文章编号:2096-5052(2026)03-0066-10　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.07

盾构隧道疏散通道临界防烟风速计算模型研究

罗驰恒[1],郭元俊[2],贾瑶[2],姜学鹏[2*]
(1.中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;
2.武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要:为解决盾构隧道行车道下方安全疏散通道的临界防烟风速计算问题,本研究建立基于 Froude 数的理论计算模型,并结合火灾动力学模拟器(fire dynamics simulator, FDS)数值模拟与缩尺寸试验进行验证。通过理论推导,构建包含隧道纵向风速、火源功率及隧道高度的临界防烟风速隐式控制方程。结果表明:临界防烟风速随隧道纵向风速增大而线性降低,随火源功率升高而线性递增,随隧道高度增加呈指数型衰减;确定了控制烟气侵入的临界 Froude 数为 12;1∶10 缩尺寸模型试验验证理论公式的准确性,计算值与实测值偏差≤0.05 m/s。研究成果可为盾构隧道安全疏散通道加压送风系统设计提供理论依据。

关键词:盾构隧道;疏散通道;临界防烟风速;Froude 数;纵向通风;缩尺寸试验
中图分类号:U458; X951　　**文献标志码**:A

引用格式:罗驰恒,郭元俊,贾瑶,等. 盾构隧道疏散通道临界防烟风速计算模型研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2026,8(3):66-75. Luo Chiheng, Guo Yuanjun, Jia Yao, et al. Research on calculation model of critical smoke control velocity for evacuation passages in shield tunnels[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):66-75.

Research on calculation model of critical smoke control velocity for evacuation passages in shield tunnels

Luo Chiheng[1], Guo Yuanjun[2], Jia Yao[2], Jiang Xuepeng[2*]
(1. China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China;
2. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: To determine the critical smoke control velocity for safety evacuation passageways located beneath the carriageway of shield tunnels, a theoretical model based on the Froude number was developed and validated via FDS (fire dynamics simulator) numerical simulations and reduced-scale experiments. An implicit governing equation for the critical smoke control velocity was theoretically derived by considering the effects of longitudinal tunnel velocity, fire heat release rate, and tunnel height. The results showed that the critical smoke control velocity decreased linearly with increasing longitudinal tunnel velocity, increased linearly with increasing fire heat release rate, and decreased exponentially with increasing tunnel height. Meanwhile, a critical Froude number of 12 was identified as the threshold for preventing smoke ingress into the safety evacuation passageway. The proposed theoretical model was further validated in a 1∶10 reduced-scale experiment, and the maximum absolute deviation between the calculated and measured velocities did not exceed 0.05 m/s, demonstrating the satisfactory predictive accuracy of the model. The results can provide a theoretical basis for the design of pressurized ventilation systems and the determination of critical smoke control velocities in safety evacuation passageways of shield tunnels.

收稿日期:2026-04-21;**修回日期**: 2026-05-19;**接受日期**:2026-05-20;**出版日期**:2026-09-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52376130,52476127)
第一作者简介:罗驰恒(1990—),男,湖北天门人,高级工程师,硕士,主要研究方向为隧道工程设计。E-mail:tjulch@163.com
*通信作者简介:姜学鹏(1976—),男,山东青岛人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为隧道及地下空间火灾动力学与火灾防治。E-mail:jxp5276@126.com

Keywords：shield tunnel；evacuation passage；critical smoke control velocity；Froude number；longitudinal ventilation；scale model experiment
Received：2026-04-21；**Revised**：2026-05-19；**Accepted**：2026-05-20；**Published**：2026-09-20

0　引言

随着城市地下交通网络规模持续扩大，盾构隧道以其适应复杂地质条件的优势在水下及城市隧道工程中得到广泛应用。然而，其火灾安全问题一直是工程领域关注的焦点[1]，盾构隧道空间封闭、疏散救援条件受限，一旦发生火灾，高温烟气快速蔓延将严重威胁人员生命安全，研究表明烟气中毒与窒息是隧道火灾伤亡的主要原因[2]。目前工程中利用行车道下方富余空间设置疏散通道，通过端部风井加压送风在疏散口形成由下层向上层的气流屏障，其中能够恰好抑制烟气侵入的风速被定义为临界防烟风速，该参数直接关系到防烟系统设计的有效性与经济性[3-5]。

相关专家针对隧道疏散通道的防烟技术已开展相关研究。姜学鹏等[6]建立横通道临界风速与隧道纵向风速、火源功率及横通道几何参数的无量纲关系式；严磊[7]分析不同纵向风速下的烟气侵入规律，提出防止烟气倒灌的合理防烟风速；姚勇征等[8]进一步研究火源功率对横通道温度分布的影响，建立临界风速预测模型；Zhou 等[9]通过缩尺寸试验发现，横通道临界风速与火源位置、半横向排烟速度及防护门高度等因素相关；刘琪等[10]针对隧道安全疏散通道单侧正压防烟系统，推导出满足防烟要求的风机流量与压力计算式；谢宝超等[11]通过数值模拟发现，单侧送风模式下当开启疏散口数量不超过 10 个时，所有疏散口风速均可满足规范要求；张新等[12]研究水下公路隧道纵向疏散通道加压送风系统，提出基于理论计算的送风量设计方法，为水下隧道安全疏散通道防烟系统设计提供工程参考。既有研究多集中于与行车道处于同一水平面的横通道，其防烟机制主要依赖横向压力梯度；而位于行车道正下方的安全疏散通道，其气流运动需克服重力作用，并受到纵向气流与烟气浮力的耦合影响，防烟机理存在本质差异。横通道防烟主要依靠通道内外的水平压力梯度，而上层疏散通道防烟需要向上的气流速度形成垂直方向的动量屏障，以抵抗烟气向下扩散的浮力作用。现有横通道的临界风速计算模型是否适用于下方疏散通道仍有待验证，目前针对行车道下方疏散通道临界防烟风速的理论建模与系统性参数研究尚未见报道。

本研究拟通过理论分析建立临界防烟风速的初步理论模型，结合数值模拟方法系统研究隧道纵向风速、火源功率及隧道高度对临界风速的影响规律，最终构建适用于盾构隧道安全疏散通道的临界防烟风速计算模型，并通过缩尺寸试验进行验证。研究成果可为盾构隧道安全疏散通道防烟系统的优化设计提供理论依据与技术支撑。

