

王继猛,崔燕,王鹏飞,等. 大气环境影响下的高压氢储罐氢气泄漏爆炸事故后果模拟[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(3):30-35. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.004

WANG J M, CUI Y, WANG P F, et al. Simulation of Consequences of Hydrogen Leakage Explosion Accident in High-pressure Hydrogen Storage Tank Under the Influence of Atmospheric Environment [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(3):30-35. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.004

大气环境影响下的高压氢储罐 氢气泄漏爆炸事故后果模拟

王继猛¹, 崔燕^{1*}, 王鹏飞^{1,2}, 刘勇^{1,2}, 王莹¹, 程川¹, 王昊¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害防治国家安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为研究高压氢储罐氢气泄漏爆炸在大气环境因素影响下的危险性, 以假设某企业的高压氢储罐发生氢气泄漏爆炸事故为研究背景, 运用 ALOHA 软件, 模拟氢气云爆炸威胁区域随大气稳定度、风速、温度和湿度变化时的动态变化规律。模拟结果表明: 天气越稳定氢气云爆炸危险性越大; 风速越小氢气云爆炸危险性越大; 温度对氢气云爆炸危险性影响较小; 湿度这一因素不影响氢气云爆炸危险性。研究结果对高压氢储罐氢气泄漏爆炸事故的预防、应急疏散和救援具有重要的指导意义。

关键词: 氢气; 大气环境; 高压氢储罐泄漏; 氢气云爆炸; ALOHA; 事故模拟

中图分类号: X932

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)03-0030-06

Simulation of Consequences of Hydrogen Leakage Explosion Accident in High-pressure Hydrogen Storage Tank Under the Influence of Atmospheric Environment

WANG Jimeng¹, CUI Yan¹, WANG Pengfei^{1,2}, Liu Yong¹, WANG Ying¹, CHENG Chuan¹, WANG Hao¹

(1. School of Resources and Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the danger of hydrogen leakage and explosion of high-pressure hydrogen storage tanks under the influence of atmospheric environmental factors, taking the assumption that a high-pressure hydrogen storage tank of a certain enterprise has a hydrogen leakage and explosion accident as the research background, the ALOHA software is used to simulate the dynamic change law of the hydrogen cloud explosion threat area with changes in atmospheric stability, wind speed, temperature and humidity. The simulation results show that firstly, the more stable the weather, the greater the risk of hydrogen cloud explosion. Secondly, the smaller the wind speed, the greater the risk of hydrogen cloud explosion. Thirdly, temperature has few impact on hydrogen cloud explosion risk, and lastly humidity as a factor does not affect the risk of hydrogen cloud explosion. The research

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年项目资助(19B197); 湖南省自然科学基金青年项目资助(2020JJ5172)

* 通信作者, E-mail: cuiyan911@163.com

results have important guiding significance for the prevention, emergency evacuation and rescue of hydrogen leakage and explosion accidents in high-pressure hydrogen storage tanks.

Keywords: hydrogen; atmospheric environment; high-pressure hydrogen storage tank release; hydrogen cloud explosion; ALOHA; accident simulation

氢气是一种应用广泛的化工原料,工业上主要用于炼油、合成氨、合成甲醇、直接还原铁矿石生产钢铁等^[1].氢能以其资源丰富、来源多样、洁净环保、可存储、可再生等特点而备受世界各国青睐^[2].然而,氢气易泄漏扩散、可燃范围宽、燃烧热值高、爆炸能量大,因此,使用风险高.由于高压氢储罐等设备的制造、安装不可避免地存在着各种缺陷,往往因腐蚀穿孔、阀门失效、疲劳产生裂纹等造成气体泄漏.虽然氢气的性质很稳定,不容易跟其他物质发生化学反应,但在储存过程中一旦发生泄漏便会与空气混合形成爆炸性混合物,遇热或明火即会发生氢气云爆炸^[3].

