

LPG 储罐泄漏喷射火灾过程模拟

曾晨岗, 单彦广

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 喷射火灾是指由具有一定压力的单相或两相可燃介质从有限大小的出口泄漏, 遇到火源而引起的火灾. 液化石油气(LPG)储罐由于化学、机械或热冲击等不同原因发生泄漏时, 储罐内气液两相介质在巨大的压差下从泄漏口喷出, 遇到火源即形成喷射火灾, 极易造成严重的危害后果. 运用 FDS 软件, 模拟了有风和无风条件下 LPG 储罐连续泄漏造成的喷射火灾情况, 得到了火焰的热辐射变化规律和火焰发生发展情况. 模拟结果表明, 对于所研究的特定情况, 为了避免人员伤亡和设备损坏, 安全半径至少应设置在距离火焰中心 25 m 以外. 这一结果与文献中采用点火源模型预测的结果吻合良好, 表明所建模型是可行的.

关键词: 喷射火灾; LPG 储罐; 安全半径; 数值模拟

中图分类号: X 932 **文献标志码:** A

Modelling of the Evolution of Jet Fire Caused by Continuous Discharge of Propane from a LPG Tank

ZENG Chengang, SHAN Yanguang

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A jet fire is a fire caused by a single phase or two-phase combustible medium with certain pressure discharged from a limited size outlet. The discharge of two-phase flow from a LPG (liquefied petroleum gas) tank due to chemical, mechanical, or thermal effect can lead to a serious jet fire. A mathematical model was developed based on FDS to simulate the evolution of the jet fire and the radiation due to continuous discharge of propane from the LPG tank. The influence of wind was investigated. The radiation intensity of the flame was predicted in different conditions. The results indicate that a stronger wind can enhance the combustion, thus increase the radiation intensity of the flame. For the specific case simulated in the paper, the minimum safe distance predicted by the model is 25 meters, which agrees well with the result suggested by the point fire model.

Key words: jet fire; LPG tank; safe distance; numerical simulation

收稿日期: 2014-05-20

第一作者: 曾晨岗(1988-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 储罐泄漏火灾演变及其危害. E-mail: 947731571@qq.com

通信作者: 单彦广(1974-), 男, 教授. 研究方向: 两相流动与传热. E-mail: shan@usst.edu.cn

大型液化气储罐在机械、化学和热作用下泄漏导致的火灾爆炸是工业生产过程中常见的重大灾害事故。据统计,化工生产过程中发生火灾爆炸的事故约占 35%,有关液化气泄漏导致的灾害事故约占 14%^[1]。研究液化气储罐泄漏引起的火灾事故及其发生发展规律和危害结果,对于预防及控制液化气泄漏导致的火灾危害具有重大意义。目前对于储罐泄漏引发火灾事故的研究,主要分为两个方面。一方面是针对火灾情况下储罐内热响应的研究,如俞昌铭、单彦广等^[2-4]根据实验和模拟计算结果分析储罐爆炸机理及热响应规律,并对液化石油气(LPG)的储存与运输过程中的危害及影响因素进行研究^[5];文献[6-7]针对不同条件下储罐的热响应研究了 LPG 储罐内的传热传质过程;文献[8-9]对 LPG 各组分的饱和蒸气压与温度的关系进行了研究,并进行了小型现场储罐火灾实验;文献[10-11]对 LPG 储罐热分层区对储罐热响应以及分层增压过程进行了研究。另一方面是针对储罐泄漏后火焰扩散、传播及危害的研究。李庆功等^[12]运用 FDS 火灾模拟软件对大型原油储罐区池火灾进行了模拟,以得到池火灾发生后对邻近储罐的危害情况;王以革等^[13]对二氯丙烷罐区的全面积池火灾进行模拟得到了火焰辐射强度的变化规律;王波等^[14]则从系统科学的角度对火灾管控进行了探讨。这些研究为分析液化气储罐火灾事故发生机理,预测火灾发生发展及火灾发生后的危害管控提供了理论依据。在 LPG 泄漏导致的火灾中,除过池火灾外,还有一类危害更大,也更难控制的火灾,即储罐在机械、化学作用下产生裂口,或在热作用下阀门打开时,由于储罐内外的压差,在裂口或阀门处形成喷射火灾。目前,对此类喷射火灾发生发展及危害的研究较少。本文针对 LPG 储罐阀门打开后泄漏形成喷射火灾的情况,采用 FDS 火灾模拟软件,对火灾发生发展过程进行模拟,分析喷射火灾对周围环境的热辐射危害,预测其破坏半径,从而为控制和削弱喷射火灾的危害后果提供理论依据。

