

长通道内机械排烟速率对 烟气层吸穿影响的数值模拟研究

蒋亚强, 霍然, 胡隆华, 纪杰, 阳东, 王浩波

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要:通过数值模拟,分析了长通道内机械排烟时排烟口下方的流场结构、烟气层温度和厚度,定量描述了烟气层厚度、温度与排烟速率之间的关系.结果表明,排烟速率大到一定程度时会导致烟气层吸穿,使得机械排烟效率降低.

关键词:长通道;机械排烟;吸穿;烟气层厚度;数值模拟

中图分类号:TU834.27 文献标识码:A

A numerical study on smoke layering plugholing under mechanical extraction in a long channel

JIANG Ya-qiang, HUO Ran, HU Long-hua, JI Jie, YANG Dong, WANG Hao-bo

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In a long model channel under mechanical extraction, the flow pattern, vertical temperature distribution and depth of the smoke layer below the extraction vent were analyzed by numerical modeling. The variations of the depth and temperature under different mechanical extraction rates were quantitatively described. The results show that plugholing occurs in the long channel when smoke extraction rate increases to some relative high levels, causing the efficiency of the mechanical extraction system to be reduced.

Key words: long channel; mechanical smoke extraction; plugholing; smoke layer depth; numerical modeling

0 引言

机械排烟时烟气层的吸穿现象会导致机械排烟的效率大大降低,甚至会出现远离排烟口处的烟气层继续沉降的情况,从而有可能使其威胁到人员安全^[1~3].当前,对于吸穿现象的研究主要是针对中庭排烟开展的, Loughed 和 Hadjisophocleous (1997, 1999)分别对小尺寸和大尺寸中庭结构开展

了一系列实验,研究了这一类建筑中吸穿现象对机械排烟的影响^[2~6].钟委通过开展全尺寸机械排烟实验,根据 Hinckley 模型给出了三种不同排烟风速所对应的烟气层临界厚度^[1].

地铁站台、地下商业街等建筑中存在着大量的长通道结构形式.长通道内通常都采用顶部通风、排烟的方式.与其他建筑相比,长通道的几何特征、补风形式以及烟气在其内部的流动规律都有很大的不

收稿日期:2008-01-04;修回日期:2008-09-11

基金项目:国家自然科学基金(50706050)资助.

作者简介:蒋亚强,男,1984年生,硕士生.研究方向:地铁火灾烟气控制. E-mail: yqjiang@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:霍然,教授. E-mail: huoran@ustc.edu.cn

同,对吸穿现象现有的研究结果在长通道内是否适用还不清楚.胡隆华等在某地下长通道内开展了现场试验,结果表明,机械排烟量大,排烟效率反而低^[2],长通道排烟也存在吸穿现象,但文献^[2]主要讨论了排烟口和补气口相对位置对机械排烟效率的影响,对烟气层吸穿这一因素的影响没有做深入分析.

本文以小尺寸地铁站台通道为物理模型,通过数值模拟,研究了长通道内机械排烟速率对烟气层吸穿的影响,分析了发生吸穿现象时所对应的烟气层厚度-排烟速率以及温度-排烟速率之间的关系.

1 烟气层吸穿现象

建筑内发生火灾时,烟气从火源区以顶棚射流的形式沿着通道水平蔓延,并在建筑内形成一定厚度的烟气层.开启机械排烟系统后,排烟口正下方的烟气层会出现凹陷^[7].如图1所示, H 为离排烟口较远处烟气层的厚度, h 为排烟口正下方烟气层的厚度, V_e 为机械排烟速率.烟气层凹陷的程度与排烟速率大小有关.排烟速率较小时, $h \approx H$;排烟速率继续增大, h 就越来越小,即烟气层逐渐变薄;增大至一定程度,烟气层厚度 $h=0$,即此时排烟口下方已不存在烟气.

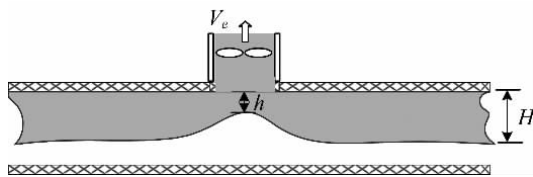


图1 排烟口下方烟气层凹陷示意图

Fig. 1 Smoke layer depression below the vent

当排烟口下方的烟气层厚度为零时,大量下层冷空气被直接吸入排烟口,即烟气层发生了吸穿.但此时仍然有烟气从排烟口的四周被吸入,并且在排烟口处与空气相混合.

