

高压天然气管道喷射火焰长度和伤害范围研究

于巧燕^{1,2}, 侯磊^{1,2*}, 柴冲^{1,2}, 李延豪^{1,2}

1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)油气管道输送安全国家工程实验室, 北京 102249

* 通信作者, houleicup@126.com

收稿日期: 2022-05-17

中国石油天然气集团有限公司—中国石油大学(北京)战略合作科技专项(ZLZX2020-05)资助

摘要 喷射火会对周围人员和设施造成损坏, 导致事故升级。天然气管道泄漏后发生喷射火不仅造成资源的浪费, 还会造成环境污染, 对生命财产安全造成严重危害。为研究长输高压天然气管道泄漏喷射火的危害, 本文基于气体燃烧学和流体力学理论对天然气管道喷射火进行计算流体动力学(CFD)模拟, 探究了泄漏孔径、泄漏压力和延迟点火时间等因素对管道喷射火焰长度和热辐射伤害范围的影响。结果表明, 燃烧初期, 在初始点火能量的作用下, 喷射火焰长度随着燃烧的进行呈线性增加。当达到一定值后由于热量的扩散和供给不足会出现一段时间的不稳定状态, 直至扩散的热量和喷射火燃烧产生的热量达到一个平衡状态, 燃烧处于稳定状态。天然气管道喷射火焰前端会先形成球状火焰, 然后逐渐发展为稳定的喷射火焰, 火焰长度经历了快速上升、动态波动和稳定3个阶段。随着泄漏孔径和泄漏压力的增加, 火焰长度随之增加, 但其增加幅度逐渐变小。泄漏压力越大, 喷射火焰轮廓越明显。热辐射水平伤害范围随着泄漏孔径和泄漏压力的增加而增大, 其中泄漏孔径的影响高于泄漏压力, 且轻伤范围增长最快。压力为10 MPa时轻伤范围和死亡范围分别为2 MPa时的1.55倍和1.72倍, 泄漏孔径为100 mm的轻伤范围和死亡范围分别为20 mm时的2.03倍和3.08倍。随着延迟点火时间的增加, 点火初期火焰长度和热辐射伤害范围显著增大, 延迟点火时间对燃烧稳定后火焰长度和伤害范围的影响较小。

关键词 喷射火; 热辐射; 火焰长度; 泄漏压力

Investigation of flame length and damage range of high-pressure natural gas pipeline

YU Qiaoyan^{1,2}, HOU Lei^{1,2}, CHAI Chong^{1,2}, LI Yanhao^{1,2}

1 College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 National Engineering Laboratory for Pipeline Safety, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Jet fire may cause damage to people and facilities, which will lead to the escalation of accident. Jet fire caused by natural gas pipeline leakage could cause not only the waste of resources, but also the environmental pollution and serious damage to life and property. In order to study the hazard of jet fire in long distance natural gas pipeline with high pressure, CFD simulation based on gas combustion science and fluid mechanics mechanism was carried out to investigate the influence of leakage diameter, leakage pressure and ignition delay time on the length of flame and the damage range of thermal radiation. The results

引用格式: 于巧燕, 侯磊, 柴冲, 李延豪. 高压天然气管道喷射火焰长度和伤害范围研究. 石油科学通报, 2022, 04: 593-603

YU Qiaoyan, HOU Lei, CHAI Chong, LI Yanhao. Investigation of flame length and damage range of high-pressure natural gas pipeline. Petroleum Science Bulletin, 2022, 04: 593-603. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.051

showed that at the initial stage of jet fire, the length of jet flame increases linearly with the combustion process under the action of initial ignition energy. There will be an unstable state for a period of time due to heat diffusion and insufficient supply, jet fire reaches an equilibrium state until the heat generated by the diffusion and the combustion of the jet fire reaches an equilibrium state. The front of the gas pipeline jet fire forms a spherical flame firstly, and then develop into a stable flame gradually. The length of jet flame has experienced three stages of straight rise, dynamic fluctuation and stability. The flame length increases with the increasing of leakage diameter and leakage pressure, and the increase amplitude decreases gradually. The flame profile becomes more obviously with the increase of leakage pressure. The damage range of thermal radiation level increases with the increase of leakage aperture and leakage pressure, and the influence of leakage aperture is higher than that of leakage pressure, and the growth of light injury range is the fastest. The ranges of minor injury and death at 10 MPa were 1.55 times and 1.72 times of those at 2 MPa. When the leakage diameter is 100 mm, the ranges of minor injury and death are 2.03 times and 3.08 times of those at 20 mm, respectively. At the initial stage of ignition, flame length and damage range increase significantly with the increasing of ignition delay time. When the combustion reaches stability, ignition delay time has little influence on flame length and damage range.

Keywords jet fire; thermal radiation; flame length; leakage pressure

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.051

0 引言

随着我国经济的迅速发展,能源需求也越来越大。2022年4月21日,全国油气管道规划建设和保护工作会议中提出“油气是现代能源体系的重要组成部分,事关国计民生”。天然气作为一种清洁能源,其燃烧产物主要是二氧化碳和水,能够从根本上改善环境质量,在生产生活中具有不可替代的地位^[1]。管道作为油气行业承上启下的关键一环,发挥着输送油气资源、连接供需两端的桥梁纽带作用,已成为天然气输送的主要方式。由于管道服役时间、腐蚀、外界破坏等因素的影响,管道在运行过程中会发生泄漏。管道泄漏后发生燃烧不仅造成资源的浪费,还会造成环境污染,对生命财产安全造成严重危害。事故数据分析表明,高压气体发生泄漏后,气体喷射速度高,立即点燃将发生喷射火,不满足气云爆炸的条件^[2]。喷射火在短时间内产生非常高的热量,约有50%的喷射火导致多米诺骨牌效应,引发额外的灾难性事件^[3-4]。

火焰形状和长度是影响伤害范围的重要因素,火焰形状和长度的精确预测对伤害范围的确定就有重要意义。Gopalaswam^[5]根据实验结果拟合了以浮力为主的气体火焰长度关系式,发现火焰长度的水平偏移受射流火焰下风方向风的影响,当风沿侧风方向流动时,射流火灾的垂直范围减小。Palacios^[6]通过实验研究得出垂直喷射火在静止空气中的火焰长度与直径之比为7,火焰形状可以用圆柱形描述,提出了预测射流火焰长度和宽度的表达式。Zhou^[7]采用线源模型预测垂直湍流喷射火周围的辐射热流分布,指出火焰形状对模型预测具有重要影响;上下对称背靠背的锥形火焰形

