

隧道内不同横向位置双火源 顶棚最大温升试验研究

袁和勇, 吴智慧

安徽交通职业技术学院土木工程系, 安徽 合肥 230041

摘要:为分析自然通风隧道内双火源的顶棚最大温升,在不同火源边长、火源间距、火源横向位置3个影响因素下,采用隧道模型(与实际隧道的比例为1:10)在实验室内进行77组双火源火灾试验,与9组单火源火灾试验对照,分析3个影响因素对顶棚最大温升的影响。结果表明:双火源间距相同时,火源边长越大,顶棚最大温升越大;火源间距和火源横向位置对顶棚最大温升影响显著;火源边长和双火源间距相同时,火源位于贴壁位置时的顶棚最大温升最大;单火源燃烧时,随火源逐渐远离侧壁,顶棚最大温升先减小后增大;双火源间距较大时,随火源逐渐远离侧壁,顶棚最大温升一直减小;火源边长相同时,随双火源间距增大,火源位于同一位置的顶棚最大温升基本呈减小趋势。将 Alpert 顶棚最高温升预测模型与 Zukoski 镜面效应相结合,可较准确地预测单火源位于贴壁位置时的顶棚最大温升;双火源位于不同隧道横向位置时的归一化顶棚最大温升均随无量纲火源间距的增大而减小。

关键词:安全工程;双火源;隧道横向位置;火源间距;顶棚最大温升

中图分类号:U458

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)04-0119-07

引用格式:袁和勇,吴智慧.隧道内不同横向位置双火源顶棚最大温升试验研究[J].山东交通学院学报,2024,32(4):119-125.

YUAN Heyong, WU Zhihui. Experimental study on the maximum temperature rise of the ceiling with dual fire sources at different transverse positions in a tunnel[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(4): 119-125.

0 引言

隧道空间结构狭长,一旦车辆相撞引发火灾事故,车辆间距更小,积聚的高温烟气更易引燃其他车辆,形成多火源火灾^[1-2]。隧道火灾中的多火源火灾占比高达14%^[3-4]。火灾间距较小时,火焰两侧卷吸空气不平衡,火焰倾斜甚至合并,火焰高度增大,直至形成顶棚射流,增大顶棚下方烟气温度,易破坏隧道主体结构,隧道火灾不可控,破坏性较大,对人员疏散和车辆安全转移造成极大困难^[5-7]。

从隧道内多火源火灾角度考虑,Zhao等^[8]采用小尺寸试验分析双火源的燃烧过程,探究隧道内双火源间距对顶棚最大温升和纵向温度分布的影响;Meng等^[9]采用试验研究隧道内2个横向对称排列火源的间距对顶棚最大温升的影响,并提出相应的预测模型。陈柔均^[10]通过改变火源热释放速率、火源间距和纵向通风速度分析隧道顶棚温度变化规律,构建双火源顶棚最大温升的预测模型。Heidarinejad等^[11]采用火灾动力学模拟工具研究隧道内障碍物与双火源的距离及双火源不同放置方式对临界通风速度的影响。研究隧道内多火源火灾时,通常假设火灾发生在隧道纵向中心线上,实际上隧道的任意横向位置

收稿日期:2023-08-12

基金项目:安徽省科学研究重点项目(2022AH052457)

第一作者简介:袁和勇(1988—),男,合肥人,讲师,工学硕士,主要研究方向为交通建设工程安全技术及管理,E-mail:844652392@qq.com。

都有可能发生火灾,火灾位置对顶棚最大温升有较大影响^[12-14]。

本文采用隧道模型进行试验,考虑隧道不同车道均有可能发生火灾,将双火源分别设置在隧道贴壁、临壁、中轴线 3 处横向位置,研究火源边长和火源间距对顶棚最大温升的影响,以期为隧道火灾探测、消防救援及隧道结构防护提供基础数据。

1 试验

1.1 试验平台与测点布置

在隧道模型中完成全部试验,隧道模型与实际隧道比例为 1:10,如图 1 所示。隧道模型的长、宽、高分别为 10.5、1.0、0.6 m。隧道模型的顶棚、底板及内侧侧壁采用厚 1.5 cm 的防火板,保证隧道模型壁面与实际隧道壁面的导热性能相似,外侧侧壁采用耐高温的防火玻璃,以便观察试验现象。采用 K 型铠装热电偶(响应时间小于 1 s,直径 1.5 mm,误差为 $\pm 1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)测量试验温度,Agilent34970A 多路数据采集器记录温度数据。为保证试验数据误差较小,点火后等待 150 s,待火源热释放速率稳定后记录数据。



