

中文引用格式:安伟光,薛晶云,王涛,等. 气压和风速对狭长受限空间电缆火灾轰燃的影响[J]. 中国安全科学学报,2025,35(7): 75-81.

英文引用格式:AN Weiguang,XUE Jingyun,WANG Tao,et al. Influence of air pressure and ventilation speed on flashover of cable fire in long-narrow confined spaces [J]. China Safety Science Journal,2025,35(7):75-81.

气压和风速对狭长受限空间电缆火灾轰燃的影响^{*}

安伟光^{1,2}教授,薛晶云¹,王涛¹,雇孟彬¹,王梦²,王喆^{**1}

(1 中国矿业大学 城市火灾防控江苏省高校重点实验室,江苏 徐州 221116;

2 徐州高新区安全应急装备产业技术研究院,江苏 徐州 221116)

中图分类号:X928.7

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.0562

基金项目:国家自然科学基金资助(52374244,51974298);江苏省科技计划专项资金项目(BE2023049);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021ZDPYYQ004)。

【摘要】 为探究高原环境下气压与通风风速对狭长受限空间电缆火灾轰燃临界条件的影响特征,基于量纲分析推导出轰燃临界顶棚温度与气压和通风风速的函数关系式;采用火灾动力学模拟软件(FDS),建立狭长受限空间电缆火灾模型,研究不同气压(101、90、77和65 kPa)和风速(0、0.5、1.0和1.5 m/s)条件下火灾发展过程中的轰燃临界温度值。结果表明:狭长受限空间电缆火灾的轰燃临界顶棚温度较高,在720.7~877.3℃范围内;轰燃临界顶棚温度与气压和通风风速之间呈幂函数关系,且随着气压和通风风速的增大而降低;该预测模型能够对自然通风和纵向通风2种场景下狭长受限空间电缆火灾的轰燃临界顶棚温度提供合理的预测,模型预测结果和数值模拟结果吻合良好。

【关键词】 气压; 通风风速; 狭长受限空间; 电缆火灾; 轰燃; 临界顶棚温度

Influence of air pressure and ventilation speed on flashover of cable fire in long-narrow confined spaces

AN Weiguang^{1,2}, XUE Jingyun¹, WANG Tao¹, GU Mengbin¹, WANG Meng², WANG Zhe¹

(1 Key Laboratory of Urban Fire Prevention and Control in Jiangsu Province, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China; 2 Xuzhou Hi-Tech Zone Safety and Emergency Equipment Industrial Technology Research Institute, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: In order to investigate the influence of air pressure and ventilation speed on the flashover critical conditions of cable fires in long-narrow confined spaces under plateau environments, a functional equation between the flashover critical ceiling temperature and air pressure and ventilation speed was derived based on dimensional analysis. A cable fire model in a long-narrow confined space was established using Fire Dynamics Simulator (FDS) to study the critical flashover temperature during fire development under different air pressures (101, 90, 77, and 65 kPa) and ventilation speeds (0, 0.5, 1.0, and 1.5 m/s). The results show that the flashover critical ceiling temperature of cable fires in long-narrow confined spaces is relatively high, ranging from 720.7 to 877.3 °C. The flashover critical ceiling temperature

^{*} 文章编号:1003-3033(2025)07-0075-07; 收稿日期:2025-03-21; 修稿日期:2025-05-30

^{**} 通信作者:王喆(1988—),女,河南焦作人,硕士,实验师,主要从事城市火灾防控方面的研究。E-mail: wangzhe0391@163.com。

follows a power-law relationship with air pressure and ventilation speed, while showing a decreasing trend with increasing pressure and ventilation speed. The established model provides reasonable predictions for the flashover critical ceiling temperature of cable fires in long-narrow confined spaces under both natural ventilation and longitudinal ventilation scenarios. The model prediction results agree well with the numerical simulation results.

