

倾斜隧道贴壁火灾顶棚烟气最大温升模拟研究

张培红,何晓祥,郭尹亮

(东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘要 目的 研究在火灾浮力效应、壁面辐射热反馈及空气卷吸限制效应的协同作用下倾斜隧道贴壁火灾发展的特性。**方法** 利用 FDS 软件对倾斜隧道贴壁火进行数值模拟,分析顶棚烟气最大温升及其位置;考虑火源中心与侧壁的距离、坡度,建立了无量纲预测模型,进行拟合分析。**结果** 当贴壁火热释放速率分别为 2.7、4.0 和 5.0 MW 时,隧道贴壁火的顶棚最大温升分别在坡度为 2%、1%、0 时达到最大值,之后随着坡度的增大呈指数衰减;与轴线火相比,当坡度小于 10% 时,贴壁火的最大温升点与火源中心更近,坡度大于 10% 时,贴壁火的最大温升点位置更远;贴壁火和轴线火的拟合结果很好,相关系数分别为 0.98 和 0.95。**结论** 侧壁限制对最大温升的影响随着火源中心与侧壁距离的缩小而更加显著;随着隧道坡度增大,倾斜隧道贴壁火的火焰同时向火灾上游和侧壁倾斜,空气卷吸和对流换热作用不断增强,从而影响火焰的受力机制和火源表面接受到的辐射热反馈,顶棚最大温升随坡度增加呈指数衰减。

关键词 倾斜隧道;贴壁火;轴线火;最大温升;最大温升点位置

中图分类号 X932

文献标志码 A

引用格式:张培红,何晓祥,郭尹亮. 倾斜隧道贴壁火灾顶棚烟气最大温升模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):232-240. (ZHANG Peihong, HE Xiaoxiang, GUO Yinliang. Study on maximum ceiling smoke temperature rise of inclined tunnel wall fires[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024,40(2):232-240.)

Study on Maximum Ceiling Smoke Temperature Rise of Inclined Tunnel Wall Fires

ZHANG Peihong, HE Xiaoxiang, GUO Yinliang

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, China, 110819)

Abstract: To study the particularity of fire development law in inclined tunnel wall fire under the synergistic effect of fire buoyancy effect, wall radiant heat feedback and air entrainment restriction mechanism, using FDS to analyze the maximum ceiling smoke temperature rise and its location in inclined tunnel wall fire, considering slope and distance between the fire center and the side wall, a

收稿日期:2023-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(52374188,51774067)

作者简介:张培红(1969—),女,教授,博士,主要从事火灾安全科学与技术等方面研究。

dimensionless prediction model of ceiling smoke maximum temperature rise and maximum temperature rise point is constructed. In inclined tunnel wall fire, the influence of the side wall limitation on the maximum temperature rise is more significant with the decrease of the distance between the fire source center and the side wall. The maximum temperature rise of the heat release rate of 2.7, 4 and 5 MW tunnel wall fire reaches a maximum at 2%, 1% and 0 slope respectively; As the slope continues to increase, the maximum ceiling smoke temperature rise decays exponentially with tunnel slope. Compared with the axis fire, it is closer that the distance between the maximum temperature rise point of the wall fire and the center of the fire source when the slope is less than 10%, when the slope is greater than 10%, the position of the maximum temperature rise point of the wall fire is slightly farther. With the increase of tunnel slope, air enrolling and convective heat transfer are continuously enhanced, and the flame of inclined tunnel wall fire tilts towards the upstream and side wall at the same time, which affects the force mechanism of the flame and the radiant heat feedback received by the fire source surface, the maximum temperature rise of the ceiling decreases exponentially with the increase of the slope.

Key words: inclined tunnel; wall fire; axis fire; maximum temperature-rise; position of maximum temperature rise point

近年来,各种结构形式的城市隧道工程迅速发展。隧道中一旦发生火灾,烟气迅速蔓延,隧道顶棚下方烟气温度迅速升高,对隧道结构安全、人员疏散和应急救援造成严重的威胁,会造成严重的人员伤亡和财产损失^[1-2]。R. L. Alpert^[3]通过火灾试验得出自然通风条件下在水平隧道火灾中顶棚下方烟气最大温升(简称为顶棚最大温升),为后人开展研究奠定基础。H. Kurioka等^[4]利用小尺寸隧道模型,得到强制通风条件下的顶棚最大温升预测模型。Y. Z. Li等^[5]进行不同通风条件下的火灾试验研究,发现当无量纲风速大于0.19时,顶棚最大温升与纵向通风速度呈反比;当无量纲风速小于0.19时,顶棚最大温升与纵向通风速度无关。在实际工程中,交通隧道总是有一定的纵向坡度^[6],国内的胶州湾海底隧道最大纵坡为4%,湘江隧道最大纵坡为5%,在挪威、新西兰等一些国家,有隧道纵坡达到10%,例如霍默隧道和海威尔隧道^[7]。L. H. Hu等^[8]利用小尺寸试验研究了倾斜隧道顶棚最大温升与坡度的关系,引入了坡度系数的概念,修正了倾斜隧道的顶棚最大温升。一些学者利用FDS火灾数值模拟软件开展研究,分析了隧道坡

