

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-352-07

基于多指标约束的V形坡隧道烟气控制方案

李国栋

(中铁第四勘察设计院集团有限公司 武汉 430063)

【摘要】 以武汉两湖隧道为例,通过建立全长3720m的FDS数值模型,研究非对称V形坡(-2.2%/-1%/1%/4.5%)隧道的烟气控制方案。针对不同火灾场景共设置27组全尺寸模拟实验,分析不同坡度火源位置、不同纵向补风+不同排烟口开启方式下的烟气控制效果。构建了以60℃烟气蔓延长度、排烟效率、清晰高度处温度与能见度为约束条件的排烟效果评价模型。结果表明:发生在任意坡度段的火灾,均采用上游隧道洞口处单向机械补风、排烟口上游、下游各开启3个、机械补风风速为1m/s时,可以保证隧道不同火源位置均能达到较好的烟气控制效果,且满足隧道内人员安全疏散要求。

【关键词】 V形坡隧道;数值模拟;火灾烟气;评价模型;烟气控制方案

中图分类号 X913.4/U458.1 文献标识码 A

Smoke Control Scheme in V-slope Tunnel Fire Based on Multi-objective Constraint

Li Guodong

(China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd, Wuhan, 430063)

【Abstract】 Taking Wuhan Lianghu tunnel as an example, the smoke control scheme of asymmetric V-slope (-2.2%/-1%/1%/4.5%) tunnel is studied by establishing a 3720m FDS numerical model. A total of 27 groups of full-scale simulation experiments are set for different fire scenarios to analyze the smoke control effect under different slope fire source location, different longitudinal air supplement and different smoke outlet opening modes. A smoke exhaust effect evaluation model with 60℃ smoke spread length, smoke exhaust efficiency, temperature and visibility at clear height as constraints is constructed. The results show that when the fire occurs in any slope section, the one-way mechanical air supplement at the upstream tunnel portal, three at the upstream and downstream of the smoke exhaust outlet are opened respectively, and the mechanical air supplement wind speed is 1m/s, it can ensure that the better smoke control effect can be achieved at different fire source positions of the tunnel, and meet the requirements of personnel safe evacuation in the tunnel.

【Keywords】 V-slope tunnel; numerical simulation; fire smoke; evaluation model; smoke control scheme

作者(通讯作者)简介:李国栋(1983-),男,硕士研究生,高级工程师,E-mail:185091953@qq.com

收稿日期:2022-02-28

0 引言

近年来,城市水下隧道得到了长足发展。为保障火灾时人员安全,水下隧道多采用重点排烟模式。但水下隧道“V”形连续纵坡使得隧道内烟气流更为复杂^[1,2],亟需考虑不同坡度段发生火灾对烟气控制效果的影响,进而明确隧道烟气控制最佳方

案,以提升救援有效性。

部分学者对隧道火灾烟气控制方案进行了研究。徐志胜^[3]建立了+3%坡度隧道数值模型,研究了集中排烟模式下排烟口的最佳开启方式;林鹏^[4]针对水平、3.2%单坡隧道进行研究,结果表明倾斜隧道中排烟效率对排烟口位置更加敏感;曾艳华^[5]

研究了坡度隧道通风排烟方式和排烟口开启状态对排烟效果的影响,发现同时开启火源上下游排烟口时排烟效率更高;王国卓^[6]通过缩尺寸实验,得出纵向与横向排烟相结合能达到较好烟气控制效果;肖志行^[7]对“相向射流+竖井自然排烟”组合模式进行了研究,分析得出射流风速和火源位置对烟气控制的影响;蔡崇庆^[8]针对单坡隧道不同重点排烟模式进行研究,制定了合理的排烟方案;潘一平^[9]研究了重点排烟模式下排烟口的数量、间距、位置和面积,结果表明火源两侧的排烟口都打开时排烟效果更好;李保军^[10]针对单侧集中排烟隧道研究了排烟口开启数量对烟控效果的影响,结果表明开启火源附近4个排烟口时烟气控制效果最好;姜学鹏^[11,12]提出将排烟效率、烟气蔓延范围、能见度作为纵向合理机械补风的判定三个指标,并通过缩尺寸模型试验对重点排烟与纵向补风共同作用下的临界风速进行了研究,提出合理纵向补风风速应小于临界风速值。上述研究多通过构建单一水平和单坡隧道数值模型对烟气控制方案进行探讨,未针对非对称V形坡隧道不同位置火灾的烟气控制方案进行研究,且对排烟效果的评价指标零散,缺少系统性的评价方法。