图 1 隧道模型

热电偶测点的布置如图 2 所示。顶棚温度测点位于顶棚下方 0.01 m,从 2 个火源中心上方向隧道两端布置纵向热电偶,间隔 0.10 m;横向热电偶从内壁向外壁布置,间隔 0.05 m;火源间竖向热电偶从顶棚下方 0.01 m 向下布置,间隔 0.05 m。隧道内不同横向位置(贴壁、临壁、中轴线)的火源布置俯视图如图 3 所示。 x 方向为隧道纵向, y 方向为隧道横向。火源靠近隧道内壁的一侧与隧道内壁的距离为 r ,火源间距为 s ,隧道宽 w ,火源边长为 D 。 $r=0$ 时,火源位于贴壁位置; $r=w/4-D/2$ 时,火源位于临壁位置; $r=w/2-D/2$ 时,火源位于中轴线位置(以下简称贴壁火源、临壁火源、中轴线火源)。在门窗关闭的实验室内进行试验,防止外界风干扰,试验时室温约为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

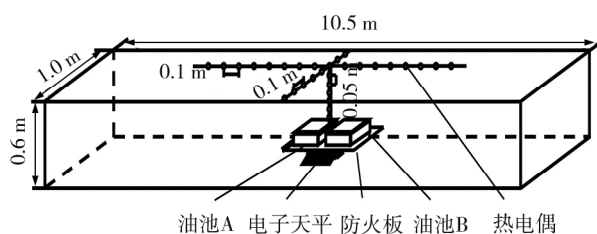


图 2 热电偶测点布置图

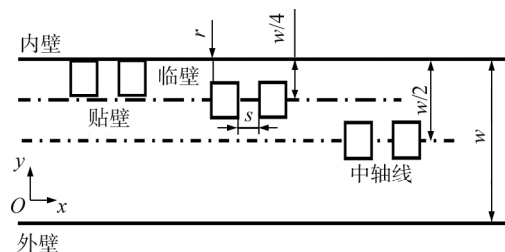


图 3 隧道内火源位置俯视图

1.2 试验工况设计

燃料为 92[#]汽油。油池 A、B 相同,采用 3 种方形油池:第 1 种油池的长、宽、高分别为 0.10、0.10、0.08 m,第 2 种油池的长、宽、高分别为 0.15、0.15、0.08 m,第 3 种油池的长、宽、高分别为 0.20、0.20、0.08 m。单火源位于隧道中轴线时,热释放速率分别为 4.38、13.86、22.05 kW。考虑火源尺寸、火源间

距和火源横向位置对顶棚最大温升的影响,设计 77 组双火源火灾试验,以 9 组单火源火灾试验为对照组,在贴壁、临壁和中轴线位置各进行 3 组单火源火灾试验,火源 A 边长分别为 0.10、0.15、0.20 m,试验编号为 1~9。双火源试验工况如表 1 所示。

表 1 双火源试验工况

试验编号	火源横向位置	火源 A、B 边长/m		火源间距/m
10~19	贴壁	0.10	0,0.02,0.04,0.06,0.08,0.10,0.12,0.14,0.16,0.22	
20~28		0.15	0,0.02,0.04,0.06,0.10,0.14,0.18,0.22,0.26	
29~37		0.20	0,0.02,0.06,0.08,0.10,0.14,0.18,0.22,0.28	
38~47	临壁	0.10	0,0.02,0.04,0.06,0.08,0.10,0.12,0.14,0.18,0.25	
48~56		0.15	0,0.02,0.06,0.10,0.12,0.14,0.16,0.18,0.20	
57~63		0.20	0,0.02,0.06,0.10,0.14,0.18,0.22	
64~71	中轴线	0.10	0,0.02,0.04,0.06,0.10,0.14,0.18,0.22	
72~79		0.15	0,0.02,0.04,0.08,0.12,0.16,0.20,0.24	
80~86		0.20	0,0.02,0.04,0.08,0.12,0.16,0.20,0.24	

