

高层建筑竖井内烟气流动特性及控制方法

张建荣

(重庆市沙坪坝公安消防支队, 重庆 400030)

摘要: 竖井火灾烟气流动特性和控制是与高层建筑火灾安全紧密相关的问题。从竖井烟气流动作用因素、烟气参数分布特性与烟气上升速度3个方面论述了对于高层建筑竖井烟气流动特性的研究现状。总结了目前常用的竖井烟气控制方法及工程实践中存在的问题,提出了改善烟气控制效果的方法和思路。

关键词: 高层建筑; 竖井; 烟气流动; 烟气控制

中图分类号: TU834.635

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S2-0128-03

Discussion on the Characteristics of Smoke Movement and Smoke Control Methods in a Shaft of High-Rise Building

ZHANG Lianrong

(Chongqing Shapingba Fire Detachment, Chongqing 400030)

Abstract: Characteristics of smoke movement and smoke control in a shaft is a serious issue that closely related to the fire safety of high-rise building. This paper talks about the studies on the characteristics of smoke movement in a shaft of high-rise building from three aspects: the factors which influence smoke movement in a shaft, the distribution of smoke parameters and the upward velocity of smoke flow. Smoke control methods which are commonly used and the problems in engineering practice are summarized. Some methods thoughts are given to improve the efficiency of smoke control.

Key words: high-rise building; shaft; smoke movement; smoke control

随着城市的发展,高层和超高层建筑越来越常见。高层建筑减小了土地使用面积,在一定程度上代表着城市的发展水平。但与此同时,高层建筑中火灾问题也给生命财产安全带来了很大的挑战。火灾对人们生命财产造成了极大的危害,这种危害可以分为2类:热辐射引起的危害和非热因素引起的危害^[1]。对于热辐射引起的危害研究较多,而针对非热因素引起的危害的研究则起步较晚。然而,统计结果表明:火灾中85%以上的死亡直接或间接的受到火灾烟气的影响,有毒烟气的吸入更是造成火灾中人员伤亡的主要原因^[2]。同时,在高层建筑中含有大量的竖井,这给烟气向非着火层的蔓延提供了条件。高层建筑楼的梯间、电梯间、管道井等竖向通道内容易形成“烟囱效应”,使火灾烟气在垂直方向扩散速度可以达到3~4 m/s,对于人员的逃生造成了极大的威胁^[3]。因此,研究烟气在竖井内的流动规律并提出相应的控制方法就显得很有必要。本文将对竖井烟气流动特性与竖井烟气控制方法的现有研究状况进行综述,并结合学术研究成果和工程实践对竖井火灾烟气控制提出一些思考。

1 竖井中火灾烟气的流动特性研究

1.1 烟囱效应

烟囱效应是烟气在高层建筑竖井中传播的主要驱动力,也是造成竖井烟气流速较快的原因^[4]。烟囱效应是浮力和内外压差共同作用的结果。有研究表明:在烟囱效应中浮力和内外压差都是存在的,只是在不同的范围内所起的作用不

同。当火源距离竖井中心线较近时,竖井内烟气的运动规律主要受内外压差的决定。当火源距离竖井中心线较远时,烟气在竖井内的运动主要受浮力的作用^[5]。当室外温度小于竖井内温度时,室外空气从中性面以下开口进入竖井,从中性面以上的开口流出。如果着火层在中性面以下时,烟气就会通过竖井传播到中性面以上各层,而中性面以下则只有着火层是有烟气的;如果着火层在中性面以上时,若无楼层之间的渗透,则只有着火层是有烟的。由于火灾烟气温度相对较高,一般不存在建筑通风中存在的逆烟囱效应。

中性面的位置对于火灾烟气的传递方向有很大影响。由于火灾情况下竖井内温度一般大于室外温度,所以提高中性面的高度可以减少受烟气影响的楼层数目^[6]。Klote^[7]通过理论分析,推导出了不同开口下中性面位置的计算公式。Klote模型在预测中性面位置方面得到了广泛的应用,然而它也具有局限性。Klote模型的一个重要假设就是竖井内温度不随高度发生变化,这对于高度较高的竖井显然是不适应的。Zhang等^[8]引进了双区模型的概念,即将竖井划分为近火源区和远火源区,认为每个区内的温度是恒定的,通过理论推导得到了预测中性面位置的数学模型。然而此模型仍然对竖井内的温度分布做了简化处理,具有一定的局限性。Yang等^[9]在Klote模型的基础上,考虑了竖井内空气与竖井壁面之间的热量交换,分别在恒壁温和恒热流的情况下给出了预测中性面的数学模型,与实际情况更为接近。

