DOI: 10.11883/bzycj-2016-0323 文章编号: 1001-1455(2018)04-0891-07

开敞空间液化天然气泄漏低温扩散及爆炸传播规律*

任少云
(中国人民武装警察部队学院消防指挥系,河北 廊坊 065000)

摘要: 低温可导致人员冻伤及物品脆裂,气体爆炸传播规律是爆炸演化过程和事故分析的基础。采用数值模拟方法,研究液化天然气大面积泄漏汽化过程、甲烷与空气混合过程及爆炸传播过程。结果表明:随着扩散距离的增大,低温区域的温度谷值升高,且升高趋势变缓;在距泄漏源中心 110 m 范围内,温度低于 273 K;随着风速的增加,温度谷值呈线性下降;随着泄漏时间的延长,温度谷值降低,且下降趋势变缓;随着距泄漏中心距离的增加,爆炸后超压峰值先升高后降低;在距泄漏源中心 200 m 范围内,爆炸产生的高温会对人员造成伤害。

关键词: 液化天然气;泄漏;低温;浓度分布;爆炸
中图分类号: O382 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

液化天然气(liquefied natural gas, LNG)作为能源给工业生产和日常生活提供了极大便利,然而,一旦发生泄漏,却给人身安全带来危害。LNG 泄漏后:一方面从环境中吸收大量的热,使空气温度急剧下降,形成低温冻伤区域;另一方面与空气混合达到爆炸极限,形成可燃性混合气体。因此,在 LNG 泄漏后的救援过程中,必须考虑低温冻伤的可能性以及可燃性混合气体爆炸的危害效应。

目前,人们已广泛研究了 LNG 连续泄漏扩散过程[1-3],并探讨了 LNG 爆炸后的超压和温度分布规律[4]。在这些研究中,一般假定天然气浓度均匀分布。但是事实上由于重力和扩散作用,LNG 泄漏后其浓度分布并不均匀[5],而浓度分布不均匀将直接影响可燃气体的爆炸规律,因此研究浓度分布不均匀天然气的爆炸传播规律具有实际意义。考虑到数值方法已在液体吸热汽化和气体爆炸特性研究中得到了广泛应用[1-2,6-7],为了降低成本、减小风险,本研究中选择数值方法研究 LNG 泄漏及爆炸传播规律。

本文中采用计算流体力学软件 Fluent 建立 LNG 泄漏汽化模型和气体爆炸模型,利用 Burro 实验数据[8]验证数值模型,由此探讨开敞空间 LNG 泄漏汽化过程中的低温规律、甲烷与空气混合形成可燃性气体浓度分布规律,以及遇到火焰后爆炸压力场和温度场的变化规律。

1 数值模型和实验验证

1.1 数值模型

利用国际上比较流行的计算流体力学软件——Fluent 进行数值模拟。采用两相流模型模拟气体混合,采用 k-ε 湍流模型模拟湍流流动,采用组分传递方程计算燃烧,采用 Arrhenius 方程计算化学反应速率,采用 P-1 模型计算辐射传热,采用耦合壁面求解固体壁面散热。

利用 Gambit 软件建立几何模型,并将几何模型划分合适的网格;将网格导入 Fluent 软件,设置参数,开始计算。由于气体的混合和爆炸为瞬态过程,时间步长影响计算结果的准确性、稳定性和计算时间,因此综合考虑计算结果的准确性和计算时间,设时间步长为 10 μs。选用压力基求解器,压力-速度耦合采用 Simple 算法。

* **收稿日期**: 2016-10-22; **修回日期**: 2017-03-08
基金项目: 武警学院国家自然科学基金培育项目(ZKJJPY201621);国家重点研发计划项目(2016YFC0800609)
第一作者: 任少云(1978—),女,博士,副教授,995292635.qq.com。

