

CNG 加气母站风险分析及事故后果模拟

王涛^{1,2} 刘晓龙^{1,2} 史少帅^{1,2}

1. 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院 2. 化学品安全控制国家重点实验室

王涛等. CNG 加气母站风险分析及事故后果模拟. 天然气工业, 2010, 30(9): 105-109.

摘要 由于 CNG 具有易燃、易爆和易泄漏等危险性, 其运行设备又处于高压状态, 一旦发生事故, 将对加气站场周边居民和环境造成巨大的风险和破坏, 因而研究 CNG 加气母站运行风险及模拟事故后果严重程度, 对 CNG 加气母站的安全管理和规划布局具有重要意义。为此, 阐述了 CNG 加气母站工艺流程, 详细分析了 CNG 加气母站运行过程中的安全隐患, 并在此基础上应用挪威 DNV 公司开发的 SAFETI 软件, 结合数学模型对某 CNG 加气母站进行事故后果模拟。通过构建针对性强的事故模型, 对 CNG 加气母站发生的主要事故类型和风险程度进行了模拟计算, 得出了较真实的事事故影响范围曲线图。分析结果表明: 该模拟方法可以为 CNG 加气母站的安全管理和事故预防工作提供一定的技术支撑。

关键词 CNG 加气母站 风险分析 事故 模拟 SAFETI 软件

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.09.026

为了降低汽车废气排放, 改善大气环境, 压缩天然气(CNG)成为替代汽油、柴油的首选清洁燃料。该燃料能降低汽车运行费用、提高经济效益, 延长汽车设备使用寿命, 降低维修费用^[1]。由于该燃料所具有的强市场发展潜力, 近年来, 全国各地 CNG 加气母站的兴建数量逐年增加。然而, 由于 CNG 具有易燃、易爆和易泄漏等危险性, 同时运行设备又处于高压状态, 一旦发生事故(遇火源易发生火灾爆炸), 将对站场周边居民和环境造成巨大的风险和破坏。因此研究 CNG 加气母站运行风险及模拟事故后果严重程度, 对 CNG 加气母站的安全管理和规划布局具有重要意义^[2]。

1 CNG 加气母站工艺流程

所谓加气母站, 是指与输气管道末端相连, 以管道气为处理气源而修建的工艺站场。目前国内加气母站普遍采用技术比较成熟的工艺流程, 即对进站气源进行除尘、脱水、脱硫和压缩等主要处理, 然后将天然气增压至 25 MPa, 随后经加气机给专用运输车辆(CNG 槽车或长管拖车)充装, 运送至市区各加气站。CNG 加气母站一般由 5 个操作系统组成, 即计量调压系统、净化脱水系统、气体压缩系统、输气系统和输送系

统^[3], 其工艺流程如图 1 所示。

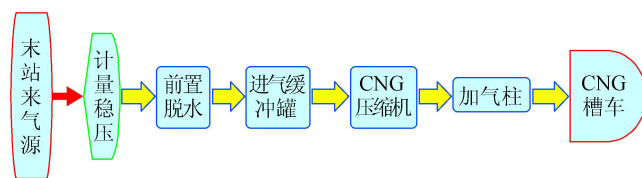


图 1 CNG 加气母站工艺流程图

2 CNG 加气母站的运行风险分析

CNG 加气母站的整个工艺过程都充满高压可燃性气体, 且属于高压操作系统, 因而 CNG 加气母站的运行特征决定其具有一定危险性。所以, 分析、探讨 CNG 加气母站运行风险, 对于搞好站场安全管理, 减少安全隐患具有重要意义。

2.1 气源风险分析

2.1.1 易燃易爆性

CNG 加气母站处理气源(天然气)的主要成分为甲烷, 甲烷是一种易燃易爆气体, 在空气中的爆炸极限为 5.3%~14%, 最小点火能为 0.28 mJ, 火灾危险性属甲类。因此, 一旦发生火灾, 扑救难度相当大。

