

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230317007

储氢温度对加氢站泄漏爆炸事故的影响研究*

戴君豪, 杨石刚, 方 秦, 杨 亚

(陆军工程大学国防工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 通过降低氢气的温度, 可以实现更高密度的氢气储存, 进而有效提升存储及运输的效率。为探究储氢温度对加氢站泄漏爆炸事故的影响规律, 利用FLACS软件对加氢站内长管拖车在不同储氢温度条件下(50、100、200与300 K)发生泄漏后的氢气扩散和爆炸事故进行分析。研究表明: 随着储氢温度的降低, 高压氢气射流撞击防爆墙后可燃气云达到稳定的时间、扩散范围和冻伤区域均逐渐增大, 而最大爆炸超压和爆炸危险距离则呈现出先增大后减小的趋势; 储氢温度为50 K时的轻微冻伤距离比储氢温度100 K和200 K时分别增加了近1倍和7倍, 严重冻伤距离也最大; 储氢温度为100 K时泄漏气云爆炸产生的超压峰值比常温氢气爆炸提高了近3倍, 危险区域也最大; 储氢温度为200 K时, 达到爆炸超压峰值的时间最快, 储氢温度为50 K时最慢。

关键词: 氢气; 低温; 泄漏; 爆炸; 数值模拟

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0293-08

Study on the Influence of Hydrogen Storage Temperature on Leakage and Explosion Incidents at Hydrogen Refueling Stations

DAI Junhao, YANG Shigang, FANG Qin, YANG Ya

(School of National Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: Lowering the temperature of hydrogen allows for higher density storage, effectively enhancing storage and transportation efficiency. To investigate the influence of hydrogen storage temperature on the risk of leakage and explosion incidents at hydrogen refueling stations, FLACS software was used to analyze the diffusion and explosion of hydrogen following a leakage from a tube trailer within the station under different storage temperatures (50 K, 100 K, 200 K, and 300 K). The study results indicated that with the decrease in hydrogen storage temperature, the time for the combustible gas cloud to stabilize, its diffusion range, and the cryogenic burn areas all increased after a high-pressure hydrogen jet hit the explosion-proof wall. Meanwhile, the maximum explosion overpressure and explosion hazard distance initially increased and then decreased. The distance for minor cryogenic burns at a storage temperature of 50 K was nearly twice that at 100 K and seven times that at 200 K, with severe cryogenic burns covering the largest areas. The peak overpressure from cloud explosions at 100 K was nearly triple that of a standard-temperature hydrogen explosion, with the largest hazard area. At a storage temperature of 200 K, the time to reach peak explosion overpressure was the shortest, whereas at 50 K, it was the longest.

Keywords: hydrogen; cryogenic; leakage; explosion; numerical simulation

* 收稿日期: 2023-03-17; 修回日期: 2023-08-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020TFB20103300)、江苏省自然科学基金项目(BK20180081)资助

作者简介: 戴君豪(1996—), 男, 硕士研究生。主要从事高压氢气泄漏与爆炸安全防护研究。E-mail: daijhlgd@126.com

通讯作者: 杨石刚(1985—), 男, 副教授, 博士。主要从事结构抗爆和防灾减灾研究。E-mail: youngshg@126.com

0 引言

目前,加氢站内氢气主要以常温高压氢气为主^[1],快速充装会导致储氢瓶内氢气温度显著上升,氢气密度也随之降低。通过降低储氢温度可以在较低的储存压力下达到更高的储氢密度并且有效避免“温升现象”^[2],显著提升加氢速度和效率。为揭示储氢温度对加氢站泄漏爆炸事故的影响规律,有必要对不同储氢温度下氢气的泄漏扩散特性以及爆炸灾害效应进行对比分析。

影响氢气泄漏扩散和爆炸的因素主要包括环境条件^[3-8]、泄漏条件^[9-12]和点火源位置^[13],国内外学者针对这些影响因素开展了广泛研究。在环境条件方面,主要集中于对风向^[3-5]、风速^[5-6]和障碍物^[7-8]等的研究;而在泄漏条件方面,主要集中于对泄漏孔直径^[9-10]、方向^[10-11]、储氢容器压力^[9-11]和容积^[12]等的研究,只有少数针对储氢温度的研究^[14-17]。H.Kobayashi等^[14-15]开展了开敞空间下低温氢气泄漏扩散实验和爆炸实验,结果表明:氢气泄漏速率和火焰长度会随着储氢温度的降低而增加。L.Gong等^[16]通过实验分析了储氢温度和泄漏孔径对开敞空间下低温高压氢气泄漏扩散的影响,结果表明:氢气浓度随着储氢温度的降低和泄漏孔径的增加而增加。Q.Ba等^[17]对常温和低温高压氢气射流进行了数值模拟,结果表明:低温高压氢气射流的中心线质量分数和速度衰减速率与常温高压射流的衰减速率相似。综上所述,目前关于储氢温度的研究多局限于开敞空间,对于在加氢站等受限空间下高压氢气泄漏扩散特征和爆炸冲击波传播特征的差异性尚不清晰,关于储氢温度对加氢站氢气泄漏爆炸事故的影响也有待进一步研究。

