

不同集中排烟量对隧道火灾烟气控制效果的影响

姜学鹏^{1,2}, 张阳树¹, 徐志胜¹, 魏东²

1. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075
2. 中国人民武装警察部队学院; 灭火救援技术公安部重点实验室, 河北廊坊 065000

摘要 以钱江水下盾构隧道为研究对象, 采用 FDS 5.0 对双向均衡排烟模式和 50MW 火灾规模下、10 个不同集中排烟量对隧道火灾烟气控制效果的影响进行模拟计算。对比分析不同集中排烟量下, 隧道内排烟阀处竖向排烟风速、排烟阀及排烟风机口处温度、排烟效率、行车道 2m 高度处能见度、烟气蔓延范围的变化情况。模拟分析表明, 集中排烟量对排烟效果影响很大。当排烟量为 190m³/s 时, 可达到较好的隧道火灾烟气控制效果。

关键词 安全工程; 公路盾构隧道; 集中排烟系统; 排烟量; 烟控效果

中图分类号 U453.5

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.15.005

Effect of Different Exhaust Rates on Fire Smoke Control in a Shield Tunnel

JIANG Xuepeng^{1,2}, ZHANG Yangshu¹, XU Zhisheng¹, WEI Dong²

1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China
2. Ministry of Public Security Key Laboratory of Fire Fighting and Rescuing Technology, Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang 065000, Hebei Province, China

Abstract Taking Qianjiang shield tunnel as the research object and based on the CFD simulation method, a large eddy simulation analysis software FDS is adopted to simulate and analyze the effect of exhaust rate on fire smoke control under the condition of the same heat release rate of 50MW and exhaust ports in a road tunnel. Ten different exhaust rates are simulated under the mode of bidirectional equilibrium smoke extraction. Comparative analysis are made on smoke flow velocity in exhaust ports, temperature at exhaust ports and exhaust fans, smoke exhaust efficiency, visibility distributions at two meters high of road, and smoke spread distance, when smoke exhaust rates are different. The results show that different smoke exhaust rates have great influence on smoke exhaust effect. The simulation results show that smoke flow velocities in exhaust ports are less than 10m/s, temperature at exhaust fans are less than 280°C, and visibility distributions at two meters high of road are more than 10m, which satisfy requirements of the design code. When the smoke exhaust rate are greater than or equal to 190m³/s, the temperature at exhaust ports is less than 280°C, smoke exhaust efficiency could reach at 100% and fire smoke is limited in the section of the opened exhaust ports. It is indicated that a quite good smoke control effect could be achieved. The results could provide some reference to design institutes for selecting exhaust fan.

Keywords safety engineering; road shield tunnel; central smoke extraction system; exhaust rate; smoke control effect

0 引言

公路隧道集中排烟系统可将火灾烟气经独立排烟道集中排出, 实现烟气与人员的有效分隔, 其工程应用日益广泛^[1-4]。

隧道集中排烟系统多在端部设排烟竖井, 火灾时利用竖井轴流风机诱导排烟道内空气流动, 进而在打开的排烟阀处形成竖向排烟风流, 将行车空间内的火灾烟气从排烟阀处吸入排

收稿日期: 2012-03-07; 修回日期: 2012-04-09

基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2010H01); 灭火救援技术公安部重点实验室开放课题(KF2011003); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011QNZT109)

作者简介: 姜学鹏, 讲师, 研究方向为火灾烟气流动与控制研究, 电子信箱: jxp5276@126.com

烟道经竖井排出。显然,隧道集中排烟系统的机械排烟量对控制烟气在隧道内流动起着关键作用,其烟气控制效果主要通过排烟阀处的竖向排烟风流来实现。中国《建筑防排烟技术规程》(DGJ 08—88—2006)、《建筑设计防火规范》(GB 50016—2006)规定:排烟口的风速不宜大于 10m/s。

目前,相关研究多为排烟速率对单个排烟阀(口)处机械排烟效果的影响^[5-7],针对隧道集中排烟模式下多点排烟的烟气控制效果研究尚不多见。本文以钱江盾构隧道为研究对象,采用 FDS 软件,对不同排烟量作用下的隧道火灾烟气控制效果的影响进行模拟对比分析。