已有学者和专家针对氢气的危险性展开了研究,沈晓波等^[4]首次总结了高压氢气泄漏扩散、泄漏自燃、喷射火和气云爆炸等典型事故演化过程,为高压氢储罐氢气泄漏爆炸事故后果分析奠定了基础;张俊峰^[5]利用模拟软件对低压储氢装置在换气站内的泄漏爆炸过程进行模拟研究,探究各项参数对爆炸强度、冲击波及火焰传播行为的影响规律;徐平等^[6]通过对高压储氢罐不同位置发生泄漏扩散的数值计算,得到不同位置泄漏后的扩散特性;MAO等^[7]利用 FLUENT 软件模拟氢气在不同舱室中的扩散过程,得出氢气浓度分布随泄漏时间的变化规律;EDELIA等^[8]首次提出高压氢有可能形成一个巨大的蒸气云,当泄漏源靠近地面时,即使没有限制也可能爆炸的概念.

在氢气的危险性研究上,大多数专家和学者主要集中在氢气的泄漏扩散规律及爆炸危险性方面,对爆炸后果的影响因素研究较少.并且,ALOHA 是一款功能强大的化工模拟软件,主要利用高斯模型、重气扩散模型等来计算毒气云团扩散速率、范围及纵深,还可计算沸腾液体膨胀蒸气爆炸、喷射火、池火等热辐射范围,以及蒸气云团爆炸冲击波超压范围等^[9].因此,利用 ALOHA 软件对高压氢气储罐泄漏后发生氢气爆炸进行模拟,并分析事故后果的影响范围及其影响因素,为事故发生后的应急处置提供依据.

1 泄漏源介绍

以江西九江某企业内的高压氢气储罐为研究对象,该储罐容积为 300 m³,储罐压力为 35 MPa,储存温度为常温,储罐中的氢气为气态,其储罐分布如图 1 所示.



图1 企业储罐分布

2 数学模型介绍

本文研究的是企业内高压氢储罐泄漏后所引发的氢气云爆炸事故,所涉及的数学模型有高斯烟羽模型、气体爆炸模型,具体模型介绍见下文.

2.1 高斯烟羽模型

由于氢气属于轻质气体,而且泄漏时间较长,因此选用高斯烟羽模型进行模拟.采用扩散模型见式(1).

$$X(x, y, z, t, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2}\right] \right\}. \quad (1)$$

式中: Q 为氢气泄漏速率, kg/s ; u 为泄漏时平均风速, m/s ; σ_y, σ_z 为水平风向、垂直风向的扩散系数; H 为泄漏源有效高度, m ; x, y, z 为下风向、水平风向和垂直风向的距离, m ; t 为泄漏后的时间; X 为空间任意一点 (x, y, z) 在 t 时刻空气中的氢气浓度, kg/m^3 .

2.2 气体爆炸模型

蒸气云爆炸模型包括 TNT 当量模型、TNO 模型等^[10]. 由于 TNT 当量模型算法较保守^[11], 因此本文选其作为计算模型. 模型计算式如下所示.

$$W_{\text{TNT}} = \frac{\varphi W_f Q_f}{Q_{\text{TNT}}}. \quad (2)$$

式中: W_{TNT} 为蒸气云的 TNT 当量, kg ; φ 为蒸气云的 TNT 当量系数, 一般取 4%^[12]; W_f 为蒸气云中燃料的总质量, kg ; Q_f 为燃料的燃烧热, kJ/kg ; Q_{TNT} 为 TNT 的爆炸热, 取 4.52 MJ/kg.

气体爆炸冲击波以被引燃处为中心向四周扩散, 气体爆炸冲击波超压值计算式为

$$L = r / \sqrt[3]{W_{\text{TNT}}}; \quad (3)$$

$$P_i = \frac{3.9}{L^{1.85}} + \frac{0.5}{L}. \quad (4)$$

式中: L 为 r 处的爆炸特征长度; r 为到火球中心的距离; P_i 为 r 处的爆炸冲击波的超压值.

3 初始参数确定

3.1 ALOHA 软件参数确定

模拟时初始参数如表 1 所示.

表 1 ALOHA 软件参数

参数名称	参数值
地理位置	东经 116°36'2.9"、北纬 29°57'30.5"
海拔/m	33
建筑物类型	无黏滞双层建筑
日期时间	2021 年 7 月 28 日 13 时 11 分
模拟危险品种类	纯净氢气
外部大气条件	如表 2 所示
泄漏情况及类型	立式高压储罐容积为 300 m ³ 、储存氢气为气态、泄漏口选择直径为 5 cm 的圆形孔
算法选择	高斯烟羽模型
显示选项	结果显示中有英制单位或者公制单位 ^[13] , 本文选择公制单位

3.2 模拟环境参数确定

模拟时各环境参数如表 2 所示.