以武汉两湖隧道为研究对象,构建全尺寸水下V形坡隧道数值模型,针对不同坡度段火灾位置,探究不同纵向通风与重点排烟口开启方式下的烟控效果,依据评价指标,进而提出科学合理的隧道火灾烟气控制方案。

1 数值建模及工况设计

1.1 工程概况

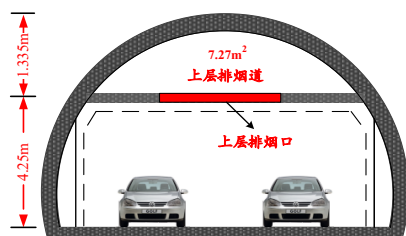


图1 两湖隧道上层横断面

Fig.1 Upper cross section of Lianghu tunnel

武汉两湖隧道为双层超大直径隧道,其中省博

紧急出入口—光谷大桥段长3720m,整个隧道呈不对称“V”字形,最大纵坡为4.5%。隧道内径13.7m,上层行车道净高4.25m。排烟道横断面面积7.27m²,在排烟道顶隔板上间隔60m设长1m×宽4m排烟口。隧道出入端各设置一处竖井双向均衡排烟,总排烟量为90m³/s。隧道上层横断面如图1所示,隧道纵断面如图2所示。

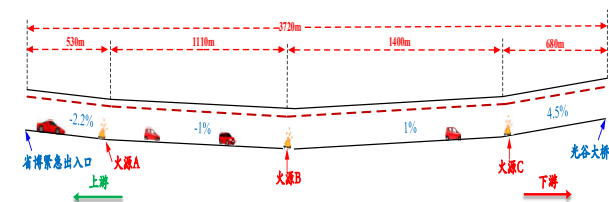


图2 火源设置示意

Fig.2 Schematic diagram of fire source setting

1.2 数值模型建立

为真实模拟两湖隧道火灾烟气流动情况,采用FDS构建3720m长的全尺寸隧道模型。考虑2~3辆小汽车碰撞火灾,设火灾规模为15MW超快速 t^2 火。火源位于隧道中心线,尺寸为长5.5m×宽2m(高度忽略不计),火源燃料默认为丙烷。网格大小选择1/16~1/4倍火源特征直径作为模拟网格尺寸^[13],火源上下游采用0.5m×0.5m×0.5m局部加密网格,其余网格尺寸均为1m×1m×1m。隧道两端出口设置为自然开口,排烟道端口处设为EXHAUST,压力为101325Pa,其环境温度设置为20℃。墙体为混凝土,模拟计算时间为1200s,选取1100s~1200s的模拟数据平均值进行研究讨论。

1.3 工况设定

考虑火灾位置、排烟口开启方式、纵向通风等对排烟效果的影响,设定在隧道出入段、隧道最低点发生火灾,如图2所示。负号代表隧道下坡方向,近省博紧急出入口侧为上游,近光谷大桥侧为下游。采用“双向机械补风(隧道两端洞口同时补风)+排烟口对称开启(上游、下游各开启3个)及“单向机械补风(沿行车方向单向机械补风)+排烟口对称开启/不对称开启(上游2个、下游4个)3种不同通风排烟控制方案,每种方案配合不同补风风速,共计27组模拟工况,详见表1。