1 算例设定

钱江盾构隧道长度为 3245m,内径 13.7m,行车空间净高 6.51m。隧道拱部设置排烟道,排烟阀间距为 60m,排烟阀形状为 4m×1.25m(横向×纵向)。图 1 为盾构隧道横断面图。

取 600m 长的隧道区段进行研究,竖井距端部 50m。隧道环境温度设为 20℃,隧道壁面光滑绝热,隧道行车道两端设为开放边界。火灾规模取为 50MW,火源设计为 10m×2.0m×0.11m(纵向×横向×竖向),位于中心线中点。火源前后各 160m 范围内采用 0.4m×0.4m×0.4m 的网格,其他区域为 1.0m×0.4m×0.4m。

以双向均衡排烟模式(图 2)来探讨集中排烟系统不同排烟量对烟气控制效果的影响。为对比分析不同排烟量的排烟效果,将各工况中隧道两端机械补风风速均设为 0m/s,火源功率设为 50MW,模拟时间为 600s。在隧道端部排烟竖井设定 10 个不同的排烟量,具体为 124.37,130,140,150,160,170,180,190,200,210m³/s。

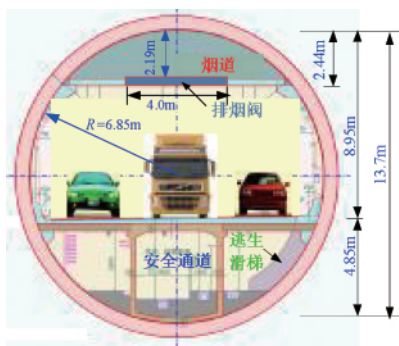
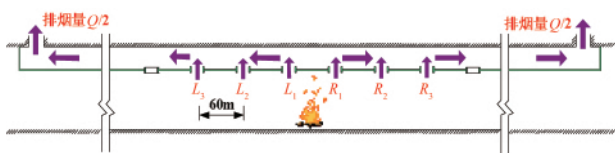


图 1 盾构隧道横断面

Fig. 1 Cross section of shield tunnel



*L₃、L₂、L₁、R₁、R₂、R₃ 为排烟阀

图 2 隧道双向均衡集中排烟模式示意

Fig.2 Bidirectional equilibrium central smoke extraction system in a tunnel

2 模拟结果与分析

2.1 排烟阀处竖向排烟风速

两端竖井排烟风机启动后,在排烟阀处引起竖向排烟风流,表 1 为各个排烟阀处的竖向排烟风速。

表 1 不同排烟量下排烟阀处竖向排烟风速

Table 1 Smoke flow velocities in exhaust ports with different smoke exhaust rates

排烟量 Q $/(m^3 \cdot s^{-1})$	各开启排烟阀流速 $/(m \cdot s^{-1})$					
	L_3	L_2	L_1	R_1	R_2	R_3
124.37	3.74	4.37	6.19	6.20	4.39	3.79
130	3.98	4.60	6.29	6.31	4.60	3.97
140	4.37	4.88	6.44	6.45	4.89	4.36
150	4.77	5.19	6.63	6.63	5.18	4.75
160	5.14	5.43	6.83	6.82	5.44	5.17
170	5.54	5.69	7.04	7.03	5.69	5.54
180	5.96	5.95	7.22	7.18	5.90	5.89
190	6.31	6.18	7.42	7.42	6.18	6.30
200	6.68	6.42	7.58	7.62	6.45	6.66
210	7.10	6.72	7.79	7.78	6.74	7.12

(1)火源功率为 50MW 时,排烟量从 124.37m³/s 增大到 210m³/s 的过程中,各工况排烟阀处的最大竖向风速从 3.74m/s 增大到 7.12m/s,在 10m/s 以下,均满足规范要求。

(2)离火源最近的 2 个排烟阀(L₁、R₁)处的流速最大,且离火源越远排烟阀处的流速越小。这是由于顶隔板下方的气体在流动过程中,经过排烟阀时会发生分流,一部分烟气进入排烟道,一部分烟气继续沿隧道在顶隔板下方蔓延,在蔓延过程中烟气的温度不断衰减,使其体积流量逐渐减小,因此离火源越远排烟阀处的流速越小。