本文基于行业相关标准和某在营加氢站布局,利用FLACS软件对不同储氢温度下高压氢气泄漏后的扩散、爆炸事故过程进行数值模拟,并根据事故伤害准则对其后果进行量化分析,以期为未来加氢站建设、改造以及事故预防工作提供参考。

1 仿真模型建立

1.1 数值模型

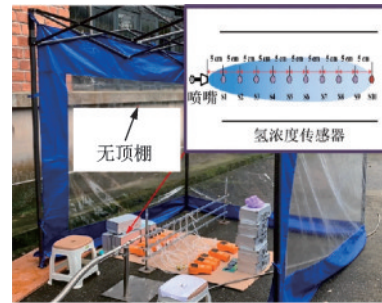
FLACS软件是由挪威Gexcon公司开发的三维气体爆炸模拟软件,其氢气模块经过大量实验数据

验证^[18-20],能够准确预测氢气扩散、火灾和爆炸,被广泛应用于国际氢安全领域。FLACS软件使用有限体积法在三维笛卡尔网格上求解可压缩守恒方程。泄漏气体的扩散过程通过求解物质的质量、动量、焓和化学组分的守恒方程来进行描述。各守恒方程可以统一表达为^[21]:

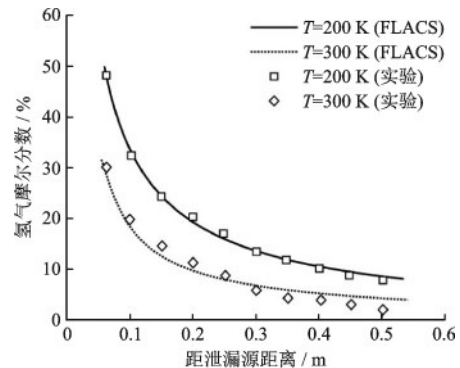
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j\rho\varphi) - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\varphi\frac{\partial\varphi}{\partial x_j}\right) = S_\varphi \quad (1)$$

式中, φ 为通用求解变量; ρ 为气体密度; S_φ 为源项; t 为时间; u_j 代表*i*方向上的速度矢量; x_j 代表在*j*方向的坐标位置; Γ_φ 为扩散系数。

为验证FLACS软件对不同储氢温度下氢气泄漏扩散过程数值计算的准确性,本文使用L.Gong等^[16]所做实验进行验证,实验装置如图1(a)所示。泄漏实验的储氢压力为0.5 MPa,泄漏孔径为2 mm,数值计算结果和实验结果对比如图1(b)所示。此外,还使用J.Daubesch等^[20]所做实验验证上述数值模型对泄漏爆炸过程数值计算的准确性,实验装置如图2(a)所示。储氢压力为4 MPa,泄漏孔径为12 mm,在距离泄漏源1.8 m处点燃氢气射流,在距离泄漏源出口0.2 m处布置压力监测点记录爆炸发生后的压力峰值,监测点实验数据与数值计算结果对比如图2(b)所示。从图1(b)



(a) 试验装置^[16]



(b) 实验结果与模拟结果对比

图1 氢气泄漏模型验证

Fig.1 Verification of hydrogen leakage model

和图2(b)可以看出,数值计算结果与实验结果吻合较好。

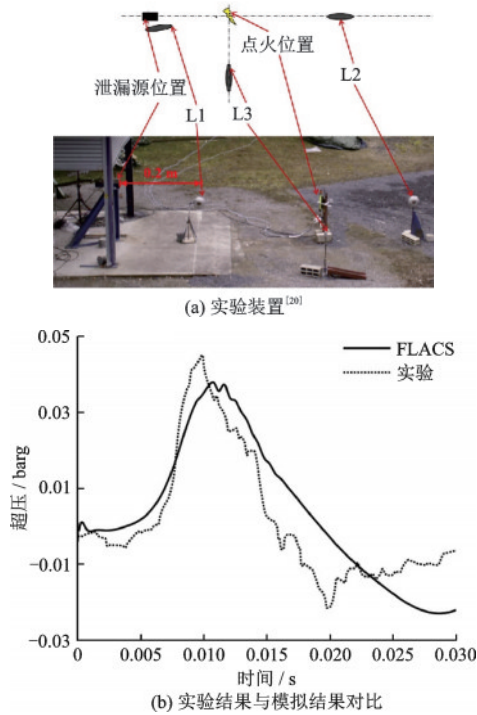


图2 氢气爆炸模型验证

Fig.2 Verification of hydrogen explosion model

1.2 几何模型

以某在营加氢站为基础建立1:1三维几何模型,如图3所示。选取X轴正方向为东,Y轴正方向为北,该站东西长70 m,南北长50 m,可以分为两个区域:储氢区和加注区。氢气由长管拖车从气源处运至储氢区,通过卸气柱将氢气从长管拖车内卸载,并通过压缩机输送至低温储氢瓶组。车辆在加

