

纵向通风水平隧道火灾烟气流动特性研究

卢平, 丛北华, 廖光焯, 范维澄, 厉培德

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 地铁隧道火灾烟气控制是城市公共安全的一个重要组成部分。在分析地铁隧道火灾烟气流动主要影响因素的基础上, 将地铁隧道通风和排烟系统作为一个整体考虑, 引入地铁隧道火灾烟气的浮力效应和热阻效应, 建立了隧道通风网络火灾模拟的数学模型, 分析了地铁隧道火灾烟气逆流的临界条件、临界流速、隧道风流及烟流流速与火灾强度的变化关系, 为地铁隧道火灾烟气控制和事故应急处理提供科学依据。

[关键词] 地铁隧道; 火灾烟气; 浮力效应; 热阻效应; 临界风速

[中图分类号] TU988.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)10-0059-06

1 前言

在地铁营建与运营中, 地铁火灾是不容忽视的问题。据统计^[1], 隧道火灾频率约 $2 \text{次}/10^8 \cdot \text{车} \cdot \text{km}$ 。1995年10月28日夜, 阿塞拜疆首都巴库地铁由于电动机车电路故障发生一起恶性地铁火灾惨剧。由于地铁车厢大部分材料采用易燃物质, 火势异常猛烈, 有毒烟雾弥漫, 地铁司机也没有按照常规要求千方百计将列车开出去, 然后再采取救援措施, 却把列车停在了隧道内, 被困乘客纷纷打破车窗玻璃夺路而逃, 在浓烟中乱成一团, 大火直到第二天凌晨才被扑灭。这场火灾造成558人死亡, 269人受伤。据调查, 死亡的558名乘客中大多数不是被烧死, 而是窒息而死。2003年2月18日韩国大邱市地铁发生的火灾造成198人死亡, 146人受伤, 289人失踪, 成为震惊世界的重大火灾事故^[2]。因此, 如何有效地控制隧道内火灾烟气流向, 迅速排除烟气, 以保证乘客安全疏散和消防人员的安全, 是地铁通风设计和火灾事故处理中必须解决的问题。

随着我国国民经济的飞速发展, 都市地下交通发展迅速。据北京市“十五”时期城市基础设施建

设与发展规划^[3], 到2005年, 地铁运营线路将达到138 km, 比2000年增加85 km。地铁线网覆盖率达到13%, 客运量达到7.64亿人次, 地铁在城市客运中所占的比例达到10%以上。地铁交通事业快速发展给地铁火灾防范提出了更严格的要求, 而我国地铁消防工程起步较晚, 防排烟工程则更晚, 地铁火灾烟气控制方案还不成熟。随着火灾科学和计算机技术的飞速发展, 使人们能够对地铁火灾过程进行模拟和分析, 运用消防工程学的原理和方法进行地铁防火设计和火灾烟气控制。因此, 必须加强地铁系统火灾安全工程的研究, 为确保地铁安全运营和火灾烟气控制提供理论依据和技术支撑。

2 地铁隧道火灾工况

火灾的大小对地铁隧道烟气流动有重要的影响。在设计烟控系统时, 必须首先确定火灾大小。火灾大小用火灾面积和放热量来表示。

2.1 火源特性

在火灾通风模拟时, 目前确定火源参数的方法是采用火灾发展特性曲线, 即根据相似条件下发生的火灾事故, 进行火灾模拟试验, 确定火源温度。

[收稿日期] 2004-01-12

[基金项目] 国家自然科学基金专项基金资助项目(50323005)

[作者简介] 卢平(1966-), 安徽庐江县人, 中国科学技术大学博士后

用这种方法,可以比较客观地对各种不同规模、不同发展趋势的火灾全过程进行模拟。根据大量的燃料燃烧实验资料确定多种火源特性曲线,供火灾模拟时使用。当然,提供的火源特性曲线与实际情况会有出入,但此模拟的结果仍有重要的参考价值。

