

中文引用格式:杨项博,万华仙,张玉春. 纵向风对隧道火灾顶棚辐射热流的影响[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(4): 145-151.

英文引用格式: YANG Xiangbo, WAN Huaxian, ZHANG Yuchun. Effect of longitudinal wind on ceiling radiant heat flux of tunnel fires[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(4): 145-151.

纵向风对隧道火灾顶棚辐射热流的影响*

杨项博, 万华仙** 副教授, 张玉春 教授

(西南交通大学 地球科学与工程学院, 四川 成都 611756)

中图分类号: X928.7

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.04.1021

基金项目: 国家自然科学基金资助(52278415, 51906239)。

【摘要】 为揭示全尺寸隧道火灾顶棚辐射热流分布特征, 开展数值模拟研究, 通过改变纵向风速、火源功率和火源有效高度, 模拟分析公路隧道顶棚辐射热流分布、顶棚最大辐射热流及其位置等参数, 揭示纵向风速、火源功率和火源有效高度对各参数的影响及其重要度。结果表明: 受火源功率和火源有效高度的影响, 自然通风时火源表面上方的顶棚辐射热流呈均匀分布或中间低两边高的变化特征; 纵向通风时顶棚辐射热流呈先增后减的变化特征, 且热流峰值出现在火源中心附近及火源下游。火源有效高度较高时, 顶棚最大辐射热流峰值在风速小于临界风速时获得; 随着火源有效高度的减小和火源功率的增大, 风速小于和大于临界风速时都会出现顶棚最大辐射热流峰值。风速小于临界风速时, 顶棚最大辐射热流位置出现在火源表面上方, 受火源功率、纵向通风以及火源有效高度的影响较小; 风速大于临界风速时, 顶棚最大辐射热流位置随火源功率增大而增大, 受纵向风速的影响较小。

【关键词】 隧道火灾; 纵向风; 顶棚辐射热流; 火源功率; 火源有效高度

Effect of longitudinal wind on ceiling radiant heat flux of tunnel fires

YANG Xiangbo, WAN Huaxian, ZHANG Yuchun

(Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University,
Chengdu Sichuan 611756, China)

Abstract: To reveal the distribution characteristics of ceiling radiant heat flux in full-scale tunnel fires, the numerical simulation research was carried out. Longitudinal ventilation velocities, heat release rates and effective fire heights were changed. The distribution of ceiling radiant heat flux in road tunnel vehicle fires, the maximum ceiling radiant heat flux and its position were analyzed. The influences of the longitudinal wind speed, the heat release rate, and the effective fire height on each parameter and their important degrees were revealed. Results show that under the natural ventilation, affected by the heat release rate and effective fire height, the radiant heat fluxes under the ceiling above the fire source surface show a uniform distribution, or the law that the middle radiant heat fluxes are low while the two sides are high. Under the longitudinal ventilation, the ceiling radiant heat flux increases and then decreases. The peak value of the heat flux occurs near the center of fire source and the downstream of fire source. At large effective fire source heights, the peak values of the maximum ceiling radiant heat flux are obtained under

* 文章编号: 1003-3033(2025)04-0145-07; 收稿日期: 2024-12-09; 修稿日期: 2025-02-11

** 通信作者: 万华仙(1990—), 女, 四川成都人, 博士, 副教授, 主要从事隧道火灾相关方面的研究。E-mail: hxwan@swjtu.edu.cn。

the condition of wind speed lower than the critical velocity. While reducing the effective fire height and increasing the heat release rate, The peak value of maximum ceiling radiant heat flux individually occurs both when the wind speed is less than and when it is greater than the critical wind speed. When the wind speed below the critical velocity, the maximum ceiling radiant heat flux presents right above the surface of the fire source, and it is weakly affected by the heat release rate, longitudinal ventilation and the effective fire height. When the wind speed above the critical velocity, the maximum ceiling radiant heat flux increases with the heat release rate, and it is less affected by the wind velocity. The research results can provide some reference basis and data supports for tunnel fire prevention and control and tunnel safety design.

