

地铁站火灾烟气扩散 控制模式的数值模拟^{*}

南京工业大学 周 汝[☆] 何嘉鹏 蒋军成

摘要 提出了在楼梯口采用防烟空气幕来代替挡烟垂壁及速度不小于 1.5 m/s 向下气流的烟气控制模式。建立了双层地铁车站的物理模型,采用 CFD 方法模拟比较了 4 种烟气控制模式的控制效果。结果表明,在楼梯口设置防烟空气幕不仅可以保证人员 6 min 以上的安全疏散时间,而且减少了所需新风量,可以有效阻止火灾的进一步扩大和控制烟气扩散。

关键词 地铁站 火灾 烟气控制 防烟空气幕 挡烟垂壁

Numerical simulation of smoke control modes in underground railway station fire

By Zhou Ru[★], He Jiapeng and Jiang Juncheng

Abstract Puts forward a smoke control mode of applying smoke-preventing air curtain substituting for ceiling screen and down air flow with velocity no lower than 1.5 m/s at the landing of stairs. Establishes a physical model of a two-layer underground railway station, simulates and compares four smoke control modes by CFD. The results indicate that more than 6 minutes for safe evacuation can be guaranteed by the smoke-prevention air curtain and the quantity of fresh air is reduced compared with the conventional modes, therefore effectively prevents the fire expanding further and controls the smoke spreading.

Keywords underground railway station, fire, smoke control, smoke-preventing air curtain, ceiling screen

★ Nanjing University of Technology, Nanjing, China

①

0 引言

在地铁设计与营运过程中,有一个不能忽视的潜在问题,即地铁火灾的防范和应急处理问题。因此有必要对地铁站火灾时有毒有害烟气的蔓延规律进行深入研究,从而在理论上掌握设定着火点和燃烧物情况下火灾时空气流动及有毒有害烟气的蔓延规律,为地铁的防火救灾工作提供科学的理论依据。

目前我国地铁站一般分为上、下两层,上层为站厅层,下层为站台层。站台层的人员疏散到地面的唯一通道是站台层与站厅层相连接的楼梯口。当站台层发生火灾时,所产生的烟气将迅速通过楼梯口扩散至站厅层,并封住楼梯口,使得站台层人员失去逃生的机会。因此在站台层着火时,保证楼梯口的畅通直接关系到人的生命安全。根据《地铁设计规范》(GB 50157—2003)^[1]的要求,在高峰客

流量发生火灾时,6 min 内一列列车的乘客和站台上候车的乘客及工作人员要全部撤离站台。达到这一目的的传统方法是在楼梯口设置挡烟垂壁,站台层排烟,站厅层送风,使站台层形成负压,在楼梯口形成速度不小于 1.5 m/s 的向下气流^[2]。但是这种方法导致站台层形成负压,大量的新风将会涌入火场使得火势进一步扩大,给灭火救灾工作带来困难。因此,应采用新的方式进行防烟,利用早在通风工程中得到广泛应用的空气幕墙进行防排烟,上述问题就可以得到很好的解决,同时所需新风量较少,并且可以很好地阻碍烟气扩散,却又不妨碍人员的逃生。本文提出了将

①☆ 周汝,男,1981 年 5 月生,在读博士研究生
210009 南京市中山北路 200 号南京工业大学 225 信箱
(025) 83239964 (0) 13813866851
E-mail: maxmuse, zhou@163.com
收稿日期:2006-07-17
一次修回:2007-01-15
二次修回:2007-07-10

* 江苏省社会发展项目(编号:BS2003031)

空气幕用于地铁站楼梯口防烟,在楼梯口采用防烟空气幕来代替挡烟垂壁及速度不小于 1.5 m/s 的向下气流,并用 CFD 方法模拟比较了不同控制模式的烟气控制效果。