2 结果与讨论

2.1 顶棚最大温升特性

不同火源边长、火源间距条件下,火源位于不同横向位置时顶棚最大温升如表 2 所示。由表 2 可知:双火源间距相同时,火源边长越大,顶棚最大温升越大;火源间距和火源横向位置对顶棚最大温升影响显著。

火源边长和双火源间距相同时,贴壁火源的顶棚最大温升最大,火焰直接烘烤侧壁,烟气更易积聚,高温侧壁和高温烟气的热反馈加快液体燃料的蒸发,增大火源的热释放速率。侧壁影响火焰卷吸空气,火焰的长度增大,卷吸更多空气保证充分燃烧。单火源燃烧时,随火源远离侧壁,顶棚最大温升先减小后增大,主要原因是中轴线火源火焰卷吸空气不受侧壁限制,燃烧更充分。临壁火源的顶棚最大温升较小,火源距侧壁较近,侧壁对火焰卷吸空气的限制作用大于中轴线火源,高温侧壁对空气产生的加热作用不如贴壁火源明显,临壁火源的热释放速率小于贴壁火源和中轴线火源。双火源间距较大时,随火源远离侧壁,顶棚最大温升减小,主要原因是火焰从双火源中间区域卷吸的空气增多,侧壁对空气卷吸的限制作用变弱。

火源边长相同时,随双火源间距增大,火源位于同一位置的顶棚最大温升基本呈减小趋势,主要原因是:1)火源间距较小时,火焰因内外侧卷吸空气不平衡引起火焰倾斜甚至合并,火焰高度增大,顶棚温度也更高;火焰对燃料产生热反馈,间距较小的双火源受自身火焰和另一火焰的热反馈,火源的热释放速率大。2)随火源间距的增大,合并的火焰逐渐分离,分离至一定距离后,火焰在竖向上分为 2 个相互独立的

表 2 不同火源横向位置下顶棚最大温升

火源边长/m	火源间距/m	顶棚最大温升/℃		
		中轴线	临壁	贴壁
0.10	0	300.03	248.04	364.22
	0.04	218.85	219.45	379.75
	0.10	142.65	154.08	252.90
	0.22	129.67	138.07	210.00
0.15	0	436.94	382.08	612.00
	0.04	460.53	404.30	557.00
	0.10	351.52	359.41	464.00
	0.22	230.97	235.12	430.22
0.20	0	810.61	653.34	855.00
	0.04	794.95	696.86	849.50
	0.10	556.01	464.27	613.28
	0.22	405.54	412.83	608.00

羽流,等同单火源^[15]。

2.2 不同横向位置的单火源顶棚最大温升

火源位于隧道内时,根据烟气的流动形态,烟气蔓延过程主要分为 4 个阶段:1)羽流受浮力作用向上运动,直至达到顶棚;2)顶棚射流径向扩散直至达到侧壁;3)顶棚射流由径向蔓延转变为水平蔓延;4)烟气蔓延,形成充分发展的一维稳定流动^[16]。

顶棚最大温升是表征隧道烟气温度的关键参数之一,顶棚最大温升的经验公式^[17]为:

$$\{\Delta T_{\max}\} = 16.9 \{\dot{Q}\}^{\frac{2}{3}} / \{H_f\}^{\frac{5}{3}}, r/H_f < 0.18, \quad (1)$$

式中: $\{\Delta T_{\max}\}$ 为以 $^{\circ}\text{C}$ 为单位的顶棚最大温升 $\Delta T_{\max}$ 的数值; $\{\dot{Q}\}$ 为以 kW 单位的火源热释放速率 $\dot{Q}$ 的数值; $\{H_f\}$ 为以 m 为单位的隧道有效高度 H_f (火源表面到隧道顶棚的高度)的数值; r 为火源靠近隧道内壁一侧与隧道内壁的距离, m。

式(1)适用于无侧壁限制、弱羽流撞击顶棚的火源。在烟气蔓延的第 3 个阶段,烟气撞击侧壁后向下运动,形成反壁面射流,部分烟气回流至火源区域,顶棚下方的最高烟气温度比无侧壁约束时高。

火源功率较大时,火羽流直接冲撞顶棚形成顶棚射流,本文所有工况下的火焰均未形成顶棚射流,符合式(1)的适用条件。为判断式(1)预测不同隧道横向位置火源引起的顶棚最高温升的准确性,假设

$$\{\Delta T_{\max}\} = \alpha \{\dot{Q}\}^{\frac{2}{3}} / \{H_f\}^{\frac{5}{3}}, \quad (2)$$