(3)随着排烟量的增大,离火源最近的 2 个排烟阀处的流速逐渐增大,当排烟量达到 190m³/s 时,离火源最近的 2 个排烟阀(L₃、R₃)处的流速已大于中间的 2 个排烟阀(L₂、R₂)处的流速。这是由于随着排烟量的增大,从隧道两端进入的新风量增加,与烟气在离火源最近的 2 个排烟阀形成汇流进入排烟道,导致该排烟阀处的流速逐渐增大。

2.2 排烟阀及排烟风机口处温度

火源功率为 50MW 的双向均衡集中排烟模式下,不同排烟量下排烟阀及排烟风机入口处温度分布模拟结果见表 2。

(1)双向排烟情况下,排烟阀处温度基本呈对称分布,距离火源最近的 2 个排烟阀受火羽流影响温度最高,向两侧排烟阀处温度迅速降低。这是由于火灾烟气在两侧排烟风机的抽吸作用下,最先从离火源最近的 2 个排烟阀进入排烟道,在隧道壁面及卷吸的冷空气的冷却作用下稳定逐渐降低,所以拱顶下方温度在离火源最近的排烟阀处最高。

(2)各排烟阀和排烟风机口的温度,大致呈现出随排烟量的增大而逐渐降低的变化趋势,以火源两侧最近的 2 个排烟阀(L₁、R₁)处温度随排烟量的增大而衰减的最为明显。随着

表 2 不同排烟量下排烟阀及排烟风机口处温度

Table 2 Temperatures of exhaust ports and exhaust fans with different exhaust rates

排烟量 Q $/(m^3 \cdot s^{-1})$	各开启排烟阀温度/ $^{\circ}C$						排烟风机口温度/ $^{\circ}C$	
	L_3	L_2	L_1	R_1	R_2	R_3	左侧	右侧
124.37	76.6	130.7	315.1	313.4	131.8	76.9	52.0	53.0
130	76.1	128.3	308.6	316.1	129.7	76.6	51.8	52.5
140	73.8	122.3	306.7	304.7	122.4	73.9	52.1	51.5
150	71.4	119.7	299.4	300.3	120.2	72.5	51.5	50.3
160	67.5	115.1	295.1	298.4	114.4	67.8	50.2	50.7
170	64.0	110.5	287.8	287.1	111.2	61.6	49.8	50.1
180	54.6	107.3	282.0	285.1	103.4	56.2	49.8	48.3
190	54.7	99.8	274.8	278.8	101.6	53.0	48.6	47.7
200	46.6	93.7	270.4	273.9	97.4	47.7	46.8	47.6
210	45.6	88.7	268.5	270.8	89.2	43.9	46.4	46.4

排烟量的增大,一方面,烟气到达离火源最近的排烟阀处的速度加快,烟气与冷空气的强迫对流传热加剧,使烟气温度降低;另一方面,排烟量增大后从排烟阀处进入排烟道的冷空气流量增大,这使得拱顶下方的最高温度降低。在两方面因素共同作用下,50MW 时排烟阀处的最高温度,随着排烟量的增大呈现出降低的变化规律。

(3) 当排烟量 $<190m^3/s$ 时,排烟阀 L_1 和排烟阀 R_1 处的温度最高在 $285\text{—}315^{\circ}C$ 范围内;排烟量 $\geq 190m^3/s$ 时,各排烟阀处的最高温度均在 $280^{\circ}C$ 以下;说明当排烟量 $<190m^3/s$ 时,离火源最近的2个排烟阀可能会损坏。《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)规定:排烟阀在 $280^{\circ}C$ 时应能自动关闭,从不损坏排烟阀的角度来看,排烟量不宜小于 $190m^3/s$ 。

(4) 《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)规定:排烟风机必须能在 $250^{\circ}C$ 环境条件下连续正常运行不小于1.0h。各工况下排烟风机入口的温度已降至 $53^{\circ}C$ 以下,远低于 $250^{\circ}C$,且工况下排烟风机入口的温度波动不大,这一温度范围不会影响排烟风机的连续正常工作。