1 喷射火灾模型

喷射火灾是指由具有一定压力的单相或两相可燃介质从有限大小的出口泄漏遇到火源而引起的火灾。LPG 储罐在机械冲击、化学腐蚀下产生裂口,或在热作用下阀门打开时,储罐内的物质(如丙烷)由于过热,靠近液面部分迅速汽化,和液相物质一起在巨大压差下从阀门或裂口喷出,遇到火源即被点燃

形成喷射火。由于两相可燃物以很高的速度喷出,在泄漏到大气环境后其中的液相进一步汽化,与环境中的氧气迅速掺混,所以喷射火的发展较池火更为迅速。喷射火焰对周围环境和人的危害,除过烟气的扩散及危害外,还通过热辐射及对流换热对周围环境和人造成很大的热冲击。如果喷射火发生在储罐区,其对邻近储罐的热冲击作用极易造成相邻储罐也发生火灾爆炸事故,导致严重的环境破坏、设备损坏及人员伤亡。

对于 LPG 储罐,存在两种泄漏方式:连续泄漏和瞬时泄漏。严重的火灾事故,通常是以连续泄漏的方式形成持续的喷射火。因此本文主要针对持续泄漏形成的喷射火,利用 FDS 火灾模拟软件,研究其发展规律,分析有风和无风时烟气扩散过程及对周围环境的热辐射,并预测其破坏半径。

2 数学模型

喷射火灾发生发展过程,即为储罐内两相可燃物质经阀门或裂口喷射燃烧过程,遵循下列质量守恒、动量守恒、能量守恒及组分守恒方程。

质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = m_b''' \quad (1)$$

式中, m_b''' 为液滴蒸发产生的气体量; ρ 为气体密度; t 为时间; $\mathbf{u}$ 为速度矢量。

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla P = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{f}_b$ 为除重力之外的外力; $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ 为粘性应力张量 ($\boldsymbol{\tau}_{ij} = \mu (2\mathbf{S}_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{u}))$), $\mathbf{S}_{ij}$ 为应变率张量 ($\mathbf{S}_{ij} = \frac{1}{2} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$, $i, j = 1, 2, 3$); μ 为粘性系数; δ_{ij} 为克罗内克符号。

组分守恒方程

$$\frac{\partial(\rho Y_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho Y_\alpha \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_\alpha \nabla Y_\alpha + m_{\alpha}''' + m_{b,\alpha}''' \quad (3)$$

式中, Y_α 为组分 α 的质量分数; D_α 为扩散系数; m_{α}''' 为其它组分源项; $m_{b,\alpha}'''$ 为液滴蒸发生成的组分 α 的质量。

能量传输方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{DP}{Dt} + q''' - q_b''' - \nabla \cdot \mathbf{q}'' + \epsilon \quad (4)$$

式中, h_s 为显焓; q''' 为化学反应中每单位体积的热释放速率; q_b''' 为蒸发吸热量; $\mathbf{q}''$ 为导热、对流和辐射的热通量; ϵ 为耗散率; $\frac{DP}{Dt}$ 为压力的随体导数。

把燃烧产物视为理想气体则有状态方程

$$P = \frac{\rho' RT}{\bar{W}} \quad (5)$$

式中, $\bar{W}$ 为气体混合物相对分子质量; P 为理想气体的压力; ρ' 为理想气体密度; R 是理想气体常数; T 为温度。

液滴运动及蒸发模型采用 FDS 内置模型, 燃烧过程采用混合燃烧模型 (mixture fraction combustion model), 假定燃料与氧气混合燃烧, 通过