1.2 数值方法验证

依据 Burro 实验[8]建立计算域，如图 1 所示。计算域的长和宽均为 1 000 m，高为 50 m；中心泄漏源直径为 56 m。左侧为入风口，底部为地面。网格划分采用四面体非结构化网格，尺寸为 10 m。为了验证网格尺寸相关性，采用 10 m(Grid 1)和 5 m(Grid 2)两种网格尺寸对气体混合过程进行模拟计算，对应的网格数分别为 343 659 和 2 746 910。模拟计算得到 LNG 以 16 m^3/min 速率泄漏时距离泄漏中心 57 m 处甲烷体积分数-时间曲线，如图 2 所示。可见，在不同网格尺寸条件下，甲烷体积分数随的时间变化基本一致，相同时刻体积分数差值小于 0.5%，相对偏差小于 5%。

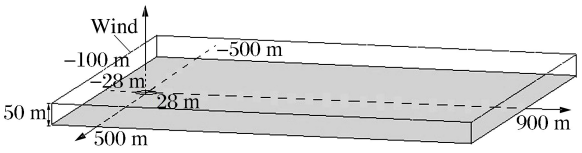


图 1 计算域

Fig. 1 Calculation domain

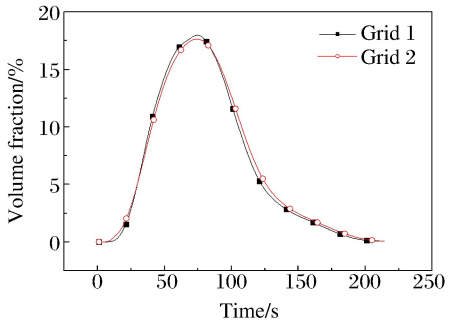


图 2 网格验证

Fig. 2 Grid verification

实验 Burro 8 和 Burro 9[8]中 LNG 泄漏扩散测试参数如表 1 所示。采用表 1 所示的初始条件和边界条件进行数值模拟，将计算结果与 Burro 实验数据[8]进行对比，如图 3 所示。可以看出：甲烷体积分数和温度变化的数值模拟结果与实验结果较吻合。两者存在差异的主要原因如下：(1) 甲烷浓度检测系统和温度检测系统存在系统误差，在 Burro 实验中采用标准镍铬(K 型)热电偶测量气云温度，但是对于 500 ℃以下的中低温，热电偶的热电势较小，对仪器抗干扰能力的要求较高；(2) 模拟过程中气体为理想气体，流动速度较快，而实际气体存在黏性，在气体混合过程中黏性力会降低气体的运动速度；(3) 模拟过程中假定地面为光滑无摩擦，而实际地面却是粗糙的。