1　理论分析

当隧道内车辆拥堵情况下发生车辆自燃火灾时，被困人员经火源两侧的邻近疏散口进入下部疏散通道逃生，当疏散口盖板未关闭且疏散通道内部压力低于行车道压力时，烟气会通过疏散口进入疏散通道，影响人员安全疏散。因此，对于采用纵向疏散方式的城市盾构隧道应采取疏散通道加压送风的方式，以保证疏散通道的安全性。疏散通道加压送风如图 1 所示。

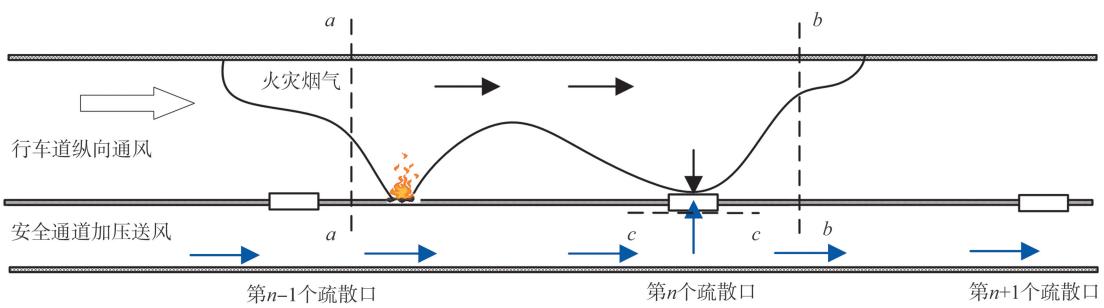


图 1　疏散通道加压送风示意图
Fig.1　Schematic diagram of pressurization system for evacuation passage

假定临界风速模型存在一临界 Froude 数[13] Fr，此临界 Fr 可控制烟气通过疏散口侵入安全疏散通道的最小风速，该最小风速为临界防烟风速，计算公式为

$$Fr=\frac{gH(\rho_0-\rho)}{\rho_0 v_{ac}^2},\quad(1)$$

式中：g 为重力加速度，m/s²；H 为隧道行车道最大净高度，m；ρ_0 为环境空气密度，kg/m³；ρ 为烟气密度，kg/m³；v_{ac} 为安全疏散通道临界防烟风速，m/s。

当式(1)定义的临界弗劳德数 Fr 小于某一值时，烟气不会侵入到安全疏散通道中[14]。同时假设在疏散口附近新鲜空气和烟气充分混合，如图 1 所示，对疏散口上、下游截面(截面 a、b)及疏散口截面(截面 c)建立连续性和能量守恒方程[15]，连续性方程为

$$m_a+m_c=m_b,\quad(2)$$

式中：m_a、m_b、m_c 为截面 a、b、c 处空气或烟气流量，kg/s。

能量守恒方程为

$$(mc_pT)_a+Q_c+(mc_pT)_c=(mc_pT)_b,\quad(3)$$

式中：T 为各下标截面处空气或烟气温度，K；m 为各下标截面处空气或烟气流量，kg/s；c_p 为空气定压比热，kJ/(kg·K)；Q_c 为对流热释放速率，kW；取 $Q_c=0.7Q$，Q 为火源总功率，kW。其系数 0.7 来源于 Heskestad 等[16]和 Karlsson 等[17]的研究，表明在敞开空间和隧道火灾中，火源总热释放速率中约 70%以对流形式释放，30%以辐射形式释放。该取值适用于火源功率 5～30 MW 的隧道火灾场景，当火源面积较大或通风条件特殊时需适当修正。

将各截面质量流量代入，即 $m_a=\rho_0 v_0 A$、$m_c=\rho_0 v_{ac} S$、$m_b=\rho v A$，其中截面 a、c 为常温新鲜空气(密度 ρ_0、温度 T_0)，截面 b 为受热混合烟气(密度 ρ、温度 T)，式(2)、(3)可化为

$$\rho_0 v_0 A+\rho_0 v_{ac} S=\rho v A,\quad(4)$$

式中：v_0 为隧道纵向风速，m/s；v 为受热混合烟气流速，m/s；A 为隧道横断面积，m²；S 为安全疏散通道疏散口面积，m²，本研究取 0.9 m×2.1 m=1.89 m²。

$$\rho_0 v_0 A c_p T_0+Q_c+\rho_0 v_{ac} S c_p T_0=\rho v A c_p T,\quad(5)$$

式中：T_0 为环境温度，K。

假定烟气为理想气体，且该过程为等压过程，则由理想气体状态方程

$$\frac{\rho_0}{\rho}=\frac{T}{T_0}。\quad(6)$$

将式(4)、(5)、(6)代入式(1)中，可得安全疏散通道临界防烟风速 v_{ac} 的隐式控制方程

$$v_{ac}=\frac{gHQ_c}{\rho_0 c_p STFr v_{ac}^2}-\frac{A}{S}v_0,\quad(7)$$

其中，

$$T=\frac{Q_c}{\rho_0 c_p(v_0 A+v_{ac} S)}+T_0。\quad(8)$$

参考 Gasser 等[18]关于隧道火灾烟气流动模型的研究、Byrne[19]关于隧道火灾一维流动与充分混合假设的总结以及 Li 等[14]关于横通道临界防烟风速的理论分析方法，本研究对疏散口附近烟气流动过程进行合理简化。上述推导过程基于以下假设：烟气为理想气体；流动过程近似为等压过程；疏散口附近新鲜空气与烟气充分混合。

火灾烟气温度通常处于 300～1 000 ℃范围内，在该温度区间内烟气密度与温度关系基本满足理想气体状态方程，采用理想气体假设能够较好描述烟气热浮力特性。疏散口区域压力主要受隧道纵向通风及安全通道加压送风共同作用，相对于大气压力，其局部压力波动较小，因此可近似视为等压过程。在纵向通风条件下，火羽流受纵向风作用发生偏转，疏散口附近存在明显的卷吸与湍流掺混现象。随着纵向风速增大，烟气与新鲜空气之间的速度梯度增强，局部掺混作用进一步加强，因此将疏散口附近流场近似视为充分混合状态。

若已知安全疏散通道烟气控制的临界弗劳德数 Fr，根据式(7)、(8)可以很容易地计算出临界速度。

2 数值模型构建

2.1 数值参数设定

以某过江盾构隧道作依托工程，隧道断面布置如图 2 所示。考虑重点排烟系统失效这种最危险场景[20]，火灾时采用纵向通风排烟方式，隧道内安全疏散通道净尺寸为 2.5 m×3.5 m，沿程设置多个疏散楼梯间，楼梯间与行车道连接处安装 900 mm×2 100 mm 规格的开启式盖板，人员可通过掀开盖板进入楼梯间，进而疏散至下行疏散通道，疏散楼梯间布置如图 3 所示。

