

地铁车站火灾情况下“吸穿效应”对机械排烟效率的影响分析

篮 杰

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//高级工程师)

摘 要 通过理论分析,找出了影响地铁车站机械排烟效率的关键因素——吸穿效应。采用 FDS 软件模拟分析了下排烟口、侧排烟口工况中不同挡烟垂壁底标高时,排烟口处 CO 平均体积分数随排烟口下方烟气层厚度变化的情况。对比分析了排烟口下方的烟气层厚度变化时排烟系统的排烟效率变化情况。找出了最佳的排烟管底标高及站厅层公共区挡烟垂壁底标高。

关键词 地铁车站;火灾;吸穿效应;机械排烟效率

中图分类号 U231.96

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.04.009

Analysis of Plug-holing Influence on Mechanical Smoke Extraction Efficiency under Metro Station Fire

LAN Jie

Abstract Through theoretical analysis, the plug-holing is detected as the key factor to influence the efficiency of mechanical smoke extraction of metro station. The simulation software FDS is used to imitate and analyze the average CO concentration in smoke outlet following the changes of the flue gas thickness below the smoke outlet, when the bottom elevations of the hang wall are different under the working conditions of lower smoke vent and lateral smoke vent. The changes of smoke extraction efficiency is comparatively analyzed when the thickness of flue gas below the smoke outlet is different. Finally, the optimal bottom elevation of smoke tube and the bottom elevation of the hang wall in the public areas of metro station are found out.

Key words metro station; fire; plug-holing; mechanical smoke extraction efficiency

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

地铁车站是一个内部狭长、相对密闭的地下空间,发生火灾时,火灾产生的热量和烟气难以被及时排除,而且人员也仅能通过极少的出入口安全疏

散至安全区,故发生火灾时乘客的疏散及救援难度大。相关研究表明:地铁车站发生火灾时,70% 以上的乘客均因吸入过多烟气或有毒物质而导致昏迷、死亡^[3-4]。因此越来越多学者致力于地铁车站内部排烟方案的研究。

本文以郑州某地铁车站站厅层公共区为研究对象,通过改变公共区排烟口下方烟气层厚度,找出排烟口下方的临界烟气层厚度。在考虑公共区装修的同时,兼顾排烟口排烟效率的提高,为全国地铁建设及消防安全提供借鉴与参考。

1 理论分析

根据文献[5]的相关研究,为了有效地排除火灾烟气,通常都要求负压排烟口浸没在烟气层之中。当排烟口下方存在足够厚的烟气层或排烟口排烟速度较小时,烟气就能够顺利排出,如图1所示。

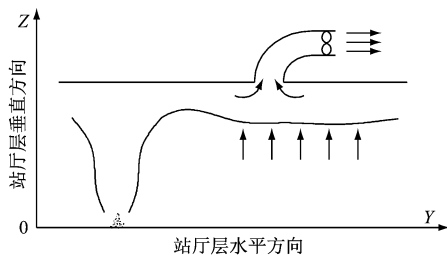


图1 排烟口下方烟气层较厚情况下的排烟示意图

当排烟口下方无法聚积起较厚的烟气层或者排烟速度较大时,就有可能发生烟气层的吸穿现象,如图2所示。在该种情况下,有一部分空气被直接吸入排烟口中,导致机械排烟效率下降。同时,机械排烟还会加剧烟气与空气界面处的扰动,使得更多的空气被卷吸进入烟气层内,进而增大烟气体量,进一步降低排烟效率。

因此,为提高排烟效率,避免吸穿现象的发生,

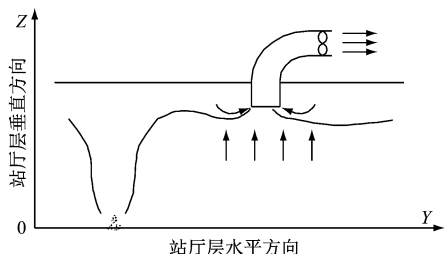


图 2 排烟口下方烟气层较薄情况下的排烟示意图

应保证排烟口下方有足够厚的烟气层。根据文献[5]的相关研究,可以采用无量纲参数 F 来描述自然排烟时的吸穿现象,其定义如下:

