

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2015.0012.018

液氨储罐泄露事故模拟分析与定量风险评估^{*}

周玉希¹, 蔡治勇¹, 王文松^{2**}

(1.重庆科技学院 安全工程学院,重庆 401331;2.重庆大学 资源及环境科学学院,重庆 400030)

摘 要:以重庆市双阳食品有限公司液氨储罐为工程实例,采用重大危险源区域定量风险评价软件 CASST-QRA V2.0,对液氨泄露事故后果进行模拟计算,定量分析其对周边环境所造成的风险大小和可接受程度;研究成果不仅可对公司的安全管理和相关行政管理部门的安全监督提供指导与依据,而且可为其他液氨储罐的管理运行提供借鉴。

关键词:液氨;泄露;事故;定量风险评估;模拟分析

中图分类号:X506

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2015)12-0088-06

液氨作为重要的工业原料和制冷剂,在工业生产中应用广泛。由于其使用条件恶劣,泄漏事故频频发生,加之液氨特有的理化性质,常常导致人员伤亡、财产损失、环境污染和社会恐慌^[1]。液氨储罐等危化品储存装置日益增多,与此同时,重特大事故也不断发生^[2]。近年来,液氨泄露事故发生起数与伤亡人数都有显著升高。据统计资料显示,2009 年到 2013 年 9 月,发生液氨泄漏造成人员伤亡的事故达到 16 起,死亡 140 人,重伤 21 人,轻伤 207 人。其中,长春市宝源丰禽业有限公司液氨泄露爆炸事故,共造成 121 人死亡、76 人受伤,直接经济损失 1.82 亿元^[3]。安监总局将液氨列为首批重点监管的危险化学品^[4]。因此,针对液氨储罐泄漏而进行的事后模拟和风险评估分析具有十分重要的现实意义。

目前,针对液氨泄露的研究已经取得一些成果。杜喜臣^[5]、孟凡亨^[6]采用事故树方法对液氨泄露原因进行了分析,陈杰^[7]对氨泄漏事故的后果进行了分类研究,孙东亮^[8]对液氨泄露扩散模型进行了分析与改进,张杰^[9]、顾建伟^[10]对液氨储罐泄露事故的影响范围进行了模拟分析,王洪德^[11]分析了风速、地表粗糙度、大气稳定度、泄漏速率等因素对液氨扩散的影响。

定量风险评价(简称 QRA)也称为概率风险评价(PRA),是一种对风险进行量化评估的技术^[12-15]。方法以事故发生频率和事故后果的乘积来对风险进行定量描述。目前,定量风险分析已经应用在 LPG^[16]、LNG^[17]等危险化学品储罐的风险评价中。

以重庆市双阳食品有限公司液氨储罐为工程实例,在现场勘查检查和相关技术资料分析的基础上,明确可能产生的事故类型和事故后果,采用重大危险源区域定量风险评价软件 CASST-QRA V2.0,计算事故影响范围,定量分析其对周边环境所造成的风险大小和可接受程度。研究成果不仅可对该公司的安全管理和相关行政管理部门的安全监督提供指导与依据,而且可为其他液氨储罐的管理运行提供借鉴。

收稿日期:2015-05-06;修回日期:2015-07-22.

^{*} 基金项目:重庆科技学院研究生科技创新计划项目(YKJCX2013015).

作者简介:周玉希(1991-),女,四川眉山人,硕士研究生,从事安全工程相关研究.

^{**} 通讯作者:王文松(1989-),男,山东聊城人,博士研究生,从事安全工程、矿业工程相关研究.E-mail:sdgxwxs@163.com.

1 工程概况

双阳食品公司位于重庆市綦江区,冻库面积约 600 m²,采用液氨制冷,制冷系统液氨采用常温高压储存,储罐设置在冷冻机房内,储罐容积为 2 m³,最大使用储存量为 500 kg,使用压力为 1.8 MPa,设计压力为 2.0 MPa。冻库位于场镇内部,周边人口密集,周边除分布有公司办公楼、食品加工区、员工宿舍外,还有小学、初中、商业集市、银行网点与普通居民区等人员密集场所。冷冻机房周边 50 m 范围内约有 130 人,50~100 m 范围内约有 850 人,100~250 m 范围内约有 650 人。由于双阳食品公司周边人口较为密集,且存在中小学等环境敏感建筑物,液氨一旦泄露,造成的后果将非常严重。调查发现,企业的应急救援预案未进行评审备案,预案内容不符合相关规定要求,预案未与当地政府相关预案衔接,也未进行演练,不能有效地控制液氨泄漏事故影响范围和防止事故后果扩大。

