

文章编号: 1671-6612 (2023) 03-387-06

# 基于 FDS 大涡模拟的工业建筑喷射火模拟分析

张 城<sup>1,2</sup> 王子云<sup>1,2</sup> 陈星百<sup>1,2</sup> 向 月<sup>1,3</sup>

(1. 四川大学建筑与环境学院 成都 610065;

2. 宜宾四川大学产业技术研究院 宜宾 644002;

3. 重庆科技学院安全工程学院 重庆 401331)

**【摘要】** 为探究工业建筑中储罐喷射火的影响,根据工业火灾燃烧特性,采用数值模拟的方法对开放环境的喷射火灾进行模拟。首先利用 FDS 大涡模拟验证喷射火经验模型。然后利用 FDS 大涡模拟不同风速下某企业储罐喷射火焰的发展过程以及对相邻建筑的影响。对比不同火灾场景下的模拟结果,分析喷射火焰的变化和对相邻建筑造成的热辐射、温度的变化。结果表明, FDS 大涡模拟与喷射火经验模型吻合,热辐射强度相对误差随着离泄露口距离增大而减小。随着风速的增大,喷射火受到的扰动增强,喷射火对沿喷射方向建筑的影响逐渐减弱,企业要加强极端天气的防范和建筑间的合理布局。

**【关键词】** 工业建筑;喷射火模型;FDS;大涡模拟

中图分类号 TU998.1 文献标识码 A

## Jet Fire Simulation Analysis of Industrial Buildings Based on FDS Large Eddy Simulation

Zhang Cheng<sup>1,2</sup> Wang Ziyun<sup>1,2</sup> Chen Xingbai<sup>1,2</sup> Xiang Yue<sup>1,3</sup>

(1.College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610065;

2.Yibin Industrial Technology Research Institute of Sichuan University, Yibin, 644002;

3.Safety Engineering Institute, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing, 401331)

**【Abstract】** In order to explore the influence of tank jet fire in industrial buildings, this paper adopts numerical simulation method to simulate jet fire in open environment according to the combustion characteristics of industrial fires. First, FDS Large Eddy Simulation is used to verify the empirical model of jet fire. Then, FDS Large Eddy Simulation is used to simulate the flame ejecting process of an enterprise storage tank and its influence on adjacent buildings under different wind speeds. The simulation results under different fire scenarios are compared to analyze the changes in the flame of jet fire and the changes in thermal radiation and temperature of adjacent buildings. The results show that the FDS Large Eddy Simulation is consistent with the empirical model of jet fire, and the relative error of thermal radiation intensity decreases with the increase of distance from the leakage port. With the increase of wind speed, the disturbance of jet fire is enhanced, and the influence of jet fire on buildings along the jet direction is gradually weakened. This enterprise should strengthen the prevention of extreme weather and the reasonable layout of buildings.

**【Keywords】** Industrial buildings; Jet fire model; FDS; Large Eddy Simulation

基金项目: 四川省重点研发项目 (2021YFS0362)

作者简介: 张 城 (1998-), 男, 硕士研究生, E-mail: zhangcheng21@stu.scu.edu.cn

通讯作者: 王子云 (1972-), 男, 博士研究生, 副教授, E-mail: wzyfirst@scu.edu.cn

收稿日期: 2023-02-16

## 0 引言

工业火灾事故的频发造成了人员伤亡和财产损失, 给社会带来不利影响。喷射火事故是工业建筑火灾的一种形式, 由加压的可燃物质泄漏时形成射流, 在泄漏口处点燃而形成。喷射火火焰及其热辐射会对周围人员、建筑和设备造成伤害。并且喷射火具有较大的初速度, 带有很大的冲击力, 会给泄漏口附近的设施带来巨大的破坏, 甚至可能引发二次灾害, 合适条件下火焰能迅速扩展到几十米以外, 充分与周围空气进行混合, 燃烧更为剧烈, 热辐射影响范围大<sup>[1]</sup>。