Keywords: air pressure; ventilation speed; long-narrow confined space; cable fire; flashover; flashover critical temperature

0 引言

我国是城市地下综合管廊建设的超级大国,建设规模宏大,工艺技术一流^[1]。作为城市地下空间利用的重要组成部分,隧道和综合管廊等狭长受限空间具有显著的纵向延伸特征,其纵向尺度显著大于高度或横向尺度,且出口通常仅分布于空间两端。在这些狭长受限环境中,电缆火灾是近年来发生频率较高的一种火灾事故。与地面上常见的民用建筑火灾相比,电缆火灾具有纵向长度远大于断面尺寸、火灾荷载密集且连续的特征^[2]。这导致狭长受限空间内的电缆火灾呈现出特殊的危险性^[3-4]。

此外,随着高原地区城镇化进程的不断推进,该环境下特有的气压变化与通风风速对电缆火灾的动力学行为及燃烧特性的影响尤为显著,这引发了国内外学者的密切关注^[5]。MOST 等^[6]研究发现,高原低压低氧条件下空气浮力作用减弱,分子扩散系数随压力降低而降低;周志辉^[7]基于理论分析得到压力模型,发现质量燃烧速率正比于压力的 2/3 次方,并分别在合肥(100.8 kPa)和拉萨(64.3 kPa)进行 Jet-A 和正庚烷油池火试验验证了预测结果;王志^[8]开展了不同压力下导线火蔓延试验,研究发现火蔓延速率随压力增加而增大;胡可昕^[9]分析综合管廊不同通风条件下燃气舱内天然气扩散情况,得到事故通风最优方案。

轰燃是火灾发展中的突变现象,表现为可燃物同时燃烧引发全面火势,伴随温度急剧上升和高浓度烟气积聚,易造成较大人员和财产损失,是建筑火灾安全领域的重点研究对象^[10-12]。国内外学者的研究证明,使用火灾动力学模拟软件(Fire Dynamics Simulation, FDS)研究轰燃现象具有可靠性。如李松阳^[13]通过试验-理论-数值模拟综合方法验证了 FDS 在狭长空间火灾轰燃中的适用性;宗若雯^[14]通过对受限空间火灾轰燃的数值试验重构,证实 FDS 能模拟火源的热解和燃烧过程,进而较好地预测腔室火灾的发展过程;POPE 等^[15]使用 FDS 建立参数

化模型,将模拟结果与试验数据对比,证明了精细化 FDS 在轰燃后模拟中的有效性。

综上,现有气压和通风条件下电缆火灾的研究大多关注火蔓延速度、火焰形态、烟气扩散等,关于 2 种条件耦合作用下轰燃行为及其影响下顶棚温度的研究少有报道。鉴于此,本文首先采用量纲分析推导轰燃临界顶棚温度与气压和通风风速的函数关系。然后,利用 FDS 软件建立模型,开展数值模拟,探究气压和通风风速对电缆火灾轰燃发生的影响,并深入探讨轰燃临界顶棚温度变化,以期对相关规范制定及地下综合管廊火灾防治提供参考。

1 轰燃临界顶棚温度量纲分析

鉴于气压与通风风速的耦合效应对电缆火灾轰燃临界温度影响机制尚不明确,文中通过量纲分析法建立关键参数的无量纲关系式。分析国内外学者的研究^[3-5]可知,狭长受限空间中电缆火灾轰燃的临界顶棚温度与电缆工况密切相关,相关物理量见表 1。

表 1 不同物理量对应符号及量纲

Table 1 Symbols and dimensions corresponding to different physical quantities

编号	物理量	符号	单位	量纲
1	轰燃临界顶棚温度	t_c	℃	Θ
2	电缆热释放速率	$\dot{Q}$	kW	L^2MT^{-3}
3	环境温度	t_0	℃	Θ
4	空气密度	ρ_∞	kg/m ³	ML^{-3}
5	定压比热容	c_p	kJ/(kg·℃)	$L^2T^{-2}\Theta^{-1}$
6	重力加速度	g	m/s ²	LT^{-2}
7	狭长受限空间高度	H	m	L
8	通风风速	U_m	m/s	LT^{-1}
9	气压	P	kg/(m·s ²)	$ML^{-1}T^{-2}$