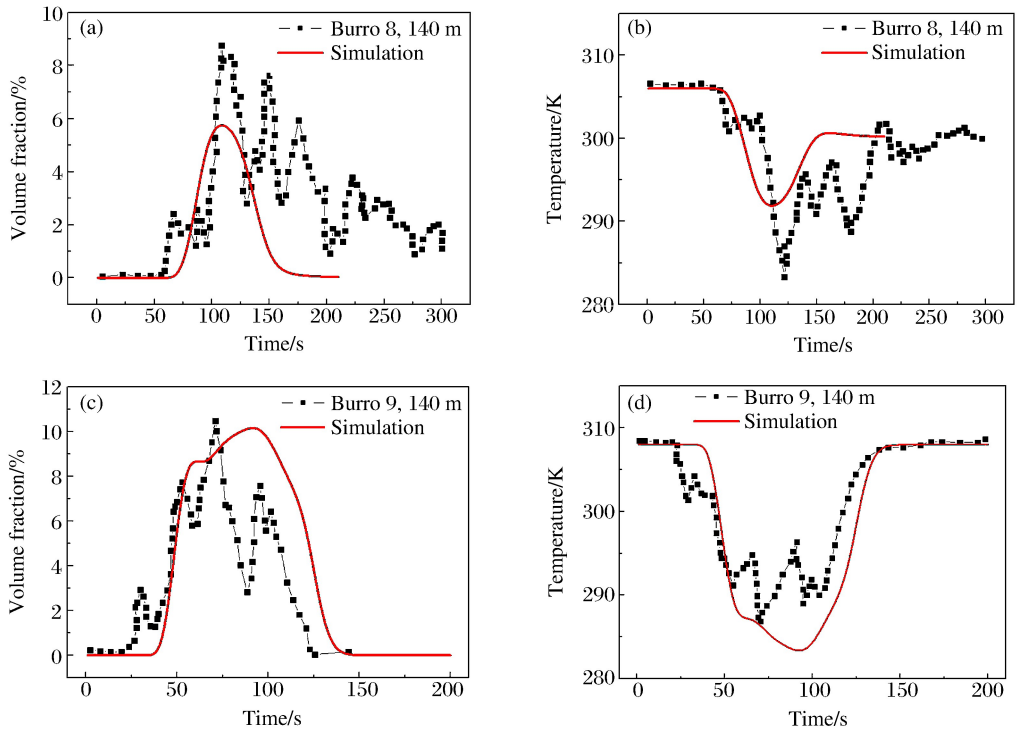


图 3 甲烷体积分数和温度的数值计算结果与实验数据的对比

Fig. 3 Comparison of methane volume fraction and temperature between calculation and experimental results

表 1 Burro 8 和 Burro 9 中 LNG 泄漏扩散实验参数[8]

Table 1 Experimental parameters of LNG leakage in Burro 8 and Burro 9[8]

实验	泄漏速率/($m^3 \cdot min^{-1}$)	泄漏时间/s	2 m 高处平均风速/($m \cdot s^{-1}$)	环境温度/K	环境压力/kPa
Burro 8	16.0	107	1.8	306.25	94.1
Burro 9	18.4	79	5.7	308.55	94.0

2　LNG 泄漏后低温区域的影响因素分析

2.1　扩散距离对低温区域的影响

为了考察扩散距离对低温区域的影响，将温度监测点设在距泄漏源中心 57、140、200、300、400 和 800 m 处。设气体为理想气体；风速为 3 m/s，初始压力为 0.1 MPa，环境温度为 300 K，泄漏时间为 100 s，泄漏速率为 16 m^3/min；中心泄漏源直径为 56 m，地面光滑、绝热。

图 4(a)显示了不同监测点温度随时间变化曲线。可见，距离泄漏源越近，低温区域的温度谷值越低，出现谷值的时间越短。这是由于 LNG 泄漏后，从周围环境中吸热汽化，距离泄漏源越近，温差越大，热交换越快。

当人的皮肤组织温度降至冰点(273 K)以下时，就可以导致冻伤。图 4(b)显示了温度谷值随距离变化趋势。很明显，随着扩散距离的增大，低温区域温的温度谷值升高，且温度谷值的升高趋势变缓，拟合公式如下：

