



移动扫码阅读

田向亮,钟茂华,刘 畅,等.不同阻塞条件下的隧道火灾全尺寸试验研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2): 93-101. doi: 10. 13199/j. cnki. cst. 2021. 02. 012

TIAN Xiangliang, ZHONG Maohua, LIU Chang, et al. Experimental study on safety full-scale of tunnel fire disaster under different blocking conditions [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (2) : 93 - 101. doi: 10. 13199/ j. cnki. cst. 2021. 02. 012

不同阻塞条件下的隧道火灾全尺寸试验研究

田向亮^{1,2},钟茂华¹,刘 畅¹,李全明²

(1.清华大学 工程物理系公共安全研究院,北京 100084;2.中国安全生产科学研究院 矿山采空区灾害防治应急管理部重点实验室,北京 100012)

摘 要:为了研究阻塞条件下的隧道火灾危险性,选取某隧道网络中的某一支路作为火灾试验区,采用轴流风机通风,额定通风量为 $27 \text{ m}^3/\text{s}$,以甲醇池火为火源,火源功率分别为 0.25、0.50 和 1.00 MW。通过改变火源功率和隧道内风门的开闭模式开展全尺寸试验,分析火源横截面和隧道中心线垂直截面风速、隧道纵向拱顶温升、隧道中心面纵向温升等参数,研究了不同阻塞条件下的隧道火灾烟气扩散规律,获得了抑制隧道火灾危险性的风门控制模式。研究表明:①在隧道通风网络中,对称风流通过风门后,隧道截面距风门 22 m 处风速在整流作用下逐渐趋于均匀;②建立了考虑隧道阻塞比的隧道风量衰减模型,该模型可根据隧道阻塞比的变化预测隧道阻塞作用下的风量损失,同时可以计算沿程阻力损失的风量;③在自然通风条件下,当火源功率大于 0.50 MW 时,火灾烟气在火羽流作用下迅速向隧道拱顶浮动,通过对流换热使得拱顶温度急剧升高,对于隧道结构的稳定性具有巨大的破坏作用;可采用调节风门的方式控制通过起火区域的风量,从而优化隧道火灾危险控制模式,局部风速大小对火灾危险性影响不大;当起火区域风量不足时,人眼高度处的 1.8 m 高温升幅较大,不利于人员逃生与救援;④阻塞条件下隧道断面不对称进风流易造成风流结构紊乱,使得隧道火灾烟气温度分布不稳定,危险性较大。

关键词:阻塞;风门;隧道;火灾烟气;全尺寸试验

中图分类号:TD752

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)02-0093-10

Experimental study on safety full-scale of tunnel fire disaster under different blocking conditions

TIAN Xiangliang^{1,2}, ZHONG Maohua¹, LIU Chang¹, LI Quanming²

(1. Institute of Public Safety Research, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Mining Goaf Disaster Prevention and Control of Ministry of Emergency Management, China Academy of Safety Science & Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to study the fire risk of tunnel under blocking conditions, a branch of tunnel network was chosen as the experimental field. The axial flow fan was used for ventilation, and the rated ventilation rate was $27 \text{ m}^3/\text{s}$. Taking methanol pool fire as fire source, the heat release rate of fire source is 0.25, 0.50 and 1.00 MW respectively. The full-scale experiment was carried out by changing the heat release rate of fire source and the opening and closing mode of air door. The smoke diffusion law of tunnel fire under different blocking conditions was studied by analyzing the parameters of air speed profile of fire source cross section, air speed profile of vertical section in tunnel centerline, excess ceiling temperature along tunnel and excess temperature profile of vertical section in tunnel centerline. The air door control mode is obtained to suppress the fire risk of tunnel. The results show that: ① in tunnel ventilation network, the air speed gradually tends to be uniform on tunnel section (22 m away from the air door) by rectification after the symmetrical air flow passing through the air door. ② The air flow attenuation model of tunnel considering blocking ratio is proposed. The model can predict the air loss under the action of tunnel obstruction according to the change of tunnel blocking ratio, and can calculate the air volume loss along the road resistance loss. ③ Under the condition of natural ventilation, when the heat release rate of fire source is greater than 0.50 MW, the fire smoke will rise to the ceiling

收稿日期:2020-11-20;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51906123, 51674152)

作者简介:田向亮(1991—),男,江苏如皋人,助理研究员,博士。E-mail:xiangliangtian@foxmail.com

通讯作者:钟茂华(1970—),男,江西进贤人,研究员,博士生导师,博士。E-mail:mhzhong@tsinghua.edu.cn

of tunnel rapidly driven by the fire plume, and the ceiling temperature will rise sharply through heat convection, which will have a great damage to the stability of tunnel structure. The air volume through the fire area can be controlled by adjusting the air door, thus optimizing tunnel fire risk control mode. The local wind speed has little influence on the fire risk. When the air volume in the fire area is insufficient, the temperature rise at the eye height is large, which is not conducive to personnel escape and rescue. ④ Under the blocking condition, the asymmetric inlet air flow of tunnel section easily causes the air flow structure disorder, which makes the temperature distribution of tunnel fire smoke unstable and dangerous.

