

专题研讨

地铁隧道火灾自然排烟模式数值模拟研究

清华大学 李 亮[☆] 李晓锋 朱颖心

摘要 采用标准 $K\epsilon$ 模型, 结合某实际工程对地铁隧道区间发生火灾时的自然排烟模式进行了模拟计算, 以预测其实际通风排烟效果。具体分析不同通风竖井间距、通风竖井出口局部阻力系数变化和隧道区间是否设置隔墙等因素对区间内实际通风排烟效果的影响, 最后给出了一些建设性的结论。

关键词 数值模拟 地铁隧道火灾 自然通风模式 $K\epsilon$ 两方程模型

Numerical simulation on natural ventilation mode of smoke control in underground railway tunnel fire

By Li Liang[☆], Li Xiaofeng and Zhu Yingxin

Abstract Using the standard $K\epsilon$ turbulence model, simulates the natural ventilation mode of smoke control in underground railway tunnel fire with a project and predicts the smoke control efficiency. Analyses the effect of the space between ventilation shafts, local resistance coefficient of ventilation shaft and the existence of partition wall in tunnel on the smoke control efficiency, and obtains some constructive conclusions.

Keywords numerical simulation, underground railway tunnel fire, natural ventilation mode, $K\epsilon$ two equation model

★ Tsinghua University, Beijing, China

0 引言

地铁作为缓解城市交通紧张的有效工具, 在许多国家得到了广泛的应用, 我国已有北京、上海、广州、天津等城市拥有地铁系统。随着国民经济的发展, 还将有十几个城市在建、拟建地铁系统。在地铁建设与运营过程中, 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。

根据日本、英国的火灾统计资料, 火灾死亡的人数中, 被烟气熏死的人所占的比例最高, 达 78.9%^[1]。因此, 设计合适的地铁防排烟系统, 确定合理的防排烟方案具有重要意义。

地铁火灾事故通常可分为两种情况: 车站火灾和区间隧道火灾。在区间隧道自然通风模式下地铁车辆发生火灾时, 烟气以火灾源为中心, 向隧道

两端蔓延, 其扩散区域的大小取决于隧道区间构造、火灾规模以及通风情况。

地铁线路设计时一般在隧道通风竖井内设置事故风机, 即发生火灾时采用机械通风方案。本文结合一实际工程, 针对在地铁线路设计时不设置事故风机, 而采用增加隧道通风竖井数量、缩小通风竖井间距的方案, 即在隧道区间发生火灾时采用自然通风排烟模式, 进行模拟分析研究, 预测其实际通风排烟效果。

《地铁设计规范》(GB 50157—2003) 19.1.40 规定: 区间隧道火灾的排烟量, 按单洞区间隧道断

☆ 李亮 男, 1981 年 2 月生, 在读硕士研究生
100084 清华大学建筑学院建筑技术科学系
(0) 13911868571
E mail: lllshy99@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-06-09

面的排烟流速不小于 2 m/s 计算, 但排烟流速不得大于 11 m/s ^[2]。以上规范要求是针对机械通风系统而言的, 对于自然通风系统, 因缺乏相应设计规范, 需要针对实际工程进行具体分析。

分析预测发生火灾时的通风状况, 可采用现场实验、模型实验或数值模拟的方法。对于前两类方法, 由于火灾实验具有危险性大、费用高等特点, 实施较为困难, 因此数值模拟方法得到了广泛的应用。

1 数学模型

采用标准 $K-\epsilon$ 两方程湍流模型进行求解, 浮升力模型采用非线性 Boussinesq 假设。描述隧道内烟气运动过程的控制方程的通用形式为^[3]

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u \phi - \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S_\phi \quad (i = 1, 2, 3)$$

式中 ϕ , Γ_ϕ , S_ϕ 分别表示通用变量、广义扩散系数和广义源项^[4]。

2 物理模型

2.1 隧道火灾模型设计条件及参数

a) 火灾强度设定

火灾强度的合理设定一直是地铁火灾工况模拟分析中的难点。目前由于缺乏权威的实测数据, 所以在本次模拟计算中参考了国内外其他地铁设计中采用的火灾强度^[5], 取 10 MW 。

b) 隧道区间土建结构

隧道区间纵断面示意图如图 1 所示。通风竖井横断面积为 $10.3 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} = 25.75 \text{ m}^2$, 竖井高度 7.5 m , 位置居中。

