

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.001

热压与风机动力共同作用下多分支隧道内 排烟气流的多解性

阳 东, 赵成梅

(重庆大学 低碳绿色建筑国际联合研究中心; 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要:多分支隧道的排烟与补风路径较多,热压与风机动力的竞争可能造成其通风排烟模式具有多解性。针对某一多分支隧道的防排烟工况,利用理论分析建立了各种气流模式的控制方程,通过数学方法获得了理论解。结果证明,在按照预期设计选定通风排烟模式与风机以后,多分支隧道内的排烟气流仍然可能存在多种状态,风机的运行工况点也会随之漂移,导致排烟方向可能与设计预期完全相反。研究还发现,通过改变风机选型能起到抑制排烟气流出现多解的作用。

关键词:多分支隧道;通风;风机性能曲线;火灾防控;多解性

中图分类号:TU96 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)01-0001-06

Multiple steady states of exhaust airflow in a multi-branch tunnel with the combined effects of buoyancy and fan power

Yang Dong, Zhao Chengmei

(National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings; Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The multi-branch tunnel has multiple routes for smoke extraction and air supply, consequently its ventilation and smoke control modes could have multiple solutions owing to the competitive effects of buoyancy and fan power. For the smoke control of a multi-branch tunnel, the mass and energy balance equations for every possible flow pattern were established, and the corresponding multiple solutions were obtained using mathematical methods. The results demonstrate that, even though the exhaust ventilation mode and fan type have been determined in accordance with the anticipation, multiple states of exhausted flow remain and the operation point of the fans will drift away from the design accordingly. This could cause a totally different direction of smoke route from the anticipated one. It is also shown that the type of fan has significant effects on the existence of multiple solutions.

Key words: multi-branch tunnel; ventilation; fan performance curve; fire control; multiple steady states

为了改善城市交通拥堵问题,城市地下空间被广泛利用,随之出现了多种形式的地下交通隧道,如地下快速通道、城市地下交通联系隧道与地铁区间隧道等。由于功能的需要,新建与拟建的城市交通隧

收稿日期:2014-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51106189);重庆市自然科学基金(cstc2011jjA0007);中央高校基本科研业务费(106112013CDJZR210001)

作者简介:阳 东(1982-),男,副教授,主要从事建筑通风与消防工程研究,(E-mail)yangdong@cqu.edu.cn。

Received:2014-06-20

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51106189);Chongqing Municipal Natural Science Foundation(No. cstc2011jjA0007);Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 106112013CDJZR210001)

Author brief: Yang Dong(1982-), PhD, associate professor, main research intrests: building ventilation and fire protection engineering, (E-mail) yangdong@cqu.edu.cn.

道呈现出体系庞大与分支较多的特点^[1-2];同时,这些交通隧道往往存在多条匝道与地面连接,匝道的首尾具有高差,容易产生热压。该类多分支隧道的结构特点给其火灾时的防排烟气流组织造成了难度。

隧道的防排烟问题一直是国内外研究的热点^[3],其中纵向排烟被认为是兼顾排烟效率与经济性的措施^[4-6]。近年来,相关学者对以城市地下交通联系隧道为代表的多分支隧道投入了更多的关注。如,华高英^[7]针对北京 CBD 地下交通联系隧道进行了不同火灾场景的烟气控制模拟研究,姜学鹏等^[8]研究了苏州火车站地下交通联系隧道的防排烟模式。上述研究表明,采用风机进行分段补风与排烟的模式可以较好地解决多分支隧道的防排烟气流组织。但值得注意的是,隧道中风机动力与热压的竞争会使流动状态出现多样性,从而造成气流路径的不确定性。前人已经对风压与热压相互竞争下的建筑通风气流模式进行了一定的研究。Li 等^[9]、Gladstone 等^[10]指出,热压和风压的竞争导致自然通风系统存在 3 个可能的理论解。Heiselberg 等^[11]对单室自然通风进行了实验和 CFD 模拟,证明了多个稳定状态的存在性。Gong 等^[12]研究了两个水平连接的建筑中由于相互竞争的浮力引起的烟气流动,发现浮力的竞争也会导致多种流动模式。Chenvidyakarn 等^[13]对双竖井诱导的置换通风进行了研究,发现两个竖井高度不同时可能产生 3 种气流状态。该方面的研究还有王晓东等^[14]、阳丽娜^[15]等的工作。对于多分支隧道,气流可选择的路径更多,因此其通风与排烟的气流组织可能具有更大的不确定性。特别是在轴流风机运行时,风机的风压与风量的关系须满足风机特性曲线,这使得实际运行工况点可能沿着风机特性曲线漂移,客观上也造成了气流不确定性的增强。