Key words: blocking; air door; tunnel; fire smoke; full-scale experiment

0 引言

在隧道中,车辆和各类构筑物均能对隧道产生阻塞作用,从而影响隧道风流结构。关于阻塞作用对隧道火灾的影响研究主要集中在车辆障碍物对烟气扩散规律和最高顶棚温度模型等方面,LI等^[1]通过模型试验研究了隧道内车辆障碍物对最高顶棚温度的影响;HU等^[2]提出了考虑障碍物与火源位置的距离的最高顶棚温度模型;TANG等^[3]进一步研究了障碍物与火源位置相邻情况下的最高顶棚温度变化规律;刘方等^[4]通过研究横截面系数对最高顶棚温度的影响,对 Kurioka 模型进行了验证,发现 Kurioka 提出的最高顶棚温度模型对于横截面系数 ≥ 1 的地铁区间隧道较为适用,对于断面系数 < 1 的工况适用性不强;杨宇轩等^[5]开展了含坡度隧道车辆阻塞下的全尺寸火灾试验研究,揭示了车辆阻塞条件下含坡度隧道的火灾烟气特性和运移扩散规律。TIAN等^[6]则研究了顶棚障碍物对隧道火灾烟气控制临界风速的影响,并基于虚拟火源提出了临界风速模型。风门是地下空间中最重要构筑物之一,风门的开闭模式可以改变隧道截面的阻塞比,从而达到隔绝隧道或限制通过隧道的风量的目的,确保需风地点的风量要求^[7-9]。关于风门调节的研究主要集中于对于通风网络风量调节、防治瓦斯突出等灾害方面^[10-12],火风压和节流效应也是目前的研究重点^[13-15]。通过风门调节改变隧道阻塞比研究隧道火灾危险性的研究较少,王凯等^[16-17]通过 FDS 模拟研究了远程控制风门的开闭对于隧道网络火灾烟气蔓延的影响。笔者基于调节风门的开闭模式来改变起火隧道的阻塞比,通过全尺寸试验分析不同工况下的风流结构和火灾危险性,提出通过改变风门的模式控制隧道火灾烟气扩散的有效方法。

1 试验方法

1.1 试验概况

试验在某试验基地火灾试验区完成。隧道通风

网络如图 1 所示,通过轴流风机排风调节通风网络风量,轴流风机额定风量为 $27.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。进入火灾试验区的风量可通过 1 号风门和 2 号风门调节,1 号风门和 2 号风门均为调节风门,其中 1 号风门为双向无压风门,2 号风门为双扇普通风门,2 号风门上设有风窗 A、风窗 B,通过控制风门和风窗的开闭可以调节进入火灾试验区的风量。火灾试验区试验段隧道直线长度为 32.0 m ,上半部分为直径 3.2 m 的半圆形,下半部分为长 3.2 m ,高 1.6 m 的矩形,不同火源功率条件下试验如图 2 所示。通过对火灾试验区隧道温度场的测量,研究了不同火源功率下,风门调节对隧道火灾烟气扩散的影响。

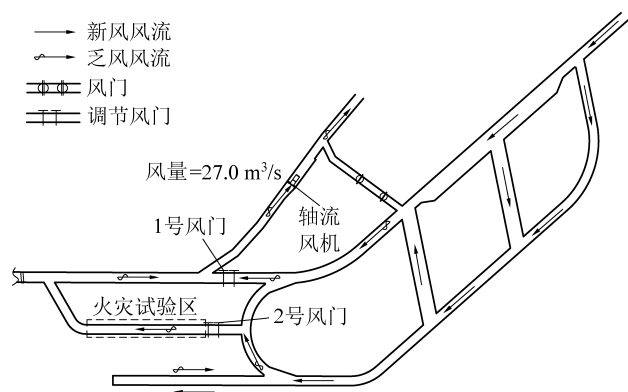


图1 隧道通风网络

Fig.1 Tunnel ventilation network

1.2 试验工况

试验共设置 18 种工况,具体工况见表 1。每种工况至少重复 3 次试验以确保试验数据的稳定性。试验使用甲醇作为燃料,通过改变底面积为 0.5 m^2 的铸铁油盘的个数来改变火源功率,甲醇燃料的初始厚度为 2 cm ,油盘上边缘距隧道地面高度为 0.25 m ,火源点位于距离 2 号风门 5.9 m 处,试验现场如图 2 所示。1 号风门和 2 号风门的位置如图 1 所示,其中 1 号风门的开启方式为开启和关闭 2 种,2 号风门的开启方式分为关闭,开启,风窗 A 开启、B 开启,风窗 A 开启、风窗 B 关闭等 4 种模式,如图 3 所示。

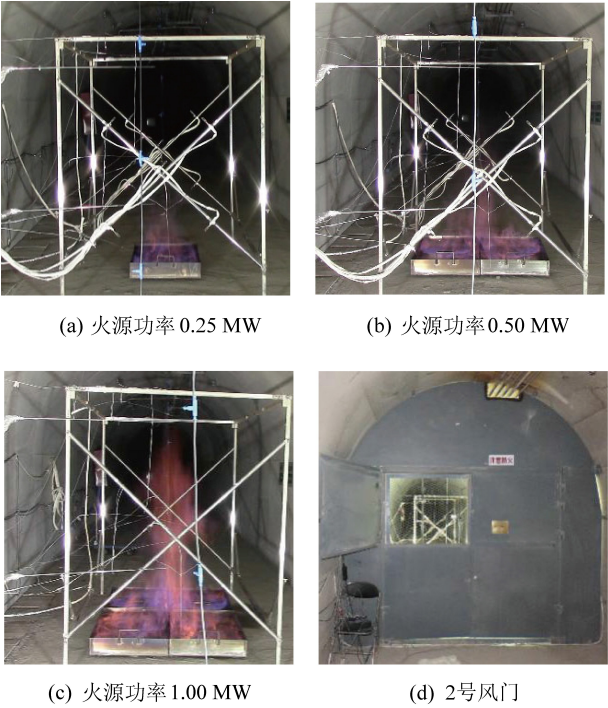


图 2 试验现场
Fig.2 Experiment scenes

表 1 隧道火灾试验工况

Table 1 Cases of experiments for tunnel fire

工况	火源功率/MW	风门开闭		2 号风门开闭		阻塞比
		1 号	2 号	风窗 A	风窗 B	
1	0.25	开	关	关	关	1.000
2	0.25	开	开	—	—	0.541
3	0.25	关	开	—	—	0.541
4	0.25	开	关	开	开	0.845
5	0.25	关	关	开	开	0.845
6	0.25	关	关	开	关	0.923
7	0.50	开	关	关	关	1.000
8	0.50	开	开	—	—	0.541
9	0.50	关	开	—	—	0.541
10	0.50	开	关	开	开	0.845
11	0.50	关	关	开	开	0.845
12	0.50	关	关	开	关	0.923
13	1.00	开	关	关	关	1.000
14	1.00	开	开	—	—	0.541
15	1.00	关	开	—	—	0.541
16	1.00	开	关	开	开	0.845
17	1.00	关	关	开	开	0.845
18	1.00	关	关	开	关	0.923