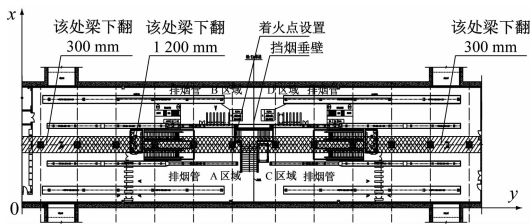


图3 地铁车站站厅层公共区物理模型

该车站站厅层公共区长度方向上以 $x=51.6\text{ m}$ 为轴两侧对称,宽度方向上以 $y=9.35\text{ m}$ 为轴两侧对称,由 $x=51.6\text{ m}$ 及 $y=9.35\text{ m}$ 两条对称轴将站厅层公共区划分为 A、B、C、D 4 个区域;在 4 个区域内各设置 1 根宽 1.25 m 、高 0.50 m 的金属排烟管(不燃)和金属送风管(不燃),设置通信系统、FAS(火灾报警系统)、BAS(环控系统)等电缆桥架(难燃);在站厅层 x 轴方向上每隔 9 m 设置 1 根长 1.2 m 、宽 0.8 m 的结构柱,共计 12 根。同时站厅层公共区顶板下方设有下翻梁。其中: $x \in (0, 10.6\text{ m}) \cap y \in (8.95\text{ m}, 9.35\text{ m})$ 以及 $x \in (93.2\text{ m}, 103.2\text{ m}) \cap y \in (8.95\text{ m}, 9.35\text{ m})$ 之间区域结构梁下翻 0.3 m ; $x \in (10.6\text{ m}, 93.2\text{ m}) \cap y \in (8.95\text{ m}, 9.35\text{ m})$ 之间结构梁下翻 1.2 m 。 $x \in (51.5\text{ m}, 51.6\text{ m}) \cap y \in (0, 18.7\text{ m})$ 区域设有挡烟垂壁。

根据 GB 50157—2013《地铁设计规范》对地下车站公共区排烟量的规定,由站厅层公共区总面积为 $1\,888.9\text{ m}^2$,可知站厅层公共区的总排烟量为 $1.13 \times 10^5\text{ m}^3/\text{h}$;考虑 0.2 的漏风系数,则每根排烟管的排烟量为 $34\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。

2.2 火源设置

由于该地铁车站站厅层公共区内装修材料仅有少量的难燃物,其余均为可燃物,且该车站没有任何商业开发区域,故该车站站厅层公共区内主要火源考虑为乘客随身携带的行李物品。对于行李物品引发的地铁火灾,参照文献[7-8]的相关研究,火源的热释放速率设定为 3 MW。

本研究将火源面积大小设置为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, 火源热释放速率设定为 3 MW , 火源位置设定在排烟系统的最不利点 (即排烟管道末端且距排烟口最远处, 火源中心坐标为 $(46.60\text{ m}, 8.25\text{ m}, 0.60\text{ m})$)。随着时间变化, 火源的热释放速率可用式 (3) 表示^[9]:

$$Q = \alpha t^2 \quad (3)$$

式中:

Q ——火源热释放速率;

a ——火源热释放速率的增长系数,按标准 NF-PA 之中的超快速增长火考虑^[10],取值为 0.1878 kW/s^2 ;

t ——时间。

经计算可得:火源热释放速率约在 126.4 s 达到峰值,且随后保持稳定燃烧。

2.3 系统工况设定

根据研究的目标,设定如下 2 种站厅层公共区排烟工况:

工况 1:每根排烟管上开设 6 个 $500 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的下排烟口,2 个排烟口之间的间距为 8 m 。着火 1 min 后,打开排烟风机,依靠出入口自然补风。

工况 2:每根排烟管上开设 6 个 $500 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的侧排烟口,2 个排烟口之间的间距为 8 m 。着火 1 min 后,打开排烟风机,依靠出入口自然补风。

3 数值模拟计算理论及方法

3.1 FDS 火灾模拟软件理论基础

本文利用 FDS 软件中的大涡模拟 (LES) 计算方法来进行数值求解,求解后即可获得测点处温度、能见度、CO 浓度等一系列数据。

3.2 网格划分

在利用 FDS 软件进行数值模拟计算的过程中,计算网格划分越精细,模拟得到的结果就越准确,但这也大幅增加了模拟计算时间。FDS 软件指导手册中提出的网格计算公式为:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho c_p T g^{1/2}} \right)^{2/5} \quad (4)$$

$$\frac{D^*}{\delta_x} \approx 4 \sim 16, \text{推荐值为 } 8 \sim 10 \quad (5)$$

式中:

D^* ——火源特征直径;