2 液氨管道和储罐泄露事故后果计算

2.1 事故计算条件

液氨属于无色有刺激性恶臭的气体,泄漏后因自身热量、地面传热、太阳辐射、气流运动等迅速蒸发,立即随风向向下风向扩散,可导致大面积内人员、牲畜中毒事故。其短时间接触容许浓度为 30 mg/m³,急性中毒浓度为 500~700 mg/m³,死亡浓度为 3 500~7 500 mg/m³。计算针对的危险源为液氨储罐和管道,储罐最大容积 2 m³,计算储存量 500 kg,计算压力 1.8 MPa,附属管道内径 50 mm。根据经验和现场考察结果,极端情况下的事故情景模式为静风条件下的管道完全破裂和容器整体破裂,最可能发生的事故情景模式为管道小孔泄露。小孔泄露一般是指孔径管径比小于 0.2 的泄露事故,其影响范围随孔径的增大而增大^[18-20]。从工程安全角度考虑,故小孔泄露计算孔径为 10 mm。

2.2 事故后果计算与分析

采用重大危险源区域定量风险评价软件 CASST-QRA V2.0,对不同气象条件下不同事故情景模式的后果进行计算,得到以泄漏点为中心的人群死亡半径、重伤半径、轻伤半径,见表 1。

表 1 液氨泄露事故影响范围一览表

泄漏模式	气象条件	死亡半径/m	重伤半径/m	轻伤半径/m
容器整体破裂	中毒扩散:静风,E 类	242	294	350
管道完全破裂	中毒扩散:静风,E 类	242	294	350
管道小孔泄漏	中毒扩散:静风,E 类	26	39	53
管道小孔泄漏	中毒扩散:1.2 m/s,E 类	23	35	48
管道小孔泄漏	中毒扩散:2.1 m/s,D 类	/	12	16
管道小孔泄漏	中毒扩散:4.9 m/s,C 类	/	/	12

事故后果随事故情景和气象条件的变化呈现出不同的影响范围。液氨泄漏事故后果最严重将形成 242 m 的死亡半径、294 m 的重伤半径和 350 m 的轻伤半径,但发生的可能性小。发生事故可能性较大的事故模式为管道小孔泄漏。在静风条件下的死亡半径为 26 m、重伤半径为 39 m、轻伤半径为 53 m。死亡区域

包括制冷机房、冷库、周围道路和南面的民居(约有居民 30 人),重伤区域包括更远处的道路、公司办公楼、食品加工区和部分民居,如图 1 所示。

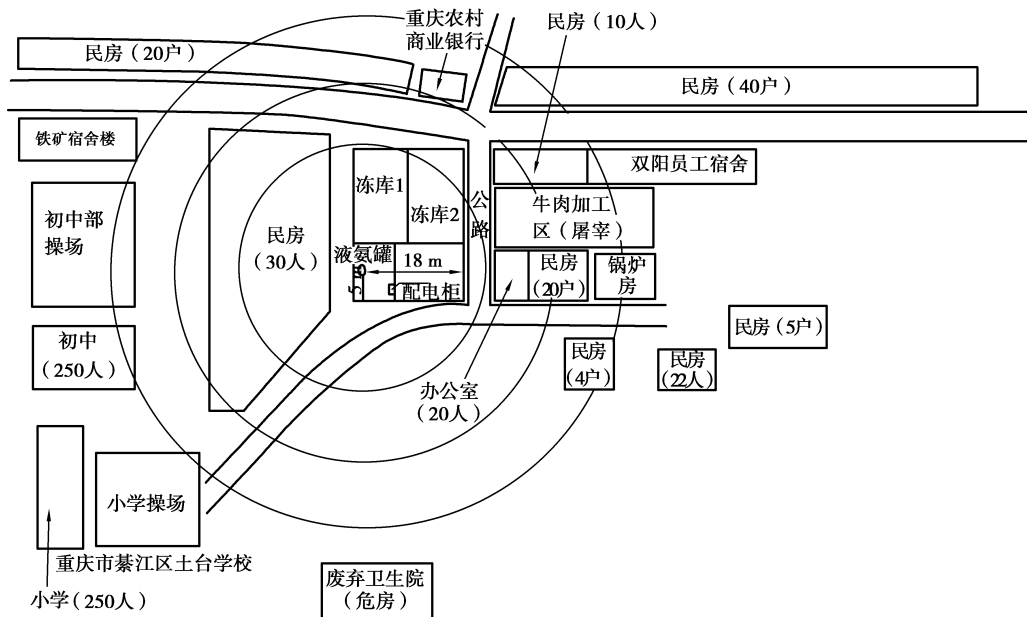


图 1 管道小孔泄漏事故后果图

3 液氨泄露事故区域定量风险评估

3.1 定量风险评估的指标和容许标准

定量风险评估的指标分为个人风险和社会风险^[12-17]。个人风险是指危险源造成某一固定位置人员死亡的概率,体现为风险等值线,如图 2(a)所示。社会风险为危险源引起大于等于 N 人死亡的所有事故的累积频率 F ,用社会风险曲线($F-N$ 曲线)表示,如图 2(b)所示^[21]。

