

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-681-07

# 坡度隧道火灾自然排烟特性研究

屈昊聿 袁中原 余南阳 徐梦一 马洋洋

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 通过模型试验,研究了坡度隧道火灾自然排烟特性,试验结果表明:(1)受坡度影响,火羽流向上坡侧发生偏转,且偏转角几乎不受火源位置与HRR的影响,只随坡度的升高而线性增大;(2)顶壁下方最高烟气温度随坡度的升高而降低,基于理论分析和模型试验结果,得到了顶壁下方最高烟气温度的计算模型;(3)火源上坡侧的顶壁下方烟气温度受坡度变化的影响较小,下坡侧的顶壁下方烟气温度随坡度的降低而升高,并在坡度降为0时与上坡侧烟气温度关于火源对称分布,结合理论分析,得出了火源段顶壁下方烟气温度的衰减模型。

**【关键词】** 隧道火灾;自然通风;坡度隧道;烟气特性

中图分类号 U453.5 文献标识码 A

## Study on Natural Ventilation Smoke Gas Characteristics

Qu Haoyu Yuan Zhongyuan Yu Nanyang Xu Mengyi Ma Yangyang

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** In this paper, the smoke characteristics of sloped tunnel fire with natural ventilation was studied through model test. The experimental results indicate: (1) The shape of the fire plume deflected to the uphill side when tunnel has slope. The fire location, HRR, shaft height had no influence to fire plume deflection angle while this deflection angle increased with the increase of slope. (2) The increase of slope made the maximum temperature beneath ceiling decrease. Based on the theoretical analysis and model test results, the calculation formula of the maximum smoke temperature beneath ceiling was adopted. (3) Slope had a little influence to the temperature beneath ceiling on the uphill side. The temperature beneath ceiling on the downhill side increased with the decrease of slope and had a symmetrical distribution with the uphill side when the slope was 0%. The formula of temperature decay beneath ceiling in the fire source section was adopted with theoretical analysis.

**【Keywords】** Tunnel fire; Natural ventilation; Sloping tunnel; Smoke characteristic

## 0 引言

近年来,随着我国城市化的进行,地下交通成为城市交通系统的重要组成部分。据统计,中国已经是世界上隧道和地下工程数量最多,发展最快的国家<sup>[1]</sup>。

地下隧道具有狭长受限的特点,一旦发生火灾,会造成重大的人员伤亡,因此对其火灾烟气特性与烟气控制的研究具有重要的意义。

目前对于隧道火灾的研究主要集中在水平隧

道的机械排烟与自然排烟<sup>[2-4]</sup>,以及坡度隧道的机械排烟方面<sup>[5-7]</sup>,对于坡度隧道的自然排烟缺乏试验研究。当隧道存在坡度时,隧道内的高温烟气会受到烟囱效应的影响,烟气特性发生变化。本文通过模型试验与理论分析相结合的方法,对坡度隧道火灾自然排烟特性进行研究,分析了火羽流偏转角、顶壁下方最高烟气温度以及顶壁下方烟气温度分布受坡度的影响规律,可以为实际工程的防排烟设计提供参考。

作者简介: 屈昊聿 (1996.12-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为隧道火灾, E-mail: 564728894@qq.com

通讯作者: 袁中原 (1983.08-), 男, 副教授, E-mail: zhongyuan.yuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-05-05

### 1 模型试验

根据 Froude 相似原理建立了缩尺比为 1/20 的模型隧道试验台，试验台由坡度调节架、隧道主体和竖井组成。隧道主体长 8m，宽 0.25m，高 0.25m，由三种材料搭建而成：火源段顶板为 5mm 厚无机玻璃钢，可防止火源段因温度过高而烧毁；隧道其中一个侧壁为 5mm 厚防火玻璃，以便对隧道中的燃烧状况与烟气进行观察，其余部分为 10mm 厚石膏板。竖井长 0.1m，宽 0.25m，高 0.1m，由石膏板制成，安装在隧道顶壁预留的孔口上，试验台如图 1 所示。