排烟气流的不确定性可能造成实际排烟方向与设计的人员疏散路径发生交叉,进而引起人员伤亡和财产损失的扩大。为了减轻或杜绝多分支隧道气流的不确定性造成的危害,获取可靠的通风排烟手段,需要利用定量方法对气流组织模式及流量分配情况进行计算。笔者结合具体多分支隧道,利用理论分析的方法,研究了风机动力与热压竞争时排烟气流路径的多解性,并对其抑制措施进行了探讨。

1 隧道结构及其通风、排烟模式的选择

1.1 多分支隧道结构

图 1 为某多分支隧道结构示意图。隧道截面尺寸为 8 m(宽)×4.35 m(高)。分支 1、分支 2 和分支 3 的坡度均为 4°。分支 1 是入口连接隧道,长 115 m,首尾高差是 8.02 m;分支 2 是出口连接隧道,总长 102 m,首尾高差是 7.12 m;分支 3 由一段 48 m 主隧道和长 125 m 的出口连接隧道组成,总长 173 m,其中

出口连接隧道的首尾高差是 8.72 m。分支 5 表示分支 1 底部与排风口的距离,其长度为 20.5 m。分支 4 为与风机房连接的排风管道,排风由轴流风机驱动。

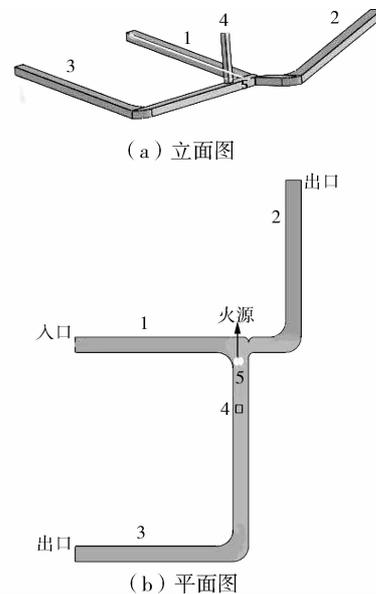


图 1 某多分支隧道结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of a multi-branch tunnel

1.2 通风排烟模式的选择

火灾规模限定为 5 MW,其对应一辆小型车辆的燃烧功率^[16]。火灾发生在分支 1 的底部(如图 1 所示)。美国 NFPA92B 提出了受限空间中火灾产烟量的计算方法^[17]。

$$M = 0.071E^{1/3} z^{5/3} + 0.0018E \quad z > z_1 \quad (1)$$

$$M = 0.032E^{3/5} z \quad z \leq z_1 \quad (2)$$

$$z_1 = 0.166E^{2/5} \quad (3)$$

式中: M 为烟气的质量流率, kg/s; E 为火源对流热释放速率, kW; 根据 PIARC 的结果^[18], 认为对流热释放速率约为火源总热释放速率的 70%; z 为烟气层高度, m; z_1 为平均火焰高度, m。

由此,可确定烟气的体积流率

$$V_e = \frac{MT_s}{\rho_0 T_0} \quad (4)$$

$$T_s = \frac{E}{Mc_p} + T_0 \quad (5)$$

式中: V_e 为体积产烟量, m³/s; ρ_0 为空气密度, 取 1.2 kg/m³; T_s 为烟气层平均温度, K; c_p 为空气比热容, 取 1.01 kJ/(kg·k); T_0 为环境温度, 取 293 K。