各位学者针对喷射火展开了许多研究, 陈东生等<sup>[2]</sup>对室外高压天然气管道进行喷射火燃烧特性实验。聂璇等<sup>[3]</sup>对气固体混合物喷射火的火焰温度、高度展开实验研究。Zhou 等<sup>[4]</sup>提出了高压氢气/天然气泄漏引发的火灾理论框架。Tong 等<sup>[5]</sup>建立了射流火灾模型, 并利用 Matlab 软件确定喷射火的影响区域; 何杰等<sup>[6]</sup>提出了精度更高且更符合实际喷射火危害区域的线性积分模型。张媛媛等<sup>[7]</sup>利用 FDS 软件模拟矩形泄漏孔在不同泄漏速度下的喷射火热辐射分布。王小完等<sup>[8]</sup>利用 PHAST 平台基于大孔模型对天然气管道泄漏火灾进行模拟分析。还有学者利用 FLACS 软件<sup>[9]</sup>、Fluent 软件<sup>[10]</sup>对喷射火进行数值模拟。

学者们在实验、理论研究、数值模拟方面对喷射火的燃烧特性以及危害进行研究, 在前人研究的基础上, 比较 FDS 大涡模拟结果与喷射火经验模型计算结果, 探究两者间热辐射强度和伤害半径的差异, 验证喷射火模型的有效性。再利用 FDS 软件在不同风速条件下对某工业建筑罐区喷射火事故进行数值模拟, 探究喷射火的火焰发展、热辐射强度和对相邻建筑造成的影响。

## 1 FDS 大涡模拟

FDS 是由美国标准技术研究院 NIST (National Institute of Standards and Technology) 开发, 用于分析火灾的模拟软件, 通过求解 Navier-Stokes 方程来模拟计算火灾的烟气流动以及热传递的过程, 还能够模拟安装喷淋设施以及其他的灭火设施时火灾的发展蔓延过程。FDS 常使用大涡模拟 (Large Eddy Simulation, 简称 LES) 求解真实火灾场景下的湍流问题, 首先是需要通过滤波函数从瞬时 N-S

方程将尺度小于滤波函数尺度的涡过滤掉, 从而得到可以直接模拟的大涡场的运动方程, 而被滤掉的小尺度涡对大涡流动的影响, 则通过在大涡流场的运动方程中引入附加应力项来体现, 被引入的应力项称为亚格子尺度应力, 而构建亚格子尺度应力的数学模型称为亚格子尺度模型 (SubGrid-Scale Model, 简称 SGS)。

滤波后的 Navier-Stokes 控制方程为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) \\ \tau_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \\ \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\tau_{ij}$  为亚格子尺度应力;  $\bar{S}_{ij}$  为应变率张量。亚格子尺度模型中的亚格子尺度应力可表示为:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (2)$$

式中,  $\mu_t$  为亚格子湍流粘性系数, 采用 Smagorinsky-Lilly 模型计算:

$$\begin{cases} \mu_t = \rho L_s^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \\ L_s = \min(kd, C_s V^{1/3}) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $L_s$  为亚格子尺度混合长度;  $k$  为 Karman 常数;  $d$  是到最近壁面的距离;  $V$  为计算控制体的体积;  $C_s$  为 Smagorinsky 常数。

## 2 喷射火经验模型

喷射火理论模型主要分为单点源模型、多点源模型和圆锥体模型三种。单点源模型是把喷射火看成一个点源, 喷射火能量由此点源向四周进行传递; 多点源模型将喷射火看成一条线段, 喷射火能量由此线段逐渐向四周进行传递; 圆锥体模型则是把喷射火看成一个处于倒立状态的圆锥体, 与单点源模型和多点源模型相比, 此种模型的能量传递方式与实际喷射火焰更为相像, 在理论研究中, 更多的科研工作者将喷射火看成圆锥体模型<sup>[7,12]</sup>。

