

# 隧道火灾逃生情况对防火门压力影响的研究

汪丹杰

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年4月30日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月31日

## 摘要

隧道火灾中的人员逃生安全与防火门压力动态响应密切相关, 而现有设计标准对防火门布局与加压送风系统的协同机制缺乏系统性指导。本研究以直线型隧道逃生通道为对象, 通过建立三维流体动力学模型, 结合加压送风量、防火门间距及开启位置等参数, 系统分析不同逃生场景下防火门压力分布规律。研究采用数值模拟方法, 设计6种防火门开启模式进行探究。结果表明: 当开启的防火门距离送风口超过临界范围时, 门体最大压力达68.3~70.3 Pa, 显著超出规范允许范围, 可能导致门体无法开启; 而靠近送风口的开启模式下压力值稳定于34.5~42.5 Pa, 满足安全要求。此外, 连续开启相邻防火门的开门阻力较间隔开启模式有所增加, 表明在条件允许的情况下, 逃生路径规划需优先分散门体开启位置。本研究旨在为隧道火灾安全设计提供理论支撑与工程参考。

## 关键词

隧道火灾, 人员逃生, 防火门压力, 数值模拟

# Study on the Influence of Tunnel Fire Escape Situations on the Pressure of Fire Door

Danjie Wang

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2025; published: May 31<sup>st</sup>, 2025

## Abstract

The safety of personnel escape in tunnel fires is closely related to the dynamic response of fire door pressure. However, the existing design standards lack systematic guidance on the coordination mechanism of fire door layout and pressurized air supply system. In this study, the linear tunnel escape channel is taken as the object. By establishing a three-dimensional fluid dynamics model, combined with parameters such as pressurized air supply volume, fire door spacing, and opening

position, the pressure distribution law of fire doors under different escape scenarios is systematically analyzed. The research designs six kinds of fire door opening modes using numerical simulation methods. The results show that when the distance between the opening fire door and the air supply outlet exceeds the critical range, the maximum pressure of the door body reaches 68.3~70.3 Pa, which is significantly beyond the allowable range of the specification and may cause the door body to fail to open. The pressure value is stable at 34.5~42.5 Pa in the opening mode near the air supply port, which meets the safety requirements. In addition, the opening resistance of the continuous opening of adjacent fire doors is increased compared with the interval opening mode, indicating that the escape path planning needs to preferentially disperse the opening position of the door body when conditions permit. The purpose of this study is to provide theoretical support and engineering reference for tunnel fire safety design.

## Keywords

Tunnel Fire, Personnel Escape, Fire Door Pressure, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

隧道作为现代交通网络的重要组成部分,承担着城市交通和跨区域运输的关键职能。然而,由于其半封闭式结构、空间狭长及疏散难度高等特点,隧道火灾事故往往具有蔓延迅速、烟气积聚、能见度低等显著风险,极易造成严重的人员伤亡和财产损失[1]。因此,如何在火灾发生时有效控制烟气扩散并保障人员安全逃生,成为隧道安全设计的核心挑战之一。

防火门在实际使用中面临复杂的动态工况:一方面,加压送风系统需维持门体两侧压差以阻挡烟气侵入;另一方面,逃生过程中多扇防火门的集中开启可能引发压力波动,导致局部超压或欠压现象,进而影响防火门的正常启闭性能[2]。为此,房轶韵[3]总结有关机械加压送风系统超压的控制措施,提出余压阀和旁通调节阀两种控制方法。孙于萍等人[4]对正压区域疏散门开启的可靠性进行分析,以人群最大推力为限值,验算了标准防火门的开门力。卢政强[5]以加压送风防烟系统中防火门为研究对象,推导出防火门开启力的理论计算公式。李削云等人[6]采用经验计算理论和计算机软件相结合的方式,对被困人员的疏散行为特性进行了研究。甘廷霞等人[7]通过分析水下隧道疏散模式,得出逃生口最佳设置间距为 80 m 的结论。