将空气和烟气均视为理想气体,则有

$$\rho_a T_a = \rho_i T_i \quad (6)$$

式中: ρ_a 和 T_a 分别为空气密度与室外温度; ρ_i 和 T_i 分别为各分支内的气体密度和温度。

由式(1)与式(4)、(5)可得: $V_e = 29.3$ m³/s。为避免排烟方向(即图 2 中箭头所示方向)与车流方向(车流的入口与出口见图 2)相逆,理想的排烟与补风

路径如图 2 所示,即分支 1、2、3 补风,烟气由轴流风机房(即分支 4)排出。为保证烟气不进入分支 1,需满足两个条件:分支 1 的补风量 Q_1 不小于产烟量 V_e ;分支 5 的补风速度达到临界风速。根据 Wu 等^[19]提出临界风速预测方法,取 $Q_1 = 29.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时可同时满足上述约束条件。因此,以其为基准计算各分支的风量及所需风机全压 P_w 。在该排烟/补风模式下,多分支隧道内的气流分配受如下方程组控制

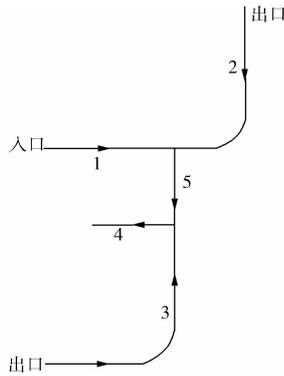


图 2 预期排烟、补风路径示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the anticipated route of smoke extraction and air supply

$$P_w = s_1 Q_1^2 + s_5 Q_5^2 + s_4 Q_4^2 \quad (7)$$

$$P_w = s_2 Q_2^2 + s_5 Q_5^2 + s_4 Q_4^2 \quad (8)$$

$$P_w = s_3 Q_3^2 + s_4 Q_4^2 \quad (9)$$

$$E = \rho_5 Q_5 c_p (T_5 - T_a) \quad (10)$$

$$\rho_a (Q_1 + Q_2) = \rho_5 Q_5 \quad (11)$$

$$E = \rho_4 Q_4 c_p (T_4 - T_a) \quad (12)$$

$$\rho_a (Q_1 + Q_2 + Q_3) = \rho_4 Q_4 \quad (13)$$

$$\rho_a T_a = \rho_5 T_5 = \rho_4 T_4 \quad (14)$$

式中: $Q_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 为各分支的气体流量, m^3/s ; P_w 为轴流风机的全压, Pa; E 为火源的对流热释放速率, kW; c_p 为空气的定压比热容, 取 $1.01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $s_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 为各分支的体积流量阻抗, kg/m^7 。

各分支的结构参数及阻力情况如表 1 所示, 阻力系数的选取参考文献[20]。隧道壁面的沿程阻力系数取 0.02; 主风道(含风井)壁面的沿程阻力系数取 0.022; 隧道入口损失系数取 0.6; 出口损失系数取 1.0。

表 1 各分支的结构参数及阻力情况

Table 1 The length and resistance coefficient of each branch

分支	长度/m	局部阻力系数					
		情形 1	情形 2	情形 3	情形 4	情形 5	情形 6
1	115	进口+合流三通=1.1	出口+分流三通=1.5	出口=1	出口+分流三通=1.5	进口=0.6	进口+合流三通=1.1
2	102	进口+弯头+合流三通=1.6	进口+弯头=1.1	进口+弯头+合流三通=1.6	出口+弯头+分流三通=2	出口+弯头+分流三通=2	出口+弯头=1.5
3	173	进口+弯头+合流三通=1.6	进口+弯头+合流三通=1.6	进口+弯头=1.1	进口+弯头=1.1	进口+弯头+合流三通=1.6	进口+弯头=1.1
4	15	出口=1	出口=1	出口+分流三通=1.5	出口+分流三通=1.5	出口=1	出口+分流三通=1.5
5	20.5	合流三通=0.5	分流三通+合流三通=1	分流三通+合流三通=1	分流三通=0.5	分流三通+合流三通=1	分流三通+合流三通=1