状适合预测高度小于1 m的火焰,当火焰高度大于1 m且小于10 m时,需通过下部锥体和上部圆柱组合进行火焰形状预测。Xu^[8]推导出火焰形状模型,建立水平视场因子、垂直视场因子和最大视场因子的表达式,模型计算结果与实测值吻合较好。杨建^[9]研究了泄漏方向与地面不同夹角下(0°、30°和90°)管道喷射火的危害范围,结果表明随着夹角的增加,喷射火危害范围逐渐减小。Rengel^[10]研究了常压和亚大气压下甲烷垂直喷射火焰形状的差异,将喷射距离、火焰长度和等效直径定义为雷诺数的函数。Palacios^[11]针对水平喷射火,调研大量包含多种气体燃料和释放条件的数据,建立表示火焰几何形状和热流参数的无量纲函数。

在经典火焰长度相关理论中,火焰出口形状系数(水力当量直径比)是火焰出口唯象常数的主要变量。Zhou^[12]分析了圆形、矩形、等边三角形和椭圆四种喷嘴形状对水平喷射火焰形状的影响,定量分析唯象常数与火焰出口形状系数的关系,认为理查森数是主导垂直投射火焰长度与水平投射火焰长度之比的主要参数;通过水力直径对无量纲流量数进行修正,从理论上考虑出口形状对上升距离的影响。孙中成^[13]通过对比圆柱孔和渐缩孔在不同温度和喷射压力下产生的喷射火,发现相较于渐缩孔,圆柱孔喷嘴形状易于产生空化效应,导致出有效流通面积减少,形成的喷射火焰长度较小。黄有波^[14]通过模拟分析不同横纵比下矩形泄漏口喷射火的温度分布,结果表明,当泄漏孔为方形时,热辐射影响范围在竖直方向上更大;泄漏口为长方形时,热辐射影响范围主要在长边方向,温度沿火焰中心线先升高后衰减;最高温度增加随着泄漏速度的增加,并建立了沿中心线和燃料射流最高温度的简单函数。

热辐射是喷射火的主要危害形式，通过对热辐射强度分布的预测，可以有效确定火灾的危害范围。周魁斌^[15]对理想气体和Abel-Noble 状态模型下高压可燃气体泄漏的动力学过程进行研究，分析了喷射火焰长度、宽度、热辐射模型，提出了有效的热灾害分析预测方法。马子超^[16]设置 0.5 m² 的泄漏口，分析暴雨天气下喷射火对周围人员与设备的伤害，研究表明，风速对喷射火的影响较小，雨水能够有效减小危害半径。刘少杰^[17]研究风速和泄漏孔径对危险范围的影响，发现随着风速和泄漏孔径的增大，危险范围增大，在喷口 25 m 以内的区域都属于危险区域。单克^[18]采用 FLACS 软件研究管径、压力、风速等因素对全管径断裂火灾热辐射范围的影响，推导热辐射距离与影响因素之间的关系式。周亚薇^[19]采用 Flacs 和点源模型相结合的方式研究了建筑物外立面受喷射火热辐射强度的影响，结果表明随着外立面高度的增加，热辐射强度先增大后减小。李云涛^[20]利用 FLACS、ALOHA 和 PHAST 软件，分析管径为 813 mm 的管道完全断裂时地面处天然气的浓度和喷射火的热辐射范围，根据临界标准确定安全距离。张亦翔^[21]发现障碍物对喷射火的发展方向有明显的阻挡作用，障碍物后方受喷射火的危害较小。刘长春^[22]通过对线性源辐射模型进行修正，构建了水雾遮蔽喷射火热辐射的工程快速计算方法，表明水雾颗粒的直径、通量、水幕尺寸对是影响水幕对喷射火热辐射遮蔽作用的关键因素。董炳燕^[23]的研究表明，随着障碍物距离的增加，其阻挡作用逐渐减小，研究结果为发生泄漏火灾事故处置及应急设施设计提供参考。周宁^[24]通过管廊喷射火实验，分析了管道喷射火对临近管道的热辐射危害，建立了管道失效评估模型。

综上所述，多数学者的研究聚焦于低压气体泄漏燃烧，对于高压天然气管道的喷射火研究不够全面；小孔泄漏是长输天然气管道中最常见的泄漏类型，完全断裂只存在于极端情况。因此，高压长输管道小孔泄漏火灾研究具有重要的工程需求。本研究针对高压长输天然气管道泄漏喷射火进行数值模拟，探究泄漏孔径、压力、延迟点火时间等因素对喷射火焰长度和水平伤害范围的影响规律。

1 模型介绍

1.1 数学模型

(1) 质量方程

在燃烧反应中，燃烧前参与反应的物质的组分总

和与反应后的各组分质量相等。通过质量守恒定律，得出以下公式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v}) = 0 \quad (1)$$

式中， ρ 为气体密度，kg/m³； t 为泄漏时间，s； ∇ 为拉普拉斯算子； \bar{v} 为泄漏气体速度矢量，m/s。

(2) 动量方程

气体泄漏的过程中，泄漏气体本身的动量会用来克服周围大气压力、黏度和自身重力，根据动量守恒定律得到以下公式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

式中， ρ 为流体密度，kg/m³； u_i 、 u_j 分别为混合气体在 x、y 方向上的速度，m/s； g_i 为 y 方向上的重力加速度，m/s²； τ_{ij} 为黏度应变张量，Pa； p 为气体的平均压力，Pa。

(3) 能量方程

能量不会无故地增加和减少，只能在不同的状态之间进行转换，或是转移到其他的物体上，在这过程中能量的总数并不会被消耗。根据能量守恒定律得出能量方程如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j E + \rho u_j p) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i \tau_{ij} \right) + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

式中， ρ 为流体密度，kg/m³； p 为流体压力，Pa； U 为流体流动速度，m/s； E 为单位质量总能，J/kg； K 为热传导系数，kW/(m·K)； τ_{ij} 为应力张量，Pa； S_h 为能量方程源项，J。

(4) 湍流模型

对高压输气管道而言，气体在泄漏孔处扩散迅速，将输气管道泄漏视为多组分气体湍流。相较于其他湍流模型，Realizable k- ϵ 能够准确预测平面周围的气流和射流，在计算收敛方面也有改进^[25]。动能方程和扩散方程如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \quad (4)$$

$$G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - \quad (5)$$

$$\rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (C_{3\epsilon} G_b + G_k) + S_\epsilon$$

式中， u_i 为离散计算时网格 I 方向上的速度，m/s； x_i 、

x_j 分别为离散计算中网格I和J的方向; G_k 为平均速度梯度引起的湍流动能, J ; G_b 为浮力引起的湍流动能, J ; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; σ_k 、 σ_ε 分别对应的普朗特数 k 和 ε ; C_2 , $C_{1\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, 这些参数是通过典型流动实验的拟合结果和计算得到的; S_k 、 S_ε 为自定义数据。

μ_t 为涡流黏度, 表达式如下:

$$\mu_t = \rho C_0 \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

式中, C_0 为经验常数, 通常为0.09; k 为湍流能量, J ; ε 为湍流耗散率, 其表达式如下:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (7)$$

式中, μ 为运动黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; u'_i 为离散计算网格I上的脉动流; x_k 为 x 方向的湍流动能, J 。