输运方程求得各组分的混合系数, 进而得到发生燃烧的燃料的质量分数, 再求解燃烧反应。喷射火焰湍流模拟采用大涡模拟。

本文模拟当阀门由于外部热冲击打开时, 储罐连续泄漏形成喷射火灾的情况。储罐内物质为丙烷, 其物性参数见表 1。阀门泄漏速率通过分析储罐内传热传质过程获得^[2]。根据伯努利方程, 可以求得阀门出口处气液两相介质泄放速度 v 。

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho''}} \quad (6)$$

式中, Δp 为内外压差; ρ'' 为泄漏的流体密度。

模拟空间取为 60 m × 50 m × 40 m, 如图 1 所示。计算域初始温度设为 20 °C, 计算域底部(地表)设置为壁面第一类边界条件, 其它表面设置为开放边界, 储罐阀门喷射设置为速度出口边界条件, 压力和温度根据课题组已有计算结果获得^[2]。

表 1 丙烷物性参数

Tab.1 Properties of propane

参数	密度/(kg · m ⁻³)	熔点/°C	沸点/°C	潜热/(kJ · kg ⁻¹)	燃烧热/(kJ · kg ⁻¹)	环境温度/°C
数值	497.86	-187.68	-42.04	344	50 488.63	20

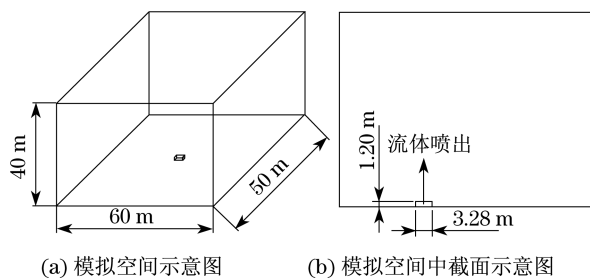


图 1 模拟区域及储罐位置示意图

Fig.1 Simulation domain and the position of the tank

3 结果与讨论

本文研究目的是确定喷射火焰对邻近人员与设备的热冲击及损害情况。根据前文所建模型, 模拟 LPG 储罐阀门打开后连续泄漏形成喷射火灾的情况, 考虑无风和有风情况对火焰发展的影响, 获得了相应条件下火焰辐射强度变化规律。通过火焰外围热辐射强度的衰减, 确定火灾发生时的安全距离, 并确定其破坏半径。

3.1 喷射火焰燃烧发展过程

图 2(见下页)为无风(a)和有风(b)时连续泄漏喷射火灾的发展过程, 横坐标、纵坐标分别表示所选

取的计算域内长度和高度。由图 2(a)可知, 在泄漏物(丙烷)被点燃初期(0.4 s 时), 火焰较小(图中黄色区域代表热释放率大于 20 kW/m³), 呈锥形。随着泄漏物和周围空气的掺混及燃烧, 在喷射火灾发生 1.8 s 后, 火焰继续向上发展形成蘑菇云状。无风时喷射火灾发生 5.2 s 后, 由于丙烷在储罐内外压差作用下连续泄漏, 和周围空气混合燃烧, 火焰向上扩展成自由射流状; 此后对于无风的情况, 火焰的范围、形状及高度不再发生显著变化, 表明火焰发展到了稳定燃烧阶段。对于有风的情况(风速 5 m/s), 如图 2(b)所示, 火灾发生初期(0.4 s 时), 火焰形状和无风时非常接近, 呈锥形。火灾发展到 1.8 s 时, 侧风的影响开始显现, 火焰形状仍接近于蘑菇云状, 但形状不再对称。随着火灾的进一步发展, 火焰形状受侧风影响, 向下风处偏移。火灾发生 25 s 后, 火焰的形状、向下风方向的倾斜角及范围不再发生显著改变, 表明有风情况下的火焰发展到了稳定燃烧阶段。

3.2 烟尘质量分布及扩散

图 3(见下页)为无风(a)和有风(b)时连续泄漏喷射火灾发展过程烟尘质量分布情况, 横坐标、纵坐标分别表示所选取的计算域内的长度和高度, 图下方的色彩条表示图中颜色对应的质量分数。从图中