表1 不同火源位置烟气蔓延长度

Table 1 Smoke spread length at different fire source locations

烟气控制方案		火源A (距离隧道入口525m)				火源B (距离隧道入口1640m)			火源C (距离隧道入口3045m)		
		补风 风速 /m ³ ·s ⁻¹	上游蔓 延长度 /m	下游蔓 延长度 /m	总计 /m	上游蔓 延长度 /m	下游蔓 延长度 /m	总计 /m	上游蔓 延长度 /m	下游蔓 延长度 /m	总计 /m
双向 补风	排烟口开 启方式	1	147	89	236	92	143	235	29	181	210
		1.5	139	93	232	90	149	239	71	150	221
	上3+下3	2	131	101	232	87	157	244	75	150	225
		1	129	103	232	92	139	231	93	135	232
单向 补风	上3+下3	1.5	91	140	231	82	149	231	77	150	227
		2	51	150	201	41	157	198	49	165	214
	上2+下4	1	119	118	237	89	143	232	93	141	234
		1.5	89	142	231	78	151	229	71	159	230
		2	45	156	201	25	157	182	41	187	228

2 隧道火灾烟气控制效果评价模型

2.1 排烟控制评价指标

火灾时，隧道重点排烟系统应满足如下目标：

(1) 保障人员安全疏散需要，避免纵向风扰乱烟气分层，使清晰高度处烟气温度的、浓度保持在安全范围内，最大程度减小烟气对人员疏散影响。

(2) 有效地将烟气排入烟道，尽可能将烟气控制在火源附近排烟口开启区域内，控制高温烟气影响范围。

基于以上控制目标，有效的重点通风排烟系统应实现：火灾烟气控制在排烟口开启区段内，清晰高度处烟气温度与能见度安全化，且排烟有效化。

2.2 数学模型

将上述排烟效果评价指标，凝炼为烟气前锋蔓延长度、排烟效率、清晰高度处能见度和温度等4个指标^[14,15]。构建基于疏散安全和排烟有效的多指标约束的通风排烟策略的优化数学模型。

$$f(x) = f(L_{60^{\circ}\text{C}}, T_z, V_z, \eta) \tag{1}$$

$$\begin{cases} L_{60^{\circ}\text{C}} \leq 60n - 30, L_{60^{\circ}\text{C}} \leq 330 - 60n \\ T_z \leq 60^{\circ}\text{C} \\ V_z \geq 10\text{m} \\ \eta^{**} \geq 95\% \\ \eta = \sum \eta_i = \frac{\sum m_{est}}{m_p} \times 100\% \end{cases} \tag{2}$$

其中，式(1)为优化的目标函数，式(2)为约束条件。式中， $L_{60^{\circ}\text{C}}$ 为排烟道底板下方60℃烟气

温度前锋蔓延距离，m； T_z 为清晰高度处温度，℃； V_z 为清晰高度处能见度，m； η 为排烟效率，%； n 为上游侧排烟口开启数量，个； m_{est} 为第*i*个排烟口单位时间排出的CO₂量，kg/s； m_p 为单位时间内CO₂生成总量，kg/s。

3 结果与讨论

3.1 烟气蔓延长度

表1为不同纵向补风+不同排烟口开启组合方式下的烟气蔓延长度。

隧道2.2%~1%下坡段A点发生火灾时，上游烟气受到纵向风流的抑制作用，其蔓延长度随补风风速增大而减小，最小蔓延长度为45m；下游则随风速增大而增加，蔓延总长均<300m。由式(2)中烟气蔓延长度判据可得：排烟口上3+下3开启时，烟气蔓延长度均满足 $L_{60^{\circ}\text{C}} \leq L = 150\text{m}$ 、 $L_{60^{\circ}\text{C}} \leq L = 150\text{m}$ ；排烟口上2+下4开启，单向1m/s补风，上游烟气蔓延长度不满足 $L_{60^{\circ}\text{C}} \leq L = 90\text{m}$ 。

隧道最低点B发生火灾时，上游烟气受到纵向风流的抑制作用，其蔓延长度随补风风速增大而减小，最小蔓延长度为25m；下游则由于烟囱效应耦合增大的风速而增加，总蔓延长度均<300m。由判据可得：排烟口上3+下3开启，补风风速≤1.5m/s时，烟气蔓延长度均满足 $L_{60^{\circ}\text{C}} \leq L = 150\text{m}$ 、 $L_{60^{\circ}\text{C}} \leq L = 150\text{m}$ ；排烟口上2+下4开启，不同补风风速均能将烟气控制在排烟口开启区段。