2.1.2 腐蚀性

输气管道中的天然气除甲烷外,还含有少量的硫化氢、可溶性硫化物、水分及二氧化碳等组分^[4]。若 CNG 加气站没有脱水和脱硫设备,硫化氢在潮湿的环境下会对管壁及设备造成应力腐蚀^[5],随着时间的推移可能造成事故隐患。

2.1.3 静电荷聚集性

天然气本身是绝缘的,当其在较高流速下流经管路进入容器的过程中或压缩气体从管口或破损处高速喷出时,由于强烈的摩擦作用,有产生静电的特性,静电聚积到一定电位时就会产生静电放电^[6]。如果静电放电产生的电火花能量达到或大于可燃物的最小点火能,就会立即引起燃烧或爆炸。

2.1.4 膨胀和压缩性

CNG 加气母站要求将进站天然气经脱水(硫)、压缩等工艺,最终增压至 25 MPa。由于天然气具有压缩性,使得压力容器和管道的天然气储存了大量的压缩能,导致系统处于高压运行状态,容易发生超压^[7],若系统压力超过了其能够承受的许用压力,压力容器和管道会出现裂纹,最终超过设备及配件的强度极限而发生爆炸事故。

2.2 工艺设备风险分析

2.2.1 压力管道(容器)超高压泄漏

CNG 加气母站运行过程始终处于高压状态,系统高压运行容易发生超压现象,很容易造成管道、压力容器泄漏;当压力超过设备和组件所能承受的最大压力时,有可能发生爆炸或局部破裂,造成天然气的大量泄漏^[8]。

2.2.2 管道腐蚀泄漏

在高压状态下, H_2S 水溶液对输气管道的腐蚀作用进行得很快,即使溶液中 H_2S 的质量分数很低,容器及管道的硫化物也能在很短的时间内引起应力腐蚀破坏,造成管道腐蚀,发生天然气泄漏。

2.2.3 压缩机爆炸

天然气经压缩后温度会迅速升高,如果压缩机内

循环冷却水水质差,冷却系统不能有效运行,会使设备内温度过高;高温就会导致压缩机内部的润滑油黏度降低,失去润滑作用,使设备的运行部件摩擦加剧,造成设备内温度超高,容易引起火灾爆炸^[9]。另外,如果压缩机气缸润滑油选择不当、加油量过多、油质不佳或过滤器污垢严重,吸入气体含尘量大均易形成积碳。积碳燃烧后产生大量的一氧化碳,当压缩机系统中一氧化碳的含量达到 15%~75% 时就会发生爆炸,并引起压缩机爆炸事故。

3 事故后果模拟

3.1 事故后果模拟方法简介

事故后果模拟是在事故模型分析的基础上选择数学模型(常见的数学模型有气体泄漏模型、扩散模型、爆炸模型和热辐射模型等),并根据事故现场的情况(包括气象条件、装置设备的尺寸大小和储存条件等)和有关危险物质的物性参数,利用计算机模拟并输出模拟结果的过程^[10]。

借鉴挪威 DNV 开发的 SAFETI 6.5.1 (Software for Assessment of Flammable, Explosive and Toxic Impacts, SAFETI 是一种多功能定量风险评估和危险性评价的计算软件,可对任何一种石油化工装置可能发生的火灾和爆炸事故的影响范围及程度进行计算,并生成相应的图形文件,进而得出事故影响区)软件,将数学模型(SAFETI 软件中采用的数学模型有气体释放模型、气云扩散模型、喷射火模型和蒸气云爆炸模型等)应用于某 CNG 加气母站进行事故后果模拟分析。

3.2 事故后果模拟

南京某 CNG 加气母站设计规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进站压力为 4.2~5.88 MPa,温度为 17.2~22.5 °C。该加气母站分为生产区(压缩机 4 台,3 用 1 备)、加气区(6 台加气柱)、站场值班室和停车区 4 个部分,如图 2 所示。