注区加氢时,加氢机从储氢罐中取气,然后充装到燃料电池汽车的车载储氢瓶中。氢气加注的各环节均可能发生泄漏,为了保证安全,加氢站储氢区内各设备之间防火间距均满足规范要求^[22],如图3(b)所示。

1.3 参数设置

由于长管拖车储存压力大,充、放气频繁,工作时软管剧烈振动容易发生爆裂,是重大危险源。例如,2021年8月4日,沈阳一企业储氢长管拖车软管爆裂,发生爆燃。因此本文将泄漏源设置为长管拖车卸气孔处,坐标为(36.75,10.4,1.6),泄漏方向为-Y。点火源设在防爆墙内侧,坐标为(36.75,1.2,1.6)。在防爆墙内侧设置监测点M1(30.75,1.4,1.6),用于分析储氢温度对可燃气云扩散浓度的影响;在长管拖车和储氢罐周围分别设置监测点M2(28.2,7.2,1.6)和M3(34.7,10.2,1.6),用于分析储氢温度对可燃气云爆炸超压的影响,如图3(b)所示。根据Y.X.Zhao等^[23]和M.He等^[24]对低温高压氢气储氢参数的建议,泄漏孔径设置为15 mm,储氢温度分别选取50、100、200和300 K进行研究。根据《作业场所环境气体检测报警仪通用技术要求》^[25]对可燃气体检测仪响应时间的规定,将泄漏持续时间设置为30 s。大气温度设置为15℃,不考虑风向和风速的影响。泄漏扩散模拟工况见表1。

1.4 网格划分及敏感性分析

分别使用三种网格尺寸对加氢站泄漏后的氢气扩散(0.25、0.5和1 m)和爆炸(0.15、0.175和0.2 m)进行数值模拟计算。储氢温度为300 K时,

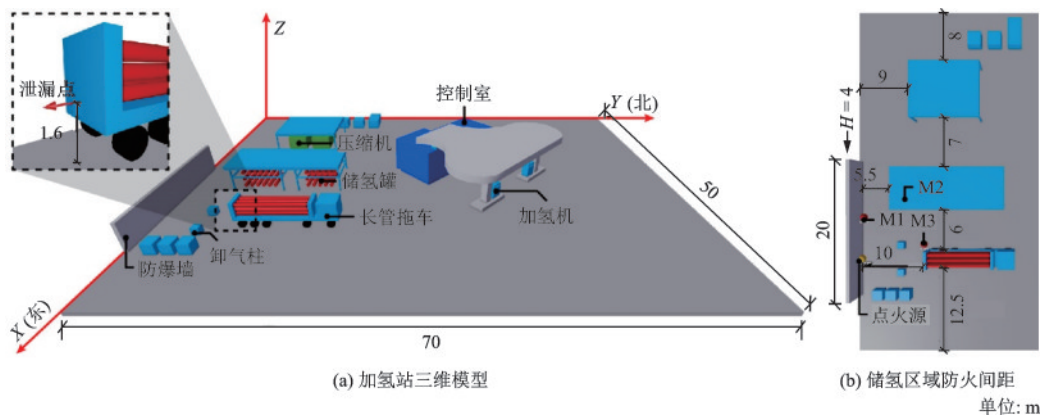


图3 加氢站物理模型

Fig.3 Physical model of hydrogen refueling station

表 1 泄漏扩散模拟工况

Table 1 Simulation conditions of hydrogen leakage and diffusion

工况	储氢温度/K	泄漏孔径/mm	储氢压力/MPa
1	50		
2	100		
3	200	15	20
4	300		

监测点 M1 处的氢气浓度和监测点 M2 处的爆炸超压如图 4 所示。可以看出,随着网格尺寸的减小,网格数量的进一步增加对模拟结果的影响较小。综合考虑计算精度和计算效率,泄漏扩散模型核心区域范围网格尺寸取 0.5 m,爆炸模型核心区域网格尺寸为 0.175 m。