(5) 燃烧模型

管道泄漏燃烧属于非预混燃烧, 选用Non-Pre-mixed Combustion模型可以快速模拟相关化学反应, 在一定的程度上减少计算时间。

(6) 热辐射模型

热辐射是喷射火的主要热传播方式, 本文在进行喷射火模拟过程中, 选取P-1热辐射模型进行喷射火热辐射的计算^[26]。

1.2 泄漏量计算模型

天然气泄漏量是影响管道喷射火的主要因素, 由于长输管道两站之间距离较大, 短时间内小孔泄漏速率变化不大, 假设发生小孔泄漏时管内压力不变, 泄漏口处泄漏速率保持不变。图1为小孔泄漏模型。天然气泄漏状态与管内压力有关, 当管内压力和大气压满足式(8)时, 泄漏为音速流动, 泄漏量采用式(10)计算; 当管内压力和大气压满足式(9)时, 泄漏为亚音速流动, 泄漏量采用式(11)计算。

$$\frac{P_0}{P} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (8)$$

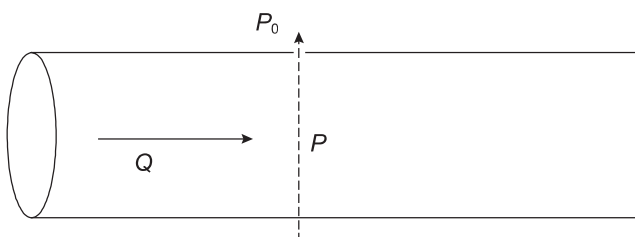


图1 小孔泄漏模型

Fig. 1 Orifice leakage model

$$\frac{P_0}{P} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (9)$$

式中, P_0 为环境压力, Pa ; P 为容器内介质压力, Pa ; γ 为气体绝热指数。

$$Q = AP \sqrt{\frac{M}{R_g T} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (10)$$

$$Q = C_d AP \sqrt{\frac{M \gamma}{R_g T} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (11)$$

式中, Q 为气体泄漏质量流率, kg/s ; C_d 为气体泄漏系数, 圆孔取1; A 为泄漏孔面积, m^2 ; P 为容器内介质压力, Pa ; M 为泄漏气体的分子量; R_g 为理想气体常数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; T 为气体温度, K 。

2 模型验证

通过英国学者Lowesmith^[28]实验结果验证模型的可靠性。实验中喷射口距离地面3.25 m, 喷射口水平放置并与风向相同。气体喷出后立即点燃, 喷射压力保持在6.15 MPa, 燃烧持续时间为60 s。

Lowesmith实验的喷射火焰与通过数值模拟生成的喷射火焰分别如图2和图3所示, 选取1200 K^[28]以上的区域近似认为是喷射火区域。在泄漏点附近, 由于天然气浓度较高, 喷射速度较大, 参与燃烧的天然气体非常少, 形成了一段肉眼不可见的火焰, 模拟结果中喷射口附近温度也较低, 与实验结果相符。因为天然气密度低于空气密度, 在浮力作用下向上移动, 火焰前端向上偏移。Lowesmith实验中火焰水平长度为 37.8 ± 2.9 m, 数值模拟中燃烧稳定后火焰长度约为42 m, 误差为3.2%。总体而言, 模拟结果与实验现象具有较好的一致性。



图2 Lowesmith实验喷射火焰

Fig. 2 Jet flame in Lowesmith's experiment

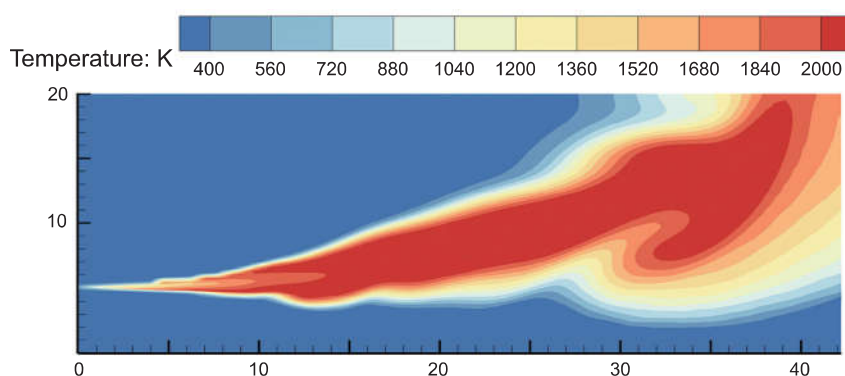


图3 数值模拟喷射火焰
Fig. 3 Jet flame in simulation

3 结果与讨论

通过数值模拟研究泄漏压力、泄漏孔径和延迟点火时间对管道泄漏喷射火的影响，具体工况如表 1 所

示。分析研究工况中喷射火焰长度和伤害范围的变化，其中火焰长度是指从泄漏口到连续火焰前端的长度，热辐射伤害准则参考表 2^[29]，以热通量 4 kW/m² 作为热辐射导致轻伤的评判依据，以 37.5 kW/m² 作为热辐射导致死亡的评判依据。

表 1 研究工况
Table 1 simulated condition

| 工况 | 管内压力/MPa | 泄漏孔径/mm | 泄漏质量/(kg·s ⁻¹) | 延迟点火时间/s |
|----|----------|---------|----------------------------|----------|
| 1 | 2 | | 4.345 | |
| 2 | 4 | | 8.690 | |
| 3 | 6 | 40 | 13.035 | 0 |
| 4 | 8 | | 17.380 | |
| 5 | 10 | | 21.725 | |
| 6 | | 20 | 4.345 | |
| 7 | | 40 | 17.380 | |
| 8 | 8 | 60 | 39.105 | 0 |
| 9 | | 80 | 69.520 | |
| 10 | | 100 | 108.625 | |
| 11 | | | | 1 |
| 12 | | | | 5 |
| 13 | 8 | 40 | 17.380 | 10 |
| 14 | | | | 15 |

表 2 热辐射伤害准则
Table 2 Thermal radiation injury criteria

| $q/(kW \cdot m^{-2})$ | 人员伤害 | 设备破坏 |
|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| 37.5 | 1 min: 100% 人员死亡 10 s: 1% 人员死亡 | 设备严重损坏 |
| 25 | 1 min: 100% 人员死亡 10 s: 1% 人员重伤 | 无火焰长时间热辐射点燃木材的最小能量，设备钢结构变形 |
| 12.5 | 1 min: 1% 人员死亡 10 s: 人员一度烧伤 | 有火焰时点燃木材的最小能量，塑料熔化的最小能量 |
| 4 | 20 s 以上人员感到疼痛，可能烧伤，无人员死亡 | 30 min 玻璃破裂 |