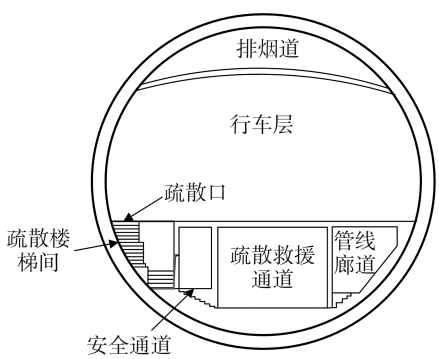
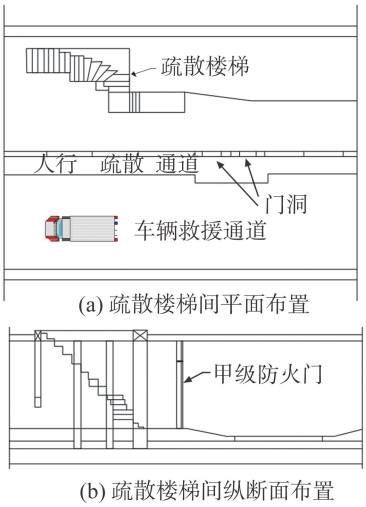


图 2 隧道横断面示意图

Fig.2 Schematic diagram of tunnel cross-section



(a) 疏散楼梯间平面布置

(b) 疏散楼梯间纵断面布置

图 3　安全疏散通道疏散楼梯间布置图
Fig.3　Layout of evacuation stairwells in safety evacuation passage

基于典型水下盾构隧道的几何特征,采用火灾动力学模拟器(fire dynamics simulator, FDS)建立长度 1 000 m 的隧道模型,火源设置为矩形面火源,尺寸为 2 m×2 m,位于隧道行车道中心地面处,火源采用稳态热释放速率模型,未设置增长阶段(t^2 增长曲线),即火灾发生后立即达到设定功率并保持恒定。此简化基于以下考虑:本研究关注热稳定阶段的临界防烟风速,火灾增长阶段的瞬态效应不影响最终结果。为确定合适的网格尺寸,开展了网格独立性验证。根据 McGrattan 等[21]提出的网格尺寸选取准则,火源特征直径 D^* 的计算公式为

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 c_0 T_0 \sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}}。\tag{9}$$

根据该准则,当网格尺寸取 1/16 D^* ~1/4 D^* 时,模拟结果与试验结果非常吻合。将各火源功率代入计算可得网格尺寸范围,其交集为 0.146 25~0.772 50 m。分别采用 0.25 m×0.25 m×0.25 m、0.5 m×0.5 m×0.5 m、0.25 m×0.5 m×0.5 m 3 种网格尺寸进行对比模拟,结果表明 3 种网格尺寸得到的临界防烟风速趋势一致且差异较小。隧道火灾中,竖直方向存在显著的热分层现象,温度和速度梯度远大于水平方向,因此对疏散口附近 z 方向网格加密至 0.25 m,以准确捕捉热分层界面和烟气层厚度变化;基于模拟精度与计算效率平衡原则,疏散口附近采用 0.25 m×0.5 m×0.5 m 加密网格,其余区域统一为 0.5 m×0.5 m×0.5 m 网格。行车道及安全通道上游端口均采用“supply”边界条件实施纵向送风,下游端口设为“OPEN”开放边界,初始环境参数设定为温度 20 ℃、压强 101 kPa。

临界防烟风速的判定采用疏散口流速监测与二分法相结合的方式。沿隧道纵向中心断面布置流速切片,并在各疏散口处布置流速测点阵列,监测疏散口气流速度大小与方向,测点布置如图 4 所示。当疏散口处气流方向由安全通道指向行车道(z 方向速度分量 v_{ac}>0)且流速稳定时,判定烟气未侵入疏散通道;当疏散口处气流方向反转(v_{ac}≤0)或流速不足以维持向上气流时,烟气在浮力驱动下穿过疏散口进入安全通道,判定为烟气侵入。对于每组工况,通过调节安全通道加压送风风速,采用二分法逐步逼近(步长 0.05 m/s),直至找到恰好维持所有疏散口气流方向向上的最小送风风速,即为该工况的临界防烟风速。模拟总时长 600 s,取稳态阶段(400~600 s)数据平均值作为计算结果。

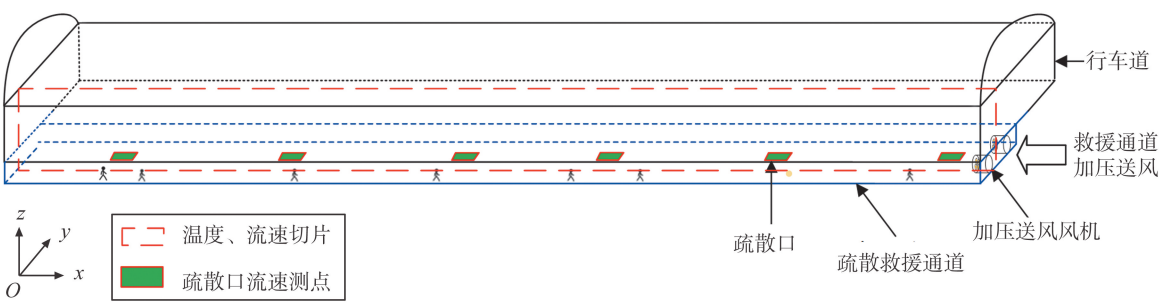


图 4　安全通道测点布置图
Fig.4　Layout diagram of safety evacuation passage monitoring points

2.2　工况设置

当隧道发生火灾时,行车道开启纵向通风排烟,同时安全疏散通道进行加压送风来抑制烟气进入安全疏散通道。为探究隧道内不同纵向风速、火源功率、火源位置及隧道高度对安全疏散通道临界防烟风速变化情况的影响,模拟工况表如表 1 所示。

表 1 数值模拟工况设置

Table 1 Numerical simulation conditions

工况组	工况	研究目的	v_0/(m·s^{-1})	Q/MW	火源位置	H/m
G1	A01-A75	基础参数矩阵	0.5/1.0/1.5/2.0/2.5	10/15/20	1	5/6/7/8/9
G2	A76-A105	补充火源功率	0.5/1.5/2.5	12.5/17.5	1	5/6/7/8/9
G3	A106-A114	火源位置对比	0.5/1.0/1.5	10/15/20	2	5