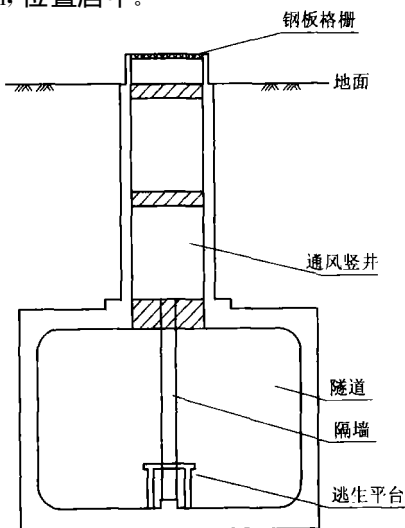


图 1 隧道区间通风竖井纵断面示意图

c) 自然排烟条件

隧道区间内相隔一定距离设通风竖井, 无机械通风机。通风竖井顶部出口处设有钢板格栅。两侧隧道之间设有隔墙。

2.2 物理模型的简化

实际隧道区间内部结构较为复杂, 在模拟中作如下几点简化:

a) 按最不利工况计算, 发生火灾的车厢恰停在两通风竖井正中;

b) 假定火源位于列车中部;

c) 忽略隧道区间轨道枕木等因素对空气流动的影响;

d) 忽略隧道区间内部电缆线对空气流动的影响;

e) 列车车厢外形近似为长方体, 列车总长度 120 m ;

f) 暂不考虑隔墙的影响, 后面将单独进行分析;

g) 先假定通风竖井出口处无格栅, 出口处局部阻力变化对通风效果的影响将在后面单独进行分析。

3 模拟计算结果与分析

3.1 通风竖井间距对自然通风排烟效果的影响

在不考虑隔墙与通风竖井出口处局部阻力损失对排风量影响的前提下, 计算结果表明, 当事故列车所停位置两端通风竖井的距离(本文中涉及的通风竖井间距皆指两竖井相邻壁面之间的距离)由 20 m 逐步增大至 100 m 时, 单个通风竖井的排风量基本都在 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右, 但是事故列车所在隧道区间段的温度和烟气浓度会急剧上升, 且无论通风竖井间距大小, 火源所处的两通风竖井之间的区域烟气浓度和温度都很高, 之外的区域烟气浓度和温度都相对很低, 可视为安全区。从火灾车厢端部(各图中横坐标 10 m 位置处)起, 不同通风竖井间距下(分别为 $20, 30, 40, 50, 100 \text{ m}$), 距轨面 2.9 m (人站在逃生平台上时头部的高度)的温度变化曲线如图 2 所示。

人在温度超过体温的环境中, 因为出汗过多, 会出现脱水、疲劳和心跳加快等现象。温度超过 66°C 便难于呼吸, 使消防人员救援困难及室内人员逃生迟缓。生存极限的呼吸温度 (breathing level temperature) 约为 131°C , 但室内气温高达

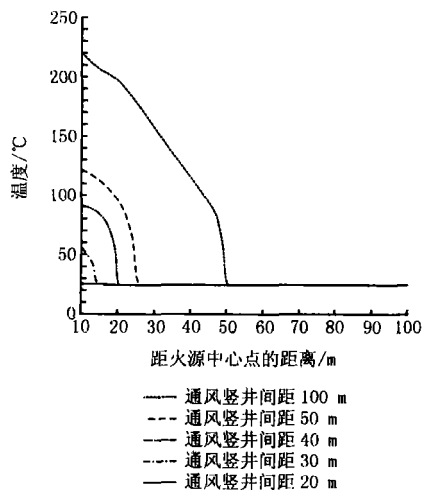


图2 不同通风竖井间距人呼吸高度温度变化曲线

140℃时仍能短暂存活^[9]。

鉴于以上考虑, 本文中将人员逃生路线安全温度上限定为 66℃。

由图2可以看出, 当通风竖井间距超过 40 m 时, 其温度远高于 66℃; 当间距不超过 30 m 时, 温度则控制在 60℃以下。

3.2 隧道区间隔墙对自然通风排烟效果的影响

在 3.1 节的计算结果基础上, 以通风竖井间距 20 m 为例, 考虑隔墙对通风竖井排风量的影响(此处未考虑通风竖井出口处格栅)。计算结果表明, 若在上下游隧道中间加设隔墙, 变成双洞区间(加设隔墙之后, 上下游隧道之间在通风竖井位置处留有疏散口), 由于空间相对狭小, 热量和烟气大量聚集, 事故车厢周围烟气浓度很大, 距轨面 2.9 m 高度处, 温度在 70~80℃左右, 通风竖井排风量仅为 29.3 m³/s, 列车所停位置隧道区间断面平均风速仅为 0.9 m/s 左右。若不设置隔墙, 计算结果表明, 在同样位置烟气浓度大幅降低, 温度低于 50℃, 通风竖井排风量为 62.7 m³/s, 列车所停位置隧道区间断面平均风速在 1.9 m/s 左右。