2 数值模拟研究

本文使用的是美国 NIST 所开发的 FDS (Fire Dynamics Simulator) 场模拟程序,采用的是 2007 年 10 月 12 日发布的 5.0.1 版本. FDS 是一种专门解决由火焰驱动流体运动问题的计算流体力学 (CFD) 模型. 该模型用数值方法求解适用于低速、热驱动流

体的 $N-S$ 方程,重点关注火源产生的烟气和热量的输运问题^[8].

模拟计算所采用的物理原型为火灾科学国家重点实验室的小尺寸长通道模型,其几何尺寸为 7.5 m (长) \times 1.5 m (宽) \times 0.6 m (高),为国内典型岛式地铁站台通道大小的 1/8. 国内外研究地铁火灾时,通常选取 2 MW 的火灾功率^[9]. 本文考虑比较保守的情况,火源功率设为 2.8 MW. 根据 Froude 相似准则^[10],小尺寸实验对应的火源功率 $Q_m = Q_F \left(\frac{1}{8}\right)^{5/2} = 15.5 \text{ kW}$. 如图 2 所示,火源为油盘火,燃料为甲醇,尺寸为 20 cm \times 20 cm \times 5 cm,距通道左端 2.2 m.

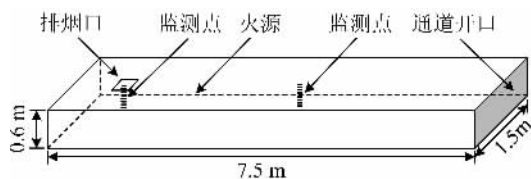


图2 小尺寸长通道模型

Fig. 2 Geometrical configuration of the long model channel

通道中排烟口距通道左端 0.8 m,位于火源与通道封闭端之间,其开口尺寸 20 cm \times 20 cm,刚开始时关闭,起火后 60 s 时开启.排烟口正下方沿中心线竖直方向设置了 12 个温度监测点,各点沿竖向等距分布,间距为 2.5 cm,最高点位于距顶棚下方 2.5 cm.通道右端为全开,同时作为排烟时的补气口.模拟计算的工况如表 1 所示,研究了不同排烟速率下机械排烟口下方的流场结构、烟气层温度和厚度.

为了能够捕捉到燃烧羽流附近各参数较大的变化梯度,本文对计算区域的网格划分比较精细,使用 300 (长度方向) \times 60 (宽度方向) \times 24 (高度方向) 的网格系统对其进行划分,网格数量为 432 000;计算单元的尺寸为 0.025 m \times 0.025 m \times 0.025 m,并满足立方体单元结构的要求^[8].

3 结果与讨论

图 3 为长通道正中心的温度截面,由图中可以看出,无机械排烟时,烟气在长通道内自由蔓延,形成稳定的烟气层.通道内各处的烟气层厚度相差不大,分界面比较平整.

图 4 是中心截面左端的局部图,反映了不同排

表 1 模拟计算参数设置
Tab. 1 Parameter settings for modeling

编号	火源功率/kW	环境温度/°C	排烟口开启时间/s	排烟口尺寸/cm	排烟速率/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	计算时间/s
S1	15.5	25	60	20×20	排烟口关闭	150
S2	15.5	25	60	20×20	0.01	150
S3	15.5	25	60	20×20	0.02	150
S4	15.5	25	60	20×20	0.03	150
S5	15.5	25	60	20×20	0.04	150
S6	15.5	25	60	20×20	0.05	150
S7	15.5	25	60	20×20	0.06	150
S8	15.5	25	60	20×20	0.07	150
S9	15.5	25	60	20×20	0.08	150
S10	15.5	25	60	20×20	0.09	150
S11	15.5	25	60	20×20	0.10	150
S12	15.5	25	60	20×20	0.11	150