隧道1%~4.5%上坡段C点发生火灾双向补风时，随补风风速的增大，上游烟气逐渐增加，下游逐渐

减小；单向补风时，烟气则被吹往下游，呈现上游减小，下游增加的趋势。总蔓延长度 < 300m。由判据可得：双向补风 $\geq 1\text{m/s}$ 时，满足判据；排烟口上3下3开启+单向补风 $\leq 1.5\text{m/s}$ 、排烟口上2下4开启+单向补风 $\geq 1.5\text{m/s}$ 时，满足烟控要求。

3.2 清晰高度处温度分析

图3-图5为不同火源位置、不同纵向补风+不同排烟口开启组合方式下的温度分布。

由图3可知，A点火灾时：温度呈现不对称分布，上游的温度稍高于下游。随补风风速增大，上游温度迅速降低，下游逐渐升高，距离火源越近 L1-R1 排烟口开启区段受火羽流影响温度波动较大。60°C 以上高温烟气均控制在排烟口开启区段（375m-675m）。由式（2）中 $T_z \leq 60^\circ\text{C}$ 判据可得：不同烟控组合方式均满足要求。

由图4可知，B点火灾时：隧道右侧坡度更大，故下游的温度稍高于上游。由于双向补风将烟气控制在排烟口开启区段（1490m-1790m）内，整体温度有缓慢上升的趋势。沿行车方向补风时，上游温度随风速增大迅速降低，而下游则逐渐升高。上游温度均低于60°C，下游R1-R2开启区段温度在60°C上下波动。

由判据可得：不同烟控组合方式均满足要求。

由图5可知，C点火灾时：因其位于连续上坡段，烟气朝上坡蔓延，故下游的温度高于上游。C点距离隧道出口仅675m，远小于与入口的距离，故双向补风时，下游补风将烟气吹往上游，使上游温度升高、下游降低。单向补风时，规律同B点类似，但补风风速为2m/s时，“烟囱效应”得到促进，高温烟气被大量吹往下游，使R1-R3排烟口开启区段（3045m-3195m）内温度骤升超过60°C。由判据可得：除单向补风2m/s外，不同烟控组合方式均满足要求。

3.3 清晰高度处能见度分析

图6~图8为不同火源位置、不同纵向补风+不同排烟口开启组合方式下的温度分布。

A点火灾时（见图6）：较小补风风速下，下游能见度高于上游。随补风风速增大，烟气逐渐聚集在下游，上游能见度逐渐增加，下游能见度逐渐降低。由式（2）中 $V_z \leq 10\text{m}$ 判据可得：双向补风烟控效果较好；单向补风+排烟口上3下3开启时，1m/s补风烟控效果较好、上2下4开启时，除2m/s补风外，基本满足要求。