$$T_{min} = 306 - \frac{2\,450}{1 + (x/0.47)^{0.66}} \tag{1}$$

式中：T_{min}为温度谷值，K；x 为扩散距离(即距泄漏源中心的距离)，m。

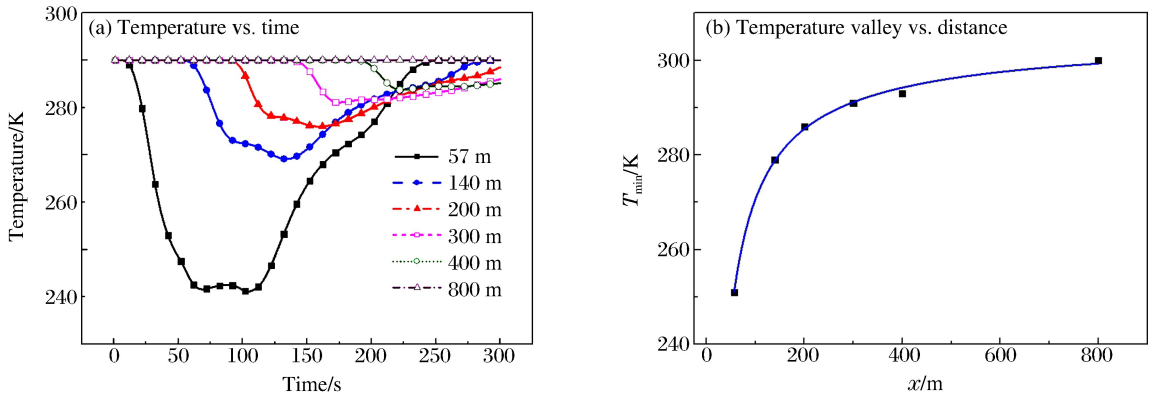


图 4　扩散距离对低温区域的影响

Fig. 4　Influence of diffusion distance on low temperature region

根据式(1)，LNG 大面积泄漏时(直径为 58 m)，距离泄漏源中心 110 m 处的温度为 273 K。说明当处置人员距离泄漏源中心 110 m 范围内时，需要做好防冻保护。

2.2　风速对低温区域的影响

为了考察风速对低温区域的影响，取风速为 1.8、3.0、5.0 和 7.0 m/s，扩散距离取 140 m，泄漏时间为 100 s，其余条件与 2.1 节一致。

图 5(a)显示了不同风速条件下温度随时间变化曲线。可以看出，风速增大，低温区域的温度谷值下降，温度谷值出现的时间缩短。这是因为风速越大，对流换热系数越大，气温下降得越快。图 5(b)显示了低温区域温度谷值随风速变化趋势。可见，低温区域的温度谷值随风速呈线性下降，风速越大，低温区域的温度谷值越低，其拟合公式为：

$$T_{min} = 286 - 1.9v \tag{2}$$

式中：T_{min}为温度谷值，K；v 为风速，m/s。

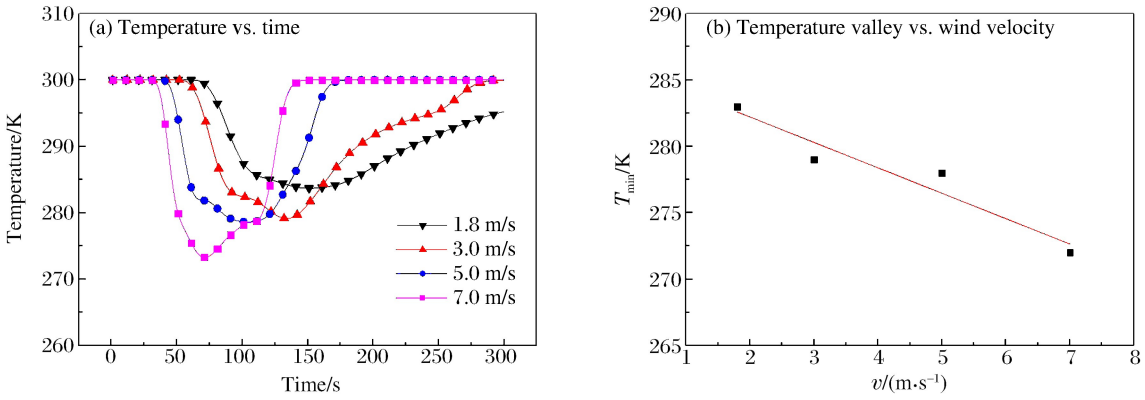


图 5 风速对低温区域的影响

Fig. 5 Influence of wind velocity on low temperature region

2.3 泄漏时间对低温区域的影响

为了考察泄漏时间对低温区域的影响，设泄漏时间分别为 50、100、150 和 200 s，取扩散距离为 140 m，风速为 3 m/s，其他条件与 2.1 节一致。