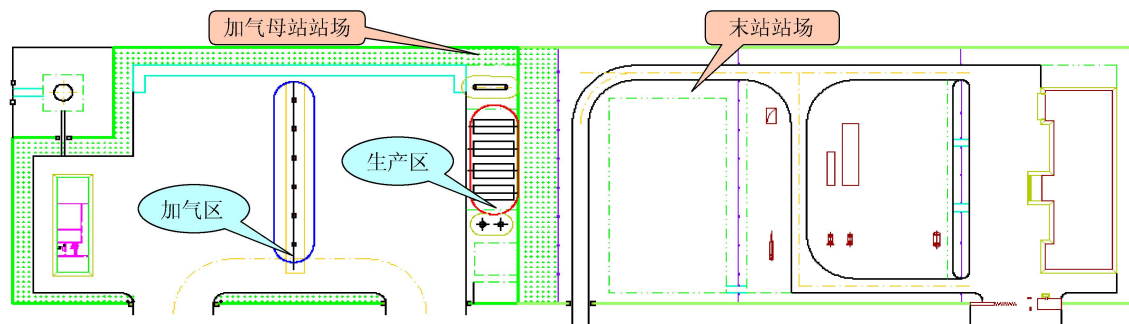


图 2 某 CNG 加气母站站示意图

3.2.1 计算模型说明

3.2.1.1 气体释放模型

采用 PHAST 的 LEAK 模型计算站内工艺设备或管道腐蚀穿孔后的天然气的释放,如图 3 所示。

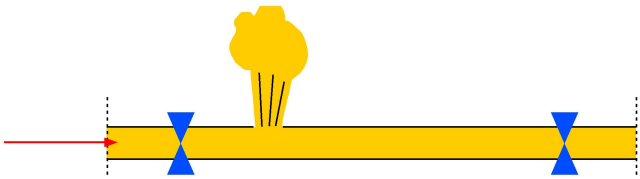


图 3 管道气体泄漏模型图

3.2.1.2 气云扩散模型 UDM

采用 UDM 扩散模型进行扩散模拟。对气云扩散分为 5 个阶段进行分段模拟。UDM 模型考虑了气象条件、介质密度、表面粗糙度和湍流扩散等多种因素的影响。图 4 演示了天然气泄漏后气云扩散的过程。

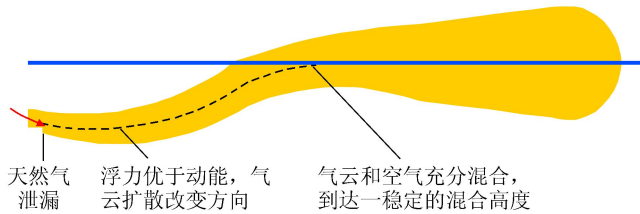


图 4 气云扩散过程示意图

3.2.1.3 喷射火模型

喷射火焰采用 Shell 喷射火焰模型。Shell 模型将火焰模拟为一倾斜的平截头圆锥体,如图 5 所示。

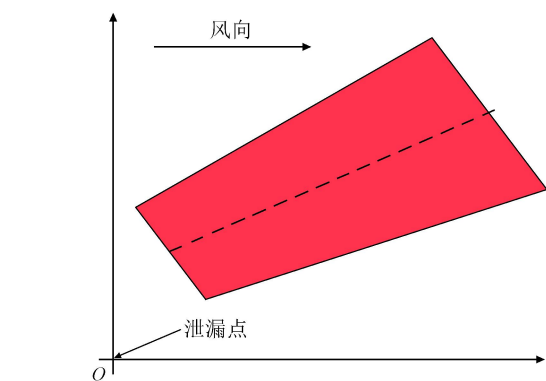


图 5 Shell 喷射火焰模型图

3.2.1.4 热辐射伤害阈值

火灾热辐射对人/建筑物的伤害情况见表 1。

3.2.1.5 爆炸冲击波超压阈值

爆炸超压的破坏影响见表 2。

表 1 火灾热辐射对人/建筑物的伤害情况表¹⁾

入射通量/ kW·m ⁻²	对人体伤害情况	对设备伤害情况
37.5	1 min 内 100% 的人死亡,10 s 内 1% 的人死亡	设备全部损坏
12.5	1 min 内 1% 的人死亡,10 s 内 1 度烧伤	有火焰,木材燃烧、塑料管溶化所需的最小能量
4.0	20 s 内引起疼痛,但不会起水泡	/
1.6	长期接触不会有不适感	/