3 结果分析与讨论

3.1 火源位置

为分析不同火源位置对安全疏散通道临界风速的影响,分别对疏散口上游(位置 1)和疏散口处(位置 2)两个火源位置进行了模拟研究。为确定最不利火源位置,本研究结合文献分析与工程实践进行判断。据文献[22-23]研究可知:火源最不利位置的区域范围为 10~20 m,在该范围内安全疏散通道临界风速基本保持一致。选取火源位置为疏散口上游距其 20 m 处作为最不利工况,火源位置示意图如图 5 所示,确保设计参数的安全性。



图 5 火源位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of fire source locations

火源位置影响图如图 6 所示。由图 6 可知:在火源功率 10、15、20 MW、纵向风速 0.5、1、1.5 m/s 范围内,火源位于位置 1 时的临界防烟风速均显著高于位置 2。开启纵向通风使火羽流向下游偏斜,当火源处于位置 1 时,疏散口正位于火羽流倾斜区域,导致高温烟气聚集、防烟需求增大;而火源处于位置 2 时,疏散口位于火源上游回流区,受火源热量影响可忽略,临界风速要求较低。因此确定位置 1 为最不利火源位置,后续研究采用此最不利设置。

3.2 隧道纵向风速

不同纵向风速情况下安全疏散通道临界防烟风速关系图如图 7 所示。由图 7 可知:在 10、15、20 MW火源功率下,隧道纵向风速从 0.5 m/s 增至 2.5 m/s 时,安全疏散通道临界防烟风速分别从 1.07、1.21、1.41 m/s 降至 0.64、0.77、0.84 m/s,呈现显著负相关关系。纵向风速增大虽会通过增强火羽流偏转使烟气更易侵入疏散口,但同时降低了烟气温度导致疏散口热压减小,且后者影响占主导,故临界防烟风速随纵向风速增大而降低。

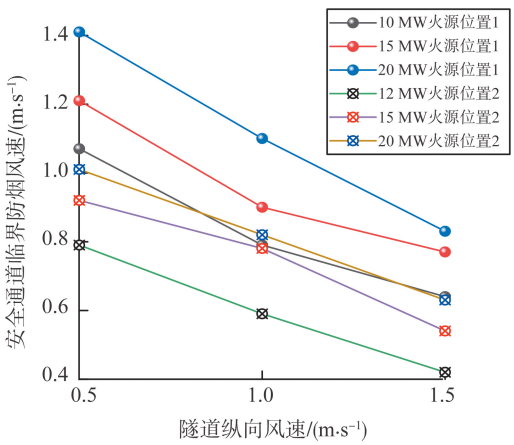
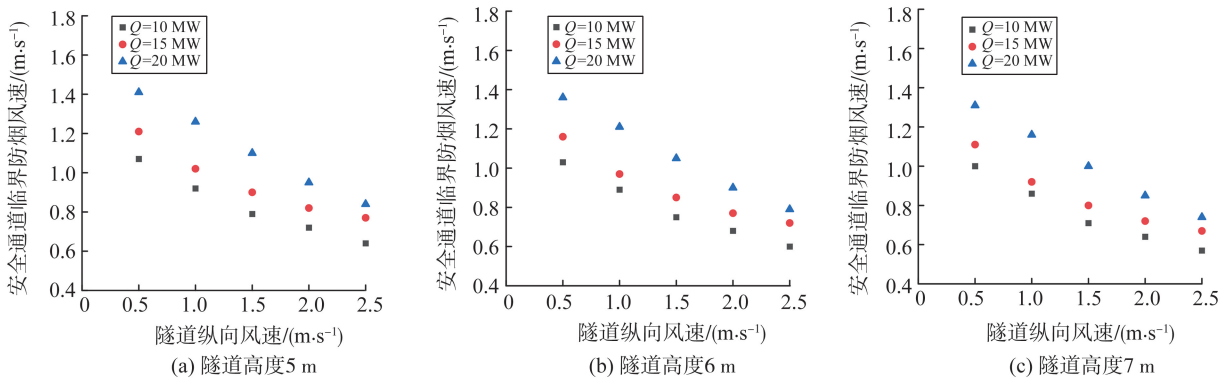
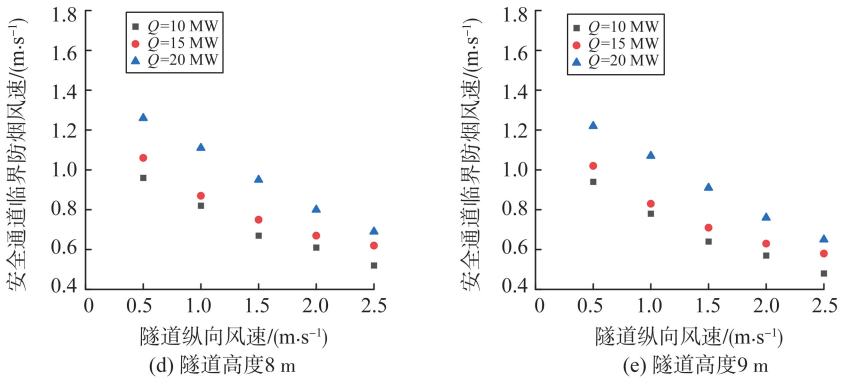