根据量纲分析理论^[3]设上述物理量中存在函数关系:

$$\varphi_1(t_c, \dot{Q}, t_0, \rho_\infty, c_p, g, H, U_m, P) = 0 \quad (1)$$

9个物理量中有4个独立变量,则应当产生5个无量纲量($\Pi_i, i=1,2,\dots,5$)。选取 t_0, ρ_∞, g 和 H 为基本变量。设无量纲量 Π_i 中4个独立变量的常数幂分别为 a_i, b_i, c_i, d_i ($i=1,2,\dots,5$),则:

$$\begin{aligned}\Pi_1 &= \rho_\infty^{a_1} \times t_0^{b_1} \times g^{c_1} \times H^{d_1} \times t_c, \\ \Pi_2 &= \rho_\infty^{a_2} \times t_0^{b_2} \times g^{c_2} \times H^{d_2} \times \dot{Q}, \\ \Pi_3 &= \rho_\infty^{a_3} \times t_0^{b_3} \times g^{c_3} \times H^{d_3} \times c_p, \\ \Pi_4 &= \rho_\infty^{a_4} \times t_0^{b_4} \times g^{c_4} \times H^{d_4} \times U_m, \\ \Pi_5 &= \rho_\infty^{a_5} \times t_0^{b_5} \times g^{c_5} \times H^{d_5} \times P\end{aligned}\quad (2)$$

计算得:

$$\begin{aligned}\Pi_1 &= \frac{t_c}{t_0}, \Pi_2 = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty g^{3/2} H^{7/2}}, \Pi_3 = \frac{c_p t_0}{gH}, \\ \Pi_4 &= \frac{U_m}{g^{1/2} H^{1/2}}, \Pi_5 = \frac{P}{\rho_\infty gH}\end{aligned}\quad (3)$$

则式(1)可以表示为5个无量纲量的关系:

$$\varphi_2\left(\frac{t_c}{t_0}, \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty g^{3/2} H^{7/2}}, \frac{c_p t_0}{gH}, \frac{U_m}{g^{1/2} H^{1/2}}, \frac{P}{\rho_\infty gH}\right) = 0\quad (4)$$

对式(4)进行变形可得:

$$\frac{t_c}{t_0} = \varphi_3\left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty g^{3/2} H^{7/2}}, \frac{c_p T_0}{gH}, \frac{U_m}{g^{1/2} H^{1/2}}, \frac{P}{\rho_\infty gH}\right)\quad (5)$$

将第一项与第二项无量纲量相除,可得无量纲热释放速率 $\dot{Q}^*$:

$$\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty g^{3/2} H^{7/2}} \times \left(\frac{c_p T_0}{gH}\right)^{-1} = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p t_0 g^{1/2} H^{5/2}} = \dot{Q}^*\quad (6)$$

则式(5)可变形为:

$$\frac{t_c}{t_0} = \varphi_4\left(\dot{Q}^*, \frac{U_m}{g^{1/2} H^{1/2}}, \frac{P}{\rho_\infty gH}\right)\quad (7)$$

再将第二项与第三项无量纲量相乘可得:

$$\frac{U_m}{g^{1/2} H^{1/2}} \times \frac{P}{\rho_\infty gH} = \frac{U_m P}{\rho_\infty g^{3/2} H^{3/2}}\quad (8)$$

对式(7)进行变形得:

$$\frac{t_c}{t_0} = \varphi_5\left(\dot{Q}^*, \frac{U_m P}{\rho_\infty g^{3/2} H^{3/2}}\right)\quad (9)$$

将 $\dot{Q}^*$ 移至等式左边,定义新的无量纲量 t_{cl}^* 和 P_1^* :

$$t_{cl}^* = \frac{t_c}{t_0 \dot{Q}^*}, P_1^* = \frac{U_m P}{\rho_\infty g^{3/2} H^{3/2}}\quad (10)$$

可得无量纲临界顶棚温度函数关系式:

$$t_{cl}^* = f_1(P_1^*)\quad (11)$$

式(11)描述了纵向通风时轰燃临界顶棚温度

与气压和通风风速的函数关系。

对于自然通风工况($U_m = 0$ m/s),设物理量中存在函数关系:

$$\psi_1(t_c, \dot{Q}, t_0, \rho_\infty, c_p, g, H, P) = 0\quad (12)$$

由相同步骤,定义新的无量纲量 t_{c2}^* 和 P_2^* :

$$t_{c2}^* = \frac{t_c}{t_0}, P_2^* = \frac{\dot{Q}^* P}{\rho_\infty gH}\quad (13)$$

