氢气生产装置和储存设施爆炸安全性评估

赵子贤

（北京国信安科技术有限公司，北京100070）

摘要：现阶段，人类面临能源枯竭和环境污染两大难题，氢能作为高效清洁能源被广泛重视和大力支持，但安全设施必须与主体工程同时设计、施工、投入生产和使用。文章运用TNO多能法针对城市加氢站内小规模氢气生产装置和储存设施进行爆炸后果模拟，分析其冲击波超压影响范围，为新建项目选址及重要建筑物抗爆设计提供参考。

0引言

环境污染和能源枯竭是当今时代困扰人类的两大难题，开发新型能源是各国研究思考的重点。氢能作为一种高效清洁能源，可以循环利用，在未来的能源系统中将占据重要位置，拥有十分广泛的应用领域，但发展也离不开安全生产。安全生产工作应坚持安全第一，预防为主、综合治理的方针，从源头上防范化解重大安全风险。因此安全设施必须与主体工程同时设计、施工、投入生产和使用。

燃料电池是高效清洁利用氢能的最佳工具，近年来氢燃料电池汽车得到迅速发展。加氢站有储氢容器和现场制氢装置，因此在加氢站建设前期，进行相关生产装置和储存设施的爆炸后果模拟，为站内配套重要建筑物抗爆设计提供重要依据至关重要。

1爆炸安全性评估分析

本文对重要建筑物爆炸安全性评估采用基于后果的分析方法，主要包含危害识别、泄漏计算、爆炸后果模拟分析和重要建筑物爆炸载荷确定等。

1.1确定分析范围

先进行危险源的辨识，基于以往的事故经验和必要的判断对可能发生的事故进行定性分析。

1.2危害识别

危害识别是依据装置的物料特性、操作条件、平面布局和仪表控制，参考工艺装置可燃物料信息、设计和操作说明、物料平衡表以及总平面布置图等设计资料，辨别能够导致泄漏和爆炸后果的初始事件和最终事件，其中包括识别失效事件的触发条件、泄漏规模和爆炸后果类型等。

根据装置物料平衡表、物料安全技术说明书、过去类似装置的事故案例、HAZOP分析报告、重大危险源评估报告等资料和信息，识别各个装置危险物料分布、危险物料泄漏导致的气云扩散、火灾和爆炸场景、可能发生的工艺事故和极端事故场景。

1.3泄漏计算

1.3.1泄漏单元划分

装置泄漏存在多种可能性，这些可能性被划分为离散的泄漏事件，称为失效场景。一般通过划分泄漏单元，将具有类似潜在危害的设备进行组合：

（1）以PID确定设备设施数量，发生泄漏时能切断泄漏源的阀门位置为主要依据，比如紧急切断阀，从而使得各泄漏单元在发生泄漏时处于相对独立；

（2）划分泄漏单元通常仅针对主工艺物料回路（筛选的单元中含易燃、易爆、有毒的危险化学品设备设施，不可燃的或无毒的物料、水、空气不纳入分析中）；

（3）依据工艺系统操作条件（温度、压力）的变化、物料的变化、泄漏位置的变化，可进一步区分子系统；

（4）对紧急切断阀门泄漏等级、阀门全行程关闭时间、气动（电液联动）执行机构的可靠性、阀门耐火有严格要求。

1.3.2确定泄漏孔径及泄漏持续时间

为确保爆炸后果模拟分析的全面性和完整性，需选择一系列合适的失效事件，从微小的泄漏到大型泄漏（工艺设备和储罐）或者全口径泄漏（管线）。考虑到计算量的问题，后果模拟不可能涵盖所有的泄漏尺寸，通常采用一组离散数据来代表可能的泄漏情况，并开展后果模拟计算。本次模拟的泄漏孔径尺寸选取25mm（中孔）和100mm（大孔）[1]。

