

环境风对受限边界水平喷射火温度的影响研究

廖梓富, 颜 华, 向 超, 赖鹏浩

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年10月9日; 录用日期: 2025年11月1日; 发布日期: 2025年11月10日

摘 要

为了研究环境风对受限边界水平喷射火温度的影响, 采用FDS软件模拟不同环境风速(0 m/s、0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s)以及不同甲烷泄漏速率(40 m/s、60 m/s、80 m/s、100 m/s)下水平喷射火撞击垂直壁面的温度分布特征。研究结果表明: 垂直壁面温度受环境风和泄漏速率的影响, 泄漏速率增加会使垂直壁面高温区域越宽且最高温度增加, 环境风会导致火焰下洗现象的发生, 高温区域下移, 风速的增加使得温度分布偏移越明显; 纵向温度均呈现随着垂直距离的增加而先增至最高温度后衰减的趋势, 泄漏速率越大, 纵向最高温度越高, 环境风会使高温区域下移且纵向温度衰减趋势越强。通过采用环境风速来修正得到水平喷射火撞击垂直壁面后的纵向温度衰减规律。

关键词

喷射火, 环境风, 受限边界, 泄漏速率, 温度分布

Study on the Influence of Environmental Wind on the Temperature of Restricted Boundary Horizontal Jet Fire

Zifu Liao, Hua Yan, Chao Xiang, Penghao Lai

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: October 9, 2025; accepted: November 1, 2025; published: November 10, 2025

Abstract

In order to study the effect of environmental wind on the temperature of confined boundary horizontal jet fire, FDS software was used to simulate the temperature distribution characteristics of horizontal jet fire impact on vertical walls under different environmental wind speeds(0 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s, 2 m/s) and methane leakage rates (40 m/s, 60 m/s, 80 m/s, 100 m/s). The

文章引用: 廖梓富, 颜华, 向超, 赖鹏浩. 环境风对受限边界水平喷射火温度的影响研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1316-1326. DOI: 10.12677/me.2025.136147

research results indicate that the vertical wall temperature is affected by environmental wind and leakage rate. An increase in leakage rate will widen the high-temperature area of the vertical wall and increase the maximum temperature. Environmental wind will cause the occurrence of flame downwash phenomenon, and the high-temperature area will move downwards. The increase in wind speed will make the temperature distribution shift more obvious; The vertical temperature shows a trend of first increasing to the highest temperature and then decreasing with the increase of vertical distance. The higher the leakage rate, the higher the vertical maximum temperature. The environmental wind will cause the high-temperature area to move downwards and the vertical temperature attenuation trend will be stronger. By using environmental wind speed to correct the longitudinal temperature attenuation law after the horizontal jet fire impacts the vertical wall.

Keywords

Jet Fire, Environmental Wind, Restricted Boundary, Leakage Rate, Temperature Distribution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

天然气是重要的清洁能源，占能源的份额不断提高[1]。管道运输作为天然气的主要运输方式，具有高效、经济、环保等特点。天然气管道在公共区域铺设，经常面临管道腐蚀、地质灾害以及第三方破坏等外部干扰因素，所带来的泄漏危害后果严重，喷射火是发生概率最高的燃气事故，大约占事故的 50%，并且容易引发二次事故和多米诺效应[2]，射流火灾可能撞击密集的管道或建筑物墙壁等，从而产生更危险的火灾事故，造成更大的人员伤害和财产损失。

大量的研究对自由射流火焰的几何形状和热辐射进行了分析。Rengel 等[3]确定了常压和低压下甲烷垂直射流火灾的火焰几何形状。Zhao 等[4]研究了非预混掺氢天然气射流火焰的火焰高度、宽度等，建立了火焰高度预测模型。Zhou 等[5]通过实验系统地研究了喷嘴出口形状对水平射流火焰几何形状的影响。Huang 等[6]采用不同长宽比的矩形喷口研究了水平射流火灾的几何特征。Zhao 等[7] [8]通过实验研究了不同环境气压下水平喷射火的水平火焰投影长度以及倾斜乙烯射流火焰的水平延伸距离。Lv 等[9]研究了从向下到向上不同倾斜角度的射流火焰的火焰几何形状和空气卷吸特性。关于喷射火热辐射的研究，Zhou 等[10]在对以往的半经验模型进行总结的基础上，提出了一种预测水平丙烷喷射火灾热辐射的线源模型。Ab Aziz 等[11]介绍了各种喷射释放情景、不同方向和释放尺度等参数对于预测热辐射的半经验模型的影响。Palacios 等[12]收集了大量实验数据，建立了大范围水平喷射火的热辐射预测模型。

然而射流火焰撞击引起的对流换热问题的研究缺乏，当火焰撞击到建筑物墙壁，火焰就会在壁面蔓延。顶棚射流是典型的垂直喷射火撞击墙体，许多学者研究其温度，其中 Alpert [13]与 Heskestad [14]较早提出了仅限于弱浮力羽流的顶棚射流温度分布的预测模型。对于强浮力羽流的温度分布，Heskestad [15]引入羽流半径 b 作为特征长度，研究了自由火焰长度与顶棚高度之比在 0.3~3.0 之间的顶棚温度分布。但上述相关性不适用于水平射流火焰撞击障碍物后的温度分布规律，Wang 等[16]提出了水平射流火焰撞击垂直壁面的温度分布预测公式：

$$b = 0.42 \left[(\rho_{\infty} C_p)^{4/5} T_{\infty}^{3/5} g^{2/5} \right]^{-1/2} \frac{T_m(D)^{1/2} \dot{Q}_c^{2/5}}{\Delta T_m(D)^{3/5}} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta T(z, D)}{\Delta T_m(D)} = \left(1 - 0.09 \frac{z}{b}\right)^{4/5} \quad (0.7 < z/b < 11.5) \quad (2)$$