表 2 模拟环境参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
容积/m ³	300	大气稳定度	B
风向	南风(S)	云层覆盖度	5
风速/(m/s)	2.3	泄漏孔径/cm	5
温度/℃	23	地面粗糙度	开阔乡村
湿度/%	70	反转高度/m	0
工作压力/MPa	35		

4 氢气云爆炸影响因素的模拟分析

4.1 模拟情形设置

因氢气泄漏后发生氢气云爆炸在拥堵情况下的后果较为严重, 故在参数设置中把拥堵程度设为难以

通行.此外,由于影响氢气泄漏爆炸范围的因素众多,本文仅考虑大气稳定度、风速、温度和湿度这 4 个因素,模拟氢气在这 4 个因素影响下的泄漏爆炸威胁区域分布.点火时间和点火类型 2 类参数也是依此固定选为未知和火花、火焰点燃.模拟结果将根据爆炸产生的冲击波压强的大小划分致命、重度和轻微伤害区域并依次显示成红色、橙色和黄色.另外在选用表 2 所示数据对某一参数进行模拟和分析时,保持其余参数不变.

4.2 大气稳定度对氢气云爆炸威胁范围的影响

大气稳定度有关的参数包括时间、地点、风速、云层覆盖度等(此处风速与模拟情形设置的风速为同一参数),由于储罐地点是确定的,因此仅需考虑时间、风速和云层覆盖度对大气稳定度的影响.在其他环境参数不变的情况下,通过改变时间和云层覆盖度得到了不同大气稳定度下氢气云爆炸威胁范围的变化情况.大气稳定度相关数据如表 3 所示,其中大气稳定度由 A 到 F 依次增高.

表 3 大气稳定度相关参数

大气稳定度	时间	云层覆盖度
A	13:29	0
B	13:11	5
C	09:11	7
D	08:11	10
E	00:11	7
F	04:11	5

考虑风速为 2.3 m/s(此处为平均速率,下同),初始温度为 23 ℃,湿度为 70%,大气稳定度为表 3 内数据时泄漏爆炸情形.模拟结果分别为图 2 和图 3 所示.