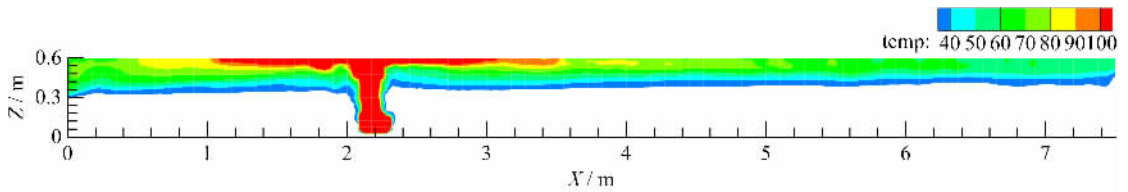


图 3 无机械排烟时,长通道内烟气层的温度分布

Fig. 3 Temperature distribution in the channel with no mechanical extraction

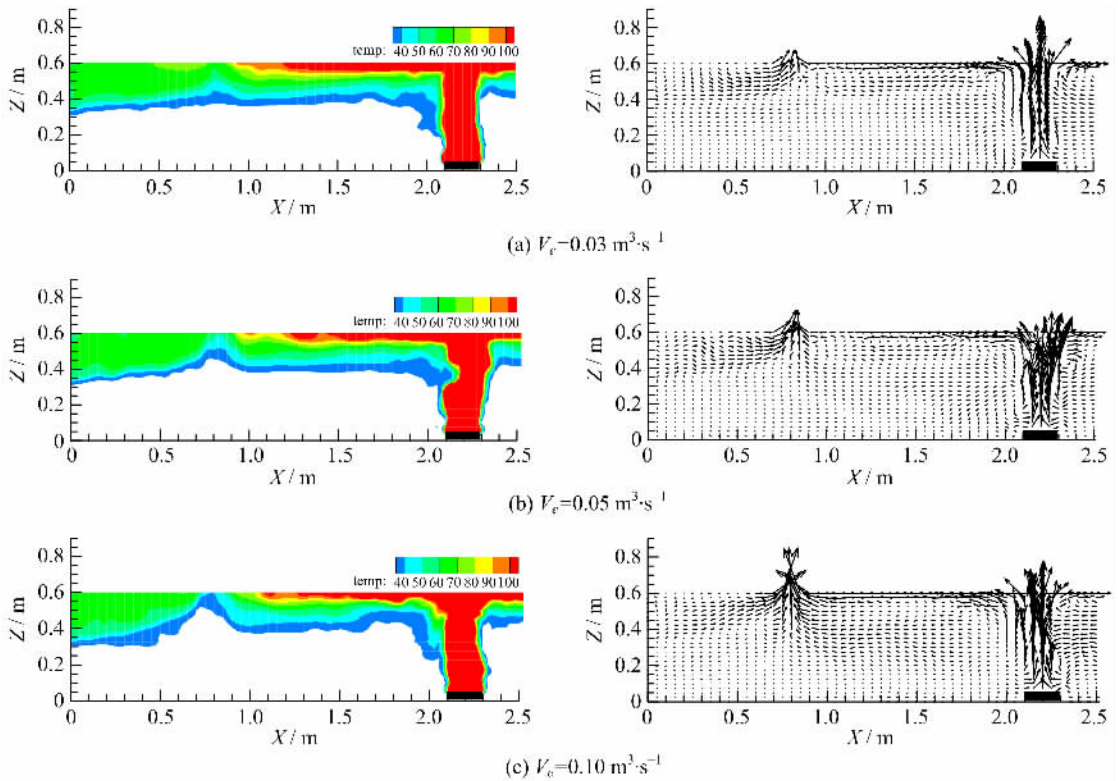


图 4 不同排烟速率时,排烟口下方的温度分布和速度矢量图

Fig. 4 Temperature distribution and velocity vectors below the vent under different mechanical extraction rates

烟速率下,排烟口附近烟气层的温度和速度矢量变化情况.由图 4(a)可以看出, $V_e < 0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,被吸进排烟口的仅仅是烟气.从图 4(b)可以看出, V_e 增大到 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 左右时,开始有空气直接被吸入排烟口,但吸入的量较少,大部分吸进排烟口的气体仍是上层烟气.图 4(c)表明, $V_e = 0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,烟气层被完全吸穿,排烟口正下方的空气以较高的流速被直接吸入.这三组图片直观的描述了吸穿的发展过程.

