

中文引用格式:唐君磊,李元洲. 竖井倾斜角度与环境压力对烟气吸穿的影响研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(8):180–187.

英文引用格式:TANG Junlei, LI Yuanzhou. Research on influence of shaft incline angle and ambient pressure on smoke plug-holing[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8): 180–187.

竖井倾斜角度与环境压力对烟气吸穿的影响研究^{*}

唐君磊, 李元洲^{**} 副研究员

(中国科学技术大学 火灾安全全国重点实验室, 安徽, 合肥 230026)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.1341

资助项目:中央高校基本科研业务费专项资金。

【摘要】 为更好地设计高海拔地区隧道竖井排烟,利用数值模拟方法,计算分析环境压力以及竖井倾斜角度对隧道火灾烟气吸穿效应的影响。通过FDS软件计算得到不同工况温度场,引入吸穿高度并判断各工况吸穿程度;结合吸穿程度重新定义无量纲理查森 Ri' 数,并提出吸穿高度的理论计算模型,推导出发生吸穿的临界 Ri' 数(Ri'_c)。结果表明:吸穿高度随角度的增加而增加,随环境压力的增大而升高; Ri' 数随环境压力的降低而降低,随竖井倾角的增加而增大;在同一环境压力下, Ri'_c 数随竖井倾斜角度的增加而降低,利用 Ri' 数与 Ri'_c 数的关系可判断是否发生完全吸穿效应。

【关键词】 竖井倾斜角度; 环境压力; 吸穿效应; 吸穿高度; 隧道火灾

Research on influence of shaft incline angle and ambient pressure on smoke plug-holing

TANG Junlei, LI Yuanzhou

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230026, China)

Abstract: To better design the smoke exhaust system for tunnel shafts in high-altitude areas, numerical simulation methods were used to calculate and analyze the effects of environmental pressure and shaft inclination angle on the smoke plug-holing effect during tunnel fires. The temperature fields under different working conditions were obtained using FDS simulations. The plug-holing height was introduced to determine the degree of plug-holing for each working condition. Combined with the degree of plug-holing, the dimensionless Richardson number (Ri') was redefined, and a theoretical calculation model for the plug-holing height was proposed. The critical Ri' number (Ri'_c) for the occurrence of plug-holing was derived. The results show that the plug-holing height increases with the increase of the angle and environmental pressure. The Ri' number decreases with the decrease of environmental pressure and increases with the increase of the shaft inclination angle. Under the same environmental pressure, Ri'_c number decreases with the increase of the shaft inclination angle. The relationship between Ri' number and the Ri'_c number can be used to determine whether a complete plug-holing effect occurs.

Keywords: shaft inclined angle; environmental pressure; plug-holing effect; plug-holing height; tunnel fire

^{*} 文章编号:1003-3033(2025)08-0180-08; 收稿日期:2025-03-20; 修稿日期:2025-05-18

^{**} 通信作者:李元洲(1973—),男,山东青岛人,博士,副研究员,主要从事火灾烟气流动与控制等方面的研究。E-mail: yzli@ustc.edu.cn。

0 引 言

西部高海拔地区隧道数量增加和规模扩大带来的隧道火灾对人民生命财产安全的威胁不可轻视^[1]。烟气是隧道火灾中对人员威胁最大的因素,高原低压低氧环境以及隧道内部设置的竖井都会对隧道内烟雾运动产生影响。