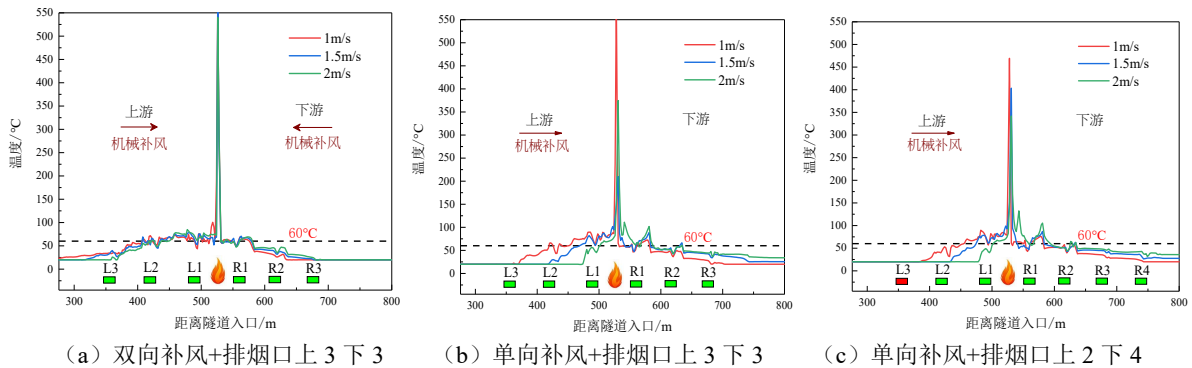


图3 火源A点清晰高度处温度分布

Fig.3 Temperature distribution at the clear height of point A of fire source

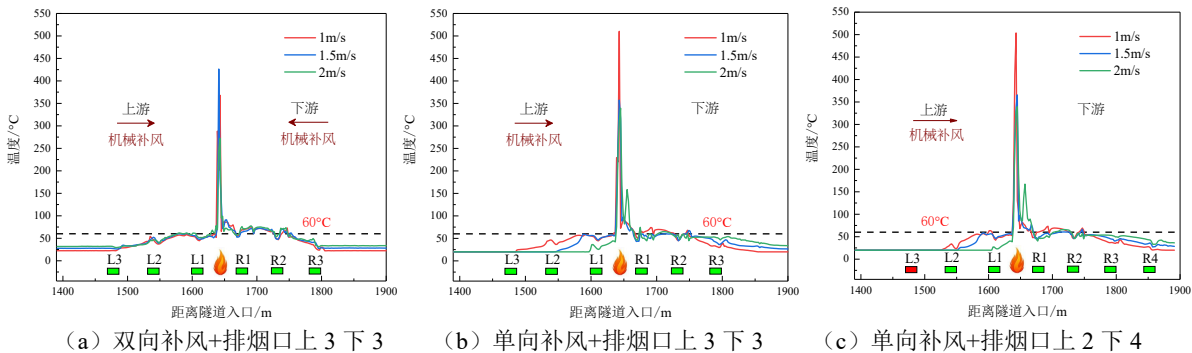


图4 火源B点清晰高度处温度分布

Fig.4 Temperature distribution at the clear height of point B of fire source

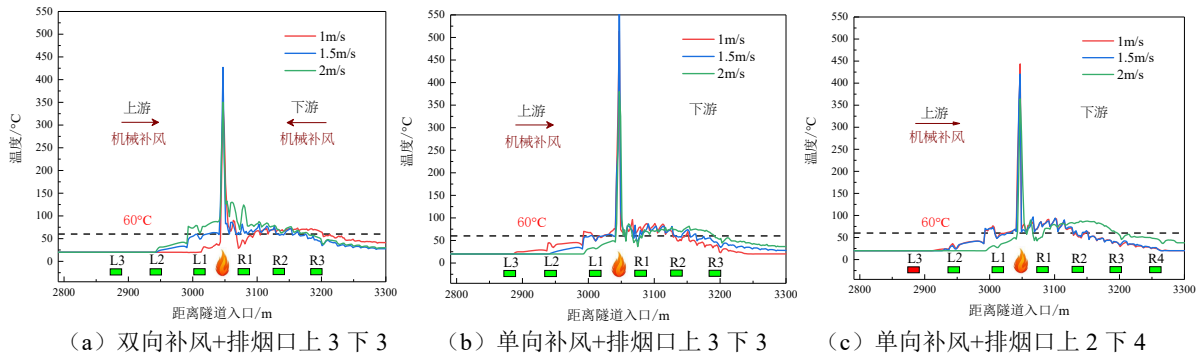


图5 火源C点清晰高度处温度分布

Fig.5 Temperature distribution at the clear height of point C of fire source

B、C点火灾时（图7、图8）：由于右侧整体坡度大于左侧，上游能见度高于下游。双向补风时，下游烟囱效应被抑制，上游能见度随风速增大而降低、下游则相反。单向补风时，烟囱效应得到促进，

上游能见度逐渐升高而下游逐渐降低。由判据可得B点火灾时，双向补风以及单向1m/s 补风时烟控效果较好；C点火灾时，双向补风 $\leq 1.5\text{m/s}$ 以及单向1m/s补风时烟控效果较好。

