

LNG 接收站泄漏事故及火灾爆炸后果分析

翁浩铭^{1,2} 李自力^{1,2} 边 江^{1,2} 张成斌^{1,2}

1. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580;

2. 山东省油气储运安全省级重点实验室, 山东 青岛 266580

摘 要: LNG 属于易燃易爆的危险性物品, 一旦发生泄漏, 可能引发喷射火、池火、蒸气云爆炸、闪火等危害。利用挪威船级社研制的 PHAST 软件, 选取具有代表性的泄漏工况对 LNG 泄漏及可能引发的事故进行分析计算。利用 GIS 显示扩散气体、喷射火及池火热辐射、蒸气云爆炸超压的影响区域, 并提出风险防范对策措施, 为消防力量的布置以及应急预案的制订等提供依据。

关键词: LNG 泄漏; 喷射火; 池火; 蒸气云爆炸; LNG 接收站安全

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2016.06.009

0 前言

进入 21 世纪后, 我国对能源的需求不断增加, 出于市场需求, 我国 LNG 产业步入了发展的快车道^[1]。自 2006 年以来, 沿海地区数座 LNG 接收站陆续建成投运。截止 2015 年底, 已有 14 座 LNG 接收站投产运营, 在建及处于规划阶段的接收站达到 15 座。然而, LNG 的管理却相对滞后, LNG 的安全问题也愈发受到各方面的重视。

LNG 的储存温度很低, 在 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 此外还具有易燃、易爆、易扩散等特点, 被列为甲类火灾危险性物品。LNG 的泄漏一方面可能造成低温冻伤、窒息等危害, 泄漏到水面上还可能造成 RPT(快速相变)爆炸; 另一方面, 泄漏出来的 LNG 蒸汽云一旦遇到火源将引发喷射火、池火、蒸气云爆炸、闪火等危害, 也可能产生 BLEVE(沸腾液体扩展蒸汽爆炸)等危害而形成多米诺效应^[2]。

1 LNG 泄漏扩散

LNG 接收站储罐区选用全容式混凝土储罐, 闫晓等人^[3]对该类型储罐区进行了风险识别以及相应的评估, 认为储罐发生全面破裂以及罐顶全面失效的概率保守

估计为 $1 \times 10^{-8} \text{ y}^{-1}$, 而储罐的进出料管线发生完全断裂以及小孔泄漏的概率分别为 $4.21 \times 10^{-5} \text{ y}^{-1}$ 和 $2.1 \times 10^{-4} \text{ y}^{-1}$, 进出料管线发生小孔泄漏的概率远超其他类型的事故。因此本文将对发生概率最大的 LNG 小孔泄漏进行分析, 利用 DNV PHAST 软件, 以某 LNG 接收站为例对各类事故后果进行模拟计算。

1.1 计算模型

PHAST 采用 UDM(Unified Dimensional Model)模型来计算泄漏以及扩散。UDM 是一种复合模型, 包括两个子模型: 准瞬时模型和有限时间修正模型, 模型以距离和时间作为关键变量, 通过一系列代数方程来描述扩散云团, 对于瞬时和连续释放通过不同的方程来描述并考虑了整个扩散状态^[4]。Pitblado R 等人^[5]将 PHAST 的计算结果与 Burro 等实验进行对比, 两者较为吻合。

1.2 计算实例

某 LNG 接收站所在地区平均风速为 5 m/s , 年平均气温为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均湿度为 70% , 大气稳定度为中等稳定。计算物料选取单组份甲烷代替 LNG, 储存温度为 $-164\text{ }^{\circ}\text{C}$, 泄漏口径根据 API 581 推荐取 101.6 mm (4 in)^[6], 泄漏口高度为 1 m , 水平喷射, 连续性泄漏^[7], 持续时间为 10 min 。

1.2.1 液相扩散

经过计算得到该工况下质量流率为 41.1 kg/s , 喷射速度为 19.8 m/s 。液相物料经过泄漏口喷射到地面上, 在地面上形成液相流动。在不设围堰的情况下, 形成的最大液池半径为 17.5 m , 液池具体形成过程见图 1; 其蒸发速度和液池与大气及地面的接触面积大小有关, 因此与液池半径发展趋势基本一致, 见图 2; 液池温度由于蒸发吸热带走部分热量呈下降趋势, 见图 3。