1 地铁站物理模型

本文的研究对象为一双层岛式车站,每层有效空间长 130 m,宽 20 m,高 5 m。其中地下 1 层为站厅层,两端各有 1 个人行出入口与外界相连,每个出入口宽 4 m,高 3 m;地下 2 层为站台层,站台左右两端分别有通往隧道的隧道口,每个开口宽 5 m,高 5 m。站厅与站台之间靠 4 个宽度为 5 m、水平开口长度为 6 m 的楼梯连接,楼梯间距为 20 m。车站平、立面示意图见图 1。

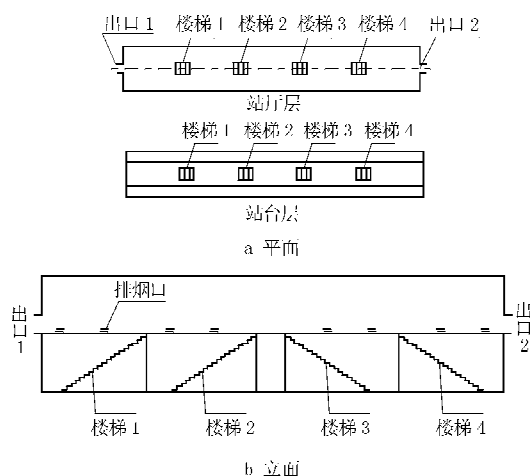


图 1 地铁站平、立面示意图

由于本文是针对一列列车在站台层着火时烟气控制的分析,研究的重点在站台层,为了节省模拟计算时间,在建立物理模型时将站厅层去掉,只对站台层进行模拟分析。

根据《地铁设计规范》(GB 50157—2003)的要求,用 0.5 m 高的挡烟垂壁将地铁站均分成 4 个防烟分区,每个防烟分区面积为 650 m²。

本文所模拟的机械排烟方式是垂直排烟,在每个防烟分区的轨道顶部均匀设置 4 个排烟口,每个排烟口的尺寸为 1 m×0.5 m(长×宽)。

假设列车的某一节车厢着火,着火车厢停置在与 2 号楼梯口对应的轨道上。

2 数学模型及边界条件

2.1 数学模型

对火灾时烟气的扩散控制作了三维场模拟,火灾的通用控制方程可以写成如下的通用形式^[3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

式中 t 为时间; ρ 为烟气的密度; ϕ 为通用变量; u 为烟气扩散速度; Γ 为烟气扩散系数; S_ϕ 为源项。

在模拟中采用 SIMPLEC 算法来求解雷诺平均 N-S 方程。对于湍流计算则采用完全浮力修正的 $K-\epsilon$ 两方程模型。

采用 Rosseland 辐射模型,该辐射模型适用于大空间,且计算量小。介质吸收系数取 0.1,介质散射系数取 0.01^[4]。

用体热源来模拟燃烧。一列列车的放热量随时间的变化如图 2 所示^[5]。当列车燃烧 25 min 时,放热量 q_s 达到峰值 13 MW。假设前 25 min 的放热量随时间呈线性变化,即 $q_s = kt, k = 8.67 \text{ kW/s}$ 。

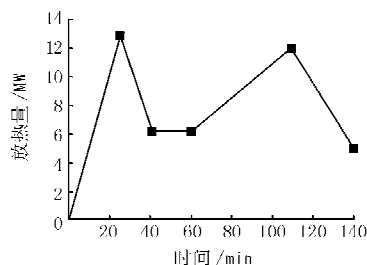


图 2 列车放热量随时间的变化

火焰上方的烟气羽流由三部分组成,即可燃物的质量损失、燃烧所需要的空气量和上升过程中卷吸的空气量。在一定规模火灾条件下,可燃物的质量损失速率、燃烧所需的空气量是一定的,因此在一定高度上羽流的质量流量主要取决于羽流对周围空气的卷吸能力^[6]。在工程计算中经常认为烟气羽流的质量就等于卷吸的周围冷空气量。在许多模拟中也因为忽略了可燃物的质量损失和燃烧所需要的空气量而不考虑质量源项问题。本文假设燃烧为充分燃烧,且燃烧产物为 CO_2 。根据氧耗原理,大部分的有机燃料燃烧时每释放一定量的热量($1.32 \times 10^7 \text{ J}$)就会有一定量的氧气(1 kg)被消耗^[7]。这样由热源的放热量就可得到燃烧所消耗的氧气量,进而可以求出所产生的烟气量。由计算可得,烟气量 $W_s = 9.03 \times 10^4 \text{ t}$ 。