图 1 模型试验台

Fig.1 The picture of tunnel model

在隧道顶壁下方 1cm 处布置 K 型铠装热电偶以监测顶壁下方烟气温度，如图 2 所示。采用安捷伦 34980A 采集烟气温度数据，采样间隔为 5s，取各工况下热电偶测温结果的稳定段温度平均值为该热电偶处的烟气温度。



图 2 热电偶布置图

Fig.2 The diagram of thermocouple arrangement

选取甲醇为试验燃料，通过油盘的尺寸来对火源功率进行控制，油盘的边长分别为 5.5cm、7.5cm、

9.5cm。使用精密电子称对燃料燃烧时的质量损失速率进行测量，测量间隔为 2s，取其中燃料质量下降稳定的时间段内的质量损失速率，燃料燃烧的火源功率由式 (1) 计算得出：

$$Q = \chi m_f \Delta H \tag{1}$$

式中：Q 为火源热释放率；χ 为燃烧效率（对于酒精燃料一般取 1）；m<sub>f</sub> 为质量损失速率；ΔH 为燃料的燃烧热。

最终得到 5.5cm、7.5cm、9.5cm 边长油盘的 HRR 分别为 0.935kW、1.599kW、2.733kW。

在隧道模型的中轴线上共设置 3 个纵向火源位置，如图 3 所示，其中位置 A 为隧道纵向中心，位置 B 为位置 A 与下坡侧竖井内壁之间的中点，位置 C 为火源外侧紧贴下坡侧竖井内壁的位置。

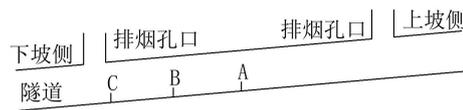


图 3 火源位置示意图

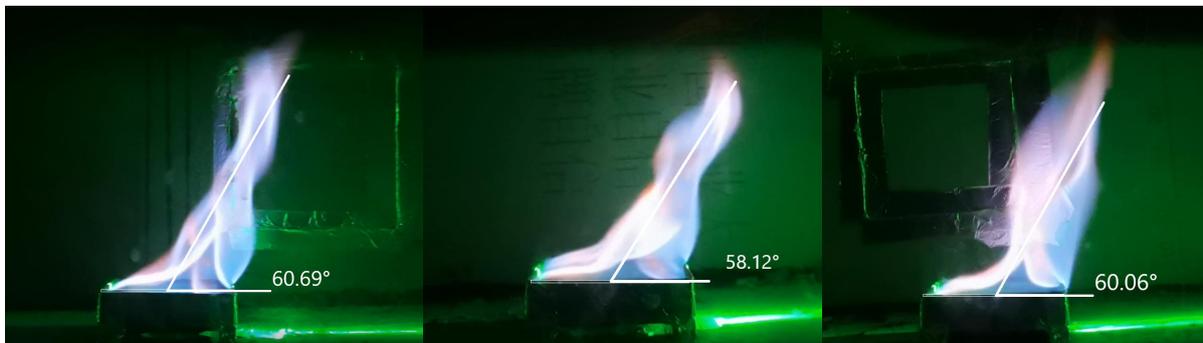
Fig.3 The diagram of fire source location

### 2 结果分析与讨论

#### 2.1 火羽流偏转角

如图 4 所示为坡度 5%、HRR=1.599kW 时，不同纵向火源位置处的火羽流偏转角，试验结果表明当隧道具有坡度时，在烟囱效应的影响下，火羽流会向坡度升高的方向倾斜。

由图 4 可见，当坡度与 HRR 不变时，火源位置对火羽流偏转角基本没有影响。其原因是火源位置的变化所引起的火源两侧热压的变化对羽流的卷吸影响非常小。



(a) 位置 A

(b) 位置 B

(c) 位置 C

图 4 不同火源位置处的火羽流偏转角

Fig.4 Effect of fire location on flame deflection angle

如图 5 所示为坡度 5%、火源位置 C, 不同  $HRR$  时的火羽流偏转角, 图中结果显示,  $HRR$  对火羽流偏转角几乎没有影响。其原因是  $HRR$  增大使火