3.1 泄漏压力对喷射火的影响

图4表示不同泄漏压力下喷射火的形状变化。点火初期火焰前端会形成球形火焰,在向上发展的过程中与喷射区域的连接逐渐变弱,直至脱离喷射区域。随后由于没有燃烧物的供给而逐渐减弱直至消失。从气体点燃至火焰达到稳定阶段,喷射火焰会经历不稳定阶段,且随着压力的增大,泄漏口附近的火焰不稳定性越明显。这是因为泄漏压力增加,泄漏口与外界压差变大,扰动增强,湍流增大,从而导致火焰脉动明显。随着时间的延续,燃烧趋于平稳,火焰形状逐渐趋于稳定。泄漏压力越大,所形成的喷射火轮廓越明显。

此外,由于泄漏口处天然气速度较快,与空气混合不够充分,氧气供应不足,泄漏孔附近的天然气无法充分燃烧,因此泄漏口附近温度较低。随着泄漏气体向高空扩散,动能在扩散过程中不断耗散,速度降低,天然气与空气充分混合,处于富氧燃烧或化学当量比附近。此时天然气完全燃烧,生成足够多的热量,温度升高。

不同泄漏压力下火焰长度随时间的变化见图5。由图可见,火焰长度随着压力的增大而增加,在0.5 s时,不同压力下火焰长度分别为14.04 m、20.6 m、27 m、28.06 m、40.17 m。这主要是因为泄漏孔径

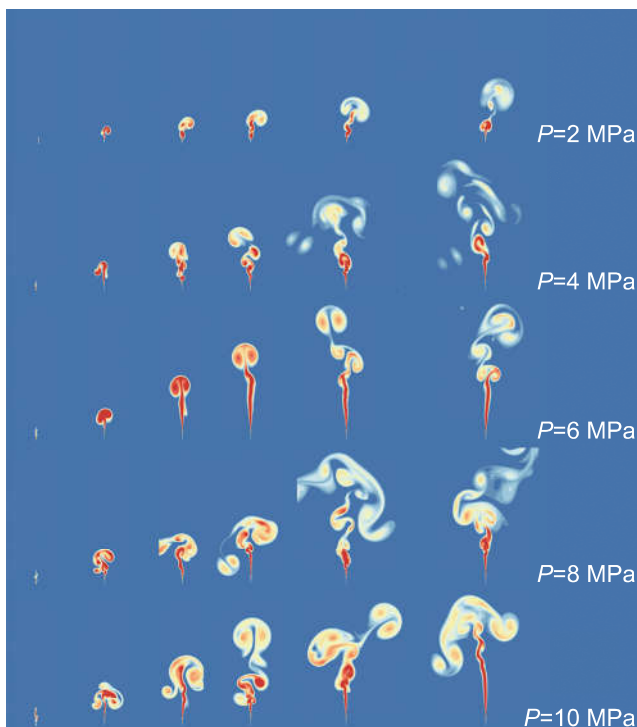


图4 不同泄漏压力下火焰变化

Fig. 4 Change of flame shape under different leakage pressure

一直的前提下,泄漏压力的增加引起单位时间内天然气流量和动能的增大,从而导致燃烧物增加和喷射距离增大;此外由于压力的增加会加强卷吸作用,使得更多的空气参与反应而加速燃烧,火焰高度升高。可以看出,喷射火焰在达到稳定前首先经历一个快速上升的阶段,然后发生波动并逐渐下降,最终趋于稳定。喷射火焰长度与管道压力呈正相关,但是随着压力的增加,其增加的幅度越来越小。