2.2 边界条件

4 个隧道口取压力出口边界条件,压力为当地大气压,温度为地铁站内温度。排烟口设为风机出口边界条件,在边界处取压力升高值分别为 10, 20, 30 Pa 三种情况下,每个防烟分区排烟量分别为 6.1, 8.1, 10.3 m³/s。

3 楼梯口设置挡烟垂壁同时站台层采用轨顶排烟时防烟性能分析

3.1 物理模型和边界条件

挡烟垂壁是从顶棚下垂不小于 0.5 m 的固定或活动式的挡板,通过将烟流阻挡在挡板前,延长烟流封住楼梯口的时间,达到阻烟效果。本文在站台通向站厅的 4 个楼梯口的三面都安装了挡烟垂壁,如图 3 所示。

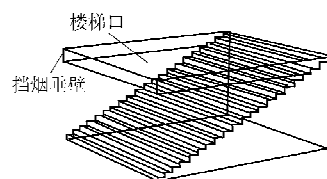


图 3 挡烟垂壁安装位置

将楼梯口设置为压力入口边界条件,入口压力为大气压。轨道顶部排烟口压力升高值为 30 Pa。

3.2 模拟结果

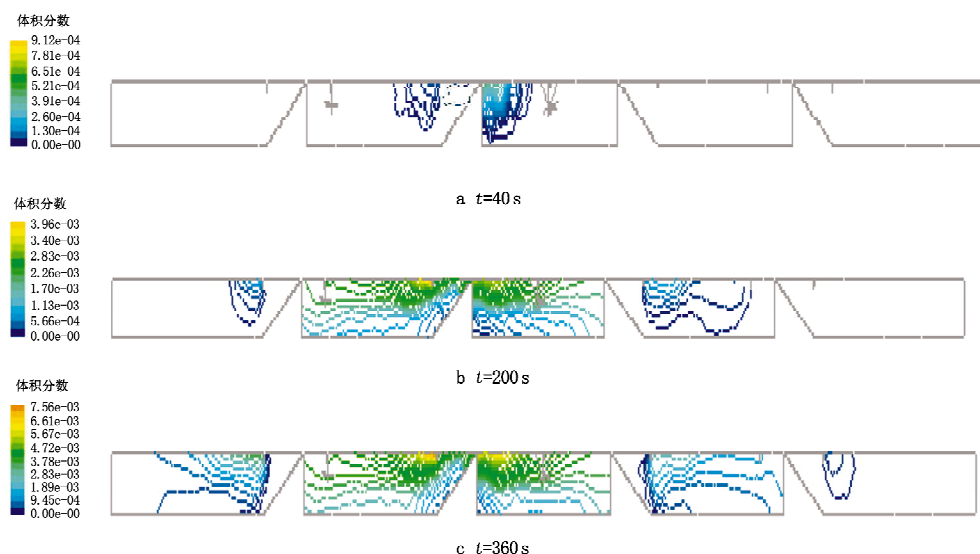


图 4 第 1 种烟气控制模式下地铁站烟气体积分数分布

梯上方挡烟垂壁的作用,烟气在此受到阻挡,但此时楼梯口已经有少量的烟气存在,如图 4a 所示,主要是由于烟气越过了侧面楼梯扶手上方挡烟垂壁到达楼梯口,并将继续通过楼梯口扩散至站厅层,威胁上一层的安全。