隧道火灾烟气运动中,通过比较无量纲理查森数(Ri^* 数)和临界 Ri^* 数(Ri_c^* 数)可以判段竖井的排烟效果^[2], Ri^* 数主要与环境压力和竖井高度相关。JI Jie^[3]、YAN Zhiguo^[4]等认为,环境压力的降低导致空气密度的下降并进一步减弱空气卷吸效应。张念等^[5-6]总结给出低压环境下隧道火灾的燃烧特性及在人眼特征高度处烟气层分布特性。纪慧琢^[7]和田源^[8]等采用数值模拟分析得到低环境压力下的隧道火灾烟气运动分布特性。杜涛等^[9]通过试验研究得出,在同一隧道截面上,某点处烟气温度随着该点与隧道顶棚之间距离的增大而近似呈线性降低。XUE Dapeng 等^[10]等模拟计算自然通风条件下竖井倾斜角度对烟气运动状态的影响,给出隧道断面排出气体浓度公式。YAO Yongzheng 等^[11]分析倾斜竖井对排烟效果中的改善作用。樊勇杰^[12]定性分析得到不同环境压力下的 Ri_c^* 数,定量分析竖井烟气吸穿程度与环境压力之间的关系。梁建兴^[13]探究纵向通风对倾斜竖井排烟效果的影响,提出合适的纵向风能抑制倾斜竖井烟气吸穿效应,提高排烟效率,但并没有给出倾斜竖井发生吸穿效应的判据。黄天荣等^[14]进行 1:10 缩尺寸试验,最终给出侧向倾斜竖井排烟效果弱于垂直型竖井的结论。

综上,目前针对不同环境压力下倾斜型竖井对隧道火灾烟气吸穿影响的研究缺乏。因此,笔者拟以高原环境下的隧道为研究对象,分析在不同环境压力中竖井倾斜角度对隧道火灾烟气吸穿效应的影响,以期能为高海拔地区隧道倾斜竖井自然排烟设计提供理论依据及实践参考。

1 隧道火灾场景设置及验证分析

1.1 隧道倾斜竖井及火源设置

火灾实体试验难以改变环境压力,数值模拟具有方便快捷地调节试验参数和环境条件的优点。多数情况下,火灾动力学模拟器(Fire Dynamics Simulator,FDS)软件采用的是混合分数燃烧模型,该模型假定可燃气体和氧气一旦混合便立即燃烧,

且该过程与温度无关。同时,在模拟隧道火灾中烟流动时假设压力扰动可以无限快速地传播,以精确计算火场温度、烟气相关特征。

受计算机在弧形结构处理方面的限制,很多模拟计算甚至小尺寸试验中将拱形隧道转换成相同水利直径的矩形隧道,结合文献[15],文中也沿用该处理办法。

在 FDS 中选择搭建一条全尺寸隧道模型,隧道长度 L 为 200 m,宽度 W 为 10.8 m,高度 H 为 7.5 m。竖井中心位于火源右侧 40.5 m 处,竖井开口的长度 l 和宽度 w 均为 3 m,竖井竖直高度 h 为 5 m,具体设置如图 1 所示。模拟选取环境压力 P_a 为 65 和 100 kPa,竖井倾斜角度 θ 分别为 0(无排烟对照组)、30、45、60、75、90°,工况见表 1。单数号工况 $P_a = 65$ kPa,双数号工况 $P_a = 100$ kPa。

表 1 模拟工况设置

Table 1 Simulated conditions setting	
工况	$\theta/(^{\circ})$
1—2	0
3—4	30
5—6	45
7—8	60
9—10	75
11—12	90

火源设定在隧道的纵向中心线上,距隧道左端 81 m,尺寸为 2 m×2 m。根据《公路隧道通风设计细则》^[16]推荐的火灾规模,火源功率设置为 5 MW,以模拟隧道最常见的汽车火灾。考虑最危险的火灾情况,火源类型设置为定常火源。隧道的顶棚、侧壁及底板墙体设置为混凝土;隧道两端及竖井开口处均为开放状态;初始环境温度为 20 ℃。

在竖井开口中心下方设置 18 个竖向温度测点,最高点从 7.3 m 开始,间距为 0.4 m。为计算 Ri^* 数,在无排烟隧道原竖井开口下方设置烟气层厚度测点及一系列竖向温度、速度和密度测点。水平方向距隧道左开口 9 m,竖直方向距顶棚 0.2 m 处,在隧道中心线设置 163 个温度探测点,水平间距为 1 m。沿隧道纵向中心线设置贯穿竖井的温度切片。

1.2 网格独立性分析

MCGRTTAN 等^[17]推荐网格尺寸位于 $0.25D^*$ 和 $0.0625D^*$ 之间,火源特征直径 D^* ^[17]为:

$$D^* = (Q/\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g})^{2/5} \tag{1}$$

