

液氢生产与储运系统安全性研究综述

赵 晨 (中共长治市委政法委员会社会治安综合治理中心, 山西 长治 046000)

王 强 (北京劳动保障职业学院, 北京 100000)

摘 要: 基于液氢危险性, 对液氢生产与储运系统安全性国内外研究现状进行全面的综述。从理论研究、专利技术、标准规范等 3 个方面系统梳理和综述国内外研究成果, 评述和总结得出液氢安全性研究成果主要涉及事故机理、扩散模型、后果模拟、安全检测等方面, 指出液氢泄漏和扩散各类模型求解方法, 提出液氢生产与储运系统安全性研究的可行性和必要性。

关键词: 液氢; 事故机理; 扩散模型; 后果模拟; 安全性

1 引言

液氢商业应用在我国尚处起步阶段, 开展安全预警和完整性研究, 掌握大规模液氢的泄漏扩散机制、制定应急预案、划定紧急疏散区域、评估事故危害后果等都有非常重要的现实意义。

通过开展液氢生产与储运系统安全性国内外研究现状调研, 为辨识液氢生产与储运系统危险源及泄漏爆炸事故可信事件, 划定安全区域, 指导制定应急预案及安全布置等研究奠定基础。

2 液氢危险性分析

氢元素是宇宙中最轻且最丰富的元素, 质量分数约占 75%。氢气属于二次能源, 可通过石油热裂解、天然气重整、煤气化、电解水等方法制备。常温常压下氢气是一种无毒无味、没有颜色的气体。

因氢具有能量密度高、无二次污染、原料来源广泛等优点, 目前已经广泛应用于航空航天领域, 且在燃料电池、氢能汽车等领域展现出良好的应用前景。除用作燃料, 液氢还可以用于超导体等的冷却。然而, 液氢的低温特性、泄漏易扩散、爆燃爆轰、窒息是其主要危险特性。操作失误、材料失效、设计缺陷、部件异常或失灵, 以及外来的碰撞和冲击等, 均可引起液氢储罐或管路等的破裂失效, 导致液氢泄漏, 造成冻伤、窒息、材料氢脆、火灾爆炸事故。

安全性是液氢应用和大规模商业化推广的重要前提之一, 并在世界范围内引起了广泛的关注。

3 国外研究现状

3.1 研究机构

美国、日本、欧盟对氢能源领域的研究起步较早, 并成立了专门的研究机构开展液氢安全实验研究:

①美国矿业局和美国内政部首先开展了液氢泛滥

实验。实验研究了 0.5~7.4L 的液氢泄漏后, 低温氢气与周围空气的混合规律。实验发现, 初期液氢会迅速蒸发, 进而与空气混合形成不均匀的混合物, 且可燃云团与可视云团的范围不同。同时, 研究人员在实验中点燃了氢气云团, 以评估云团燃烧带来的危害。当点燃液氢上部的氢气云团时, 产生了一股迅速燃烧的火焰; 而点燃泛滥区域上方的云团时, 生成的火焰尺寸与泛滥体积、泛滥速率、表面形状、点燃位置和点燃时间密切相关;

②美国国家航空航天局 (NASA) 在 White sands 实验基地进行了大规模液氢泛滥实验 (液氢泄漏量为 5.1m^3 , 时间约为 35s), 研究由大量液氢泛滥引起的可燃蒸气云的形成和扩散规律, 包括液相扩散和氢气云团形成速率、氢气云团上升速率、氢气云团扩散出爆炸极限浓度等。NASA 实验发现, 液氢排放动力学与可视氢气云团的外形和演化之间密切相关, 当液氢排放率增加时, 会生成更高上升速率的羽流。4% 平均氢气浓度通常非常接近可视云的边界, 但浓度有剧烈波动。近场中氢气云的扩散机制为膨胀和浮力, 远场中羽流扩散受大气湍流控制。地面附近的气云可运动到距离泄漏源下风向 50~100m 处;

③德国材料监测协会 (BAM) 进行了建筑物间的液氢倾倒实验, 研究了液池扩散和蒸发特性, 以及氢气云团形成和扩散规律。实验结果表明, 由于实验当天的空气湿度非常大, 液氢附近的水汽凝结现象非常明显, 水蒸气云的体积比可燃气体混合物的体积要大得多; 气云很快上升并消失; 水面上液池半径约为 0.6m, 铝表面上超过 1m, 且水表面上有冰生成。此外, 进行了液化石油气的对比实验, 表明液氢的危害范围不会超过常用的化石燃料;

④英国健康和实验室(HSL)进行了液氢罐车运输管破裂失效状况下的液氢泛滥实验,且实验中将气云点燃^[1]。液氢泛滥速率为60L/min。研究了不点燃云团情况下的氢气扩散、地面液池形成、大气扩散规律,不同存储条件下泛滥行为,以及点火后的火焰速度、热辐射和声压。实验中在地面观察到固态沉积物;点火开始后,空气中先发出低沉的响声,然后火焰开始蹿升,火焰的上升速度大约为30m/s。实验结果表明:将液氢释放到混凝土地面时,会因液氢的蒸发而出现过热现象(16K);可燃氢气云团扩散到泄漏源下风向至少9m处。