式中 α 为系数。

$\{\Delta T_{\max}\}$ 与 $\{\dot{Q}\}^{\frac{2}{3}} / \{H_f\}^{\frac{5}{3}}$ 的关系如图 4 所示。拟合直线的斜率为 α 。

由图 4 可知:火源位于隧道不同横向位置时, α 差别较大。火源位于贴壁位置时, $\alpha = 27.00$; 火源位于临壁和中轴线时 α 相同, 均为 18.02, 前者是后者的 1.49 倍, 表明受隧道侧壁限制, 顶棚下方烟气最大温升增大。火源位于隧道中轴线附近时, $\alpha = 18.02$, 大于式(2)的 16.90, 主要原因是狭长空间内的高温烟气更易积聚, 高温烟气对火源的热反馈使得火源的热释放速率更高。火源位于侧壁附近时, 顶棚最高温升不完全按式(1)计算。

由 Zukoski 镜面效应理论可知, 贴壁火源燃烧时, 火羽流的卷吸过程受侧壁限制^[18]。贴壁附近的羽流特性与 2 倍火源功率的羽流特性接近, 可认为贴壁火源的平均热释放速率 $\bar{Q} \approx 2\dot{Q}$, 临壁火源和中轴线火源的平均热释放速率 $\bar{Q} = \dot{Q}$ 。

结合 Alpert 经验公式和 Zukoski 镜面效应理论, 隧道内火源位于不同横向位置时的顶棚最大温升的数值:

$$\{\Delta T_{\max}\} = \alpha \{\bar{Q}\}^{\frac{2}{3}} / \{H_f\}^{\frac{5}{3}},$$

式中: $\{\bar{Q}\}$ 为以 kW 为单位的根据 Zukoski 镜面效应理论修正后的火源热释放速率 $\bar{Q}$ 数值。

$\{\Delta T_{\max}\}$ 与 $\{\bar{Q}\}^{\frac{2}{3}} / \{H_f\}^{\frac{5}{3}}$ 的关系如图 5 所示。

由图 5 可知: 采用 $\bar{Q}$ 的顶棚最大温升数据点更集中, 火源位于贴壁、临壁和中轴线位置的 α 基本一致, 相关系数 $R^2 = 0.967$, 拟合精度较高。

单火源顶棚最大温升试验结果与预测结果的对比如图 6 所示。

由图 6 可知: 试验结果与预测结果误差较小, 将 Alpert 经验公式和 Zukoski 镜面效应理论相结合, 能较好地预测火源位于隧道不同横向位置时的顶棚最大温升。