2) 从图 4b 可以看出,200 s 时,烟气虽然扩散到 1,3 号楼梯,但由于挡烟垂壁的存在,烟气被挡在了 1,3 号楼梯口前面。此时 2 号楼梯口已经完全被烟气充满,而在 4 号楼梯口还没有烟气。

3) 从图 4c 可以看出,360 s 时,1,3 号楼梯口的烟气厚度已经完全超过了挡烟垂壁的高度,尤其在挡烟垂壁前烟气层已经接近地面,但是烟气依然被挡烟垂壁挡在了楼梯口前。此时在 4 号楼梯也有少量的烟气出现并被挡在了楼梯口前面。

4 楼梯口设置挡烟垂壁同时站台层采用轨顶排烟并保证楼梯口存在速度不小于 1.5 m/s 的向下气流时防烟性能分析

按照《地铁设计规范》(GB 50157—2003)的要求,当站台层着火时,站台层排烟,站厅层送风,使站台形成负压,从而使楼梯口形成速度不小于 1.5 m/s 的向下气流。本文在模拟中进行简化,直接假定在发生火灾时楼梯口具有速度为 2 m/s 的向下气流。

4.1 边界条件

楼梯口设为速度入口边界条件,入口速度为 2 m/s。边界处的湍流动能 K 和湍流动能耗散率 ϵ 可由下式求解^[8]。排烟口压力升高值设为 30 Pa。

$$\left. \begin{aligned} K &= 0.05v_0^2 \\ \epsilon &= \frac{K^{3/2}}{0.03} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

取垂直于轨道的站台层中心面为观察面,下文同。烟气扩散情况如图 4 所示。

1) 火灾发生后 40 s 时,烟气扩散到 2 号楼梯。由于楼

式中 v_0 为入口速度, m/s。

4.2 模拟结果

烟气扩散情况如图 5,6 所示。

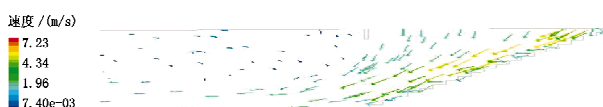


图 5 第 2 种烟气控制模式下 2 号楼梯口速度场矢量图(60 s)

1) 从图 5 可以看出,向下气流从楼梯口流出后贴着地面向前流动。热烟气由于密度较小而浮在上面,所以气流开始对烟气扩散影响不大。但是当烟气扩散至挡烟垂壁时,就会受到挡烟垂壁和楼梯口向下气流的阻挡作用而停滞在挡烟垂壁前。

2) 从图 6a,6b 可以看出,60 s 时烟气扩散至 2 号楼梯并被阻挡在挡烟垂壁前;当达到 150 s 时在 2 号楼梯口前烟气层已经下降到地面,但由于楼梯口向下气流的作用,烟气被挡在挡烟垂壁前面而无法到达楼梯口,此时在 1 号楼梯也开始出现烟气并和 2 号楼梯一样被挡在楼梯口前。

