

点式排烟模式隧道火灾排烟量计算方法^{*}王 瑞^{1,2}

(1. 中国铁建 BIM 工程实验室, 710043, 西安; 2. 极端环境岩土和隧道工程智能建养全国重点实验室, 710043, 西安)

摘 要 [目的]为解决 GB 50016—2014《建筑设计防火规范》中,隧道火灾点式排烟系统的排烟量没有公认的数值及计算方法的问题,提出了临界排烟量的定义及相关计算方法。[方法]对排烟口下方烟气进行受力分析,采用表征浮升力与惯性力相对大小的 Froude 准则数作为判定临界排烟量的理论判据。在此基础上,进一步分析了浮升力与惯性力相对大小与烟气偏转轨迹之间的内在联系,结合模型试验数据,建立了临界排烟量的半经验模型。[结果及结论]临界排烟量的 Froude 准则数与排烟风口间距及火灾热释放率无关,与烟气层厚度和排烟风口长度的比值有关。当烟气层厚度和排烟风口长度的比值大于 0.67 时,Froude 准则数与烟气层厚度和排烟风口长度的比值存在幂函数关系;当烟气层厚度和排烟风口长度的比值小于等于 0.67 时,Froude 准则数与烟气层厚度和排烟风口长度的比值线性相关。

关键词 隧道; 点式排烟模式; 临界排烟量

中图分类号 U231.96

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.013

Calculation Method for Tunnel Fire Smoke Exhaust Volume with Point Smoke Exhaust Mode

WANG Rui

(1. CRCC BIM Engineering Laboratory (FSDI), 710043, Xi'an, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Tunnelling, 710043, Xi'an, China)

Abstract [Objective] To address the lack of recognized numerical values and calculation methods for smoke exhaust volume of tunnel fire point smoke exhaust system specialized in GB 50016—2014 'Code for fire protection design of buildings', a definition of critical smoke exhaust volume and relevant calculation methods are proposed. [Method] A force analysis of smoke beneath vent is conducted using the Froude number, which characterizes the relative magnitude of buoyancy force and inertia force, as the theoretical criterion for determining the critical smoke exhaust volume. Based on this criterion, the intrinsic relationship between the relative magnitude of buoyancy and inertia forces, and the smoke gas deviation

trajectory is further analyzed. Combined with model test data, a semi-empirical model for the critical smoke exhaust volume is established. [Result & Conclusion] The Froude number for determining the critical smoke exhaust volume is independent of the spacing between vents and the heat release rate of fire, but is related to the ratio of smoke layer thickness to vent length. When this ratio is greater than 0.67, the Froude number exhibits a power function relationship with the ratio of smoke layer thickness to vent length. Conversely, when this ratio is less than or equal to 0.67, the Froude number is linearly correlated with the ratio of smoke layer thickness to vent length.

Key words tunnel; point smoke exhaust mode; critical smoke exhaust volume

随着我国城市轨道交通的飞速发展,出现了越来越多超过 3 km 的长区间隧道,甚至是一些跨江越海隧道。为了避免纵向通风排烟对长区间隧道内追踪列车运行安全造成的影响,通常需要设置中间风井,但中间风井的设置受到日趋严格的城市规划限制,且其投资成本较高。点式排烟模式是一种较为有效的替代方案。在隧道顶部设置排烟道,排烟道隔板按照一定间距设置排烟口。当列车发生火灾并滞留在区间隧道时,火灾附近的排烟口打开,同时开启竖井内的风机,将高温有毒烟气通过排烟道排出隧道。

设计点式排烟系统的关键为:需要多少排烟量才能将烟气控制在安全范围内。文献[1]通过数值模拟发现,相比于无坡度隧道,坡度为 1%、3% 和 5% 隧道的排烟量需要分别增加 5%、10% 和 20% 才能将烟气控制在安全范围内。文献[2]采用小尺寸燃烧试验和数值模拟相结合的方法,对地铁隧道火灾半横向排烟进行了研究,研究结果表明,最佳排烟风速与火灾热释放率的 1/3 次方成线性关系。

已有的文献研究无法满足通用性设计需求,GB

^{*} 陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-141)

50016—2014《建筑设计防火规范》中明确指出,隧道中重点排烟的排烟量目前还没有公认の数値。而点式排烟模式是重点排烟的一种形式,因此需建立该模式下排烟量的理论计算模型,以期更好地指导工程实践。