基于上述背景,本研究以典型直线型隧道逃生通道为对象,采用数值模拟方法系统分析不同防火门开启模式对通道内压力分布的影响规律。通过构建三维流体动力学模型,结合加压送风量、防火门间距及开启位置等关键参数,明确防火门允许压力范围的临界条件,并提出优化送风策略与逃生路径规划的建议,为提升隧道火灾安全性能提供理论依据与工程参考。

## 2. 隧道逃生通道模型建立

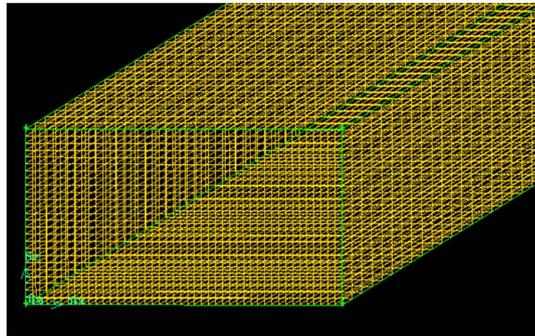
### 2.1. 模型参数概述

本研究以某隧道直线型疏散通道为研究对象,选取总长 3000 米的区段进行结构分析。该通道截面呈矩形结构,几何尺寸为 2.5 米(高)×4.5 米(宽)。在通道双侧墙面上,以 100 米为间隔等距配置了 29 组防火门装置,左右两侧门体呈镜像对称布局。所有防火门均采用规范要求的双开式构造,单樘门洞实测尺

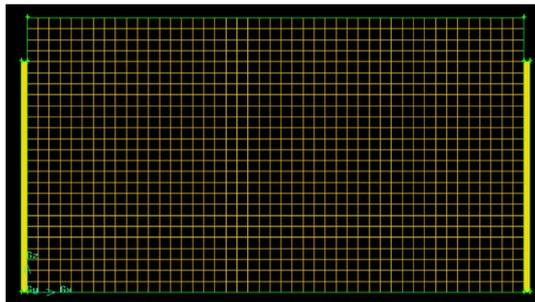
寸达到 2.1 米(高)×2 米(宽), 防火门的门缝宽度取 0.002 m~0.004 m。

## 2.2. 模型建立

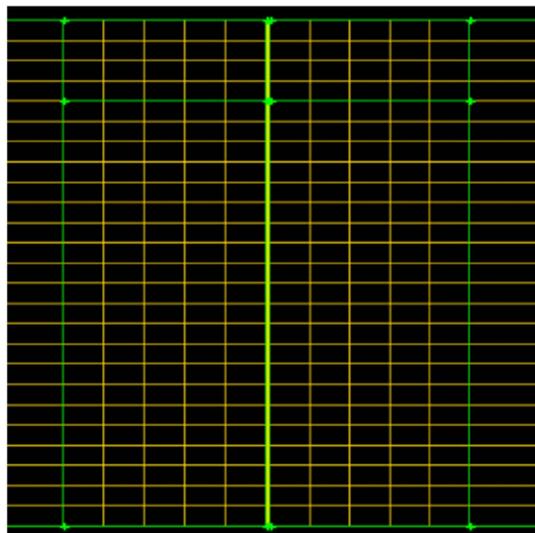
本研究基于 Gambit 构建了逃生通道三维仿真模型, 建模过程严格遵循实际工程参数来建立实体几何。在网格划分阶段采用结构化网格进行划分。网格划分示意图如图 1 所示。



(a)



(b)



(c)

**Figure 1.** Escape channel meshing diagram: (a) Escape channel grid main view; (b) Entrance section grid diagram; (c) Fire door grid diagram