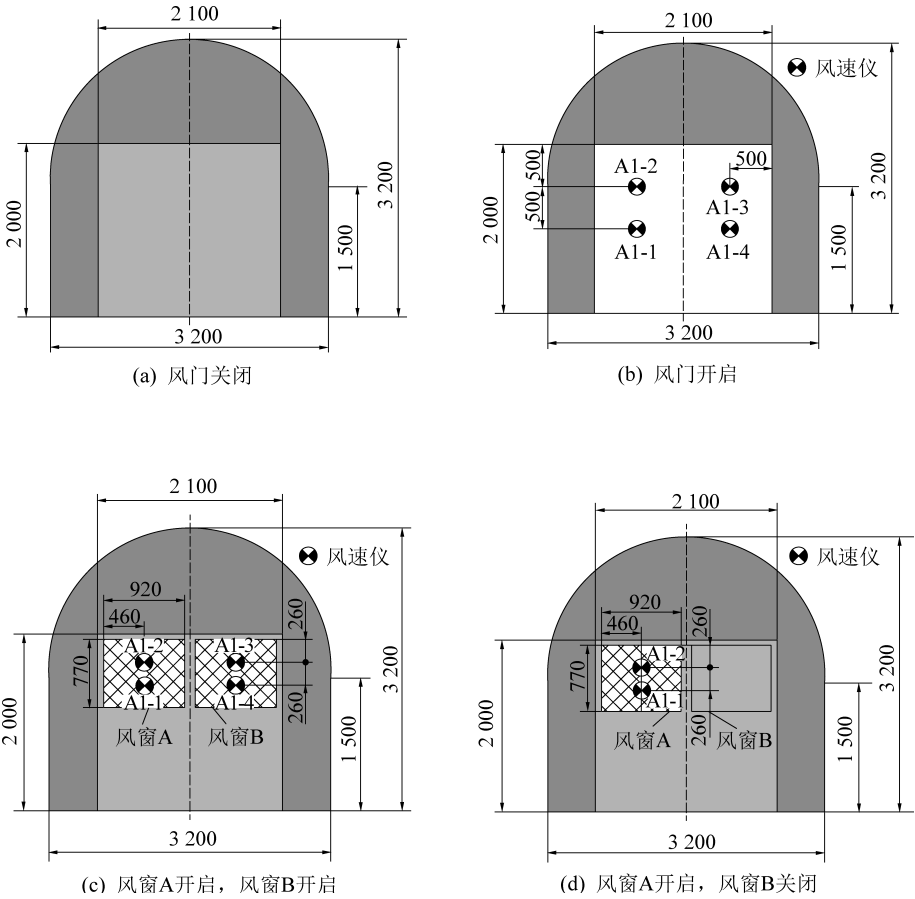


图 3 2 号风门的开闭方式
Fig.3 Open/close modes for No.2 air door

1.3 试验测点布置

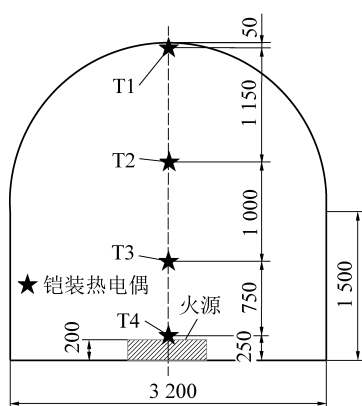
试验中对温度和风速2个特性参数进行了测量。关于温度测量,采用直径1 mm的K型铠装热电偶对火源附近温度较高区域温度进行了实时监测,测量火源区域温度,使用NI SCXI-1000数据记

录仪对热电偶数据进行采集,测点布置如图4、图5a所示。在远离火源区域,采用一线总线分布式测温系统测试隧道中心面纵向温度分布,测点布置如图4、图5b所示。

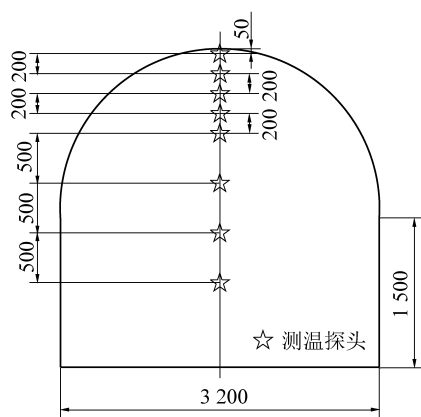


图4 温度测点布置

Fig.4 Planform of temperature measurement points



(a) 铠装热电偶



(b) 测温电缆

图5 温度测点布置截面

Fig.5 Sectional diagram of temperature measurement points

关于风速测量,一方面,为了获得更加稳定、准确的隧道截面风速,在试验前,对隧道各断面风速进行测量,试验采用加野多通道风速仪。如图6所示,将隧道截面平均分割为 $0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ 网格,采用23支风速探头对隧道断面风速实时测量,采集频率为1 Hz,采集2 min,在火灾试验区隧道内截面风速的测试间隔为1.5 m,如图7所示。另一方面,在试验过程中,对于2号风门的入口风速进行了实时测量,