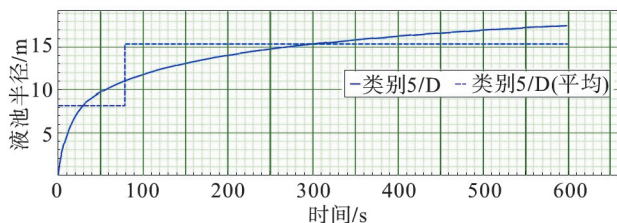


图 1 液池半径随时间的变化关系

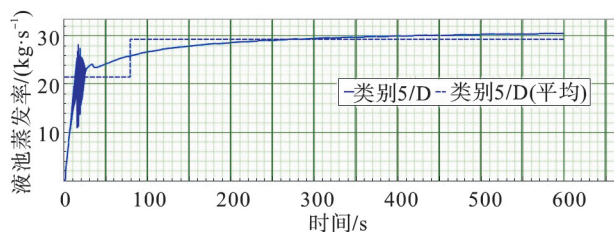


图 2 液池蒸发率随时间的变化关系

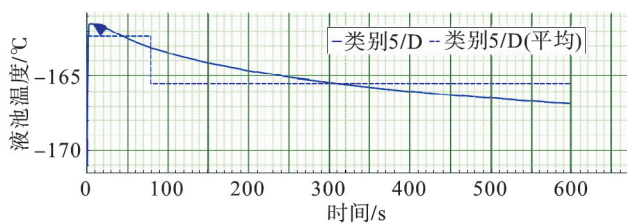


图 3 液池温度随时间的变化关系

1.2.2 气相扩散

在液相泄漏扩散的同时, 出口处一部分的闪蒸气以及泄露出来液相的蒸发气, 形成两相扩散。LNG 蒸气云的扩散过程大致分为四个阶段^[8-9]: 泄漏初始阶段、重力沉降阶段、混合扩展阶段、被动扩散阶段。将计算结果以图表的形式显示, LNG 蒸气云的 LFL (燃烧下限)、UFL (燃烧上限) 以及 $1/2$ LFL 浓度对应的范围见图 4~5, 图 4 以及文中其他俯视图对应的高度均为 1 m 。从图 4~5 可以看出, 扩散出来的低温气云 $1/2$ LFL 浓度的最远距离为 192 m , 高度为 8 m , 宽度为 50 m , 呈现出扁平状。

此外, DNV PHAST 提供 GIS (Geography Information System) 地图输入, 可以在地图上直观地显示受影响的范围, 为应急指导提供很大的便利。该 LNG 储罐区常年风向为北风, 该工况下其影响范围见图 6。

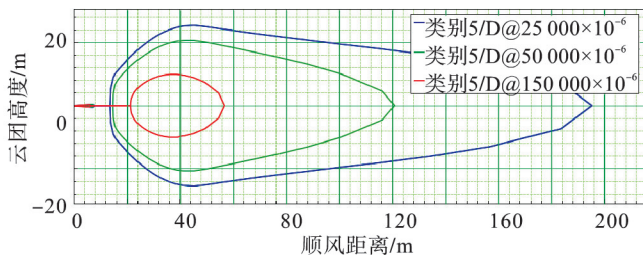


图 4 泄漏口水平面不同浓度云团俯视图

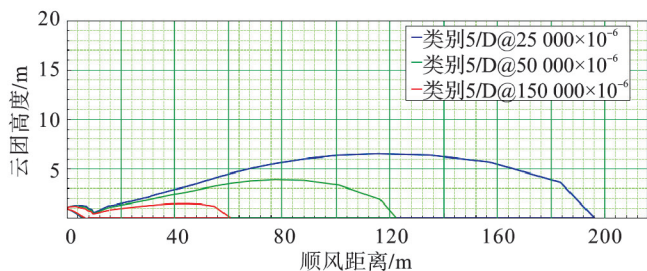


图 5 泄漏口中心垂直面不同浓度云团侧视图



图 6 GIS 上不同浓度对应的扩散范围

2 泄漏后果

根据历来发生的 LNG 泄漏导致的相关事故^[10], 以及相关文献^[11]的描述记载, 总结了 LNG 小孔泄漏可能导致的几种事故及其产生的条件, 见图 7。