式中: D^* 为火源特征直径,m; g 为重力加速度,m/s²; Q 为火源热释放速率,kW; T_0 为环境初始温度,K;

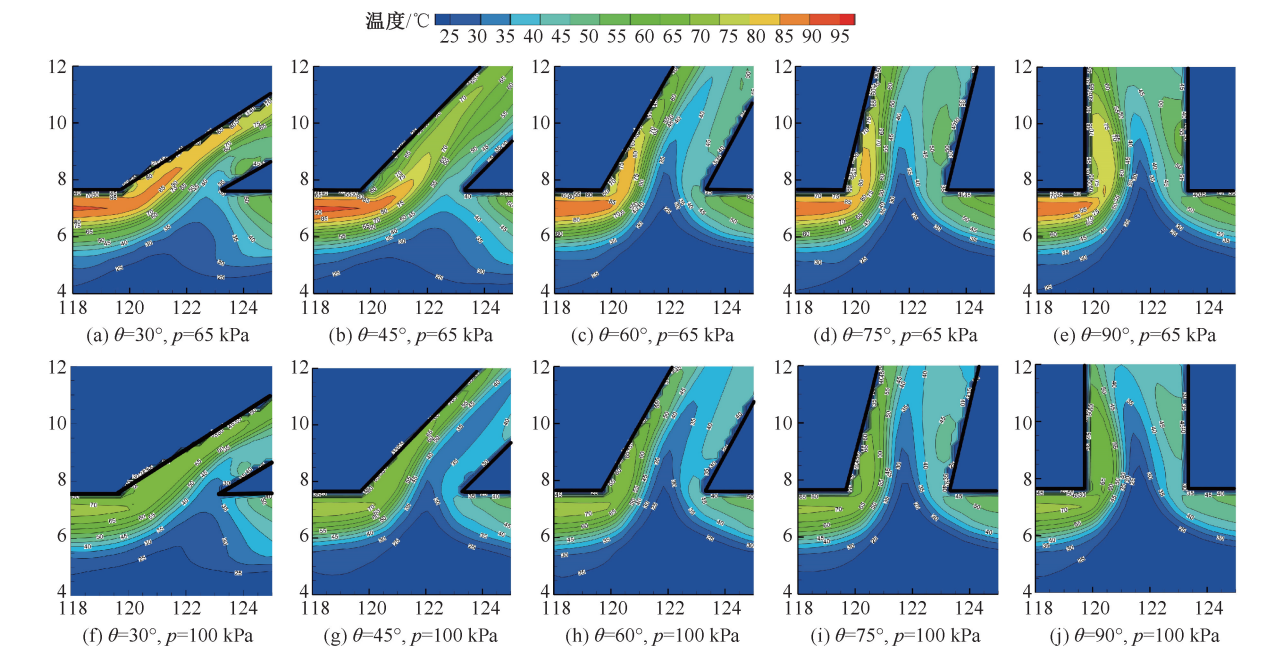


图 4 65 和 100 kPa 压力时稳定状态下不同竖井倾角时的竖向截面温度场

Fig. 4 Vertical temperature section of under different shaft dip angles under steady state at 65 and 100 kPa pressure

表 2 不同工况吸穿效应

$\theta/(^{\circ})$	P_a/kPa	
	65	100
30	未吸穿	未吸穿
45	未吸穿	临界状态
60	吸穿	吸穿
75	吸穿	吸穿
90	吸穿	吸穿

2.2 不同 θ 和 P_a 下的烟气运动模式

Ri' 数^[2,20] 为烟气竖向热浮力 F_v ^[21] 与水平惯性力 F_h 之比:

$$Ri' = F_v / F_h = (\Delta \rho g h A_s) / (\rho_{s0} v^2 d w) \tag{3}$$

$$F_v = g P_a h (1/T_0 - 1/T_s) A_s / R \tag{4}$$

式中: $\Delta \rho$ 为无排烟时烟气与环境空气的密度差, kg/m^3 ; ρ_{s0} 为无排烟时的烟气密度, kg/m^3 ; v 为无排烟时竖井开口下方烟气的水平流速, m/s ; A_s 为竖井水平横截面积, m^2 ; d 为无排烟时竖井开口下方烟气层厚度, m ; w 为竖井开口宽度, m ; h 为竖井竖直高度, m ; T_s 为竖井中空气的绝对温度, K ; R 为通用气体常数。