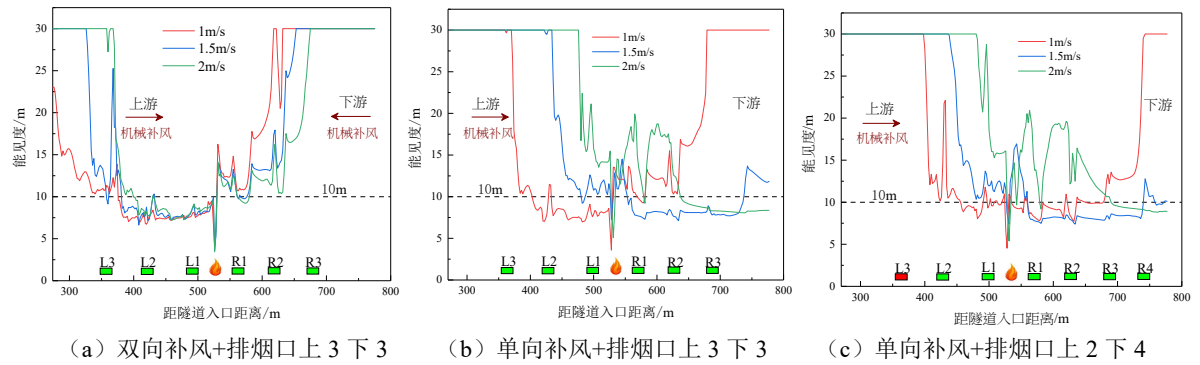


图6 火源A清晰高度处能见度分布

Fig.6 Visibility distribution at clear height of fire source A

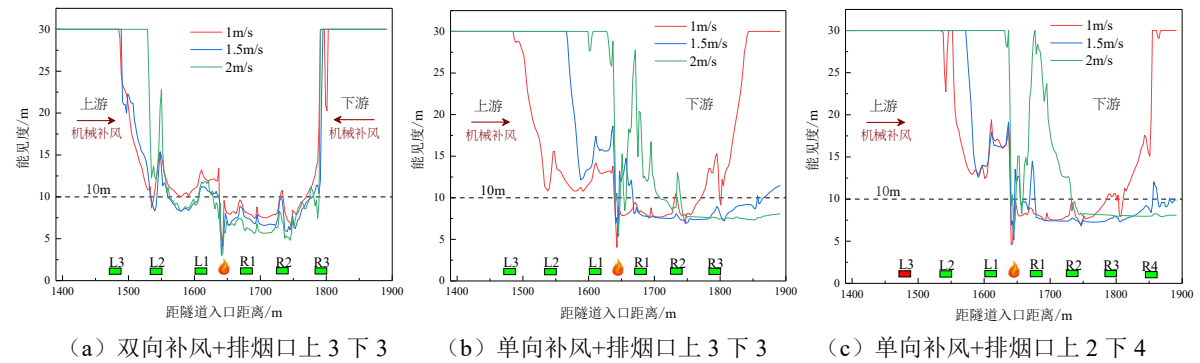


图7 火源B清晰高度处能见度分布

Fig.7 Visibility distribution at clear height of fire source B

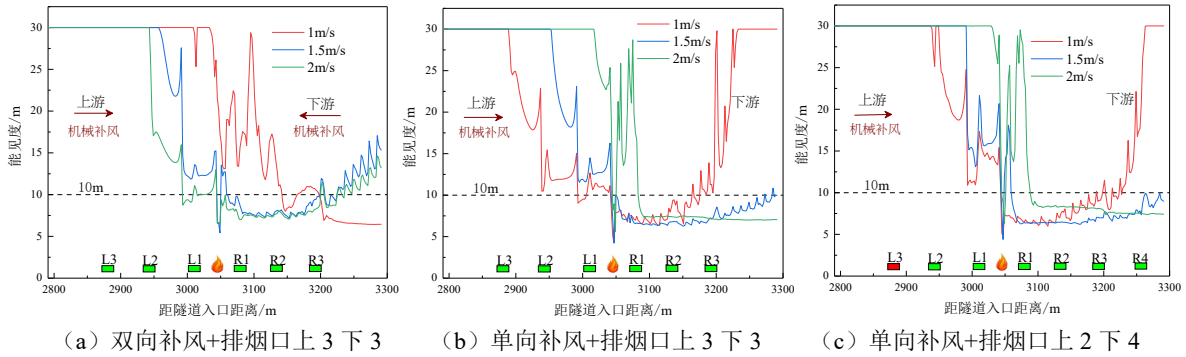


图8 火源C清晰高度处能见度分布

Fig.8 Visibility distribution at clear height of fire source C

表2 不同火源位置排烟效率

Table 2 Smoke exhaust efficiency at different fire source locations

序号	补风方 式	排烟口 开启方式	通风风速 $/m^3 \cdot s^{-1}$	各排烟口排烟效率 $\eta_i/\%$							总排烟效率 $\eta/\%$
				L3	L2	L1	R1	R2	R3	R4	
A1	双向补 风	上3+下3	1	35.6	21.6	16.7	16.1	4.3	0.4	/	94.7
A2			1.5	31.3	20.7	16.6	17.8	8.8	0.6	/	95.8
A3			2	30.1	17.7	10.8	21.8	13.7	5.2	/	99.3
A4	单向补 风	上3+下3	1	28.07	16.79	7.3	22.85	13.6	7.6	/	96.2
A5			1.5	16.12	4.6	0.35	33.26	20.36	21.3	/	96.0
A6			2	9.2	1.06	0.3	37.33	17.1	18.06	/	80.9
A7	双向补 风	上2+下4	1	/	22.54	25.4	26.16	13.8	5.8	2.8	96.5
A8			1.5	/	3.86	18.1	31.73	18.05	10.38	15.5	97.6
A9			2	/	0.42	8.9	36.0	14.94	7.96	14.55	82.8
B1	双向补 风	上3+下3	1	3.63	10.5	17.4	34.1	21.6	12.0	/	99.2
B2			1.5	0.7	11.7	17.1	34.8	25.3	8.68	/	98.3