为定量评估 LNG 泄漏引发事故的伤害范围, 根据冲击波超压准则以及热辐射伤害/破坏准则^[12], 确定了爆炸产生的冲击波超压与人体及建筑遭到损害的相应关系以及火灾不同热辐射强度的影响后果, 见表 1。文中计算影响范围所需的热辐射强度及爆炸超压大小均依据表 2。

2.1 喷射火

目前研究喷射火的主要方法有点源模型、多点源模型、固体源模型以及 CFD 模型。PHAST 软件中的喷射火计算模块中包含的 Cone 平头圆锥体形模型以及 API RP 521 香蕉形模型, 均为固体源模型。相比于点源模型, 固体源模型虽然计算复杂, 但精度更高^[13]。通过对这两种固体源模型的对比发现, API 模型在近场的热辐射强度要比 Cone 模型大得多, 而对远场的热辐射强度估算不足。为充分估计远场的热辐射强度, 本次计算选用了

Cone 模型,计算结果见图 8~9, GIS 上的热辐射范围见图 10。当发生泄漏,气云被点燃发生闪火,就可能回燃到泄漏口形成喷射火,而在图 10 所示范围内的人员和设备就可能被热辐射伤害。

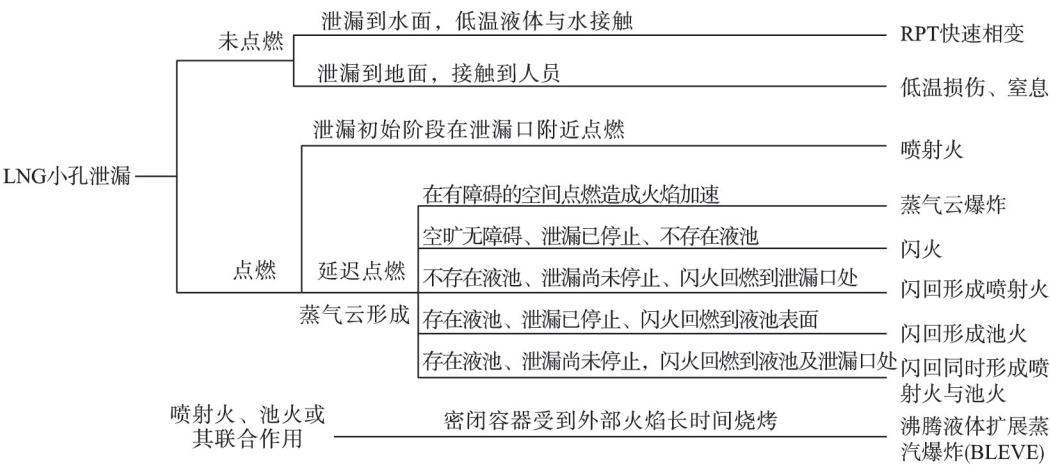


图 7 LNG 泄漏可能导致的几种事故后果

表 1 冲击波超压伤害对照表

爆炸冲击波 /kPa	对人的损伤程度	对工艺设备和建筑物的破坏程度
20 ~ 30	轻微挫伤	大建筑物有显著破坏
30 ~ 50	中等损伤:听觉器官损伤,内脏轻度出血、骨折等	-
50 ~ 100	严重:内脏严重损伤,可引起死亡	钢骨架和轻型钢筋混凝土建筑物破坏
100	严重:可能大部分死亡	除防震钢筋混凝土外其余建筑物均破坏

表 2 热辐射伤害 /破坏准则

热辐射强度 /(kW·m ⁻²)	对人员影响	对设备影响
1.6	长时间暴露不会有不适感	-
4	暴露 20 s 后人员会感觉疼痛,但不会起水泡	玻璃暴露 30 min 后破裂
12.5	1 min 内死亡率 1 %;10 s 内 1 度烧伤	有明火时木材被点燃所需的最小能量;塑料管及合成材料熔化
37.5	1 min 内死亡率 100 %;10 s 内死亡率 1 %	生产设备设施遭受严重损坏