其中, ΔT_m 为撞击区域的最高温升, ΔT 为离开火羽流轴线径向距离处位置的温升, D 为火源喷嘴与顶棚之间的垂直高度, Q 为火源热释放速率(kW), Z 为顶棚下方离开羽流轴线的径向距离(m)。

基于以上分析, 针对水平喷射火在受限边界下的温度分布特性大多数研究并没有考虑到环境因素, 无论是环境压力还是环境风都可能会对火焰温度有所影响, 其中环境风对喷射火后果的影响研究较少, 因此需研究环境风对受限边界水平喷射火温度的影响。本研究通过 FDS 数值模拟, 研究环境风和受限边界耦合作用下水平喷射火温度参数的演化规律, 明晰不同燃气泄漏速率、环境风速下水平喷射火的温度分布特征, 分析垂直壁面处温度的变化, 为该类火灾防护以及应对措施提供参考。

2. 数值模拟

采用火灾动态模拟软件 FDS (Fire Dynamics Simulator)开展数值模拟, FDS 为美国国家标准研究所 (NIST: National Institute of Standards and Technology)开发的计算流体动力学软件, 用于模拟火灾中的流体运动, 其可靠性已得到实验验证。因此以甲烷为研究对象, 采用湍流模型中的大涡模型(Large Eddy Simulation, LES)进行模拟。

计算域尺寸为 8 m (长) × 1 m (宽) × 8 m (高), 沿着 x 轴和 z 轴分别布置了 9 个和 13 个热电偶, 相邻热电偶间距为 0.6 m, 通过热电偶测量水平射流撞击垂直壁面的温度, 环境风从垂直壁面左侧吹入, 如图 1 所示。本次模拟采取泄漏速率为 40 m/s、60 m/s、80 m/s、100 m/s, 风速为 0 m/s、0.5 m/s、1 m/s、1.5 m/s、2 m/s, 孔板间距为 1 m。火灾中温度分布特征参数是重要的研究内容, 采用 Tecplot 得出温度分布云图, 对具体火焰温度分布进行分析。

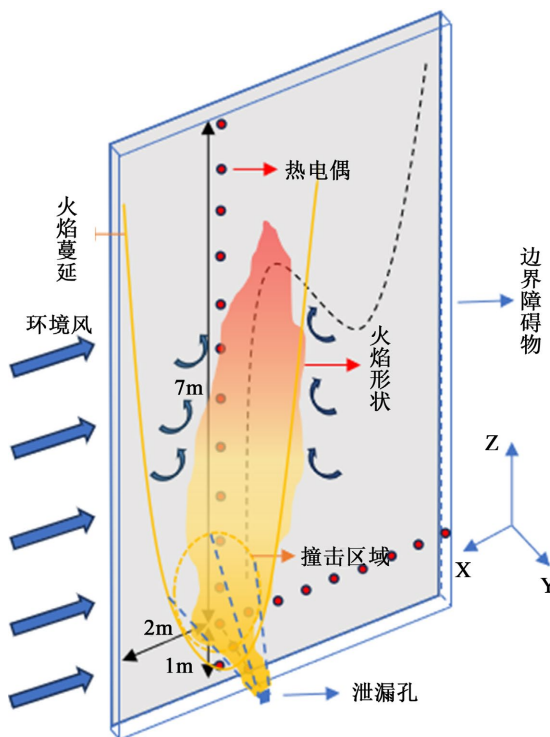


Figure 1. Simulation model of jet fire

图 1. 喷射火模拟模型

图 2 为典型工况下的火焰形态。水平喷射火焰形态的演变主要源于受限垂直壁面阻力、初始动量和向上浮力的耦合作用，水平喷射火焰撞击垂直壁面后大部分沿着垂直壁面向上蔓延，在喷嘴所对垂直壁面水平投影的上方，向上的浮力也抑制了燃料逆向质量输送速率。在初始动量和浮力的作用下，两侧和底部的燃料比起中间部分的燃料能卷吸到更多的空气来支持燃烧，较大的初始动量会使燃料以较大的速率从撞击点向四周蔓延，垂直壁面受到火焰撞击后，在热力学和流体力学耦合作用下，火焰底层区域形成具有离心运动的火焰涡旋结构。在喷嘴所对垂直壁面水平投影的下方区域，初始动量矢量和浮力矢量逆向耦合，火焰传播在浮力和惯性力达到动态平衡时实现稳定传播，火焰蔓延形态在垂直壁面上形成稳定的“U”形。