Ri' 数中 F_h 也受 P_a 的影响。 F_h 中的水平流速与羽流上升速度成正比, 而羽流上升速度又受环境压力的影响^[22-23]:

$$v \propto \sqrt{(2.18 g (P_a / P_0)^{9/25}) / z} \tag{5}$$

式中: v 为烟气的水平流速, m/s ; P_0 为标准大气压, kPa ; z 为火源上方高度, m 。

综上, Ri' 数与 P_a 有关, P_a 降低时, F_h 随烟气层水平流速的增加而增大, F_v 会逐渐减小, 进而 Ri' 数随之减小。

由无排烟工况时的烟气层数据和式 (3) 计算得到不同模拟工况下的 Ri' 数, 见表 3。 $P_a = 101 \text{ kPa}$ 时竖直竖井刚好发生吸穿效应的 Ri'_c 数为 1.4^[20], $P_a = 60 \text{ kPa}$ 时 Ri'_c 数为 1.1^[12]。由于 Ri' 数与 Ri'_c 数均未考虑 θ 的影响, 因此, 不适用于倾斜竖井。

图 5 为倾斜竖井开口下方烟气的受力分析。 F_v 沿竖井倾斜方向的分力为驱动力 F_d , 随着 θ 的增加, F_d 不断增加, 吸穿效应也就更显著, 驱动力在烟气吸穿过程中起到关键作用。同一环境条件下, F_d 随 θ 发生变化, 因此, F_d 更适合用于 Ri' 数的判定。

重新定义 Ri' 数为:

$$Ri' = F_d / F_h = (\Delta \rho g h A_s \sin \theta) / (\rho_{s0} v^2 d w) \tag{6}$$

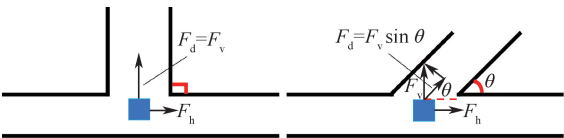


图 5 受力分析

Fig. 5 Force analysis

表 3 无排烟时竖井开口下方的烟气层参数

Table 3 Parameters of smoke layer below the shaft opening without smoke exhaust

P_a/kPa	烟气厚度/m	烟气速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	烟气密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	环境密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Ri'	Ri'_c
65	2.71	1.92	0.64	1.17	2.79	$1.1^{[12]}$
100	2.60	1.54	1.03	0.76	3.16	$1.4^{[20]}$

2.3 不同 θ 对 h_p 的影响分析

图 6 和图 7 分别为 P_a 为 100 和 65 kPa 时, θ 为 $45^\circ \sim 90^\circ$ 下竖井内部温度场及各工况下的 h_p 模拟数据。 $P_a = 100 \text{ kPa}$ 时 θ 从 90° 减小为 75° , h_p 下降 22.77%, 而 θ 从 45° 减小为 30° , h_p 下降 68.71%, h_p 随 θ 的降低变化显著, 当 θ 越小, h_p 下降程度越显著。 h_p 随 P_a 的减小而降低, 并且 θ 越大, P_a 对 h_p 的影响越显著。