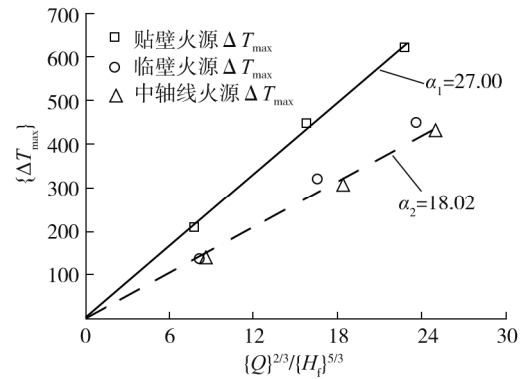


图 4 $\{\Delta T_{\max}\}$ 与 $\{\dot{Q}\}^{2/3}/\{H_f\}^{5/3}$ 的线性关系

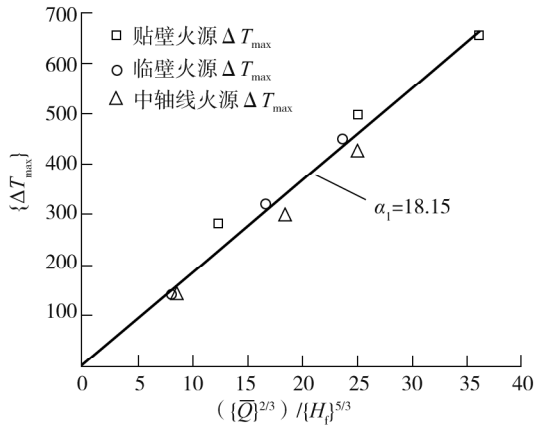
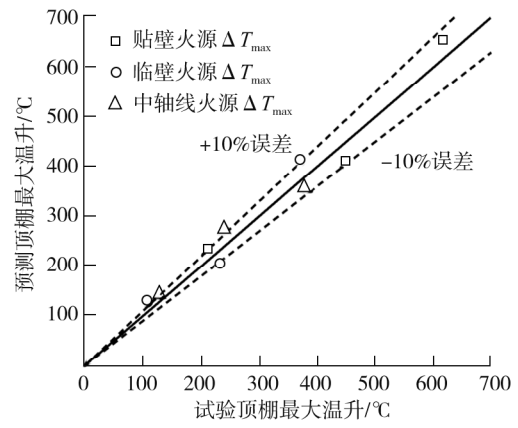
图5 $\{\Delta T_{\max}\}$ 与 $\{\bar{Q}\}^{2/3}/\{H_f\}^{5/3}$ 的线性关系

图6 顶棚最大温升试验结果与预测结果的关系

2.3 不同横向位置的双火源顶棚最大温升

中轴线火源的火焰均能从四周稳定地卷吸空气,隧道侧壁严重影响临壁火源和贴壁火源的火焰对周围空气的卷吸。

当火源靠近侧壁时,火焰只能通过3个面卷吸空气,需更多空气才能保证充分燃烧,火焰两侧的水平惯性力更大,火焰发生合并的概率更高,火焰长度大大增加。火源靠近侧壁时,高温烟气和高温侧壁的热反馈使火源的热释放速率增大。在相同火源间距的条件下,受侧壁限制的火源顶棚最大温升远大于无侧壁限制的火源。

隧道内双火源无量纲顶棚最大温升 $\Delta T_{\max}/T_0$ 受 $\dot{Q}$ 、 ρ_0 、 T_0 、 c_p 、 g 、 D 、 s 、 H_f 8 个参数影响^[19],可表示为:

$$\Delta T_{\max}/T_0 = f(\dot{Q}, \rho_0, T_0, c_p, g, D, s, H_f), \quad (3)$$

式中: $\dot{Q}$ 为单火源总热释放速率, kW; ρ_0 为环境空气密度, kg/m³; T_0 为环境空气温度, K; c_p 为空气比热, kJ/(kg·K); g 为重力加速度, m/s²; D 为火源边长, m; s 为火源间距, m。

基于量纲分析,式(3)可推导为:

$$\Delta T_{\max}/T_0 = fcn \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 D^{\frac{7}{2}} g^{\frac{3}{2}}}, \frac{c_p T_0}{D g}, \frac{s}{H_f} \right). \quad (4)$$

将式(4)右侧的第一项和第二项合并得到无量纲顶棚最大温升:

$$\Delta T_{\max}/T_0 = fcn \left(\frac{\dot{Q}}{c_p T_0 \rho_0 g^{\frac{1}{2}} D^{\frac{5}{2}}}, \frac{s}{H_f} \right) = fcn \left(\dot{Q}^*, \frac{s}{H_f} \right), \quad (5)$$

式中: $\dot{Q}^*$ 为火源的无量纲热释放速率, $\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{c_p T_0 \rho_0 g^{\frac{1}{2}} D^{\frac{5}{2}}}$ 。

式(5)表明 $\Delta T_{\max}/T_0$ 是无量纲热释放速率 $\dot{Q}^*$ 和无量纲火源间距 s/H_f 的函数。

分析无量纲顶棚最大温升与无量纲热释放速率的相关性。由 Alpert 经验公式可得到:

$$\Delta T_{\max}/T_0 \propto \dot{Q}^{*2/3}. \quad (6)$$

结合式(5)(6)可得:

$$\Delta T_{\max}/T_0 = \dot{Q}^{*2/3} fcn(s/H_f). \quad (7)$$

对式(7)变换可得

$$\Delta T_{\max}/(T_0 \dot{Q}^{*2/3}) = fcn(s/H_f).$$

$\Delta T_{\max}/(T_0 \{\dot{Q}^*\}^{2/3})$ 与无量纲火源间距 s/H_f 的关系如图7所示。

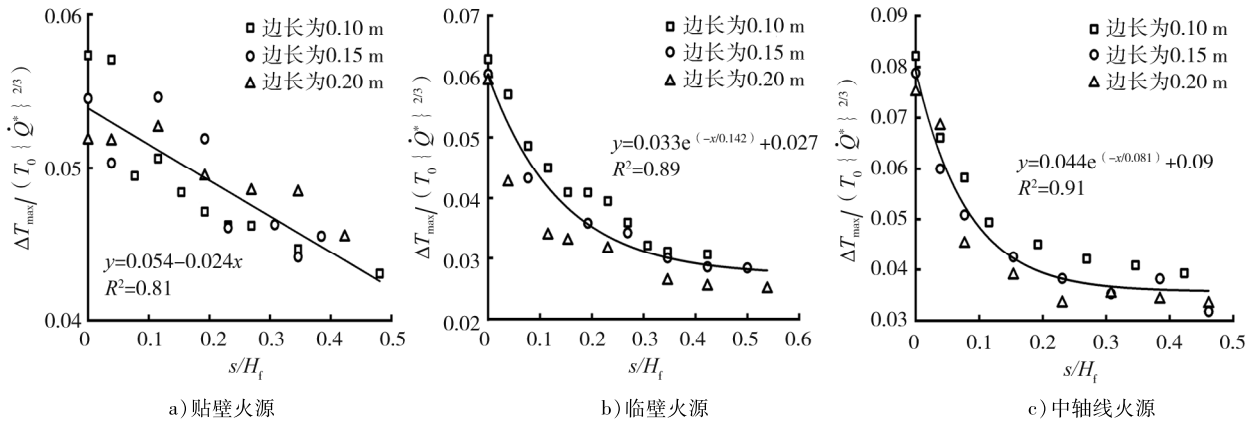


图7 归一化顶棚最大温升 $\Delta T_{\max} / (T_0 \{\dot{Q}^*\}^{2/3})$ 与无量纲火源间距 s/H_f 的关系

由图7可知:火源位于贴壁位置时,归一化顶棚最大温升随无量纲火源间距的增大而近似线性减小,但减幅较小,主要受侧壁对火焰卷吸空气的限制,火焰在火源间距较小时一直处于合并状态;侧壁对临壁火源和中轴线火源火焰卷吸空气的限制较小,单火源时燃料燃烧更充分,归一化顶棚最大温升更大,随火源间距的增大,火焰快速分离,归一化顶棚最大温升下降速度也更快。

对3个不同火源横向位置的归一化顶棚最大温升数据点分别拟合,得到顶棚最大温升的预测公式为:

$$\Delta T_{\max} = \begin{cases} (0.054 - 0.024 \{s/H_f\}) (T_0 \{\dot{Q}^*\}^{2/3}), & \text{贴壁火源} \\ (0.033 \exp(-\{s/H_f\}/0.142) + 0.027) (T_0 \{\dot{Q}^*\}^{2/3}), & \text{临壁火源} \\ (0.044 \exp(-\{s/H_f\}/0.081) + 0.09) (T_0 \{\dot{Q}^*\}^{2/3}), & \text{中轴线火源} \end{cases}$$

火源位于中轴线位置时的顶棚最大温升预测结果与文献[8,19-20]试验结果对比,如图8所示。

由图8可知:小部分散点位于 $\pm 20\%$ 误差线以外,大部分预测结果与试验结果基本一致。

3 结论

1) 单火源和双火源位于贴壁位置时的顶棚最大温升大于火源位于临壁和中轴线位置;火源间距较小时,中轴线火源燃烧时的顶棚最大温升大于临壁火源,火源间距较大时,火焰可从火源间区域卷吸较多空气,临壁火源和中轴线火源燃烧的顶棚最大温升差别不大。

2) 结合 Alpert 顶棚最高温升预测模型与 Zukoski 的镜面效应理论,研究单火源位于贴壁位置的顶棚最大温升时,将火源热释放速率替换为2倍实际热释放速率,代入 Alpert 预测模型,预测结果与试验结果基本一致,较准确。

3) 临壁双火源燃烧时,归一化顶棚最大温升随无量纲火源间距的增大而线性减小;双火源位于临壁和中轴线位置时,归一化顶棚最大温升随无量纲火源间距的增大呈指数衰减;所得顶棚最大温升预测模型可用于火源位于临壁、中轴线和贴壁3种不同隧道横向位置的情况。