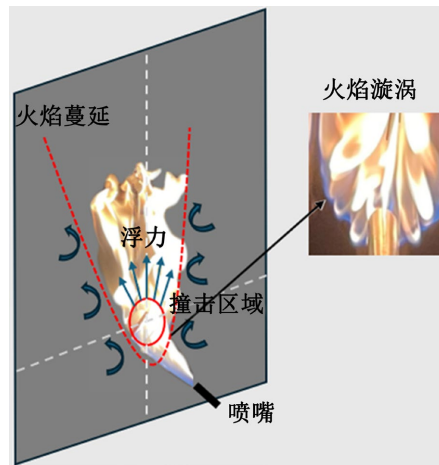


Figure 2. Analysis of vertical wall flame momentum and buoyancy
图 2. 垂直壁面火焰动量与浮力分析

为了确保结果的可靠性，需对网格尺寸进行分析。其通用数学表达式可表示为：

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_e c_p T_e \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (3)$$

式中， D^* 为火源特征直径； $\dot{Q}$ 为火源功率(kW)； ρ_e 为空气密度(kg/m³)； c_p 为环境空气定压比热容(kJ/(kg·K))； T_e 为环境空气温度(K)； g 为重力加速度(m/s²)。

网格尺寸对火灾模拟精度具有显著影响。在 LES 框架下，较小的网格单元能够更准确地捕捉火焰区的湍流脉动，从而提高热释放速率、温度场等参数的计算精度。然而，网格细化会导致计算量急剧增加。因此，需通过网格敏感性分析确定最佳网格尺寸。取 $\dot{Q} = 5 \text{ MW}$ ， $\rho_e = 1.205 \text{ kg/m}^3$ ， $c_p = 1.004 \text{ kJ/(kg·K)}$ ， $T_e = 293.15 \text{ K}$ ， $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ，代入式(3)可计算出 D^* 。通过选取 0.05、0.1、0.15 和 0.2 四种不同的网格尺寸进行分析，由图 3 的结果可知，在网格尺寸为 0.05 和 0.1 m 模拟下得到的温度数据较为接近。数值离散化分析表明，空间步长与计算效率呈现显著负相关。当网格大小设定为 0.2 m 时，运算耗时达到最小值，但结果精度不高；若将网格缩减至 0.05 m 量级，则会导致计算负荷呈指数增长。通过多参数权衡分析，本研究在确保物理场重构精度的前提下，采用 0.1 m 作为网格尺寸。由于环境风速的存在，所得温度波动较大，13~15 s 温度波动较为稳定，后续温度选取其平均值进行分析。

通过弗劳德相似准则将无环境风下的受限前壁实验温度[17]与 FDS 数值模拟结果进行对比，验证 FDS 数值模拟对本次研究的有效性，如图 4。结果表明模拟喷射火焰温度与实验结果数值上的差异小于 10%，趋势变化较一致，总体误差在可接受范围内，所以 FDS 软件可用于喷射火灾模拟。

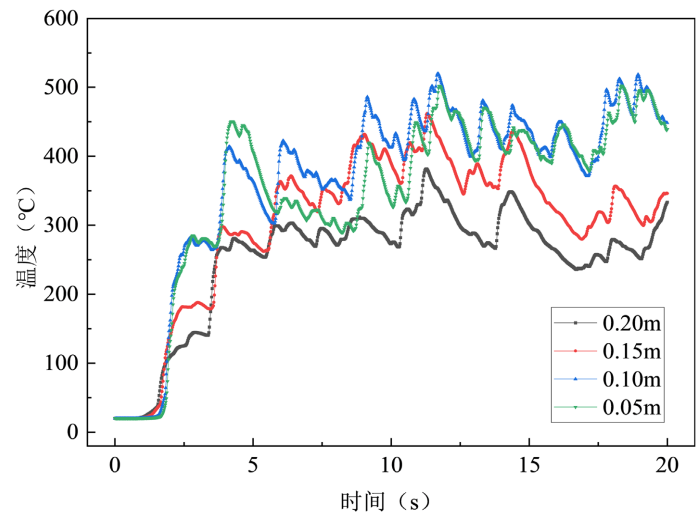


Figure 3. Grid sensitivity analysis
图 3. 网格敏感性分析

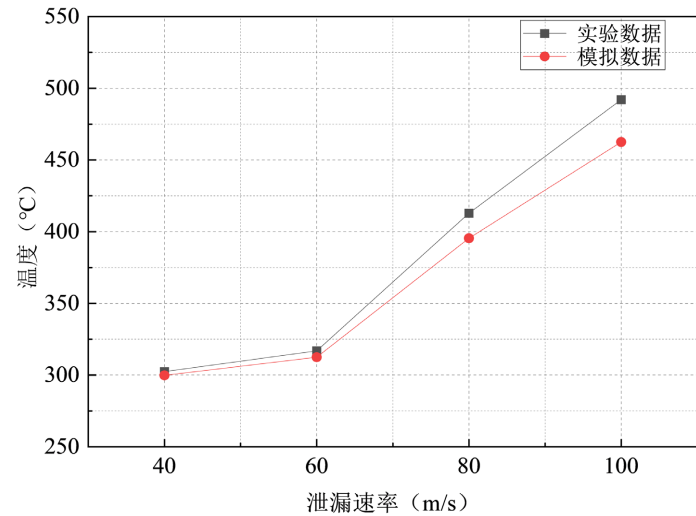


Figure 4. Comparison chart of experimental and simulated temperatures
图 4. 实验与模拟温度对比图