联立式(7)~(14), 利用非线性方程组的迭代求解算法, 可得: $Q_2 = 25.7096$, $Q_3 = 38.8421$, $Q_4 = 103.7318$, $Q_5 = 64.8897$, $P_w = 133.4276 \text{ Pa}$ 。根据所需风机总流量 Q_4 与风机全压 P_w , 选取两台大流量高温消防排烟轴流风机 NXT-17No18A/24 进行并联排烟。单台风机的性能参数如表 2 所示, 并联后的特性曲线可表示为二次函数^[21]:

$$p = -0.13898Q^2 + 14.858Q + 288.55 \quad (15)$$

风机特性曲线与该多分支隧道的阻抗特性曲线如图 3 所示。其中, A 点为设计的防排烟模式所对应的风机工况点。

2 气流组织模式的多解性分析

值得注意的是, 上文所述的防排烟模式(情形 1)及其所对应的工况点 A 仅为风机开启后隧道流

场达到的稳定状态之一, 代表烟气在发展过程中未能进入到具有高差的隧道分支(如分支 1、2)的情形。但是, 烟气在发展过程中有可能进入到具有高差的隧道分支, 引起热压与风机风压的竞争, 进而造成流场稳定状态的其他可能性。经分析, 分支 4 的轴流风机开启后, 除了设计的防排烟模式(情形 1)外, 还可能出现另外 5 种气流组织模式。

2.1 各排烟模式的控制方程

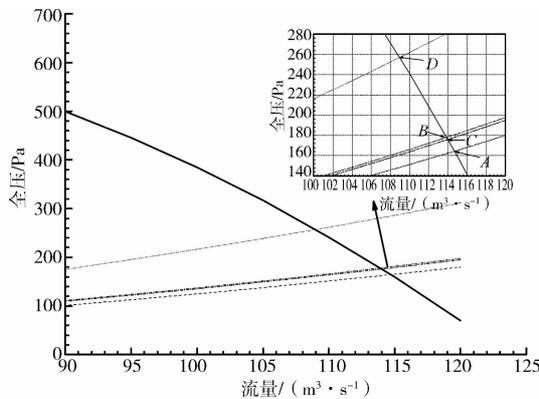
1) 情形 1 如图 2 所示。将式(7)~(14)与风机特性曲线方程(15)联立后, 可获得设计的防排烟模式所对应的风机实际运行工况点及各分支的体积流量。

2) 情形 2 如图 4 所示。在该情形中, 高温烟气进入了具有高差的分支 1, 因此, 热压对气流组织造成影响。其控制方程为

表 2 风机性能参数表

Table 2 The list of fan performance parameters

风机类型	工况点	流量/ (m ³ · h ⁻¹)	全压/Pa	静压/Pa
NXT-17No18A/24	1	125 666	648	535
	2	147 099	576	422
	3	169 170	456	251
	4	190 604	304	44
NXT-17No18A/36	1	179 593	776	545
	2	205 924	736	433
	3	232 884	653	265
	4	259 215	526	45



注：——两台NXT-17No18A/24风机并联特性
情形1阻抗特性 - - - - -情形2阻抗特性
 - · - · -情形4阻抗特性 - - - - -情形5阻抗特性

图 3 多分支隧道的阻抗特性曲线与风机特性曲线

Fig. 3 The impedance characteristic curve of the multi-branch tunnel and the fan performance curve