竖井中的烟气流动不仅受到烟囱效应的影响,还有烟气

自身浮力的作用。为此,Cooper^[10]、Chow等^[11]发展了考虑浮力驱动和自然对流驱动双重作用的竖井烟气运动模型。

1.2 竖井中烟气主要参数的分布特性

竖井中烟气中主要物理参数的分布与烟气对冷空气的卷吸量有很大关系。对此,Marshall^[12]在一个1/5尺寸竖井模型中研究了烟气流动过程中对空气的卷吸特征,并建立了基于实验的空气卷吸模型,改进了竖井中烟气羽流卷吸空气的卷吸系数。Ergin-Ozkan等^[13]研究了在楼梯井中的倾斜楼梯段区域冷空气界面的形成以及影响因素。Peppes^[14]、Qin等^[15~16]针对楼梯井,利用数值模拟的方法,研究了火灾过程中楼梯井内浮力驱动的烟气流动特性及其温度、压力等参数的分布规律。Yang等^[9]利用理论分析与数值模拟,发现当热气流与竖井壁面存在换热时,气流温度在竖向上可能呈现指数分布的特性。

1.3 烟气的上升速度

虽然竖井内的烟气受到周围卷入冷空气的影响较小,但却要受到竖井壁面换热和壁面粘滞力的作用。因此,在竖井这样的受限空间中,烟气上升时间也与开放环境中有很大不同。同时,竖井内烟气上升时间又直接反应了烟气在高层建筑中的传播速度与对上部楼层的危害性大小。

Zukoski等^[17]在竖井顶部与底部开口和侧壁连续开口的条件下,通过理论推导得到了烟气上升时间的数学模型,并通过盐水模型试验进行了验证。Tanaka^[18]则通过小尺寸和全尺寸实验,给出了在完全开放环境、开放竖井和封闭竖井条件下烟气上升时间的实验拟合模型。火源的热释放速率和空间几何结构被认为是影响竖井烟气上升速度的最重要的因素。然而由于开放竖井与封闭竖井结构不同(前者顶部打开,后者封闭),开放竖井中烟气的驱动力与封闭竖井以及完全开放环境也有所区别。后两者中烟气仅在浮力的作用下向上运动,而开放竖井中的烟气不仅受到浮力的作用,还受到竖井内外压差的作用。但是,Tanaka等人却没有考虑这一点。Zhang等^[19]在Tanaka的基础上,运用实验分别得到了开放竖井和封闭竖井内烟气上升时间的数学模型。以上模型的建立都没有考虑烟气与竖井壁之间的热量交换,这对于分析高层建筑竖井内烟气的流动还是会带来一定的偏差。Sun等^[20]则考虑了烟气与竖井壁面之间的对流换热,得到了烟气上升时间的数学模型并进行了实验验证。然而该模型仍然没有全面、详尽的考虑竖井内烟气与竖井壁面的实际换热特点,仍然需要更详尽的研究。

2 竖井烟气控制方法的研究与工程实践

2.1 常用烟气控制方法

由于建筑火灾中烟囱效应导致的烟气沿垂直方向的流动速度比沿水平方向上的流动速度大得多,若不进行有效阻止,在几分钟时间内就可以扩散到几十层的楼层中,从而对远离着火点的人员构成危害^[21]。因此,必须对高层建筑竖井中的烟气进行控制。高层建筑中常用的烟气控制远离主要有:阻挡或隔断、疏导排烟与加压防烟^[4]。

阻挡或隔断指的是利用墙、门、楼板等隔断烟气的传播。在高层建筑中,可以利用阻挡或隔断手段阻止烟气串入竖井,从而从源头上控制烟气利用竖井进行跨楼层传播。具体做法是在建筑物内划分防火分区和防烟分区。防烟分区设在防火分区内部,利用隔墙、梁或垂直挡板等阻挡烟气流动。防火分区和防烟分区的面积及划分原则参见文献^[22-23]。

疏导排烟可以分为自然排烟和机械排烟。自然排烟是利用热烟自身的浮力、热压及其他自然力将烟气从窗户或专

设的排烟口排出,具有设施简单,投资少,日常维护容易等优点。为防止烟气串入楼梯井或电梯井等人员聚集空间,可以考虑修建专门的排烟竖井并进行排烟,且使排烟竖井不与非着火层进行交互。Tamura^[24]研究了利用排烟竖井进行自然排烟的可能性。随后,Tamura等^[25]进一步计算了可以达到理想排烟效果的排烟竖井尺寸。张靖岩^[26]也对利用竖井进行自然排烟进行了理论分析和数值模拟,并提出了达到理想排烟的竖井高度临界值的概念。为了提高建筑的利用面积,Ding等^[27]则尝试利用太阳能烟囱将自然通风与竖井排烟系统合二为一,并通过模型实验及数值模拟验证了其有效性。机械排烟则是利用排烟风机将烟气抽走,同时也要补入新鲜空气。建筑火灾情况下的排烟过程就是室内烟气和室外新鲜空气的置换过程^[28]。如果补气不足将导致排烟区出现负压而不利于排烟,补气过多又会扰乱烟气层进而危及人员的安全疏散。文献^[29]指出补气量应该略大于排烟量,然而具体数值仍需要进一步根据火源功率进行量化。