3. 结果与分析

3.1. 环境风对垂直壁面温度分布的影响

图 5 为不同风速下垂直壁面温度随燃料泄漏速率变化下温度分布图, 孔板间距为 1 m。从图中可以看出, 随着燃料泄漏速率增加, 高温区域的范围变得更宽广, 这是因为可燃气在更高的泄漏速率时具有更大的初始动能, 气体质量流量增大, 喷射火燃烧所产生的总热值变大, 壁面温度随着燃气泄漏速率的增加而增大。当风速为 0 m/s 时, 垂直壁面上的高温区域随着燃料泄漏速率升高而逐渐变宽, 燃料泄漏速率增加使火羽流初始动能变大, 水平射流撞击垂直壁面后动量逐渐增大, 温度沿着垂直壁面向四周扩散蔓延。火焰外侧卷吸空气使燃料与空气充分混合, 燃烧更加充分, 中心区域最高温度为 440℃。当具有环境风速时, 火羽流在风速、浮升力以及壁面阻力的耦合作用下呈现弯曲向上的形态。风速改变火焰蔓延扩散的方式从而导致壁面温度发生变化, 壁面最高温度区域随风速增大向右偏移。以泄漏孔水平投影

处温度探测器为基点,同一垂直高度的最高温度从无风速时的 400°C 降低至 160°C 。对于相同泄漏速率下的垂直壁面温度分布,环境风的存在会使火焰高温区域下移,火焰温度分布范围减小。由于环境风在背风侧形成向下的卷吸作用大于火焰热浮升力作用,在风速、浮升力和壁面阻力的耦合作用下,风速越大,火焰向右发生偏移的程度越明显,风速的增加使得火焰与泄漏孔在垂直壁面上纵向投影的夹角从 0° 增至最大 30° ,对于垂直壁面温度分布有较大影响作用。

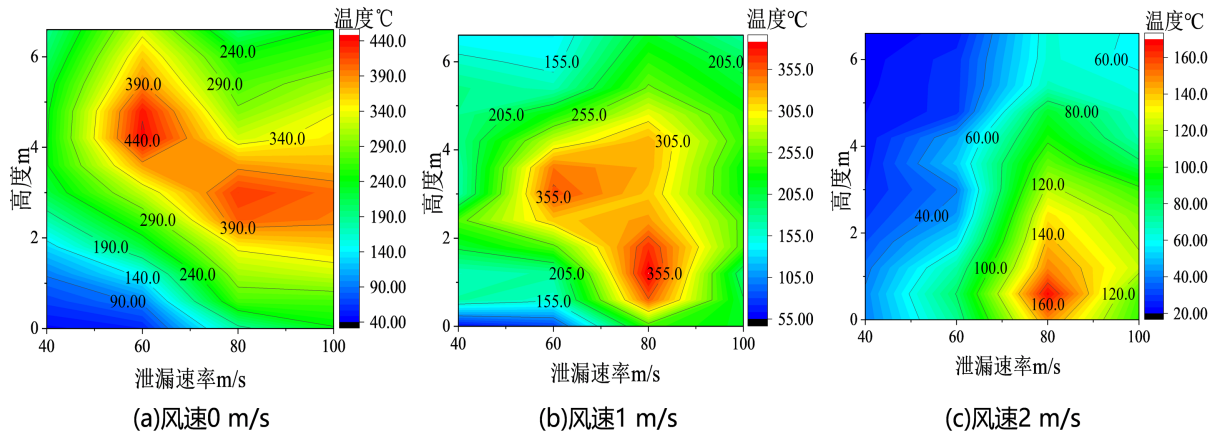


Figure 5. Temperature distribution on vertical wall at different wind speeds

图 5. 垂直壁面不同风速下温度分布

图 6 为燃料泄漏速率为 40 m/s 时,不同环境风速下的垂直壁面温度云图。当环境风速为 0 m/s 时,火焰稳定燃烧且垂直壁面最高温度为 220°C ,温度蔓延区域扩大且温度逐渐衰减。随着环境风速逐步增加,风速改变火焰蔓延路径向右偏移,当环境风速为 0.5 m/s 时,火焰出现轻微偏移现象,温度分布也随着火焰形态的改变而变化,当环境风速为 1 m/s 时,火焰中心最高温度达到 360°C 。从图 6(d)可以看出,火焰高温区域向下移动且温度分布发生改变。由于产生了火焰下洗现象,环境风气流掠过泄漏孔,在背风侧形成负压区,将周围的气体拖曳至泄漏孔下方燃烧,水平射流撞击垂直壁面,再与浮升力耦合作用下使得火羽流始终保持向上运动的趋势,部分燃料被拖曳至负压区域,该区域羽流卷吸空气,使燃料能够充分燃烧。当环境风速大于 1.5 m/s 时偏移更为明显,火焰最高温度为 360°C 且温度分布范围减小,火焰下洗现象增强。由于燃料泄漏速率不变,增大环境风速会使火焰背风侧的压力差更大,负压区火焰拖曳作用越强,使得更多燃料被卷吸进入背风侧燃烧,形成更明显的火焰下洗现象。