Keywords: tunnel fire; longitudinal wind; ceiling radiant heat flux; heat release rate; effective fire height

0 引言

随着我国公路隧道建设数量的增加,隧道发生火灾的风险也日益增加。隧道内一旦发生火灾,高温有毒烟气会对隧道内的结构、设备、车辆和人员构成严重威胁。已有隧道火灾研究主要关注火源功率、火焰形态、临界通风速度和温度分布等^[1-2]的变化,对隧道内火羽流引起的热量传递特征研究较少。

顶棚辐射热流是评估隧道火灾热量传递大小的关键参数之一,对预测隧道火灾是否蔓延以及损失程度至关重要。目前,对于隧道火灾辐射热流的研究相对较少。FAN Chuangang 等^[3]发现,隧道断面面积越大,辐射热流越小。郭红会^[4]采用固体火焰模型计算不同纵向风速下的隧道火焰辐射热流。TANG Fei 等^[5]发现,隧道内横向顶棚热流随火源长宽比的增大而增大。XU Tong 等^[6]发现,随着坡度的增大,倾斜隧道上游顶棚热流增大,下游顶棚热流减小。GUO Fangyi 等^[7]研究发现,纵向通风时,隧道下游辐射热流随与火源距离的增加呈先增后减的变化趋势。上述研究均基于 Froude 准则搭建缩尺模型,该缩尺模型主要保证流动的相似性,忽略了辐射效应^[8]。石嘉康^[9]发现,Froude 模型无法对辐射传热系数进行缩放,缩尺隧道内的辐射传热比例高于全尺寸隧道,而烟气温度和烟气速度小于全尺寸隧道火灾。全尺寸隧道火灾辐射热流研究中,姜智彬^[10]采用点源模型计算火灾辐射热流,确定全尺寸隧道内火灾辐射引燃的安全距离。王明年等^[11]分析了全尺寸隧道火灾的车辆引燃时间。然而,上述研究并未对全尺寸隧道火灾在纵向通风作用下的顶棚辐射热流分布进行详细测量和分析,从而未能充分揭示火灾顶棚辐射热流在隧道内的分布特征。

鉴于火灾动力学模拟工具(Fire Dynamics

Simulator, FDS)被广泛应用于隧道火灾的模拟研究,且模拟结果的准确性已得到了较好的验证^[12-14]。因此,笔者拟运用 FDS 6.7.0 版本开展全尺寸隧道火灾数值模拟研究,通过改变纵向风速、火源功率及火源有效高度,分析隧道车辆火灾顶棚辐射热流分布特征,以期为隧道火灾防控和隧道安全设计提供参考依据和数据支撑。

1 全尺寸隧道火灾数值模拟

1.1 基于 FDS 的隧道火灾模型

基于 FDS 建立全尺寸隧道火灾模型,如图 1 所示,隧道长 500 m,宽 10 m,高 6 m。隧道顶部、两侧壁面以及地面的材料均为混凝土,其密度为 2 280 kg/m³,热导率为 1.2 W/(m·K),比热容为 0.88 kJ/(kg·K)。火源放置于隧道底部中心(图 1a)。模拟考虑具有较大火灾荷载的重型货车着火,设置模拟火源的横截面尺寸为长 12 m×宽 2 m。参考不同车型的高度^[15],设火源有效高度 H_e 为 2、3、4 m,火源功率 Q 为 10、20、30、40 和 50 MW。燃料为丙烷,其产烟量为 0.015 kg/kg,辐射分数为 0.3^[16-18]。采用 FDS 默认的辐射传热模型,即有限体积法求解灰色气体的辐射传输方程^[19]。隧道右侧开口为自然通风,左侧开口为纵向通风,设定纵向通风风速 v 分别为 0、1.5、2、3、4.5 和 6 m/s,共计 90 个工况。模拟的环境温度为 20 ℃,压强为 101 kPa。总模拟时长为 800 s,在模拟进行到 400 s 时,隧道内的温度和辐射热流达到稳定状态,为保证数据准确性,模拟数据均选取 700~800 s 的数据平均值。