加压防烟指的是通过风机加压送风,使楼梯间和前室或合用前室保持正压,从而防止烟气的侵入。孙晓乾^[30]对影响楼梯间加压送风效果的因素进行了数值模拟研究,指出防烟楼梯间的加压送风量、门缝宽度及门的开启数量对加压送风效果具有重要的影响。

为了提高高层建筑中烟气控制的效率,也有一些新的方法被提出。Guyonnaud等^[31]首先从理论上研究了空气幕的作用机理,进而提出了可以使用空气幕阻止火灾烟气的传播,并通过实验研究验证了其有效性。杜峰等^[32]通过数值模拟的方法研究了空气幕在高层建筑楼梯间防烟中的应用,并结合空气幕阻挡烟气的机理和工程实际情况,提出了针对高层建筑楼梯间的空气幕使用方案,并指出了影响空气幕使用效果的主要因素。Krajewski等^[33]利用CFD研究使用空气幕防烟的可靠性,并提出了优化的方法。然而,要使空气幕在防烟中得到更好的工程应用,空气幕的一些定量参数还需要进一步的实验研究。

2.2 工程实践中存在的问题

在工程实践中,竖井防排烟系统和措施仍有不尽人意之处。特别是在正压防烟方面,工程中还有一些缺陷,主要表现为:1)风机风量偏低。防烟楼梯间及前室、合用前室和消防电梯间前室的机械加压送风量,应由计算确定,当计算值和规范规定的值不一致时,应按两者中较大值确定。但在设计中,往往存在直接按规范给定风量选型的情况,导致风机选型偏小。2)防烟楼梯间、前室防火门缝隙过大,造成漏风量很大,难以保证正压。3)防烟楼梯间送风口形式不合理。送风量与压力值不仅与风口大小有关,还与风口的形式有关。目前多采用固定百页窗式常开风口,风阻较大,使离风机较远的风口风量不足,压力偏低。由于目前规范中对于风口的形式也没有十分明确的要求,这给风口的选型造成了一定的困惑。为了保证对前室和楼梯间的正压送风,目前张建安等^[34]提出可以设置一些专门的送风管道或竖井。张宾^[35]还提出了使用服务电梯井作为高层建筑防烟楼梯间的加压送风竖井的方案。发生火灾时,电梯厢的运行模式为自动降至底层,所有楼层的电梯门处于关闭状态,这为电梯井作为加压送风竖井提供了条件。

3 结语

1)烟囱效应是竖井内烟气流动的主要动力,所以在火灾烟气控制中,若烟气进入竖井,应该尽量减小烟囱效应以减慢烟气传播速度,延长烟气层上升时间,为人员逃生争取更

多的时间。同时,应利用已有的中性面计算模型,找出在具体高层建筑中改变中性面位置的因素,在防排烟策略中考虑主动改变中性面位置的方法,尽量减少受烟气影响的层数。

2)在前室入口处应使用有效的正压防烟手段,阻止烟气进入建筑竖井,从源头上避免竖井加快烟气竖向传播的不利局面。

3)可以利用专门的排烟竖井疏导烟气,使烟气不向楼梯井、电梯井等人员密集空间传播;合理规划排烟竖井的结构,在设计中就要考虑利用现有的自然通风系统(如太阳能烟囱、通风幕墙等)进行火灾工况下的自然排烟,以减小成本和提高建筑利用空间。

4)加强科学研究与工程实践、规范编订的结合;结合竖井防排烟工程中遇到的实际问题开展定量的科学研究,及时将研究的结果用于指导工程实践以及相关规范的编制和修订。

参考文献:

- [1] 范维澄,王清安,姜鹏辉,等. 火灾学简明教程[M]. 合肥:中国科技大学出版社,1995.
- [2] Hietaniemi J. Burning characteristics of selected substances: production of heat, smoke and chemical species [J]. *Fire and Materials*, 1999, 23(4): 171-185.
- [3] 陈继斌,张贵林. 高层建筑防烟楼梯间前室送风联动控制可靠性研究[J]. *消防科学与技术*, 2011, 30(8): 683-685.
- [4] 陆亚俊,马最良,邹平华. 暖通空调[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [5] 张靖岩,霍然,王浩波,等. 烟囱效应形成机理的实验[J]. *中国科学技术大学学报*, 2006, 36(1): 73-76.
- [6] Black W Z. Smoke movement in elevator shafts during a high-rise structural fire [J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44 (2): 168-182.
- [7] Klote J H. A general routine for analysis of stack effect[J]. *National Institute of Standards and Technology*, 1991, 34(1): 6-17.
- [8] Zhang J Y, Lu W Z, Huo R, et al. A new model for determining neutral-plane position in shaft space of a building under fire situation [J]. *Building and Environment*, 2008, 43 (6): 1101-1108.
- [9] Yang D, Li B, Du T, et al. Analytical models for evaluating buoyancy-driven ventilation due to stack effect in a shaft considering heat transfer from shaft interior boundaries[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2012, 19(3): 651-656.
- [10] Cooper L Y. Simulating smoke movement through long vertical shafts in zone-type compartment fire models[J]. *Fire Safety Journal*, 1998, 31(2): 85-99.
- [11] Chow W K, Fong N K. PolyU/USTC Atrium: A full-scale burning facility—preliminary experiments[J]. *Journal of Applied Fire Science*, 1998, 8(3): 229-241.
- [12] Marshall N R. Air entrainment into smoke and hot gases in open shafts[J]. *Fire Safety Journal*, 1986, 10(1): 37-46.
- [13] Ergin-Ozkan Z, Mokhtarzadeh-Dehghan M R, Reynolds A J. Experimental study of natural convection between two compartments of a stairwell[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, 38(12): 2159-2168.
- [14] Peppes A A, Santamouris M, Asimakopoulos D N. Experimental and numerical study of buoyancy-driven stairwell flow in a three storey building[J]. *Building and Environment*, 2002, 37(5): 497-506.
- [15] 秦挺鑫,郭印诚,张会强,等. 楼梯井内火灾过程的大涡模拟[J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(1): 177-179.
- [16] Qin T X, Guo Y C, Chan C K, et al. Numerical simulation of fire-induced flow through a stairwell[J]. *Building and Environment*, 2005, 40(2): 183-194.
- [17] Zukoski E E. A review of flows driven by natural convection in adiabatic shafts[C]. NIST-GCR-95-679, 1995.
- [18] Tanaka T, Fugita T, Yamaguchi J. Investigation into rise time of buoyant fire plume fronts[J]. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 2000, 2(1): 14-25.
- [19] Zhang J Y, Li Y Q, Huo R, et al. Experimental studies on a rise-time of smoke layer interface in vertical shaft[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 11(1): 162-170.
- [20] Sun X Q, Hu L H, Chow W K, et al. A theoretical model to predict plume rise in shaft generated by growing compartment fire[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(4): 910-920.
- [21] Klote J H, Milke J A. Design of smoke management systems [J]. Atlanta:ASHRAE Inc, 1992: 19-90.
- [22] GB 50045—95 高层民用建筑设计防火规范[S].
- [23] GB 50016—2006 建筑设计防火规范[S].
- [24] Tamura G T. Analysis of smoke shafts for control of smoke movement in buildings [J]. *ASHRAE Transactions*, 1970, 76(2): 290-297.
- [25] Tamura G T, Shaw C Y. Basis for the design of smoke shafts [J]. *Fire Technology*, 1973, 19(3): 209-222.
- [26] 张靖岩. 高层建筑竖井内烟气流动特征及控制研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2006.
- [27] Wenting D, Yoshikazu M, Yuji H, et al. Smoke control based on a solar-assisted natural ventilation system[J]. *Building and Environment*, 2004, 39(7): 775-782.
- [28] 范维澄. 火灾科学导论[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 1993.
- [29] 张靖岩,霍然,王浩波,冯瑞. 高层建筑安全核区域防排烟技术探讨[J]. *中国安全生产科学技术*, 2006, 2(1): 10-15.
- [30] 孙晓乾. 火灾在高层建筑竖向通道内的流动及控制研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2009.
- [31] Guyonnaud L, Sollic C, Dufresne de Virel M, et al. Design of air curtains used for area confinement in tunnels[J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 28(4): 377-384.
- [32] 杜峰,张村峰. 空气幕在高层建筑楼梯间防烟中的应用[J]. *消防科学与技术*, 2009, 28(8): 596-599.
- [33] Krajewski G, Sztarbala G. Air curtains used for separating smoke free zones in case of fire[J]. *Proceedings of Building Simulation*, 2011, 41(1): 2773-2777.
- [34] 张建安. 浅谈高层民用建筑防排烟设施设计施工中常见问题及对策[J]. *甘肃科技纵横*, 2008, 37(4): 120-121.
- [35] 张宾. 建筑物的正压送风防排烟系统及其设计计算方法探讨[D]. 杭州:浙江大学, 2002.

(编辑 王秀玲)