**图 1.** 逃生通道网格划分图: (a) 逃生通道网格主视图; (b) 入口段网格图; (c) 防火门处网格图

数值模拟选用 Fluent 流体计算软件, 采用压力基求解器配合 SIMPLE 算法进行迭代求解。模型示意图和通道加压送风示意图如图 2、图 3 所示。

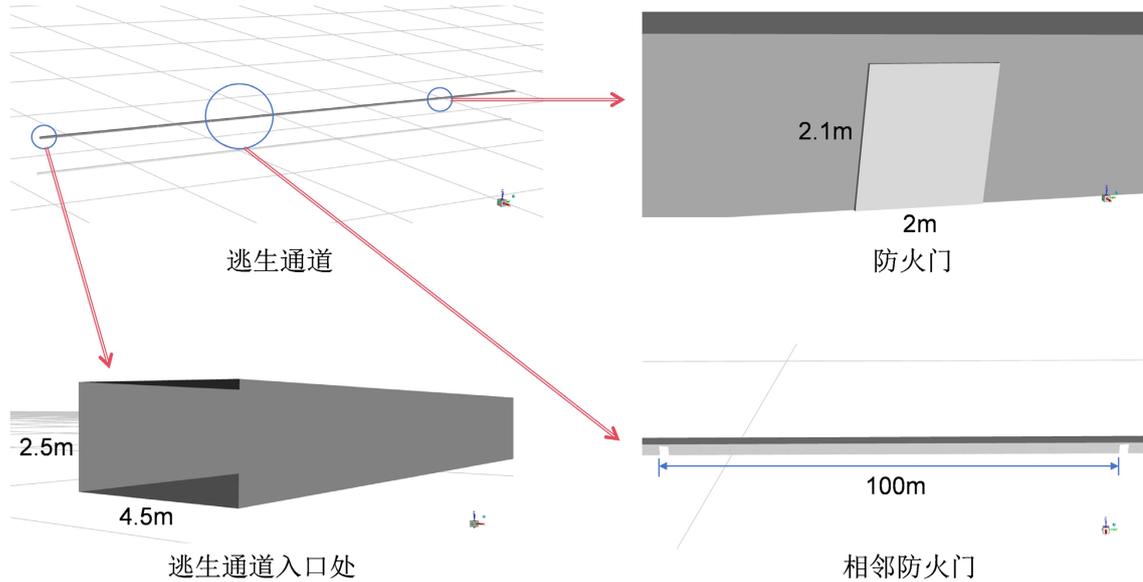


Figure 2. Escape channel model diagram  
图 2. 逃生通道模型图

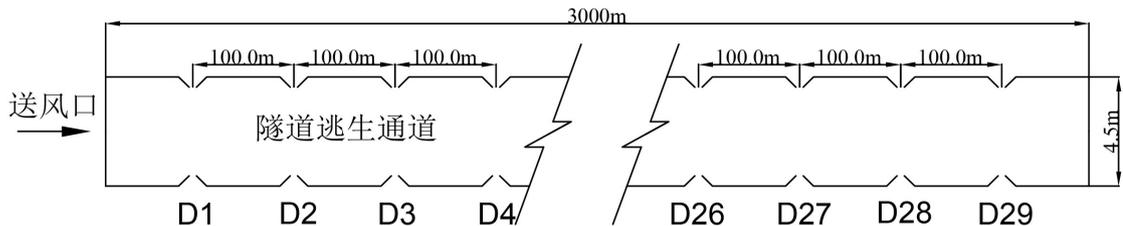


Figure 3. Safety channel pressurized air supply diagram  
图 3. 安全通道加压送风示意图

图 3 中, D1~D29 为防火门编号。

### 2.3. 加压送风量计算

为确保逃生通道在门体开启状态下的风速符合防烟性能要求, 加压送风系统的设计风量应包含以下关键组成部分: 1) 门体开启风量: 该风量基准值由门洞有效通风面积、规范风速标准、压差参数及开门持续时间共同确定。其核心功能在于通过维持特定气流速度实现烟气控制, 需重点考量门体结构参数与加压送风系统的动态响应特性[8]。2) 门缝渗透风量: 特指在门体开启工况下, 通过防火门密封结构产生的气体渗透[9]。虽然常规状态下该值量级较小, 但在系统高压差运行条件下, 其叠加效应可能会产生显著影响, 故必须作为系统风量计算的必要修正项。

防火门在规定风速下门洞开启所需风量可按下式计算:

$$Q = A \times v \times N \quad (1)$$

式(1)中,  $A$  为防火门门洞开启的面积( $\text{m}^2$ );  $v$  为开启门洞处的风速( $\text{m/s}$ );  $N$  为开启的防火门数量。