泄漏持续时间的取值取决于泄漏单元的探测系统和联锁切断系统等级，结合泄漏单元的总体布局、物料特性、气体和探测器系统布置特点，本次模拟不同泄漏类型（中孔泄漏、大孔泄漏）的泄漏持续时间在DNV模拟中根据要求和实际情况自动调整。

1.3.3泄漏速率及泄漏量计算

本次分析最大可能泄漏量的计算分三种情况，不同泄漏场景的泄漏量根据实际情况而定：

（1）如果上游物料流量＞初始泄漏速率，则泄漏量为：

泄漏量=初始泄漏速率×导则规定的泄漏时间

（2）如果上游物料流量＜初始泄漏速率，则泄漏量为：

泄漏单元内物料存量=初始泄漏速率×导则规定的泄漏时间

泄漏量=泄漏单元内物料存量+上游物料流量×系统隔离时间

（3）系统中的最大量（包含上下游节点）

泄漏量的计算理论是通过模拟不同泄漏孔径下的泄漏速率与泄漏持续时间的乘积，实际泄漏量不会超过装置储存的最大量或可隔断的总量。对间歇工艺，泄漏量按照设备单元内最大存量计算。

本次模拟不同泄漏类型（中型泄漏、大型泄漏）的泄漏量在DNV模拟中根据要求和实际情况自动调整。

1.4爆炸后果模拟及建筑物爆炸性安全评估

本文采用DNV模拟软件，模拟制氢装置及储存设施等发生泄漏导致的爆炸后，对其附近控制室进行爆炸性安全评估。

2爆炸荷载评估准则

2.1超压对建筑物的影响

根据不同场景下产生爆炸的超压值，评估不同爆炸载荷对控制室的损害程度和影响。超压对建筑物的影响中关注的压力值如表1所示。

表1 超压对建筑物的影响（近似值）

压力/kPa	影响
6.9	房屋部分被破坏，不能居住
20.7	工厂建筑物内的重型机械(1 362 kg) 轻微损坏；钢结构建筑变形，并脱离筑基
48.2	装载货物的火车车厢倾翻

2.2判定建筑物抗爆设计的准则

按照以下规则，评估建筑物是否需要采取抗爆设计或抗爆加固措施：

（1）当建筑物受到的爆炸超压高于6.9kPa，且未进行抗爆设计时，建筑物宜进行抗爆治理[2]。

（2）普通建筑物能够承受（不发生倒塌）爆炸冲击波超压小于6.9kPa[3]。

综合国外和国内化工企业人员集中建筑物抗爆设计要求，若重要建筑物暴露爆炸峰值超压高于6.9kPa，则需要执行GB/T50779—2022《石油化工建筑物抗爆设计标准》和其他相关标准要求采取主体结构整体抗爆设计，否则对于既有建筑物可不采取主体结构整体抗爆设计或改造。对新建项目的建筑物，即使建筑物暴露爆炸峰值超压低于6.9kPa，建筑物还需要满足（GB/T50779—2022）对峰值超压低于6.9kPa时的相关抗爆设计要求。

3爆炸后果模拟

爆炸后果模拟的工作内容包括可燃蒸气云泄漏扩散模拟和爆炸后果模拟。

可燃蒸气云扩散分析的目的是确定在不同泄漏类型下的泄漏量，以及自然环境下，可燃气云扩散产生的爆炸燃料量。可燃蒸气云进入受限空间或阻塞空间并被延迟点燃的条件下，将产生破坏性的爆炸载荷。蒸气云爆炸后果模拟是把可燃浓度的蒸气云的位置和质量，装置区阻塞度和气云受约束条件，点火源强度等多项因素作为初始条件，利用TNOMulti-EnergyMethod（TNO多能法）模型预测蒸气云爆炸后果和爆炸载荷传播特征，以确定建筑物的爆炸载荷。

TNO多能法属于蒸气云爆炸预测方法之一，该模型是在大量数值和实验研究的基础上建立起来的蒸气云爆炸效应预测的模型[4]，可以用于确定约束空间内蒸气云特征。目前国内外关于多能法的研究和应用比较广泛[5-7]。