以圆锥体模型为基础的喷射火研究过程中, Thornton 模型是 Chamberlain 在前人研究基础上, 基于(烃类)喷射火焰形状研究得出的半经验模型,

该模型接受了风洞实验和现场实验的检验, 包括陆地和水面上的大量实验, 应用范围较为广泛<sup>[13]</sup>。根据理论分析和实验数据对比验证结果, Chamberlain 总结出距泄露孔距离  $r$  处的热辐射强度计算公式如下<sup>[14,15]</sup>:

$$I_r = \frac{\eta M H_c T_{jet}}{4\pi r^2} \quad (4)$$

式中:  $I_r$  为  $r$  处的热辐射强度,  $\text{kW/m}^2$ ;  $\eta$  为效率因子, 取 0.35;  $M$  为物质泄露量,  $\text{kg/s}$ ;  $H_c$  为物质燃烧热,  $\text{kJ/kg}$ ;  $T_{jet}$  为辐射率系数, 喷射火取 1;  $r$  为目标到泄露口处的距离,  $\text{m}$ 。

### 3 数值模拟模型验证

以甲烷为例通过 FDS 大涡模拟结果验证喷射火经验模型热辐射强度和伤害半径的准确性。甲烷的理化性质如表 1 所示。

表 1 甲烷的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of methane

性质	表达式与数值
分子式	$\text{CH}_4$
分子量	16
相对密度 (水=1)	0.42
常温沸点 ( $^{\circ}\text{C}$ )	-161.5
燃烧热 ( $\text{kJ/mol}$ )	890.31

#### 3.1 热辐射强度验证

本次验证取  $0.4\text{m}$  的网格尺寸进行模拟, 模拟区域为  $20\text{m} \times 50\text{m} \times 50\text{m}$ 。喷射火通常发生在室外条件下, 在 FDS 软件 PyroSim 内将除地面外的其他边界设为开放边界, 添加甲烷的燃烧反应和粒子模型, 设置点火源表面和泄露表面, 添加点火口和泄露口, 泄露口面积为  $0.36\text{m}^2$ , 位置为  $(10, 5, 0)$ , 泄露质量速率为  $3.6\text{kg/s}$ 。在  $X=10\text{m}$  所在平面横向和纵向间隔  $2\text{m}$  分别设置热辐射强度探测器 (Radiative Heat Flux Gas), 设置模拟时间为  $30\text{s}$ 。

已知甲烷的泄露质量速率为  $3.6\text{kg/s}$ , 燃烧热为  $55687.5\text{kJ/kg}$ , 根据式 (4) 可得甲烷喷射火模型距离泄露孔  $r$  处的热辐射强度可表示为式 (5), 函数图像如图 1 所示。

$$I_r = \frac{5583.7}{r^2} \quad (5)$$

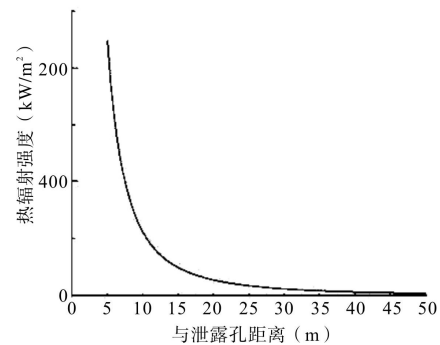


图 1 甲烷 Thornton 模型热辐射强度和与泄露孔距离关系曲线

Fig.1 The relationship curve of thermal radiation intensity and distance from leakage hole in Thornton model of methane