在隧道纵向中心截面($Y = 5$ m)设置温度切片,用于获取整个截面上的参数数据。此外,在纵向中心截面还额外设置辐射热流参数测点(图 1b),在

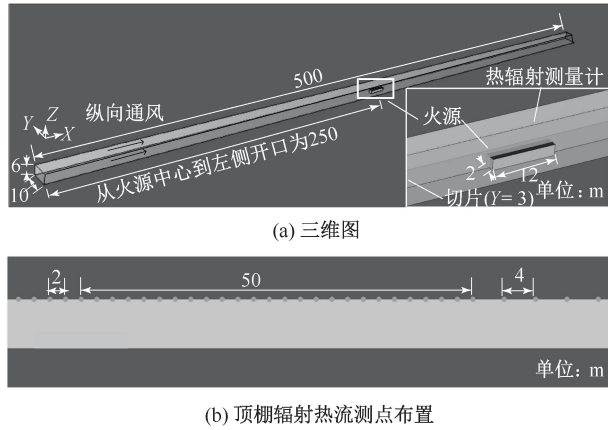


图1 FDS隧道火灾模型

Fig.1 Tunnel files model simulated by FDS

顶棚 $Z = 6\text{ m}$, $X = 200 \sim 300\text{ m}$ 位置,每隔 2 m ,并在 $X = 100 \sim 200\text{ m}$ 和 $X = 300 \sim 500\text{ m}$ 处,每隔 4 m 分别设置面向地板的辐射热流测点。

1.2 数值模拟网格选取

表示特征长度与网格尺寸之比的无量纲参数 D^*/δ_x 已被广泛用于确定网格尺寸^[19-21],其中,特征长度 D^* 为:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

式中: ρ_∞ 为环境密度, kg/m^3 ; c_p 为空气的定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_∞ 为环境温度, K ; g 为重力加速度, m/s^2 。

D^*/δ_x 的建议值为 $4 \sim 16$ ^[19]。 $\dot{Q} = 10\text{ MW}$ 时,计算的网格尺寸 δ_x 在 $0.15 \sim 0.60\text{ m}$ 。选择5种网格尺寸,即 $\delta_x = 0.167, 0.2, 0.25, 0.33$ 和 0.5 m 进行网格独立性分析。图2为火源中心下游 100 m 处的竖向温度分布。可以看出,除了 0.5 和 0.33 m 的网格,其余更小网格尺寸模拟的竖向温度相近。这说明比 0.25 m 更细的网格不会带来更高的预测精度,只会显著增加模拟时长。因此,选择 $0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ 的网格大小。

1.3 隧道火灾模型验证

$\dot{Q} = 66\text{ MW}$, $H_e = 1.5\text{ m}$, $v = 3\text{ m}/\text{s}$ 的场景^[22] 与本研究 $\dot{Q} = 50\text{ MW}$, $H_e = 2\text{ m}$, $v = 3\text{ m}/\text{s}$ 的工况相似; $\dot{Q} = 25\text{ MW}$, $H_e = 2.6\text{ m}$, $v = 2.5\text{ m}/\text{s}$ 的场景^[23] 与文中 $\dot{Q} = 30\text{ MW}$, $H_e = 2\text{ m}$, $v = 3\text{ m}/\text{s}$ 的工况相似。顶棚气体模拟温度与全尺寸隧道火灾试验温度比较见表1^[22]和表2^[23]。可以看出,顶棚模拟温度数据与全尺寸试验结果相符较好。

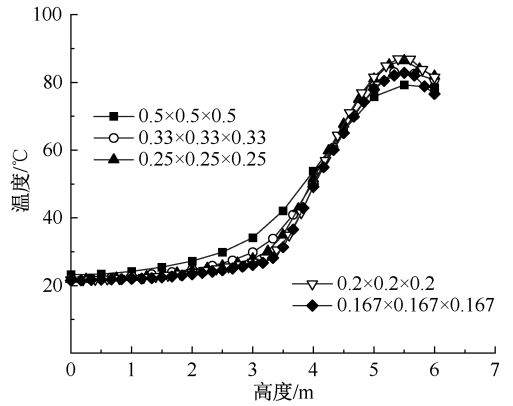


图2 不同网格尺寸下隧道内竖向温度分布

Fig.2 Vertical temperature distribution in tunnel with different grid sizes

表1 模拟顶棚温度与文献[22]试验结果的对比

Table 1 Comparison of simulated ceiling temperatures with test results of reference^[22]

离火源中心距离/m	试验温度/°C	模拟温度/°C
7	1 141	1 200
47	396	458
77	271	351
107	217	267

表2 模拟顶棚温度与文献[23]试验结果的对比

Table 2 Comparison of simulated ceiling temperatures with test results of reference^[23]