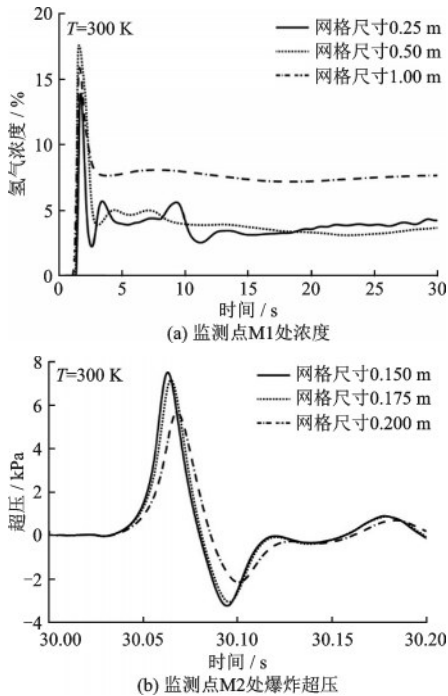


图 4 网格尺寸对计算结果的影响

Fig. 4 Influence of mesh sizes on calculation results

对于泄漏和扩散模拟,计算区域为 80 m × 125 m × 50 m,将整个计算区域分为核心区域和非核心区域。对核心区域采用均匀网格,并对泄漏孔附近进行局部加密。非核心区域将核心区域网格按照比例扩大的形式进行延伸,以减少计算时间;对于爆炸模拟,计算区域为 90 m × 90 m × 30 m,计算域内均采用均匀网格。网格划分如图 5 所示。

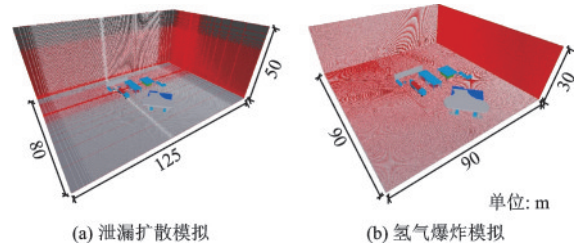


图 5 网格划分

Fig. 5 Grid division

2 泄漏气云扩散模拟分析

2.1 氢气泄漏扩散特性

高压氢气发生泄漏后产生高度欠膨胀射流,卷吸周围的空气并与其混合形成可燃气云。受防爆墙阻挡后,射流扩散路径发生明显偏转。由于防爆墙上方的流体速度大于周围空气流速,压强减小,四周气流向该处汇聚,运动轨迹受到地转偏向力的作用,发生偏转,形成漩涡状,如图 6 所示。

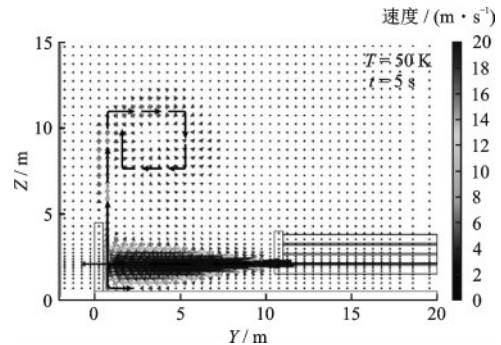


图 6 高压氢气泄漏的速度矢量图

Fig.6 Velocity vector diagram of high pressure hydrogen leakage

图 7 为不同储氢温度下氢气泄漏扩散过程对比。可以看出,随着储氢温度的降低,卷吸的气云尺寸也越来越大,气云内部浓度也越高。此外,氢气温度降低会使空气中的水蒸气凝结,形成密度大于空气的重气云,并在重力作用下发生沉降,可燃气云达到稳定阶段所需的时间也随之上升。总体上,储氢温度的降低导致了可燃气云在泄漏源上方堆积,形成更大的可燃气云浓度和范围,危险性更大。

2.2 储氢温度对可燃气云扩散范围的影响

当高压氢气射流受到防爆墙阻碍时,可燃气云扩散路径开始沿墙的两侧与地面扩散,且防爆墙内侧气云浓度较高。泄漏终止时刻的可燃气云的最大长度、最大宽度和最大高度如图 8 所示。