测点如图3所示。风速值均为风速探头记录数据的平均值。

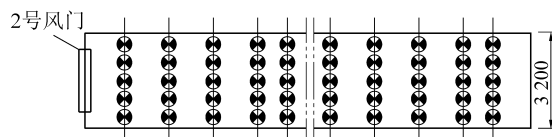


图7 风速测试截面

Fig.7 Planform of air speed measurement points

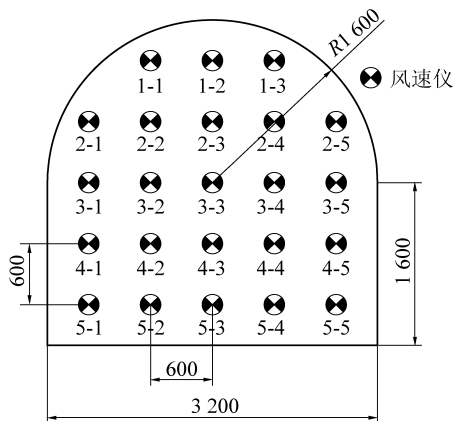


图6 风速测点布置截面

Fig.6 Sectional diagram of air speed measurement points

2 试验结果与讨论

2.1 隧道风流结构

2.1.1 隧道风速分布

风门的调节方式决定了进入火灾试验区的风量。各工况下通过2号风门的平均风速以及根据平均风速计算的风量,如图8所示。当1号风门开启和2号风门2个风窗同时开启时,通过风门的平均风速最小,而当1号风门开启条件下2号风门仅开启风窗A和风窗B工况下,进入火灾试验区的风量最小。当1号风门关闭而2号风门开启工况下,进入火灾试验区的风量最大,达到 $20.73\text{ m}^3/\text{s}$ 。当1号风门关闭而2号风门仅开启风窗A工况下,通过

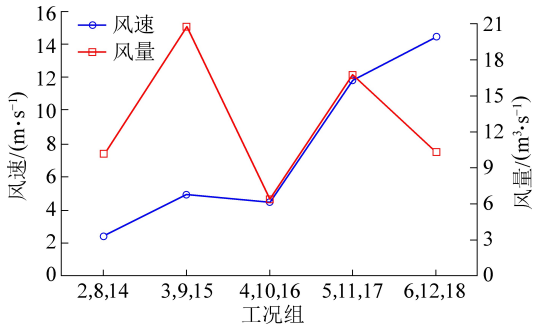


图 8 各工况下通过 2 号风门的风速、风量

Fig.8 Air speed and air quantity for No.2 air door

风窗 A 的局部风速最大,达到 14.44 m/s,但由于通风面积较小,因此进入火灾试验区的风量较小。

对于火源横截面和隧道中心线竖直截面风速分布以工况 2 和工况 6 为例,火源横截面风速分布和隧道中心线竖直截面风速分布如图 9、图 10 所示。

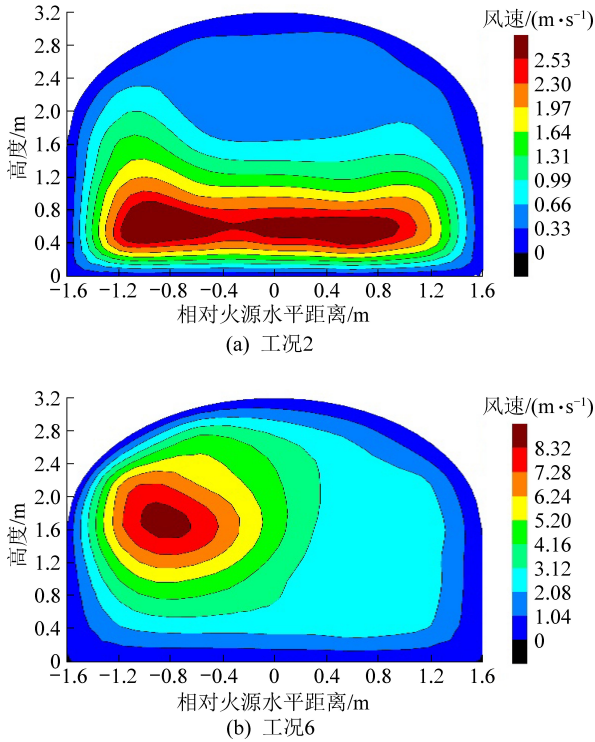


图 9 火源横截面风速分布

Fig.9 Air speed profile of fire source cross section

在火源横截面上,以火源为中心,火源右侧距火源距离为正,左侧为负。结合图 9 和图 10 可知,工况 2 中,火源横截面距离 2 号风门 5.9 m,在横截面上风速较为对称,且在竖直方向存在显著的梯度分布,通风风流在距离 2 号风门 22 m 以后,断面风速基本趋于稳定,风速为 0.93~1.16 m/s。对于工况 6,在 2 号风门仅开启风窗 B 条件下,由于只开启一扇风窗,火源横截面风流结构相对于隧道中心线不对称,隧道中心面纵向风速分布也较为紊乱,且无明显稳定截面。