可得无量纲临界顶棚温度函数关系式:

$$t_{c2}^* = f_2(P_2^*)\quad (14)$$

式(14)描述了自然通风条件下轰燃临界顶棚温度与气压的函数关系。

函数关系式所需的经验系数,可由数值模拟数据求得。

2 狭长受限空间电缆火灾 FDS 模型

利用 FDS 建立狭长受限空间电缆火灾模型,使用大涡模拟,采用有限体积辐射模型和混合分数燃烧模型,模拟时间设置为 5 000 s。

2.1 狭长受限空间及电缆火灾轰燃模型

根据地下狭长受限空间实物和《城市综合管廊工程技术规范》^[16]建立狭长受限空间模型,如图 1 所示。狭长受限空间截面宽度为 3.0 m,高度为 3.2 m,长度为 10.0 m,墙壁、顶棚、地板材料均为厚度 0.2 m 的混凝土。内部敷设 5 层电缆,上下电缆间距为 0.2 m,最下层电缆与狭长受限空间底部距离为 0.3 m,横向电缆间距为 0.1 m,检修通道 1.2 m。将电缆简化成长方体,长方体截面为 0.1 m×0.1 m 的正方形,材料体积按照铜:聚氯乙烯=1:1 进行配比。其中铜的导热系数为 387 W/(m·℃),密度为 8 940 kg/m³,比热容为 0.38 kJ/(kg·℃);聚氯乙烯的导热系数为 0.2 W/(m·℃),密度为 1 500 kg/m³,比热容为 1.5 kJ/(kg·℃)。

为便于研究电缆轰燃行为,火源设置在狭长受限空间上风口。结合预先模拟的结果,兼顾轰燃发生的可能性和模型稳定性,设定火源功率密度为 6 MW/m²,火源上表面积为 0.1 m²,高度为 0.1 m。此外,在狭长受限空间非火源端设置吸风口。

2.2 电缆与顶棚温度监测

图 2 为各探测设备位置示意图,顶棚热电偶沿 x 轴方向布置,间距为 0.1 m,共 100 个;电缆表面热电偶布置在选取的 4 根电缆 C1—C4 正上方,每根电缆上热电偶间距为 0.1 m,共 100 个。在非火源侧电缆处设置温度场切片。