ρ ——空气密度, 1.2 kg/m^3 ;

c_p ——空气比热容;

T ——环境温度;

δ_x ——网格尺寸。

当火源的热释放速率为 3 MW 时,依据式(4)和式(5)可计算出火源的特征直径为 1.485 m ,取 $D^*/\delta_x = 10$,则网格尺寸取值为 0.1485 m 。

4 模拟结果及分析

4.1 下排烟口底部烟气层厚度对排烟效率的影响

在站厅层公共区排烟工况 1 中,通过调整站厅

层公共区挡烟垂壁的底标高(分别为 4.2 m 、 4.1 m 、 3.9 m 、 3.7 m 、 3.5 m 、 3.3 m 、 3.1 m 、 2.9 m 、 2.7 m 、 2.5 m 、 2.3 m),对比分析排烟口下方烟气层厚度变化时排烟系统的排烟效率(通过排烟管内 CO 平均体积分数来体现)。模拟仿真计算结果如图 4 所示。

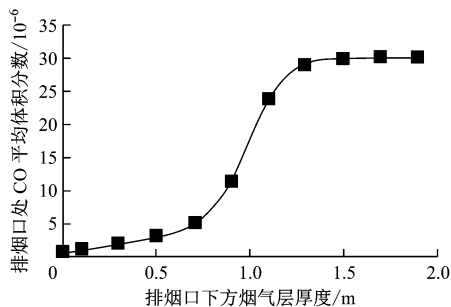


图 4 工况 1 中,火灾发生 126 s 时,排烟口处 CO 平均体积分数随排烟口下方烟气层厚度变化的曲线

由图 4 可知:①随着排烟口下方烟气层厚度的增加,排烟口处 CO 平均体积分数不断提升(排烟效率不断提高);②当排烟口下方烟气层厚度在 $0 \sim 0.7 \text{ m}$ 时,随着排烟口下方烟气层厚度的增加,排烟口处 CO 平均体积分数提升幅度较小;③当排烟口下方烟气层厚度在 $0.7 \sim 1.3 \text{ m}$ 时,随着排烟口下方烟气层厚度的增加,排烟口处 CO 平均体积分数提升幅度较大;④当排烟口下方烟气层厚度大于 1.5 m 时,随着烟气层厚度的增加,排烟效率基本不变。

通过对模拟计算结果的分析,可得出以下结论:

(1)当排烟口下方烟气层厚度较薄时,排烟口下方无法聚集起一定厚度的烟气层,使得周围环境中的空气被大量吸入排烟口,故而产生吸穿现象^[11]。在此种状况下,烟气层与空气之间扰动紊乱,故而随着排烟口下方烟气层厚度的增加,排烟口处 CO 平均体积分数提升幅度较小,排烟效率提升幅度较小。

(2)当排烟口下方烟气层较厚时,排烟口处烟气与周围空气之间的扰动变小,故机械排烟可以顺利的排除烟气,排烟效率较高。

(3)当排烟口下方烟气层厚度增加至一定程度以后,吸穿效应消失,此时排烟口排除的空气量基本不变。因此,当排烟口下方烟气层厚度大于临界烟气层厚度 1.5 m 时,随着烟气层厚度的增加,排烟效率基本不变。

为保证排烟口下方有足够厚的烟气层,可抬高排烟管道的底标高及降低挡烟垂壁底标高。然而,

当挡烟垂壁底标高过低时,会严重影响站厅层公共区的装修效果。因此,在实际工程中,应尽可能在提高排烟管标高的同时降低挡烟垂壁的底标高。

根据该地铁车站的相关数据:站厅层公共区层高为 4.8 m,排烟管道高度为 0.5 m。在保证排烟管道最小上部安装空间的条件下,排烟管底标高取值为 4.2 m,则挡烟垂壁底标高取值为 2.7 m。

4.2 侧排烟口下部烟气层厚度对排烟效率的影响

在站厅层公共区排烟工况 2 中,设置排烟管底标高为 4.2 m,每根排烟管上开设 6 个 500 mm × 400 mm 的侧排烟口,通过调整站厅层公共区挡烟垂壁的底标高(分别为 4.3 m、4.1 m、3.9 m、3.7 m、3.5 m、3.3 m、3.1 m、2.9 m、2.7 m、2.5 m、2.3 m),对比分析排烟口下方烟气层厚度变化时排烟系统的排烟效率高低(通过排烟管内 CO 平均体积分数来体现),模拟仿真计算结果如图 5。