经过 FDS 模拟, 甲烷喷射火在  $5\text{s}$  左右达到稳定状态, 在  $30\text{s}$  的模拟时间内, 得到各测点热辐射数据 1000 组, 在泄露孔附近的几个测点所得辐射强度数据较大, 主要受到黑体辐射和火焰影响; 在喷射火焰最高处附近的辐射强度波动较大, 受到火焰脉动的影响。喷射火焰可以分为两部分, 火焰内部的稳态火焰和火焰外部的间歇性火焰。稳态火焰燃烧比较稳定, 传热比较稳定, 因此所形成的热辐射强度也比较稳定。间歇性火焰是由于随着火灾的持续发展, 热驱动火焰周围空气流动, 冷空气下沉, 热空气上升, 促使火焰附近周围空气形成卷吸现象, 进而可能会干扰稳态火焰的稳定性, 使得稳态火灾周围出现湍流现象, 间歇性火焰由此产生, 引起火焰的不稳定和传热的不稳定。

为了数据的准确性, 只统计火焰影响范围外  $20\text{--}30\text{s}$  内处于较稳定状态的测点的热辐射强度, 以同一高度最大的平均值作为此距离的热辐射强度, 所得结果与 Thornton 喷射火模型进行比较, 比较结果如图 2 所示。Thornton 喷射火模型计算结果与 FDS 模拟结果所得的热辐射强度变化趋势是一致的, 与泄露孔距离越远, 热辐射强度越小, 其变化率也越小。FDS 模拟结果与 Thornton 喷射火模型经验公式计算结果最大误差为  $20\%$ , 随着距离的增大, 误差逐渐减小, Thornton 喷射火模型是在理想化的辐射环境下进行计算, 而实际的喷射火辐射强度受到火焰黑体辐射的影响, 距离泄露孔越近, 黑

体辐射越强,对热辐射强度的影响越大,距离越远,其影响越小,所以 Thornton 喷射火模型与 FDS 大涡模拟的热辐射强度结果的差值会随着距离的增大而减小。

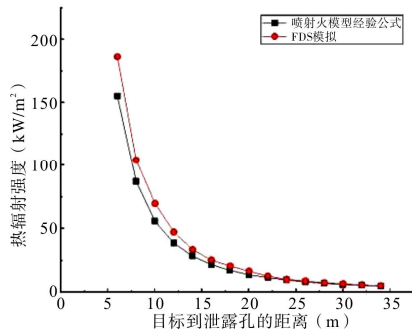


图 2 Thornton 喷射火模型与 FDS 大涡模拟结果比较

Fig.2 The result compared between Thornton Jet fire model and FDS Large Eddy Simulation

### 3.2 伤害半径验证

根据式 (5) 计算各热辐射强度对应的理论伤害半径,与 FDS 大涡模拟及拟合结果比较如表 2 所示。由于黑体辐射的影响,导致同一距离内 FDS 大涡模拟热辐射强度大于 Thornton 喷射火模型,等热辐射强度条件下,FDS 大涡模拟结果与泄露孔距离更近,所以 Thornton 喷射火模型的理论伤害半径比 FDS 模拟伤害半径更大,并且随着距离的增大,误差逐渐减小。

表 2 Thornton 喷射火模型与 FDS 大涡模拟伤害半径比较  
Table 2 Damage radius compared between Thornton Jet fire model and FDS Large Eddy Simulation

热辐射强度 (kW/m <sup>2</sup> )	理论伤害半径 (m)	FDS 模拟伤害半径 (m)	相对误差
37.5	12.2	14	0.13
25	15.0	16	0.06
12.5	21.1	22	0.04
4	37.4	38	0.02
2	52.8	54	0.02
1.6	59	60	0.01

## 4 喷射火场景模拟

### 4.1 模型建立与参数设置

以某化工企业罐区为例,依照建筑图纸和现场图片信息,通过 SketchUp 软件处理生成该企业罐区几何模型,完成建模后,将在 SketchUp 建立的

工厂三维立体模型以 DXF 格式导出并保存,然后通过 Pyrosim 导入上述 DXF 格式文件并加以修改,最后转换为 FDS 输入文件格式。构建如图 3 所示的几何模型。