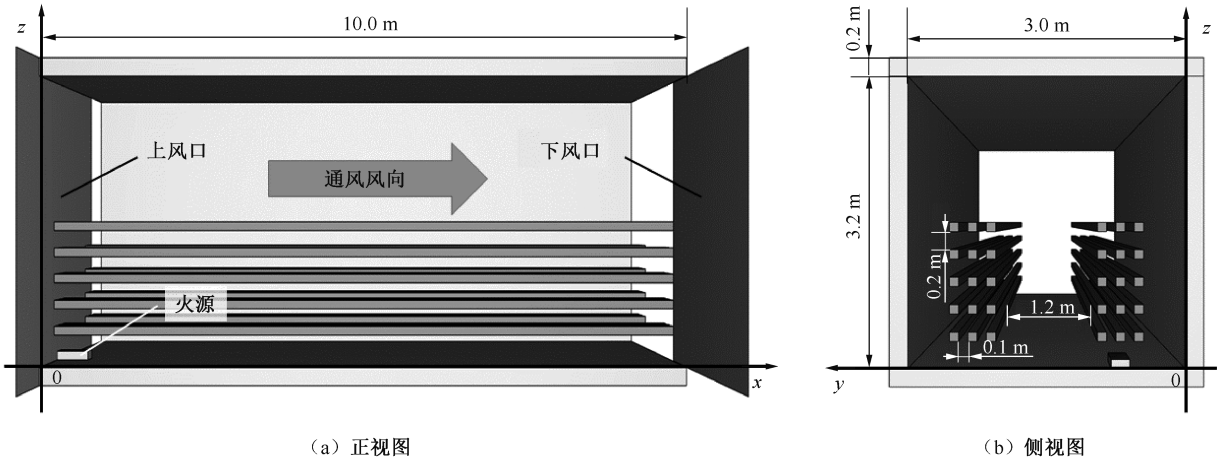


图 1 狭长受限空间模型
Fig. 1 Long-narrow confined space model

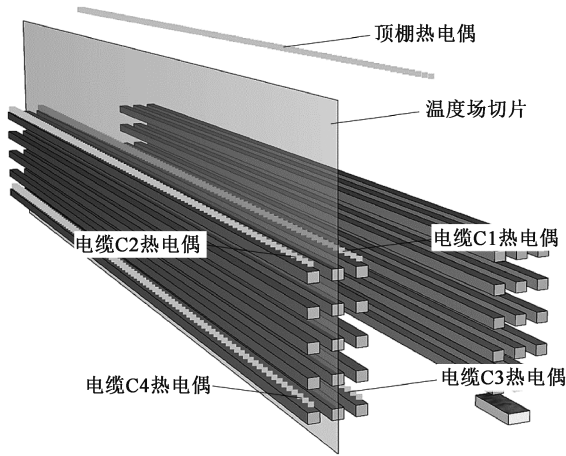


图 2 温度探测设备位置
Fig. 2 Location of temperature detection equipment

2.3 工况设计

选取徐州、乌鲁木齐、西宁、拉萨 4 个典型地点的气压环境,设置气压分别为 101、90、77 和 65 kPa。另外,参照规范^[16]设置 4 种纵向通风风速,分别为 0、0.5、1.0 和 1.5 m/s,探究气压和通风风速 2 种因素耦合对狭长受限空间内电缆火灾轰燃临界条件的影响。

2.4 网格验证

在 FDS 模拟中,选择合适的网格尺寸是建立模型的关键。网格越密集,计算所需的时间越长,计算的精度越高。若划分网格稀疏,则无法准确描述模型具体结构,结果误差较大。因此,网格尺寸的大小一般通过火源特征直径确定。FDS 用户手册建议 D^*/δ_x 的最优取值范围为 4~16。其中, D^* 为火源特征直径, δ_x 为网格尺寸。火源特征直径的计算公式为:

$$D^* = (\dot{Q}_f / (\rho_\infty c_p t_0 \sqrt{g}))^{2/5} \quad (15)$$

式中: $\dot{Q}_f$ 为火源总热释放速率,取 600 kW;空气密度 ρ_∞ 取 1.204 kg/m³;定压比热容 c_p 取 1.005 kJ/(kg·K);环境温度 t_0 取 19.85 °C (293 K); g 为重力加速度,取 9.81 m/s²。计算可得火源的特征直径 D^* 为 0.78 m。因此,网格尺寸 δ_x 的最优取值范围为 0.05~0.20 m。

结合预先模拟结果,将网格尺寸取值范围缩至 0.08~0.16 m,采取均匀划分网格的方法,选取 5 种不同网格尺寸(0.08、0.10、0.12、0.14 和 0.16 m)进行对比,结果如图 3 所示。可以看出,随着网格加密,温度曲线的差距逐渐减小。当网格尺寸为 0.08 和 0.10 m 时,温度曲线差别较小。在合理平衡计算精度和计算时间后,选用大小为 0.1 m×0.1 m×0.1 m 的网格单元格,网格总数量为 157 472。

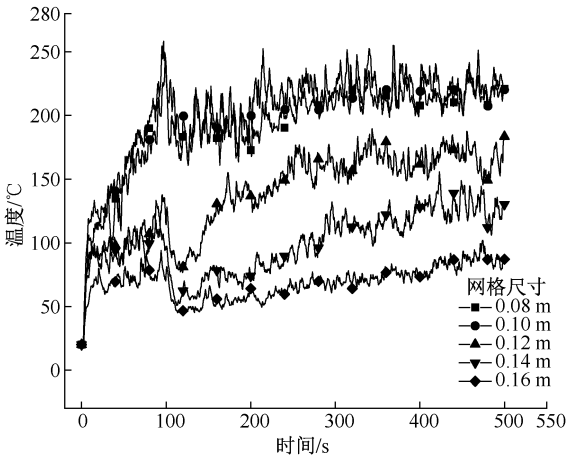


图 3 不同网格尺寸下的顶棚温度
Fig. 3 Ceiling temperature under different grid sizes

3 气压和风速对电缆火灾轰燃的影响

3.1 气压和通风风速对顶棚临界温度的影响

当前,建筑内轰燃现象发生的判定标准主要包括以下 3 条^[10-12]:①室内火灾由局部火向全面火过渡,轰燃后室内所有可燃物都开始燃烧;②受限空间内顶棚温度达到 600℃;③地板所受辐射热通量达到 20 kW/m²。结合轰燃判据和狭长受限空间的特性,文中使用第 1 条判据确定轰燃的发生,认为同一电缆上不同位置的大量热电偶迅速升温的时间段为轰燃发生的轰燃时段,再根据轰燃发生时的临界顶棚温度修正第 2 条判据。即先由温度场初步确定火灾由局部火向全面火转变的时段。再分析图 2 中电缆 C1—C4 上相同电缆不同位置热电偶的温度,最终确定热电偶迅速升温的时段为轰燃时段。选取轰燃时段下限时刻的顶棚平均温度作为临界顶棚温度。