在火灾发生过程中,火源特性曲线的温度和烟气浓度随时间变化有一共同特点,即开始的上升阶段,中间的稳定阶段,其后的下降阶段。上升阶段时间较短,斜率较大;稳定阶段温度和烟气浓度达到最高值,稳定的时间依可燃物的数量及火势大小而定;下降阶段,时间较长,斜率较小。图1为煤科总院重庆分院在模拟平峒内做的燃烧实验曲线^[4]。燃烧实验以1 000 kg 木柴和204 kg 皮带(长24 m)为燃烧物,燃烧开始前巷道风速为1.73 m/s,用以模拟隧道内的火灾。图1上部的纵坐标为烟气折算浓度 w (CO_2 和 CO 之和),下部的纵坐标为火源温度 T 。

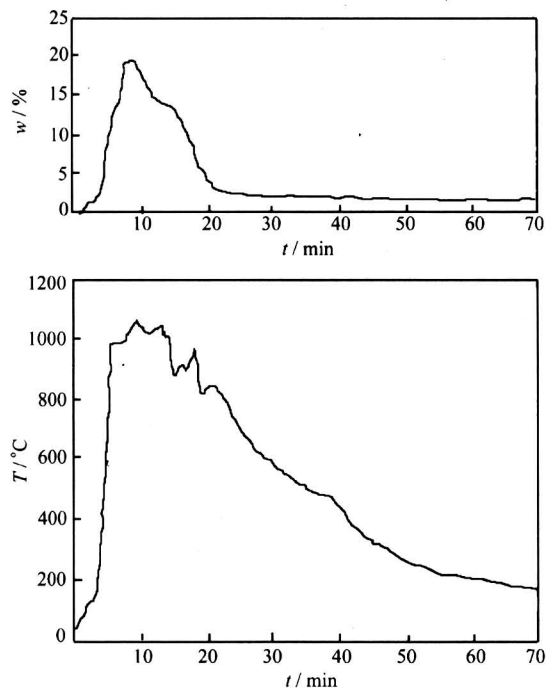


图1 隧道火灾实验燃烧曲线

Fig.1 Combustion curve of experimental tunnel fire

2.2 火灾模型

火灾模型可以是稳态或非稳态的。放热量随时间变化的火灾即为非稳态火灾。防火工程师常用 t^2 型火灾来近似非稳态火灾,其强度可用式(1)计算式:

$$Q = at^2 \quad (1)$$

式中: Q —火灾功率, kW; a —增长系数, $\text{kW}\cdot\text{s}^{-2}$; t —燃烧时间, s。

火灾从稳定燃烧开始至功率达到1 055 kW 所需时间称为增长时间 t_g , 根据火灾发展的快慢情况, t^2 型火灾可分为4种发展类型:极快、快速、中速和慢速^[4], 见表1和图2。

表1 t^2 型非稳态火灾

Table 1 Unsteady fire model of t^2 type

类型	慢速	中速	快速	极快
增长系数 $a/\text{kW}\cdot\text{s}^{-2}$	0.002 931	0.011 27	0.046 89	0.187 8
增长时间 t_g/s	600	300	150	75

放热量为常数的火灾定义为稳态火灾,虽然火灾本质上是非稳态的过程,但稳态火灾是非常有用的理想模型。在很多应用中,采用稳态火灾将使设计方法更简单,结果更安全。在缺乏放热量设计资料的情况下,可以假定火灾为稳态过程,这将使设计的系统更加可靠。这也正是典型规范 BOCA 和

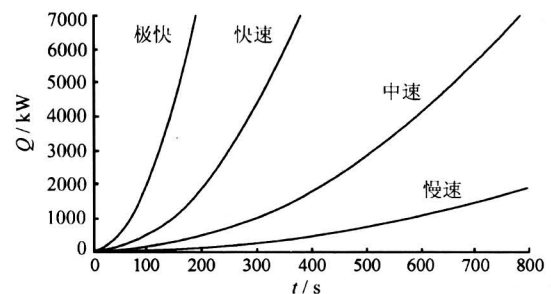


图2 t^2 型火灾关系曲线

Fig.2 Curves showing relations of t^2 type fire

ICBO 所采用的方法^[5]。

3 地铁隧道火灾烟气的流动特性

3.1 火灾烟气的浮力效应与回流现象

浮力效应是地铁隧道火灾与露天火灾的显著区别(图3)。在着火隧道区段的上部,由于热烟气上升而形成一定厚度的热烟气流层,并随火点烟气的不断产生而迅速膨胀,向两侧扩充,同时下部冷空气流向火源,此时火场两侧形成对称的循环风流。