离火源中心距离/m	试验温度/°C	模拟温度/°C
20	362	330
50	242	232
100	160	183

2 纵向风对顶棚辐射热流的影响

2.1 自然通风条件下顶棚辐射热流分布影响

图3为自然通风($v = 0\text{ m}/\text{s}$)条件下,不同 \dot{Q} 和 H_e 时火源近区顶棚辐射热流(\dot{q}'')随与火源中心距离(r)的变化。可以看出,在火源表面上方($r = -6 \sim 6\text{ m}$),当 $\dot{Q} = 10\text{ MW}$ 或 $H_e = 4\text{ m}$ 时, \dot{q}'' 基本呈均匀分布;在其他更大的 \dot{Q} 或更小的 H_e 下,火源表面上方 \dot{q}'' 呈中间低两边高的分布特征。这是因为 \dot{Q} 越小、 H_e 越大时,新鲜空气越容易被卷吸到火源中心参与燃烧;随着 \dot{Q} 的增大或 H_e 的减小,火羽流卷吸受限程度增加,新鲜空气难以到达火源中心,导致 \dot{q}'' 在火源表面上方呈中间低两边高的变化特征。在火源表面上方区域以外, \dot{q}'' 随 H_e 增加逐渐减小,并且在更大的 \dot{Q} 或更小的 H_e 下,由于更多的热量

在顶棚纵向蔓延, q'' 衰减减缓。

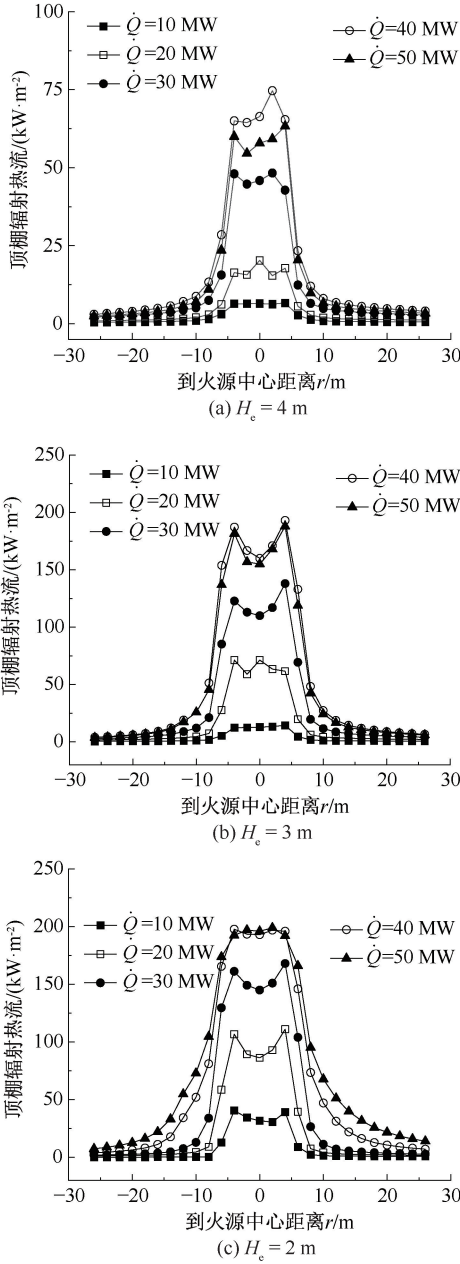


图3 自然通风($v = 0 \text{ m/s}$)下顶棚辐射热流分布
Fig. 3 Distribution of ceiling radiant heat flux ($v = 0 \text{ m/s}$)

2.2 纵向通风作用下顶棚辐射热流分布影响

图4为 $Q = 40 \text{ MW}$ 时不同 v 和 H_e 下 q'' 随 r 增大的变化。可以看出,同一 v 下 q'' 随 r 的增加呈先增后减的变化特征,且 q'' 峰值出现在火源中心附近以及火源下游区域。这是因为纵向通风使得火羽流向下游倾斜,更多的热量聚集在火源下游,并沿下游方向衰减。在火源附近($0 \leq r \leq 10 \text{ m}$), H_e 为4和3 m时,下游 q'' 在 $v = 2 \text{ m/s}$ 时达最大值; H_e 为2 m

时,下游 q'' 在 $v = 3 \text{ m/s}$ 达最大值。 $H_e = 4 \text{ m}$ 时,火源上游($r \leq -6 \text{ m}$)的 q'' 在所有纵向风速工况下均低于下游 q'' ;随着 H_e 的减小,火焰撞击顶棚后延伸距离增大,较低纵向风速($v = 1.5$ 和 2 m/s)所提供的驱动力无法使火焰撞击顶棚后的上游火羽流完全流向下游,隧道上游与下游 q'' 差距不大。其他 Q 下具有类似的变化特征。