本文模拟场景中涉及制氢装置、储氢设施和加氢设施，装置区外东北方向设置控制室。

3.1物性数据及气象条件

依据GB50160—2008《石油化工企业设计防火规范》（2018年版）和GB50058—2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》等相关标准，本文选取的主要危险物料为氢和氨，具有火灾爆炸危险性。

本次场景后果模拟分析主要考虑天气场景：大气稳定度D/F[1]，大气温度20℃。

3.2潜在爆炸区域（障碍区/阻塞区）

本文通过识别可能使气体进入并产生可燃蒸气云爆炸的区域如表2所示。

表2 潜在爆炸区域详细信息

序号	阻塞区名称	阻塞区类型	面积/m²	强度曲线	阻塞比
1	制氢装置	TNO	286	6	0.2
2	储氢瓶组	TNO	102	4	0.3
3	氢气压缩机	TNO	228	4	0.2
4	加氢	TNO	175	4	0.1

3.3可信泄漏事件

根据不同泄漏单元的不同孔径的泄漏频率，考虑点火概率和后果分配概率（爆炸/闪火），泄漏事件的发生频率=泄漏频率×点火概率后果分配概率（爆炸/闪火），当事件发生频率大于1×10-5认为是可信事件，纳入本次后果模拟，点火概率选取0.9。

3.4爆炸后果分析

不同泄漏场景泄漏扩散形成可燃蒸气云团，可燃蒸气云进入阻塞区域空间内被点燃发生爆炸事故。经过模拟分析，本文模拟场景中控制室所受最大冲击波超压值超过6.9kPa，处于6.9～48.0kPa之间。

4重要建筑物暴露的爆炸荷载

4.1控制室爆炸冲击波超压以及正向持续时间

重要建筑物暴露在可燃物料泄漏形成蒸气云爆炸最差场景处的爆炸冲击波超压以及正压持续时间如表3所示。

表3 控制室暴露的爆炸超压即正压持续时间

建筑物名称	最大超压/kPa	持续时间/s	冲量/(Pa·s)	设备名称	场景名称	阻塞区名称
控制室西墙	22.05	1.29	258.44	储氢瓶组	25 mm 泄漏	储氢瓶组区
控制室南墙	15.77	1.29	190.10	储氢瓶组	25 mm 泄漏	储氢瓶组区