图 6(a)显示了不同泄漏时间条件下的温度变化曲线。泄漏时间增长，低温区域温度谷值降低，出现温度谷值的时间也延长。其原因是：泄漏时间越长，泄漏的 LNG 量越多，汽化时从环境中吸收的热量也越多，导致环境温度越低。图 6(b)显示了低温区域的温度谷值随泄漏时间变化趋势。随着泄漏时间的增长，低温区域的温度谷值降低，且下降趋势变缓，其拟合公式为：

$$T_{\min} = 292.5 - 0.168t + 0.0004t^2 \tag{3}$$

式中：$T_{\min}$为温度谷值，K；t 为泄漏时间，s。

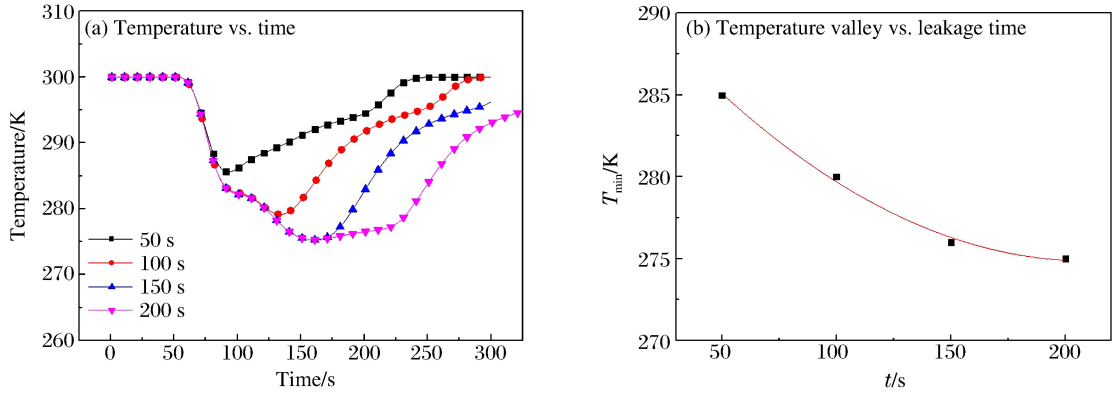


图 6 泄露时间对低温区域的影响

Fig. 6 Influence of leakage time on low temperature region

3 非均匀分布可燃气云爆炸压力场和温度场

可燃气体的浓度分布影响其燃烧反应速率。研究发现，在气体的实际扩散过程中，气体浓度分布不均匀[5]。因此，研究浓度分布不均匀时 LNG 可燃气云的爆炸压力场具有实际意义。

3.1 非均匀分布可燃气云爆炸压力和温度变化规律

LNG 泄漏后汽化为气态甲烷，甲烷与空气混合后形成可燃气云。为了准确模拟可燃气云爆炸压力和温度变化规律，先采用液体汽化模型模拟可燃气云的甲烷浓度分布。计算域如图 1 所示，浓度监测点分别设在距泄漏源中心 57、140、200、300、400 和 800 m 处，距地面高 1 m；风速为 3 m/s，初始压力为 0.1 MPa，环境温度为 300 K，泄漏时间为 100 s，泄漏速率为 16 m^3/min。假设气体为理想气体，地面光滑、绝热。

图 7(a)为不同监测点处甲烷体积分数随时间变化曲线。图 7(b)显示了泄漏 100 s 时距地面 1 m 高处甲烷分布。可以看出：甲烷的体积分数随时间增加先升高后降低；距离泄漏源越远，体积分数越低。同一时刻不同监测点处甲烷的体积分数不同，这是由于距离泄漏源中心越远，扩散到该处的时间越长，因此甲烷浓度形成梯度。为了便于对比分析，以下的甲烷体积分数均采用本节数据。

LNG 泄漏 100 s 时点火，点火源距离泄漏中心下风向 57 m，距地面高 1 m，点火半径为 5 mm，初始温度为 2 500 K，初始压力为 0.1 MPa，环境温度为 300 K。