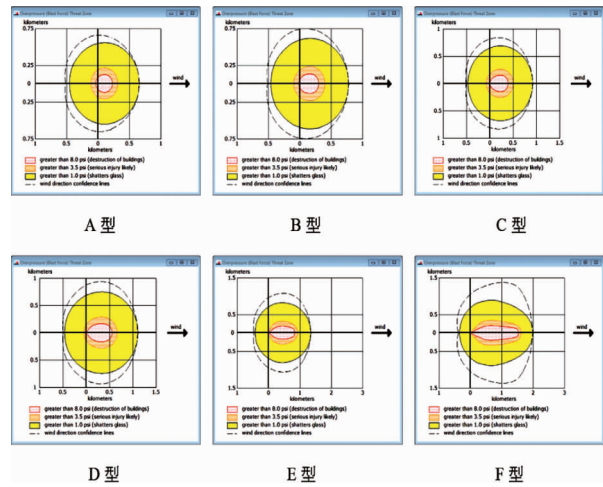


图 2 不同大气稳定度条件下氢气泄漏爆炸威胁区域

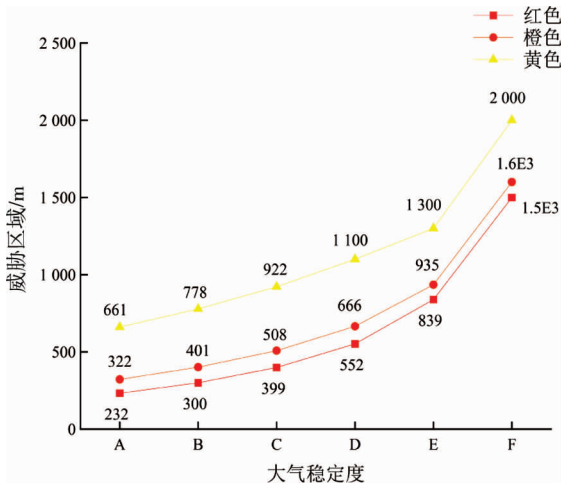


图 3 不同大气稳定度下各威胁区域范围变化图示

由图 2 和图 3 可以看出:大气稳定度从 A 增长到 F,其红色、橙色和黄色威胁区域分别从 232,322,661 m 增长到了 1 500,1 600,2 000 m,说明大气稳定度越高,氢气云爆炸威胁区域范围越大,同时也说明大气稳定度是影响高压储罐氢气泄漏爆炸威胁范围的重要因素之一.

而此市在仲夏及初秋出现不稳定性和稳定性天气的概率较大^[14],即危险概率也较大,所以在这些时间段应加大防控力度.

4.3 风速对氢气云爆炸威胁范围的影响

随着风速的变化,大气稳定度也会随之变化.不过为了研究风速对氢气云爆炸威胁范围的影响规律,当输入大气稳定度这一参数时,会点击软件中的 override 按钮将其修改为 B 类.进而考虑初始温度为 23 ℃,湿度为 70%,大气稳定度为 B 类,风速分别为 1.0,1.5,2.0,2.5,3.0,5.0,8.0,10.0,15.0 m/s 的泄漏爆炸情形.模拟结果分别为图 4 和图 5 所示.

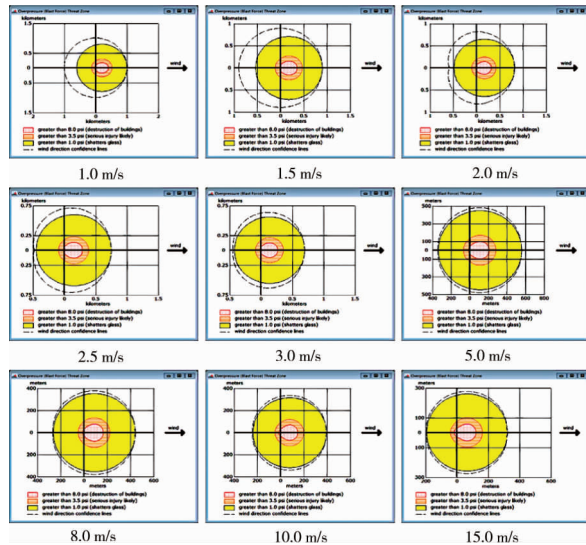


图4 不同风速下氢气泄漏爆炸威胁范围

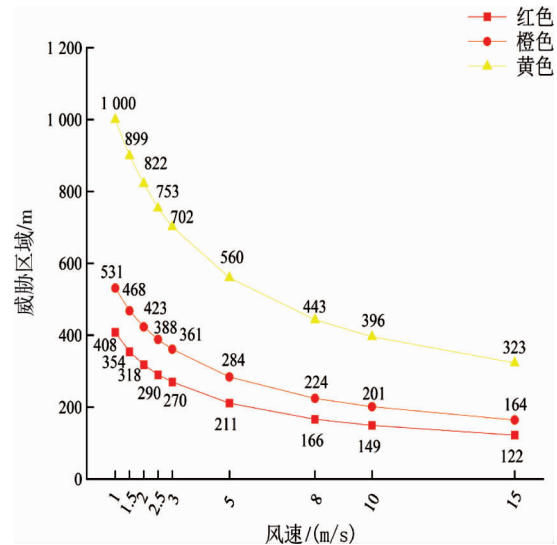


图5 不同风速下各威胁区域范围变化

由图4和图5可知:随着风速不断增加,氢气泄漏发生氢气云爆炸后的威胁区域呈明显下降趋势.而此市冬夏两季风多且大^[15],即在春秋两季氢气储罐危险性相对较大.具体的,风速从1 m/s增加到15 m/s,其红色、橙色和黄色威胁区域依次从408,531,1 000 m分别降到了122,164,323 m.因此,就数值降低大小可以判断出风速对各类威胁区域的影响程度:黄色>橙色>红色.