由图 4 中的温度分布还可以看出,随着排烟速率的增大,排烟口下方的气体温度是逐渐降低的.但是,发生吸穿后,其温度也不会降低至环境温度.因为仍有烟气从排烟口的四周被吸入,并在排烟口处与空气相混合,这样就使得排烟口正下方的温度高于环境温度.

图 5 是排烟口下方各监测点的排烟速率-温度曲线,其中,温度以 T_i/T_{ref} 的形式给出, $T_i (i=1,2, \dots, 12)$ 为每一场景中各监测点的温度, T_{ref} 为距通道左端 1.1 m 处的最高温度.从图中可以看到, V_e 在 $0.05 \sim 0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间时,排烟口下方 $0.15 \sim 0.3 \text{ m}$ 处的 6 个监测点的温度曲线开始变得平缓,逐渐趋于一个定值,曲线上的这一区域被称为吸穿过渡区.这是由于出现吸穿后,排烟口下方出现一个凹陷区域,位于该区域内的各个监测点暴露于空气之中,其温度也降低至空气温度.当排烟速率大于 $0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 后,则烟气层被完全吸穿,因此这一区域被叫做完全吸穿区.上文分析过,由于此时仍然有烟气从四周被吸进排烟口,导致排烟口附近的温度还是高于环境温度.随着排烟速率的增大,从排烟口四周被吸入的烟气量减少,排烟口下方 $0.45 \sim 0.575 \text{ m}$ 处的 6 个监测点的温度继续下降;排烟量

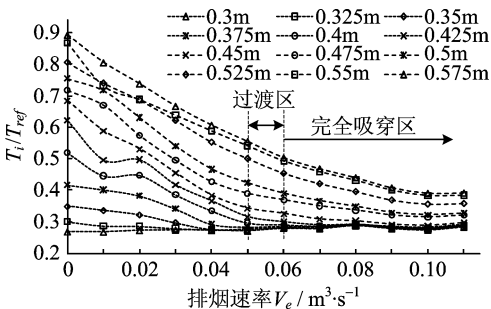


图 5 排烟口下方各监测点的温度变化曲线
Fig. 5 Curves of temperature versus extraction rate below the vent

大于 $0.09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以后,所有监测点的温度都基本不再发生变化.

上面提到,排烟口下方烟气层厚度会随着排烟速率增大发生凹陷.本文根据排烟口下方各监测点的温度数据,采用与 N -百分比法的方法计算排烟口下方烟气层厚度 h , N 取 35,即认为温升达到参考点处温升 $35\% \times (T_{ref} - T_a)$ 的点位于烟气层内.计算得到排烟口下方烟气层厚度 h 随排烟速率的变化情况如图 6 所示,结果表明,发生凹陷后的烟气层厚度 h 随着排烟速率 V_e 的增大而减小;但是从 $V_e = 0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 开始,烟气层厚度就全部降为零.即排烟量大于(等于) $0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 后就会出现吸穿现象,排烟口正下方已经没有烟气层.这个趋势与图 4 的分析结果是基本一致的.由于 $V_e = 0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 位于过渡区内,该速率下只有很少量的空气被直接从排烟口下方吸入,排烟口下方仍然存在厚度较薄的烟气层.

烟气层吸穿会导致机械排烟效率的降低.图 7

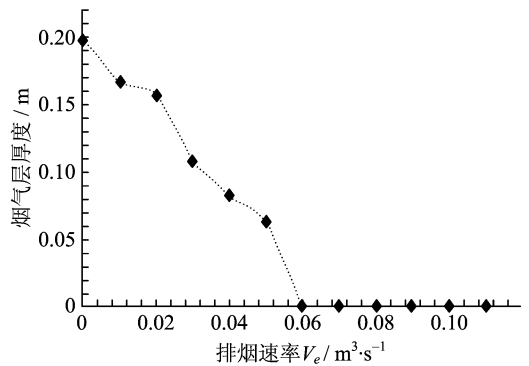


图 6 排烟口下方烟气层厚度变化曲线
Fig. 6 Smoke layer depth versus extraction rate (below the vent)