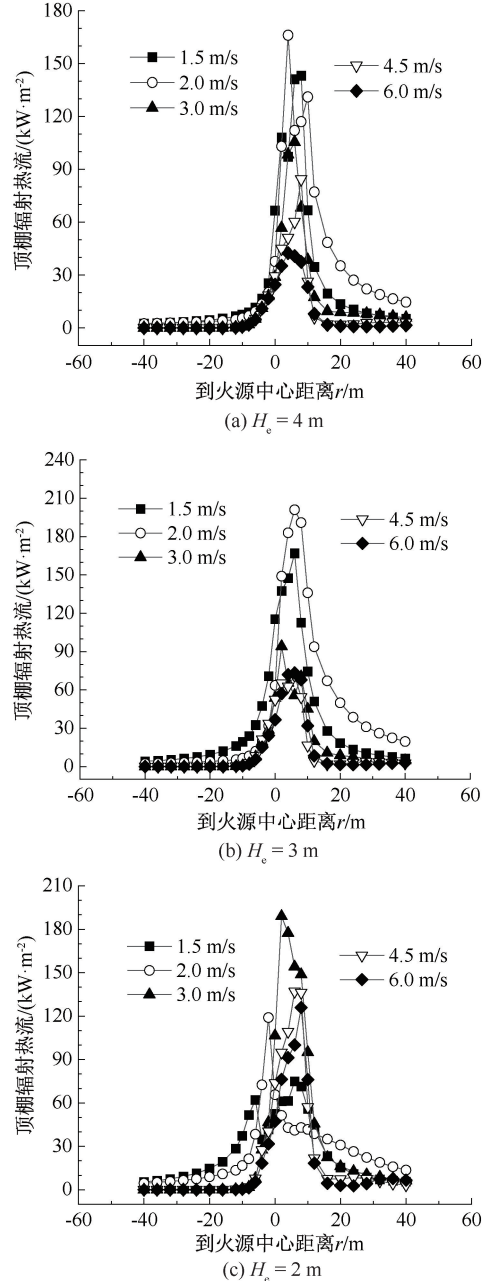


图4 顶棚辐射热流分布($Q = 40 \text{ MW}$)
Fig. 4 Distribution of ceiling radiant heat flux ($Q = 40 \text{ MW}$)

2.3 顶棚辐射热流纵向衰减预测模型

q'' 受 Q 、 H_e 、 v 、以及环境参数等多因素的影响。

定义顶棚下方纵向温度高于 $600\text{ }^\circ\text{C}$ [24] 温度区间的水平长度为顶棚火焰长度 (L_f), 火源下游到顶棚最大辐射热流位置的纵向距离为 r , 不同 \dot{Q} 下 \dot{q}'' 随 r/L_f 的变化如图 5 所示。利用指数函数进行拟合:

$$\dot{q}'' = 17.36(r/L_f)^{-0.53} \quad (2)$$

可以看出, \dot{q}'' 与 r/L_f 呈现 0.53 次方衰减, \dot{q}'' 随 r 的增加而减小, 随着 L_f 的增大而增大。

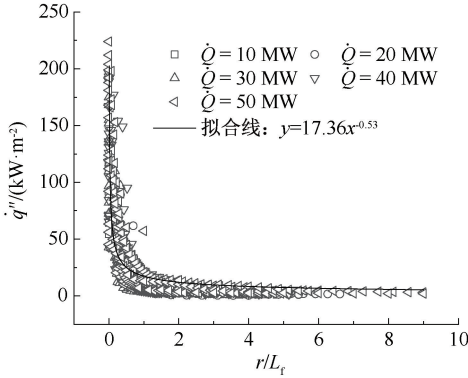


图 5 顶棚辐射热流与无量纲纵向距离的关系
Fig. 5 Relationship between ceiling radiant heat flux and normalized longitudinal distance