2.3 排烟效率

应用排烟阀排烟效率计算模型^[9],对不同排烟量下双向均衡排烟工况的排烟阀排烟效率进行计算,得到各个工况每个排烟阀的排烟效率与总的排烟效率,结果如表3所示。

(1) 双向排烟情况下,排烟阀排烟效率基本呈对称分布,距离火源最近的2个排烟阀排烟效率最高,距离风机最近的2个排烟阀排烟效率最低。

(2) 火源两侧各排烟阀处的排烟效率,随排烟量的变化曲线呈现离火源越近的排烟阀处的排烟效率波动越小;离火源最远的2个排烟阀处的排烟效率,随排烟量的增大呈现先增大后减小的变化趋势。这是由于随着排烟量的增大,烟气在顶隔板下方流动加强,从离火源最远的排烟阀处排出的烟气量增大;同时,从隧道两端洞口流入的空气量也随之增大,从离火源最远的排烟阀处排出的空气量也增大,在这两方面因素共同作用下,离火源最远的2个排烟阀处的排烟效率,

表 3 不同排烟量下排烟阀排烟效率

Table 3 Smoke extraction efficiencies with different exhaust rates

排烟量 Q $/m^3 \cdot s^{-1}$	各开启排烟阀排烟效率/%						合计
	L_3	L_2	L_1	R_1	R_2	R_3	
124.37	9.80	12.6	20.7	19.9	13.0	9.80	85.8
130	10.3	13.3	20.2	20.6	13.4	10.3	88.1
140	10.7	13.5	20.4	20.5	13.7	10.7	89.5
150	11.4	14.2	20.7	20.9	14.2	11.3	92.7
160	11.8	14.5	21.2	21.1	14.5	11.9	95.0
170	12.3	14.8	21.6	21.4	14.8	12.2	97.1
180	12.9	15.4	22.1	21.7	15.0	12.8	99.9
190	13.2	15.1	21.6	21.9	15.2	13.0	100
200	12.7	15.2	21.6	22.3	15.3	12.9	100
210	12.8	15.1	22.0	22.1	15.2	12.8	100

随排烟量的增大呈现先增大后减小的变化趋势。

(3) 50MW 火灾下,当排烟量达到 $190m^3/s$ 时,各排烟阀排烟效率总和可达到100%,几乎可将火灾产生的烟气量全部排出。继续增加排烟量,则只是增大了冷空气的排出量,降低了风机的工作效率。因此,从排烟系统的排烟效率模拟结果看,不宜小于 $190m^3/s$ 。

2.4 行车道 2m 高度处的能见度

图3为烟气稳定后,隧道内行车道上方2m高度处的能见度随火源距离变化的曲线图。

由火源功率为50MW时,不同排烟量下烟气稳定后,行车道2m高度处能见度随距离变化曲线可知:

(1) 双向均衡排烟下,2m高度处能见度以火源为中心呈对称分布,从火源向两边,排烟阀打开段内随着烟气温度下降,烟气层不断沉降,2m高度处能见度逐渐下降;排烟阀打开段外2m高度处能见度又逐渐上升,说明烟气基本被控制在排烟阀打开段内。