3.2 理论研究方面

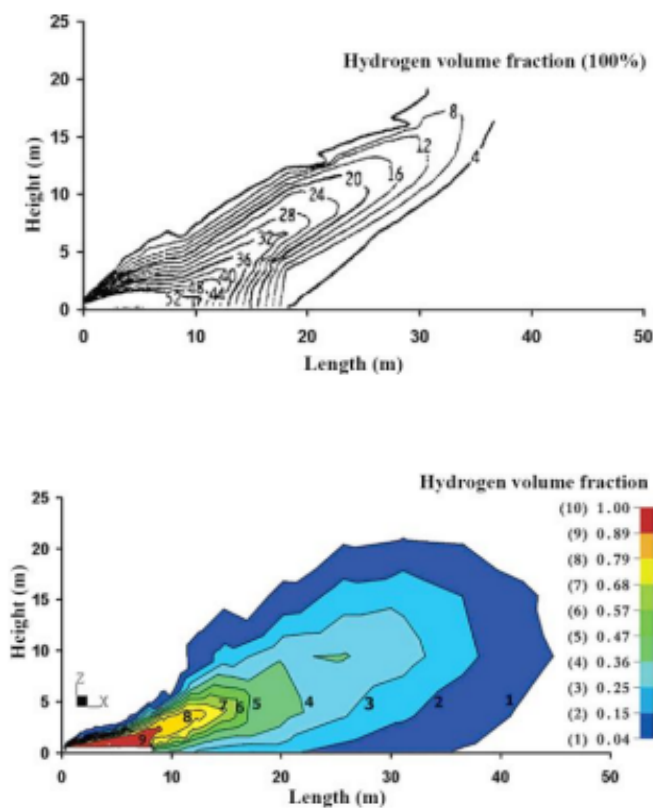


图1 模拟结果和实验结果对比

发达国家在氢能灾害事故量化动态风险评估、非理想特性液氢泄漏模型、氢气泄漏探测预警技术、超高压气态氢与液氢火灾爆炸处置技术、长距离管道输送氢安全技术等方面开展了研究。

①国外学者Tsunemi等对站内3种泄漏场景下的加氢站风险进行了定量评估;

②Giannissi等建立了液氢泄漏计算模型,分析了泄漏率、风速等因素对液氢泄漏后可燃蒸气云的影

响;

③Hall等采用实验和数值模拟的方法,研究了距地面和顶棚不同高度位置处的高压氢泄漏喷射火特性;

④Sklavounos和Rigas采用三维雷诺平均N-S方程和SST湍流模型,在CFX中模拟了大规模液氢和液化天然气泛滥,并用NASA实验对模拟结果进行了验证,模拟结果如图1所示。

云团扩散距离和取样点处氢气浓度的预测结果与实验结果较为一致,但云团与地面间的分离距离及氢气浓度分布的预测误差相对较大。研究表明,燃料气体如天然气和氢气,在低温扩散时表现为重气扩散特性。

3.3 标准规范方面

目前国外已在液氢制备、储运及使用安全方面开展了深入研究,形成了相对成熟的技术并建立了氢能安全标准规范体系。代表性标准规范如下:

①《氢及氢安全系统安全指导》AIAA-G-095,关于液氢储存规定主要参考《弹药与爆炸物安全标准》;

②《格林安全手册》GLM-QS-1700.1-2018,规定了推进剂氢气和液氢的安全设计、运输、安全距离、防护等;

③《储存、处理和分配液氢的安全性》Doc 06/19,提出了液氢储存、处理和分配过程中的安全要求,并为液氢使用用户的液氢储存以及液氢的道路、铁路和海路运输提出了指导意见;

④《液氢技术条件》TOCTP 56248-2014,规定了氢、液氢生产、储存、运输的相关指标及安全技术要求;

⑤《液氢生产、储存、运输和使用安全要求》,包括液氢装置分类、建构筑安全设计及泄漏检测,火灾报警等安全内容。

4 国内研究现状

我国在氢能源领域的研究起步相对较晚,液氢储运技术方面仍存在较大瓶颈,液氢加氢站目前仍未在民用领域规模化投用,目前针对于液氢加氢站及其安全性的研究极少。

4.1 理论研究方面

对氢能源安全方面的研究还十分有限,已有研究多停留在数值模拟相关的基础理论阶段。典型的研究如下:

①刘元亮分析了风场、地面传热、泄漏源和大气

湿度对液氢泄漏扩散的影响,并建立安全距离预测方法,根据风速和泛溢速率对可燃云下风向方向最远扩展距离的影响规律,采用次响应曲面函数模型在MATLAB中进行拟合,拟合关系式的表达形式为:

$$\text{Length} = a + bu_0 + c\dot{m}_m + du_0\dot{m}_m + eu_0^2 + f\dot{m}_m^2$$

其中, a、b、c、d、e 和 f 为拟合系数。拟合值分别为 $a=-5.9155$, $b=23.4548$, $c=13.4266$, $d=1.7735$, $e=-3.2307$, $f=-1.7423$ 。 $\dot{m}_m$ 为泛溢速率, u_0 为风速;

②中山大学的孙标等建立了蒸汽云扩散积分模型和池火热辐射固体火焰模型,用于液化天然气泛溢的预测。对风速和泛溢速率在云团扩散中影响,以及围堰和喷射水幕在事故中的防护作用进行了研究。研究表明,围堰会改变下风向风速场的分布,而水幕可显著减小安全距离,且扇形水幕的效果优于矩形水幕^[2-3]。

③李静媛和梁阳等采用 CFD 数值软件 FLACS 对加氢站内高压氢泄漏、扩散及点火爆炸的全过程进行了模拟研究,并分析了环境风速、环境温度、点火位置等因素对事故后果的影响^[4];

④付佳佳等对不同喷射速度和喷口直径下的低速氢喷射火进行了数值模拟,得到了不同参数条件下的氢喷射火特性^[5];

⑤段强领采用实验方法研究了高压氢气泄漏后的自引燃机理,并进一步探讨了管道几何结构对自燃机理的影响^[6];

⑥郭进和王昌建等通过系列实验对受限空间氢气爆炸泄压机理进行了研究,得到了不同因素对泄爆过程中超压、火焰的影响规律。

4.2 专利技术方面

目前,国内暂无授权的液氢安全预警、事故模拟相关专利技术,与之相关的代表性专利包括:《加氢站中活动类别的预测方法及装置》、《气敏色变传感器及基于气敏色变传感的加氢站安全盾系统》、《一种加氢站安防报警系统》、《一种加氢站安全监控方法、电子设备及存储介质》、《一种加氢站安全监控与应急管理系统》。以上专利主要涉及加氢站安全检测、风险辨识、事故报警等相关软硬件开发或集成,以实用新型专利类型为主。

4.3 标准规范方面

我国液氢标准主要涉及航天和军工领域,近年来民用领域液氢标准陆续颁布,与之相关的代表性标

准包括:《加氢站安全技术规范(GB/T 34584-2017)》、《氢能汽车用燃料 液氢(GB/T40045-2021)》、《液氢贮存和运输技术要求(GB/T40060-2021)》、《液氢生产系统技术规范(GB/T40061-2021)》、《汽车加油加气加氢站技术标准(GB 50156-2021)》。以上标准的颁布和实施,有效完善了我国氢能标准体系,但针对液氢加氢站液氢生产、储运及应用全过程系统的安全技术标准尚未建立。

5 结论

基于国内外研究现状调研可知,目前关于液氢安全性研究成果主要涉及事故机理、扩散模型、后果模拟、安全检测等方面。

液氢泄漏后的扩散过程主要包括液氢在地面的成池过程,以及低温氢气云团在大气环境中的扩展和稀释过程两部分。目前,液氢泄漏数值模型分为整体模型、浅层模型和 CFD 模型。整体模型通过求解表征液池性质的微分方程,假设液池是圆柱形的,且深度是整个面积上的平均值,不能处理复杂的障碍物,也不包括氧和氮的冷凝,常用的积分模型包括 GASP 等。浅层模型求解的是二维偏微分方程,已用于模拟非挥发性流体。CFD 模型求解的是三维雷诺平均 N-S 方程,计算复杂,但可以较好地反应真实的物理场景,且可以模拟液氢泄漏源泛溢、液氢流动和蒸发、低温氢气云团大气扩展和稀释的整个过程,常用的 CFD 工具有 CFX、Fluent 和 FLACS 等。

参考文献:

- [1] Hooker P, Willoughby DB, Royle M. Experimental release of liquid hydrogen, Proceeding of 4th International Conference on Hydrogen Safety, 2011; San Francisco, Paper 160.
- [2] 孙标. 液化天然气泄漏扩散及火灾特性数值模拟研究[D]. 广州: 中山大学, 2012.
- [3] 孙标, 郭开华. LNG 池火热辐射模型及安全距离影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(9): 51-55.
- [4] 李静媛. 加氢站高压氢气充装策略及泄漏爆炸后果预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. 75-93.
- [5] 付佳佳, 王昌建, 秦俊, 李建. 氢气喷射火的大涡模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(5): 95-99.
- [6] Guo J., Liu X.Y., Wang C.J.. Experiments on vented hydrogen-air deflagrations: the influence of hydrogen concentration[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017(48): 254-259.