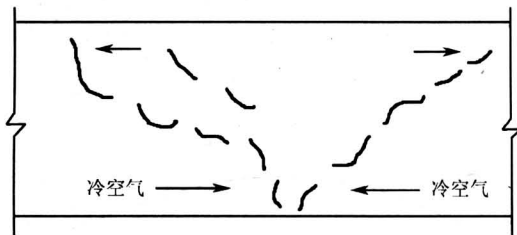
图3a是隧道内无纵向风流的情况。当有纵向通风时,火点两侧的烟气流不对称,如纵向风速 v

较小，不足以克服反向的上层热烟气流时将产生回流现象，即火源上部的烟气会逆着风向流动（图 3b），这对于防止火灾烟气蔓延（炽热烟气将点燃火源上风方向停留车辆）和消防队员的安全是很不利的。因此，为防止火灾烟气逆流，隧道纵向通风风速应大于临界风速（图 3c）。

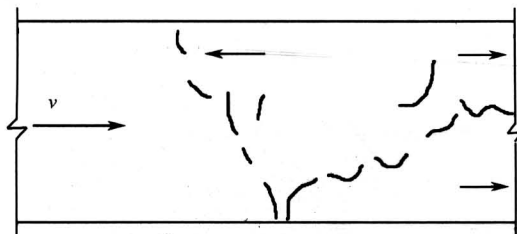
隧道发生火灾时，隧道内气流为紊流状态，气流浮力较大，气流的粘滞力可忽略不计，此时，可采用气流的浮力和输运力的比值，即 Froude 数 Fr 来表征其运动状态^[6]。

$$Fr = \frac{gH(\rho - \rho_f)}{\rho v^2} \quad (2)$$

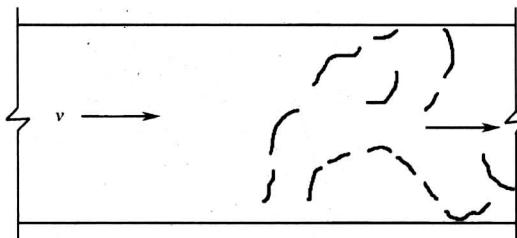
式中： ρ 、 ρ_f —正常状态和火灾状态下气流的密度， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ ； H —隧道高度，m； g —重力加速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ； v —隧道入风流流速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



(a) 无纵向风速



(b) 较小的纵向风产生回流



(c) 大于临界风速的纵向烟流

图 3 纵向通风隧道火灾烟气流动示意图

Fig.3 Schematic map of fire smoke flow of tunnel with longitudinal ventilation

由于火灾烟气流动的压力变化不大，可视为定压不可压缩流动，则：

$$\frac{\rho_f}{\rho} = \frac{T}{T_f} \quad (3)$$

$$Fr = \frac{gH}{v^2} \left(1 - \frac{T}{T_f} \right) \quad (4)$$

式中： T 、 T_f —正常状态和火灾状态下气流的平均温度 (K)。

假设火灾产生的烟气量与隧道风的流量相比可忽略不计，并不计气流与隧道壁面的热交换，则由能量守恒定律可知：

$$mc_p T + Q_w = mc_p T_f \quad (5)$$

$$T = T_f - \frac{Q_w}{mc_p}$$

$$T_f = \frac{Q_w}{\rho c_p A v} + T \quad (6)$$

式中： m —通风气流质量流量， $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ； c_p —空气定压比热， $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ； Q_w —火灾功率，W； A —气流流通的环形面积， m^2 。