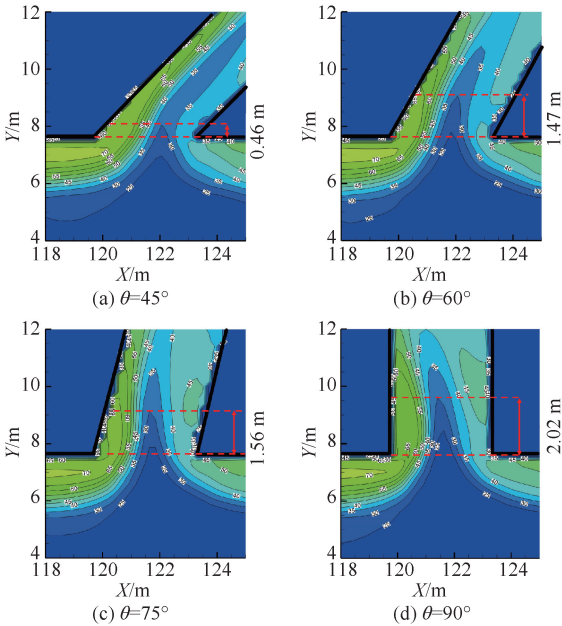


图 6 $P_a = 100 \text{ kPa}$ 时不同 θ 下的 h_p 模拟数据

Fig. 6 Simulated data of h_p at different θ when

$P_a = 100 \text{ kPa}$

图 8 为竖井内烟气运动示意。面积为 A_s 、烟气层厚度为 d 的烟气整体蔓延至竖井开口下方时, 烟气团会受到沿竖井倾斜方向向上的驱动力作用。当烟气开始向竖井内部运动后由于受到沿竖井倾斜方向上的驱动力影响开始沿竖井倾斜方向向上运动。本质上, 吸穿效应是因为竖井内部的烟雾向上运动时竖井开口附近的烟雾没有及时填满竖井开口, 使环境空气进入到竖井内部。假设烟雾由竖井开口一侧运动到另一侧, 恰好填满竖井开口, 在此期间烟气层在竖井内不断向上运动, h_p 为:

$$h_p = (F_d l^2 \sin \theta / 2 m v^2) - d = (\Delta \rho g h A_s l \sin^2 \theta / 2 \rho_{s0} d w v^2) - d \quad (7)$$

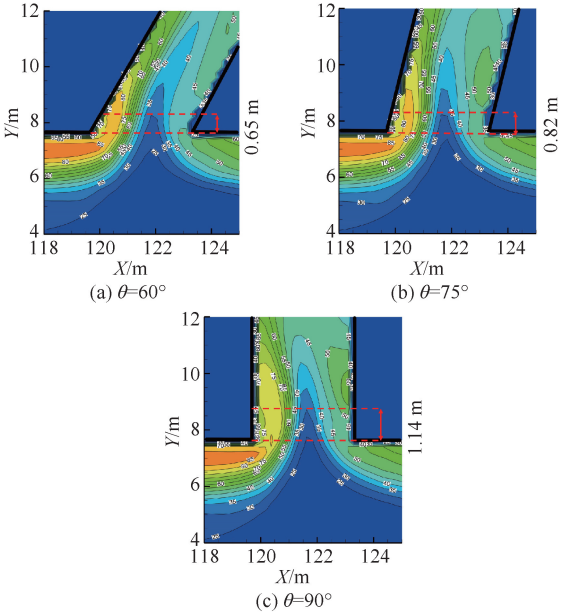


图 7 $P_a = 65 \text{ kPa}$ 时不同 θ 下的 h_p 模拟数据

Fig. 7 Simulated data of h_p at different θ when

$P_a = 65 \text{ kPa}$

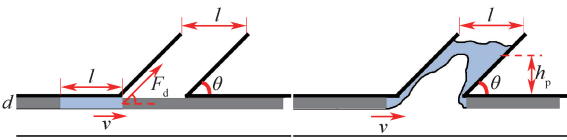


图 8 竖井内烟气运动

Fig. 8 Smoke movement diagram in shaft

式(7)可进一步简化为:

$$h_p = (l Ri' \sin \theta / 2) - d \quad (8)$$

可以看出, h_p 与 l 成正比。这是因为竖井自然排烟隧道中竖井开口长宽比对排烟性能有较大影响, 长宽比越小, 排烟效率就越高^[24]。当 A_s 一定时, l 越长, 排烟效率就越低, 吸穿效应越明显, h_p 就越高。