$$(\rho_a - \rho_1)gh_1 = s_1 Q_1^2 + s_2 Q_2^2 \quad (16)$$

$$P_w = s_2 Q_2^2 + s_5 Q_5^2 + s_4 Q_4^2 \quad (17)$$

$$P_w = s_3 Q_3^2 + s_4 Q_4^2 \quad (18)$$

$$\rho_a Q_2 = \rho_1 (Q_1 + Q_5) \quad (19)$$

$$E = \rho_1 (Q_1 + Q_5) c_p (T_1 - T_a) \quad (20)$$

$$\rho_a Q_3 + \rho_1 Q_5 = \rho_4 Q_4 \quad (21)$$

$$\rho_a T_a = \rho_1 T_1 = \rho_4 T_4 \quad (22)$$

$$\rho_a Q_3 c_p T_a + \rho_1 Q_5 c_p T_1 = \rho_4 Q_4 c_p T_4 \quad (23)$$

将式(16)~(23)与风机特性曲线方程(15)联立,可获得情形 2 对应的各分支的流量。

3)情形 3 如图 5 所示,其控制方程为

$$(\rho_a - \rho_1)gh_1 = s_1 Q_1^2 + s_2 Q_2^2 \quad (24)$$

$$(\rho_a - \rho_1)gh_1 = s_1 Q_1^2 + s_3 Q_3^2 + s_5 Q_5^2 \quad (25)$$

$$P_w = s_3 Q_3^2 + s_4 Q_4^2 \quad (26)$$

$$\rho_a Q_3 = \rho_a (Q_4 + Q_5) \quad (27)$$

$$E = \rho_1 Q_1 c_p (T_1 - T_a) \quad (28)$$

$$\rho_1 Q_1 = \rho_a Q_5 + \rho_a Q_2 \quad (29)$$

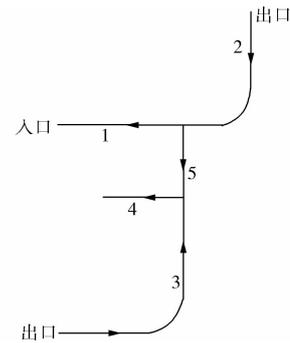


图 4 情形 2 的排烟、补风路径

Fig. 4 The smoke exhaust and air supply route of scenario 2

$$\rho_a T_a = \rho_1 T_1 \quad (30)$$

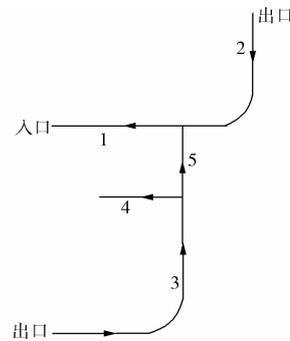


图 5 情形 3 的排烟、补风路径

Fig. 5 The smoke exhaust and air supply route of scenario 3

4)情形 4 中如图 6 所示,其控制方程为

$$(\rho_a - \rho_1)gh_1 = s_1 Q_1^2 + s_5 Q_5^2 + s_3 Q_3^2 \quad (31)$$

$$(\rho_a - \rho_2)gh_2 = s_2 Q_2^2 + s_3 Q_3^2 + s_5 Q_5^2 \quad (32)$$

$$P_w = s_3 Q_3^2 + s_4 Q_4^2 \quad (33)$$

$$E = \rho_1 (Q_1 + Q_2) c_p (T_1 - T_a) \quad (34)$$

$$\rho_a Q_3 = \rho_a (Q_4 + Q_5) \quad (35)$$

$$\rho_a Q_5 = \rho_1 (Q_1 + Q_2) \quad (36)$$

$$\rho_a T_a = \rho_1 T_1 \quad (37)$$

$$\rho_1 = \rho_2 \quad (38)$$

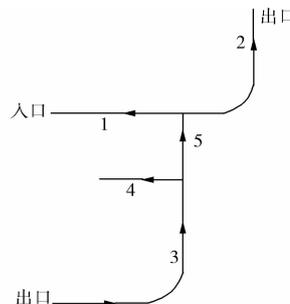


图 6 情形 4 的排烟、补风路径

Fig. 6 The smoke exhaust and air supply route of scenario 4

5)情形 5 如图 7 所示,其控制方程为

$$(\rho_a - \rho_2)gh_2 = s_1Q_1^2 + s_2Q_2^2 \quad (39)$$

$$P_w = s_1Q_1^2 + s_5Q_5^2 + s_4Q_4^2 \quad (40)$$

$$P_w = s_3Q_3^2 + s_4Q_4^2 \quad (41)$$

$$\rho_aQ_1 = \rho_2(Q_2 + Q_5) \quad (42)$$