若将隔墙改设为一定间距的柱支撑结构, 以通风竖井间距 30 m 为例, 从火灾车厢端部(横坐标 10 m 位置)起, 沿隧道方向距轨面 2.9 m 的温度变化曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 当考虑隧道内柱支撑结构对气流组织的影响时, 在火灾车厢附近的局部区域温度有所上升, 但仍低于 66℃, 即相比之下柱支撑结构对通风排烟效果的影响较小。

3.3 通风竖井出口处局部阻力损失对自然通风排

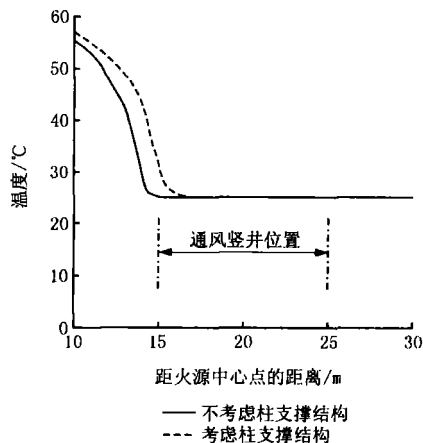


图3 两种结构下隧道方向人呼吸高度温度变化曲线(通风竖井间距 30 m)

烟效果的影响

在 3.1 节的计算结果基础上, 以通风竖井间距 20 m 为例, 考虑通风竖井出口处局部阻力损失对通风竖井排风量的影响(此处考虑无隔墙的情况)。当设定通风竖井出口处局部阻力系数为 2.0 时, 计算结果表明, 通风竖井排风量将下降至未考虑出口处局部阻力时的 85%。若由于某种原因导致通风竖井出口处局部阻力进一步增大, 如局部阻力系数增大至 15 左右时, 在其他条件都不变的情况下, 以通风竖井间距 20 m 和 30 m 的工况为例, 通风竖井排风量都会下降至未考虑出口处局部阻力时的 41%左右。其温度变化曲线如图 4、5 所示。

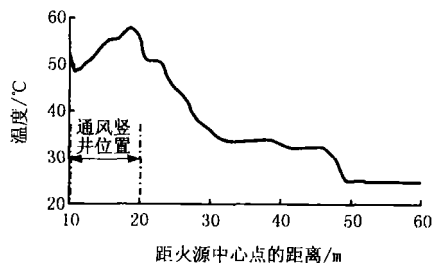


图4 隧道方向人呼吸高度温度变化曲线(通风竖井间距 20 m)

由图 4 和图 5 可以看出, 两通风竖井间隧道区域内空气温度明显上升。虽然图 4 中所示温度变化范围在 66℃以内, 但由于出口处局部阻力系数过大, 两通风竖井间的隧道区域顶部出现明显的逆流现象, 且列车所停位置隧道区间断面平均风速小于 1.0 m/s, 这些都对排烟极为不利。因此在设计时应采取一定措施, 使得通风竖井出口处局部阻力

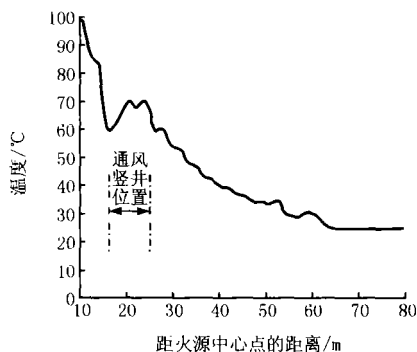


图5 隧道方向人呼吸高度温度变化曲线
(通风竖井间距 30 m)