不同气压和通风风速下狭长受限空间电缆火灾轰燃临界顶棚温度如图 4 所示。与普通建筑火灾中公认的轰燃临界顶棚温度 600℃ 相比,由于狭长受限空间独特的结构特点及火灾荷载的差异性,此类环境下的电缆火灾表现出更高的轰燃临界顶棚温度。在选定的气压和通风风速条件下,临界顶棚温度范围为 720.7~877.3℃。

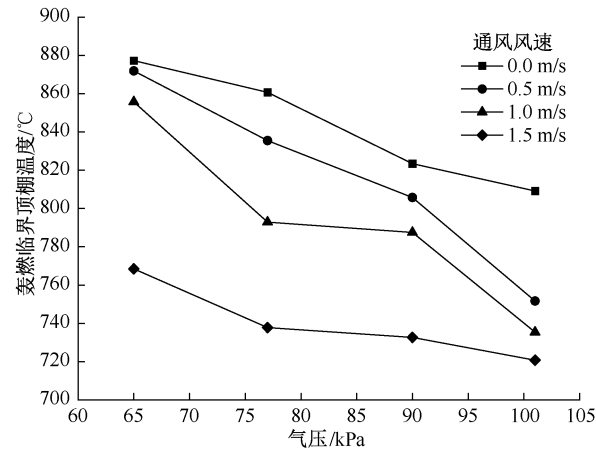


图 4 轰燃临界顶棚温度

Fig. 4 Critical ceiling temperature for flashover

由图 4 可知:轰燃临界顶棚温度随着气压和通风风速的增大而下降。在低气压条件下,空气浮力作用减弱,且分子扩散系数减小^[17],这导致已燃区向未燃区的热传递效率降低。因此,整个空间轰燃前的预热时间更长,已燃区热量积聚时间也相应延长,最终使得顶棚平均温度在达到轰燃临界点时更高。当通风风速增大时,火焰倾斜程度加大,增加了向未燃区的

热传递,整个空间轰燃前的预热时间缩短,从而导致到达轰燃临界时顶棚平均温度相对较低。

3.2 无量纲临界顶棚温度预测模型结果

将纵向通风和自然通风条件下数值模拟数据分别代入式(11)和式(14),计算得无量纲顶棚温度 t_{c1}^* 和 t_{c2}^* 与无量纲压强 P_1^* 和 P_2^* 并绘制于图 5 中。如图 5 所示,相同通风风速时无量纲温度分别随着无量纲压强的增大表现出下降趋势,即无量纲温度分别与无量纲压强呈负相关。

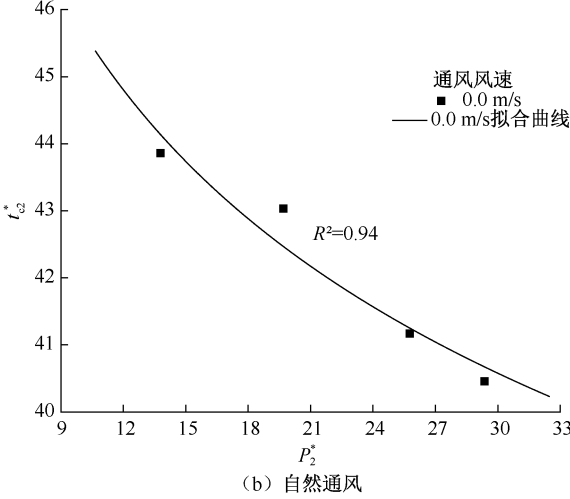
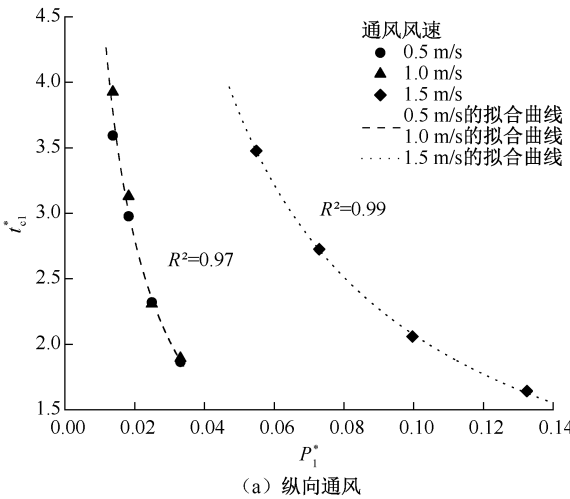