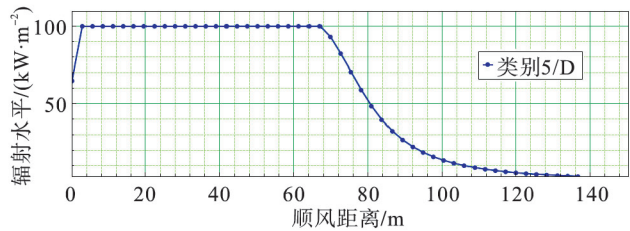


图 8 喷射火热辐射强度与距离关系曲线

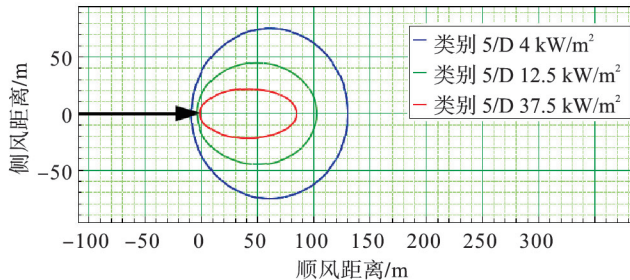


图 9 喷射火不同热辐射强度对应影响范围



图 10 GIS 上喷射火不同热辐射强度对应影响范围

2.2 池火

目前通常采用场模型和半经验模型来对烃类池火灾进行研究^[14]。场模型通过解决 Navier-Stokes 方程控制流动,同时结合描述火灾中化学及物理过程的分模型,进行火灾特性的预测。半经验模型则是由大量的实

验数据总结推导出半经验的关系式,如果应用没有超过有效范围,将得到合理的预测^[14]。半经验模型因其简单易用的特点,在工程风险评估领域应用广泛。

PHAST 将池火火焰假设为一个受风剪切的圆柱体,采用 Mudan 模型计算池火火焰高度,采用 Johnson^[15] 提出的关系式计算火焰倾角。PHAST 根据引燃时间不同,将池火灾分为早期池火灾和晚期池火灾。早期池火灾发生在液池质量达到平衡阶段,晚期池火则发生在液池半径达到最大的时候。早期和晚期池火不同热辐射强度对应影响范围见图 11、12。

从图 11~12 可以看出,晚期池火由于其液池半径比早期的大得多,发生火灾时其热辐射范围也相应更大。由于 LNG 液相的蔓延一方面是其超低温特性会对沿途设备造成损害,另一方面一旦发生池火其热辐射的影响范围大大增加,有必要采取措施对 LNG 液相蔓延进行控制。GIS 上晚期池火的热辐射影响范围见图 13。

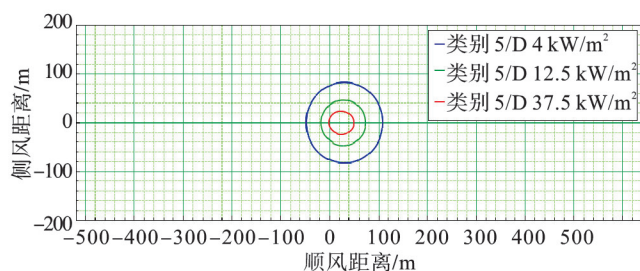


图 11 早期池火不同热辐射强度对应影响范围

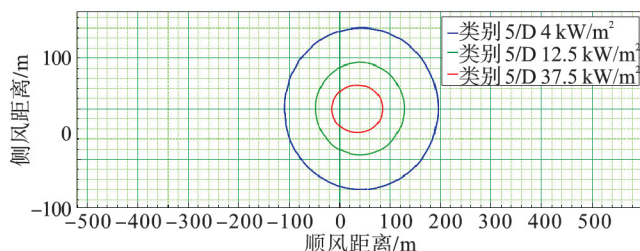


图 12 晚期池火不同热辐射强度对应影响范围



图 13 GIS 上晚期池火不同热辐射强度对应影响范围

2.3 蒸气云爆炸

开敞空间气体爆燃已有的理论研究方法包括 TNT

当量法、TNO 多能模型、Kuhl 模型、Baker-Strehlow 模型以及 CFD 数值计算方法^[16]。TNO (The Netherlands Organization) 多能法是目前模拟预测蒸气云爆炸的常用方法^[17],是荷兰 TNO 实验室于 1985 年在大量实验和数值研究基础上提出并逐步完善起来的。由于该模型经大量的实验结果验证和修正,比较接近事实^[18],因此本次计算采用 TNO 多能法来对爆炸影响范围进行预测。该计算中爆炸的能量主要取决于爆炸极限(5%~15%)浓度范围内 LNG 的质量,此外爆炸威力的大小还与附近障碍物、气云尺寸、初始压力温度^[19]等有关。PHAST 根据泄漏情况计算出晚期爆炸的最坏情况(无障碍),见图 14~15。爆炸中心为点火点,本文的点火点位于气云前端。