2.4 顶棚最大辐射热流的影响

图 6 为不同工况下顶棚最大辐射热流 (\dot{q}''_{\max}) 随 v 的变化。当 $H_e = 4\text{ m}$ 时, \dot{q}''_{\max} 随 v 的增大呈先增后减的变化特征, 且在 $v = 1.5 \sim 2\text{ m/s}$ 时达到峰值。文中所有工况下的临界风速 (v_c) 都在 $2 \sim 3\text{ m/s}$ 范围内。说明当 H_e 较大时, \dot{q}''_{\max} 在小于 v_c 时达到峰值。当 H_e 为 3 m 和 2 m 时, 较小的 \dot{Q} 也是在 v 小于 v_c 时出现 \dot{q}''_{\max} 峰值, 较大的 \dot{Q} 条件下, \dot{q}''_{\max} 随 v 增加大致呈现先减后增再减的变化特征, 谷值出现在 $v = 1.5\text{ m/s}$, 2 个峰值分别出现在 $v = 0\text{ m/s}$ 和 $v = 2 \sim 3\text{ m/s}$ 时。这说明随着 H_e 的减小以及 \dot{Q} 的增大, 在 v 小于 v_c 和 v 大于 v_c 时都会出现 \dot{q}''_{\max} 峰值。这是因为 v_c 越小、 \dot{Q} 越大, 火羽流的受限卷吸程度增加, 当 v 小于 v_c 时, 纵向通风能提供更多氧气, 促进火羽流进行空气卷吸, 进而使顶棚辐射热流减小, 出现 \dot{q}''_{\max} 谷值; 而当 v 大于 v_c 时, 纵向通风能提供更多氧气, 也会带走更多热量, 使顶棚辐射热流减小, 出现 \dot{q}''_{\max} 峰值。

2.5 顶棚最大辐射热流位置的影响

定义出现 \dot{q}''_{\max} 的位置到火源中心的水平距离为 L_{\max} , 当 \dot{q}''_{\max} 出现在火源右侧时, L_{\max} 为正, 反之为负。图 7 为 v 小于 v_c ($v \leq 2\text{ m/s}$) 时 L_{\max} 随 \dot{Q} 的变

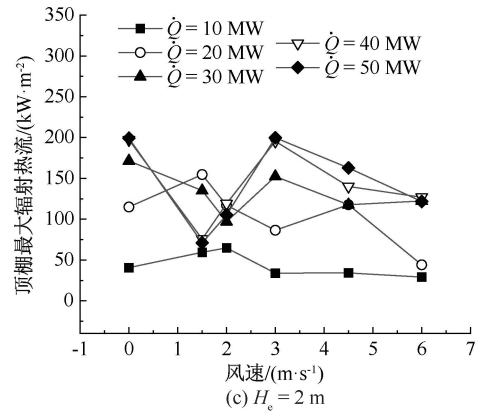
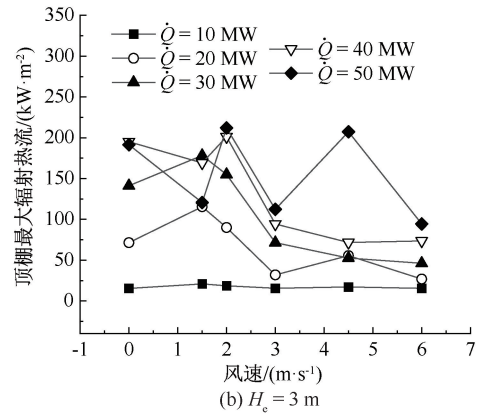
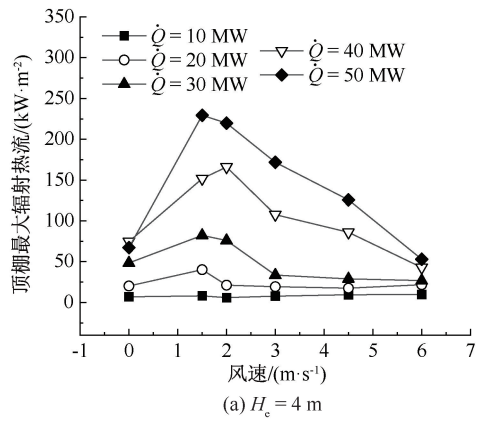