图6为喷射火焰长度随泄漏压力的拟合曲线,拟合公式见式(12),拟合度为0.9928。

$$F_L = -1.2857P^2 + 28.629P + 50 \quad (12)$$

式中, F_L 为喷射火焰长度, m; P 为泄漏压力, MPa。

选取泄漏压力为2 MPa、泄漏孔径为40 mm工况进行喷射火伤害范围分析。图7为不同时刻伤害范围的变化。在燃烧初期,伤害范围类似于半球状向周围

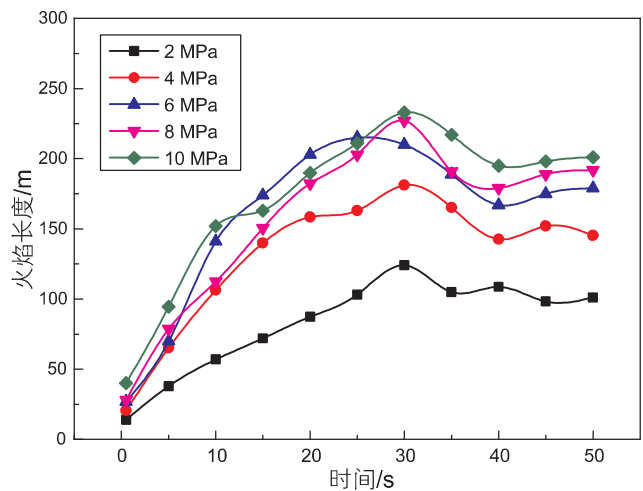


图5 不同泄漏压力下火焰长度变化

Fig. 5 Flame length under different leakage pressure

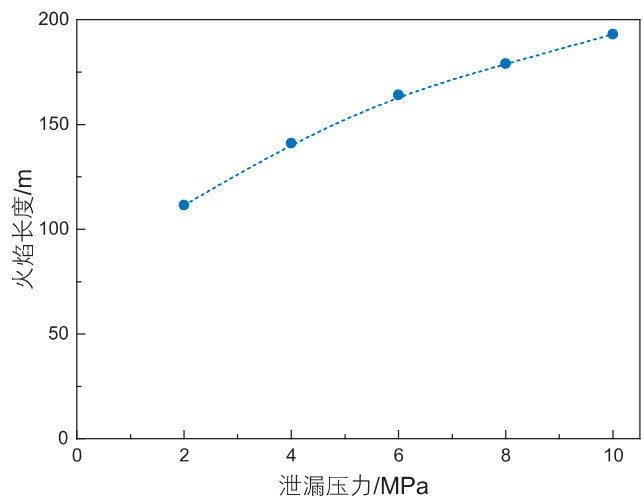


图6 火焰长度与泄漏压力之间的关系

Fig. 6 Relationship between flame length and leakage pressure

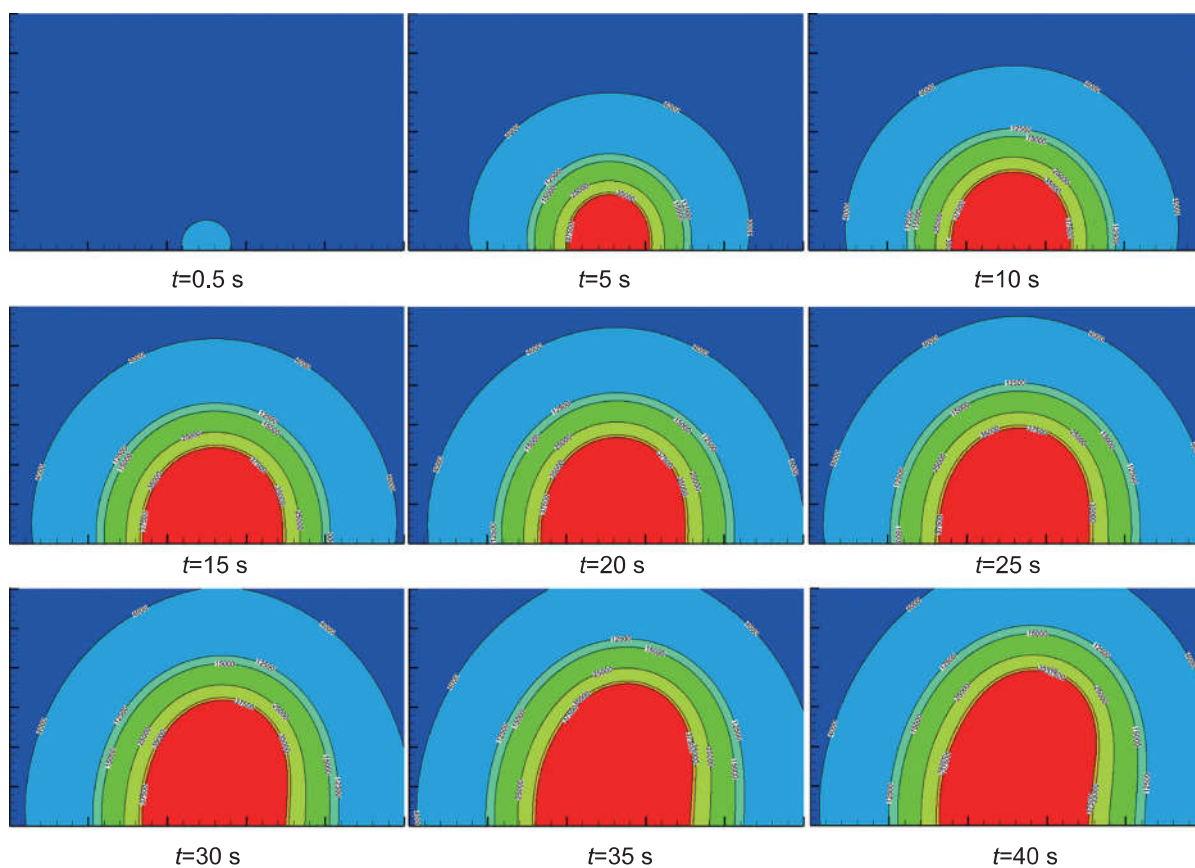


图 7 泄漏压力为 2 MPa 时热辐射伤害范围

Fig. 7 Thermal radiation hazard when leakage pressure is 2 MPa

扩散，其中轻伤范围最大，随着时间的延续，辐射范围逐渐向四周蔓延，伤害范围越来越大。其他工况下伤害范围有所变化，但扩散规律与 2 MPa 工况类似，此处不再赘述。

本文主要研究在水平方向的危害半径，不考虑其在垂直方向的危害范围。图 8 为水平伤害范围随泄漏压力的变化趋势。泄漏压力为 2 MPa 时，伤害半径和死亡半径分别为 220 m 和 81 m，随着压力的增大，参与反应的气体增加，产生的热量增加，管道喷射火热辐射伤害半径随之增大，增加幅度逐渐减小。当泄漏压力达到 10 MPa 时，轻伤半径和死亡半径分别为 2 MPa 时的 1.55 倍和 1.72 倍。

3.2 泄漏孔径的影响

不同泄漏孔径下喷射火形状见图 9。在同一泄漏压力下 (8 MPa)，泄漏孔径的增加虽然不会引起泄漏气体动能的显著增加，但是会引起泄漏量的明显增加。大量的高压气体瞬间膨胀扩散，导致喷射火焰长度和横向扩散明显增大。点燃发生 0.5 s 时，20 mm 泄漏孔径产生的火焰长度只有 7.6 m，泄漏孔径为 100 mm 时

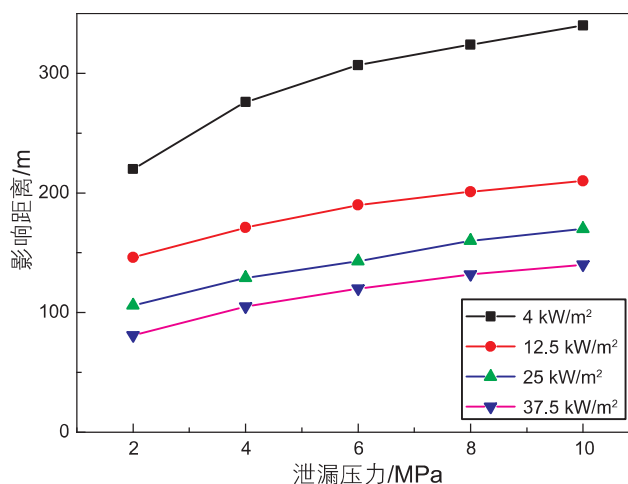


图 8 热辐射伤害距离随泄漏压力的变化

Fig. 8 Change of thermal radiation hazard distance with leakage pressure

的喷射火焰长度已经达到了 64.2 m。随着燃烧的进行，火焰在垂直和横向范围内迅速发展。泄漏孔径大的喷射火在水平范围内的分布更为广泛，进而导致危害范围更大。燃烧发生 15 s 时，不同泄漏孔径下火焰的横

向范围分别为 36 m、73 m、94 m、105 m、123 m。

不同泄漏孔径的喷射火焰长度随时间的变化如图 10 所示。由图可知，燃烧前期，在初始点火能量的作用下，喷射火焰长度随着燃烧的进行呈线性增加。当达到一定值后由于热量的扩散和供给不足会出现一段时间的不稳定状态，直到扩散的热量和喷射火燃烧产生的热量达到一个平衡状态，燃烧处于稳定状态，火焰长度也逐渐趋于稳定。总体而言，火焰长度的变化经历了线性增长、波动、平稳 3 个阶段。