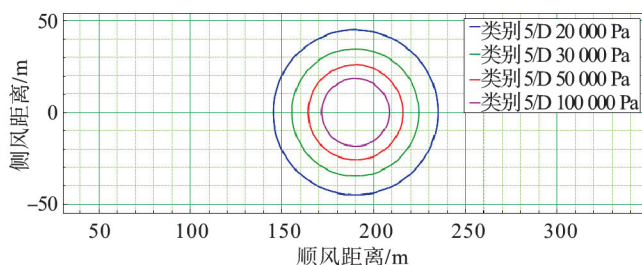


图 14 晚期爆炸最坏情况不同超压对应影响范围



图 15 GIS 上晚期爆炸最坏情况不同超压对应影响范围

2.4 闪火

闪火是一种非爆炸性的燃烧过程。其发生的条件和蒸气云爆炸的条件类似^[20]。闪火的主要危害来自热辐射和直接接触火焰,由于持续时间短,燃烧速度相对较慢(10 m/s)^[21],其危害程度要比其他泄漏事故小得多。

3 结论

通过对文中 LNG 接收站泄漏事故及火灾爆炸计算,可以看出风向基本能够决定危险区域的方位。特别是对于那些常年风向较为固定的 LNG 接收站而言,在常年风向下风向处保留一定的安全距离,尽量减少设备安置、人员作业,在一定程度上能够规避风险,减少损失。

目前关于 LNG 储罐的围堰的尺寸如何确定等问题尚无定论。当 LNG 发生泄漏,储罐围堰能够阻碍 LNG

气体的扩散,减小受影响的区域,然而正是由于围堰的阻拦导致 LNG 在罐区累积,增大了发生火灾爆炸的可能性。因此,为解决 LNG 储罐是否设置围堰等问题,应将泄漏及火灾爆炸作为一个连续的过程进行研究,结合发生火灾爆炸条件形成概率,综合评价围堰的设置。

除了围堰,高倍数泡沫系统、强制水幕系统也对抑制 LNG 的扩散有明显的抑制作用,但是这些措施的具体参数,如高倍泡沫发泡倍数、供给强度,强制水幕系统水压等,仍需进行深入的研究。此外,从事安全工作的人员应从影响 LNG 扩散的各个因素入手,拓展思路,努力提出其他有效的 LNG 泄漏抑制技术。

参考文献:

- [1] 胡彬,刘希,邓琳灿. 中国 LNG 发展现状[J]. 化工管理, 2015, 386(27): 1.
Hu Bin, Liu Xi, Deng Lincan. The Current Situation of the Development of LNG in China [J]. Chemical Enterprise Management, 2015, 386 (27): 1.
- [2] 何静,张礼敬,陶刚,等. 大型 LNG 储罐区个人风险及泄漏后果定量分析[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(10): 46-49.
He Jing, Zhang Lijing, Tao Gang, et al. Quantitative Analysis on Individual Risk and Leakage Consequences of LNG Storage Tank [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41 (10): 46-49.
- [3] 闫晓,赵东风,孟亦飞. 大型 LNG 储罐区卸料管线泄漏事故定量风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(4): 72-77.
Yan Xiao, Zhao Dongfeng, Meng Yifei. Quantitative Risk Analysis on Leakage Accident of Unloading Pipeline in Large LNG Storage Tank Farm [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9 (4): 72-77.
- [4] 朱伯龄,於孝春,李育娟. 气体泄漏扩散过程及影响因素研究[J]. 石油与天然气化工, 2009, 38(4): 354-358.
Zhu Boling, Yu Xiaochun, Li Yujuan. Research on Influencing Factors in the Process of Gas Leakage and Dispersion [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2009, 38 (4): 354-358.
- [5] Pitblado R, Baik J, Raghunathan V. LNG Decision Making Approaches Compared [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 130 (1-2): 148-154.
- [6] 周玉希,蔡治勇. 基于 PHAST 软件的 LNG 储配站储罐泄漏扩散分析[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2013, 15(增刊 1): 12-16.
Zhou Yuxi, Cai Zhiyong. The Analysis of LNG Storage and Distribution Station Tank Leakage and Diffusion Based PHAST [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 15 (Suppl 1): 12-16.
- [7] 苑伟民,袁宗明,毕建伟,等. LNG 泄漏扩散模拟研究[J]. 天然气与石油, 2011, 29(4): 1-5.
Yuan Weimin, Yuan Zongming, Bi Jianwei, et al. Study on LNG Leakage and Diffusion Simulation [J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29 (4): 1-5.
- [8] 庄学强. 大型液化天然气储罐泄漏扩散数值模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
Zhuang Xueqiang. Numerical Simulation for LNG Release & Dispersion from Large Scale Tank [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [9] 唐建峰,蔡娜,郭清,等. 液化天然气水平连续泄漏重气的扩散过程[J]. 化工进展, 2012, 31(9): 1908-1913.
Tang Jianfeng, Cai Na, Guo Qing, et al. Research on the LNG Dense Gas Diffusion: A Continuous Horizontal Jet Release [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31 (9): 1908-1913.
- [10] 孙晓平,朱渊,陈国明,等. 国内外 LNG 罐区燃爆事故分析及防控措施建议[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 126-131.
Sun Xiaoping, Zhu Yuan, Chen Guoming, et al. An Analysis of Foreign and Domestic Explosion Accidents in LNG Tank Fields and Proposals for Preventing Measures [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33 (5): 126-131.
- [11] 张文冬,张永信. 基于 PHAST 软件模拟大型 LNG 储罐泄漏事故[J]. 石油化工安全环保技术, 2014, 30(5): 27-31.
Zhang Wendong, Zhang Yongxin. Simulation of Leakage Accident of Large LNG Storage Tank Based on PHAST Software [J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2014, 30 (5): 27-31.
- [12] 秦慧艳,刘家洪,余翔,等. 液化天然气工厂厂址选择和总图设计要点[J]. 天然气与石油, 2013, 31(6): 83-86.
Qin Huiyan, Liu Jiahong, Yu Xiang, et al. Site Selection and Plot Plan Design Essentials of Liquefied Natural Gas (LNG) Plant [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31 (6): 83-86.
- [13] 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.
Sha Xidong, Jiang Hong. Researches and Analyses of LPG Jet Fire Hazards [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36 (11): 46-48.
- [14] 李慧,蒋军成,王若茵. 池火灾热辐射的数值研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(10): 11-14.

- Li Hui, Jiang Juncheng, Wang Ruojun. Modeling and Numerical Study of Pool Fire Heat Radiation [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15 (10): 11 - 14.
- [15] Johnson, A D. Model for Predicting Thermal Radiation Hazards from Large-Scale LNG Pool Fires [J]. ICHIME Symposium Series, 1992, (130): 507 - 524.
- [16] 李生娟, 毕明树, 章正军, 等. 气体爆炸研究现状及发展趋势[J]. 化工装备技术, 2002, 23(6): 15 - 19.
- Li Shengjuan, Bi Mingshu, Zhang Zhengjun, et al. Research Status and Development Trend of Gas Explosion [J]. Chemical Equipment Technology, 2002, 23 (6): 15 - 19.
- [17] 黄斌, 刘扬, 傅程, 等. LPG 储罐的蒸气云爆炸后果模拟[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 34(19): 29 - 31.
- Huang Bin, Liu Yang, Fu Cheng, et al. Consequence Simulation of Vapor Cloud Explosion in LPG Storage Tank [J]. Inner Mongolva Petrochemical Industry, 2008, 34 (19): 29 - 31.
- [18] 张瑞华, 陈国华, 张晖, 等. TNO 多能法在蒸气云爆炸模拟评价中的工程应用[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 109 - 114.
- Zhang Ruihua, Chen Guohua, Zhang Hui, et al. Engineering Applications of TNO Multi-Energy Method in VCE Simulation Assessment [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 34 (5): 109 - 114.
- [19] 毕明树. 开敞空间可燃气体云爆炸的压力场研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2001.
- Bi Mingshu. A Research on the Pressure Fields of Unconfined Flammable Gas Cloud Explosions [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001.
- [20] Hanna S R, Drivas D G. Guideline for Use of Vapor Cloud Dispersion Model [M]. 2nd Edition. New York: Wiley-American Institute of Chemical Engineers, 1996: 25 - 47.
- [21] 刘茂, 余素林, 李学良, 等. 闪火灾害的后果分析[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(4): 28 - 31.
- Liu Mao, Yu Sulin, Li Xueliang, et al. Analysis of Consequences of Flash Fire [J]. Journal of Safety and Environment, 2001, 1 (4): 28 - 31.