图 6 不同工况下的顶棚最大辐射热流
Fig. 6 Maximum ceiling radiant flux under different cases

化。可以看出, 绝大部分工况下的 L_{\max} 均出现在火源表面上方 ($-6\text{ m} \leq L_{\max} \leq 6\text{ m}$), 受 \dot{Q} 、 v 以及 H_e 的影响较小, 可近似认为仍出现在火源表面上方。这是因为, 在小纵向风速作用下, 纵向通风作用不足以克服大功率火源产生的火羽流惯性, 使得烟气发生逆流, 且火羽流倾斜范围相对较小, 从而使 \dot{q}''_{\max} 出现在火源表面上方。

图 8 为在 v 大于 v_c ($v \geq 3\text{ m/s}$) 时 L_{\max} 随 \dot{Q} 的变化特征。可以看出, L_{\max} 随 \dot{Q} 的增大而增大, 受 v 的影响较小; L_{\max} 值的变化范围表明: 随着 \dot{Q} 的增

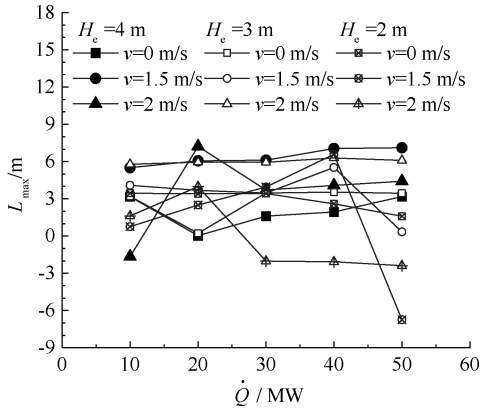


图7 顶棚最大辐射热流位置随火源功率的变化 ($v \leq 2 \text{ m/s}$)

Fig.7 Variation of position of q_{max}'' with \dot{Q} ($v \leq 2 \text{ m/s}$)

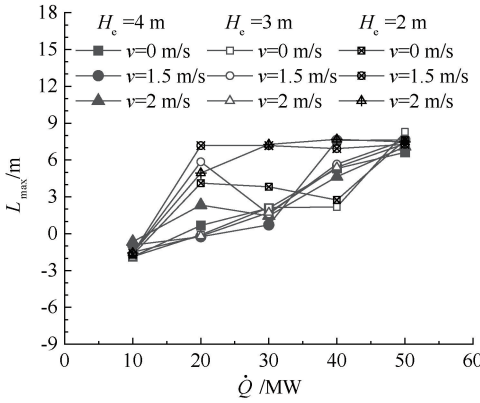


图8 顶棚最大辐射热流位置随火源功率的变化 ($v \geq 3 \text{ m/s}$)

Fig.8 Variation of position of q_{max}'' with \dot{Q} ($v \geq 3 \text{ m/s}$)

大,辐射热流峰值的位置从靠近火源中心 ($L_{\text{max}} = 0$) 转变为出现在火源下游 ($L_{\text{max}} > 6 \text{ m}$)。这是因为 v 较大时,纵向通风作用占主导,火羽流倾斜程度增加。

3 结论

1) 自然通风条件下,当火源功率较小或火源有效高度较大时,火源表面上方的顶棚辐射热流基本呈现均匀分布状态;当火源功率更大或火源有效高度更小时,火源表面上方的辐射热流呈现中间低两边高的分布特征。纵向通风作用下,顶棚辐射热流随纵向距离的增加呈现先增后减的变化特征,峰值出现在火源附近以及下游区域。通过建立顶棚辐射热流衰减模型,发现顶棚辐射热流与无量纲纵向距离呈现出-0.53次方的衰减特征。

2) 当火源有效高度较大时,在纵向风速小于临界风速时达到顶棚最大辐射热流峰值;随着火源有效高度的减小和火源功率的增大,在风速小于和大于临界风速时都会出现顶棚最大辐射热流峰值。

3) 纵向风速低于临界风速时,顶棚最大辐射热流出现在火源表面上方,受火源功率、纵向通风以及火源有效高度的影响较小;当纵向风速高于临界风速时,顶棚最大辐射热流位置到火源中心的水平距离随着火源功率的增大而增大,受纵向通风的影响较小。

参考文献

[1] 徐童,唐飞,何清. 隧道内贴壁火顶棚射流温度及火焰特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 93-97.
XU Tong, TANG Fei, HE Qing. Study on temperature and flame characteristics of ceiling jet induced by wall-attached fire in a tunnel [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 93-97.

[2] 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.

[3] FAN Chuangang, LI Yingzhen, INGASON H, et al. Effect of tunnel cross section on gas temperatures and heat fluxes in case of large heat release rate[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 405-415.