门开启时, 规定风速值下的其他门漏风总量应按下式计算[10]:

$$L = 0.827 \times A \times \Delta P^{\frac{1}{n}} \times 1.25 \times N_2 \quad (2)$$

式(2)中, A 为每个疏散门的有效漏风面积(m<sup>2</sup>), 疏散门的门缝宽度取 0.002 m~0.004 m;  $\Delta P$  为计算漏风量的平均压力差(Pa), 当开启门洞处风速为 0.7 m/s 时, 取  $\Delta P = 6.0$  Pa, 当开启门洞处风速为 1.0 m/s 时, 取  $\Delta P = 12.0$  Pa, 当开启门洞处风速为 1.2 m/s 时, 取  $\Delta P = 17.0$  Pa;  $n$  为指数(一般取  $n = 2$ ); 1.25 为不严密处附加系数;  $N_2$  为漏风疏散门的数量: 楼梯间采用常开风口, 取  $N_2 =$  加压楼梯间的总门数 -  $N_1$  楼层数上的总门数。

为使所选风机型号能够应对大多数隧道火灾情况, 本研究中风机风量由逃生通道同时开启 3 扇门计算获得[11]。根据式(1)、(2)计算可得, 门洞开启所需风量为 45,360 m<sup>3</sup>/h, 其余防火门漏风总量为 29,228 m<sup>3</sup>/h, 加压送风系统总计算风量  $Q$  为 74,588 m<sup>3</sup>/h。同时, 排烟系统的设计风量不应小于该系统计算风量的 1.2 倍[12], 因此该系统的加压送风量为 89,505 m<sup>3</sup>/h。

## 2.4. 边界条件设置

本研究在边界条件设置中, 入口采用速度入口, 出口定义为压力出口, 设置  $k-\epsilon$  湍流模型表征气流运动特征。为更好地模拟防火门漏风情况, 将处于关闭状态的防火门设置为多孔介质模型。数值计算采用二阶迎风格式离散控制方程[13], 当连续方程残差降至  $10^{-6}$  时判定收敛。具体边界条件设置如表 1 所示。

**Table 1.** Calculating model boundary conditions

**表 1.** 计算模型边界条件

模型位置	边界条件	参数
逃生通道送风口	速度入口边界	2.21 m/s
防火门门缝	压力出口边界	0 (与大气压相对值)
逃生通道四周	壁面边界	粗糙度 3 mm
逃生通道其余部分	壁面边界	粗糙度 3 mm

为更好地模拟防火门漏风情况, 本研究中对处于关闭状态的防火门采用多孔介质模型进行处理, 其粘性阻力和惯性阻力计算方法如表 2 所示。

**Table 2.** Velocity-pressure drop relationship table of porous media

**表 2.** 多孔介质速度 - 压降关系表[14]

速度(m/s)	压降(Pa)
0.272,486,772	5
0.408,730,159	10
0.544,973,545	15
0.613,095,238	20
0.681,216,931	25
0.749,338,624	30
0.817,460,317	35
0.885,582,011	40
1.021,825,397	45
1.089,947,09	50

由表 2 数据可以绘制出一条  $x$ 、 $y$  曲线以创建穿过这些点的趋势线，从而产生以下等式[15]:

$$\Delta P = 29.101v^2 + 15.937v \quad (3)$$

其中,  $\Delta P$  是压降,  $v$  是速度。

简单均质多孔介质的情况:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v_i + C_2 \frac{1}{2}\rho|v|v_i\right) \quad (4)$$

其中  $S_i$  是  $i$ th ( $x$ ,  $y$ , or  $z$ ) 动量方程的源项,  $|v|$  是速度的大小,  $\alpha$  是磁导率,  $C_2$  是惯性阻力因子。

将等式(3)和(4)进行比较, 得出以下曲线系数:

$$29.101 = C_2 \frac{1}{2}\rho\Delta n \quad (5)$$

其中  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $\Delta n$  为多孔介质的厚度(m)。计算可得惯性阻力系数  $C_2 = 950.237$ 。