3) 从图 6c 可以看出,在 1,2 号楼梯烟气始终无法通过站台层的楼梯口扩散至站厅层,而在 3,4 号楼梯一直没有烟气出现。

使用该方法防烟效果明显好于上一种方法,完全可以保证人员 6 min 以上的安全疏散时间。

5 楼梯口设置防烟空气幕的防烟性能分析

5.1 物理模型和边界条件

在楼梯口设置厚度为 40 mm 的空气幕,射流角度为 30° ^[9],出风速度为 10 m/s。另外,楼梯扶手两边采用下拉

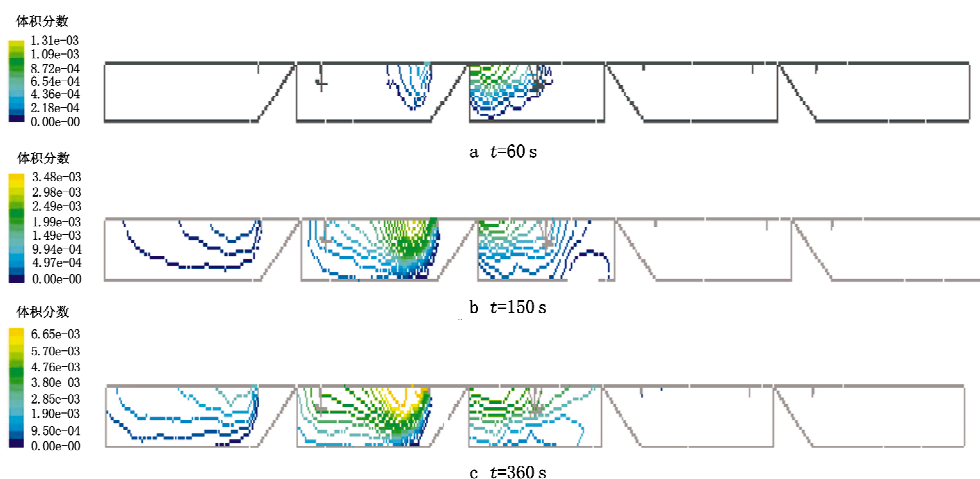


图6 第2种烟气控制模式下地铁站烟气体积分数分布

到地面的挡烟垂壁完全封住,如图7所示。

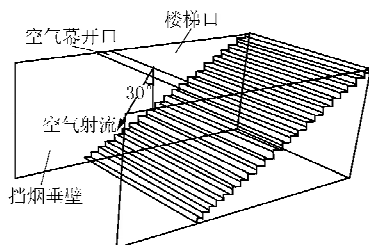


图7 防烟空气幕安装位置

5.2 模拟结果

烟气扩散情况如图8,9所示。

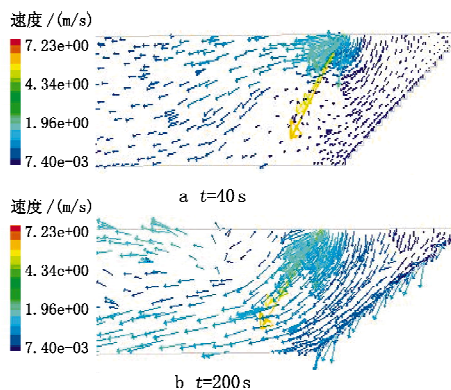


图8 第3种烟气控制模式下2号楼梯口速度矢量图

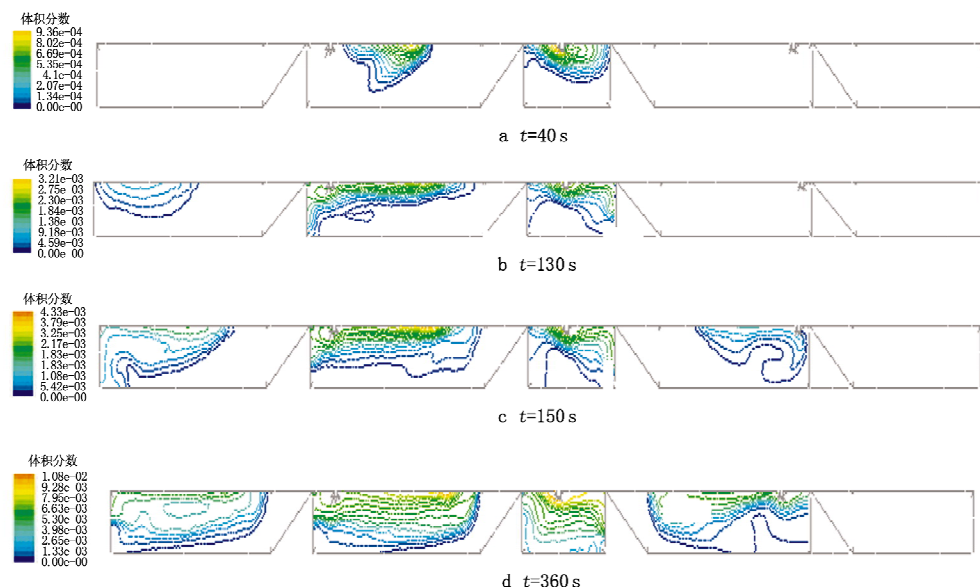


图9 第3种烟气控制模式下地铁站烟气体积分数分布

1)从图8a可以看出,刚开始从防烟空气幕以 30° 喷出空气流^[9],射流扰动挤压空气幕周围的空气形成旋涡,空气旋涡又使得空气幕射流偏离了原来的射流方向。从图8b

可以看出,200 s时流体流动达到稳定,空气幕射流与楼梯口向下空气流汇合以新的复合速度方向向前流动。当烟气扩散至空气幕气流出口处时,受到空气幕射流和楼梯口向

下气流的阻挡作用,而停滞在空气幕气流前。