图 9 为 2 种 P_a 下 h_p 随 θ 变化的模拟数据和由式(8)得到的理论模型计算值。可以看出 $P_a = 100 \text{ kPa}$, $\theta = 60^\circ$ 时误差最大, 理论模型计算出的 $h_p = 0.96 \text{ m}$, 模拟计算得到的结果为 1.47 m 。图 9 中, h_p 随着 P_a 的降低而降低。这是因为 h_p 和 Ri' 数成正比, 当 P_a 降低时, 由于空气密度降低, F_d 减小, Ri' 数也会降低, 因此 h_p 也随之减小。

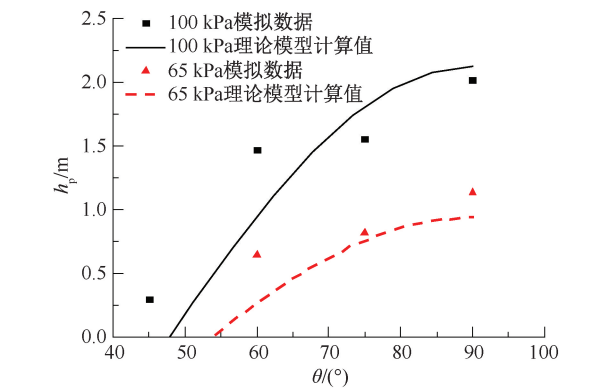


图 9 倾斜竖井不同 θ 下的 h_p 对比

Fig. 9 Comparison of h_p under different θ

图 10 为由文献[12]模拟得到的 h_p 与其理论模型计算值对比。可以看出,理论模型计算值与模拟计算得到的结果接近。同时 h_p 与 h 成正比,而 h 越高, Ri_c 数越大。

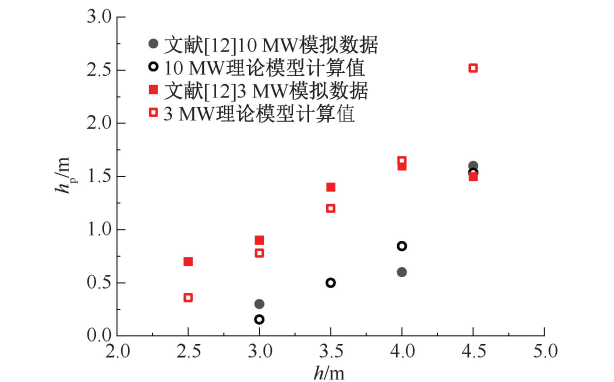


图 10 垂直竖井不同 h 下的 h_p 对比

Fig. 10 Comparison of h_p under different h for vertical shafts

2.4 不同 θ 及 P_a 对 Ri_c 数的影响分析

$h_p=0$ 时, Ri' 数= Ri_c 数。由式(8), Ri_c 数可表示为:

$$Ri_c = 2d/l\sin\theta \tag{9}$$

由表 3 数据计算得到的 Ri' 数以及 Ri_c 数如图 11 所示。在同一环境压力下, Ri_c 数随 θ 的增加而降低, P_a 的变化对 Ri_c 数影响较小。由式(9)计算得到的 Ri_c 数可以较为准确的判断倾斜竖井是否发生完全吸穿。当计算得到的 Ri' 数大于 Ri_c 数时,即可

认为发生完全吸穿。例如: $P_a=100\text{ kPa}$ 时, Ri' 数与 Ri_c 数 2 条曲线的交点得到的临界 θ 为 45° 左右; $P_a=65\text{ kPa}$ 时,发生吸穿现象的临界 $\theta=55^\circ$ 。