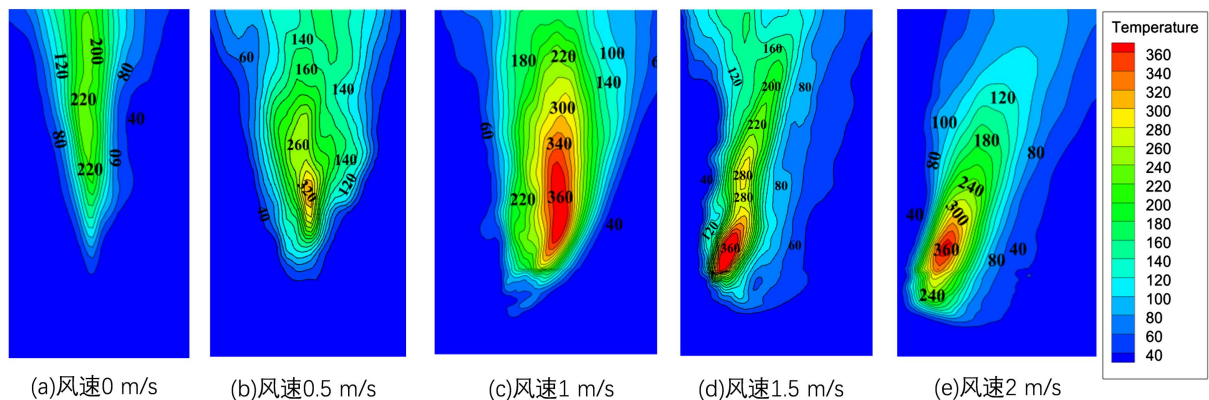


Figure 6. Temperature cloud map of vertical wall at different wind speed

图 6. 垂直壁面不同风速下温度云图

3.2. 环境风对纵向温度分布的影响

图 7 为泄漏孔水平投影垂直壁面纵向温度变化图, 当环境风速为 0 m/s 时, 四种泄漏速率下的垂直壁面纵向温度都随着垂直高度的增加而呈现出先增加至最高温度然后衰减的趋势。当泄漏速率为 40 m/s 和 60 m/s 时, 泄漏孔正对处壁面温度较低, 仅有 50℃ 左右。这是因为较低的泄漏速率提供的燃料气体质量以及初始动量较小, 火焰燃烧产生较小的热值, 随着垂直距离的增加, 燃料充分燃烧使温度逐渐升至最高温后衰减。当泄漏速率较大时(80 m/s、100 m/s), 提供更多的气体质量, 火羽流卷吸空气效应更强, 燃料充分燃烧使得温度较高, 壁面温度在火焰撞击区域达到最高温度(400℃~500℃)后进入温度衰减区, 壁面温度随着垂直距离的增大而逐渐降低。

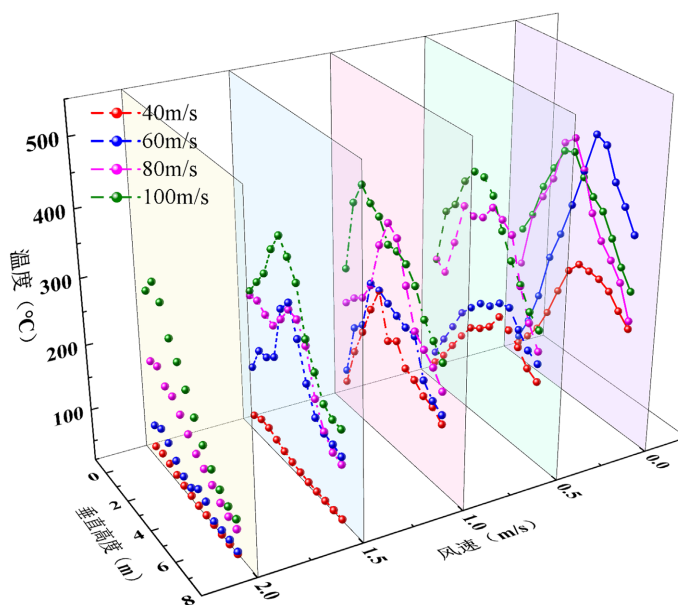


Figure 7. Longitudinal temperature variation of vertical wall under different wind speeds
图 7. 不同风速下垂直壁面纵向温度变化图

当环境风速为 1 m/s 时, 由于环境风导致火焰下洗现象产生, 使其火焰高温区域发生下移。以泄漏孔水平投影处为基点, 达到最高温度的垂直高度相较于无环境风时降低, 后续温度依旧随着垂直高度的增加而降低。较小的环境风速使得火焰相对于泄漏孔正对处垂直壁面纵向发生偏移, 火羽流轴线向右弯曲向上, 火羽流形态的改变致使温度分布发生变化。各泄漏速率下的最高温度相对于无环境风时有所降低, 且达到最高温度之后的衰减趋势不同。