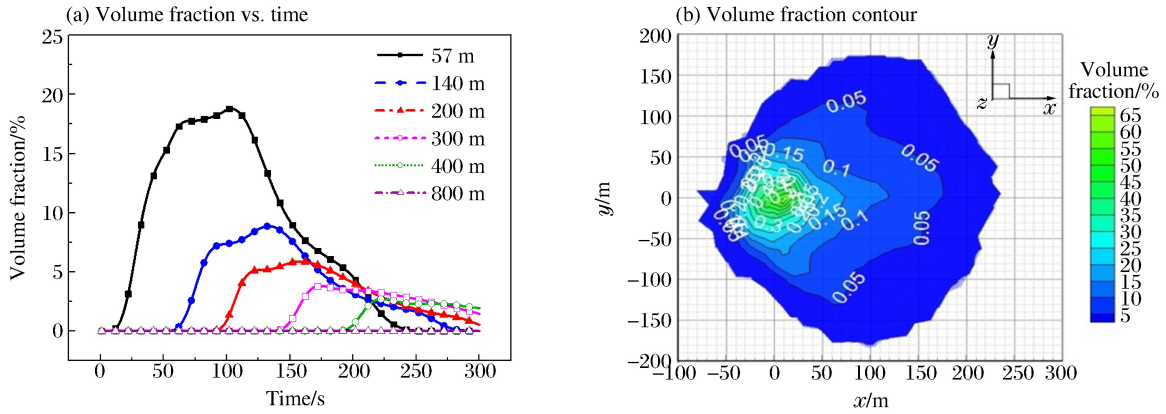


图 7　甲烷体积分数-时间曲线及云图(监测点距地面 1 m 高)

Fig. 7　Methane's volume fraction-time curve and contour (Distance from monitoring point to the ground is 1 m)

图 8 显示了点火后不同监测点处压力和温度随时间变化曲线。由图 8(a)可知：压力场由超压阶段发展到负压阶段；距离泄漏源中心 57 m 处的甲烷体积分数为 16%，爆炸后超压峰值为 0.64 kPa；距离泄漏源中心 140 m 处的甲烷体积分数为 10%，爆炸后超压峰值最大，为 1.04 kPa；距离泄漏中心由 200 m 增大到 400 m 时，超压峰值由 0.27 kPa 降到 0.001 kPa。由图 8(b)可知：距泄漏源中心 57 m(点火位置)处的温度最高；距离泄漏源中心 400 m 处的高温峰值下降至环境温度。

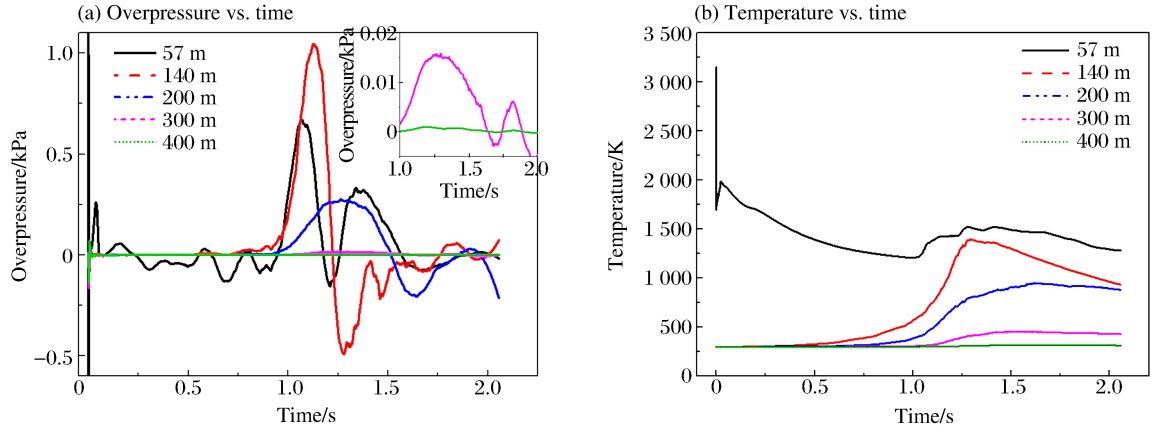


图 8　不同监测点的超压和温度随时间变化曲线

Fig. 8　Overpressure and temperature vs. time at different distances away from leakage center

