

武汉长江隧道通风排烟问题的数值模拟研究*

武汉大学 方正[★] 袁建平

机科发展科技股份有限公司 齐运才

中南建筑设计院 张雷

摘要 采用大涡模拟火灾分析软件(FDS)分析不同火灾功率时通风速度对隧道烟气流动及温度分布的影响,可为今后的日常管理提供相关的运行控制参数。研究表明,在 20 MW 的火灾规模条件下,隧道通风速度以控制在 2.5 m/s 为宜。

关键词 隧道 通风 排烟 FDS 模拟

Numerical simulation for ventilation and smoke extraction system in Wuhan Yangtze Tunnel

By Fang Zheng[★], Yuan Jianping, Qi Yuncai and Zhang Lei

Abstract By the fire analysis software (fire dynamic simulator) of large eddy simulation (FDS), studies the impact of ventilation velocity on smoke flow and temperature distribution under different fire power magnitudes, which is expected to provide related operation control parameters for daily management. The research reveals that the ventilation velocity of 2.5 metres per second is desirable when the fire power is around 20 MW in magnitude.

Keywords tunnel, ventilation, smoke extraction, FDS, simulation

[★] Wuhan University, Wuhan, China

①

1 工程概况

武汉长江隧道位于长江大桥、二桥之间,北接汉口大智路,南通武昌友谊大道(远期穿越沙湖与中北路衔接),是解决主城区过江交通的一条城市主干道。隧道通风设计段总长 3 440 m,为双孔 4 车道^[1]。隧道过江段为盾构施工,采用纵向通风的方式,顶部设有专门的排烟通道。烟道设置在盾构段行车道顶部,面积为 6.88 m²,在行车道顶部隔板中央每隔 30 m 设置 2 m×1.5 m 电动可调风门 1 个,每 3 个为一组。火灾发生后,火灾发生点和火灾发生点前方一组风门同时打开排烟,产生的烟雾可及时排放,既节能,投资也少。

2 长江隧道火灾通风气流组织

武汉长江隧道的通风设置方式是:在正常情况下采用纵向通风以排除污染空气,当发生火灾时采

用半横向通风方式。隧道火灾通风气流组织见图 1,盾构段底部安全通道气流方向与行车方向相

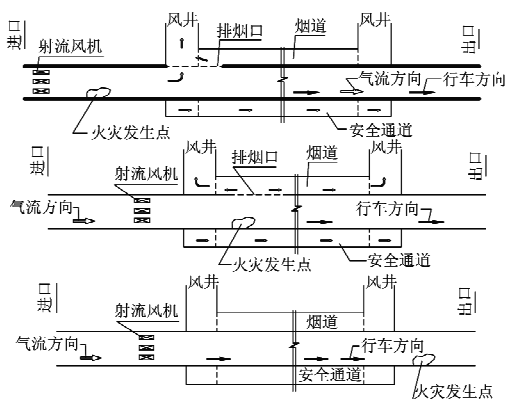


图 1 进口、中部、出口段火灾通风气流组织

①☆ 方正,男,1966 年 2 月生,工学博士,教授,博士生导师
430072 武汉大学土木建筑工程学院市政工程系
(027) 68772312

E-mail: zfang@whu.edu.cn

收稿日期:2007-09-24

修回日期:2008-05-21

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50478057),武汉市长江隧道综合防灾体系检验项目资助

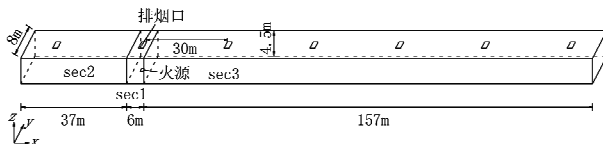
同^[1],以保证人员的安全疏散。

3 长江隧道通风排烟问题的数值模拟

3.1 模拟研究的几何条件和初始条件

长江隧道通风排烟的模拟计算采用美国标准与技术研究院(NIST)开发的场模拟模型 FDS 软件^[2],为了适应 FDS 软件的网格要求,需要简化纵向通风结合顶部排烟的通风排烟方式。

把长江隧道简化为一长方体的隧道,省略排风道,在参数设置时在每个排烟口处加载一个向外的风速,该风速的大小由排烟风机的排烟量确定^[3]。计算时采用大涡模拟(LES),由于大涡模拟对计算机硬件的要求较高,选取单洞区间隧道的局部作为模拟对象,长 200 m,宽 8 m,高 4.5 m,顶部和墙面都用耐火极限不小于 2 h 的不燃烧混凝土砌成。为了简化计算,假设隧道区间内除了火源外其余均不可燃^[4]。把隧道分成三段,中间一段计算网格比较密,为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的正方体,前后两段由于计算机硬件的局限,计算网格较疏且不是正方体,为 $1\text{ m} \times 0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 。火源材料为煤油,火源用直角坐标构成的平面表示,对角坐标为 $(39.5, 3.5, 0)$, $(40.5, 4.5, 0)$,火源尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。在 200 m 长的隧道内设置排烟孔,排烟孔的间距为 30 m,每个排烟口尺寸为 $2.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 。