度对公路隧道火灾上游最大温升的影响^[9]、倾斜隧道的顶棚最大温升与烟气逆流距离^[10-11]、隧道宽度和坡度对隧道顶棚温升分布的影响^[12]、倾斜隧道的临界风速与坡度的关系^[13-14]。以上研究一般假设火源位于隧道轴线位置,实际上,由于车辆的流动性,火灾可能发生在隧道的任意位置。范传刚等^[15]利用小尺寸试验平台,研究了在水平隧道中火源横向位置对顶棚射流特性和火源燃烧行为的影响,并建立了考虑火源横向位置的顶棚最大温升的预测模型。在此基础上,Z. Gao等^[16-17]、J. Ji等^[18]研究了侧壁对水平隧道火灾特性的影响,建立了基于火焰高度、羽流受限程度的顶棚温升分布经验模型。

当倾斜隧道与侧壁限制两种环境条件共同作用时,由于火源距隧道壁面较近,在火灾的浮力效应、壁面辐射热反馈及对空气的卷吸限制效应的协同作用下,会形成更加复杂的热和速度场边界条件。基于此,笔者拟利用火灾动力学模拟软件对自然通风条件下坡度为0~15%倾斜隧道的贴壁火与轴线火进行数值模拟,对比分析隧道顶棚烟气温度分布特征,构建顶棚最大温升及其位置的预测模型,为后续隧道火灾控制方法的研究提供

理论依据。

1 模型构建及验证

1.1 模型构建

文献[21]在对国内主要城市公路隧道调研的基础上,选择宽 12 m、高 5.4 m 的典型公路隧道截面,建造了 1:6 的小尺寸模型,使用不同热释放速率的甲醇火池,研究了水平隧道不同火源位置的隧道顶棚最大温升以及横纵向温升分布。笔者依据文献[21],利用 FDS 软件建立一个 12 m×5.4 m×100 m 的全尺寸模型,用来模拟小轿车着火的场景。模型的顶棚、侧壁及地面均采用混凝土材料,隧道两端表面设为开放,环境温度设置为 20℃。为研究稳定燃烧阶段的火灾特性,模拟时间设置为 360 s。在中心截面上的两个不同横向位置安放方形火池,作为轴线火和贴壁火。火池边长分别设为 1.875 m、2.25 m、2.625 m,依次建立了三组热释放速率分别为 2.7 MW、4.0 MW 和 5.0 MW 的

火灾模拟模型。有学者研究发现有扩展计算域 的模型比没有扩展计算域的模拟效果更好^[19-20],因此在隧道出入口两端各扩展出 4 m 的计算域,模拟热烟气和环境空气双向流动的开放空间(见图 1)。

为测量顶棚最大温升,L. H. Hu^[8]、X. Zhang^[10]、J. Ji^[21]在试验中将热电偶布置在距离顶棚(0.02~0.04)H 的垂直高度上,依此,笔者在火源上方距离顶棚 0.15 m 的水平面上布置热电偶树。在距离火源 0~10 m 和 10~50 m 的纵轴上分别布置间距为 0.375 m 和 0.937 m 的热电偶;在火源正上方横向布置间隔为 0.375 m 热电偶。为准确测得最大温升点的位置,在火源下游 0~5 m 内每隔一个网格设置一串横向热电偶;在火源下游每隔 10 m 设置一个竖直热电偶树,竖直间距为 0.15 m。此外,为了测量火源表面接受到的热辐射值,在火源表面均匀布置辐射热流计,布置间距为 0.375 m。具体的测点位置如图 1 所示,空心圆为热电偶,实心点为辐射热流计。

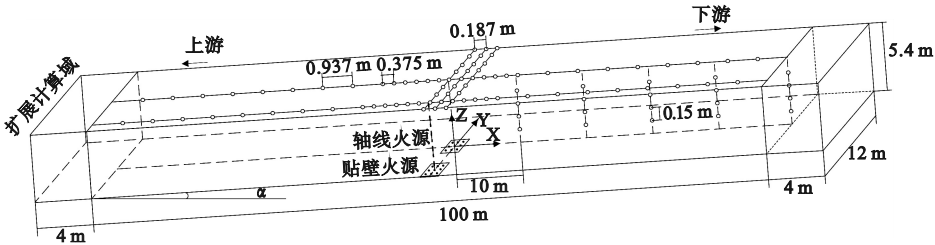


图1 隧道模型及测点布置图

Fig.1 Tunnel model and measurement point layout

根据不同的热释放速率、火源位置和坡度度共设置了 51 个模拟工况,如表 1 所示。

表1 模拟工况

Table 1 Simulated conditions

工况	ϕ /MW	火源位置	坡度/%
1-14	2.7	轴线、贴壁	0~15
15-28	4.0	轴线、贴壁	0~15
29-42	5.0	轴线、贴壁	0~15
43-51	2.7、4.0、5.0	贴壁	1、2、4