2) 从图 9a 可以看出,40 s 时在 2 号楼梯附近出现了烟气,但是烟气被空气幕气流吹得远远偏离了楼梯。从图 9b,9c,9d 可以看出,随着时间的推移,在 2 号楼梯附近烟气不断累积,压力不断增大,烟气也逐渐地向 2 号楼梯逼近。

3) 从图 9b,9c 可以看出,130 s 和 150 s 时分别在 1,3 号楼梯附近也出现烟气,但是和 2 号楼梯一样烟气被防烟空气幕吹得远离了楼梯。

4) 从图 9d 可以看出,即使到 360 s 时,4 号楼梯口附近也没有烟气出现,主要是由于烟气扩散至 4 号楼梯时压力已经很小了,无法突破防烟空气幕所形成的空气流而被吹散到了站台层两边的轨道。

5) 从图 9 可以看出,在整个模拟过程中烟气始终无法突破防烟空气幕而进入到站厅层。即使不加任何的排烟设施,在楼梯口采用防烟空气幕的方法完全可以保证人员 6 min 以上的安全疏散时间。

6) 采用楼梯口设置挡烟垂壁同时站台层采用轨顶排

烟并保证楼梯口存在速度不小于 1.5 m/s 的向下气流与直接在楼梯口设置防烟空气幕这两种方法,由于气流的运动形式不同,导致烟气在楼梯口前的运动形式也不相同。前一种方法是烟气先扩散至挡烟垂壁,然后被挡烟垂壁和向下气流挡在挡烟垂壁前;后一种方法是烟气开始被空气幕所形成的气流吹得远离楼梯,然后随着烟气的不断累积,压力不断地增大,逐渐地向楼梯逼近。

7) 这两种方法虽然都可以保证人员 6 min 以上的安全疏散时间,但是采用轨顶排烟的方法导致站台层形成负压,大量的新风将会涌入火场使得火势进一步扩大,而采用空气幕的方法对火场的影响要小得多。

6 楼梯口设置防烟空气幕同时站台层采用轨顶排烟性能分析

从前文的模拟中可见在楼梯口采用防烟空气幕的方法对于站台层火灾防烟是非常有效的,在此基础上还可以进一步采用轨顶排烟的方法提高防烟空气幕的防烟效果。模拟结果如图 10 所示。