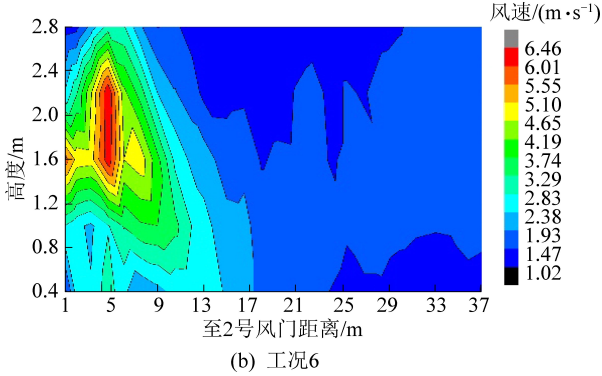
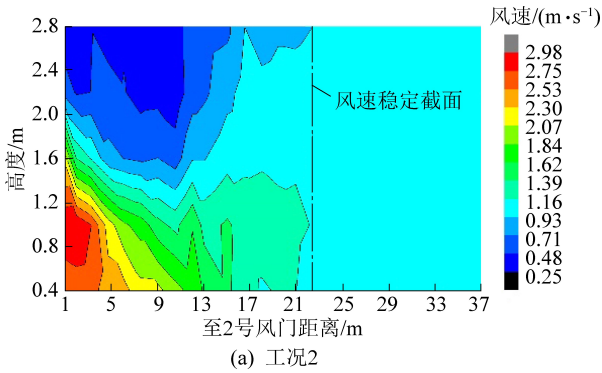


图 10 隧道中心线竖直截面风速分布

Fig.10 Air speed profile of vertical section along tunnel centerline

2.1.2 隧道风量衰减模型

结合图 1 和图 8 可知,当 1 号风门关闭时,乏风风流只从 2 号风门通过后经由通风口排出。工况 3、工况 5 和工况 6 通过 2 号风门的风量分别为 20.73、16.75 和 10.23 m³/s,上述工况对应的阻塞比为 0.541、0.845 和 0.923。

由此可知,随着阻塞比增大,隧道风流在受到风门的局部阻力影响下,风量不断衰减。考虑临界条件,当阻塞比为 1 时,风流无法通过,则风量为 0。风量随阻塞比的衰减如图 11 所示,通过数据拟合可以得到风量随阻塞比的衰减模型为

$$V = 21.2 - 0.001\,95 e^{-9.3r} \tag{1}$$

式中:V 为风量,m³/s;r 为阻塞比。

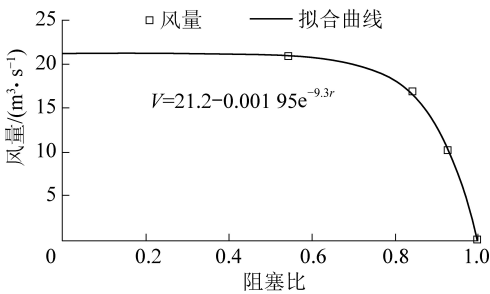


图 11 风量衰减模型

Fig.11 Air flow attenuation model

通过衰减模型可以计算,当阻塞比为 0 时,隧道

风量为 $21.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 而隧道风量轴流风机的额定风量 $27 \text{ m}^3/\text{s}$, 则风量在沿程阻力作用下损失的风量为 $5.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。综上所述, 该模型可根据隧道阻塞比的变化预测隧道阻塞作用下的风量损失, 同时可以计算沿程阻力损失的风量。

2.2 隧道温度分布

对于隧道温度分布, 最高拱顶温度和人眼高度处温度是判别火灾危险性的重要指标, 研究中的试验隧道衬砌为钢筋混凝土结构, 研究表明^[18], 当钢筋混凝土在高于 200°C 温度下持续 7 min 后, 内衬钢筋即开始破坏。人体对高温烟气的忍耐是有限的, 大量研究表明^[19-20], 65°C 为人体可短时间呼吸的极限烟气温度。若隧道初始温度记为常温 20°C , 则最高拱顶处和人眼高度处的临界温升分别为 180°C 和 45°C 。温升高于临界温升则具有较高危险性。温度取值均为稳定燃烧阶段温度的平均值。

2.2.1 自然通风工况

1) 隧道纵向拱顶温升。工况 1、工况 7 和工况 13 分别表示不同热释放速率下 2 号风门关闭的工况, 此 3 种工况下, 由于 2 号风门关闭, 风流无法进入火灾试验区, 形成了独头结构。图 12 为此 3 种工况下隧道纵向拱顶温度的温升, 以火源为中心。

以通风方向为正方向, 火源上风向至火源距离为负, 火源下风向至火源距离为正。当火源功率为 0.50 、 1.00 MW 时, 隧道拱顶温升高于 180°C , 根据拱顶温度衰减趋势可以看出, 当火源功率为 0.50 MW

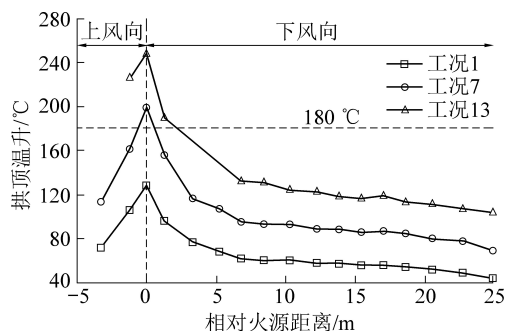


图 12 自然通风条件下隧道纵向拱顶温升

Fig.12 Excess ceiling temperature along tunnel under natural ventilation

时, 火源下风向 0.5 m 范围内隧道拱顶温升高于 180°C , 当火源功率为 1.00 MW 时, 该范围为 2 m 。此外, 由于 2 号风门关闭, 隧道一端形成堵头结构, 因此火源燃烧释放的热量会沿火源上风向大量蓄积, 从图 12 可以看出, 关于火源对称的拱顶温度测点上风向温度明显高于下风向温度。因此, 当火灾区域无通风作用, 则火灾烟气在火羽流作用下迅速向隧道拱顶浮动, 通过对流换热使得拱顶温度急剧升高, 对于隧道结构的稳定性具有巨大的破坏作用。

2) 隧道中心面纵向温升分布。此 3 种工况下隧道中心面纵向温度分布如图 13 所示, 随着火源增大, 隧道温度场温升显著增加; 对于人眼高度处 (1.8 m 高度) 温升, 当火源功率为 1.00 MW 时, 人眼高度处温升在沿隧道纵向方向为 45°C 左右, 对于人员逃生具有较高的危险性。