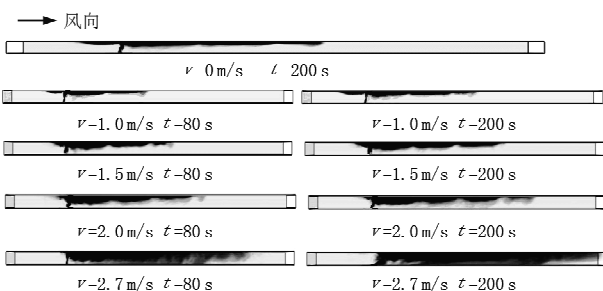


图中 sec1, 2, 3 分别代表第一、二、三个计算区域

图2 模拟计算的模型图

3.2 火灾功率为 3 MW 时通风排烟模拟

在火灾功率为 3 MW 时,从火源点沿行车方向设 6 个排烟口,每个排烟口风速为 7.5 m/s,图 3 是在上游设置不同纵向通风风速时的排烟情



v 为纵向风速, t 为模拟的时刻

图3 3 MW 时通风排烟模拟结果

况的模拟结果,该纵向风速均匀地加载在隧道入口断面上。

从图 3 可以看出,当利用顶部排烟口进行排烟时,是否设置纵向通风对烟雾有很大的影响。无纵向通风时,烟气向上游回流的长度较长,烟雾横向扩散的范围较大;当设置了纵向通风后,在较低的风速下,如设置 1.5 m/s 纵向通风时,烟雾向上游回流的距离明显减小,同时下游烟雾的横向扩散明显减少,烟雾基本上位于隧道的顶部,保持了烟气的分层状态,烟雾向下游的扩散也被控制在了一定的范围内;但是当设置较大的风速时,反而使下游的烟雾浓度横向发展的速度加快,扰乱了烟雾的分层,当设置 2.7 m/s 的风速时,烟雾充满了下游的整个隧道,给逃生带来很大影响。

由以上分析可知,当利用顶部排烟口进行排烟时,设置合适的纵向通风既能使烟雾的回流减少,同时还能使下游的烟雾保持分层状态。在 3 MW 火灾功率情况下,使用 6 个排烟口排烟时,建议纵向通风的风速为 1.5 m/s。当设置了 1.5 m/s 的纵向通风,火灾发展到 200 s 时,隧道内的烟气流动基本上处于稳定状态,烟气的影响范围可以被控制在从火源到第 6 个排烟口之间。

图 4 为 1.5 m/s 纵向通风时 CO 体积分数分布图,可以看出,在 2 m 高处(火源点两侧烟雾的 CO 体积分数均在 2×10^{-6} 以下,不会给人员逃生带来太大的影响。而在 3 m 以上,CO 体积分数大于 2×10^{-6} 的区域向上游延伸了 5 m 左右,虽然这个高度的烟雾不会对人体造成危害,可是较大的烟雾浓度会造成人的恐慌,因此建议上游后续车辆要与火源保持 10 m 以上的距离;下游体积分数大于 2×10^{-6} 的区域达到了距火源点 60 m 左右,所以建议为避免烟雾的影响,下游人员应在 200 s 内撤离到距火源点 60 m 以外的地方。

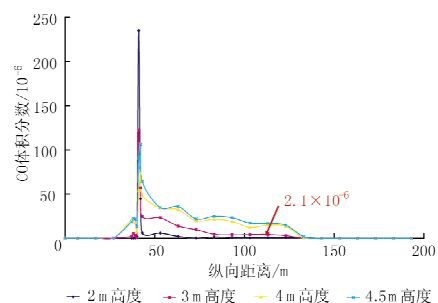


图4 1.5 m/s 纵向通风时 CO 体积分数($t=200\text{ s}$)分布

图 5 为 1.5 m/s 纵向通风时的温度分布图,可以看出,在隧道的顶部即 4.5 m 高的地方,火源点上方出现了 276 °C 的高温,这是采用了半横向排烟通风措施后出现的和设置临界通风不同的地方,这种高温对隧道的防火材料提出了一些要求,在进行隧道施工时,应采用耐高温的防火材料。在火源点上方 1 m 和 2 m 高度处,温度基本在 50 °C 以下,温度场向上游传播的距离比较小,这与通风和火灾规模有关;在火源点下游,温度在 50 °C 以上的区域延伸到距火源点 40 m 左右的地方。