1) 比较图 10a~10d 与图 9a~9d,可以看出,采用轨顶

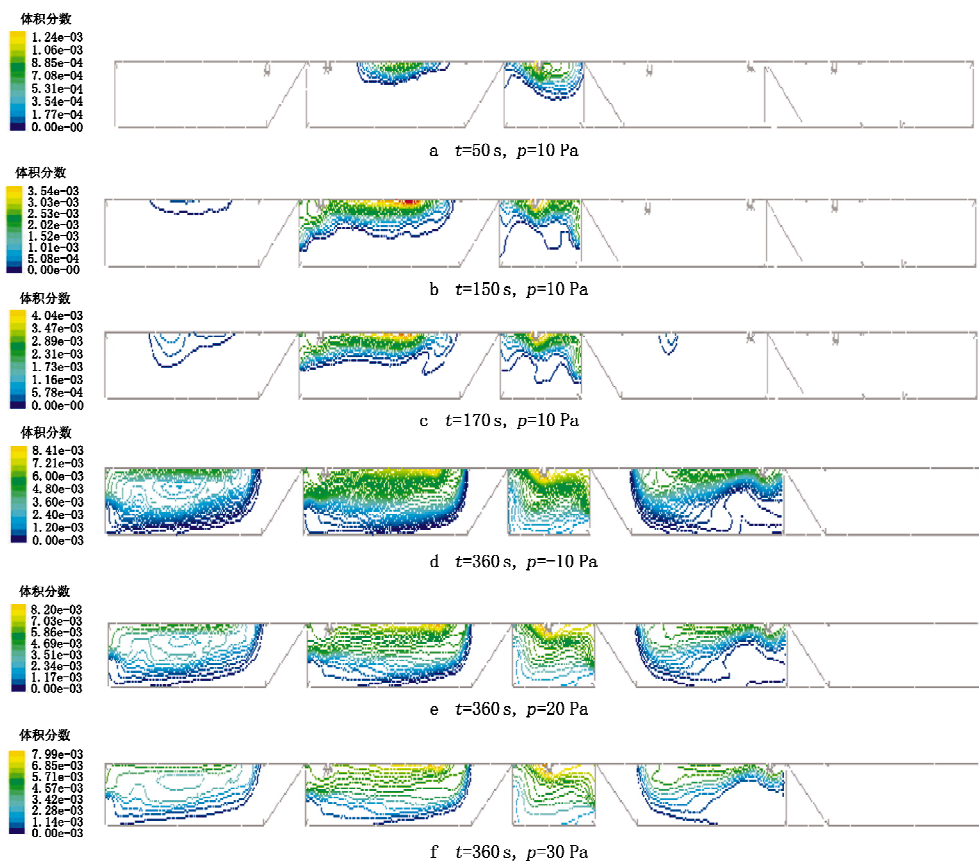


图 10 第 4 种烟气控制模式下地铁站烟气体积分数分布

排烟的方法使烟气扩散至 1,2,3 号楼梯前比不采用排烟的方法延迟了 10~20 s 左右。

2) 从图 10d~10f 可以看出,在不同的排烟条件下站台层中心面上烟气浓度分布的差别不大,排烟的作用主要是

延缓了烟气扩散到楼梯前的时间。

3) 当楼梯口采用防烟空气幕时,排烟口采用 10 Pa 的压力升高值就可以了,此时排烟口的排烟量为每个防烟分 (下转第 73 页)

断后流量有所增加,但对散热量的影响不大,从图 3 中看到,当流量再增加 50% 时,散热器的散热量增加不到 5%,因此其他用户阀门关断的水力耦合对该用户的阀门开启时间影响不大,也就不会对热分摊有太大影响。但可能会使得总的供回水温差减小。

2.3.3 各用户通断调节对热源和管网运行工况的影响

虽然各用户通断调节是随机的,但由于数量众多,这种随机结果表现在管网的总流量上在一定周期内并不会剧烈变化,数量越多,越趋于稳定。目前风机盘管空调系统就是一个通断调节的应用实例,实际运行表明,一个安装 200 个以上风机盘管的空调系统,各房间的电磁阀在各自随机调节时,制冷机的流量在一定周期内比较稳定,而一个供热小区的用户数量多在 200 户以上,流量剧烈变化的概率更小,因此各用户通断调节对热源和管网运行影响不会太大,这种调节方式对热源和管网的具体影响可进一步研究。

3 结论

3.1 末端通断调节与热分摊技术利用阀门通断调节,对于串联系统,避免了流量连续调节导致流量过小而引起的失调问题,同时内置的前馈和反馈结合的控制策略避免动作的滞后,可改善调