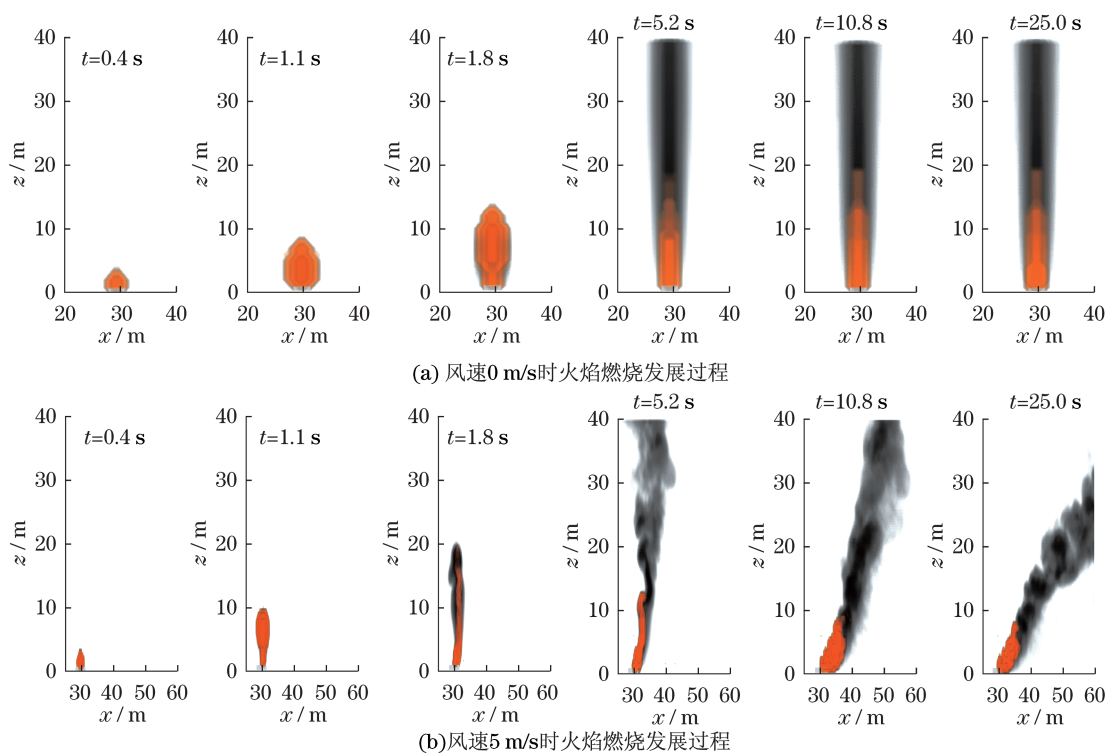


图2 火焰燃烧发展过程

Fig.2 Flame evolution process

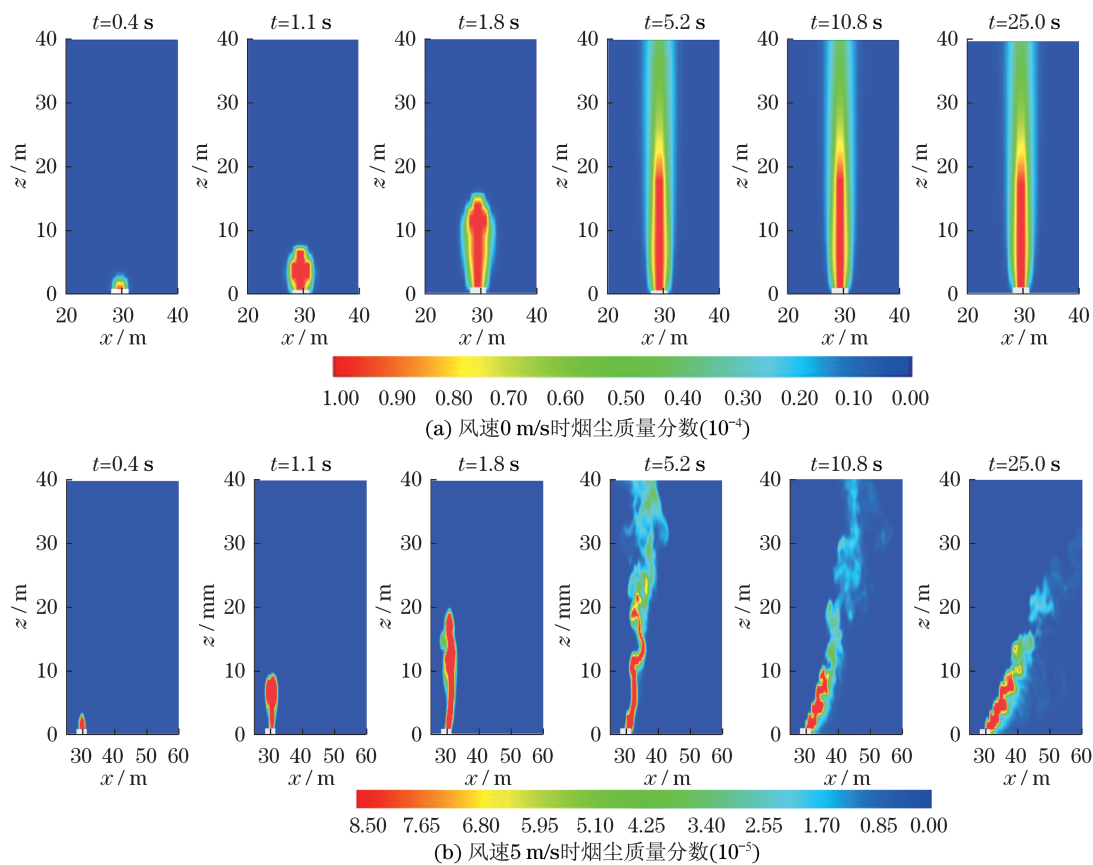


图3 烟尘质量分布图

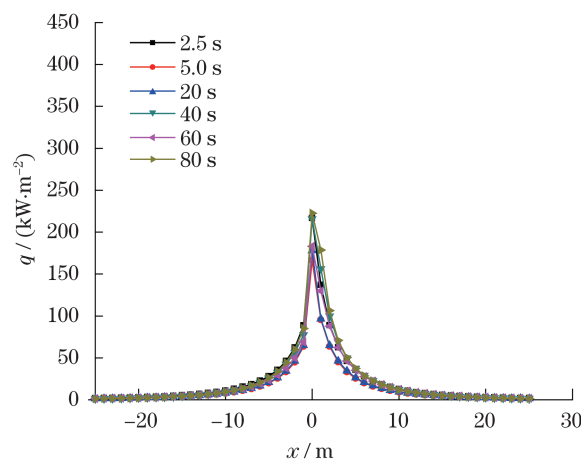
Fig.3 Mass distribution of the soot

可以看出,烟尘主要集中在火焰内部,这与火焰内部氧气浓度相对较低有关.烟尘质量分布和火灾过程中火焰形状变化密切相关.在火灾初期,火焰较小,相应地生成的烟尘也较少.随着火灾发展,火焰高度抬升,形成自由射流状,对应的烟尘质量分布跟随发生相应变化.在无风情况下,烟尘质量分数最大值可达到 1.0×10^{-4} .在左侧进风为 5 m/s 情况下,由于风的输运作用,氧气在火焰处的质量分数比静风时大,使得丙烷可以更加充分燃烧,烟尘质量分数最大值比无风时要小.