图 6 火源位置影响图

Fig.6 Influence of fire source locations



(a) 隧道高度5 m (b) 隧道高度6 m (c) 隧道高度7 m



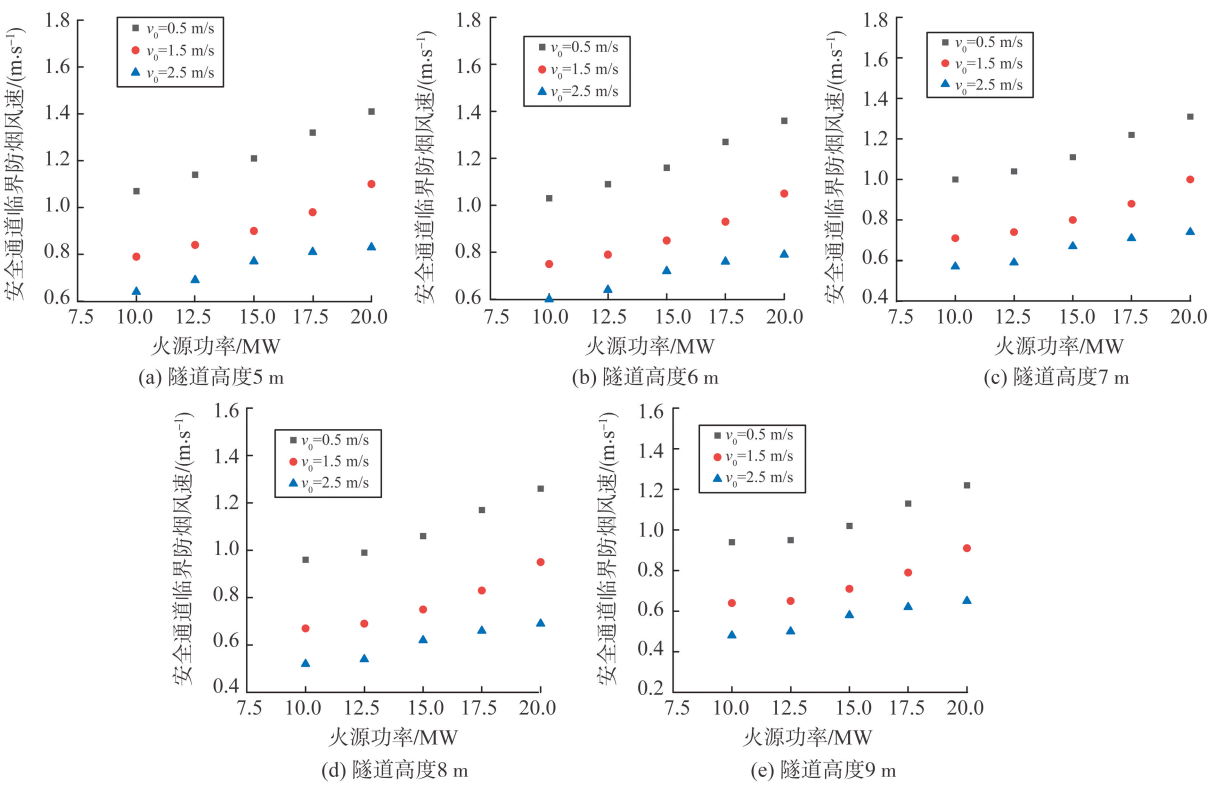
(d) 隧道高度8 m　　(e) 隧道高度9 m

图 7　不同纵向风速情况下安全疏散通道临界防烟风速关系

Fig.7　Relationship between critical smoke control velocity in safety evacuation passage under different longitudinal wind velocities

3.3　火源功率

为分析火源功率影响，在控制其他参数不变条件下开展数值模拟，不同火源情况下安全疏散通道临界防烟风速关系图如图 8 所示。由图 8 可知：当隧道纵向风速为 0.5、1.5、2.5 m/s 时，火源功率从 10 MW 增至 20 MW 对应安全疏散通道临界防烟风速分别从 1.07、0.79、0.64 m/s 升至 1.41、1.10、0.83 m/s，表明临界防烟风速随火源功率增大而线性递增。高功率火源产生的高温烟气量及热辐射更强，热烟气对疏散口侵入程度增加；纵向风作用下火羽流偏转后，上部空间烟气充满度提升，下部空间弥散加剧。两者共同作用使防烟需求增大，故临界风速随火源功率升高而增大。



(a) 隧道高度5 m　　(b) 隧道高度6 m　　(c) 隧道高度7 m

(d) 隧道高度8 m　　(e) 隧道高度9 m

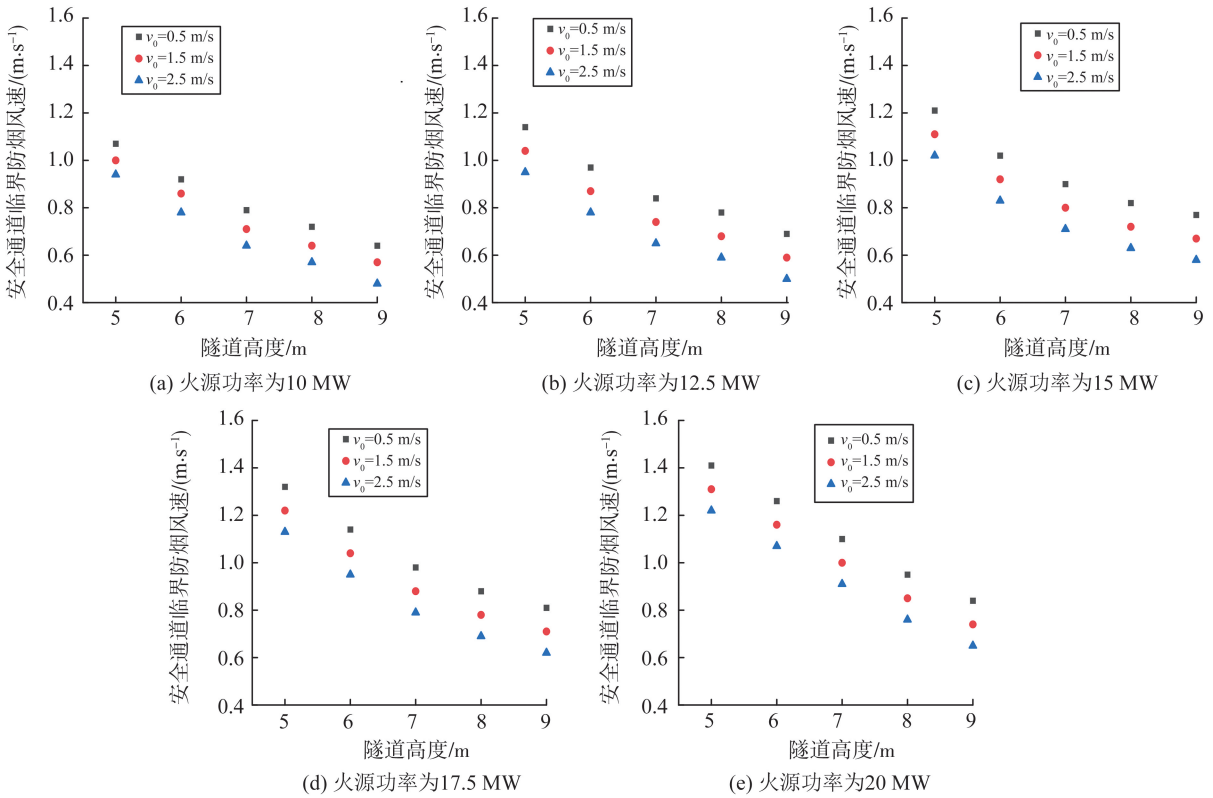
图 8　不同火源情况下安全疏散通道临界防烟风速关系

Fig.8　Relationship between critical smoke control velocity in safety evacuation passage under different fire source conditions