注:表中坡度 0~15% 的取值分别为 0、3%、5%、7%、10%、12%、15%。

1.2 网格优化

以水平隧道下热释放速率为 2.7 MW 轴线火为例,火源的特征直径为 1.431 5 m, FDS 的网格尺寸取火源特征直径的 1/4~1/16,约为 0.09~0.36 m。由于研究重点是顶棚烟气的最大温升,因此需要对竖直方向的网格尺寸进行细化,考虑了四个网格方案:① 0.125 m×0.125 m×0.12 m;② 0.187 5 m×0.187 5 m×0.15 m;③ 0.2 m×0.2 m×0.2 m;④ 0.3 m×0.3 m×0.3 m。

图3为四个方案的纵向烟气温度分布比较结果。随着网格精度的增加,温度数据不断接近,方案①和②模拟结果差距很小;由于使用28个MPI并行运行,方案①网格的计算时间为120 h,比方案②网格的25 h高出数倍,但预测精度没有显著改善,考虑到数据精度与计算资源的平衡,选择方案②。

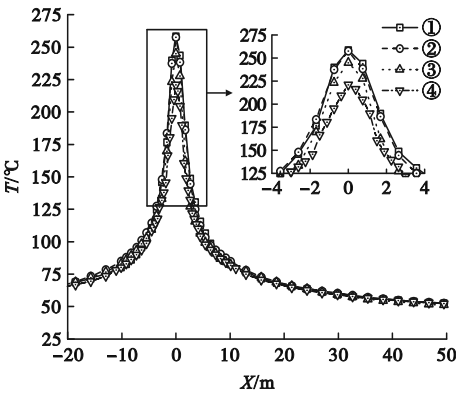


图2 网格方案分析

Fig. 2 Grid schemes analysis

1.3 模型验证

图3为工况1最大温升点的温升-时间曲线。可以看出,起火60 s后,顶棚气体温度达到准稳态,取60~360 s的数据平均值对顶棚最大温升进行分析,平均值在允许误差范围内。

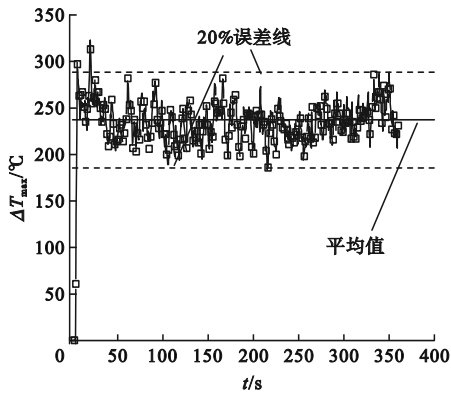


图3 工况1的温升-时间曲线

Fig. 3 Temperature rise-time curve of condition 1

文献[21]给出了水平隧道不同火源横向位置的隧道火灾顶棚最大温升预测公式:

$$\Delta T_{\max} = 17.9 \frac{\Phi^{2/3}}{H^{5/3}} (1.096 e^{-\frac{14.078 D}{W/2}} + 1). \quad (1)$$

式中: ΔT_{\max} 为顶棚最大温升,℃; Φ 为火源热释放速率,kW; H 为隧道高度,m; D 为火源中心与侧壁的距离,m; W 为隧道宽度,m。

图4为笔者建立模型中部分工况的数值模拟结果与文献[21]和[22]的经验模型的预测值对比。总体来看,误差在允许范围内,说明笔者所建的FDS模拟模型是可靠的,利用该模型研究倾斜隧道火灾的顶棚最大温升是可行的。

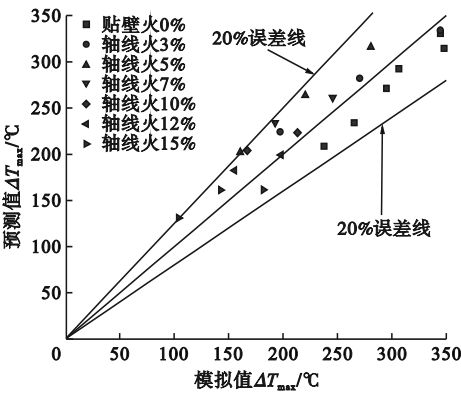


图4 数值模拟与文献[21]、文献[22]对比

Fig. 4 Comparison between numerical simulation and literature [21] and [22]