注:1)事故模拟中,12.5 kW/m² 被视为数秒之内可能逃生的热辐射极限。

表 2 爆炸超压的破坏影响情况表

强度 /MPa	破坏影响
0.002	相当于 50% 窗户破坏,由于破裂玻璃碎片导致人员受伤
0.014	相当于石砖建筑物的严重结构性破坏,室外人员 30% 的死亡几率而室内人员的死亡几率为 10%
0.021	相当于石砖建筑物坍塌,室外人员 70% 的死亡几率,而室内人员的死亡几率为 30%

3.2.2 计算假设和场景

3.2.2.1 天然气主要可燃物性参数

天然气主要可燃物性参数见表 3。

表 3 天然气主要可燃物性参数表

属 性	计算值
燃烧热 /kJ·kmol ⁻¹	889.5
LFL	4.52%
UFL	16.96%
平均分子量	16.72

3.2.2.2 计算天气条件

采用 QRA 计算中常使用的 2 种大气稳定度 D、F,对 3 种天气条件进行分别计算。主要的天气条件如表 4。

表 4 天气条件明细表

序号	天气条件	风速/ m·s ⁻¹	大气 稳定度	描述
1	1.5/F	1.5	F	宁静的夜晚或阴的白天
2	1.5/D	1.5	D	阴的白天
3	5/D	5.0	D	阴的,有风的白天

注:大气温度为 9.85℃;大气压力为 0.101 3 MPa;大气相对湿度为 0.77;表面粗糙度长度为 0.10 m;风速在垂直方面的分布服从 Power 定律。

3.2.2.3 计算假设

1)假设释放方向为水平方向,不考虑线路截断阀门关闭的影响以及沿线高程的影响。

2)延迟蒸气云爆炸的中心位于气云中心处。

3.2.2.4 计算假设场景

假设场景 1:CNG 压缩机 3 台同时运行,此时排气量约为 2.60 kg/s,加气柱被槽车撞到,发生严重破裂事故,管道完全断裂。

假设场景 2:加气母站气源入口处发生小孔泄漏。计算假设场景参数见表 5。

表 5 假设场景一览表

序号	假设事故	泄漏压力/MPa	泄漏孔径/mm	泄漏时间/s
场景 1	加气柱管线发生严重破裂事故(完全断裂)	25.00	25	300
场景 2	加气母站气源入口处发生小孔泄漏事故	5.50	20	300

3.2.3 计算结果

各场景泄漏、扩散、火灾和蒸气云延迟爆炸的计算结果见表 6~8。

3.2.4 结果分析

场景 1 以加气柱管道被槽车碰撞后断裂口为 25 mm 假设场景进行了后果定量模拟计算,结果表明热辐射(12.5 kW/m^2)影响距离为 23 m,蒸气云爆炸产

生 0.014 MPa 冲击波的影响距离约为 49 m。

场景 2 以加气母站气源入口处发生 20 mm 小孔泄漏为假设场景进行了后果定量模拟计算,结果表明热辐射(12.5 kW/m^2)影响距离为 23 m,蒸气云爆炸产生 0.014 MPa 冲击波的影响距离约为 48 m。

从该加气母站的总图布置以及场景 1、场景 2 的热辐射和气云爆炸模拟来看,天然气泄漏扩散遇到点火源都可能会对加气母站或输气末站造成十分严重的后果,因此,站场应严格控制站区内的点火源,做好以下安全防护措施,以防止火灾爆炸事故的发生。