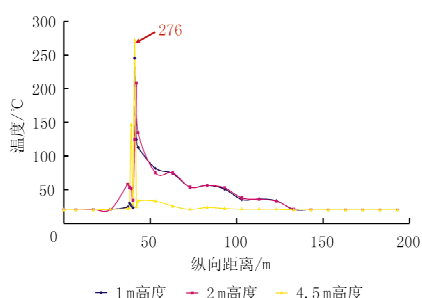


图 5 1.5 m/s 纵向通风时的温度 ($t=200$ s) 分布

3.3 火灾功率为 20 MW 时的通风排烟模拟

在火灾功率为 20 MW 时,从火源点沿行车方向设 6 个排烟口,每个排烟口的风速为 7.5 m/s,图 6 是在上游设置不同纵向通风风速时排烟的模拟结果。

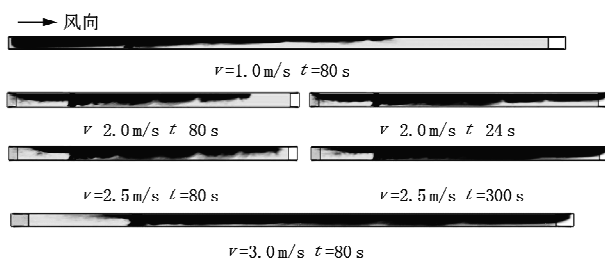


图 6 20 MW 时通风排烟模拟结果

从图 6 可以看出,当设置 1.0 m/s 的纵向通风时,下游烟气能够得到很好的控制,但上游烟气延伸了很大的范围;当设置 2.0, 2.5 m/s 纵向通风时,上游烟气可以被控制在距火源点约 40 m 的范围内,下游烟气到达距火源点约 160 m 以外时开始出现很好的分层;而当设置了 3.0 m/s 的通风风速时,虽然可以很好地控制烟气向上游的蔓延,但烟气向下游蔓延很快,在 80 s 时已蔓延到了火源点 160 m 以外,同时烟气充满了整个隧道。因此,当采用半横向排烟通风方式时,建议采用 2.0~

2.5 m/s 的纵向通风风速,这样既能够控制烟气向上游的扩散,又有利于下游人员的疏散。

图 7 为 2.5 m/s 纵向通风时 CO 体积分数分布图,可以看出,当 $t=300$ s 时,在上游 1 m, 2 m 高度处,CO 体积分数基本为 0,也就是说人体不会受到烟气的影响,在隧道顶部,烟气回流了 20~30 m 的距离,这种回流的分层效果很明显,因此烟气不会对上游人员疏散造成影响。在火源点下游 1 m 高处 CO 体积分数较小,基本在 10×10^{-6} 以下,但这种浓度仍然会对人员疏散造成影响。因此下游人员应当在 160 s 以内撤离到距离火源点 200 m 以外的地方,同时利用烟气在下游的分层安全疏散。

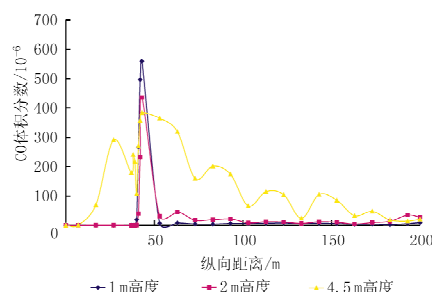


图 7 2.5 m/s 纵向通风时 CO 体积分数分布 ($t=300$ s)

图 8 为 2.5 m/s 纵向通风时的温度分布,可以看出,最高温度不是出现在火源点正上方,而是向下游偏移了,最高温度达到 628 °C,隧道顶部在此处设置了排烟口,因此排烟口的耐火性必须达到此温度。而在隧道顶部的其他部位,温度在 50 °C 左右,不会对隧道结构带来太大影响。在 1 m, 2 m 高度上,60 °C 以上温度延伸到了火源点上游 20 m 处,在 2 m 高度上甚至达到了 200 °C 左右;下游高温的分布范围较大,发展到了距离火源点 100 m 处,温度从 300 °C 左右逐渐降低到 80 °C 左右。虽然上游温升不大,但为了避免热辐射对人员的影响,上游人员也应该撤离到距火源点 20 m 以外的地方。

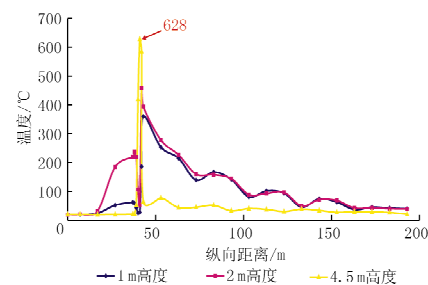


图 8 2.5 m/s 纵向通风时的温度分布 ($t=300$ s)

(下转第 75 页)