2 结果与讨论

2.1 坡度与火源位置对最大温升的影响

图5为不同坡度隧道贴壁火与轴线火的顶棚最大温升。

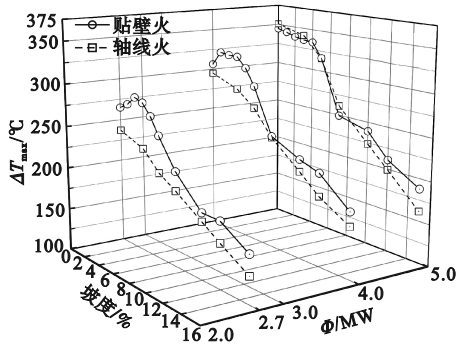


图5 顶棚最大温升对比

Fig. 5 Maximum ceiling temperature rise comparison

从图5可以看出,当火源热释放速率为2.7 MW时,侧壁限制使得最大温升显著增加;火源热释放速率为4.0 MW时,贴壁火

与轴线火最大温升的差值较 2.7 MW 工况减小,但贴壁火优势依旧明显;当热释放速率增大到 5 MW 时,贴壁火与轴线火最大温升的差值较小。这是由于火源贴壁时,在火焰热辐射和火羽流对流换热的作用下,侧壁温度升高,使得火源表面接受到的辐射热反馈增大(见图 6)。此外,贴壁火卷吸空气受到限制,火焰需要蔓延更长的路径才能得到燃烧需要的氧气,火焰更接近顶棚。随着火源热释放速率增大,贴壁火的最大温升优势逐渐减小,主要是由于火源中心与侧壁距离增加,侧壁限制空气卷吸的作用减弱。

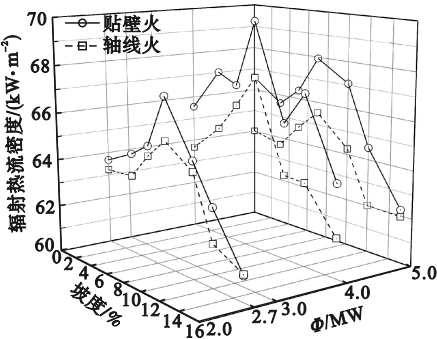


图 6 火源表面接收的辐射热

Fig. 6 Radiant heat of fire source surface

从图 5 可以看出,轴线火的顶棚最大温升随着坡度的增大呈线性衰减,这与 L. H. Hu^[8]的研究结果一致。这是因为倾斜隧道的浮力效应使得上游入口流入更多空气,火源周围空气受到卷吸和对流作用更加增强;加上重力的作用,火羽流向下游倾斜,导致其真实路径变长,最终导致顶棚最大温升减小。

贴壁火的顶棚最大温升与坡度呈非线性关系:①当火源热释放速率为 2.7 MW 和 4 MW 时,随着坡度的增加,顶棚最大温升先增大后减小,两者分别在坡度 2%、1% 取得最大值;随着坡度继续增加,顶棚最大温升呈指数衰减;②当火源热释放速率增大到 5 MW 时,顶棚最大温升随着坡度的增大持续衰减。

烟气层边界气体温度设为 25 ℃^[23],提取火灾下游竖直热电偶温度数据,得到了坡度为 0~5% 倾斜隧道不同热释放速率的贴

壁火下游的平均烟气层厚度,如表 2 所示。从表 2 可以看出,火源热释放速率为 2.7 MW 和 4 MW 时,烟气层厚度分别在坡度 2%、1% 时取得最低值,说明此时浮力效应带来的新鲜空气缓解了火源贴壁带来的空气卷吸限制,促进了可燃气体充分燃烧,使得顶棚最大温升增大;随着坡度继续增大,新鲜空气过量导致烟气层厚度增大,从而降低顶棚最大温升。火源热释放速率为 5 MW 时,一方面火源贴壁带来的空气卷吸限制较弱,另一方面火源热释放速率增大使得浮力效应更强,从上游入口流入更多的新鲜空气,导致烟气层厚度随着坡度的增加而持续增大,顶棚最大温升持续降低。

表 2 贴壁火下游烟气层厚度
Table 2 Thickness of downstream smoke layer
mm

坡度/%	不同火源热释放速率		
	2.7 MW	4.0 MW	5.0 MW
0	1 532	1 788	1 873
1	1 460	1 710	1 920
2	1 440	1 820	1 980
3	1 500	1 873	2 108
4	1 520	1 940	2 180
5	1 548	1 978	2 206