设置 0.25m<sup>2</sup> 方形泄露口、泄露速率为 9.625kg/s 的喷射火场景。环境压力为常压 101325Pa,环境温度为 20℃,模拟时间为 30s,网格大小为 0.5m。在 FDS 软件 PyroSim 内将除地面外的其他边界设为开放边界,模拟自然环境下网格边界动力和热量的传递。探究储罐高压储存甲烷时沿-Y 方向发生喷射火事故,不同风速条件下对喷射火热辐射强度和对相邻建筑的影响。

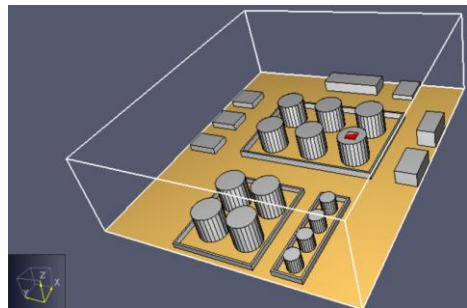


图 3 几何模型

Fig.3 Geometric model

### 4.2 模拟结果与分析

对于火焰发展过程,图 4 表示无风环境下喷射火灾火焰发展过程,燃烧初期,泄露的甲烷具有很高的初速度,火焰处空气压力降低,并且空气受热上升,受气压影响,甲烷与空气充分混合,喷射火在 0.5s 时形成蘑菇云形状,在 1.5s 时持续沿泄露方向喷射,2.5s 时,火焰到达沿泄露方向最远距离,并迅速向左右和上方膨胀,蘑菇云形状的喷射火焰逐渐变大,在 3.5s 时,泄露的甲烷经过充分燃烧,蘑菇云火焰膨胀至最大范围后消失。5.5s 后,喷射火焰形态与喷射距离不再有大变化。图 5 至图 7 分别表示沿 X 方向风速为 2m/s、5m/s、8m/s 时的喷射火火焰发展过程,与无风环境下的喷射火焰发展过程类似,风速条件下增加了喷射火焰的扰动,火焰沿 X 方向倾斜,喷射距离有所减少,并且随着沿 X 方向风速的增大,喷射火焰沿 X 方向更加倾斜且倾斜得越来越快,火焰稳定前的喷射距离越来越短,喷射火焰没有直接接触到喷射方向的相邻建筑。相比于无风环境下,随着风速的增大,蘑菇云状的喷射火焰越不明显,并且消散更快,风速为

8m/s 时, 蘑菇云状火焰迅速向 X 方向膨胀, 充分燃烧消散后火焰倾角逐渐变缓, 最后稳定沿倾斜方向形成喷射火。

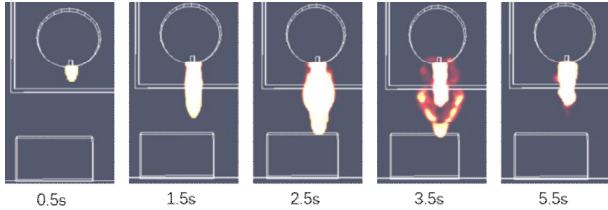


图 4 无风环境下喷射火火焰发展过程

Fig.4 The flame development of jet fire in a windless environment

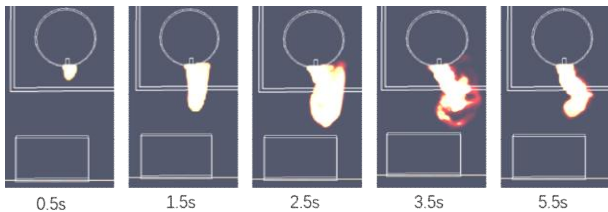


图 5 沿 X 方向 2m/s 风速下喷射火火焰发展过程

Fig.5 The flame development of jet fire at a wind speed of 2m/s along the X direction