羽流温度升高, 受到坡度引起的热压作用更强的同时, 火羽流的卷吸也会增强, 两方面因素共同作用下, 火羽流偏转角几乎不产生变化。

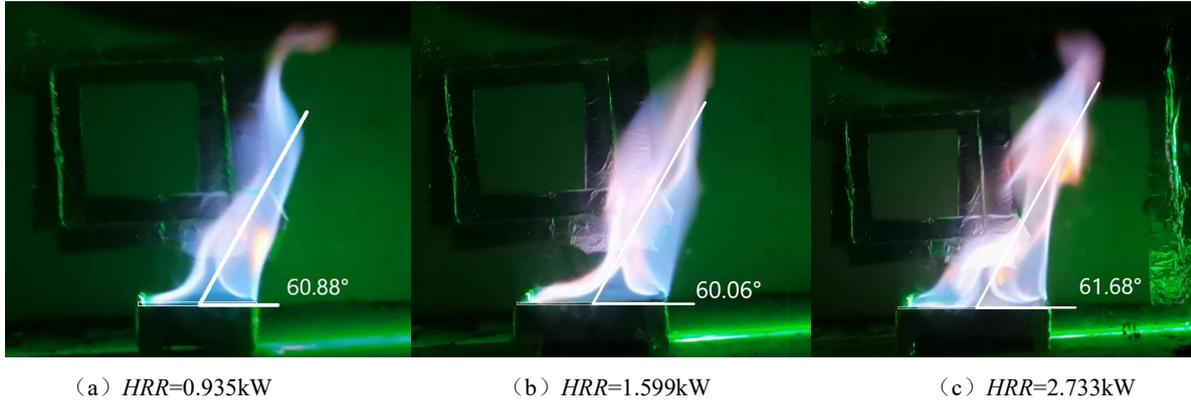


图 5 不同  $HRR$  时的火羽流偏转角

Fig.5 Effect of  $HRR$  on flame deflection angle

对不同坡度时火羽流与水平面的夹角  $\theta$  进行汇总, 可得夹角  $\theta$  与坡度的关系如图 6 所示, 由图可见角  $\theta$  随坡度的增大而近似线性减小, 因此对其进行线性拟合可得角  $\theta$  与坡度的关系式为:

$$\theta = 84.827 - 4.959\beta, \beta \geq 2\% \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为火羽流与水平面的夹角;  $\beta$  为隧道坡度,  $\beta\%$ 。

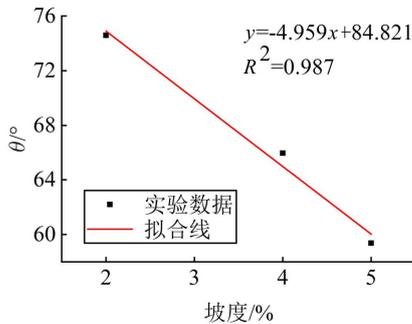


图 6 角  $\theta$  与隧道坡度关系图

Fig.6 Effect of tunnel slope on flame deflection angle

将坡度对火羽流的影响等效为水平隧道时纵向风速 (称为纵向诱导风速) 对火羽流的影响, 由 Raj<sup>[8]</sup> 的研究成果知, 火羽流偏转角与纵向风速的关系可以表示为式 (3)。

$$\sin \theta = \begin{cases} 1, & V' \leq 0.19 \\ (5.26V')^{-1/2}, & V' > 0.19 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为火羽流与水平面的夹角,  $V'$  为无量纲风速, 可由  $V' = u / \omega^*$  得出;  $u$  为纵向风速 (即纵向诱导风速); 火羽流特征速度

$\omega^* = (Q_c g / b_f \rho_0 c_p T_0)^{1/3}$ ;  $b_f$  为火源半径;  $\rho_0$  为环境气体密度;  $T_0$  为环境气体温度;  $Q_c$  为对流热释放率;  $g$  为重力加速度。