$$E = \rho_2(Q_2 + Q_5)c_p(T_2 - T_a) \quad (43)$$

$$\rho_aQ_3 + \rho_2Q_5 = \rho_4Q_4 \quad (44)$$

$$\rho_aT_a = \rho_2T_2 = \rho_4T_4 \quad (45)$$

$$\rho_aQ_3c_pT_a + \rho_2Q_5c_pT_2 = \rho_4Q_4c_pT_4 \quad (46)$$

$$P_w = s_3Q_3^2 + s_4Q_4^2 \quad (49)$$

$$\rho_aQ_3 = \rho_a(Q_4 + Q_5) \quad (50)$$

$$E = \rho_2Q_2c_p(T_2 - T_a) \quad (51)$$

$$\rho_2Q_2 = \rho_aQ_5 + \rho_aQ_1 \quad (52)$$

$$\rho_aT_a = \rho_2T_2 \quad (53)$$

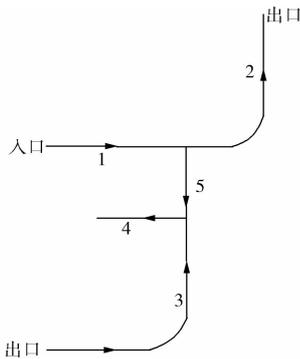


图 7 情形 5 的排烟、补风路径

Fig. 7 The smoke exhaust and air supply route of scenario 5

6)情形 6 中如图 8 所示,其控制方程为

$$(\rho_a - \rho_2)gh_2 = s_1Q_1^2 + s_2Q_2^2 \quad (47)$$

$$(\rho_a - \rho_2)gh_2 = s_2Q_2^2 + s_3Q_3^2 + s_5Q_5^2 \quad (48)$$

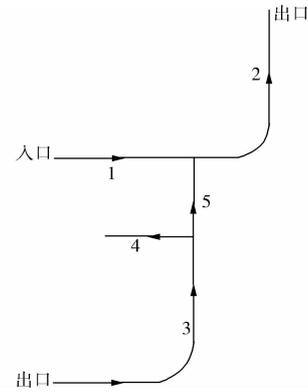


图 8 情形 6 的排烟、补风路径

Fig. 8 The smoke exhaust and air supply route of scenario 6

2.2 求解结果及分析

通过数值迭代方法对各情形的流量分配进行求解,所得的结果如表 3 所示。当流量为负时,代表流向与假定流向相反,此时解不存在。情形 1、情形 2、情形 4 与情形 5 存在解,其对应的风机工况点如表 3 所示。

表 3 各情形对应的体积流量分配情况及解的存在性

Table 3 Volume flow rate of the key branches in each scenario and the existence of the solution

情形	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_{12}	P_w	存在性
1	32.82	28.77	43.25	114.70	71.45	164.29	是
2	40.48	76.06	68.60	114.04	45.44	175.47	是
3	44.11	72.65	71.55	109.94	-38.40	242.16	否
4	26.95	2.82	128.89	108.98	19.91	257.09	是
5	79.70	38.71	63.30	114.15	50.85	173.71	是
6	83.48	55.90	72.50	109.93	-37.44	242.33	否

由此可见,将选定的风机开启以后,多分支隧道内的气流组织模式存在多解性,这导致实际气流路径可能与设计气流路径不同。其中,情形 2 和情形 4 中烟气流向与车行方向相逆,是应当避免的气流组织模式。

为此,讨论风机选型对气流组织模式不确定性的影响。若采用 2 台 NXT-17No18A/36 轴流风机进行并联排烟(风机的参数见表 2),其特性曲线可表示为:

$$p = -0.10044Q^2 + 18.845Q - 104.66 \quad (54)$$

将式(54)分别与情形 1 至情形 6 的控制方程组联立求解,发现只有情形 1 的解存在,其结果为:

$Q_1 = 47.45, Q_2 = 41.60, Q_3 = 61.72, Q_4 = 160.62, Q_{12} = 98.90, P_w = 330.93$ 。这说明改变轴流风机的选型可以有效抑制排烟气流组织的不确定性。

3 结论

排烟气流的不确定性是在防排烟设计中应该避免的问题。在多分支隧道中,结构的高差引起的热压与风机动力可能形成竞争,进而造成气流路径及流量的多解性及不确定性。鉴于排烟气流不确定性对人员疏散与消防救援造成的威胁,对其影响因素应予以充分重视。隧道分支的数量、热压的强度、风机选型与隧道阻力特性被认为是造成隧道气流不确