3.4　隧道高度

为分析隧道高度影响，控制其他参数不变开展数值模拟，不同隧道高度情况下安全疏散通道临界防烟风速关系图如图 9 所示。由图 9 可知：在纵向风速 0.5～2.5 m/s 范围内，隧道高度从 5 m 增至 9 m 时，安全疏散通道临界防烟风速对应从 0.64～1.07 m/s降至 0.48～0.94 m/s（如 1 m/s 风速下从 0.92 m/s降至 0.78 m/s），呈现显著负相关关系。高

隧道空间使火焰与顶板间形成更长烟气蔓延路径，延缓烟气沉积并缩短疏散口处滞留时间；同时隧道高度增加伴随火焰偏转角增大及疏散口温度降低，共同降低防烟需求。因此临界防烟风速随隧道高度增大而减小。



(a) 火源功率为10 MW　(b) 火源功率为12.5 MW　(c) 火源功率为15 MW

(d) 火源功率为17.5 MW　(e) 火源功率为20 MW

图 9　不同隧道高度情况下安全疏散通道临界防烟风速关系

Fig.9　Relationship between critical smoke control velocity in safety evacuation passage under different tunnel heights

3.5　临界弗罗德数 *Fr*

为验证基于临界 *Fr* 推导的安全疏散通道临界防烟风速模型对实际烟气控制的适用性，将各工况模拟结果代入式(7)和式(8)计算对应 *Fr* 值，图 10 为 27 个典型工况(火源功率为 10、15、20 MW，纵向风速为 0.5、1.5、2.5 m/s，隧道高度为 5、7、9 m)的数值模拟结果。

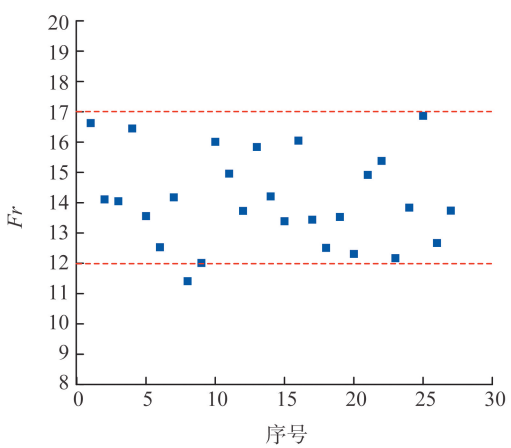


图 10　典型工况下 *Fr* 数示意图

Fig.10　Schematic illustration of froude number under typical fire scenarios

由图 10 可知：不同工况下计算得到的临界 *Fr* 存在一定波动，其整体分布范围约为 12~17，最小值为 11.41(火源功率 10 MW、纵向风速 1.5 m/s、隧道高度 9 m)。说明临界 *Fr* 并非严格常数，而是受火源热释放率、纵向气流惯性作用及隧道几何条件共同影响。

进一步分析发现，临界 *Fr* 随火源功率增大整体呈轻微下降趋势。例如，在隧道高度 7 m、纵向风速 1.5 m/s 条件下，火源功率由 10 MW 增加至 20 MW 时，临界 *Fr* 由 14.21 下降至 12.17。由于高热释放率条件下烟气浮力增强，使纵向气流惯性作用相对减弱所致。随着纵向风速增加，临界 *Fr* 整体亦呈下降趋势，说明风速增大后惯性力对烟气运动的控制作用增强。此外，隧道高度增加时，临界 *Fr* 也略有减小，这与高隧道条件下烟气浮力分散效应增强有关。

由式(1)可知，临界防烟风速与 *Fr* 满足反比平方根关系

$$v_{ac} \propto \frac{1}{\sqrt{Fr}}。 \tag{10}$$

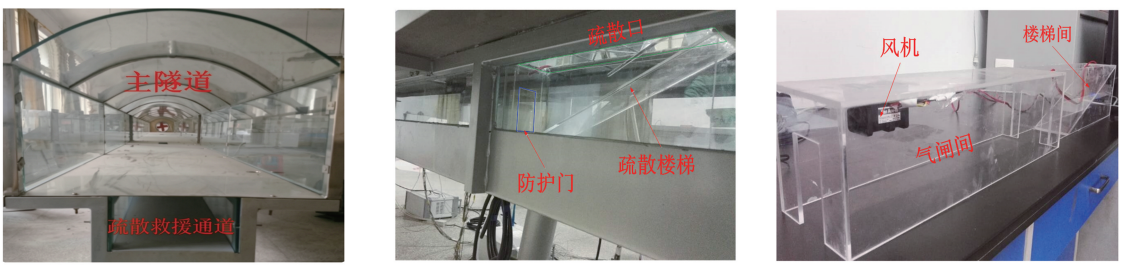
因此，当 *Fr* 取值增大时，预测得到的临界防

烟风速减小，可能导致防烟能力被高估。为保证模型预测的安全性，工程应用中宜采用偏保守的 Fr 取值。结合 27 组典型工况结果，本研究最终取 $Fr=12$ 作为安全疏散通道临界弗劳德数。此外，Fr 的非恒定性[24]表明，在超长隧道或复杂几何结构条件下，局部流场仍可能对临界风速产生影响，因此实际工程应用中仍需结合局部参数进行进一步修正。

3.6　缩尺寸模型验证

缩尺模型的制作忽略电缆廊道土建结构，重点关注底部人行疏散通道区域。模型遵循几何相似、运动相似和热相似三大准则。几何相似方面，相似比为 1∶10，试验模型总长 10 m，主隧道宽 525 mm、高 437 mm（316 mm 直墙+121 mm 弧形玻璃高），底部安全疏散通道宽 250 mm、高 350 mm，对应实际工程主隧道宽 5.25 m、高 4.37 m，安全疏散通道宽 2.5 m、高 3.5 m。根据 Froude 相似准则，运动相似方面，$Fr=v^2/gL$ 恒定，模型风速与实际风速之比为 0.316。热相似方面，火源功率相似比满足 $Q_m/Q_f=(L_m/L_f)^{5/2}=0.1^{2.5}=0.003\ 16$，式中 L 为特征长度，m；下标 m 和 f 分别表示模型与实际隧道。对应实际火源功率 10、15、20 MW 的模型火源功率分别为 0.032、0.047、0.063 MW。