2.2 倾斜隧道贴壁火灾最大温升预测模型

将火源贴壁时不同坡度的顶棚最大温升无量纲化为 $\Delta T'_{\max}/\Delta T_{\max}$ ($\Delta T'_{\max}$ 为倾斜隧道顶棚最大温升, ΔT_{\max} 为水平隧道顶棚最大温升),与隧道坡度的关系如图 7 所示。

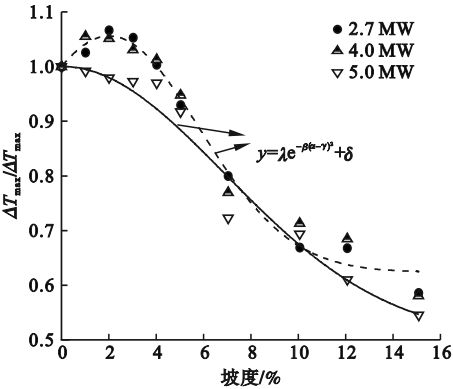


图 7 贴壁火最大温升衰减

Fig. 7 Maximum temperature rise attenuation of wall fires

从图7中可以看出,随着坡度增大,无量纲最大温升与坡度呈指数分布,二者的拟合关系式^[10]:

$$\frac{\Delta T'_{\max}}{\Delta T_{\max}} = \lambda e^{-\beta(\alpha-\gamma)^2} + \delta.$$

(2)

式中: λ 、 β 、 γ 、 δ 为常数。

由于火源热释放速率2.7 MW与4 MW工况的最大温升随坡度的变化规律非常接近,且与火源热释放速率5 MW明显不同,因此对贴壁火顶棚最大温升随坡度的衰减规律拟合时,将数据分为两类进行分析,数据拟合效果较好。

联立式(1)、式(2)得到适用于预测倾斜隧道贴壁火顶棚最大温升的预测模型:

$$\Delta T'_{\max} = 17.9 \frac{\Phi^{2/3}}{H^{5/3}} (1.096 e^{-\frac{14.078 D}{W/2}} + 1) \times (\lambda e^{-\beta(\alpha-\gamma)^2} + \delta).$$

(3)

式中各参数值如表3所示。

表3 各参数的拟合值

Table 3 The fitted values of parameters

火源热释放 速率/MW	λ	β	γ	δ	R^2
2.7、4.0	0.432	0.035	2.002	0.624	0.98
5.0	0.499	0.011	0	0.501	0.97

2.3 顶棚最大温升点的位置

H. Kurioka 等^[4]在研究隧道火灾火焰倾角时提出,将250℃作为燃烧区域的边界温度,因环境温度设为20℃,所以燃烧区域边界温度定为270℃。定义 L 为最大温升点与火源中心的纵向距离,其与坡度、火源位置和火源热释放速率的关系如图8所示。从图8中可以看出,最大温升点随着坡度和火源热释放速率的增加不断向火源下游移动,这是由于浮力效应逐渐增强使得火羽流逐渐向下游倾斜。

图9为坡度0~15%倾斜隧道中热释放速率为4 MW的贴壁火和轴线火的羽流特性以及最大温升点位置。从图9中可以看出,贴壁火的燃烧区域大于轴线火,坡度为7%倾斜隧道贴壁火的燃烧区域纵向跨度较