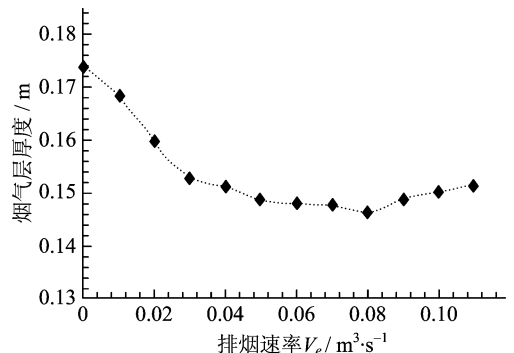


图 7 距通道左端 4.0 m 处烟气层厚度变化曲线
Fig. 7 Smoke layer depth versus extraction rate (4 m from the left channel wall)

是距通道左端 4.0 m 处的烟气层厚度曲线,通过该曲线可以看出排烟效率的变化情况.当排烟速率大于 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 后,烟气层厚度基本上维持在一稳定水平,不会随排烟速率的增大而显著降低;排烟速率超过 $0.07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 后,过大的排烟速率加大了烟气层界面处对下层空气的水平卷吸,反而出现了烟气层随着排烟速率增大而变厚的趋势.由此可见,由于会出现吸穿,排烟量达到一定大小后,如果再继续增大则会使机械排烟效率降低.

4 结论

模拟计算的结果表明,当长通道内的排烟口尺寸、火源功率保持不变时,排烟口下方的温度-排烟速率曲线存在过渡区和完全吸穿区.在过渡区内 ($V_e = 0.05 \sim 0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),仅有少量空气被吸入排烟口;完全吸穿 ($V_e > 0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) 后,排烟口下方不存在烟气层,在相应的 V_e-h 曲线上,该区域内的烟气层厚度全部为零;从距通道左端 4.0 m 处的 V_e-h 曲线可以看出,烟气层吸穿会导致机械排烟效率降低.

从以上结果可以看出,当单个排烟口的排烟量过大时就可能导致发生烟气层吸穿,影响机械排烟系统的有效性.因此在实际设计过程中就需要尽量分散布置排烟口,避免单个排烟口的排烟量过大.

影响烟气层吸穿的因素有很多,包括排烟速率大小、烟气层厚度、火源功率以及火源与排烟口之间的距离等.本文主要是针对其中排烟速率大小的影响展开研究的,在后续的工作中,将继续开展其他因素对烟气层吸穿的影响研究.

参考文献(References)

- [1] 钟委. 地铁站火灾烟气流动特性及控制方法研究[D]. 中国科学技术大学,合肥,2007.
- [2] 胡隆华,霍然,李元洲,等. 地下长通道补气口位置对火灾机械排烟效率的影响[J]. 中国工程科学,2005,7(5):90-92.
- [3] Loughheed G D, George V H. Investigation of atrium smoke exhaust effectiveness [J]. ASHRAE Transactions, 1997,103:519-533.
- [4] Hadjisophocleous G V, Loughheed G D, Cao S. Numerical study of the effectiveness of atrium smoke exhaust systems[J]. ASHRAE Transactions, 1999, 105:699-715.
- [5] Loughheed G D, Hadjisophocleous G V, McCartney C, et al. Large-scale physical model studies for an atrium smoke exhaust system[J]. ASHRAE Transactions, 1999,105:676-698.
- [6] Loughheed G D, Hadjisophocleous G V. The smoke hazard from a fire in high spaces [J]. ASHRAE Transactions, 2001,107:720-729.
- [7] Cooper L Y. Smoke and heat venting [M]//SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002, 3 228-3 229.
- [8] Kevin M G, Bryan K, Simo H, et al. Fire Dynamics Simulator (Version 5): User's Guide [M]//Gaithersburg, Maryland. National Institute of Standards and Technology, 2007.
- [9] 杨昀,曹丽英. 地铁火灾场景设计探讨[J]. 自然灾害学报,2005,15(4):121-125.
- [10] Quintiere J G. Scaling applications in fire research [J]. Fire Safety Journal, 1989,15:3-29.