图 5 无量纲顶棚温度与无量纲压强关系

Fig. 5 Correlation between dimensionless ceiling temperature and dimensionless pressure

结合式(10)和式(13)可得:

$$t_{c1}^* = \frac{t_c}{t_0 \dot{Q}^*} \propto \left(\frac{U_m P}{\rho_\infty g^{3/2} H^{3/2}} \right)^{-1} = P_1^{*-1} \quad (16)$$

$$t_{c2}^* = \frac{t_c}{t_0} \propto \left(\frac{\dot{Q}^* P}{\rho_\infty g H} \right)^{-1} = P_2^{*-1} \quad (17)$$

可以看出,临界顶棚温度 t_c 与气压 P 和通风风速 U_m 呈负相关,即:

$$t_c \propto P^{-1}, t_e \propto U_m^{-1} \tag{18}$$

假设选择幂函数形式 $y=nx^m$ 对数据进行拟合, 其中, n, m 为经验系数; R^2 为决定系数。拟合后的曲线如图 5 所示, 拟合得到的轰然临界顶棚温度预测模型见表 2, 从表 2 可以看出, 相同通风风速时拟合曲线和数值模拟数据表现出相当高的相关性, 说明采用幂函数进行拟合是合理的。由此得出, 狭长受限空间电缆火灾的轰然临界顶棚温度与气压和通风风速之间呈幂函数关系, 且与气压和通风风速呈负相关。

表 2 轰然临界顶棚温度预测模型

Table 2 Prediction model for critical ceiling temperature of flashover

通风风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	关系式	R^2
0.0	$t_{c2}^* = \frac{t_c}{t_0} = 58.618 \left(\frac{\dot{Q}^* P}{\rho_\infty g H} \right)^{-0.108} = \frac{58.618 P_2^{*-0.108}}{t_0 \dot{Q}^*} =$	0.94
0.5、1.0	$t_{c1}^* = \frac{t_c}{t_0 \dot{Q}^*} = 0.124 \left(\frac{U_m P}{\rho_\infty g^{3/2} H^{3/2}} \right)^{-0.795} = \frac{0.124 P_1^{*-0.795}}{t_0 \dot{Q}^*} =$	0.97
1.5	$t_{c1}^* = \frac{T_c}{T_0 \dot{Q}^*} = 0.286 \left(\frac{U_m P}{\rho_\infty g^{3/2} H^{3/2}} \right)^{-0.861} = \frac{0.286 P_1^{*-0.861}}{T_0 \dot{Q}^*} =$	0.99

文献[18–20]对于建筑轰燃的预测模型研究, 多集中于常压、无风时民用建筑内部火灾的热释放速率、火蔓延速度、热辐射等因素; 文中建立的轰燃临界温度预测模型考虑了纵向通风和自然通风 2 种条件, 适用于气压在 65~101 kPa 范围内的狭长受限空间电缆火灾场景。

4 结 论

1) FDS 数值模拟结果表明: 狭长受限空间电缆火灾的轰然临界顶棚温度范围为 720.7~877.3℃, 高于普通建筑火灾的 600℃, 这一差异主要源于其特殊的空间结构及火灾荷载特性。

2) 基于数值模拟结果, 得到相同通风风速时狭长受限空间电缆火灾的轰然临界顶棚温度与气压和通风风速之间呈幂函数关系, 且与气压和通风风速呈负相关。

3) 使用量纲分析方法建立纵向通风和自然通风条件下耦合气压和通风风速的无量纲轰然临界顶棚温度预测模型, 该模型拟合结果与数值模拟结果吻合良好。

参 考 文 献

[1] 油新华, 何光尧, 王强勋, 等. 我国城市地下空间利用现状及发展趋势[J]. 隧道建设, 2019, 39(2): 173–188.
YOU Xinhua, HE Guangyao, WANG Qiangxun, et al. Current status and development trend of urban underground space in China [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 173–188.