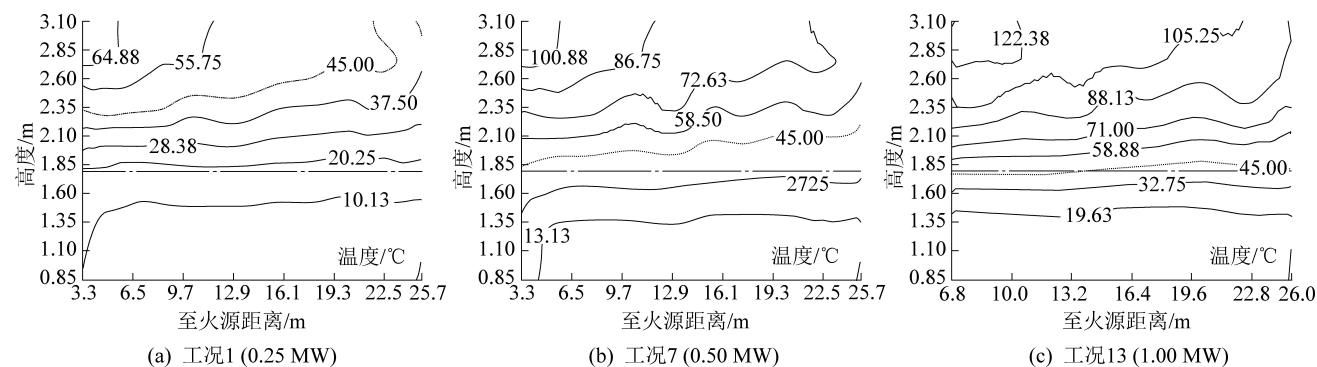


图 13 自然通风条件下隧道中心面纵向温升分布

Fig.13 Excess temperature profile of vertical section along tunnel centerline under natural ventilations

综合上述, 2 个特征温度的温升情况可以看出, 当火源功率高于 1.00 MW 时, 无论是隧道拱顶还是人眼高度处温度均高于危险温度。因此对于功率大于 1.00 MW 的火灾, 隧道内的火灾危险性较高, 对火灾区域进行机械通风对于降低火灾危险性尤为必要。

2.2.2 机械通风工况

根据试验数据对比发现, 对于不同功率火灾, 在风门的不同调节模式下其温度变化趋势基本相同, 且火源功率 1.00 MW 时火灾危险性最大, 因此笔者选取火源功率为 1.00 MW 的甲醇池火各工况分析机械通风条件下隧道纵向拱顶温升及隧道中心面纵

向温升分布。

1)隧道纵向拱顶温升。机械通风条件下隧道纵向拱顶温升(图14),可以看出,对于火源功率1.00 MW火灾,在机械通风作用下,各工况拱顶温升均低于180℃,说明机械通风对于降低隧道拱顶温度具有显著效果。对于通风对称的工况(工况14—工况17),火源下风向拱顶温度沿纵向方向先增高后降低,这是由于通风作用产生的切向力与火焰向上的浮升力共同作用使得火焰向下风向偏转,作用在火焰上的风速越大,向下风向偏转角度越大,最高拱顶温度位置距离火源距离越远,这与Kurioka模型^[21]是一致的。从隧道拱顶温度的蔓延规律可以看出,拱顶温度随纵向距离增大逐渐降低,在距火源17 m前降温梯度逐渐减小,在距火源17 m后降温梯度逐渐增大,这是由于拱顶风速的不稳定造成的,由图10可知,隧道截面风速在距离2号风门22 m后基本趋于一致,而在22 m之前,隧道拱顶风速则是沿纵向方向不断上升,在22 m后达到最大,因此,风速越大,通风作用对于烟气的降温作用越明显,因此在隧道拱顶风速达到最大值后,隧道拱顶温度下降梯度增大。对于工况18,由于通风风流不对称,在纵向方向上,拱顶温度几乎保持恒定,且对于拱顶的降温效果较好。

2)隧道中心面纵向温升分布。机械通风对于隧道中心面温度分布的影响(图15),对于通风风流对

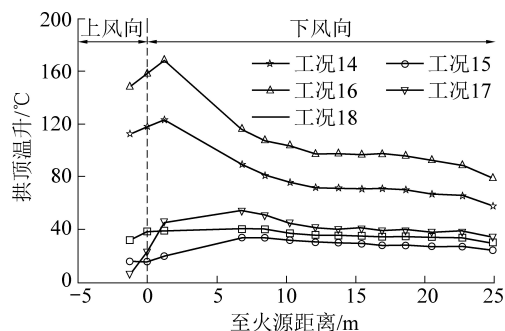


图14 机械通风条件下隧道纵向拱顶温升

Fig.14 Excess ceiling temperature along tunnel under mechanical ventilations

称的工况(工况14—工况17),隧道中心面纵向温度场在竖直方向上存在较为稳定分层,维持了较好的层化结构,但对于通风风流不对称的工况(工况18),隧道中心面纵向温度场呈现了完全不同的温度结构,这与不对称风流的不稳定性有关。从图中可以看出,当1号风门关闭,2号风门开启时(工况15),该工况下进入火灾试验区的风量最大,通风作用对于隧道的降温效果最佳。而当1号风门开启,2号风门开启风窗A和风窗B时(工况16),该工况下进入火灾试验区的风量最小,人眼高度处温升超过55℃,远高于临界温升,工况14(1号风门开启,2号风门开启)同样存在人眼高度处温升超过45℃的情况,上述2种工况下人眼高度处温升甚至