同样:

$$15.937 = \mu D \Delta n \quad (6)$$

其中  $\mu = 1.7894 \times 10^{-5}$ 。计算可得粘性阻力系数  $D = 17,812,674.64$ 。

该数值模型采用结构化网格划分方法, 针对防火门、送风口等关键区域实施局部网格加密处理以提升计算精度。在保证模拟精度的前提下, 通过网格数量优化策略有效降低了计算成本。模型验证采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)作为量化指标, 当计算误差低于 2% 阈值时判定模型验证合格[16]:

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N \left( \frac{V_m - V_{m-1}}{V_m} \right)^2} < 0.02 \quad (7)$$

式中:  $V_m$  为采用第  $m$  次网格时得到的速度,  $V_{m-1}$  为采用第  $m-1$  次网格时得到的速度;  $N$  为所验证的样本点数。

本研究依据不同网格密度条件下的门缝特征数据, 结合公式(7)开展数值计算。对比分析表明: 210 万与 410 万网格单元模型间的均方根误差(RMSE)达到预设精度标准(<2%); 而 172 万网格模型与其他两类网格的 RMSE 均超出误差允许范围。基于计算精度与资源效率的综合考量, 最终选定 210 万网格规模的通道模型作为研究对象。

### 3. 数值模拟

本研究通过建立不同案例, 运用数值模拟技术, 系统分析了隧道火灾场景中不同逃生情况对防火门压力影响的研究。旨在平衡好防火门的压力, 在保证其防烟性能的同时, 也要保证火灾发生时防火门能够顺利打开。

#### 3.1. 防火门允许压力范围计算

根据建筑设计防火规范, 隧道的避难设施内应设置独立的机械加压送风系统, 其送风的余压值应为 30 Pa~50 Pa [17]。

同时, 防火门的最大允许压力差可按下列公式计算[18]:

$$P = \frac{2 \times (F' - F_{dc}) \times (W_m - d_m)}{W_m \times A_m} \quad (8)$$

$$F_{dc} = \frac{M}{W_m - d_m} \quad (9)$$

式中,  $P$  为疏散门的最大允许压力差(Pa);  $A_m$  为门的面积( $m^2$ );  $d_m$  为门把手到门铰的距离(m), 为 60 mm;  $M$  为闭门器的开启力矩(N·m), 对应 3 号闭门器 45 N·m;  $F'$  为门的总推力(N), 一般取 110 N;  $F_{dc}$  为门把手处克服闭门器所需的力(N);  $W_m$  为单扇门的宽度(m)。

根据公式(8)和(9)计算可得, 该隧道逃生通道防火门的最大允许压力差为 56 Pa, 根据防火门的面积可换算为 117.6 N 的开门力, 而成年人的最大推力一般为 110 N, 因此该计算符合结果。逃生通道内部需维持 30~50 Pa 的送风余压以保证通道的防烟性能, 结合二者结果可得该防火门的允许压力范围为 30~56 Pa。

### 3.2. 案例设计

本研究通过建立 6 个不同的防火门开启案例, 来探讨隧道火灾逃生情况对防火门压力的影响。这 6 个案例均为同一个隧道逃生通道模型, 唯一的区别在于其开启的防火门位置不同, 防火门的设置及各个防火门的编号如表 3 所示。

Table 3. Case design model

表 3. 案例设计模型

序号	通道尺寸	通道长度	开启防火门编号
Case 1	2.5 m × 4.5 m	3000 m	D1、D2、D3
Case 2	2.5 m × 4.5 m	3000 m	D14、D15、D16
Case 3	2.5 m × 4.5 m	3000 m	D27、D28、D29
Case 4	2.5 m × 4.5 m	3000 m	D1、D3、D5
Case 5	2.5 m × 4.5 m	3000 m	D13、D15、D17
Case 6	2.5 m × 4.5 m	3000 m	D25、D27、D29