基于此,本文搭建 1:20 的模型试验装置,研究了火灾强度、排烟口间距、排烟口尺寸等参数对排烟口排烟特性的影响规律。在此基础上,通过对排烟口下方烟气的受力分析,采用 Froude 准则数建立了临界排烟量半经验模型,并利用试验数据确定了半经验模型中的系数,获得了临界排烟量的计算关系式。本文研究可为点式排烟工程应用提供理论支撑和科学依据。

1 模型试验

1.1 试验装置

本文基于 Froude 模拟法搭建缩尺比为 1:20 的隧道模型,该隧道模型由隧道和排烟道两部分组成。隧道的一侧采用厚为 5 mm 的防火玻璃制作,便于观察火焰和烟气的流动情况,隧道模型的其余部分均采用厚为 10 mm 的防火板制作。隧道模型长为 14.00 m,宽为 0.25 m,高为 0.25 m,排烟道的长度和宽度与隧道模型相同,其高度为 0.12 m。热电偶位于隧道横向中心,沿隧道纵向以 0.10 m 的间隔布置,距离隧道顶壁下方 0.01 m。排烟道与离心风机采用直径为 100 mm 的软管连接,并通过离心风机下游的风阀调节风量。隧道模型的排烟口间距可调,分别为 1.5 m、3.0 m 和 4.4 m;隧道模型的排烟口长为 0.035 m~0.200 m。试验中,火源始终位于隧道中心处,以确保火源两侧风量相等。隧道模型示意图如图 1 所示。

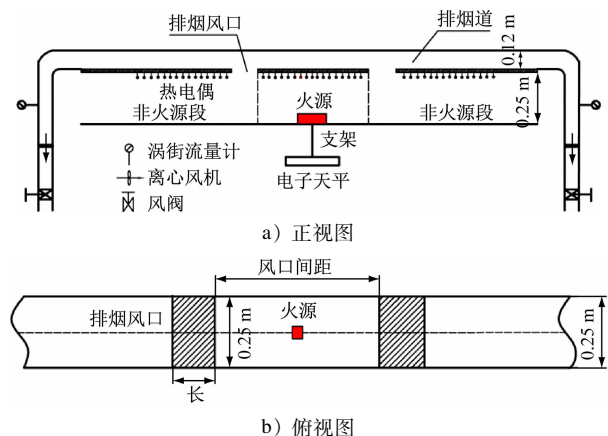


图 1 隧道模型示意图

Fig. 1 Diagram of tunnel model

1.2 燃烧系统

采用甲醇模拟火源,其火灾热释放率 Q 可以表示为^[3]:

$$Q = \chi m_f \Delta H \quad (1)$$

式中:

m_f ——燃料质量损失率;

χ ——燃烧效率;

ΔH ——燃烧热。

对于甲醇而言,其燃烧效率可以认为是 1,燃烧热为 19.93 kJ/g^[3]。

2 理论分析

2.1 临界排烟量的定义

排烟口下方烟气流动示意图如图 2 所示。当烟气流动到排烟口下方,在排烟作用下,大量烟气被排出隧道,部分烟气继续向排烟口下游扩散。随着排烟量逐渐增加,烟气越过排烟口的扩散长度会逐渐减小,直至烟气被完全控制在两个排烟口之间(即再继续增加排烟量,烟气仍然被控制在两个排烟口之间),本文将烟气被控制在排烟口之间的最小排烟量定义为完全排烟的临界排烟量(见图 2 b))。采用临界排烟量控制火灾烟气具有以下两个优点:① 在排烟口下游营造一个无烟环境,在最大程度上确保人员安全疏散;② 减少风机设备容量,避免不必要的设计冗余。