因此当坡度低于 2% 时, 火羽流受到的影响减弱, 此时式 (2) 是否适用仍需进一步验证。

### 2.2 顶壁下方最高烟气温度

图 7 为火源位于位置 A 时不同  $HRR$  下顶壁下方烟气最高温度与坡度的关系图, 由试验结果可知, 顶壁下方最高烟气温度随坡度的升高而下降, 其原因是坡度的升高会使火羽流产生偏转, 羽流上升段的长度更长, 通过辐射换热的方式损失的热量更多, 且在坡度引起的热压的影响下会使火源附近的气流速度增大, 火羽流受到更大的扰动, 卷吸进羽流的环境气体更多, 在  $HRR$  不变的情况下, 形成的烟气质量流量更多, 因此顶壁下方最高烟气温度下降。

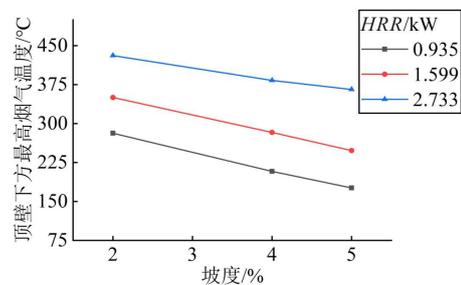


图 7 顶壁下方最高烟气温度与坡度关系图

Fig.7 Effect of tunnel slope on maximum ceiling temperature increase

将坡度对顶壁下方最高烟气温度的影响也等效为水平隧道时的纵向诱导风速。纵向诱导风速可由式 (2)、(3) 计算得出。

李颖臻<sup>[2]</sup>通过模型试验, 得出在通风状态下, 较小火灾(火羽流未能撞击顶壁)顶壁下方最高烟气温度可以表示为式 (4):

$$\Delta T_{\max} = \begin{cases} \frac{2.68C_T(1-\chi_r)^{2/3}g^{1/3}}{(\rho_0c_pT_0)^{1/3}}\frac{Q}{ub_f^3H^{5/3}}, V' > 0.19 \\ 14.1C_T(1-\chi_r)^{2/3}\left(\frac{Q}{H^{5/2}}\right)^{2/3}, V' \leq 0.19 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\chi_r$  为辐射散热所占的火羽流总散热量的比例;  $C_T$  为温度修正系数;  $H$  为隧道高度。

本实验当  $\beta \geq 2\%$  时, 火羽流具有偏转角, 联立式 (2)、(3)、(4) 可得:

$$\Delta T_{\max} = \frac{14.0968C_T(1-\chi_r)^{1/3}\left[\sin\left(\frac{-4.959\beta+84.827}{180}\pi\right)Q^{1/3}\right]^2}{H^{5/3}}, \beta \geq 2\% \quad (5)$$

式中:  $\sin\left[\left(-4.959\beta+84.827\right)\pi/180\right]$  即为火羽流与水平面的夹角的正弦值  $\sin\theta$ 。

将试验结果关于式 (5) 进行拟合, 拟合结果如图 8 所示, 顶壁下方最高烟气温度与坡度的关系可以表示为式 (6), 拟合结果较好。式 (6) 是否适用与小于 2% 的坡度仍需验证。

$$\Delta T_{\max} = \frac{24.94\left[\sin\left(\frac{-4.959\beta+84.827}{180}\pi\right)Q^{1/3}\right]^2}{H^{5/3}}, \beta \geq 2\% \quad (6)$$

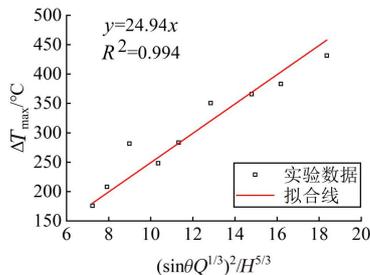
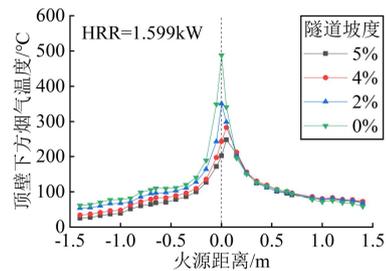


图 8 试验数据关于式 (5) 拟合

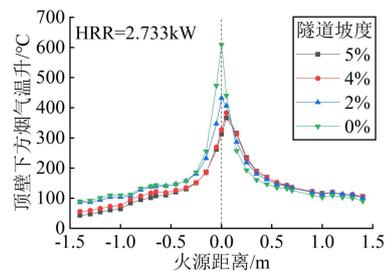
Fig.8 Experimental results fitted with Eq (5)