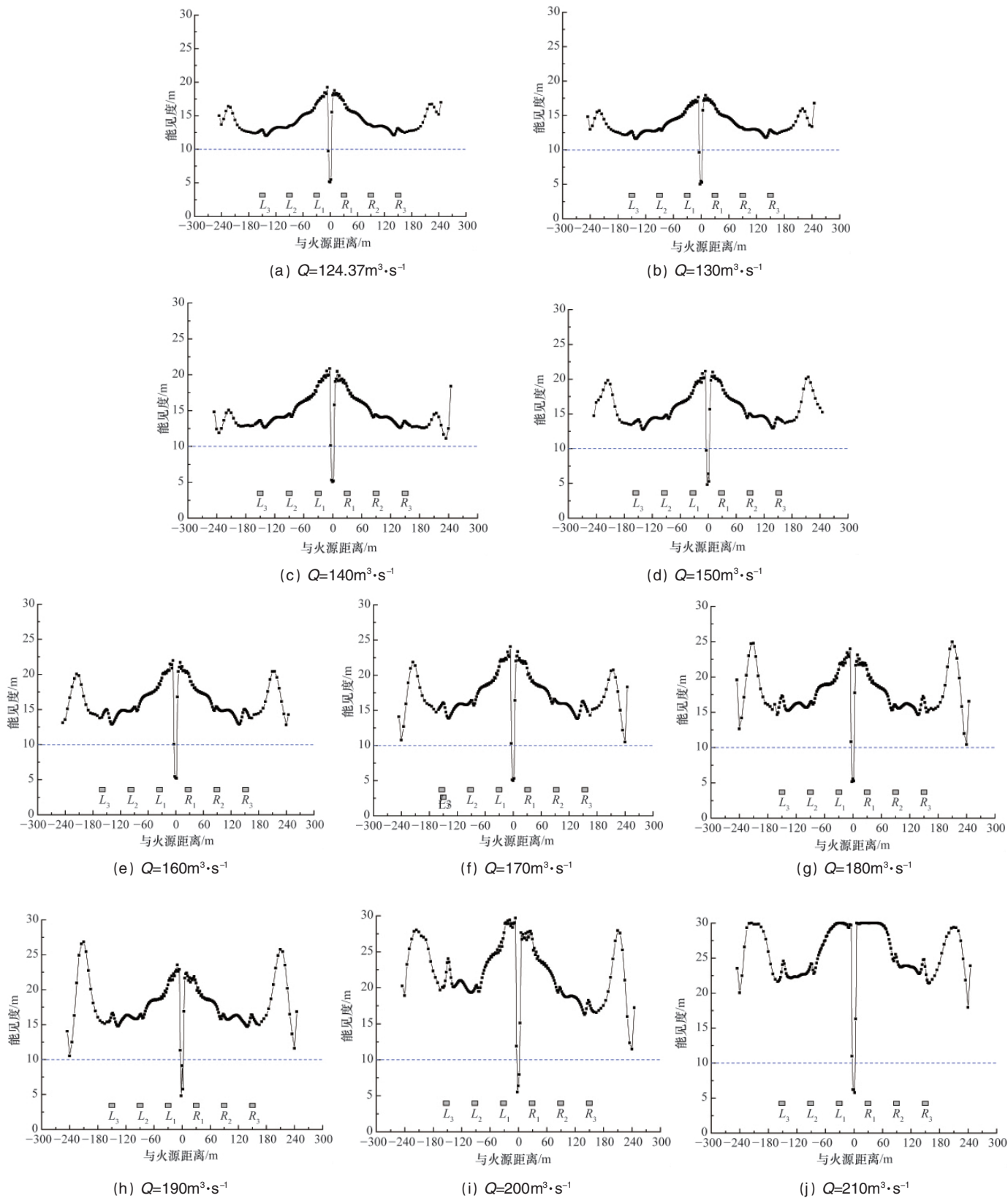


图3 不同排烟量下行车道上方2m高度处能见度分布

Fig. 3 Visibility distributions at 2m high of road with different exhaust rates

(2) 各工况只有火源附近6—10m范围能见度低于10m, 沿纵向两侧距火源10m范围外能见度均高于10m, 表

明隧道两端无机械补风时行车空间烟气分层效果较好。

(3) 竖井集中排烟诱发空气从两端隧道口流入, 并将部

分经竖井排出的烟气重新带入隧道内,形成“短路效应”造成接近隧道出入口处 2m 高处的能见度较低,该部分烟气在自身浮力作用下逐渐向隧道顶部流动,2m 高处的能见度又逐渐升高。

(4) 随排烟量增大,隧道内沿程各点 2m 高度处的能见度逐渐增大。因此,单从 2m 高度处的能见度看,排烟量越大越好,但成本会随之增加,而且由于各工况下除火源附近 6—

10m 以外能见度都大于 10m,当排烟量不小于将火灾烟气控制在 2m 以上所需的排烟量(124.37m³/s)时,2m 高度处的能见度均能满足人员安全的要求。

2.5 烟气蔓延范围

通过对火源功率为 50MW 时的工况进行数值模拟,得到烟气稳定后隧道内火灾烟气向火源两侧的蔓延距离(以某处温度达到 60℃为判据)(表 4)。

表 4 不同排烟量下烟气蔓延距离

Table 4 Smoke spread distances with different exhaust rates

排烟量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	124.37	130	140	150	160	170	180	190	200	210
蔓延范围/m	364	361	344	332	300	300	298	298	298	298