将式 (6) 代入式 (4) 中可得：

$$Fr = \frac{gHQ_w}{\rho c_p A T_f v^3} \quad (7)$$

Froude 数越小，气体浮力越小。因此，只要控制 Froude 数小于某一特定值 ($Fr_c = 4.5$)^[7]，即隧道纵向风速大于某一特定值（称之为临界风速 v_c ），就可以控制烟气不产生回流。

由式 (7) 可得，在临界状态下（即保证烟气不产生回流），临界 Froude 数 Fr_c 和临界风速 v_c 的关系可表示为：

$$v_c = k \cdot k_g \cdot \left(\frac{gHQ_w}{\rho c_p A T_f} \right)^{1/3} \quad (8)$$

式中： v_c —入风的临界风速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ； k —系数， $k = Fr_c^{-1/3}$ ； k_g —坡度校正系数。

3.2 火灾烟气流动的热阻效应

地铁隧道要求风速大于 2 m/s，因而空气的流动状态处于紊流状态，隧道火灾烟气流动符合阻力平方定律。在火灾烟流流经的隧道中，由于风流温度的升高和燃烧生成物的加入，热烟气体积膨胀使隧道中通风阻力增加的现象，称为热阻效应。由通风理论可知^[8]：隧道的通风阻力为

$$h = RQ^2 \quad (9)$$

式中： h —隧道阻力； Q —隧道风流的体积流量； R —以风流体积流量计算时的隧道风阻。

对地铁通风网络系统任一节点，由于在风流汇合点的密度不同，流入和流出节点的体积流量的代

数和不为零,但其质量流量守恒。因此,式(9)可改写为质量流量形式:

$$h = RQ^2 = \frac{\rho}{1.2} R_0 \left(\frac{M}{\rho} \right)^2 = \frac{R_0}{1.2\rho} M^2 = R_m M^2 \quad (10)$$

式中 R_m —以风流质量流量计算隧道通风阻力时的隧道风阻, $R_m = R_0/1.2\rho$; 它与风流的密度成反比。

$$R_{m2} = R_{m1} \frac{\rho_1}{\rho_2} = R_{m1} \frac{T_2}{T_1} \quad (11)$$

即随着隧道火灾烟流温度的升高,风阻也随之增大,在风流质量流量不变时,隧道的通风阻力增加,相当于在隧道中增阻,对风流起“节流”作用。

4 隧道列车火灾对隧道风流状态影响的模拟分析

如图 4 所示的地铁隧道通风网络,对网络图中的任一节点、回路和分支,存在风流质量平衡定律、能量守恒定律和分支阻力定律,可用以下式表示^[8]:

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{M} = 0 \quad (12-a)$$

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (12-b)$$

$$h_i = R_i \cdot M_i^2 \quad (12-c)$$

式中; \mathbf{B} —网络的基本关联矩阵; \mathbf{C} —网络的基本回路矩阵; \mathbf{H} —分支风压向量矩阵的转置矩阵, $\mathbf{H} = [H_1, H_2, \dots, H_n]^T$, $H_i = h_i - h_{Ni} - h_{fi}$; h_i —分支 i 的通风阻力; h_{Ni} —分支的位能差; h_{fi} —分支 i 的风机风压; R_i —分支风阻; M_i —分支风量。

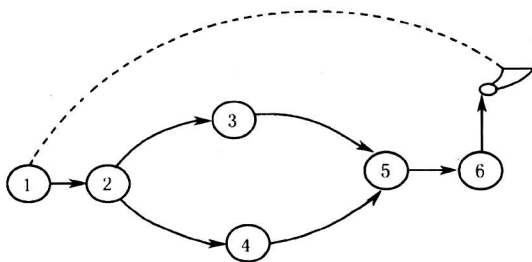


图 4 地铁隧道通风网络示意图

Fig.4 Sketch of ventilation net of subway tunnel

由图论知识可知,对于一个网络(分支 n , 节点 m),其独立回路数(余树弦数): $N = n - m + 1$ 。式(12-b)的独立方程正好也是 N 个,由于该