非均匀分布的混合气体爆炸后，随着与泄漏中心距离的增加，爆炸后超压峰值先增大后减小，如图 9(a)所示。这是因为：距离泄漏中心较近时，甲烷浓度较高，属于富燃料燃烧，燃烧不充分，爆炸超压峰值较低；距离泄漏中心较远时，当甲烷浓度降低到当量比浓度时，爆炸超压峰值最大；距离泄漏中心更远时，甲烷浓度很低，爆炸超压峰值随之降低。图 9(b)展示了温度峰值-距离曲线。可见，距离泄漏中心越远，温度峰值越低。距离泄漏源中心 200 m 范围以内，爆炸产生的高温超过 960 K，会对人员造成伤害。

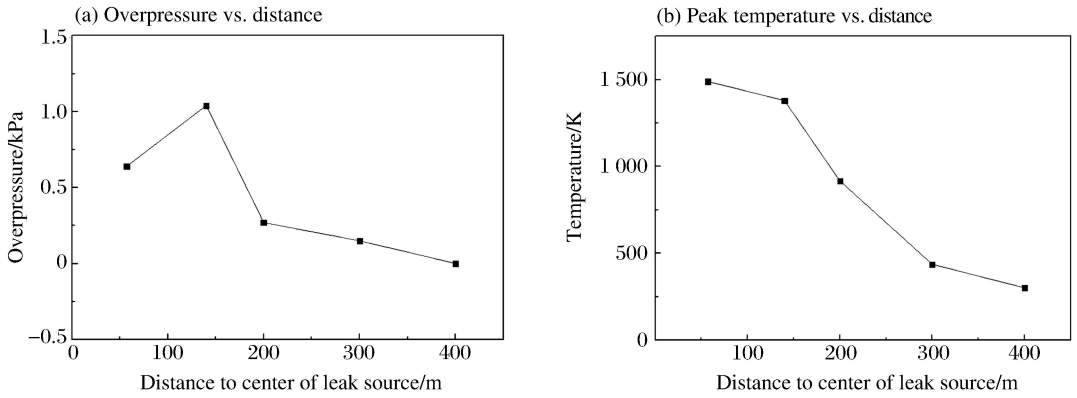


图 9 不同位置的超压峰值和温度峰值变化趋势

Fig. 9 Variation of peak overpressure and peak temperature with distances away from leakage center

3.2 点火时刻对爆炸压力场和温度场的影响

为了研究不同点火时刻对爆炸压力场的影响，设点火时刻分别为 50、100、150 和 200 s；点火源距泄漏中心下风方向 57 m，距地面高 1 m；点火半径为 5 mm；初始温度为 2 500 K，初始压力为 0.1 MPa，环境温度为 300 K。

图 10 显示了距泄漏源中心 140 m 处不同点火时刻爆炸压力和温度随时间变化曲线。当点火时刻为 100 s 时，甲烷浓度达到爆炸极限的区域最大(如图 7 所示)，因此爆炸超压峰值和温度峰值最高；当点火时刻为 200 s 时，甲烷浓度接近爆炸下限，因此爆炸超压峰值和温度峰值最低。