节性能。

3.2 末端通断调节与热分摊技术通过计量楼栋热入口的总热量,可以有效促进建筑保温。

3.3 末端通断调节与热分摊技术可以有效避免用户开窗和室温偏高,有助于建筑节能。

3.4 末端通断调节与热分摊技术(通过记录通断控制阀的累积开启时间)和用户面积结合的新热分摊方法,可以有效解决传统热计量方式中建筑物中不利位置住户热费缴纳、邻室传热等问题,实现用户公平用热、合理分摊。

3.5 末端通断调节与热分摊技术集调节和计量于一体,同时由于仅进行通断控制,可靠性较高,并且改造简单,成本低廉,避免了传统热计量方法需要对供暖系统进行复杂改造以及增加大量温控阀、热分配表,成本高昂的弊端,有利于推广应用。

参考文献:

- [1] 江亿. 我国供热节能中的问题和解决途径[J]. 暖通空调, 2006, 36(3): 37-41
- [2] 张锡虎, 黄涛. 住宅集中供暖系统分户热计量和收费的若干问题[J]. 暖通空调, 2000, 30(1): 2-5
- [3] 肖兰生. 住宅供暖计量收费方法的探讨[J]. 暖通空调, 2001, 31(4): 21-23
- [4] 许文发. 实施按户计量收费管理的前期工作及相关问题探讨[J]. 暖通空调, 1999, 29(1): 16-19
- [5] 江亿. 我国供热节能中的问题和解决途径[J]. 暖通空调, 2006, 36(3): 37-41
- [6] 苑军, 孙意. 城市地铁消防设计问题初探[J]. 消防科学与技术, 2003, 22(4): 302
- [7] 周汝, 何嘉鹏, 谢娟, 等. 地铁站火灾时空气幕防烟的数值模拟与分析[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(3): 27-31
- [8] 刘方, 付祥钊, 廖曙江, 等. 热辐射对中庭火灾烟流的影响[J]. 重庆大学学报, 2001, 25(1): 28-31
- [9] Chow W K. Simulation of tunnel fires using a zone model[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 221-236
- [10] 程远平, 陈亮, 张孟君. 火灾过程羽流模型及其评价[J]. 火灾科学, 2002, 11(3): 132-136
- [11] 傅祝满, 范维澄. 建筑火灾区域模拟燃烧及组分浓度的计算[J]. 燃烧科学与技术, 1997, 3(2): 163-168
- [12] Cheng L H, Ueng T H, Liu C W. Simulation of ventilation and fire in the underground facilities[J]. Fire Safety Journal, 2001, 36(6): 597-619
- [13] 何嘉鹏, 王东方, 唐晓亮, 等. 高层建筑火灾防烟空气幕的实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(6): 37-40

(上接第 44 页)

区 $0.56 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 左右, 远远低于《地铁设计规范》(GB 50157—2003)所要求的 $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 再增加排烟量对于防烟效果影响不太大, 同时还会使大量新风涌入火场。

7 结论

通过对站台层一列列车着火情况下, 各种防排烟控制模式进行模拟比较可知, 传统的防排烟方式虽然可以保证 6 min 以上的安全疏散时间, 但和防烟空气幕相比, 涌入火场的新风量将大大增加, 这将进一步促进火灾的发展, 对人员的疏散造成更大的困难, 同时也将导致更多的财产损失。而通过防烟空气幕和站台层设置轨顶排烟的方式可以更加有效地控制站厅层的压力, 使站台层和站厅层之间形成合理的压差, 使其在最小新风量的条件下达到对烟气的最佳控制效果。由于地铁站结构特殊, 实验条件复杂, 国内外鲜有地铁火灾的实验报告, 因此需要进一步的实体实验来验证该方法的合理性和优越性, 使其能尽快应用。

参考文献:

- [1] 北京城建设计研究总院. GB 50157 2003 地铁设计规范