### 3.3. 结果与分析

对表 3 中 6 个 Case 分别进行数值模拟, 记录每个 Case 中各个防火门的压力变化情况并对其进行整合和分析。具体情况如图 4 所示。

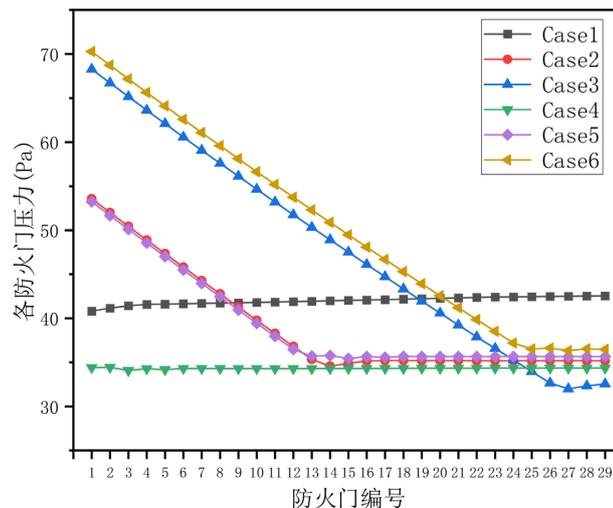
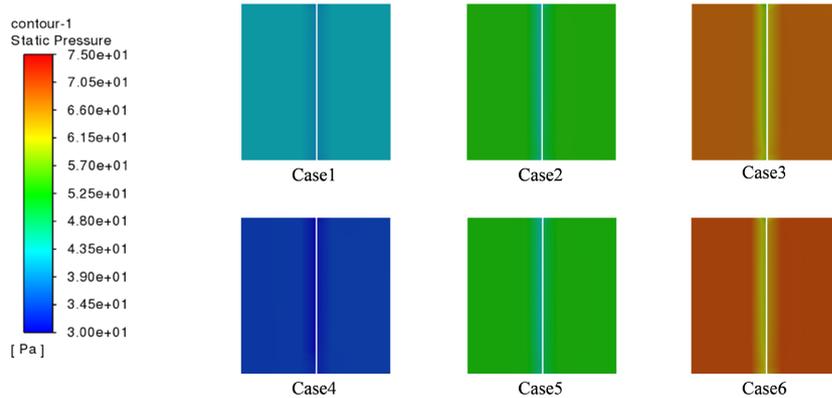


Figure 4. The pressure change diagram of each fire door under different opening conditions  
图 4. 不同开启情况下各防火门的压力变化图

由图 4 可知, 该隧道逃生通道防火门各个 Case 的压力均满足隧道防烟要求(余压保持在 30~50 Pa), 然而 Case 3 和 Case 6 的防火门存在超压情况, 这说明了开启的防火门距离送风口过远会存在火灾时无法打开的情况。通过分别分析 Case 1、Case 2、Case 3 和 Case 4、Case 5、Case 6 这两组数据, 可以看出开启的防火门距离送风口越远, 逃生通道内的压力越不稳定; 通过分别分析 Case 1、Case 4 和 Case 2、Case 5 以及 Case 3、Case 6 这三组数据, 可以看出火灾时通过开启连续的三扇防火门进行逃生所需的开门力比间隔开启三扇防火门所需的开门力大, 这在 Case 1 和 Case 4 之间尤为显著。各案例中防火门的最大压力、最大防火门压力云图、速度云图分别见表 4、图 5 和图 6。

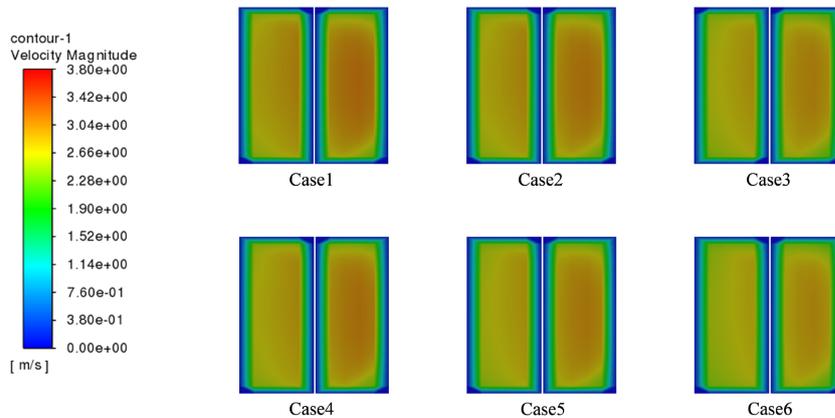
**Table 4.** The maximum fire door pressure gauge in each case  
**表 4.** 各案例中最大防火门压力表