方程组是非线性的,可进行数值方法求解,求得 N 个余树枝的分支风量,继而可由式(12-a)得到网络其它分支风量。

式(12-b)可改写为

$$\mathbf{F} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{R} \cdot |\mathbf{M}| \cdot \mathbf{M} - \mathbf{C} \cdot \mathbf{H}_f - \mathbf{C} \cdot \mathbf{H}_N = 0 \quad (13)$$

对式(13)进行 Taylor 展开,并忽略高阶小量,则:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{M}_y^k = \mathbf{F}(\mathbf{M}_y^k) \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{M}_y} \right)^{-1} \Big|_{\mathbf{M}_y = \mathbf{M}_y^k} \\ \mathbf{M}_y^{k+1} = \mathbf{M}_y^k + \Delta \mathbf{M}_y^k \end{cases} \quad (14)$$

其中, k 为迭代次数; y 为第 y 个独立回路, $y = 1, 2, \dots, b$ 。

式(13)、(14)为隧道通风网路模拟的迭代计算模型。

现取北京前门—单轨单洞区间隧道为例(图 5),隧道断面 $S = 4.1 \times 3.9 \text{ m}^2$,长 2 000 m;列车长 20 m,列车断面 $S_w = 2.65 \times 3.509 \text{ m}^2$ 。设列车在区间隧道的中部 1 200 m 处发生火灾,列车停留在该位置,1~2 为入风流,2~3 为燃烧区,3~4 为近场火灾影响区,4~5 为远场影响区;各段长度及风阻计算见表 2;在 5 处设有事故排烟风机,排烟风机型号为 4-72-11No.16B 离心式主通风机,风机转速 630 r/min。排烟风机的性能曲线(标准状态, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$)为:

$$H_f = 1\ 612.7 + 5.7 Q - 0.99 Q^2$$

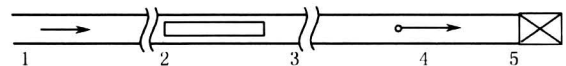


图 5 地铁隧道列车火灾计算简图

Fig. 5 Diagram showing the calculation process of subway tunnel

由表 2 所示的隧道和列车段风阻计算结果可知:地铁列车的阻塞风阻占整个隧道风阻的绝大部分,列车越长、列车断面阻塞比越大,地铁列车的局部风阻越大,其对地铁隧道风流的影响也越明显。为研究分析火灾烟气流动特性,设定地铁隧道列车火灾工况(见表 3),表 4 是不同工况条件下隧道及着火列车环形空间的风量及风速,为便于分析,同时也给出了该隧道不同工况下防止火灾烟气回流的临界风速。

表 2 隧道风阻计算表

Table 2 calculation table of tunnel air resistances

区段	隧道长度		周长		断面积		风阻		备注
	L/m	U/m	S/m ²	R/N.s ² .m ⁻⁸					
1~2	1 200	16.76	15.99	0.024 589	摩擦风阻计算 ^[8]				
2~3	50	16.76	15.99	0.001 025	$R = \frac{\alpha LU}{S^3}$				
列车	20		9.30	0.982 254					
3~4	200	16.76	15.99	0.004 098	列车风阻计算 ^[9]				
4~5	550	16.76	15.99	0.011 270	$R_n = \frac{86 \times 10^{-4} \cdot l}{(1 - \delta)^2}$				

表 3 设计地铁列车火灾工况

Table 3 Fire behavior of design subway train

列车区段	列车隧道长度 L/m	不同工况火灾烟流平均温度/℃					
		A	B	C	D	E	F
2~3	50	20	200	400	600	800	1 000

表 4 不同火灾工况条件下隧道风量、风速及着火列车环形空间的烟气流量及流速模拟结果

Table 4 Smoke flow, velocity of tunnel and the circular spaces of a train in the tunnel of different fire behaviors