### 2.3 顶壁下方烟气温度分布

图 9 为火源位于位置 A 时, 不同坡度下的火源段顶壁下方烟气温度分布图。由试验结果可知: 当隧道具有坡度时, 火源两侧的顶壁下方烟气温度分布不具有对称性, 上坡侧温度高于下坡侧温度, 原因是在隧道坡度的影响下, 火羽流向火源上坡侧发生偏转, 其撞击顶壁的位置向上坡侧偏移, 同时烟囱效应促使更多的烟气流向上坡侧的同时阻碍烟气向下坡侧流动; 其次, 随着坡度的降低, 上坡侧的顶壁下方烟气温度分布变化极小, 下坡侧的顶壁下方烟气温度则会上升, 直到坡度降为 0 时, 火源两侧烟气温度呈对称分布, 原因是一方面坡度的增大促使更多的烟气流向上坡侧, 另一方面如 2.2 所述坡度的增大使燃烧生成烟气的温度降低, 同时还会促进纵向排烟作用, 在这两方面因素的共同影响下产生了这一现象。



(a) HRR=1.599kW



(b) HRR=2.733kW

图 9 顶壁下方烟气温度分布与坡度的关系图

Fig.9 Effect of tunnel slope on ceiling temperature increase

### 2.4 顶壁下方烟气温度衰减模型

在一维扩散段选取参考点  $ref$ , 坡度隧道火源两侧顶壁下方烟气温度衰减可表示为式 (7):

$$\frac{T}{T_{ref}} = e^{-kk_s \frac{(x-x_{ref})}{H}} \quad (7)$$

式中:  $\Delta T$  为顶壁下方烟气温度与环境温度的差值;  $k$  为水平隧道温度衰减系数;  $k_s$  为温度衰减系数的坡度修正系数;  $H$  为隧道高度;  $x$  为火源距离。

参考点无量纲烟气温度表示为:

$$T_{ref}^* = \frac{T}{Q^{*2/3} T_0} \quad (8)$$

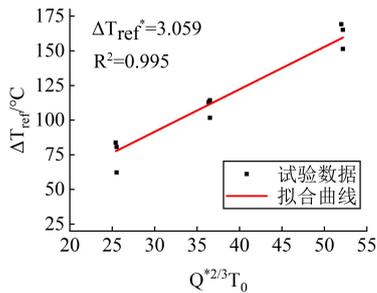
无量纲火源功率为:

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 g^{1/2} H^{5/2}} \quad (9)$$

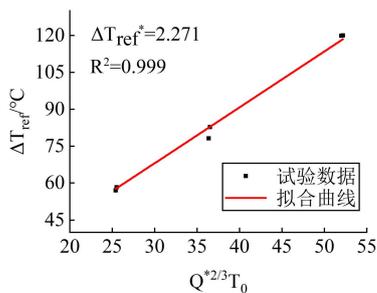
联立式 (7)、(8)、(9) 得:

$$\Delta T = \Delta T_{ref}^* Q^{*2/3} T_0 e^{-kk_s \frac{(x-x_{ref})}{H}} \quad (10)$$

选取距离火源第五个热电偶处为参考点, 以 5% 坡度为例, 对参考点无量纲烟气温度关于式 (8) 进行拟合, 拟合结果如图 10 所示, 对顶壁下方烟气温度衰减系数关于式 (7) 拟合, 拟合结果如图 11 所示, 曲线关于试验数据拟合情况较好。