定性的主要因素。

针对某多分支隧道,通过理论分析证明,风机动力与热压共同作用下会造成多分支隧道排烟气流状态呈现多个可能性,并使得实际风机工况点偏离原设计工况点。研究还发现,通过改变风机选型可以有效减少气流组织数学解的个数,从而抑制排烟气流的不确定性。

参考文献:

- [1] 王文卿. 城市地下空间规划与设计[M]. 南京:东南大学出版社,2000.
- [2] 袁廷朋,姚坚. 国内外地下车行环路工程建设案例与启示[J]. 上海建设科技,2011(5):10-13.
Yuan T P, Yao J. The cases and enlightenment of underground garage loop construction at home and abroad [J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2011 (5):10-13. (in Chinese)
- [3] Ji J, Gao Z H, Fan C G, et al. Large Eddy Simulation of stack effect on natural smoke exhausting effect in urban road tunnel fires [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66: 531-542.
- [4] Ji J, Han J Y, Fan C G, et al. Influence of cross-sectional area and aspect ratio of shaft on natural ventilation in urban road tunnel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 67: 420-431.
- [5] Yang D, Huo R, Zhang X, et al. Comparative study on carbon monoxide stratification and thermal stratification in a horizontal channel fire [J]. Building and Environment, 2012, 49: 1-8.
- [6] Yang D, Huo R, Zhang X, et al. On the front velocity of buoyancy-driven transient ceiling jet in a horizontal corridor; Comparison of correlations with measurements [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31: 2992-2999.
- [7] 华高英. 城市地下交通联系隧道性能化防火设计研究[D]. 北京:北京工业大学,2009.
- [8] 姜学鹏,庄炜茜,赵红莉,等. 通风竖井在地下联系通道通风系统中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(6):1227-1231.
Jiang X P, Zhuang W Q, Zhao H L, et al. The application of ventilation shaft in the underground passageway ventilation system [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6): 1227-1231. (in Chinese)
- [9] Li Y, Delsante A. Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces [J]. Building and Environment, 2001, 36: 59-71.
- [10] Gladstone C, Woods A W. On buoyancy-driven natural ventilation of a room with a heated floor [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 441: 293-314.
- [11] Heiselberg P, Li Y, Andersen A, et al. Experimental and CFD evidence of multiple solutions in a naturally ventilated building [J]. Indoor Air, 2004, 14: 43-54.
- [12] Gong J, Li Y G. Smoke flow bifurcation due to opposing buoyancy in two horizontally connected compartments [J]. Fire Safety Journal, 2013, 59: 62-75.
- [13] Chenvidyakarn T, Woods A W. Multiple steady states in stack ventilation [J]. Building and Environment, 2005, 40: 399-410.
- [14] 王晓东,邓启红. 两区域自然通风多解性研究[J]. 建筑热能通风空调,2007,26(5):15-19.
Wang X D, Deng Q H. Study on the multiple solutions of two regional natural ventilation [J]. Building Energy & Environment, 2007, 26(5): 15-19. (in Chinese)
- [15] 阳丽娜. 建筑自然通风的多解现象与潜力分析[D]. 湖南:湖南大学,2005.
- [16] 余后从,郭修纪. 地下交通环廊通风排烟实验研究[J]. 消防科学与技术,2012,31(9):922-925.
Yu H C, Guo X J. Experimental study on the underground ring-shaped building ventilation [J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(9): 922-925. (in Chinese)
- [17] NFPA 92—B2000 Guide for smoke management systems in Malls, Atria, and Large Areas [S].
- [18] PIARC. Fire and smoke control in road tunnels [R]. Paris, 1999.
- [19] Wu Y, Bakar M. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity [J]. Fire Safety Journal, 2000, 35(4): 363-390.
- [20] 中华人民共和国交通部. JTJ 026. 1—1999 公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [21] 贾进章,周西华,刘剑. 风机特性曲线数据拟合最佳次数的确定[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2000,19(5):478-480.
Jia J Z, Zhou X H, Liu J. Fitting the fan characteristic curve data to determine the optimum number [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2000, 19(5): 478-480. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)