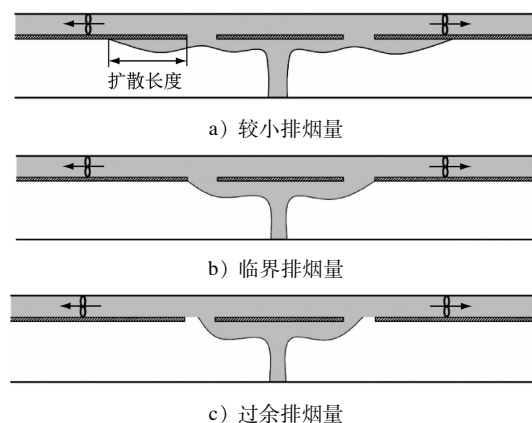


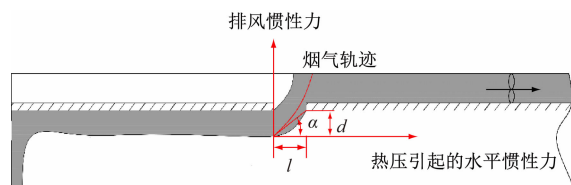
图 2 排烟口下方烟气流动示意图

Fig. 2 Diagram of smoke propagation beneath vent

2.2 受力分析

在排烟过程中,排烟口下方烟气受到排风惯性和由烟气热压引起的水平惯性力的共同作用,排风惯性力是排烟过程的驱动力,而水平惯性力会驱动烟气越过排烟口。排烟口下方烟气受力分析示

意图如图3所示。



注: l 为排烟风口长度; d 为烟气层厚度; α 为烟气偏转角度。

图3 排烟口下方烟气受力分析示意图

Fig.3 Diagram of the smoke force analysis beneath vent

在排风惯性力和水平惯性力的合力作用下, 烟气流动轨迹将会发生偏转, 临界排烟量的大小同排风惯性力和水平惯性力的相对大小密切相关。排风惯性力 F_i 与水平惯性力 F_h 的相对大小可以由 Froude 数 Fr 表征, 则有:

$$Fr = \frac{F_i}{F_h} \quad (2)$$

$$F_i = \frac{1}{2} \rho_s v^2 l w \quad (3)$$

式中:

ρ_s ——排烟口下方烟气密度, 单位 kg/m^3 ;

v ——排烟风速, 单位 m/s ;

l ——排烟口长度, 单位 m ;

w ——排烟口宽度, 单位 m 。

排烟风速 v 可以表示为:

$$v = \frac{V_e}{lw} \quad (4)$$

式中:

V_e ——排烟口处的体积流量, 单位 m^3/s 。

当火源位于隧道中心时, 由质量守恒定律可知, 排烟口处的排烟质量流量应近似等于风机处的排烟质量流量, 即:

$$\rho_s V_e \approx \rho_f V_f \quad (5)$$

式中:

ρ_f ——风机处的烟气密度, 单位 kg/m^3 ;

V_f ——风机处的体积流量, 单位 m^3/s 。

由于火灾过程中燃烧产物质量分数远低于新鲜空气的质量分数, 因此烟气密度可近似用空气密度代替。一般来说, 某个温度下的空气密度可以通过线性插值获得, 即:

$$\frac{\rho_f}{\rho_s} = \zeta \quad (6)$$

式中:

ζ ——由试验数据确定的常数。

联立式(4)~(6)并代入式(2), 经整理可获得排风惯性力和水平惯性力的最终表达式:

$$F_i = \zeta^2 \frac{\rho_s V_f^2}{2lw} \quad (7)$$

$$F_h = \Delta \rho_s g d^2 W \quad (8)$$

式中:

$\Delta \rho_s$ ——无排烟时排烟口下方烟气与环境空气的密度差, 单位 kg/m^3 ;

d ——无排烟时排烟口下方烟气层厚度, 单位 m ;

g ——重力加速度, 取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$;

W ——隧道宽度, 单位 m 。

无排烟时, 烟气层厚度 d 可以表示为^[4]:

$$d/H = 0.2128(0.5W/H)^{-1/3} \quad (9)$$

式中:

H ——隧道高度, 单位 m 。

联立式(7)~(9)并代入式(2), 经整理可获得 Froude 数的最终表达式:

$$Fr = \frac{\zeta^2 \rho_s V_f^2}{2 \Delta \rho_s g l w d^2 W} \quad (10)$$

当烟气被完全控制在两个排烟口之间时, 存在一个临界排烟量, 考虑到 ζ 是由试验确定的常数, 将完全排烟的临界 Froude 数 Fr_c 定义为:

$$Fr_c = \frac{\rho_s V_{cf}^2}{2 \Delta \rho_s g l w d^2 W} \quad (11)$$

式中:

V_{cf} ——临界排烟量, 单位 m^3/s 。

2.3 临界排烟量半经验模型的建立

基于 1:20 隧道模型试验结果及式(11), 通过计算获得的不同火灾热释放率、排烟口长度及排烟口间距下的临界 Froude 数计算结果如表1所示。在相同排烟口长度下, 火灾热释放率和排烟口间距对临界 Froude 数的影响很小, 这说明完全排烟时, 排风惯性力和水平惯性力的相对大小基本保持不变。

