模拟研究[J].热科学与技术,2003,2(4):352 - 357.
LIU Caifeng, PENG Lan, LIU Chao. Numerical simulation of smoke movement in train compartment fire accidents [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2003, 2 (4): 352 - 357. (in Chinese)

[8] 游宇航,李元洲.机械排烟控制小室火灾烟气的试验研究[J].燃烧科学与技术,2007,13(3):259 - 264.
YOU Yuhang, LI Yuanzhou. Experimental study on cabin fire smoke controlling with mechanical smoke exhaust[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2007, 13 (3): 259 - 264. (in Chinese)

(上接第69页)

[7] 郗艳红,毛军,樊洪明, 等.地铁列车着火后在隧道内行驶的安全速度的实验研究[J].华南理工大学学报, 2010, 38(3): 25 - 30.
XI Yanhong, MAO Jun, FAN Hongming, et al. Safety velocity of on-fire train moving in subway tunnel[J]. Journal of South China University of Technology, 2010, 38(3): 25 - 30. (in Chinese)

[8] Hwang C C, Edwards C C. The critical ventilation velocity in tunnel fires - a computer simulation[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40: 213 - 244.

[9] 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.
ZHAO Yi. Numerical simulation of fire smoke and ventilation controlling in subway[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2009. (in Chinese)