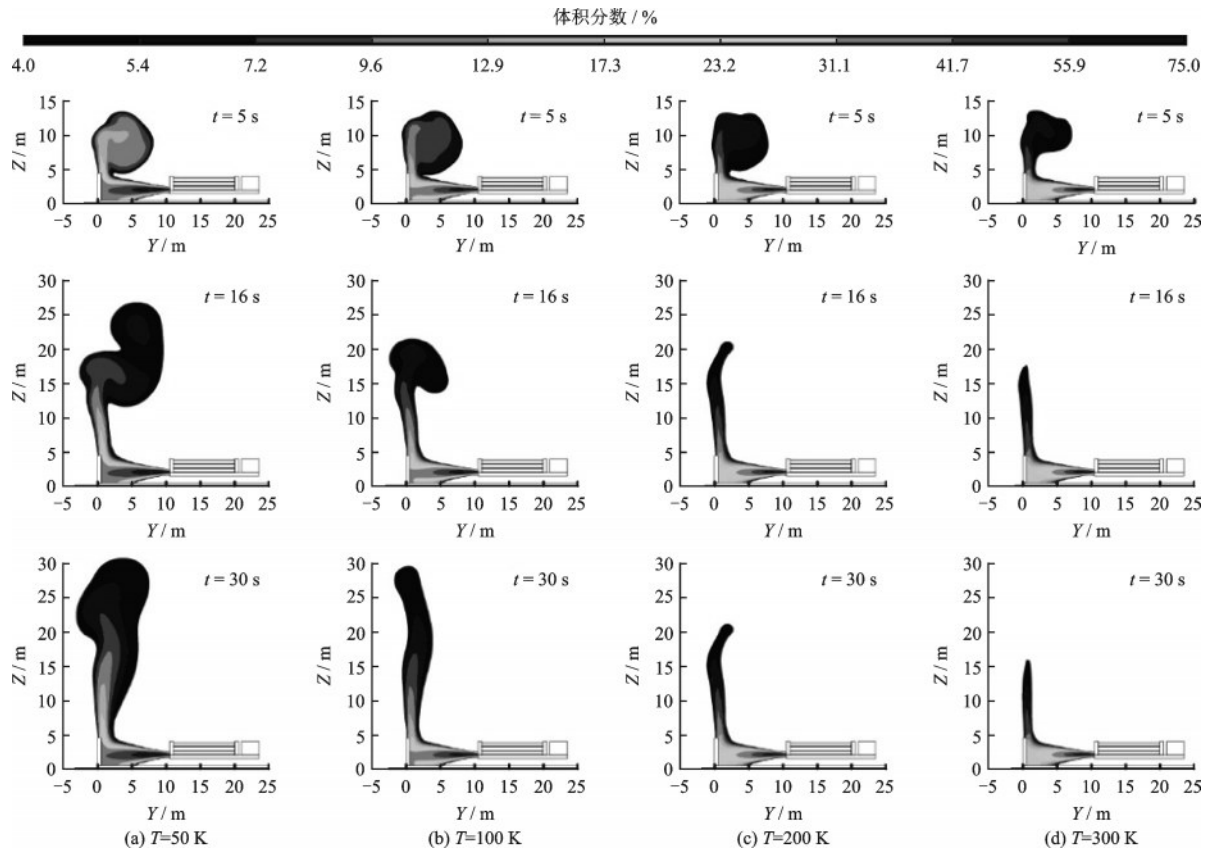


图7 不同储氢温度下氢气泄漏扩散过程对比

Fig.7 Comparison of hydrogen leakage and diffusion processes at different hydrogen storage temperatures

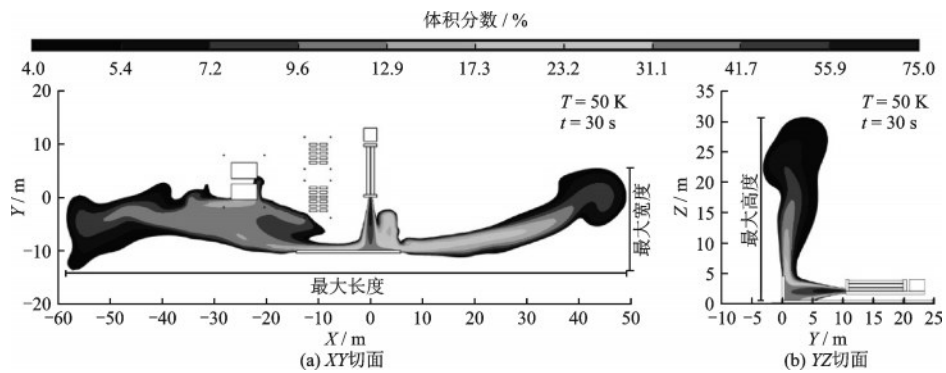


图8 可燃气云扩散体积分数分布

Fig. 8 Volume fraction distributions of flammable vapor diffusion

不同储氢温度下可燃气云的扩散范围见表2。可以看出,可燃气云扩散范围与储氢温度的大小成

表2 不同储氢温度下可燃气云的扩散范围

Table 2 Diffusion ranges of flammable gas clouds at different hydrogen storage temperatures

储氢温度/K	最大长度/m	最大宽度/m	最大高度/m
50	107.7	18.9	30.2
100	93.5	17.7	29.1
200	84.2	14.7	19.9
300	76.7	13.2	15.4

反比。这是因为在相同压力下,氢气温度越低,气体分子动能越小,导致气体分子间距变小,氢气密度增加,泄漏速率也随之增大。泄漏速率越大,射流喷射速度越大,与周围静止空气间较大的速度差会使得卷吸作用更强烈,可燃气云扩散范围越大,危险性越强。反之,危险性越小。