火灾工况	列车火灾温度/℃	烟气密度/kg.m ⁻³	烟气逆流临界风速/m.s ⁻¹	地铁隧道(1~2)		列车环形空间(2~3)	
				风量/m ³ .s ⁻¹	风速/m.s ⁻¹	风量/m ³ .s ⁻¹	风速/m.s ⁻¹
A	20	1.2000	0.00	29.67	1.86	29.67	4.43
B	200	0.7442	1.80	25.69	1.61	41.42	6.19
C	400	0.5231	2.19	23.09	1.44	52.97	7.92
D	600	0.4032	2.38	21.04	1.32	62.62	9.36
E	800	0.3281	2.49	19.44	1.22	71.10	10.63
F	1000	0.2765	2.56	18.14	1.13	78.74	11.77

图 6 为不同火灾工况条件下着火列车段烟流阻力随火灾强度的变化，图 7 为隧道内烟气质量流量随火灾强度的变化，图 8 为入风隧道内风流流速 v_a 及着火列车环形空间烟气流速 v_s 随火灾强度的变化，图 9 为防止隧道火灾烟气逆流所需的临界风速与火灾强度的关系。

模拟结果表明：着火段隧道烟流阻力随火灾强度的增加而增加，在 600℃ 以下，烟流阻力增加梯度较大，火灾烟流温度超过 600℃ 后，烟流阻力增加幅度趋于平缓。在水平隧道不考虑火灾烟囱效应条件下，随烟流温度的升高，隧道内烟流的质量流量和风机的排烟质量流量逐渐降低，而着火段由于烟气的膨胀，密度降低，烟气流体的体积流量和速度逐渐增大。为防止地铁隧道烟流逆流的临界风速随

火灾烟气温度的升高而迅速增加，火灾烟气温度超过 200℃ 后，临界速度的增加幅度趋于缓和，火灾烟气温度超过 600℃ 后，本算例条件下的临界速度基本上保持不变（约 2.5 m/s）。

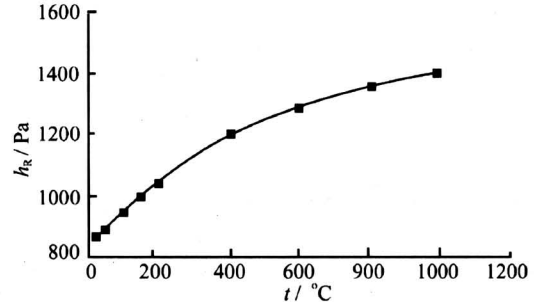


图 6 着火段烟流阻力与火灾强度关系

Fig.6 Relation between smoke flow resistance and fire intensity in fire area

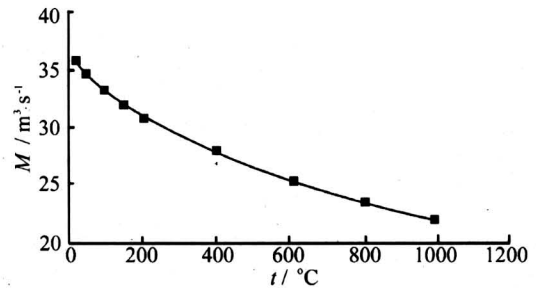


图 7 隧道风流质量流量与火灾强度关系

Fig.7 Relation between air flow mass and fire intensity in a tunnel

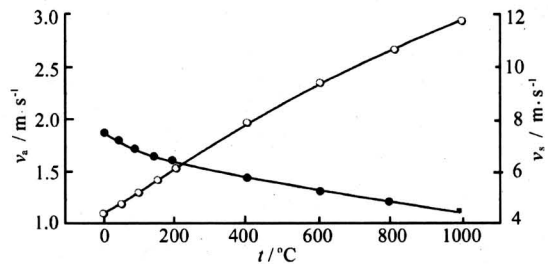


图 8 隧道及列车环形空间流速与火灾强度关系

Fig.8 Smoke velocity of tunnel and the circular spaces of a train in the tunnel of different fire behaviors