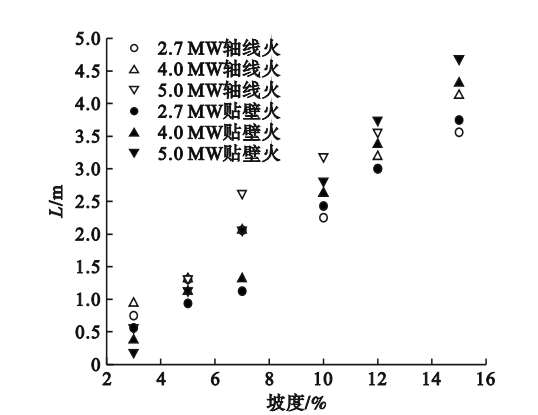


图8 最大温升点纵向位置

Fig. 8 Longitudinal position of maximum temperature rise point

小,这是因为浮力效应和侧壁摩擦阻力同时作用使得火焰向下游倾斜,并在火源一侧发生合并。当坡度 α 小于10%时,在火源贴壁时 L 较小,在火源位于轴线时 L 较大;当坡度达到10%之后,两者最大温升点的纵向位置开始接近,最后贴壁火反超轴线火。由于贴壁火和轴线火的火焰受力机制不同,在烟气运动方向,轴线火的火焰只受到浮力分量的作用,而贴壁火的火焰还受到侧壁指向火灾上游方向的摩擦阻力;火焰在侧壁的吸附作用下,向侧壁倾斜并贴向壁面,隧道侧壁对火焰的摩擦阻力作用限制了火羽流向下游倾斜。随着坡度的增大,浮力在烟气运动方向产生的分量增大,带动纵向气流的流动加快。根据伯努利方程,流速增大压强减小,吸附在侧壁上的火焰逐渐远离侧壁,火焰与侧壁的接触面积减小,这一点从最大温升点与侧壁的距离可以看出,当坡度从0增加到15%时,不同火源热释放速率贴壁火的顶棚最大温升点与侧壁的距离分别增大了0.375 m、0.562 5 m、0.562 5 m(见表4)。火焰与侧壁接触面积的减小使得侧壁对火焰的摩擦阻力减小,贴壁火与轴线火火焰的受力差距逐渐缩小。此时浮力分量对火羽流的偏转起主导作用,而贴壁火的顶棚烟气温度更高,因此浮力分量大于轴线火,最终导致贴壁火的最大温升点与火源的纵向距离逐渐接近轴线火

并反超轴线火。

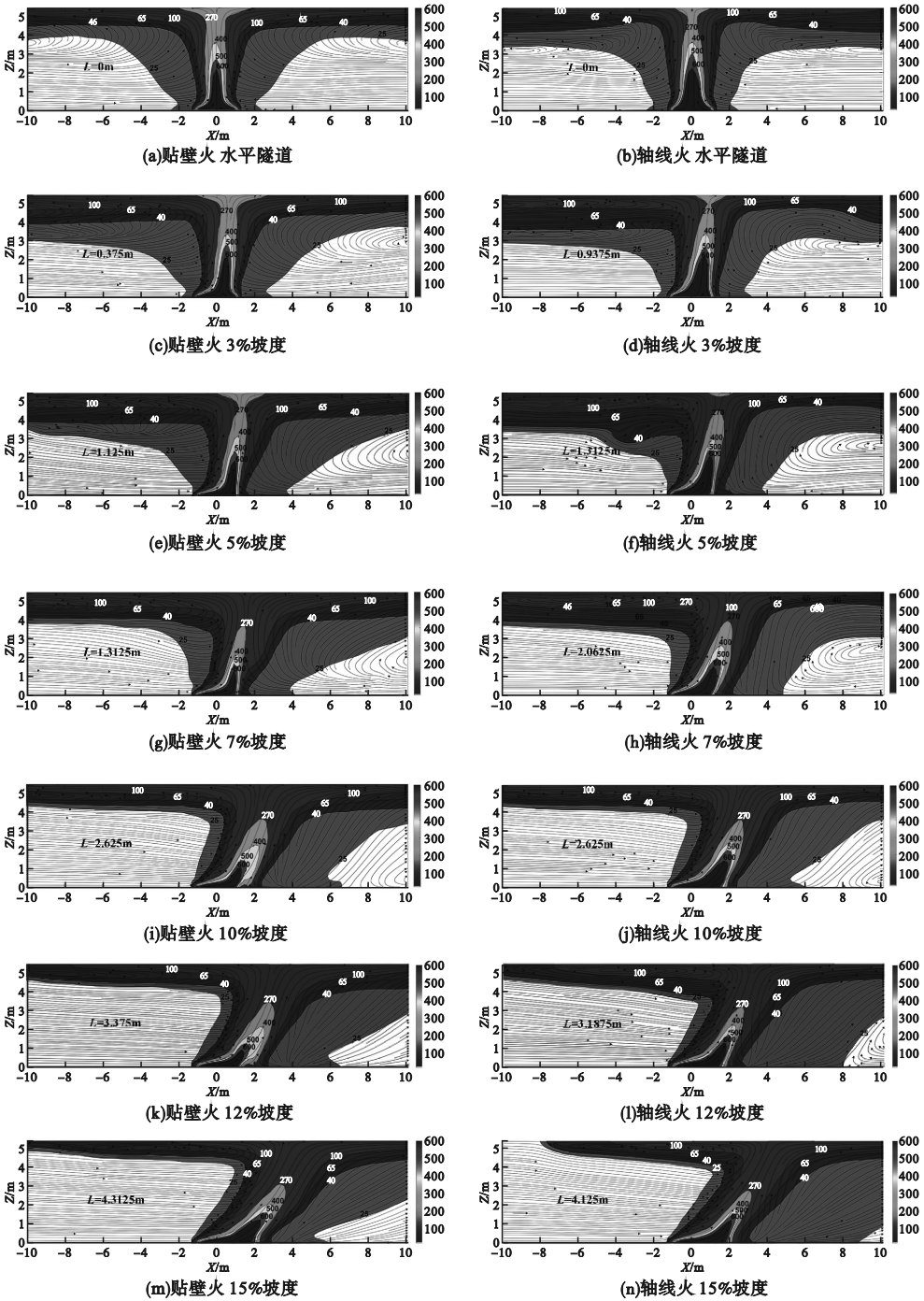


图9 热释放速率4 MW 火灾的纵向温度-速度流场分布图

Fig. 9 Longitudinal temperature-velocity flow field distributions of fire of heat release rate of 4 MW
最大温升点的位置与烟气的热物性参数
等因素相关,可以用一个函数来表示:
$$L=f(\Phi, H, C_p, T_a, \rho_a, g, \alpha). \quad (4)$$