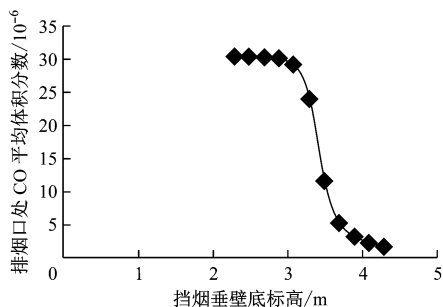


图 5 工况 2 中,火灾发生 126 s 时,排烟口处 CO 平均体积分数随挡烟垂壁底标高变化的曲线

由图 5 可知:①随着挡烟垂壁底标高的降低,排烟口处 CO 平均体积分数不断提升(排烟效率不断提高);②当挡烟垂壁底标高为 3.7 ~ 4.3 m 时,随着挡烟垂壁底标高的降低,排烟口处 CO 平均体积分数提升幅度较小;③当挡烟垂壁底标高为 2.9 ~ 3.7 m 时,随着挡烟垂壁底标高的降低,排烟口处 CO 平均体积分数提升幅度较大;④当挡烟垂壁底标高小于 2.9 m 时,随着挡烟垂壁底标高的降低,排烟口处 CO 平均体积分数基本不变(排烟效率基本不变)。

由图 4 ~ 5 可知:当采用侧排烟口时,挡烟垂壁底标高小于 2.9 m 时,随着挡烟垂壁底标高的降低,排烟口处 CO 平均体积分数基本不变;而采用下排烟口时,挡烟垂壁底标高小于 2.7 m 时,随着挡烟垂壁底标高的降低,排烟口处 CO 平均体积分数基本不变。因此,在保证相同排烟效率的前提下,相比下排烟口,采用侧排烟口时,站厅层挡烟垂壁底标

高可以降低 0.2 m。

通过现场调节郑州地铁 1 号线二期工程文苑北站挡烟垂壁高度进行排烟测试。测试结果表明:①采用侧排烟口时,挡烟垂壁底标高越低,排烟效果越好;②当挡烟垂壁底标高为 2.9 ~ 3.7 m 时,随着挡烟垂壁底标高的降低,排烟效果改善明显;③当挡烟垂壁底标高小于 2.9 m 时,排烟效果改善不明显。测试结果与模拟仿真计算结果基本一致,这进一步验证了本文研究成果的正确性与可行性。

综合考虑排烟效果及公共区装修效果,郑州市地铁 1 号线二期工程车站采用侧排烟口,排烟管底标高取值为 4.2 m,挡烟垂壁底标高取值为 2.9 m。

5 结语

本文利用 FDS 模拟软件,通过调整挡烟垂壁标高,对下排烟口、侧排烟口工况下的排烟效果进行了模拟分析,得到了排烟口处 CO 平均体积分数随排烟口下方烟气层厚度变化的曲线,可为国内地铁建设及排烟系统研究提供参考。

参考文献

- [1] 陶平.某地铁岛式站台火灾时人员疏散环境的数值研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [2] 沈建明.枢纽闲置铁路发挥城市轨道交通功能研究[J].铁道标准设计,2012(1):10.
- [3] 常磊,史聪灵,涂旭炜.地铁岛式车站火灾排烟模式的计算与验证[J].消防科学与技术,2010,29(8):664.
- [4] 周荣义,黎忠文.地铁火灾的防范与疏散[J].工业安全与环保,2005,31(11):58.
- [5] MORGAN H P, GARDINER J P. Design principles for smoke ventilation in enclosed shopping centers[M]. BR 186. Garston, U. K.: Building Research Establishment, 1990.
- [6] LOUGHEED G V. Hadjisophocleous Investigation of Atrium Smoke Exhaust Effectiveness[J]. ASHRAE Transaction, 1997, 103(2):1.
- [7] 魏雨.地铁火灾人员安全疏散研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2011.
- [8] 纪杰,钟委,张英,等.典型多层地铁车站中间层起火时的通风模式优化分析[J].中国铁道科学,2010,31(2):131.
- [9] 史聪灵,钟茂华.深埋地铁车站火灾实验与数值分析[M].北京:科学出版社,2009.
- [10] USA National Fire Protection Association. Standard for Smoke and Heat Venting: NFPA 204M—2002[S]. 2002.
- [11] 钟委.地铁站火灾烟气流动特性及控制方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2007.

(收稿日期:2018-03-14)