当环境风速为 1.5 m/s 时, 火焰下洗现象比环境风速为 1 m/s 时明显。当泄漏速率为 40 m/s 时, 相较于其他泄漏速率, 燃料所具备的初始动量较小, 其受到环境风速的影响较为明显, 泄漏孔正对处垂直壁面纵向温度较低(25℃~50℃)。当环境风速为 2 m/s 时, 风速的增大使得火焰下洗现象更明显, 火焰高温区域下移至泄漏孔水平投影附近, 当泄漏速率较大时(80 m/s、100 m/s), 燃料水平喷出具有较大的动能, 火焰受风速的影响较小, 垂直壁面纵向温度在泄漏孔附近便达到最高温度, 然后随着纵向距离的增加而逐渐降低。但当燃料泄漏速率较小时(40 m/s、60 m/s), 燃料所具备的初始动量较小, 受到环境风速的影响较为明显。在环境风速和浮升力的耦合作用下, 火焰向右发生弯曲偏移, 因为燃料泄漏所具备的初始动能较小, 风速使火焰弯曲的程度较大且温度分布也随之偏移, 泄漏孔正对垂直壁面处纵向温度普遍较低, 泄漏孔处最高温度 80℃, 垂直壁面顶端处接近环境温度 25℃。

3.3. 垂直壁面纵向温度衰减表征模型

基于 Heskestad [15]引入羽流半径 b 作为特征长度进而得到强羽流驱动条件下顶棚射流温度表征模型, 本文引用羽流半径 b 以此分析垂直壁面的温度分布。图 8 为无环境风时无量纲垂直壁面温升与无量纲垂直距离的关系曲线图, 从图中可以看出, 无环境风时, 引用羽流半径 b 作为特征长度来无量纲化垂直距离能使不同泄漏速率下的模拟数据较好的收敛。温升数据与 Wang 等[16]提出的水平射流火焰撞击垂直壁面的温度分布预测模型(公式(2))对比, 可以发现水平射流火焰与预测模型的吻合度较好, 无量纲垂直温升与无量纲垂直距离有较好的收敛性。

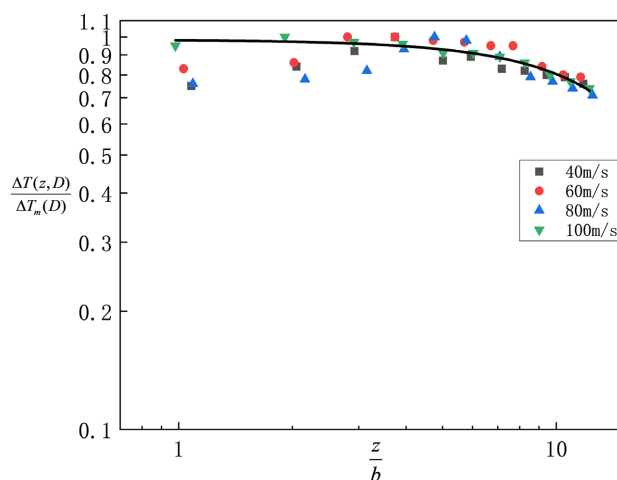


Figure 8. Non dimensional vertical wall temperature rise without environmental wind
图 8. 无环境风时无量纲垂直壁面温升

图 9 为不同风速下的无量纲垂直壁面温升与无量纲垂直距离的关系曲线图, 从图中可以看出, 随着无量纲垂直距离的增加, 燃料泄漏速率越小, 无量纲垂直壁面温升衰减趋势越缓慢。然而当具有环境风条件时, 无量纲垂直壁面温升与无量纲垂直距离并不能很好的收敛, Wang 等[16]提出的温度预测模型并不能很好地预测环境风条件下垂直壁面的纵向温度分布。由于泄漏孔水平投影处纵向温度衰减受到横向风速影响, 因此在公式(2)的基础上引入环境风速 v 对温度预测模型进行修正, 基于无量纲温升与无量纲垂直距离之间的关系, 建立公式(4)。图 10 为 Wang 等[16]所提出的在不同环境风速下无量纲温升和无量纲垂直距离的关系图, 不同的环境风速使得无量纲温升随着无量纲垂直距离增加的衰减趋势不同。图 11 采用环境风速将常系数和指数联系起来, 得出无量纲温升和无量纲垂直距离与环境风速有关的系数表达式(公式(5)), 因此, 环境风速对受限边界水平喷射火温度预测模型可以表示为式(6)。

$$\frac{\Delta T(z, D)}{\Delta T_m(D)} = \left(a \left(1 - 0.09 \frac{z}{b} \right) \right)^{\left(b \left(1 - 0.09 \frac{z}{b} \right) \right)^c} \quad (4)$$

$$\begin{cases} a = 0.52 * 1.36^v \\ b = (v - 0.37)^2 - 2.56 \\ c = 2.33 - (0.87 - v)^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta T(z, D)}{\Delta T_m(D)} = \left(0.52 * 1.36^v \left(1 - 0.09 \frac{z}{b} \right) \right)^{\left((v - 0.37)^2 - 2.56 \left(1 - 0.09 \frac{z}{b} \right) \right)^{2.33 - (0.87 - v)^2}} \quad (6)$$