式中: L 为最大温升点距火源中心的纵向距

离; m ; α 为隧道坡度, $^\circ$; T_a 为环境温度, $^\circ C$;
 ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; C_p 为比热容,
 $J/(kg \cdot K)$; g 为重力加速度, m/s^2 。
使用量纲分析法对函数关系式进行简化如下:

$$\frac{L}{H}=f\left(\frac{\Phi}{H^{3/2}g^{3/2}\rho_a},\frac{C_pT_a}{Hg},\alpha\right)=f\left(\frac{\Phi}{H^{5/2}g^{1/2}C_pT_a\rho_a},\alpha\right).$$

(5)

记 $L^*=L/H$, $\Phi^*=\Phi/(H^{5/2}g^{1/2}C_pT_a\rho_a)$, 因此式(5)可表示为

$$L^*=f(\Phi^*,\alpha).$$

(6)

表 4 贴壁火最大温升点与侧壁的距离

Table 4 The distance between the maximum temperature rise point and the sidewall of wall fire

坡度/%	距离/m		
	2.7MW	4.0MW	5.0MW
0	0.5625	0.5625	0.75
5	0.5625	0.5625	1.125
10	0.5625	0.75	1.3125
15	0.9375	1.125	1.3125

注:2.7MW、4.0MW、5.0MW 表示不同的火源热源释放速率。

将所有工况的 L 与 Φ 按上式进行无量纲化,以 $\alpha\Phi^{*2/5}$ 为横坐标、 L^* 为纵坐标作图,如图 10 所示。

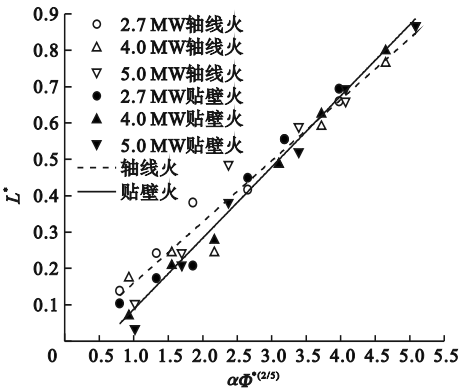


图 10 最大温升点位置拟合

Fig. 10 Maximum temperature rise point position fitting

从图 10 中可以看出,两者呈线性关系。将贴壁火与轴线火分别进行拟合,数据拟合效果较好,相关系数分别为 0.98 和 0.95。因此,在得知火源热释放速率、隧道顶棚高度、隧道坡度的基础上,就可以预测顶棚最大温升点的纵向位置:

$$L^*=\begin{cases} -0.107\,52+0.195\,49\,\alpha\Phi^{*2/5}, & \text{贴壁火;} \\ -0.008\,25+0.168\,13\alpha\Phi^{*2/5}, & \text{轴线火.} \end{cases}$$

(7)

3 结 论

(1)贴壁火的顶棚最大温升的增加现象在倾斜隧道中依旧存在,且随着火源中心与侧壁距离的缩小,侧壁限制的影响更加显著。

(2)随着隧道坡度的增大,空气卷吸和对流换热作用不断增强,在火源贴壁条件下,较小的坡度反而会促进火灾燃烧;由于不同火源的受限程度和上游卷吸的新鲜冷空气量不同,2.7 MW、4 MW、5 MW 工况的顶棚最大温升分别在坡度 2%、1%、0 时取得最大值,之后随坡度增加均呈指数衰减。

(3)在倾斜隧道中,由于贴壁火与轴线火的火焰受力机制不同,随着隧道坡度的增大,贴壁火的最大温升点与火源中心的纵向距离在坡度小于 10% 时小于轴线火,在坡度达到 10% 之后开始接近,并最终反超轴线火。

参考文献

[1] 张培红,于明川,宋健.公路隧道下沉式纵向疏散逃生楼梯间距的优化分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(4):688-694.
(ZHANG Peihong, YU Mingchuan, SONG Jian. Optimization analysis of stairway spacing for submerged longitudinal evacuation in highway tunnel [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30 (4):688-694.)

[2] 张培红,李楠.细水雾喷射角度对公路隧道火灾灭火效果的分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(4):756-761.
(ZHANG Peihong, LI Nan. Analysis on fire extinguishing effect of highway tunnel by spray Angle [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26 (4): 756-761.)