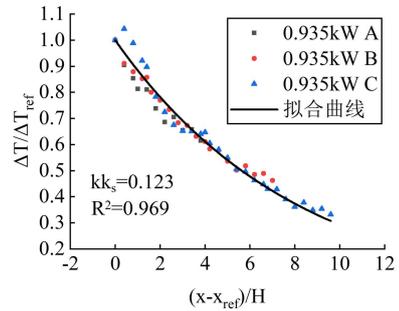
(a) 上坡侧  $\Delta T_{ref}^*$  拟合



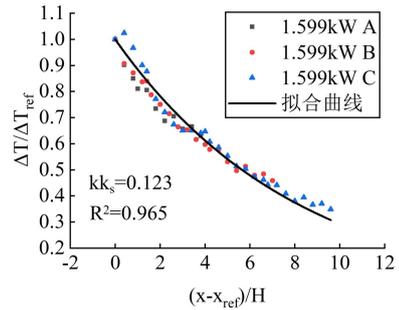
(b) 下坡侧  $\Delta T_{ref}^*$  拟合

图 10 5% 坡度参考点无量纲烟气温度拟合

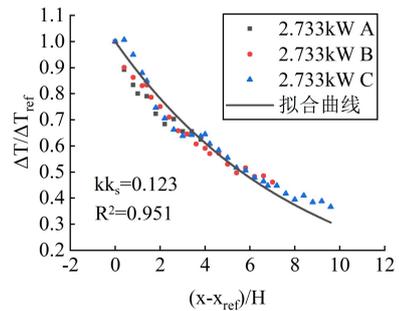
Fig.10 Experimental results fitted with Eq (8) when slope was 5%



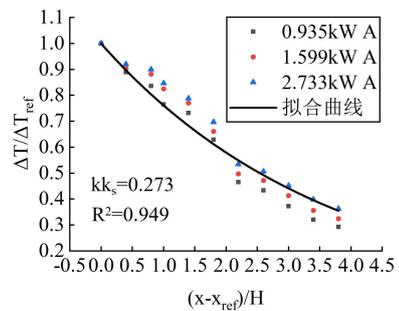
(a)  $HRR=0.935\text{kW}$  上坡侧



(b)  $HRR=1.599\text{kW}$  上坡侧



(c)  $HRR=2.733\text{kW}$  上坡侧



(d) 下坡侧

图 11 5% 坡度烟气温度衰减系数拟合

Fig.11 Experimental results fitted with Eq (7) when slope was 5%

对 0%、2%、4%、5% 坡度进行拟合, 最终结果如表 1 所示, 由拟合结果可知, 当坡度变化时,

上坡侧参考点温度衰减系数非常接近,这是坡度升高造成烟气温度下降与更多烟气流向上坡侧的共同作用导致的;下坡侧参考点无量纲烟气温度随坡度的下降而升高,烟气温度衰减系数随坡度的下降而下降,并在坡度降至 0 时与上坡侧相等,其原因是坡度下降时对烟气向下坡侧扩散的阻碍作用减小,更多的烟气流向下坡侧,且流向下坡侧的烟气受隧道口来流的扰乱减弱,对环境气体的卷吸减小。

表 1 坡度隧道拟合结果

Table 1 Fitting result of sloped tunnel

坡度/%	上坡侧	下坡侧	上坡侧	下坡侧
	$\Delta T_{ref}^*$	$\Delta T_{ref}^*$	$kk_s$	$kk_s$
5	3.059	2.271	0.123	0.273
4	3.033	2.458	0.129	0.234
2	2.992	2.805	0.141	0.180
0	2.973	2.973	0.131	0.131

对坡度隧道参考点无量纲烟气温度与水平隧道参考点无量纲烟气温度的比值  $\Delta T_{refs}^* / \Delta T_{ref0}^*$ , 及温度衰减系数  $k_s$  进行拟合, 结果如图 12 所示。因为上坡侧各坡度温度衰减系数十分接近, 对其求平均得  $k = 0.131$ 。根据拟合结果, 水平隧道火灾自然排烟的火源段顶壁下方烟气温度可以表示为式 (11)。

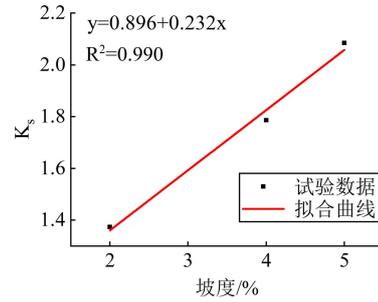
$$\Delta T = 2.973Q^{*2/3}T_0e^{-0.131\frac{(x-x_{ref})}{H}} \quad (11)$$