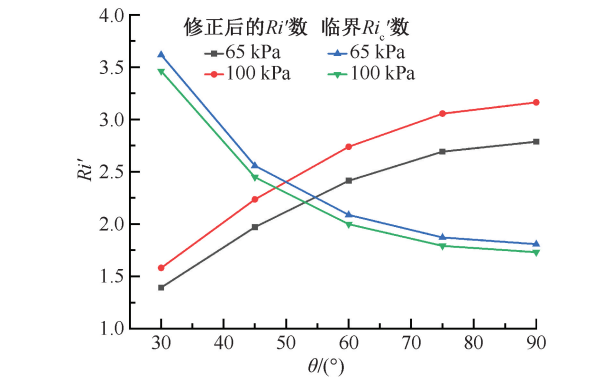


图 11 不同 P_a 及 θ 下 Ri' 数

Fig. 11 Ri' numbers under different P_a and θ

由文献[12]的数据计算不同工况中的 Ri_c 数,见表 4。可以看出,由式(9)理论模型计算得到的 Ri_c 数与经验给出的 Ri_c 数间差距较小,在 P_a 较小时有较好的一致性,在 P_a 较大时仅相差 0.1 左右,误差主要源于 d 的测量。

表 4 垂直竖井不同 P_a 下 Ri_c 数对比

Table 4 Comparison of Ri_c numbers under different P_a for vertical shafts

P_a/kPa	60	70	80	90	100
文献[12]经验值	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4
理论模型计算值	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3

3 结 论

- 1) 环境压力不变时,随着竖井倾斜角度 θ 的增加,吸穿效应逐渐增强; θ 不变时,吸穿效应随着环境压力的降低而减弱。此外由于 θ 带来的影响,重新定义理查森数 Ri' ,在此基础上给出适用不同 θ 吸穿判定的临界理查森数 Ri_c 关系式。在同一环境压力下, Ri_c 数随 θ 的增加而减小。
- 2) 倾斜竖井的吸穿高度 h_p 受环境压力和竖井倾斜角度 θ 的影响,当 θ 降低时,由于沿竖井方向的驱动力减小,竖井吸穿减弱, h_p 降低;当环境压力降低时,由于烟气速度增加,进而会补加水平惯性力,竖井的吸穿倾向将会得到缓解,由此 h_p 减小。

参 考 文 献

[1] 王启睿, 姜学鹏, 薛光桥, 等. 我国公路隧道火灾社会风险可接受标准研究[J]. 中国安全科学学报, 2024,

34(4): 121-127.

WANG Qirui, JIANG Xuepeng, XUE Guangqiao, et al. Study on social risk acceptance criteria of road tunnel fire in China[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 121-127.

- [2] 高子鹤. 隧道内受限火羽流行为特征及竖井自然排烟机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.

GAO Zihe. Studies on characteristics of confined fire plumes and mechanism of natural smoke exhaust by shaft[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.

- [3] JI Jie, GUO Fangyi, GAO Zihe, et al. Numerical investigation on the effect of ambient pressure on smoke movement and temperature distribution in tunnel fires[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118: 663-669.

- [4] YAN Zhiguo, GUO Qinghua, ZHU Hehua. Full-scale experiments on fire characteristics of road tunnel at high altitude[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 134-146.

- [5] 张念, 谭忠盛. 高海拔特长铁路隧道火灾烟气分布特性数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(6): 52-57.

ZHANG Nian, TAN Zhongsheng. Numerical simulation study on smoke distribution of fire in high-altitude super-long railway tunnels[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(6): 52-57.

- [6] 张念, 谭忠盛, 毛军, 等. 高海拔铁路隧道火灾燃烧特性试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(12): 52-57.

ZHANG Nian, TAN Zhongsheng, MAO Jun, et al. Experimental study on combustion characteristics of fire in high-altitude railway tunnels[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(12): 52-57.

- [7] 纪慧琢. 高海拔特长隧道火灾烟气流动特性的数值模拟分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

Ji Huizhuo. The simulation and analysis of fire smoke of extra long tunnel in high altitude region[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

- [8] 田源. 高海拔隧道火灾烟气及温度场数值模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(2): 201-203.

TIAN Yuan. Numerical simulation of fire smoke and temperature field in high altitude tunnel[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(2): 201-203.

- [9] 杜涛, 李萍, 王雨, 等. 隧道火灾烟气温度及蔓延速度衰减特性[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(2): 140-145.

DU Tao, LI Ping, WANG Yu, et al. Longitudinal decay of smoke temperature and front velocity in tunnel fires[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(2): 140-145.