[2] 杨永斌. 火源位置对城市地下综合管廊电力舱火灾蔓延的影响研究[J]. 武警学院学报, 2018, 34(2): 14–19.
YANG Yongbin. Study on effect of fire source location on fire spread in cable cabin of urban underground utility tunnels [J]. Journal of The Armed Police Academy, 2018, 34(2): 14–19.

[3] 周祥. 综合管廊内线性火灾特性及温度场分布实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
ZHOU Xiang. Experiment study on fire characteristics and temperature field Induced by linear fire in the urban utility tunnel [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

[4] 王涛, 宋晓枫, 徐文淑, 等. 内热源影响下高压电力电缆着火机制[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 200–205.
WANG Tao, SONG Xiaofeng, XU Wenshu, et al. Ignition mechanism of high-voltage power cables under influence of internal heat source [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 200–205.

[5] 陈长坤, 徐童, 高飞, 等. 狭长空间内 220 kV 大截面电缆火灾燃烧特点及烟气控制实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(5): 157–163.
CHEN Changkun, XU Tong, GAO Fei, et al. Experimental study on combustion characteristics and smoke control of 220 kV cable with large cross-section in long and narrow space [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(5): 157–163.

[6] MOST J M, MANDIN P, CHEN J, et al. Influence of gravity and pressure on pool fire-type diffusion flames[J]. Twenty-Sixth Symposium on Combustion, 1996, 26(1): 1 311–1 317.

- [7] 周志辉. 低气压环境对池火行为及羽流特性的影响机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
ZHOU Zhihui. Effects of low ambient pressure on pool fire behavior and plume characteristics [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [8] 王志. 不同环境条件下典型线缆燃烧特性和火蔓延行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
WANG Zhi. Studies on combustion characteristics and flame spread behaviors of typical wires and cables under different environmental conditions [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [9] 胡可昕. 综合管廊燃气舱事故通风系统的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
HU Kexin. Study on accident ventilation system of gas cabin in integrated pipe gallery [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020.
- [10] 王景栋. 低气压受限空间轰燃规律的实验研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
WANG Jingdong. Experimental study on the law of flashover in low atmospheric pressure confined space [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2022.
- [11] 张树平, 李钰. 建筑防火设计(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020:20.
- [12] HU Longhua, HUO Ran, LI Yuanzhou, et al. Full-scale burning tests on studying smoke temperature and velocity along a corridor[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(3):223-229.
- [13] 李松阳. 地下狭长空间轰燃演化机理的实验与理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
LI Songyang. Experimental and theoretical studies on the mechanism of flashover occurred in long and narrow underground space [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
- [14] 宗若雯. 特殊受限空间火灾轰燃的重构研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
ZONG Ruowen. Fire reconstruction research of flashover in the special confined compartment [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [15] POPE N D, BAILEY C G. Quantitative comparison of FDS and parametric fire curves with post-flashover compartment fire test data[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(2):99-110.
- [16] GB/T 50838—2015, 城市综合管廊工程技术规范[S].
GB/T 50838-2015, Technical code for urban utility tunnel engineering[S].
- [17] TU Ran, ZENG Yi, FANG Jun, et al. The influence of low air pressure on horizontal flame spread over flexible polyurethane foam and correlative smoke productions[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 94: 133-140.
- [18] THOMAS P H, BULLEN M L, QUNITIERE J G. Flashover and instabilities in fire behavior[J]. Combustion and Flame, 1980, 38: 159-171.
- [19] 陈爱平, 乔纳森·弗朗西斯. 室内轰燃预测方法研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(4):368-374.
CHEN Aiping, JONATHAN F. Studies on predicting flashover in enclosures [J]. Explosion and Shock, 2003, 23(4): 368-374.
- [20] ZANG Yongwang, WANG Lu. Research on flashover prediction method of large-space timber structures in a fire[J]. Materials, 2021, 14(19):DOI: 10.3390/ma14195515.



作者简介: 安伟光 (1986—),男,河北石家庄人,博士,教授,主要从事公共安全、消防工程、应急救援等方面的研究。E-mail: weiguang@cumt.edu.cn。