尽可能小。

4 结论

4.1 地铁隧道区间发生火灾时采用自然通风排烟模式时,不宜在上下游隧道之间设置隔墙,从土建结构受力分析的角度考虑,可改设为柱支撑结构。

4.2 通风竖井出口处局部阻力的变化对总排风量影响较大,且局部阻力系数过大时会出现逆向流。因此在设计时应采取一定措施,使通风竖井出口处

局部阻力尽可能小。

4.3 当改变通风竖井间距时,无论其间距大小,事故列车所停的两通风竖井之间的区域烟气浓度和温度都很高。当通风竖井间距增大时,通风竖井间的区域相应增大,其断面烟气浓度及温度也会大幅上升。

参考文献

- [1] 李先庭. 柱状燃料火焰传播及隧道网络烟气流动分析[D]. 北京:清华大学, 1995
- [2] 北京城建设计研究总院. GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2003
- [3] Li Xianting, Yan Qisen. Field model of fires in subway tunnels[C] //2nd International Symposium on HVAC. Beijing, 1995: 392—399
- [4] 冯炼, 刘应清. 地铁火灾烟气控制的数值模拟[J]. 地下空间, 2002, 22(1): 61—64
- [5] 李存夫. 设计中如何选定地铁火灾强度[J]. 地下工程与隧道, 1995(1): 40
- [6] http://www.syjh.ptc.edu.tw/pict3/2/new_page_1.htm

· 会讯 ·

建筑产品选用技术——2005 蓄冷与低温送风技术研讨会

由中国建筑标准设计研究院主办的建筑产品选用技术——2005 蓄冷与低温送风技术研讨会于 2005 年 9 月 27 日在北京召开。会上天津大学张永铨教授的主题发言《中国蓄冷技术现状与展望暨国外相关情况介绍》具体介绍了国内蓄冷技术的发展情况。从上世纪 90 年代到现在,中国蓄冷技术的发展经历了十多年的历史,特别是近几年有了长足的发展,同时低温送风技术也得到了应用。我国经过十几年建造使用水蓄冷和冰蓄冷空调系统的实践,积累了一定的经验和教训,认识到蓄能空调技术是削峰填谷的方法之一,有利于提高电网负荷率和电网的安全经济运行。我国蓄能空调技术将有较大的发展。发言中对国外蓄冷技术的发展作了阐述,特别是对美国和日本的蓄冷技术发展作了详细的介绍,讲述了蓄冷技术的起源、发展及现状。湖南大学殷平教授的主题发言《动态制冰与低温送风》具体阐述了动态制冰与低温送风技术的主要特点,以及在设计、安装和调试当中需注意的问题,并以具体实例进行了相关的技术经济分析,对比了常规空调系统与蓄冷与低温送风空调系统的投资与运行费用,说明了蓄冷与低温送风空调系统的可推广性。约克国际北亚有限公司在主题发言《蓄冰系统的设计和制冷机组的选择》中主要介绍了部分蓄冰式冰蓄冷系统中制冷机组的选择、SUIT 冰蓄冷系统及设计实例以及约克服务、产品及用户实例。特灵空调系统(江苏)有限公司的主题发言《三级压缩离心机在冰蓄冷系统中

的应用》主要介绍了离心式机组的工作原理以及应用在冰蓄冷系统当中的双工况离心机的特点及设计选型当中应注意的问题,阐述了冰蓄冷系统设计的节能与最优化设计理念,以工程实例对冰蓄冷系统的运行情况作了分析和介绍,说明了蓄冰系统的实际效果。际高集团有限公司的主题发言《以先进的工艺和技术确保冰蓄冷与低温送风工程设计意图的实现》以实际工程为例,阐述了蓄冷与低温送风空调系统在施工当中需注意的问题,用先进的施工工艺保证设计意图的实现,保证用户的正常使用。会议特邀的日本东京电力株式会社镰仓贤司在主题发言《晴海 Toliton 开发的能源系统》中介绍了东京晴海地区建筑面积约 67 万 m² 的区域供热(冷)工程的开发过程、能源规划、设计理念等。对区域供热(冷)设备、节能系统的引进所产生的经济效益和对环境保护起到的积极作用作了详细阐述。对晴海 Toliton 能源系统作了具体的性能评价。对系统的整体效率、一次能源利用率、二氧化碳排放以及系统的经济性和运行情况作了介绍。标准院介绍了国家建筑标准设计图集《冰蓄冷系统设计与施工图集》与《全国民用建筑工程设计技术措施——建筑产品选用技术》(2006 版)蓄冷装置“选用技术条件”编制情况,说明这两项技术性文件的编制有利于推广冰蓄冷技术的应用。会议还就蓄冷空调技术及系统设计等问题进行了讨论。

(中国建筑标准设计研究院)