隧道模型的主体采用 2 mm 厚镀锌钢板，主隧道底板为 2 mm 厚不锈钢材质，壁面粗糙度低于实际混凝土衬砌，但因流动已处于自模区且临界风速主要受浮力-惯性力平衡控制，壁面粗糙度差异对结果影响可忽略。为方便直接观测隧道内（包括底部安全疏散通道）烟气流动状况，模型顶部、观察侧立面全部由 8 mm 厚透明钢化玻璃制作，安全疏散通道内气闸间与楼梯间采用 5 mm 厚透明有机玻璃制成。疏散口通过一块可拆卸的不锈钢板实现可控开启的形式，其开口大小为 300 mm×40 mm。试验过程中，采用玻璃转子流量计控制燃料流量进而调节火源功率，最大量程为 1 m^3/h。在疏散口处布置多个测点，使用数字式风速仪 QDF-6 测量疏散口处流速，其量程为 0.05～30 m/s、分辨率 0.01 m/s；采用热电偶树和 UT3200 多路温度测试仪进行温度测量，其分辨率为 0.1 ℃，每组工况重复 3 次，取平均值作为最终结果。烟气流动观察采用片光源照射隧道纵向中心断面，通过拍照记录疏散口附近烟气流动情况。模型结构如图 11 所示。

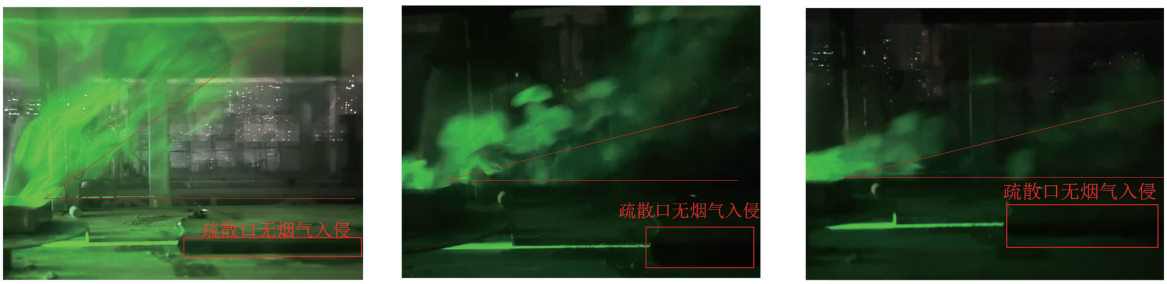


(a) 隧道结构　(b) 疏散楼梯　(c) 气闸间

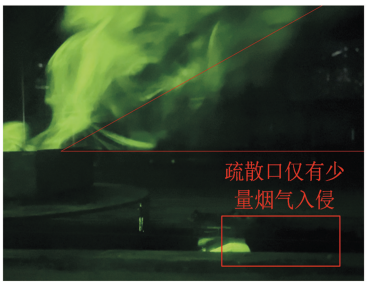
图 11　隧道缩尺模型

Fig.11　Tunnel scale model

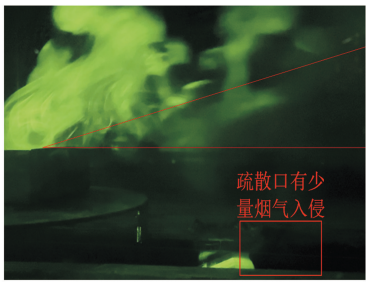
试验工况防烟效果图如图 12 所示，试验工况与对应模拟工况临界防烟风速对比图如图 13 所示。由图 12、13 可知：纵向风速增大使火羽流偏转角度增加、烟气贴近地面，加剧疏散口侵入风险；当安全疏散通道内加压送风风速超过临界值时，疏散口可实现无烟气入侵；理论公式（7）计算值与缩尺寸模型试验值偏差≤0.05 m/s，重合度高，验证了公式（7）的准确性及推导过程的合理性；缩尺寸模型试验结果与数值模拟结果吻合良好，验证了数值模型的可靠性，为后续大范围参数研究提供了方法支撑。



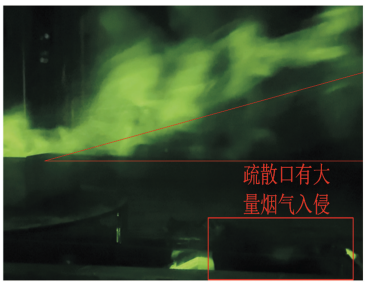
(a) v_0=0.5 m/s≥v_{ac}　(b) v_0=1.5 m/s≥v_{ac}　(c) v_0=2.5 m/s≥v_{ac}



(d) v_0=0.5 m/s＜v_{ac}



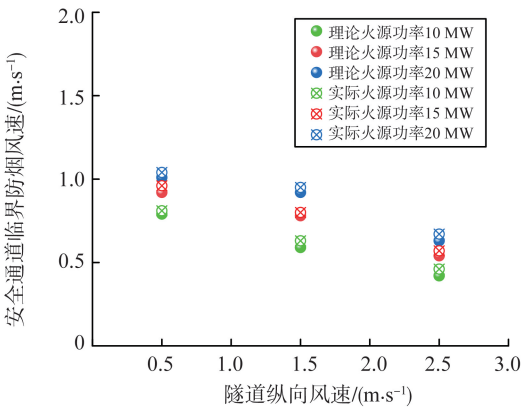
(e) v_0=1.5 m/s＜v_{ac}



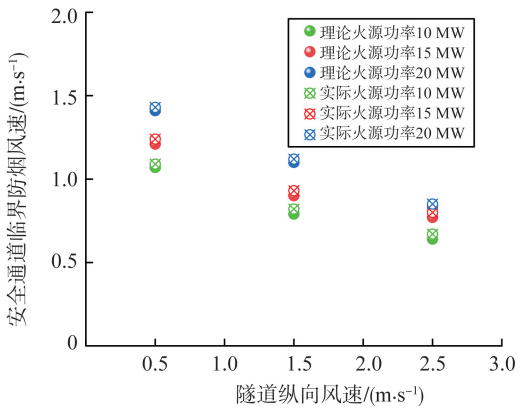
(f) v_0=2.5 m/s＜v_{ac}

图 12 试验工况防烟效果

Fig.12 Smoke control effect under test conditions



(a) 火源位于火源位置1



(b) 火源位于火源位置2

图 13 试验工况与对应模拟工况临界防烟风速对比

Fig.13 Comparison of critical smoke control velocities between test conditions and corresponding simulation conditions