排烟口长度对完全排烟临界 Froude 数的影响如图4所示。由图4可知: 随着排烟口长度的增加, 完全排烟临界 Froude 数呈先快速下降, 后缓慢下降的变化趋势。

排烟口下方烟气受到排风惯性力和水平惯性力共同作用, 完全排烟时, 烟气运动轨迹会发生偏转(见图3), 将烟气偏转角度定义为 α , 则有:

表 1 不同火灾热释放率、排烟口长度及排烟口间距下的临界 Froude 数计算结果

Tab. 1 Calculation results of critical Froude number under different conditions of fire heat release rate, vent length and vent spacing

火灾热释放率/kW	排烟口长度/m	临界 Froude 数		
		排烟口间距为 1.5 m	排烟口间距为 3.0 m	排烟口间距为 4.4 m
1.48	0.035	0.845	—	0.834
	0.050	0.374	0.370	0.400
	0.075	0.242	0.223	0.240
	0.100	0.119	0.130	0.147
	0.125	0.109	—	0.113
	0.150	0.096	—	0.101
	0.175	0.087	—	0.092
	0.200	0.084	—	0.086
2.54	0.035	0.831	—	0.852
	0.050	0.408	0.344	0.414
	0.075	0.235	0.208	0.247
	0.100	0.127	0.124	0.148
	0.125	0.111	—	0.112
	0.150	0.096	—	0.100
	0.175	0.086	—	0.089
	0.200	0.083	—	0.087
3.52	0.035	—	—	0.842
	0.050	0.398	0.340	0.417
	0.075	0.253	0.211	0.242
	0.100	0.133	0.125	0.153
	0.125	0.119	—	0.117
	0.150	0.100	—	0.108
	0.175	0.092	—	0.097
	0.200	0.084	—	0.088

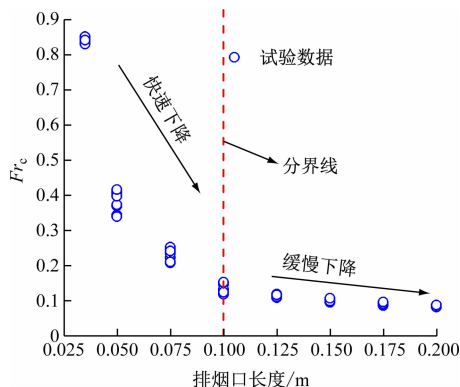


图 4 排烟口长度对完全排烟临界 Froude 数的影响

Fig. 4 Impact of vent length on the critical Froude number of complete smoke exhaustion

$$\tan \alpha = \frac{d}{l} \quad (12)$$

由力与物体的运动关系可知,临界 Froude 数与烟气偏转角的大小紧密相关,即:

$$Fr_c \propto \frac{d}{l} \quad (13)$$

不同排烟口长度下的烟气流动图如图 5 所示。当排烟口长度由 0.035 m 增加至 0.100 m,纵向烟气偏转角明显变小;当排烟口长度由 0.100 m 增加至 0.150 m 时,纵向烟气偏转角的变化不明显。根据上述分析可知:随着排烟口长度的增加,完全排烟临界 Froude 数呈先快速下降,后缓慢下降的变化趋势。

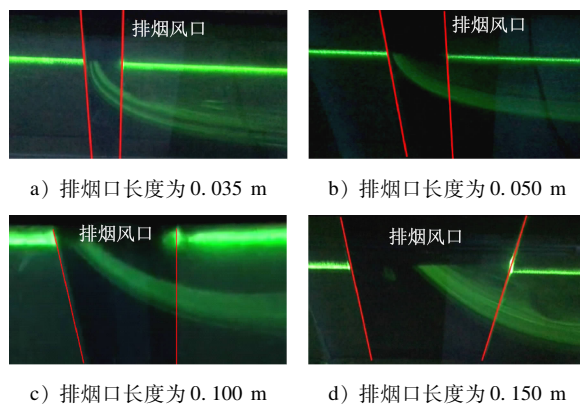


图 5 不同排烟口长度下的烟气流动图

Fig. 5 Diagram of smoke propagation with different vent lengths

根据上述分析,联立式(11)和式(13),通过拟合试验数据,可得:

$$\frac{\rho_s V_{cf}^2}{2\Delta\rho_s g l w d^2 W} = \begin{cases} 0.147(d/l) + 0.035, & 0.30 < d/l \leq 0.67 \\ 0.265(d/l)^{1.685}, & 0.67 < d/l < 2.00 \end{cases} \quad (14)$$