由不同排烟量下双向均衡排烟时火灾烟气蔓延范围看,随排烟量增大,火灾烟气蔓延范围逐渐缩小;当排烟量小于 160m³/s 时,火灾烟气蔓延范围大于 300m;当排烟量增至 160m³/s 时,火灾烟气蔓延范围基本维持在 296—300m。即火灾烟气被限制在排烟阀打开段内,可有效保障人员的疏散安全。

3 结论

以某盾构隧道为研究对象,通过 CFD 模拟的方法,对双向均衡排烟下 50MW 火灾荷载、10 个不同排烟量对隧道内烟气的控制效果进行了模拟。模拟结果表明:

(1) 排烟量从 124.37m³/s 增大到 210m³/s 的过程中,各工况的排烟阀内气体流速最大值均低于规范要求的 10m/s。

(2) 各排烟阀和排烟风机口的温度,大致呈现出随排烟量增大而逐渐降低的变化趋势。仅当排烟量 < 190m³/s 时,排烟阀 L₁ 和 R₁ 处的温度最高超过 280℃,表明这 2 个排烟阀可能会损坏。从 not 损坏排烟阀的角度看,排烟量宜 ≥ 190m³/s。各工况下排烟风机入口的温度已降至 53℃以下,不会影响排烟风机的连续正常工作。

(3) 排烟效率随排烟量的变化,呈现离火源越近的排烟阀处的排烟效率波动越小;离火源最远的 2 个排烟阀处的排烟效率,随排烟量的增大呈现出先增大后减小的变化趋势。当排烟量 ≥ 190m³/s 时,各排烟阀排烟效率总和可达 100%,即几乎可将火灾产生的烟气量全部排出。

(4) 随着排烟量的增大,隧道内沿程各点 2m 高度处的能见度逐渐增大。且各工况下除火源附近 6—10m 以外能见度都大于 10m,2m 高度处的能见度均能满足人员安全的要求。

(5) 随着排烟量的增大,火灾烟气蔓延范围逐渐缩小;当排烟量增至 160m³/s 时,火灾烟气被控制在排烟阀打开段内(300m)。

参考文献 (References)

[1] Ingason H, Wickström U. The international forum of fire research directors: A position paper on future actions for improving road tunnel

fire safety[J]. *Fire Safety Journal*, 2006, 41(2): 111–114.

[2] Harvey N, Fuster T. Design fire heat release rate selection—impacts for road tunnels [C]. 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, May 13–15, 2009. New Brunswick, NJ, United States. 2009: 211–223.

[3] 邱豪磊,李宏彻,林坤沧,等.点排式通风系统在长隧道设计与防灾之应用[C].第八届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会,中国台北,2009—11—18—19.

Qiu Haolei, Li Hongche, Lin Kuncang, et al. Apply of point smoke extraction system in tunnel design and disaster prevention[C]. The eighth cross-strait tunnel and underground engineering academic and Technical Conference. Taipei, China, Nov 18—19, 2009.

[4] 吴德兴,李伟平,郑国平.国内外公路隧道火灾排烟设计理念比较[J].公路交通技术,2008,24(5):113–117.

Wu Dexing, Li Weiping, Zheng Guoping. *Technology of Highway and Transport*, 2008, 24(5): 113–117.

[5] Lougheed G D, Hadjisophocleous G V, McCartney C, et al. Large-scale physical model studies for an atrium smoke exhaust system [J]. *ASHRAE Transactions*, 1999, 105: 676–698.

[6] 钟委,纪杰,杨健鹏,等.地铁站内排烟口设置对排烟效果影响的实验和模拟研究[J].工程力学,2010,27(3):163–168.

Zhong Wei, Ji Jie, Yang Jianpeng, et al. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(3): 163–168.

[7] 史聪灵,李元洲,霍然.室内火灾机械排烟效果的模型计算与实验研究[J].燃烧科学与技术,2003,9(6):546–550.

Shi Congling, Li Yuanzhou, Huo Ran. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2003, 9(6): 546–550.

[8] 刘琪,姜学鹏,赵红莉,等.基于多指标约束的隧道集中排烟量设计模型[J].安全与环境学报,2012,12(1):191–195

Liu Qi, Jiang Xuepeng, Zhao Hongli, et al. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(1): 191–195.

(责任编辑 陈广仁)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。