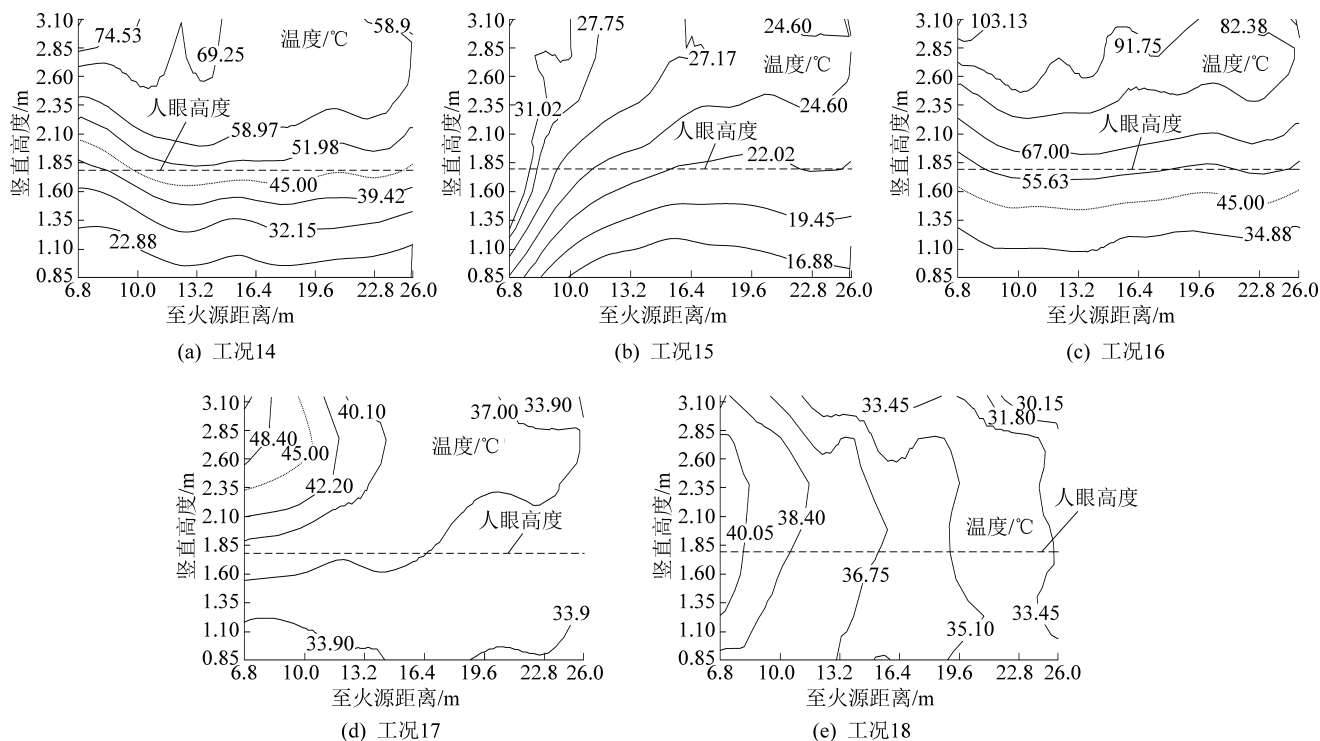


图15 机械通风条件下隧道中心面纵向温度分布(1.00 MW)

Fig.15 Excess temperature profile of vertical section along tunnel centerline under mechanical ventilations (1.00 MW)

超过自然通风工况,这对于人员逃生是极为危险的。这是由于纵向风流虽然在一定程度上降低了隧道温度场温度,但可能对热烟气层的稳定性造成一定程度的破坏,且由于通风切向力的作用,热烟气向下风向偏转,使得隧道下部温度升高,当热烟气对于人眼高度处的加热作用高于通风的散热作用时,人眼高度处温度会升高,因此提供更大的风量对于冷却隧道温度场尤为重要。

综合上述,2个特征温度的温升情况可以看出,通风作用对于降低拱顶温度效果显著;局部风速对于隧道温度场影响较小,当风量足够大时,对于隧道温度场的降温效果最优,一旦风量不足,通风作用下的风流强制对流作用无法有效冷却向下风向偏转的热烟气时,极易引起人眼高度处温度升高,不利于人员逃生与救援。因此在实际隧道火灾中,通过调节风门开闭模式,使得通过火灾试验区的风量达到最大能够有效的降低隧道危险性。同时,当进入火灾区域的风流不对称时,易造成隧道风流结构以及温度场不稳定,该模式不利于提高隧道的安全性。

3 结 论

1) 风门调节可以有效控制进入隧道的风速和风量,对称风流通过风门后,经过一段距离(22 m)的整流作用后在隧道截面上风速逐渐趋于均匀。隧道通风沿程阻力损失随阻塞比的增大不断增大,通过试验数据拟合获得了考虑隧道阻塞比的隧道风量衰减模型,该模型可根据隧道阻塞比的变化预测隧道阻塞作用下的风量损失,同时可以计算沿程阻力损失的风量。

2) 在自然通风条件下,当火源功率大于0.50 MW时,火灾烟气在火羽流作用下迅速向隧道拱顶浮动,拱顶温度急剧升高对于隧道结构的稳定性具有巨大的破坏作用。通风作用对于降低隧道拱顶温度和降低隧道温度场温度具有显著效果,但通风风量较小时,通风作用易引起人眼高度处温度升高,不利于人员逃生与救援。

3) 对于隧道火灾,局部风速的提高对于降低火灾危险性效果不显著,通过调节风门减小使得经过起火区域风量最大有助于提高隧道的安全性;不对称风流易造成风流结构的紊乱,使得隧道烟气温度分布不稳定。

参考文献(References):

[1] LI Liming, CHENG Xudong, CUI Yu, *et al.* Effect of blockage ratio on the maximum temperature under the ceiling in tunnel fires[J].