坡度隧道火灾自然排烟的火源段顶壁下方烟气温度可以表示为式 (12), 坡度为  $\beta\%$ 。

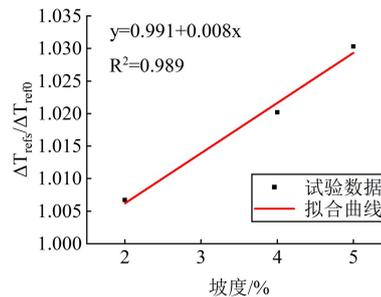
$$\Delta T = \begin{cases} a2.973Q^{*2/3}T_0e^{-0.131\frac{(x-x_{ref})}{H}}, & \text{上坡侧} \\ b2.973Q^{*2/3}T_0e^{-(c)0.131\frac{(x-x_{ref})}{H}}, & \text{下坡侧} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{式中: } \begin{cases} a = 0.991 + 0.008\beta \\ b = 1.068 - 0.006\beta \\ c = 0.896 + 0.232\beta \end{cases}$$

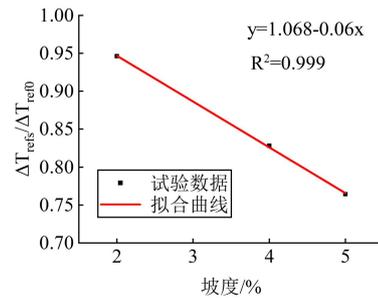
图 13 为式 (12) 计算值与试验值对比图, 由图可见计算值与试验值吻合较好。



(a)  $k_s$  拟合



(b) 上坡侧  $\Delta T_{refs}^* / \Delta T_{ref0}^*$  拟合



(c) 下坡侧  $\Delta T_{refs}^* / \Delta T_{ref0}^*$  拟合

图 12 系数关于坡度拟合图

Fig.12 Effect of tunnel slope on coefficient

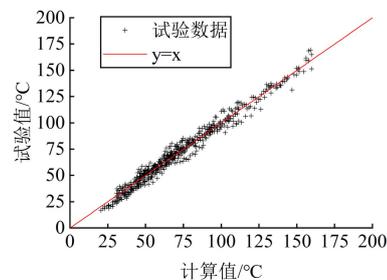


图 13 计算值与试验值对比图

Fig.13 Comparison between experimental data and results predicted with Eq(12)

### 3 结论

通过对坡度隧道火灾自然排烟特性的试验研究, 得出以下结论:

(1) 当隧道有坡度时, 火羽流会向上坡侧偏转, 且偏转角度几乎不受火源位置和  $HRR$  的影响, 只随坡度的升高而线性增大, 通过线性拟合得到了火羽流偏转角的计算模型。

(2) 顶壁下方最高烟气温度会随坡度的升高而降低, 结合理论分析, 得到了顶壁下方最高烟气温度的计算模型。

(3) 上坡侧的顶壁下方烟气温度受坡度变化的影响很小, 下坡侧顶壁下方烟气温度则会随坡度的降低而升高, 当坡度为 0 时, 两侧烟气温度关于火源对称分布, 结合理论分析, 得到了顶壁下方烟气温度衰减模型。

#### 参考文献:

- [1] 朱建峰. 我国智慧地铁发展现状与展望[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2019, 37(4): 6-9.
- [2] 李颖臻. 含救援站特长隧道火灾特性及烟气控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [3] 袁中原. 顶部开孔的地铁隧道火灾烟气扩散特性及控制方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [4] 陈滔. 地铁隧道火灾自然通风烟气特性及临界竖井长度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [5] Wang Z Y, Ding L, Wan H X, 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.
- [6] Yang Y X, Long Z, Cheng H H, et al. Experimental and numerical study of smoke temperature distribution characteristics in a sloped tunnel[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 73: 103091.
- [7] Zhao S Z, Li Y Z, Kumm M, et al. Re-direction of smoke flow in inclined tunnel fires[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 86: 113-127.
- [8] Raj P P K, Moussa A N, Aravamudau K. Experiments involving pool and vapor fires from spills of liquidified natural gas on water[R]. Prepared for U.S. Dept. of Transportation, U.S. Coast Guard, Rept. No. CG-D-55-79.