5 主要结论

1) 水平地铁隧道火灾烟气回流的临界风速与

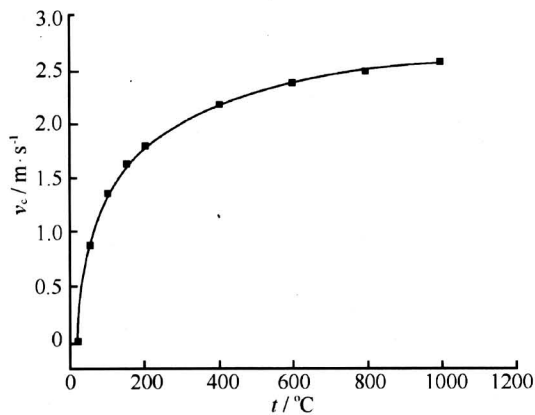


图9 临界风速与火灾强度关系

Fig.9 Relation between critical air velocity and fire intensity

地铁隧道火灾烟气的温度及隧道高度密切相关,符合以下定量关系:

$$v_c = 0.47 \sqrt{gH \left(1 - \frac{T}{T_f}\right)}$$

2) 地铁隧道气流流动属紊流流动,火灾烟气温度越高,烟气流动段隧道的流动阻力越大,气流流动阻力与火灾烟气状态的关系可由下式来表征:

$$h = \frac{R_0}{1.2\rho} M^2$$

该式可作为地铁隧道网络火灾烟气运动网模拟的一个重要的表征关系式。

3) 地铁隧道火灾烟气流动阻力随火灾强度的增加而增加,在水平隧道不考虑火灾烟囱效应条件下,随烟流温度的升高,隧道内烟流的质量流量和排烟风机的排烟质量流量逐渐降低,火灾迎风流的

风速逐渐减小,而防止火灾烟气回流的临界风速随火灾强度增强而增大,这是在地铁通风排烟设计和火灾事故处理中应注意的问题。

4) 地铁隧道火灾段由于烟流密度的降低,烟气的体积膨胀作用,烟流的体积流量和速度逐渐增大。

参考文献

- [1] 张祉道. 公路隧道的火灾事故通风[J]. 现代隧道技术 2003, 40(1): 34~43
- [2] 韩国大邱重大地铁火灾事故[EB/OL]. <http://www.cn.news.yahoo.com/030303/83/1hm90.html>
- [3] 北京市“十五”时期城市基础设施建设与发展规划[EB/OL]. <http://www.beijing.gov.cn/zw/ghxx>
- [4] 戚颖敏. 矿井火灾灾变通风理论及其应用研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1978
- [5] NFPA. Guide for smoke management system in malls, atria and large area[R]. Quincy, Mass National Fire Protection, 1995. NFPA92B
- [6] Wu Y, Bakar M Z A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-a study of the critical velocity[J]. Fire Safety Journey, 2000, 35: 363~390
- [7] Lee C K, Chaiken R F, Singer J M. Interaction between duct fires and ventilation flow: an experimental study [J], Combust Science. and Technology. 1979, 20: 59~72
- [8] 张国枢. 通风安全学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2000
- [9] Chen T Y, Lee Y T, Hsu C C. Investigations of piston-effect and jet fan-effect in model vehicle tunnels [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 73: 99~110

Study of Fire Smoke Flow Characteristics of Horizontal Tunnel Using Longitudinal Ventilation

Lu ping, Cong Beihua, Liao Guangxuan, Fan Weicheng, Li Peide

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] The management of subway tunnel fire smoke is an important component in city public safety. In this paper, on the basis of theoretical analysis of the main factors affecting fire smoke flow in a subway tunnel, the ventilation and exhaust system were considered as a whole and the effects of buoyancy and thermal resistance were introduced. Further, a mathematical model was established to express the relationships between the critical environments, critical velocities, air speeds, smoke speeds and fire intensities. The results can provide instructions for tunnel smoke managements and emergency handling.

[Key words] subway tunnel; fire smoke; buoyant effect; thermal resistance effect; critical velocity