4 结论

本研究针对盾构隧道安全疏散通道防烟风速不明的工程难题,通过理论分析、数值模拟与缩尺寸模型试验相结合的方法,系统研究了纵向风速、火源功率和隧道高度对临界防烟风速的影响规律,建立了基于 Froude 数的临界防烟风速理论计算模型,并通过试验验证了模型的有效性。

(1) 构建了基于 Froude 数的安全疏散通道临界防烟风速理论计算模型,推导出考虑纵向风速、火源功率和隧道高度的理论计算公式,填补了隧道下层安全疏散通道防烟理论的空白。

(2) 通过构建数值模拟模型,明确了关键影响因素作用规律:临界防烟风速随隧道纵向风速增大呈线性降低,随火源功率升高呈线性递增,随隧道高度增加呈指数型衰减;通过对比不同工况对临界防烟风速的影响,确定该模型临界 Froude 数为 12。

(3) 通过缩尺寸模型试验验证了理论模型的准确性,试验测得典型工况(Fr=12)下的临界防烟风速为 1.1 m/s,理论计算值与实测值偏差≤0.05 m/s,证明该模型可有效预测安全疏散通道临界防烟风速。

参考文献:

[1] Gao Yifan, Liu Zuwen, Guo Zhiguo, et al. Research on fire and smoke control in urban and underground confined spaces: advances, challenges, and prospects[J]. Smart Underground Engineering, 2026, 2(1): 33-54.

[2] Chu K K, Zhou D, Xu Z S, et al. Experimental investigation on the evacuation performance of pedestrians in an underwater shield tunnel with evacuation stairs in a fire scenario[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 156: 106247.

[3] 陈玉远. 盾构隧道底部疏散通道加压送风系统现场测试及优化研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 135-140.
Chen Yuyuan. Study of testing and optimization of pressurized air supply system at bottom of shield tunnel evacuation gallery[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 135-140.

[4] 王君, 倪天晓, 张新. 城市水下公路隧道火灾时人员安全疏散[J]. 消防科学与技术, 2012, 31 (5): 477-480.
Wang Jun, Ni Tianxiao, Zhang Xin. Safety evacuation from fire at urban underwater highway tunnel[J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(5): 477-480.

[5] Xie B C, Zhang S Q, Xu Z S, et al. Experimental study on vertical evacuation capacity of evacuation slide in road shield tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 97: 103250.

[6] 姜学鹏, 张剑高, 何超, 等. 铁路隧道横通道临界风速研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(4): 55-61.
Jiang Xuepeng, Zhang Jiangao, He Chao, et al. Study on critical wind velocity of cross passage in railway tunnel [J]. China Railway Science, 2017, 38(4): 55-61.

[7] 严磊. 双洞公路隧道火灾模式下横通道通风控制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019: 53-78.
YAN Lei. Study on ventilation control of cross passages under fire scenarios in twin-bore highway tunnels[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019:53-78.

[8] 姚勇征, 宋恪斌, 史聪灵, 等. 纵向通风下 T 型分岔隧道火灾烟气蔓延特性[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10): 115-120.
Yao Yongzheng, Song Kebin, Shi Congling, et al. Fire smoke spread characteristics of T-shaped bifurcated tunnel under longitudinal ventilation[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(10): 115-120.

[9] Zhou Y L, Bi H Q, Wang H L, et al. Critical velocity in the transverse passages of a railway tunnel rescue station with semi-transverse ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103064.

[10] 刘琪, 姜学鹏, 蔡崇庆, 等. 盾构隧道安全通道正压送风排烟的设计计算[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(2): 179-182.
Liu Qi, Jiang Xuepeng, Cai Chongqing, et al. On the principle of positive pressure air supply of safety channel in shield tunnel[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(2): 179-182.

[11] 谢宝超, 楚坤坤, 赵家明, 等. 超长距离盾构隧道疏散通道加压送风系统研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(11): 137-143.
Xie Baochao, Chu Kunkun, Zhao Jiaming, et al. Study on pressurized air supply system for evacuation passage of super long distance shield tunnel[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(11): 137-143.

[12] 张新, 徐志胜, 姜学鹏, 等. 水下公路隧道纵向疏散通道加压送风系统研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(6): 665-671.
Zhang Xin, Xu Zhisheng, Jiang Xuepeng, et al. Study on pressurization air supply system of longitudinal evacuation route in underwater highway tunnel[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(6): 665-671.

[13] 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.

[14] Li Y Z, Lei B, Ingason H. Theoretical and experimental study of critical velocity for smoke control in a tunnel cross-passage[J]. Fire Technology, 2013, 49(2): 435-449.

[15] 吴望一. 流体力学: 上册[M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2021: 145-161.

[16] Heskestad G, Delichatsios M A. Update: the initial convective flow in fire[J]. Fire Safety Journal, 1989, 15(6): 471-475.

[17] Karlsson B, Quintiere J. Enclosure fire dynamics[M]. Boca Raton, US: CRC Press, 1999: 64-66.

[18] Gasser I, Kraft M. Modelling and simulation of fires in tunnel networks[J]. Networks & Heterogeneous Media, 2008, 3(4): 691-707.

[19] Byrne E, Georgieva K, Carvel R. Fires in Ducts: a review of the early research which underpins modern tunnel fire safety engineering[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 306-314.

[20] 姜学鹏, 张子迪, 陈玉远. 隧道单向大间距点式排烟设计方法研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(6): 2220-2229.
Jiang Xuepeng, Zhang Zidi, Chen Yuyuan. Study on the design method of smoke extraction mode of one-way large-space point in tunnels[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(6): 2220-2229.

[21] McGrattan K B, Baum H R, Rehm R G. Fire dynamics simulator: technical reference guide[R]. Gaithersburg, US: National Institute of Standards and Technology, 2000: 8.

[22] 陈滔, 袁中原, 范毅腾. 隧道火灾自然通风最不利火源位置的研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(5): 633-635.
Chen Tao, Yuan Zhongyuan, Fan Yiteng. Study on the worst fire location in tunnel with natural ventilation[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(5): 633-635.

[23] 王方超, 张铎, 陈长坤, 等. 横通道通风对隧道火灾烟气蔓延影响的数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(3): 108-114.
Wang Fangchao, Zhang Duo, Chen Changkun, et al. Numerical simulation study on influence of cross-passage ventilation on spread of tunnel fire smoke[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(3): 108-114.

[24] Lanchava I, Javakhishvili G, Javakhishvili T, et al. Multifactorial dynamic model for analysis and evaluation of road tunnel fires[J]. Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences, 2025, 19(4): 40-48.

(编辑:张延欢)