4.2控制室爆炸侧向超压出量曲线

最差场景为F天气条件下储氢瓶组1发生泄漏（25mm）后氢气泄漏至储氢瓶组区域内部阻塞空间发生蒸气云爆炸，侧向超压出量曲线如图1所示。

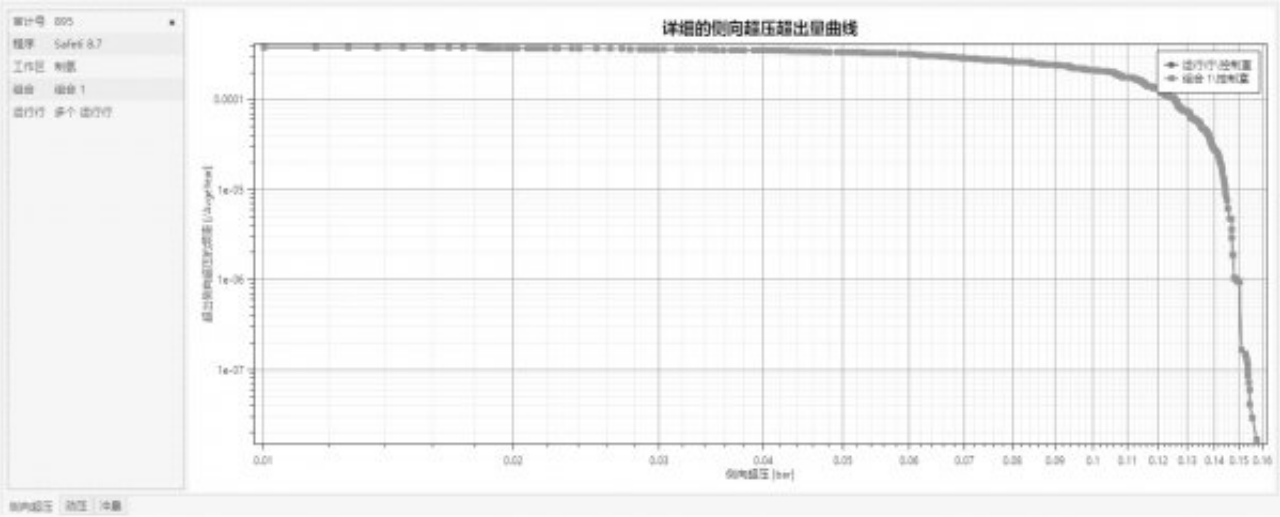

图1 最差场景爆炸侧向超压出量曲线

依据计算结果，对照文中提出的评估准则，分析认为：

控制室所在建筑暴露的最大爆炸冲击波超压22.05kPa，正相持续时间1.29s，冲量258.44Pa·s，由储氢瓶组1发生泄漏（25mm），在大气稳定度F条件下，在储氢瓶组区域内部阻塞空间发生蒸气云爆炸造成。

根据国家标准GB/T37243—2019《危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法》附录G中表G.3规定的描述，该事故场景可能对控制室造成房屋内重型机械（1362kg）轻微损坏，钢结构建筑变形，并离开筑基。

5结语

本文通过识别控制室所在建筑周边装置可能发生爆炸事故的失效事件，基于后果的分析方法，确定建筑物暴露的爆炸载荷。结论如下：

通过危害识别，综合考虑工艺操作条件、物料性质以及平面布局等因素，对每个设备单元进行爆炸后果分析，计算控制室暴露的爆炸载荷。

物料泄漏形成蒸气云爆炸最差场景为：F天气条件下，储氢瓶组1发生泄漏（25mm），在储氢瓶组区域内部阻塞空间发生蒸气云爆炸造成。控制室所在建筑暴露的最大爆炸冲击波超压22.05kPa，正相持续时间1.29s，冲量258.44Pa·s。

综合考虑中石化既有建筑物抗爆对照中石化既有建筑物抗爆治理指导意见、美国土木工程师学会ASCE对普通建筑物抗爆性能的描述，以及GB/T50779—2022《石油化工建筑物抗爆设计标准》，控制室所在建筑需要进行主体结构整体抗爆加固或抗爆设计。

对既有建筑物，还需综合评估建筑物结构形式和建筑寿命等相关因素，如有需要建议对建筑物进行结构计算验证是否能承受所承受的爆炸载荷。

目前国内城市加氢站大力发展，在加氢站前期调研和规划中，应充分考虑其建设的生产装置和储存设施存在的风险，通过抗爆计算和抗爆设计，为安全运行建立起坚固的物理防护设施。

参考文献：

[1] 国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会. 危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法[A]. 北京：中国标准出版社，2004.

[2] 中国石油化工集团有限公司. 关于印发《中国石化既有建筑物抗爆治理指导意见(试行)》的通知[Z]. 北京：中国石油化工集团有限公司安全监管部，2020.

[3] ASCE. Design of blast resistant buildings in petrochemical facilities[S]. American: ASCE library, 2010.

[4] C J H VAN DEN BOSCH, R A P M. WETERINGS. Methods for the calcula-tion of physical effects(Yellow Book)[M]. The Hague: Committee for the Prevention of Disasters, 2005.

[5] 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.

[6] 陈林顺，钱新明，冯长根. 一种处理爆炸多能法的新方法[J]. 安全与环境学报，2001，1(2)：21-24.

[7] 张网，吕东，王婕. 蒸气云爆炸后果预测模型的比较研究[J]. 工业安全与环保，2010，36(4)：48-49，52.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/207947.html