2.2 储氢温度对可燃气云扩散范围的影响

随着储氢温度的降低,一旦发生泄漏,会形成低温气云,对泄漏位置周围人员产生冻伤伤害。当

身体局部组织温度低于 $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (270 K)时就会发生冻结性冷伤^[26];温度低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (233 K)时会导致1%的死亡概率^[27]。因此,本文分别以 $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为轻微冻伤和严重冻伤的伤害阈值。

图9为泄漏结束时不同储氢温度下冻伤危险区域对比,可以看出冻伤危险区域随着储氢温度的降低而增大。当储氢温度为50 K时,X方向轻微冻伤距离最大(达77.6 m),比储氢温度100 K和200 K时的轻微冻伤距离分别增加了89.2%(近1倍)和668.3%(近7倍),会对压缩机附近工作人员造成伤害(图9(a))。从图9(b)可以看出,严重冻伤危险区域主要沿射流轴线两侧分布,储氢温度为200 K时,Y方向严重冻伤距离为4.4 m,小于防爆墙与长管拖车之间的防火间距,形状近似于椭圆形。随着储氢温度的降低,需要卷吸更多的空气来进行热量和动量交换,严重冻伤区域面积也随之增大。当储氢温度为50 K时,X方向严重冻伤危险距离最大(达12.6 m)。因此,在泄漏事故发生后救援人员应从泄漏孔两侧封堵泄漏源,避免被低温射流直接冲击。

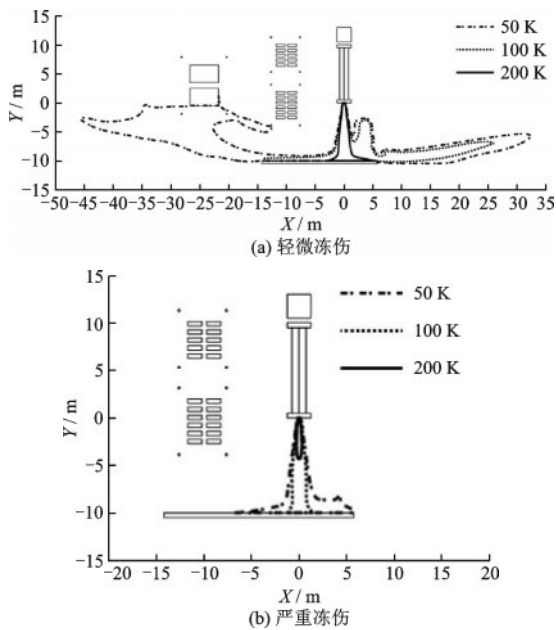


图9 不同储氢温度下冻伤危险区域对比
Fig. 9 Comparison of cryogenic burn hazard areas at different hydrogen storage temperatures

3 泄漏气云爆炸模拟分析

3.1 氢气泄漏爆炸特性

图10为不同储氢温度下等效化学计量气云体积随时间变化的趋势。可以看出,随着储氢温度的

降低,等效化学计量气云体积也越大,达到稳定状态所需的时间也越多。这是因为随着储氢温度的降低,泄漏的氢气温度与周围空气温度温差增大,需要卷吸的空气量更多。为评估最极端的爆炸事故后果,本文以泄漏30 s时的可燃气体云体积开展氢气爆炸数值模拟。

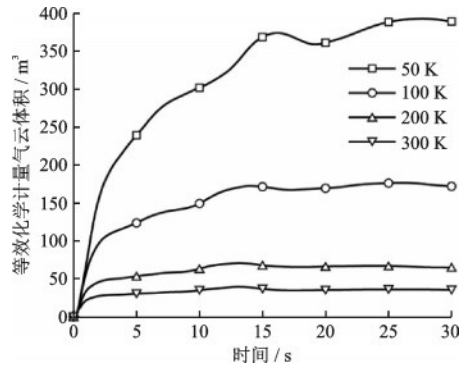


图10 等效化学计量气云体积时程曲线
Fig. 10 Volume-time curves of equivalent stoichiometric flammable gas clouds

目前,国际上关于爆炸超压对目标的伤害准则还没有统一的规定,为保守评估,本文参考化工行业和安全工程领域的相关标准和规范^[28-30],分别以7 kPa和50 kPa作为人员轻伤和致死的超压伤害阈值;为了避免加氢站发生重大事故时储氢瓶组罩棚发生倒塌引发二次伤害,以20.7 kPa作为钢结构倒塌的超压伤害阈值(见表3)。