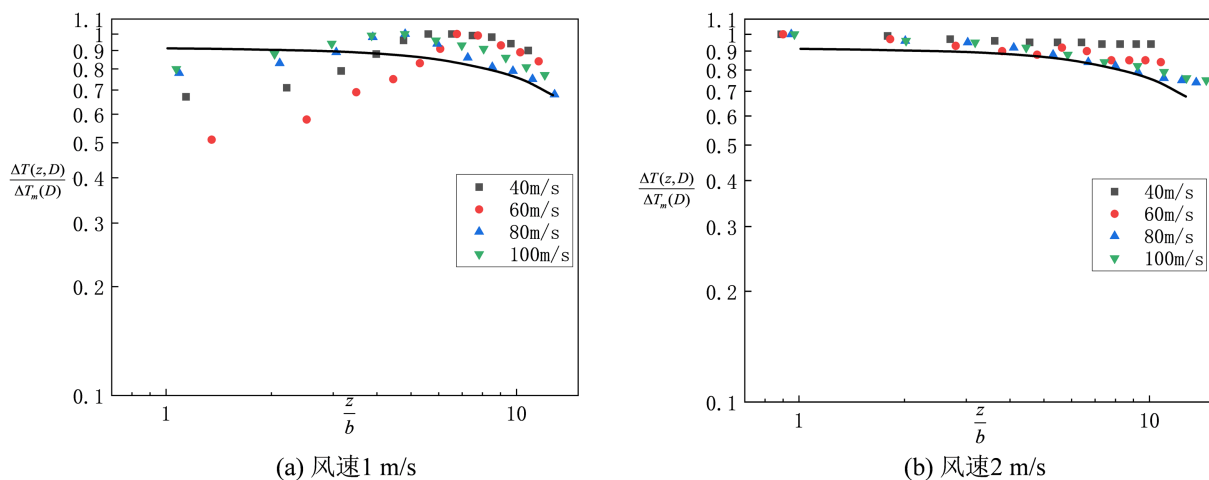


Figure 9. Non dimensional vertical wall temperature rise at different wind speeds

图 9. 不同风速下无量纲垂直壁面温升

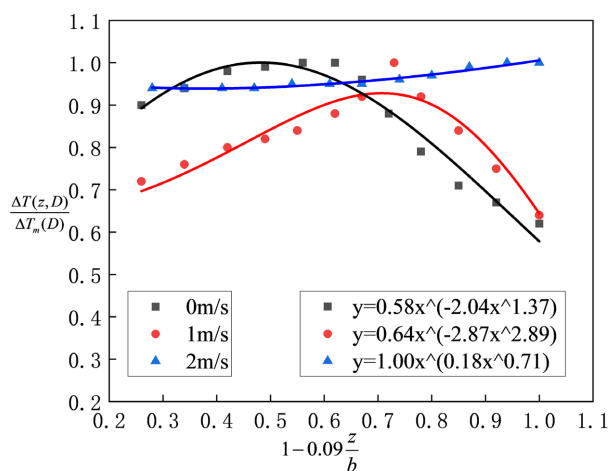


Figure 10. The relationship diagram between dimensionless temperature rise and dimensionless vertical distance under different environmental wind speeds

图 10. 不同环境风速下无量纲温升和无量纲垂直距离的关系图

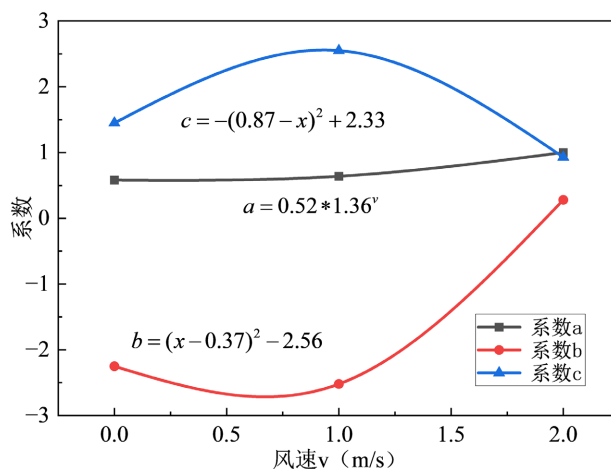


Figure 11. The relationship between coefficient and environmental wind speed v

图 11. 系数与环境风速 v 的关系

图 12 为无量纲垂直壁面温升的模拟值和公式(6)预测值的对比图, 公式(6)中的相关系数是通过拟合模拟数据所得到, 应用该公式计算所得到垂直壁面温升与模拟结果相比较, 其最大误差均在 15% 以内, 如图 12 所示, 可以看出所得数据散点较为集中地分布在等值线附近, 说明应用公式(6)可以较为准确地预测环境风条件下垂直壁面的温度变化。

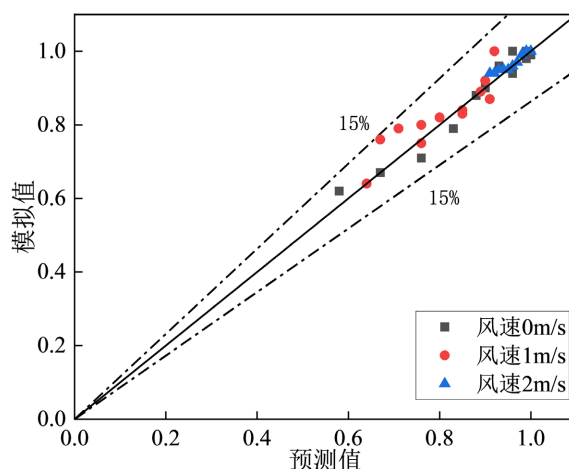


Figure 12. Comparison between non dimensional vertical wall temperature rise simulation values and formula (6) prediction values