[4] 郭红会. 隧道近火源区域火焰辐射理论与实验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
GUO Honghui. Theoretical and experimental study on flame radiation near fire source in tunnel[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019.

[5] TANG Fei, HU Peng, ZHANG Jianping, et al. Heat fluxes under the ceiling induced by wall fires with various burner aspect ratios in a channel[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(3): 4 569-4 577.

[6] XU Tong, TANG Fei, HE Qing, et al. Experimental study and physical modeling of ceiling temperature and heat flux profiles by wall-attached fires in inclined tunnels [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(3):

3 843–3 852.

- [7] GUO Fangyi, DING Long, JI Jie, et al. Effects of longitudinal wind and sidewall restriction on downstream radiative heat flux and temperature rise distribution in tunnel fires[J]. *Fire Safety Journal*, 2022, 134: DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103689.
- [8] QUINTIERE J G. Scaling applications in fire research[J]. *Fire Safety Journal*, 1989, 15: 3–29.
- [9] 石嘉康. 基于 Froude 数的相似原理在隧道火灾实验中的适用性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- SHI Jiakang. Applicability of Fr-based scaling law in tunnel fire experiment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [10] 姜智彬. 公路隧道火灾车辆引燃临界距离研究[J]. *企业技术开发*, 2011, 30(1): 29–31.
- JIANG Zhibin. Analysis on the critical distance between vehicle in road tunnel fire[J]. *Technological Development of Enterprise*, 2011, 30(1): 29–31.
- [11] 王明年, 田源, 于丽. 基于隧道火灾蔓延下的车辆引燃时间预测研究[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(12): 46–51.
- WANG Mingnian, TIAN Yuan, YU Li. Prediction of vehicle ignition time based on fire spreading in tunnel[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(12): 46–51.
- [12] GANNOUNI S, MAAD B R. Numerical analysis of smoke dispersion against the wind in a tunnel fire[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 158: 61–68.
- [13] LIANG Qiang, LI Yangfeng, LI Junmei, et al. Numerical studies on the smoke control by water mist screens with transverse ventilation in tunnel fires[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 64: 177–183.
- [14] LI Haihang, TANG Fei. Numerical and experimental study on the critical velocity and smoke maximum temperature in the connected area of branch tunnel[J]. *Building Simulation*, 2022, 15(4): 525–536.
- [15] CALIENDO C, CIAMBELLI P, GUGLIELMO M L, et al. Simulation of fire scenarios due to different vehicle types with and without traffic in a bi-directional road tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 37: 22–36.
- [16] KLASSEN M, GORE J P. Structure and radiation properties of pool fires[R]. NIST-GCR-94-651, National Institute of Standards and Technology, 1994.
- [17] BABRAUSKAS V. Estimating large pool fire burning rates[J]. *Fire Technology*, 1983, 19(4): 251–261.
- [18] PUTNAM A A, SPEICH C F. A model study of the interaction of multiple turbulent diffusion flames[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1963, 9(1): 867–877.
- [19] MCGRATTAN K, HOSTIKKA S, MCDERMOTT R, et al. Fire dynamics simulator (Version 6): user's guide[Z]. National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [20] HO L C, LI Kaiyuan, SPEARPOINT J M. Numerical simulation of scale-model smoke contamination of upper atrium levels by a channelled balcony spill plume[J]. *Fire and Materials*, 2013, 37(8): 581–596.
- [21] ZHONG Wei, FAN Chuangang, JI Jie, et al. Influence of longitudinal wind on natural ventilation with vertical shaft in a road tunnel fire[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 57(2): 671–678.
- [22] LOENNERMARK A, INGASON H. Fire spread and flame length in large-scale tunnel fires[J]. *Fire Technology*, 2006, 42(4): 283–302.
- [23] LEMAIRE T, KENYON Y. Large scale fire tests in the second Benelux tunnel[J]. *Fire Technology*, 2006, 42(4): 329–350.
- [24] WAN Huaxian, GAO Zihe, JI Jie, et al. Experimental and theoretical study on flame front temperatures within ceiling jets from turbulent diffusion flames of n-heptane fuel[J]. *Energy*, 2018, 164: 79–86.

作者简介: 杨项博 (1999—),男,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为隧道火灾。
E-mail: xbyang@my.swjtu.edu.cn。