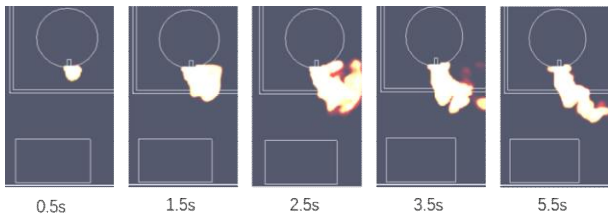


图 6 沿 X 方向 5m/s 风速下喷射火火焰发展过程

Fig.6 The flame development of jet fire at a wind speed of 5m/s along the X direction

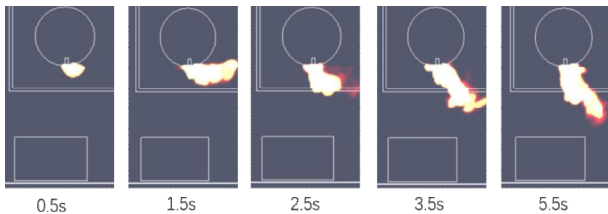


图 7 沿 X 方向 8m/s 风速下喷射火火焰发展过程

Fig.7 The flame development of jet fire at a wind speed of 8m/s along the X direction

图 8 表示各风速条件下 30s 时沿喷射方向的温度场分布状况。火焰的最高温度均达到 970℃, 由于风速的影响, 随着风速的增大, 火焰逐渐倾斜,

沿喷射方向的温度分布范围逐渐减小, 火焰沿平面的覆盖面积增大。

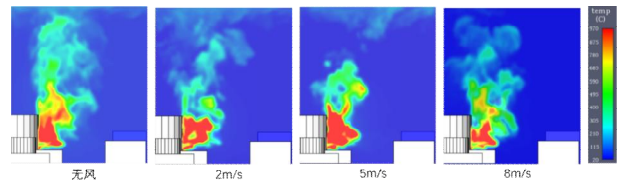


图 8 各风速条件下 30s 时喷射火温度场分布

Fig.8 Temperature distribution of jet fire at 30s under different wind speed conditions

各风速条件下与事故储罐相邻的储罐温度监测均为环境温度, 事故未对相邻储罐造成影响。对于喷射方向上的相邻建筑, 无风环境下喷射方向相邻建筑 30s 内最大热辐射强度在 2.64s 时达到最大值, 为 84.37kW/m<sup>2</sup>; 2m/s 时在 2.22s 达到最大值, 为 17.57kW/m<sup>2</sup>; 8m/s 时在 6.6s 达到最大值, 为 7.7kW/m<sup>2</sup>。随着风速的增大, 喷射方向相邻建筑受到的最大热辐射减小, 并且达到最大值的时间延长。图 9 表示了各风速条件下喷射方向上相邻建筑的温度变化。随着时间的增加, 相邻建筑的表面温度呈现先增加后减小的趋势, 无风时的温度最高为 35℃, 随着风速的增大, 温度的波动增强, 20s 后喷射火焰较为稳定时的建筑表面温度随着风速的增大而减小, 喷射火事故对相邻建筑的影响减小。

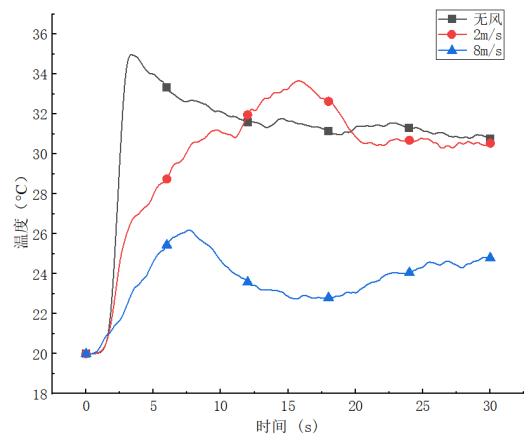


图 9 各风速条件下喷射方向上相邻建筑的温度变化

Fig.9 Temperature changes of adjacent buildings in the direction of injection under different wind speed conditions