3 结语

针对隧道火灾点式排烟模式排烟量计算问题,采用模型试验和理论分析相结合的方法,提出了临界排烟量的思路,研究了火源热释放率、排烟口间距和排烟口长度对临界排烟量的影响,主要获得以下结论:

1) 基于排烟口下方烟气受力分析,采用 Froude 数将相关影响因素无量纲化,建立了临界排烟量的计算关系式。

(下转第 87 页)

- [5] 朱瑶宏, 高一民, 董子博, 等. 盾构法 T 接隧道结构受力足尺试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(1): 9.
ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Full-scale experimental study on structural mechanism of T-connected tunnel constructed by shield method[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(1): 9.
- [6] 朱瑶宏, 高一民, 董子博, 等. 盾构法 T 接隧道结构受力现场试验研究: 以宁波轨道交通 3 号线联络通道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(11): 1759.
ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Field test on structural mechanism of T-connected shield tunnel: a case study of connecting passage on Ningbo Metro Line No. 3[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1759.
- [7] 黄大维, 陈后宏, 徐长节, 等. 联络通道施工盾构机接收对已建盾构隧道影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(4): 784.
HUANG Dawei, CHEN Houhong, XU Changjie, et al. Experi-

- mental study on influences of shield machine reception on existing shield tunnels during construction of connecting channels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 784.
- [8] 张恒忠, 舒卫建, 孟绥宝, 等. 海底隧道联络通道机械法施工的结构稳定性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 181.
ZHANG Hengzhong, SHU Weijian, MENG Suibao, et al. Structure stability analysis of subsea tunnel link passage constructed with shield method[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 181.
- 收稿日期:2024-02-21 修回日期:2024-03-20 出版日期:2024-07-10
Received:2024-02-21 Revised:2024-03-20 Published:2024-07-10
- 通信作者:周萌,高级工程师,zhoumeng@sty.sh.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 76 页)

- [6] 罗曼, 邹亚平, 李媛. 地铁装配式车站机电装修一体化设计研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(增刊 2): 24.
LUO Man, ZOU Yaping, LI Yuan. Research on the integrated design of electromechanical decoration of subway assembled station[J]. Modern Urban Transit, 2022(S2): 24.
- [7] 申樟虹, 乔志忠, 刘潇洋, 等. 城市轨道交通车站机电设备智能运维及能源管理系统[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(增刊 2): 131.
SHEN Zhanghong, QIAO Zhizhong, LIU Xiaoyang, et al. Intelligent operation and maintenance and energy management system of

electromechanical equipment in urban rail transit station[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(S2): 131.

- 收稿日期:2024-03-02 修回日期:2024-03-20 出版日期:2024-07-10
Received:2024-03-02 Revised:2024-03-20 Published:2024-07-10
- 通信作者:葛世平,正高级工程师,Geshiping6430@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 80 页)

2) 随着排烟口长度的增加,临界 Froude 数明显减小;当排烟口长度大于 0.100 m 时,进一步增加排烟口长度对临界 Froude 数的影响很小。

3) 临界 Froude 数同排烟口间距与火灾热释放率无关。

参考文献

- [1] LIN P, LO S M, LI T. Numerical study on the impact of gradient on semi-transverse smoke control system in tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 44: 68.
- [2] 卢艳艳. 区间隧道火灾半横向排烟研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
LU Yanyan. Study on smoke flow with semi-transverse smoke extraction in tunnel fire [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

- [3] 范传刚. 隧道火灾发展特性及竖井自然排烟方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015.
FAN Chuangang. Studies on characteristics of tunnel fire development and natural ventilation mode using shafts[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [4] OKA Y, OKA H, IMAZEKI O. Ceiling-jet thickness and vertical distribution along flat-ceilinged horizontal tunnel with natural ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 53: 68.

- 收稿日期:2023-05-05 修回日期:2023-06-29 出版日期:2024-07-10
Received:2023-05-05 Revised:2023-06-29 Published:2024-07-10
- 通信作者:王瑞,工程师,340350388@qq.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license