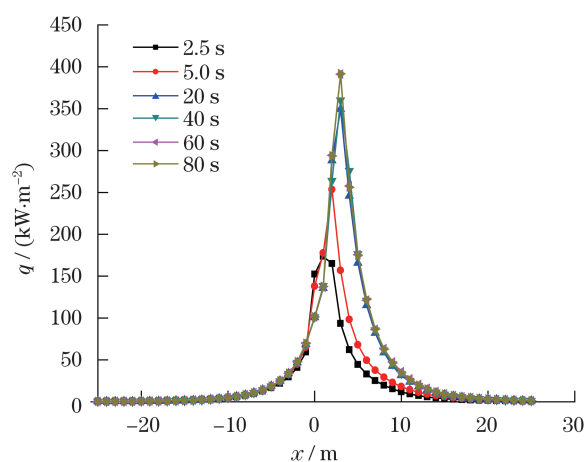
3.3 火焰辐射强度

图4为无风和有风情况下距离火焰中心不同位置在不同时刻的火焰辐射强度 q , x 为截面上的测量点距离火焰中心的距离.由图4可知,有风时燃烧更充分,释放的能量更多,辐射出去的能量也更大.无风时最大辐射强度为 250 kW/m^2 左右,风速 5 m/s 时最大辐射强度可达 400 kW/m^2 左右.从图4还可以看出,有风时火焰辐射强度最大值向下风方向偏移,随着观测点远离火焰中心,火焰辐射强度迅速衰减.由表2可知^[15],当设备和人暴露在超过 12 kW/m^2 的火焰辐射之下时,极易造成人员伤亡和设备损坏.

图5(见下页)为计算所得距阀门 25 m 处火焰辐射强度的变化.图中,1和2代表距阀门水平距离 25 m 处的火焰辐射强度,1位于下风向处,2位于上风向处;横坐标表示时间,纵坐标表示测量点处辐射强度.从图5可以看出,在无风时距阀门 25 m 处火焰辐射强度在 1.6 kW/m^2 左右,根据表2及图5模拟结果,若人处于距离火焰中心 25 m 外,则对人体无大碍.有风时距阀门 25 m 处火焰辐射强度为 1.5 kW/m^2 左右,根据表2,对人体无大碍.综合上述模拟结果,对于本文所模拟的喷射火情况,安全半径至少应在距离火焰中心 25 m 以外.



(a) 风速为 0 m/s



(b) 风速为 5 m/s

图4 不同时刻火焰辐射强度变化及分布

Fig.4 Heat flux distribution of the flame at different stages

为了验证上述模拟结果的可靠性,本文根据喷射火的点火源模型计算了相同情况下的破坏半径^[16],获得辐射强度 1.6 kW/m^2 时对应的半径为 22.90 m ,与本文模拟结果相近,说明本文所建模型和模拟结果是可靠的.

表2 火灾损伤表

Tab.2 Fire injury table

入射通量/($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$)	对设备或材料的损害	对人的损害
37.5	操作设备全部损坏	1%死亡(10 s)
25.0	工艺过程设备结构变形; 无火焰,长时间辐射下,木材燃烧的最低能量	重大烧伤(10 s),100%死亡(1 min)
12.5	有火焰时,木材燃烧,塑料融化的最低能量	一度烧伤(10 s),1%死亡(1 min)
4.0		20 s以上感觉疼痛,但没有起泡
1.6		长期辐射没有不舒服的感觉