- [10] XUE Dapeng, ZHENG Guoping, GUO Hongyu, et al. Study on the reasonable tilt angle of ventilation shafts in Xidianwan tunnel, China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 601: DOI: 10.1088/1755-1315/601/1/012003.

- [11] YAO Yongzheng, ZHANG Shaogang, SHI Long, et al. Effects of shaft inclination angle on the capacity of smoke exhaust under tunnel fire[J]. Indoor and Built Environment, 2019, 28(1): 77-87.

- [12] 樊勇杰. 低压环境下竖井自然排烟隧道火灾烟气特性研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2022.

FAN Yongjie. Study on the fire smoke characteristics of the natural smoke extraction tunnel with vertical shaft at reduced ambient pressure[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2022.

- [13] 梁建兴. 排烟井倾角对竖井隧道火灾烟气热分层和运动影响研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.

LIANG Jianxing. Study of the effect of smoke shaft inclination on the thermal stratification and movement of smoke from shaft tunnel fire[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.

- [14] 黄天荣, 张银屏, 宋飞. 自然通风隧道不同竖井结构形式火灾试验研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(10): 1376-1379.

HUANG Tianrong, ZHANG Yinping, SONG Fei. Fire tests of different shaft structures in natural ventilation tunnel[J].

Fire Science and Technology, 2020, 39(10): 1 376–1 379.

- [15] YAN Guanfeng, WANG Mingnian, YU Li, et al. Effects of ambient pressure on smoke movement patterns in vertical shafts in tunnel fires with natural ventilation systems[J]. Building Simulation, 2020, 13(4): 931–941.
- [16] JTG/T D70/2-02-2014,公路隧道通风设计细则[S].
JTG/T D70/2-02-2014, Guidelines for design of ventilation of highway tunnels [S].
- [17] MCGRATTAN K B, MCDERMOTT R J, WEINSCHENK C G, et al. Fire dynamics simulator: technical reference guide: sixth edition:1018[R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2024.
- [18] CONG Haiyong, WANG Xinshi, ZHU Pei, et al. Improvement in smoke extraction efficiency by natural ventilation through a board-coupled shaft during tunnel fires[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 118: 127–137.
- [19] COOPER L Y, HARKLEROD M, QUINTIERE J, et al. An experimental study of upper hot layer stratification in full-scale multiroom fire scenarios[J]. Journal of Heat and Mass Transfer, 1982, 104(4): 741–749.
- [20] JI Jie, GAO Zihe, FAN Chuangang, et al. A study of the effect of plug-holing and boundary layer separation on natural ventilation with vertical shaft in urban road tunnel fires[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21/22): 6 032–6 041.
- [21] 霍然, 胡源, 李元洲. 建筑火灾安全工程导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 98–99.
HUO Ran, HU Yuan, LI Yuanzhou. Introduction to building fire safety engineering[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 98–99.
- [22] 张靖岩, 李元洲, 霍然, 等. 竖井中羽流前锋上升时间的实验研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 111–114.
ZHANG Jingyan, LI Yuanzhou, HUO Ran, et al. Experimental study on the rising-time of fire plume fronts in the vertical shaft[J]. Journal of Safety and Environment, 2003, 6(2): 111–114.
- [23] 刘紫玮, 唐飞, 胡隆华, 等. 不同低气压环境下走廊火灾顶棚射流温度分布特征研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(7): 2 166–2 174.
LIU Ziwei, TANG Fei, HU Longhua, et al. Temperature profile characteristics of ceiling jet in corridor fires under various sub-atmospheric pressures[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(7): 2 166–2 174.
- [24] WANG Zhan, DENG Wenhui, ZHOU Min, et al. Evaluation of fire smoke and heat exhaust performance of shafts by natural venting in tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131: DOI: 10.1016/J. TUST. 2022. 104817.



作者简介: 唐君磊 (2000—),男,青海西宁人,硕士研究生,研究方向为隧道火灾。
E-mail:lengwulv@mail.ustc.edu.cn。