图 11 为喷射火焰长度随泄漏孔径的拟合曲线，拟合公式见式(13)，拟合度为 0.9989。本公式适用于计

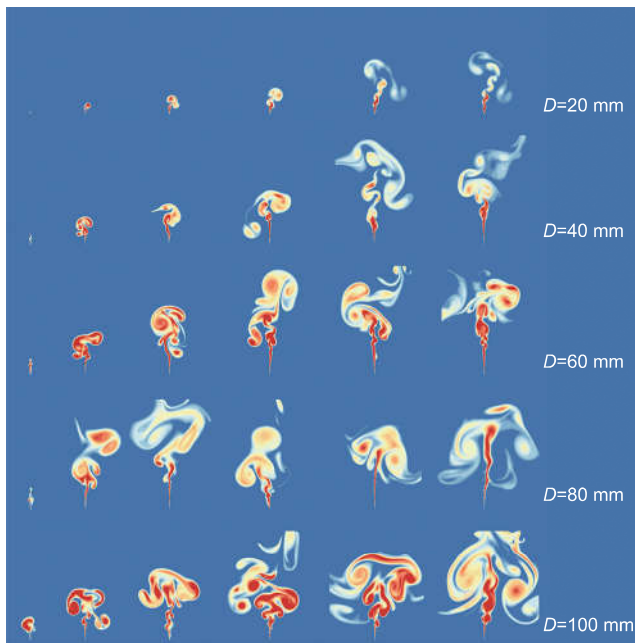


图 9 不同泄漏孔径的火焰变化
Fig. 9 Change of flame shape under different leakage diameter

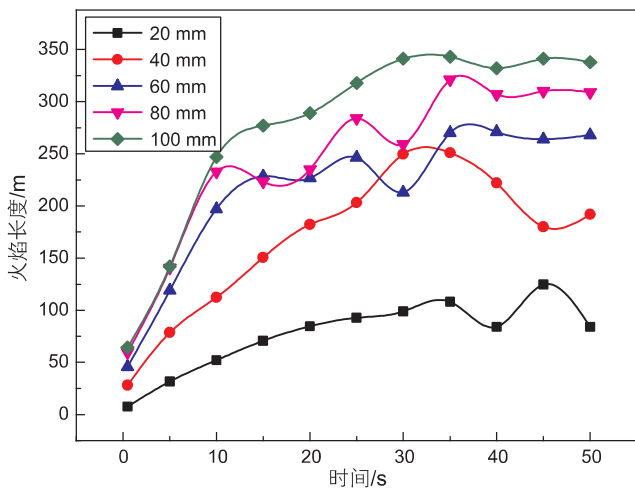


图 10 不同泄漏孔径下火焰长度变化
Fig. 10 Flame length under different leakage diameter

算小孔泄漏的管道喷射火焰长度。

$$F_L = -0.0343D^2 + 7.2442D + 45.8 \quad (13)$$

式中， F_L 为喷射火焰长度，m； D 为泄漏孔径，mm。

图 12 为伤害范围随泄漏孔径的变化趋势。随着泄漏孔径的增加，泄漏的气体呈指数增长，大量气体参与燃烧反应，轻伤半径和死亡半径也越来越大。从图中看出，泄漏孔径为 20 mm 时，喷射火热辐射轻伤半径和死亡半径分别为 230 m 和 86 m；当泄漏孔径增加至 100 mm 时，轻伤半径为 467 m，死亡半径为 265 m，分别是泄漏孔径为 20 mm 时的 2.03 倍和 3.08 倍。

3.3 点火时间的影响

图 13 表示不同延迟点火时间下火焰的变化。与泄

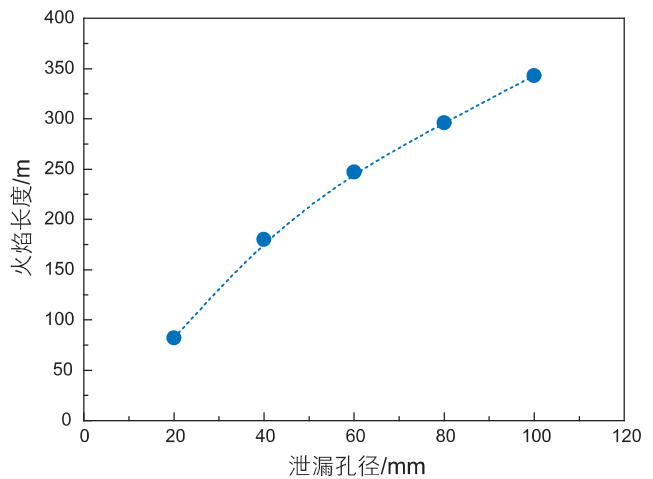


图 11 火焰长度与泄漏孔径的关系
Fig. 11 Relationship between flame length and leakage diameter

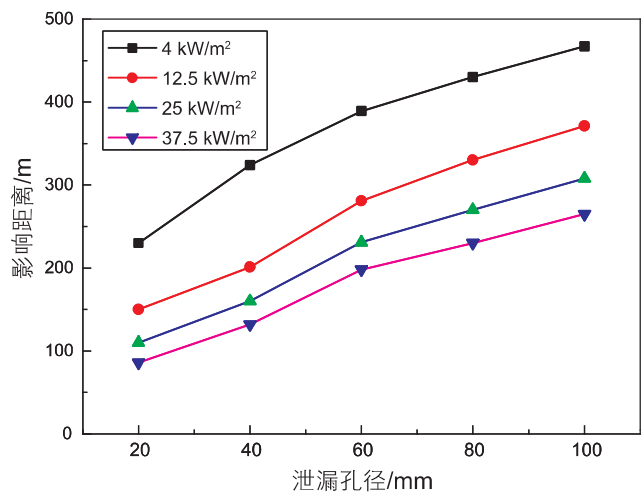


图 12 热辐射危害距离随泄漏孔径的变化
Fig. 12 Change of thermal radiation hazard distance with leakage diameter

漏后立即点燃相比,延迟点火发生前,会有大量气体从管道泄漏出来,并与周围空气充分混合,在泄漏口周围形成大量可燃气云,延迟点火时间越长,形成的可燃气云范围越大。在点燃的瞬间,可燃气云发生闪燃现象,火焰瞬间扩散至整个可燃气云,因此在点火初期,延迟点火的火焰长度明显高于立即点火的火焰

长度。延迟点火时间越久,点火初期火焰长度越大,水平范围内的火焰分布越广泛,火焰前端半球形火焰越不明显。随着可燃气云的燃尽,燃烧逐渐稳定,最终形成的稳定喷射火焰长度和形状与立即点火工况差别不大。

不同延迟点火工况下火焰长度随时间的变化见图14,从可燃气云点燃至火焰达到稳定阶段,火焰长度随着点火延迟时间的增加而增加,并且在达到稳定前,火焰长度存在明显的波动情况。延迟点火时间越长,火焰达到稳定所耗费的时间越久。