本研究只给出双火源位于3种不同横向位置的顶棚最大温升,所建预测模型有一定局限性,火源位于其他横向位置的顶棚最大温升还有待进一步研究。

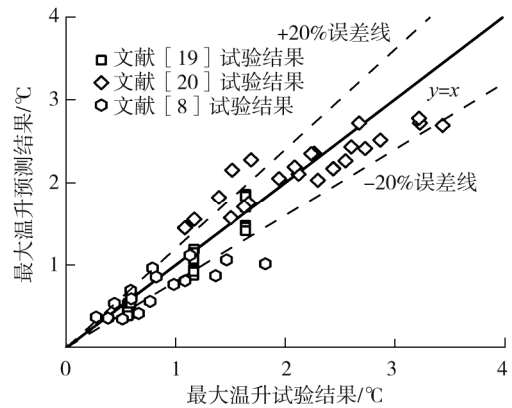


图8 顶棚最大温升预测结果与前人试验结果对比

参考文献:

- [1] VASANTH S, TAUSEEF S M, ABBASI T, et al. Multiple pool fires: occurrence, simulation, modeling and management [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 29(1):103-121.
- [2] 赵峰,夏永旭,谢涛. 公路隧道运营事故统计分析研究[J]. 公路, 2014(6):280-287.
- [3] 万华仙. 不同受限条件下双方形对称火源相互作用燃烧行为研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2018.
- [4] 何坤. 隧道多火源火灾特性及竖井自然排烟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2021.
- [5] 姜学鹏,廖湘娟,何振华. 人字坡山岭隧道火灾顶板下方烟气最高温度的研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3):925-929.
- [6] 朱伟,周晓峰,胡隆华,等. 纵向风对隧道火灾拱顶最高温度及其位置的影响[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(3):142-145.
- [7] FAN C G, ZHANG L, JIAO S C, et al. Smoke spread characteristics inside a tunnel with natural ventilation under a strong environmental wind[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82:99-110.
- [8] ZHAO J L, CUI X Y, YAO Y Z, et al. The burning process and temperature profile of double fires in a tunnel: an experimental study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 125:104500.
- [9] MENG N, SHU Y M, ZHANG S H, et al. Study on smoke temperature induced by two fires in a naturally ventilated tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131:104774.
- [10] 陈柔均. 隧道内双火源火焰形态特性及顶棚温度规律的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
- [11] HEIDARINEJAD G, MAPAR M, PASDARSHAHRI H. A comprehensive study of two fire sources in a road tunnel: considering different arrangement of obstacles[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 59:91-99.
- [12] JI J, FAN C G, ZHONG W, et al. Experimental investigation on influence of different transverse fire locations on maximum smoke temperature under the tunnel ceiling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(17/18):4817-4826.
- [13] FAN C G, JI J, Gao Z H, et al. Experimental study on transverse smoke temperature distribution in road tunnel fires[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37:89-95.
- [14] JI J, HARADA K, OHMIYA Y, et al. Tilt of flame from an item burning close to a wall[J]. Fire Technology, 2018, 54(5):1383-1404.
- [15] 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.
- [16] SEIKE M, KAWABATA N, HASEGAWA M, et al. Heat release rate and thermal fume behavior estimation of fuel cell vehicles in tunnel fires[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(48):26597-26608.
- [17] ALPERT R L. Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors[J]. Fire Technology, 1972, 8(3):181-195.
- [18] ZUKOSKI E E. Combustion fundamentals of fire[M]. [S. l.]:Springer International Publishing, 1995:101-219.
- [19] WANG Q, WANG S M, LIU H, et al. Characterization of ceiling smoke temperature profile and maximum temperature rise induced by double fires in a natural ventilation tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 96:103233.
- [20] JIA Y, FAN X L, ZHAO X J, et al. Investigation of the maximum tunnel ceiling temperature caused by two fires[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 178:107596.

Experimental study on the maximum temperature rise of the ceiling with dual fire sources at different transverse positions in a tunnel

YUAN Heyong, WU Zhihui

Department of Civil Engineering, Anhui Communications Vocational and Technical College, Hefei 230041, China

Abstract: To analyze the maximum temperature rise of the ceiling in a natural ventilation tunnel with two fire

(下转第142页)