4.4 温度对氢气云爆炸威胁范围的影响

考虑湿度为70%,风速为2.3 m/s,大气稳定度为B类,温度分别为-10,0,10,15,20,25,30,35,40℃的泄漏爆炸情形.模拟结果分别为图6和图7所示.

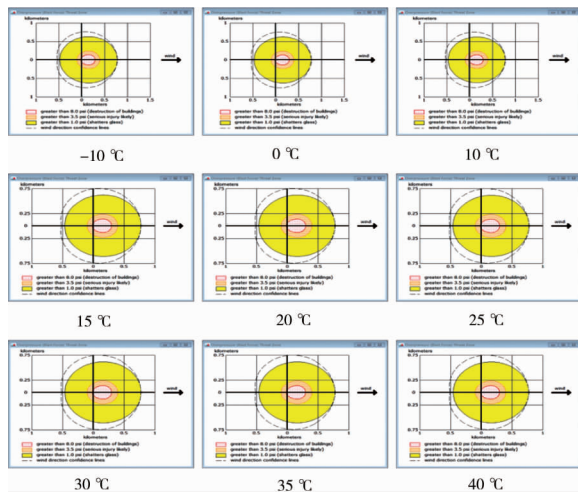


图6 不同温度下氢气泄漏爆炸威胁范围

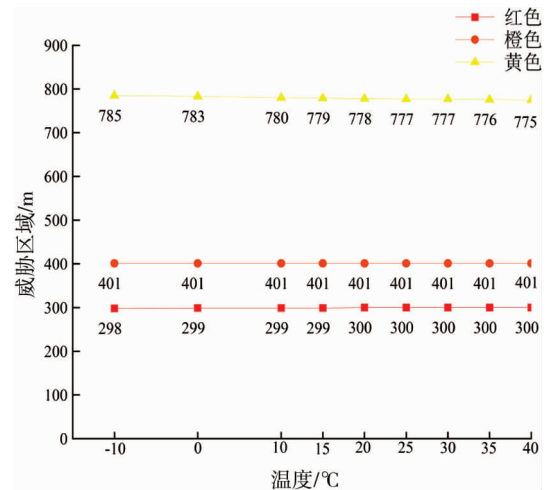


图7 不同温度下各威胁区域范围变化

由图6和图7可以看出:在其他因素不变的情况下,随着温度的升高,黄色威胁区域逐渐减小,橙色威胁区域不变,红色威胁区域则在温度增加到20℃后保持300 m不变.不过,图7中的变化曲线几乎为直线,说明温度对氢气云爆炸危险性影响较小.最后,虽然黄色威胁区域在逐渐减少,但红色威胁区域是爆炸危险性的主体,当温度升高至20℃后,其总体的危险性将会达到最大后近似不变,因此在夏季或高温天气时应加强安全监控.

4.5 湿度对氢气云爆炸威胁范围的影响

考虑初始温度为23℃,大气稳定度为B类,风速为2.3 m/s,湿度分别为30%,50%,60%,70%,75%,80%,85%,90%和99%的泄漏爆炸情形.模拟结果分别为图8和图9所示.