案例序号	最大防火门压力
Case 1	42.5 Pa
Case 2	53.6 Pa
Case 3	68.3 Pa
Case 4	34.5 Pa
Case 5	53.2 Pa
Case 6	70.3 Pa



**Figure 5.** Maximum fire door pressure cloud diagram

**图 5.** 最大防火门压力云图



**Figure 6.** The velocity cloud diagram at the opening of the door hole

**图 6.** 开启门洞处速度云图

值得注意的是,各个 Case 中防火门的最大压力差异较为明显,而开启门洞处的流速基本相同,这是因为本研究中的各个案例均保持一致,唯一变化的仅是开启的防火门位置不同。

#### 4. 结论

本研究通过数值模拟方法系统分析了隧道火灾逃生过程中不同防火门开启情况对门体压力的影响规律,揭示了防火门压力分布与逃生通道加压送风系统的动态响应特性。主要结论如下:

1) 当开启的防火门距离送风口较远时,通道内压力分布呈现显著不均衡性,可能导致部分门体难以开启,威胁人员逃生安全。设计风量为 89,505 m<sup>3</sup>/h 的加压送风系统能够有效维持通道内余压以达到防烟效果,但需结合防火门开启位置的动态调整。同时,连续开启多扇防火门所需的开门力显著高于间隔开启模式,表明在条件允许的情况下,逃生路径规划应避免集中开启相邻门体,以降低开门阻力。

2) 在工程实践中,隧道逃生通道设计中需综合考虑防火门位置、送风口布局与风机性能的协同优化。

#### 参考文献

- [1] 谭因军,王柯力,张恒,等. 10 km 级特长公路隧道自然风对火灾烟气蔓延的影响[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(1): 103-113.
- [2] 吴延奎,蒋能飞. 高层建筑前室机械加压送风系统旁通泄压阀超压控制措施分析[J]. 制冷, 2021, 40(2): 73-76.
- [3] 房铁韵. 机械加压送风系统超压控制措施分析[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(5): 68-71, 30.
- [4] 孙于萍,赵国敏,梁茵,等. 正压区域疏散门开启可靠性分析[J]. 建筑热能通风空调, 2018, 37(10): 72-74.
- [5] 卢政强. 防火门开启力的理论计算及影响因素分析[C]//中国消防协会. 中国消防协会科学技术年会论文集: 2016 年卷. 北京: 中国科学技术出版社, 2016: 89-91.
- [6] 李削云,马险峰,王俊淞. 公路隧道火灾逃生疏散研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(5): 66-71.
- [7] 甘廷霞,江梦梦,张泽江. 海底公路隧道纵向疏散模式研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(4): 460-463.
- [8] 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.
- [9] 田利伟,于靖华,毕庆焕,等. 某特大型铁路站房渗透风控制与新风利用技术低碳特性[J]. 暖通空调, 2024, 54(S2): 283-287.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 51251-2017 建筑防烟排烟系统技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [11] 孙于萍,赵国敏. 加压送风系统压力计算方法研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(4): 492-494.
- [12] 姜学鹏,屈裕坤,袁丁. 特长跨海公路隧道竖井组协同风量与防排烟设计研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(12): 4598-4607.
- [13] 宁义君,顾洪宇,朱东宇,等. 迎风格式在水滴欧拉方程数值求解中的应用[J]. 航空科学技术, 2024, 35(1): 105-114.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50073-2013 洁净厂房设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [15] Ansys Inc (2019) Ansys Fluent 12. 0 UDF Manual. [https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/udf/main\\_pre.htm](https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/udf/main_pre.htm)
- [16] Chai, T. and Draxler, R.R. (2014) Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)? Arguments against Avoiding RMSE in the Literature. *Geoscientific Model Development*, 7, 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50016-2014 建筑设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 51251-2017 建筑防烟排烟系统技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.