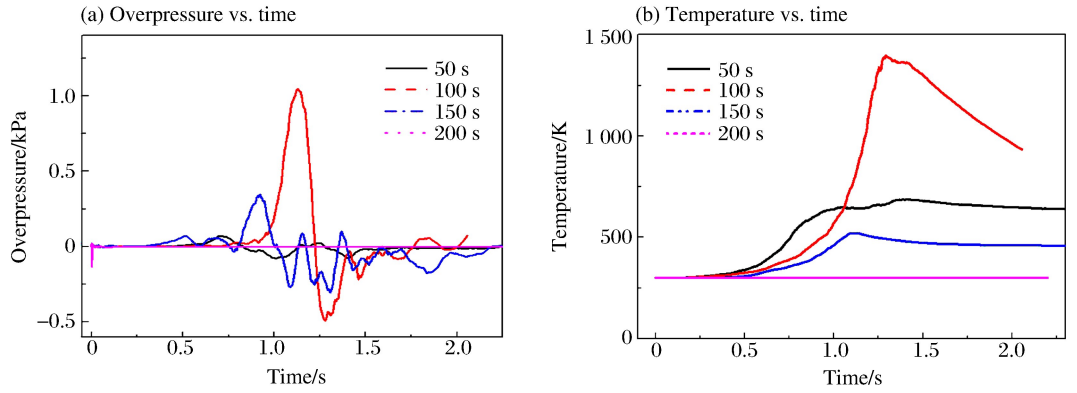


图 10 不同时刻点火爆炸压力和温度随时间变化曲线

Fig. 10 Overpressure-time and temperature-time curves at different ignition times

4 结 论

以 LNG 泄漏后吸热汽化形成的混合气体为研究对象，探索 LNG 大面积泄漏汽化过程、气体混合过程和爆炸过程，主要结论如下：

(1) 随着扩散距离的增大，低温区域的温度谷值升高，且升高趋势变缓，在 LNG 大面积泄漏时处置人员距泄漏源中心 110 m 范围内时需要做好防冻防护；

(2) 低温区域的温度谷值随风速的增加呈线性下降，随泄漏时间的增加而降低，并且降低趋势变缓；

(3) 随着距泄漏中心距离的增加，爆炸后超压峰值先增大后降低，距泄漏源中心 200 m 范围内，爆炸产生的高温超过 960 K，会对人员造成伤害。

参考文献：

[1] ZHANG X, LI J, ZHU J, et al. Computational fluid dynamics study on liquefied natural gas dispersion with phase change of water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015,91:347-354.

[2] LUKETA-HANLIN A, KOOPMAN R P, ERMAK D L. On the application of computational fluid dynamics codes for liquefied natural gas dispersion[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007,140(3):504-517.

[3] 王卿权. LNG 动力船舶燃料罐火灾、爆炸事故后果数值研究[D]. 大连:大连海事大学,2014.

[4] PLANAS E, PASTOR E, CASAL J, et al. Analysis of the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) of a liquefied natural gas road tanker: The Zarzalico accident[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,34:127-138.

[5] REN S, ZHANG Q. Influence of concentration distribution of hydrogen in air on measured flammability limits[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,34:82-91.

[6] GAVELLI F, BULLISTER E, KYTOMAA H. Application of CFD (Fluent) to LNG spills into geometrically complex environments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,159(1):158-168.

[7] SUN B, UTIKAR R P, PAREEK V K, et al. Computational fluid dynamics analysis of liquefied natural gas dispersion for risk assessment strategies[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(1):117-128.

[8] KOOPMAN R P, CEDERWALL R T, ERMAK D L, et al. Analysis of Burro series 40 m^3 LNG spill experiments [J]. Journal of Hazardous Materials, 1982,6(1/2):43-83.

The leakage, low temperature diffusion and explosion of liquefied natural gas in open space

REN Shaoyun

(*Department of Fire Commanding, The Chinese People's Armed Police Forces Academy, Langfang* 065000, *Hebei*, *China*)

Abstract: It is known that low-temperature is apt to cause skin frost bite and material embrittlement, and that the propagation law of gas explosion is the foundation of explosion evolution and accident analysis. In this paper, we investigated the process of extensive gas leakage, gas mixing with air and explosion of the liquefied natural gas (LNG) in open space using numerical simulation. The results show that, as the diffusion distance increases, the lowest possible fluctuating temperature (i.e. temperature valley) of LNG increases, and this tendency gradually slows down; that the temperature is below 273 K in the area within 110 m away from the leakage center; that the temperature valley decreases almost linearly as the wind velocity increases. As the leakage time gets longer, the temperature valley decreases, and so does its decreasing tendency. With the distance from the leakage center getting longer, the peak overpressure increases at first and then decreases. In the area within 200 m away from the leakage center, the high temperature produced by the explosion may pose a hazard to human casualties.

Keywords: liquefied natural gas; leaking; low temperature; concentration distribution; explosion

(责任编辑　王　影)