B3			2	0.32	11.8	13.7	37.9	28.4	2.65	/	94.9
B4	单向补 风	上3+下3	1	1.5	8.7	16.3	35.6	21.7	16	/	99.8
B5			1.5	0.02	0.10	11.4	39.1	21.5	20.4	/	92.52
B6			2	0.3	-1.47	3.9	35.2	21.2	16.7	/	75.83
B7	双向补 风	上2+下4	1	/	10.8	14.7	36.2	19.9	9.2	8.4	99.2
B8			1.5	/	0.7	11.8	37.9	18.7	10.2	14.3	93.5
B9			2	/	0.18	3.4	38.1	16.6	5.8	13.8	77.9
C1	双向补 风	上3+下3	1	0	-0.1	0.3	31.5	7	23.4	/	62.1
C2			1.5	0	-2.6	11.4	35.3	15.6	21.3	/	81.1
C3			2	-3.8	-2.8	12.5	35	15.3	21.6	/	82.1
C4	单向补 风	上3+下3	1	2.2	9.6	21.7	27.8	19.6	18.1	/	99.0
C5			1.5	0	-0.6	14.2	36.5	16.9	27.3	/	94.3
C6			2	1.8	0.1	6.1	33	13	27.5	/	81.5
C7	双向补 风	上2+下4	1	/	15	21.4	32.8	15.4	11.1	3.9	99.6
C8			1.5	/	0.2	13.7	34.6	13.0	14.9	19.4	95.8
C9			2	/	0	5.2	29.8	2.0	20.6	21.9	79.5

注：“/”表示为该处排烟口关闭；“-”表示该处烟气从排烟道进入隧道内。

3.4 排烟效率分析

排烟效率 $\eta \geq 95\%$ 是衡量排烟系统效果最直接的指标。不同火源位置,不同纵向补风+不同排烟口开启组合方式下的排烟效率如表2所示。

A点火灾时(位于2.2%-1%下坡段),各工况排烟效率呈不对称分布,上游侧(2.2%坡度)排烟口效率最高。随补风风速增大,上游侧排烟效率逐渐降低而下游逐渐升高。当单向补风风速 $\leq 1.5\text{m/s}$ 时,随排烟口向下游偏移(上2下4),排烟效率呈增加趋势。由式(2)中判据可得:双向补风+排烟口上3下3开启时,风速 $\geq 1.5\text{m/s}$;单向补风+不同排烟口开启组合时,风速 $\leq 1.5\text{m/s}$ 满足要求。