Journal of Fire Sciences, 2013, 31(3): 245-257.

- [2] HU Longhua, TANG Wei, CHEN Longfei, *et al.* A non-dimensional global correlation of maximum gas temperature beneath ceiling with different blockage-fire distance in a longitudinal ventilated tunnel[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 56(1/2): 77-82.
- [3] TANG Fei, CAO Zhilei, CHEN Qinpei, *et al.* Effect of blockage-heat source distance on maximum temperature of buoyancy-induced smoke flow beneath ceiling in a longitudinal ventilated tunnel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 683-688.
- [4] 刘 方, 翁庙成, 余龙星, 等. 地铁区间隧道顶部热烟气温度分布[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(2): 661-669.
LIU Fang, WENG Miaocheng, YU Longxing, *et al.* Smoke temperature distribution on the top of underground metro tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(2): 661-669.
- [5] 杨宇轩, 刘 畅, 仇培云, 等. 含坡度隧道车辆阻塞下全尺寸火灾试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(12): 1030-1038.
YANG Yuxuan, LIU Chang, QIU Peiyun, *et al.* Full-scale experimental study of a fire under a vehicle in a sloped tunnel[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2020, 60(12): 1030-1038.
- [6] TIAN Xiangliang, LIU Chang, ZHONG Maohua. Numerical and experimental study on the effects of a ceiling beam on the critical velocity of a tunnel fire based on virtual fire source[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 159: 106635.
- [7] 王二鹏, 刘 波, 郭文杰. 浅谈各种矿井风门的功能及应用[J]. 矿山机械, 2010, 38(19): 32-35.
WANG Erpeng, LIU Bo, GUO Wenjie. Discussion on function and application of various air doors in mines[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(19): 32-35.
- [8] 李志强, 王 宁, 邹 伟. 风门开启对通风网络风流非稳定影响的数值模拟分析[J]. 矿业安全与环保, 2011, 38(6): 79-81, 92.
LI Zhiqiang, WANG Ning, ZOU Wei. Numerical simulation analysis on unsteady influence of air door open on airflow of mine ventilation network[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2011, 38(6): 79-81, 92.
- [9] 黄光球, 陆秋琴. 地下矿通风系统风门对通风系统的影响研究[J]. 化工矿物与加工, 2014, 43(6): 23-27.
HUANG Guangqiu, LU Qiuqin. Influence of installment of ventilation doors on underground ventilation system[J]. Industrial Minerals & Processing, 2014, 43(6): 23-27.
- [10] 丁大同, 周玺柱, 王子邦, 等. 风门的合理配置与优化选择[J]. 煤矿安全, 2009, 40(9): 42-44.
DING Datong, ZHOU Xizhu, WANG Zibang, *et al.* Rational allocation and optimal selection of air door[J]. Safety in Coal Mines, 2009, 40(9): 42-44.
- [11] 幸大学. 煤与瓦斯突出矿井中反向风门的设置与管理[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(2): 77-79.
XING Daxue. Setting and management of reverse air door in coal and gas outburst mine[J]. Mining Safety & Environmental Protec-

- tion, 2012, 39(2): 77-79.
- [12] 王 凯, 蒋曙光, 马小平, 等. 瓦斯爆炸致灾通风系统试验及应急救援方法[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 617-622, 643.
- WANG Kai, JIANG Shuguang, MA Xiaoping, *et al.* Experimental of the ventilation systems hazard by gas explosion and the methods of emergency rescue[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 617-622, 643.
- [13] 王文才, 乔 旺, 李 刚, 等. 矿井巷道火灾烟流运动理论研究[J]. 工矿自动化, 2011, 37(3): 22-25.
- WANG Wencai, QIAN Wang, LI Gang, *et al.* Research of movement theory of fire smoke flow of mine roadway[J]. Industry and Mine Automation, 2011, 37(3): 22-25.
- [14] 王文才, 乔 旺, 李 刚. 巷道火灾对巷道通风的影响分析[J]. 煤矿安全, 2011, 42(10): 116-118.
- WANG Wencai, QIAN Wang, LI Gang. Influence analysis of roadway fire on roadway ventilation[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(10): 116-118.
- [15] 李宗翔, 王雅迪, 高光超, 等. 巷道火灾火焰局部阻力模型构建及参数识别[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 909-914.
- LI Zongxiang, WANG Yadi, GAO Guangchao, *et al.* Development of local resistance model of roadway fire flames and parameter identification[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 909-914.
- [16] 王 凯, 蒋曙光, 张卫青, 等. 矿井火灾应急救援系统的数值模拟及应用研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 857-862.
- WANG Kai, JIANG Shuguang, ZHANG Weiqing, *et al.* Numerical simulation and application research of mine fire emergency rescue system[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 857-862.
- [17] 王 凯, 蒋曙光, 张卫清, 等. 矿井火灾救灾中风量远程调控技术及数值分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1171-1176.
- WANG Kai, JIANG Shuguang, ZHANG Weiqing, *et al.* Remote control technology and numerical analysis of airflow in coal mine fire disaster relief process[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1171-1176.
- [18] 王新钢, 毛朝军, 叶诗茂, 等. 浅谈公路隧道火灾及其结构防火保护措施[J]. 消防技术与产品信息, 2005(3): 65-67.
- WANG Xingang, MAO Chaojun, YE Shimao, *et al.* Structural protection measures against highway tunnel fires[J]. Fire Technique and Products Information, 2005(3): 65-67.
- [19] 姚 坚. 公路隧道内火灾温度场分布规律数值模拟分析[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [20] 许秦坤. 狭长通道火灾烟气热分层及运动机制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [21] KURIOKA H, OKA Y, SATOH H, *et al.* Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(4): 319-340.