图15为不同延迟点火时间下燃烧发生0.5s后的热辐射伤害范围。由于泄漏扩散作用的影响,延迟点火工况在点火初期的伤害范围较大,不同点火时间下

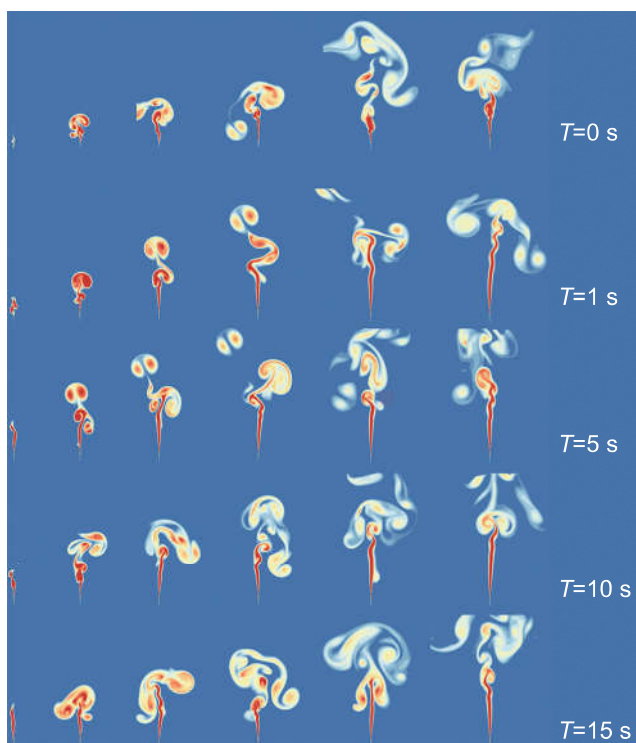


图13 不同延迟点火时间下火焰变化
Fig. 13 Change of flame shape under different ignition delay time

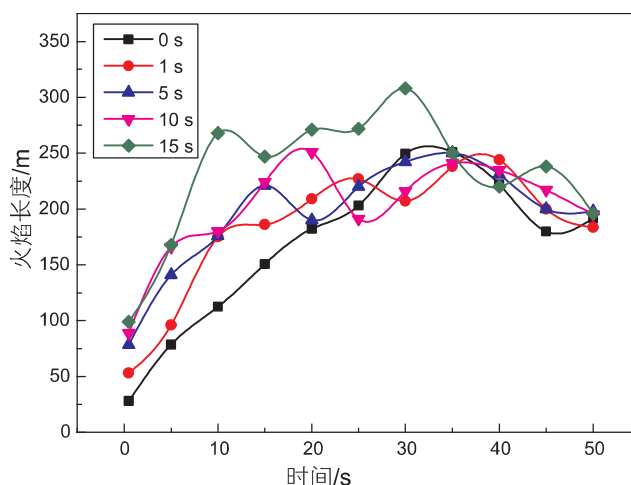


图14 不同延迟点火时间下火焰长度变化
Fig. 14 Flame length under different ignition delay time

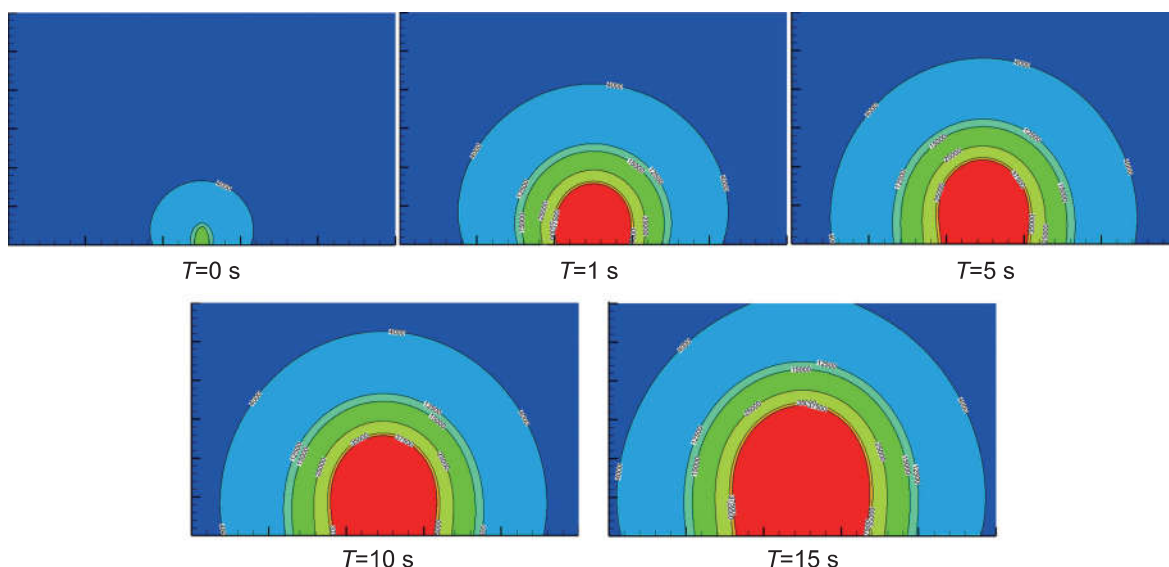


图15 不同延迟点火条件下点火初期伤害范围
Fig. 15 Initial ignition damage range under different ignition delay time

的死亡半径为 0 m、47 m、53 m、64 m、80 m，轻伤半径为 63 m、168 m、194 m、203 m、230 m。随着燃烧的继续，点火发生前扩散气体产生的影响逐渐降低，伤害范围达到最大值。随着热量不断向四周扩散，喷射火逐渐达到稳定状态，伤害范围也逐渐降低并趋于稳定。随着延迟点火时间的增加，泄漏气体点燃时的伤害范围逐渐增大。当燃烧达到稳定后，延迟点火产生的伤害范围与泄漏后立即点火基本一致。

4 结论

(1) 根据气体燃烧学和流体力学基本理论，对高压天然气管道泄漏喷射火进行了模拟分析，研究了泄漏孔径、泄漏压力和延迟点火时间等因素对喷射火焰长度和伤害范围的影响。

(2) 高压天然气管道泄漏发生喷射火燃烧时，在火焰前端首先会形成球形火焰，逐渐发展为稳定的喷射火焰；由于湍动能的作用，火焰长度会经历上升、波

动等过程，最终趋于稳定状态。

(3) 火焰长度与泄漏压力和泄漏孔径呈正相关，随着二者的增加，火焰长度逐渐增大，其增长幅度越来越小，其中泄漏孔径对火焰长度的影响高于泄漏压力；当泄漏压力从 2 MPa 增加到 10 MPa 时，火焰长度由 101 m 增加到了 210 m，泄漏孔径由 20 mm 增加到 100 mm 时，火焰长度由 84 m 增加至 338 m；延迟点火时间主要影响点火初期的火焰长度，对稳定后的火焰长度基本没有影响。

(4) 伤害范围随着泄漏压力和泄漏孔径的增大而增加，其中泄漏孔径的影响大于泄漏压力，当压力和泄漏孔径分别增大到原来的 5 倍时，热辐射半径分别增大至 1.55 倍和 2.03 倍，死亡半径分别增大至 1.72 倍和 3.08 倍；在燃烧初期，伤害范围随着延迟点火时间的增加而增大，燃烧稳定后，伤害范围会逐渐降低并趋于稳定。该结果可为安全距离计算、周围设施布局和消防救援设计提供科学依据。