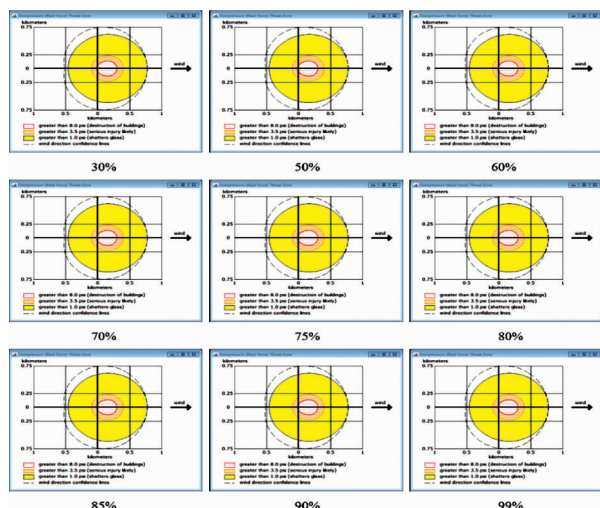


图 8 不同湿度下氢气泄漏爆炸威胁范围

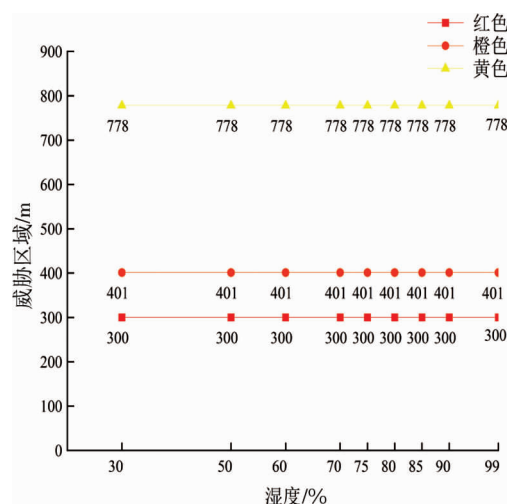


图9 不同湿度下各威胁区域范围变化

由图 8 和图 9 可以看出:湿度的增加并不会使威胁区域发生变化,不过,为进一步验证结论的准确性,将湿度调为 0%,100%分别进行模拟,模拟结果显示 3 种威胁区域依旧没发生变化,从而说明湿度对氢气云爆炸威胁范围无影响。

5 结论

1) 大气稳定性和风速对氢气云爆炸危险性有较大影响. 当其它因素不变时, 天气越稳定氢气云爆炸危险性越大, 风速越小氢气云爆炸危险性越大; 温度对氢气云爆炸危险性影响较小; 湿度这一因素不影响氢气云爆炸危险性.

2) 根据模拟结果,本地区人员应该在天气比较稳定的仲夏、初秋时节以及风速比较小的春秋两季加强对储罐安全的监管.

3) 根据模拟得到的各类威胁区域数值,可以在威胁区域边界设置应急救援队以及避难所,方便及时有效的对事故进行预防和控制.

参考文献:

- [1] 韩笑, 张兴华, 闫华光, 等. 全球氢能产业政策现状与前景展望[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(12): 27-34.
- [2] 郑津洋, 张俊峰, 陈霖新, 等. 氢安全研究现状[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(6): 144-152.
- [3] 张德勇. 氢气在化工装置中的安全使用与应急处理[J]. 石油化工安全环保技术, 2008, 24(2): 29-32.
- [4] 沈晓波, 章雪凝, 刘海峰. 高压氢气泄漏相关安全问题研究与进展[J]. 化工学报, 2021, 72(3): 1217-1229.
- [5] 张俊峰. 小型燃料电池车用低压储氢装置安全试验及泄漏爆炸模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [6] 徐平, 刘鹏飞, 刘延雷, 等. 高压储氢罐不同位置泄漏扩散的数值模拟研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(6): 921-926.
- [7] MAO X B, YING R S, YUAN Y P, et al. Simulation and analysis of hydrogen leakage and explosion behaviors in various compartments on a hydrogen fuel cell ship[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(9): 6857-6872.
- [8] EDELIA E M, WINKLER R, SENGUPTA D, et al. A computational fluid dynamics evaluation of unconfined hydrogen explosions in high pressure applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(33): 16411-16420.
- [9] 程玉龙, 王小东, 马腾博, 等. ALOHA 软件在化学应急救援中的应用[J]. 职业卫生与应急救援, 2020, 38(1): 70-75.
- [10] 张丽. 室内燃气泄漏扩散及燃烧爆炸的数值模拟[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [11] 郭晓晓, 蔡治勇, 袁成天. TNT 模型对 LNG 储罐蒸气云爆炸模拟分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2013, 15(S1): 9-11.
- [12] 李虎, 戴晓威, 何宁. 蒸气云爆炸事故后果模型对比分析研究[J]. 华北科技学院学报, 2019, 16(2): 61-66.
- [13] 焦伟婷. 基于 ALOHA 的危险品运输风险评估及应急体系研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [14] 徐大海, 钜铁林. 我国大气稳定度频率的分布[J]. 环境科学学报, 1983, 3(1): 52-61.
- [15] 沈竞, 彭王敏子, 姚琳, 等. 江西省最大风速的分布研究[J]. 江西科学, 2018, 36(6): 1000-1003.