1)站场内应严格按照相关规范要求设置紧急逃生线路和风向标。

2)在天然气易泄漏处严格按 SY 6503—2008《石油天然气工程可燃气体检测报警系统安全技术规范》的要求设置可燃气体检测报警器,同时,每周应对报警器自检系统试验 1 次,检查指示系统运行状况。已投入使用的可燃气体检测报警器的检定周期不应超过 1 a。

3)在槽车充装作业过程中,应制订严格的充装作业(工作人员应穿防静电工作服)程序;在装卸现场不允许有点火源;充装开始前,接地设施必须已经连接至槽车并经过测试确认;充装后,在充装连接管置换合格后,才能脱开连接。

4)加气机附近应设置防撞柱(栏),以免槽车碰撞;加气软管应耐天然气腐蚀,防止因腐蚀而造成天然气泄漏。

5)定期检测站内的安全阀、自力式调节阀和 ESD 系统等安全保护设施,设定参数测试,对安全阀、放空阀等应按相应运行和维护规程进行操作和维护。

6)管理单位应制订加气母站事故应急预案,包括工艺管线断裂、火灾爆炸和通信中断等紧急情况,且应急预案应与地方政府和社区联动。

表 6 泄漏及蒸气云扩散计算明细表

指 标	场景 1	场景 2
平均泄漏速率/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	2.60	2.72
0.25LFL 距离/m	71	86
0.5LFL 距离/m	43	46
1LFL 距离/m	18	17

表 7 喷射火热辐射影响距离计算明细表 m

喷射火指标	场景 1	场景 2
4.0 kW/m^2	29	28
12.5 kW/m^2	23	23
37.5 kW/m^2	19	18

表 8 蒸气云爆炸超压影响距离计算明细表 m

指 标	场景 1	场景 2
0.002 MPa	爆炸中心	40
	超压半径	34
	影响距离	74
0.014 MPa	爆炸中心	40
	超压半径	9
	影响距离	49
0.021 MPa	爆炸中心	40
	超压半径	7
	影响距离	47

4 结论

1)结合CNG加气母站的工艺流程,对加气母站运行过程中常见的风险因素进行了详细分析,为预防、控制加气母站火灾爆炸事故提供技术参考。

2)CNG加气母站事故发生具有不确定性,因此,运用SAFETI6.5.1软件对各种常见事故模型进行定量模拟计算,模拟结果对CNG加气母站的安全运行和事故预防具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 张沛. CNG汽车是天然气利用的重要发展途径[J]. 石油与天然气化工, 2008, 37(1): 23-26.
- [2] 蔡周全, 李永怀, 罗振敏. CNG加气站抑爆系统研制[J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 109-111.
- [3] 陈杰, 李求进, 吴宗之. 100起CNG加气站事故的统计分析及对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(1): 71-

75.

- [4] 温永红, 段天平. 车用燃料低硫化及应对措施[J]. 石油与天然气化工, 2002, 31(1): 31-34.
- [5] 郁永章, 高其烈, 冯兴全, 等. 天然气汽车加气站设备与运行[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [6] 黄郑华, 王玮, 李建华. 压缩天然气汽车加气站火灾危险分析与预防[J]. 安全、环境和健康, 2007, 7(8): 16-18.
- [7] 刘海燕. 天然气加气站安全评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2007.
- [8] 苏昌林, 刘缙林, 邱东利. 压缩天然气(CNG)加气站安全监测及信息管理[J]. 中国测试技术, 2007, 33(5): 15-18.
- [9] 韩中华. CNG加气站的火灾危险性分析及预防措施探讨[J]. 煤炭技术, 2008, 27(12): 161-163.
- [10] 梁韬, 陈国华, 张瑞华, 等. SAFETI在LPG储罐事故后果评价中的应用[J]. 油气储运, 2006, 25(2): 53-62.

(收稿日期 2010-07-15 编辑 何 明)