[3] ALPERT R L. Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors [J]. Fire technology,1972(8):181-195.

[4] 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.

- [5] LI Y Z, LEI B, INGASON H. The maximum temperature of buoyancy – driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires [J]. Fire safety journal, 2011, 46(4): 204 – 10.
- [6] 张志刚, 胡金平, 刘洪洲, 等. 水下公路隧道最大纵坡取值研究[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(4): 8 – 14.
(ZHANG Zhigang, HU Jinping, LIU Hongzhou, et al. Study of the maximum longitudinal gradient of underwater highway tunnels [J]. Modern tunnel technology, 2013, 50(4): 8 – 14.)
- [7] 叶欣欣. 超大纵坡公路隧道运营安全控制技术[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
(YE Xinxin. Research on operation safety control technology of super large longitudinal slope highway tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.)
- [8] HU L H, CHEN L F, WU L, et al. An experimental investigation and correlation on buoyant gas temperature below ceiling in a slopping tunnel fire [J]. Applied thermal engineering, 2013, 51(1/2): 246 – 254.
- [9] JI J, WAN H, LI K, et al. A numerical study on upstream maximum temperature in inclined urban road tunnel fires [J]. International journal of heat and mass transfer, 2015(88): 516 – 526.
- [10] ZHANG X, LIN Y, SHI C, et al. Numerical simulation on the maximum temperature and smoke back-layering length in a tilted tunnel under natural ventilation [J]. Tunnelling and underground space technology, 2021, 107: 103661.
- [11] 李建, 史聪灵, 王小勇. 坡度区间隧道地铁火灾烟气蔓延及温度分布规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(增刊2): 5 – 11.
(LI Jian, SHI Congling, WANG Xiaoyong. Study on smoke spread and ceiling temperature distribution law of inclined tunnel subway fire [J]. Journal of safety science and technology, 2021, 17(S2): 5 – 11.)
- [12] WANG Z, DING L, WAN H, et al. Numerical investigation on the effect of tunnel width and slope on ceiling gas temperature in inclined tunnels [J]. International journal of thermal sciences, 2020, 152: 106272.
- [13] 陈海峰, 周德闯, 王浩波, 等. 隧道坡度对临界风速影响的数值研究[J]. 火灾科学, 2009, 18(3): 148 – 153.
(CHEN Haifeng, ZHOU Dechuang, WANG Haobo, et al. Numerical study on the influence of tunnel slope on critical wind speed [J]. Fire science, 2009, 18(3): 148 – 153.)
- [14] 唐海峰. 横截面形状和坡度对隧道火灾烟气分布影响研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(1): 58 – 61.
(TANG Haifeng. Study on the influence of cross section shape and slope on fire smoke distribution in tunnel [J]. Fire science and technology, 2022, 41(1): 58 – 61.)
- [15] 范传刚. 隧道火灾发展特性及竖井自然排烟方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
(FAN Chuangang. Study on the development characteristics of tunnel fire and natural smoke exhaust method of shaft [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.)
- [16] GAO Z H, JI J, FAN C G, et al. Influence of sidewall restriction on the maximum ceiling gas temperature of buoyancy-driven thermal flow [J]. Energy and buildings, 2014(84): 13 – 20.
- [17] GAO Z H, LIU Z X, JI J, et al. Experimental study of tunnel sidewall effect on flame characteristics and air entrainment factor of methanol pool fires [J]. Applied thermal engineering, 2016(102): 1314 – 1319.
- [18] JI J, FU Y, LI K, et al. Experimental study on behavior of sidewall fires at varying height in a corridor-like structure [J]. Proceedings of the combustion institute, 2015, 35(3): 2639 – 2646.
- [19] 刘雨晴, 张培红. 大坡度倾斜巷道火灾烟气温度分布特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 156 – 162.
(LIU Yuqing, ZHANG Peihong. Study on smoke temperature distribution characteristics of large slope tunnel fire [J]. China safety science journal, 2021, 31(4): 156 – 162.)
- [20] ZHANG X C, YANG M J, WANG J A, et al. Effects of computational domain on numerical simulation of building fires [J]. Journal of fire protection engineering, 2010, 20(4): 225 – 251.
- [21] 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.
- [22] GAO Z, LI L, SUN C, et al. Effect of longitudinal slope on the smoke propagation and ceiling temperature characterization in sloping tunnel fires under natural ventilation [J]. Tunnelling and underground space technology, 2022, 123(5): 104396.
- [23] YI L, NIU J L, XU Z S, et al. Experimental studies on smoke movement in a model tunnel with longitudinal ventilation [J]. Tunnelling and underground space technology, 2013(35): 135 – 141.
(责任编辑: 王国业 英文审校: 刘永军)