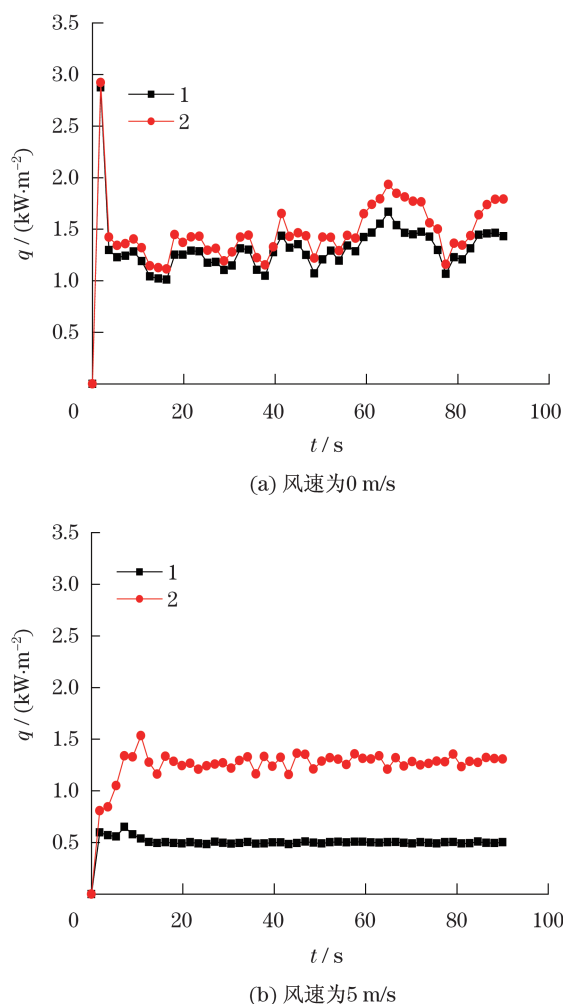


图 5 距火焰 25 m 处火焰辐射强度随时间变化情况
Fig.5 Heat flux variation at spots 25 m away from the flame

4 结 论

本文基于 FDS 模拟程序,模拟了 LPG 储罐连续泄漏喷射火灾情况,考虑了无风和有风对火焰发展的影响,获得了相应条件下火焰辐射强度变化规律.模拟结果表明,对于本文研究的特定情况,无风时火焰最大辐射强度为 250 kW/m^2 ,风速 5 m/s 时最大辐射强度可达 400 kW/m^2 .风对火焰燃烧发展和火焰辐射有显著强化作用.同时,模拟结果表明安全半径至少应在距离火焰中心 25 m 以外,人与设备才能避免伤亡和损坏.

参考文献:

- [1] Planas-Cuchi E, Montiel H, Casal J, et al. A survey of the origin, type and consequences of fire accidents in process plants and in the transportation of hazardous materials [J]. Process Safety and Environmental Protection, 1997, 75(1): 3-8.
- [2] 俞昌铭, 单彦广, 肖金生, 等. 液化气储罐受热引爆机理分析 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(4): 522-530.
- [3] 单彦广, 俞昌铭. 外焰加热条件下液化气储罐爆炸原因的定性分析 [J]. 劳动保护科学技术, 1998, 18(6): 40-42.
- [4] 单彦广, 俞昌铭. 喷射火焰环境下液化气容器的热响应 [J]. 燃烧科学与技术, 1999, 5(4): 375-379.
- [5] 单彦广, 俞昌铭. 液化气在储存与运输过程中的事故分析及防治 [J]. 劳动保护科学技术, 1998, 18(1): 27-31.
- [6] Bi M S, Ren J J, Zhao B, et al. Effect of fire engulfment on thermal response of LPG tanks [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(2): 874-879.
- [7] 赵博, 毕明树. 火灾环境下 LPG 储罐压力与温度响应的数值模拟 [J]. 石油学报 (石油加工), 2012, 28(3): 512-516.
- [8] 朱常龙, 蒋军成. LPG 饱和蒸气压的估算及分析 [J]. 石油与天然气化工, 2010, 39(3): 186-188.
- [9] 邢志祥, 赵晓芳, 蒋军成. 液化石油气储罐火灾模拟试验(二)——喷射火焰环境下 [J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 132-133.
- [10] 弓燕舞, 林文胜, 顾安忠. 分层对液化石油气储罐热响应的影响 [J]. 工业加热, 2002, 31(5): 14-16.
- [11] 弓燕舞, 林文胜, 顾安忠. 液化石油气储罐分层增压过程研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24(1): 86-88.
- [12] 李庆功, 宋文华, 陈阵, 等. 基于 FDS 的大型原油储罐防火堤内池火灾的数值模拟 [J]. 南开大学学报 (自然科学版), 2012, 45(1): 77-82.
- [13] 王以革, 谢飞, 宋文华, 等. 二氯丙烷储罐全面积池火灾的 FDS 模拟 [J]. 南开大学学报 (自然科学版), 2012, 45(4): 18-25.
- [14] 王波, 于世坤, 李庆来. “11.15”火灾的系统与风险分析 [J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(4): 326-330.
- [15] 沙锡东, 姜虹. LPG 喷射火灾危害的研究和分析 [J]. 工业安全与环保, 2010, 36(11): 46-48.
- [16] 王日燕, 罗金恒, 赵新伟, 等. 天然气输送管道火灾事故危险分析 [J]. 天然气与石油, 2005, 23(3): 34-36.

(编辑: 丁红艺)