参考文献

- [1] 苏文韬, 伟胡, 牛耀岚. 能源利用、环境保护与社会可持续发展探讨[J]. 能源与环境, 2019, 41(7): 133–137. [SU W T, WEI H, NIU Y L. Discussions on energy utilization, environmental protection and sustainable social development [J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(7): 133–137.]
- [2] 袁兵. 可燃物热解与着火特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. [YUAN B. Pyrolysis and ignition characteristic of fire material[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.]
- [3] GROSSEL S S. Guidelines for safe storage and handling of reactive materials[M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1995.
- [4] GOMEZ-MARES M, ZARATE L, CASAL J. Jet fires and the domino effect[J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(8): 583–588.
- [5] GOPALASWAMI N, LIU Y, LABOUREUR D M, et al. Experimental study on propane jet fire hazards: Comparison of main geometrical features with empirical models[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 41: 365–375.
- [6] PALACIOS A, CASAL J. Assessment of the shape of vertical jet fires[J]. Fuel, 2011, 90(2): 824–833.
- [7] ZHOU K B, JIANG J C. Thermal radiation from vertical turbulent jet flame: line source model[J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme, 2016, 138(4): 42701.
- [8] XU L, LU Y, DING C, et al. A generic flame shape model and analytical models for geometric view factor calculation on the fire exposure surface[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 173: 107392.
- [9] 杨健, 许宁, 周星, 等. 天然气管道射流火焰危害影响维度分析[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(02): 121–126. [YANG J, XU N, ZHOU X, et al. Analysis on influence dimension of jet flame hazard in natural gas pipeline[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2022, 51(02): 121–126.]
- [10] RENGEL B, ÀGUEDA A, PASTOR E, et al. Experimental and computational analysis of vertical jet fires of methane in normal and sub-atmospheric pressures[J]. Fuel, 2020, 265: 116878.
- [11] PALACIOS A, GARACIA W, RENGEL B. Flame shapes and thermal fluxes for an extensive range of horizontal jet flames[J]. Fuel, 2020, 279: 118328.
- [12] ZHOU K B, WANG Y Z, ZHANG L, et al. Effect of nozzle exit shape on the geometrical features of horizontal turbulent jet flame[J]. Fuel, 2020, 260: 116356.
- [13] 孙中成, 卢鹏, 玄铁民, 等. 喷孔形状对柴油喷雾燃烧及碳烟特性的影响[J]. 内燃机学报, 2021, 39(03): 201–208. [SUN Z C, LU P, XUAN T M, et al. Effects of nozzle shape on characteristics of diesel spray combustion and soot formation[J]. Transactions of CSICE, 2021, 39(03): 201–208.]

- [14] 黄有波, 董炳燕, 吕淑然, 等. 天然气管道泄漏孔形状对喷射火影响模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(07): 62–67. [HUANG Y B, DONG B Y, LYU S F, et al. Simulation study on influence of natural gas pipeline leak hole shape on jet fire[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(07): 62–67.]
- [15] 周魁斌, 刘娇艳, 蒋军成. 高压可燃气体泄漏动力学过程与喷射火热害分析[J]. 化工学报, 2018, 69(04): 1276–1287. [ZHOU K B, LIU J Y, JIANG J C. Analyses on dynamical process of high pressure combustible gas leakage and thermal hazard of jet fire[J]. CIESC Journal, 2018, 69(04): 1276–1287.]
- [16] 马子超, 肖泽南. 暴雨天气下天然气喷射火安全危险性模拟研究[J]. 建筑安全, 2019, 34(04): 61–64. [MA Z C, XIAO Z N. Simulation study on safety risk of natural gas jet fire in rainstorm Weather[J]. Construction Safety, 2019, 34(04): 61–64.]
- [17] 刘少杰, 刘鹏翔, 雷婷, 等. 天然气管道泄漏喷射火燃烧特性研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(06): 2184–2190. [LIU S J, LIU P X, LEI T, et al. Numerical simulation analysis for the combustion characteristic features of the jet fire caused by the natural gas pipeline leakage[J]. Journal of Safety and environment, 2017, 17(06): 2184–2190.]
- [18] 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 pipe-line[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2020, 187: 104159.
- [19] 周亚薇, 匡卓伦, 冷雪, 等. 天然气管道全管径断裂喷射火对周边建筑物外立面热辐射分布研究[J]. 安全与环境学报, 2022. 10.13637/j. issn.1009–6094.2021.2120. [ZHOU Y W, KAUNG Z L, LENG X, et al. Research on the thermal radiation distribution of full bore rupture jet fire from natural gas pipeline on the surrounding building facades[J]. Journal of Safety and Environment, 2022. 10.13637/j. issn.1009–6094.2021.2120.]
- [20] 李云海, 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. [LI Y T, ZHANG Z Y, LIU Y Q, et al. Influence range of full bore rupture accidents of natural gas pipelines[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(9): 149–154.]
- [21] 张亦翔, 李玉星, 耿晓茹, 等. 障碍物对甲烷水平喷射火燃烧特性的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(07): 54–60. [ZHANG Y X, LI Y X, GENG X R, et al. Influence of obstacles on combustion characteristics of horizontal jet fire by methane[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(07): 54–60.]
- [22] 刘长春, 邓天刁, 刘新磊, 等. 水雾遮蔽喷射火热辐射的计算模型研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(09): 2314–2323. [LIU C C, DENG T D, LIU X L, et al. Study on water mist shelding jet fire thermal radiation calculation model[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(09): 2314–2323.]
- [23] 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(01): 111–116. [DONG B Y, HUANG Y B, MENG J, et al. Numerical simulation on influence of obstacle on jet fire of natural gas[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(01): 111–116.]
- [24] 周宁, 吴露露, 李雪, 等. 喷射火环境下石化管廊管道失效特征试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(01): 135–141. [ZHOU N, WU L L, LI X, et al. Experimental Study on failure features of petrochemical pipelines under jet fire[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(01): 135–141.]
- [25] TANG J. ANSYS fluent 16.0 super learning Manual[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2016.
- [26] PEREZ-GRANDE M J, SANZ-ANDRES A. Thermal radiation heat transfer[J]. Spacecraft Thermal Control, 2012: 73–86.
- [27] LOWESMITH B J, HANKINSON G. Large scale high pressure jet fires involving natural gas and natural gas/hydrogen mixtures[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2012, 90(2): 108–120.
- [28] UPATNIEKS A, DRISCOLL J F, RASMUSSEN C C, et al. Liftoff of turbulent jet flames-assessment of edge flame and other concepts using cinema-PIV[J]. Combustion and Flame, 2004, 138(3): 259–272.
- [29] 宇德明, 冯长根, 曾庆轩, 等. 热辐射的破坏准则和池火灾的破坏半径[J]. 中国安全科学学报, 1996(02): 8–13. [YU D M, FENG C G, ZENG Q X, et al. Thermal radiation damage critiria and pool fire damage radius[J]. China Safety Science Journal, 1996(02): 8–13.]