表3 爆炸超压伤害准则

Table 3 Explosion overpressure damage level			
目标	冲击波破坏效应	伤害类型	超压阈值/kPa
人	1%致死概率	轻伤	7 ^[28]
	内脏严重挫伤	致死	50 ^[29]
钢结构	钢面板建筑破坏	倒塌	20.7 ^[30]

图11和表4分别为不同储氢温度下氢气爆炸的最大超压分布和危险距离。可以看出,常温氢气泄漏后点燃产生的爆炸强度较弱,储氢瓶组均在倒塌距离之外,不存在致死区域,轻伤距离最大为10.4 m,主要分布在防爆墙与长管拖车之间的区域(图11(d))。这是因为常温下容器内氢气的密度远低于低温下氢气的密度,相同压力和孔径下泄漏所产生的可燃气体云浓度较低。

相比于常温氢气,低温氢气具有更大的可燃气体云范围和浓度,但爆炸中的危险区域并没有随着储

氢温度的降低而一直增大。这是因为当点火源处浓度超过临界值时,燃烧剧烈程度降低^[31],爆炸超压峰值也随之降低,对应的危险区域范围也随之减小。当储氢温度为100 K时气云爆炸产生的超压值最高(52.4 kPa),轻伤距离达28.6 m,同时也产生了唯一的致死区域,最大致死距离为5.4 m(图11(b)),部分储氢瓶组也在倒塌距离之内,可能会引发二次伤害,事故危险性最高。

表4 不同储氢温度下氢气爆炸的危险距离

Table 4 Hazard distance of hydrogen explosion at different hydrogen storage temperatures

储氢温度/K	轻伤距离/m	致死距离/m	倒塌距离/m
50	25.1	—	9.4
100	28.6	5.4	14.3
200	20.2	—	9.2
300	10.4	—	2.9

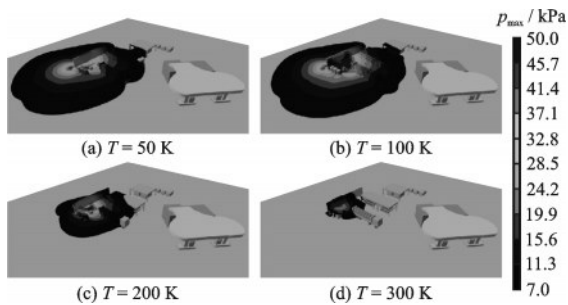


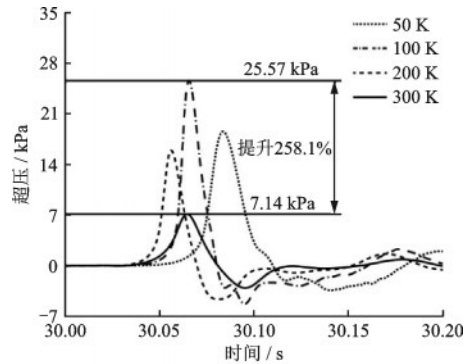
图11 不同储氢温度下爆炸压力场分布

Fig. 11 Explosion pressure field distributions at different hydrogen storage temperatures

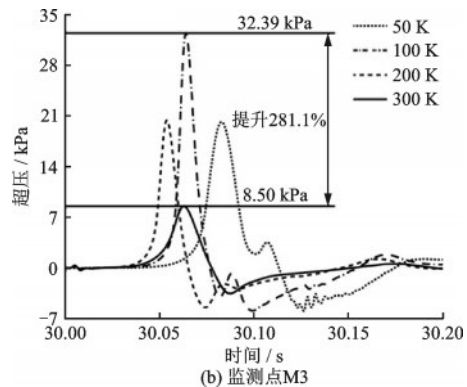
3.2 储氢温度对爆炸超压的影响

不同储氢温度下监测点1、2的气云爆炸超压峰值随时间变化如图12所示。由于可燃气云在扩散过程不断卷吸周围空气,气云内部形成了浓度梯度,发生爆炸后火焰发展不稳定,造成了压力的震荡。当储氢温度为100 K时,监测点处气云爆炸产生的超压峰值最高,监测点1和监测点2的最大爆炸超压分别为25.57和32.39 kPa,相比于常温氢气分别上升了258.1%和281.1%(近3倍),这与M. Kuznetsov等^[32]的研究结果相同。此时最大爆炸超压虽未达到致死阈值,但仍会对长管拖车和储氢瓶组附近人员的生命安全造成一定威胁。另外,从图中可以看出,达到最大爆炸超压的时间并不随着储氢温度的降低而提前。储氢温度为200 K时,达到最大爆炸超压的时间最快,储氢温度为100和300 K

时次之,储氢温度为50 K时最慢。这是因为当点火源处浓度低于临界值时,达到爆炸超压峰值的时间随着氢气浓度的增加而提前;当浓度大于临界值时,达到爆炸超压峰值的时间随着氢气浓度的增加而滞后^[30]。