开启。”从理论上讲该控制方法确实简单直接,也是最接近需求的控制,然而正如前文中对于风机盘管中“最早出现冷凝水”位置问题的讨论,在实际操作中要找到安装凝露传感器的合理位置非常困难。另一方面,以“冷凝水蒸发”作为风机盘管电动两通阀开启的判断依据,就需要对凝露传感器检测点的通风条件进行充分的考虑,若检测点通风不畅会造成冷凝水难以蒸发,使风机盘管迟迟无法进入供冷状态,延长了室内温度失控的时间;若检测点处的通风条件使得冷凝水蒸发过快,风机盘管电动两通阀开关频繁,则容易引起水系统控制的振荡。

2 结论

2.1 在“干盘管”实验中,“盘管进水分水头开始出现冷凝水下落”不应作为判断盘管是否处于干工况运行的依据,也无法以此得出“干盘管”的进水临界温度。

2.2 重申了基于干球温度效率法推导得到的干工况下风机盘管冷量修正的有效性 and 可靠性。

2.3 分析了基于新风冷凝除湿原理的干盘管系统对新风再热调节的需求,并介绍比较了新风再热方式,通过对某一“干盘管”系统的仿真计算可知,选

(上接第 26 页)

3.4 20 MW 时火源位于两个排烟口间的模拟

由于以上模拟计算的模型中火源刚好位于第二个排烟口的正下方,是排除烟气和热量最有利的位。故将模型中的火源移到第二和第三个排烟口中间,对火灾功率为 20 MW,纵向通风风速为 2.5 m/s 的排烟进行了模拟。模拟结果见图 9。

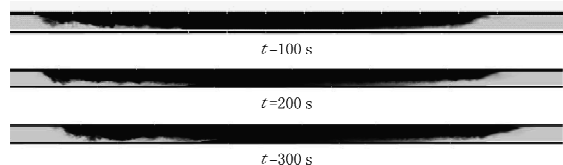


图 9 20 MW 时火源位于两个排烟口间的通风排烟模拟

从图 9 中可以看出,烟气向上游回流的距离达到 45 m,在这种情况下就需要增大纵向通风的风速,而加大风速又会加快下游烟气层的下沉,因此在这种情况下,建议不要开启火源点上方的那组排烟口,而是开启火源点下游的两组排烟口,这样就可以抑制烟气回流且下游烟气不会快速下降。

4 结论

择合理的新风再热方式可以将系统能耗的增加值控制在一个较为合理的范围,可大大改善室内温度可控度,提高室内环境质量。

2.4 应对“干盘管”防凝结水产生控制系统中凝露传感器安装位置作充分研究。

参考文献:

- [1] 殷平. “干盘管”误解剖析[J]. 暖通空调, 2008, 38(7): 44-54
- [2] 万建武, 廖荣生. 干工况风机盘管进水温度的确定[J]. 广州大学学报: 综合版, 2001(5)
- [3] 郁惟昌, 卜庭栋, 唐学波. 干工况风机盘管进水温度的确定[J]. 暖通空调, 2007, 37(10)
- [4] 刘云祥. 主动抗菌型节能、净化空气处理机组的研发[D]. 上海: 同济大学, 2004
- [5] 沈列丞, 龙惟定. 干盘管系统设计中风机盘管冷量修正法的研究[J]. 制冷与空调, 2006, 6(2)
- [6] 沈列丞. 风机盘管干工况运行空调系统在办公建筑中的应用[D]. 上海: 同济大学, 2006
- [7] Mumma S A. Designing dedicated outdoor air systems[J]. ASHRAE J, 2001, 43(5): 28-31
- [8] 沈列丞, 龙惟定. 干盘管系统中关键技术的研究[J]. 制冷与空调, 2007, 7(1)

4.1 火灾时采用半横向通风排烟方式, 不仅可以有效控制烟气向上游的扩散, 还能够减缓烟气向下游的扩散, 为下游人员疏散创造有利条件。在使用 6 个排烟口进行排烟时, 建议采用的纵向通风风速为: 3 MW 时 1.5 m/s, 20 MW 时 2.5 m/s。

4.2 采用半横向通风排烟方式排烟时, 火源点上方排烟口会出现高温区, 排烟口的耐火性能必须能够达到此温度要求。

4.3 当火源点在第二和第三个排烟口中间时, 建议不要开启火源点上方的那组排烟口, 而是开启下游的两组排烟口。

参考文献:

- [1] 管鸿浩. 武汉长江隧道通风设计[J]. 隧道建设, 2005(5): 23-27
- [2] 杨君涛, 魏冻. 基于油罐火灾数值模拟的模型选取与分析[J]. 中国安全科学学报, 2004(1): 29-33
- [3] 邓艳丽, 方正. 地铁隧道工程的性能化防火问题研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005
- [4] 冯炼, 王婉娣. 长大公路隧道火灾通风三维数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004