B、C点火灾时,各工况排烟效率呈不对称分布,下游侧整体排烟效率较高。双向补风时,上游侧L1-L3效率逐渐增加,下游则减小。单向补风时,烟气被大量吹往下游,随纵向风速的增大,上游排烟效率逐渐降低,出现负值,表明该排烟口失效,而下游则逐渐升高。B点火灾时,双向补风 $\leq 1.5\text{m/s}$ 、单向补风 1m/s 时,排烟效率大于95%;C点火灾时,双向补风效果不佳,排烟口上3下3开启、单向补风风速 1m/s 和排烟口上2下4开启、单向补风风速 $\leq 1.5\text{m/s}$ 时烟控效果较好。

3.5 讨论

通过对不同火源位置、不同补风方式+排烟口开启方式进行探究,考虑烟气蔓延长度、清晰高度处温度、能见度、排烟效率4个烟气控制指标,进而得出烟气控制方案,如表3所示。

表3 排烟方案

Table 3 Smoke exhaust scheme

火源	补风风速的选取		
	双向补风+排烟口上3下3	单向补风+排烟口上3下3	单向补风+排烟口上2下4
A	1.5m/s	1m/s	1.5m/s
B	1m/s、1.5m/s	1m/s	1m/s
C	/	1m/s	1.5m/s

由于隧道内火灾发生位置的随机性,控制模式多样化则不便于工程实际操作当采用双向补风时C点无合适的补风风速满足烟控要求;当单向补风配合排烟口上2下4时,三种火灾位置无统一的风速可满足要求;当排烟口上3下3配合 1m/s 单向补风时,均可较好实现烟气控制效果,故推荐此方案。

4 结论与讨论

本文依托武汉市两湖V形坡隧道,对隧道不同坡度段位置发生火灾进行数值模拟,分析讨论得到如下结论:

(1) 基于人员安全疏散、烟气是否有效排出的要求,构建了包含 60°C 烟气前锋蔓延长度、排烟效率、清晰高度处温度与能见度4个约束指标的隧道火灾烟气控制效果评价模型。

(2) 针对武汉两湖非对称V形坡隧道,通过对不同火源位置、纵向通风+排烟口开启组合方式进行模拟分析,得到:发生在任意坡度段的火灾,均采用上游隧道洞口处单向机械补风、排烟口上游、下游各开启3个、配合 1m/s 的补风风速,均可保证达到较好的烟气控制效果。

参考文献:

- [1] 姜学鹏,廖湘娟,景安.水下铁路隧道V形坡对烟气竞争效应的影响[J].中国铁道科学,2019,40(1):63-69.
- [2] 廖湘娟.水下V形坡隧道火灾烟气温度与流动特性研究[D].武汉:武汉科技大学,2019.
- [3] 徐志胜,应后淋,赵家明,等.+3%坡度盾构隧道集中排烟模式排烟阀开启方式的研究[J/OL].安全与环境学报,2021-08-30:1-11.
- [4] 林鹏,王国元,司有亮,等.隧道火灾排烟口位置对排烟效率的影响[J].西南交通大学学报,2019,54(5):1055-1062.
- [5] 曾艳华,李杰,张先富,等.不同排烟口开启状态下妈湾隧道的排烟技术[J].西南交通大学学报,2019,54(6):1177-1186.
- [6] 王国卓,刘万福,倪照鹏,等.排烟模式对隧道火灾烟气控制影响研究[J].消防科学与技术,2016(5):622-625.
- [7] 肖志行,杨永斌,张轩.公路隧道相向射流与竖井自然排烟组合烟气控制研究[J].消防科学与技术,2020,39(3):344-347.
- [8] 蔡崇庆.重点排烟模式下坡度隧道烟气控制优化研究[J].消防科学与技术,2020,39(4):474-477.
- [9] 潘一平,赵红莉,吴德兴,等.隧道火灾集中排烟模式下的排烟效率研究[J].安全与环境学报,2012,12(2):191-196.
- [10] 李保军,陶亮亮,王浩然,等.单侧集中排烟隧道烟气控制数值研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(S2):912-917.

(下转第 389 页)