(a) 监测点M2



(b) 监测点M3

图12 不同储氢温度对爆炸超压的影响

Fig. 12 Influence of different hydrogen storage temperatures on explosion overpressure

4 结论

根据某在营加氢站布局,利用计算流体动力学软件FLACS分析了储氢温度对加氢站氢气泄漏爆炸事故后果的影响规律。结论如下:

(1)随着储氢温度的降低,防爆墙上方的沉降气云尺寸越大,气云内部浓度也越高,达到稳定状态所需时间也越长,可燃气云扩散范围也随之增大。

(2)冻伤危险区域随着储氢温度的降低而增大。储氢温度为50 K时的轻微冻伤距离,比储氢温度100和200 K时分别增加了近1倍和7倍;储氢温度为50 K时严重冻伤危险距离最大。

(3)最大爆炸超压和危险距离随储氢温度的降

低均呈现出先增大后减小的趋势,储氢温度为100 K时气云爆炸产生的超压值最高、破坏性最强,最大爆炸超压相比于常温氢气爆炸提高了近3倍。

(4)达到最大爆炸超压的时间并不随着储氢温度的降低而提前。储氢温度为200 K时,达到最大爆炸超压的时间最快,储氢温度为100和300 K时次之,储氢温度为50 K时最慢。

参考文献:

- [1] Apostolou D, Xydis G. A literature review on hydrogen refueling stations and infrastructure. Current status and future prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113:109292.
- [2] Aceves S M, Petitpas G, Espinosa-Loza F, et al. Safe, long range, inexpensive and rapidly refuelable hydrogen vehicles with cryogenic pressure vessels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(5): 2480-2489.
- [3] Qian J Y, Li X J, Gao Z X, et al. A numerical study of hydrogen leakage and diffusion in a hydrogen refueling station[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(28):14428-14439.
- [4] Li X J, Xu Y X, Li X, et al. Effect of wind condition on unintended hydrogen release in a hydrogen refueling station[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(7):5537-5547.
- [5] Liang Y, Pan X, Zhang C, et al. The simulation and analysis of leakage and explosion at a renewable hydrogen refueling station[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(40):22608-22619.
- [6] Yuan W, Li J, Zhang R, et al. Numerical investigation of the leakage and explosion scenarios in China's first liquid hydrogen refueling station[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(43):18786-18798.
- [7] 郑津洋,刘延雷,徐平,等.障碍物对高压储氢罐泄漏扩散影响的数值模拟[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2008, 42(12):2177-2180.
Zheng J Y, Liu Y L, Xu P, et al. Numerical simulation of obstacle influence on leakage and diffusion of hydrogen due to high-pressure storage tank failure[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2008, 42(12):2177-2180.(in Chinese)
- [8] Madhav Rao V C, Sathish P, Wen J X. Effects of congestion and confining walls on turbulent deflagrations in a hydrogen storage facility-part 2: Numerical study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(32):15593-15621.
- [9] Park B, Kim Y, Paik S, et al. Numerical and experimental analysis of jet release and jet flame length for qualitative risk analysis at hydrogen refueling station[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 155:145-154.
- [10] Kim E, Park J, Cho J H, et al. Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(3):1737-1743.
- [11] Sun R, Pu L, Yu H, et al. Modeling the diffusion of flammable hydrogen cloud under different liquid hydrogen leakage conditions in a hydrogen refueling station[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(61):25849-25863.
- [12] Qian J Y, Li X J, Gao Z X, et al. A numerical study of unintended hydrogen release in a hydrogen refueling station[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(38):20142-20152.
- [13] Shirvill L C, Roberts T A, Royle M, et al. Effects of congestion and confining walls on turbulent deflagrations in a hydrogen storage facility-part 1: Experimental study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(15):7618-7642.
- [14] Kobayashi H, Naruo Y, Maru Y, et al. Experiment of cryo-compressed (90-MPa) hydrogen leakage diffusion[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(37):17928-17937.
- [15] Kobayashi H, Muto D, Daimon Y, et al. Experimental study on cryo-compressed hydrogen ignition and flame[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(7):5098-5109.
- [16] Gong L, Yang S, Han Y, et al. Experimental investigation on the dispersion characteristics and concentration distribution of unignited low-temperature hydrogen release[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 160:676-682.
- [17] Ba Q, He Q, Zhou B, et al. Modeling of cryogenic hydrogen releases[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(55):31315-31326.
- [18] Middha P, Richard M, Arntzen B J. Validation of CFD modeling of LH2 spread and evaporation against large-scale spill experiments[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(3):2620-2627.
- [19] Richard M, Hansen O R, Middha P, et al. CFD computations of liquid hydrogen releases[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(22):17380-17389.

(本文编辑:赵霞)

(下转第371页)