图 12. 无量纲垂直壁面温升模拟值与公式(6)预测值对比图

4. 结论

通过数值模拟研究分析了环境风对受限边界水平喷射火温度的影响, 分析不同风速、泄漏速率对垂直壁面以及纵向温度的影响, 研究得出:

(1) 环境风会使水平喷射火撞击垂直壁面后产生火焰下洗现象, 导致喷射火在垂直壁面的高温区域下移, 泄漏速率的增加使得垂直壁面温度分布范围变宽且最高温度达 440℃。

(2) 泄漏孔水平投影垂直壁面温度随着垂直高度的增加而先增后减, 环境风速的增加使得喷射火在垂直壁面的纵向温度衰减趋势增强, 较小泄漏速率(40 m/s、60 m/s)的纵向温度受环境风影响较大, 环境风速为 2 m/s 时, 垂直壁面纵向温度在 25℃~80℃之间。

(3) 基于国内外学者研究关于射流火焰温度预测模型, 通过引入环境风速修正得出水平喷射火撞击垂直壁面后的纵向温度衰减模型。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJCX2420713)。

参考文献

- [1] 齐先志, 王静静, 王晓霖, 等. 天然气管道周边区域个人风险计算分析[J]. 石油化工安全环保技术, 2024, 40(2): 28-32.
- [2] 董炳燕, 黄有波, 孟江, 等. 障碍物对天然气喷射火影响的数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(1): 111-116.
- [3] Rengel, B., Àgueda, A., Pastor, E., Casal, J., Planas, E., Hu, L., *et al.* (2020) Experimental and Computational Analysis of Vertical Jet Fires of Methane in Normal and Sub-Atmospheric Pressures. *Fuel*, **265**, Article ID: 116878. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116878>

-
- [4] Zhao, C., Li, X., Wang, X., Li, M. and Xiao, H. (2023) An Experimental Study of the Characteristics of Blended Hydrogen-Methane Non-Premixed Jet Flames. *Process Safety and Environmental Protection*, **174**, 838-847. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.041>
- [5] Zhou, K., Wang, Y., Zhang, L., Wu, Y., Nie, X. and Jiang, J. (2020) Effect of Nozzle Exit Shape on the Geometrical Features of Horizontal Turbulent Jet Flame. *Fuel*, **260**, Article ID: 116356. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116356>
- [6] Huang, Y., Li, Y., Dong, B. and Li, J. (2018) Predicting the Main Geometrical Features of Horizontal Rectangular Source Fuel Jet Fires. *Journal of the Energy Institute*, **91**, 1153-1163. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.06.008>
- [7] Zhao, J., Liu, J., Li, H. and Wang, J. (2021) Flame Projection Lengths of Horizontally Oriented Buoyant Jet Fires under Different Air Pressures. *Case Studies in Thermal Engineering*, **27**, Article ID: 101327. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101327>
- [8] Zhao, J., Liu, J., Ding, C., Wang, X. and Wang, J. (2023) The Study of Horizontal Extension Distances for Inclined Ethylene Buoyant Jet Fires. *Case Studies in Thermal Engineering*, **45**, Article ID: 103009. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103009>
- [9] Lv, J., Wang, Q., Tang, F. and Sun, X. (2023) The Evolution of Flame Geometrical Characteristics and Air Entrainment of Inclined Jet Flames. *Process Safety and Environmental Protection*, **178**, 414-422. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.053>
- [10] Zhou, K., Liu, J. and Jiang, J. (2016) Prediction of Radiant Heat Flux from Horizontal Propane Jet Fire. *Applied Thermal Engineering*, **106**, 634-639. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.063>
- [11] Ab Aziz, N.S., Md. Kasmani, R., Samsudin, M.D.M. and Ahmad, A. (2019) Comparative Analysis on Semi-Empirical Models of Jet Fire for Radiant Heat Estimation. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, **3**, 285-305. <https://doi.org/10.1007/s41660-019-00081-y>
- [12] Palacios, A., García, W. and Rengel, B. (2020) Flame Shapes and Thermal Fluxes for an Extensive Range of Horizontal Jet Flames. *Fuel*, **279**, Article ID: 118328. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118328>
- [13] Alpert, R.L. (1975) Turbulent Ceiling-Jet Induced by Large-Scale Fires. *Combustion Science and Technology*, **11**, 197-213. <https://doi.org/10.1080/00102207508946699>
- [14] Heskestad, G. and Delichatsios, M.A. (1979) The Initial Convective Flow in Fire. *Symposium (International) on Combustion*, **17**, 1113-1123. [https://doi.org/10.1016/s0082-0784\(79\)80106-x](https://doi.org/10.1016/s0082-0784(79)80106-x)
- [15] Heskestad, G. and Hamada, T. (1993) Ceiling Jets of Strong Fire Plumes. *Fire Safety Journal*, **21**, 69-82. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(93\)90005-b](https://doi.org/10.1016/0379-7112(93)90005-b)
- [16] Wang, Z., Zhou, K., Zhang, L., Nie, X., Wu, Y., Jiang, J., et al. (2021) Flame Extension Area and Temperature Profile of Horizontal Jet Fire Impinging on a Vertical Plate. *Process Safety and Environmental Protection*, **147**, 547-558. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.028>
- [17] 黄有波, 汪彬, 董炳燕, 等. 多侧受限边界对水平喷射火温度特性的影响研究[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(9): 1205-1210.