### 5 结论

通过比较喷射火经验模型和 FDS 大涡模拟的热辐射强度和伤害半径, 验证模型的有效性, 并用

FDS 大涡模拟软件对某企业罐区建筑进行喷射火场景模拟,模拟不同风速条件下喷射火焰的发展过程和热辐射强度变化,通过对结果的比较分析,得出了以下结论:

(1) 喷射火经验模型与 FDS 大涡模拟结果基本吻合,由于火焰黑体辐射的影响,FDS 大涡模拟的热辐射强度结果高于喷射火经验模型,并且热辐射强度和伤害半径的误差均随着离泄露孔距离的增大而减小。

(2) 随着风速的增大,喷射火焰受到扰动增强,更加沿来风的方向倾斜,火焰覆盖的面积增大。

(3) 相邻罐区未受到喷射火的影响,喷射方向上的相邻建筑受到的最大热辐射强度为  $84.37\text{kW}/\text{m}^2$ ,并且建筑表面的热辐射强度和温度随着风速的增大而减小,企业要加强对极端天气的防范和对建筑间的合理布局。

(4) 不足与展望:未在变风速条件下和不同喷射位置对工业建筑喷射火进行模拟分析,未来可以继续模拟更多的工业建筑喷射火场景,深入探究各类参数对喷射火的影响。

#### 参考文献:

- [1] 李玉星,刘鹏,耿晓茹,等.障碍物条件下的甲烷水平喷射火燃烧特性研究[J].油气田地面工程,2019,38(10): 7-13.
- [2] 陈东生,寇睫敏,杨睿,等.室外高压天然气喷射火燃烧特性实验[J].油气储运,2023,42(1):113-120.
- [3] 聂璇,周魁斌,吴月琼,等.气固射流扩散火焰形态研究[J].化工学报,2021,72(5):2878-2886.
- [4] ZHOU K B, WANG X Z, LIU M, et al. A theoretical framework for calculating full-scale jet fires induced by high-pressure hydrogen/natural gas transient leakage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018,43(50): 22765-22775.
- [5] TONG S J, LO S M, ZHANG P H, et al. Jet fire consequence evaluation on the natural gas transported by pipelines[J]. Procedia Engineering, 2013,52:349-354.
- [6] 何杰,蒋琪,朱广社,等.天然气管道失效喷射火危害模型研究[J].天然气与石油,2022,40(2):7-13.
- [7] 张媛媛,黄有波,吕淑然.矩形泄漏孔水平喷射火热辐射研究[J].中国安全科学学报,2017,27(6):73-78.
- [8] 王小完,南庆宾,骆济豪,等.基于大孔模型的天然气管道泄漏火灾模拟分析[J].灾害学,2022,37(2):49-53.
- [9] SHAN K, SHUAI J, YANG G, et al. Numerical study on the impact distance of a jet fire following the rupture of a natural gas pipeline[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020,187:104159.
- [10] 陈国华,周志航,黄庭枫.FLUENT 软件预测大尺寸喷射火特性的实用性[J].天然气工业,2014,34(8):134-140.
- [11] 洪锋,薛环铨,张帆,等.不同亚格子模型在水翼云空化数值计算中的适用性分析[J].排灌机械工程学报,2022, 40(9):915-920.
- [12] 李云涛,张振永,刘玉卿,等.天然气管道全管径断裂事故影响范围研究[J].中国安全科学学报,2020,30(9): 149-154.
- [13] Chamberlain G. Developments in design methods for predicting thermal radiation from flares[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1987,65(4):299-309.
- [14] 杨军辉.某散货船 LNG 储罐喷射火灾特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [15] 姜巍巍,李奇,李俊杰,等.喷射火及其热辐射影响评价模型介绍[J].石油化工安全环保技术,2007,130(1): 33-36,73-74.