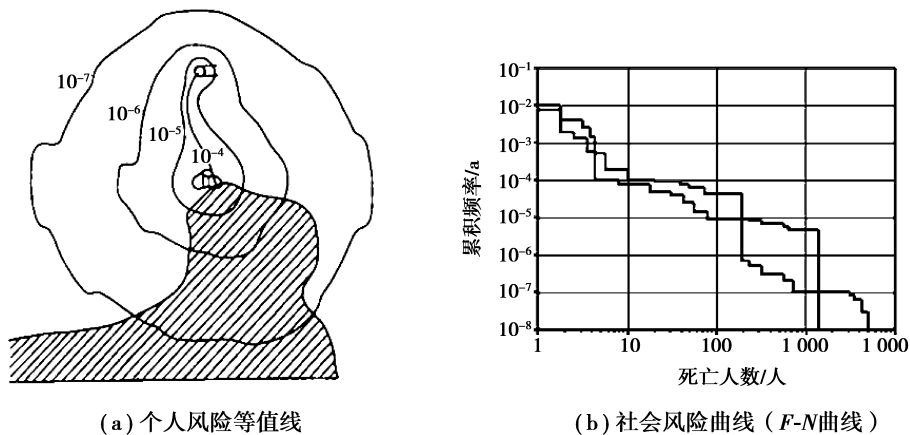


图 2 定量风险评估指标示意图

根据安监总局相关规定,采用个人风险容许标准和社会风险容许标准分别见表 2 和图 3。社会风险容许标准采用 ALARP(As Low As Reasonable Practice)原则^[22],将风险划分为 3 个区域,即不可容许区、尽可能降低区(ALARP 区)和可容许区。

表 2 个人风险容许标准

场所类别	可容许风险/a
1.高敏感场所,如学校、医院、幼儿园、养老院;	<3×10 ⁻⁷
2.重要目标,如党政机关、军事管理区、文物保护单位;	
3.特殊高密度场所,如大型体育场、大型交通枢纽。	
1.居住类高密度场所,如居民区、宾馆、度假村;	<1×10 ⁻⁶
2.公众聚集类高密度场所,如办公场所、商场、饭店、娱乐场所。	

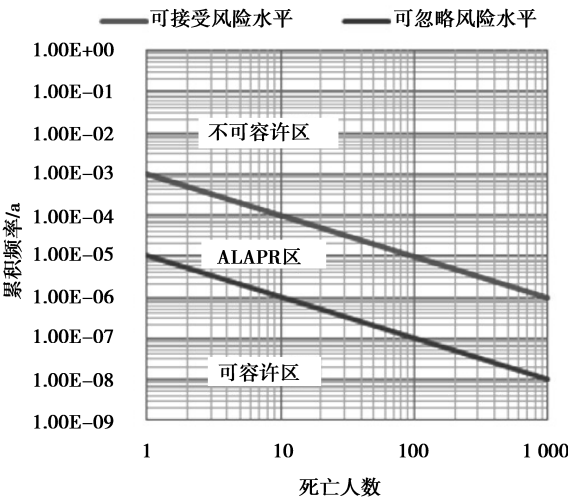


图 3 社会风险容许标准

3.2 区域定量风险计算

采用 CASST-QRA V2.0 进行个人风险和社会风险的定量计算。具体模拟计算的条件见危险源描述图(图 4)和气象条件图(图 5)。

危险源描述

危险源名称: 液氨储罐

危险源类别: 储罐

存储物质状态: 0 液态

单层或双层材质: 单层材质

存储物质名称: 氨; 氨气 (液氨)

储罐数量 (个): 1

储罐容积 (立方米): 2

储罐内工作温度 (℃): 常温

储罐内部气压 (MPa): 1.8

围堰面积 (m2): 0

附属管道内径 (mm): 50

出口管道工作流量 (kg/s): 0

☒ 管道

☐ 离心压缩机

☐ 阀门

☐ 往复压缩机

☐ 离心泵

☐ 换热器

☐ 过滤器

☐ 塔器

☒ 罐体本身

☐ 反应器

安全设施能在几分钟内消除泄漏? 10

图 4 危险源描述

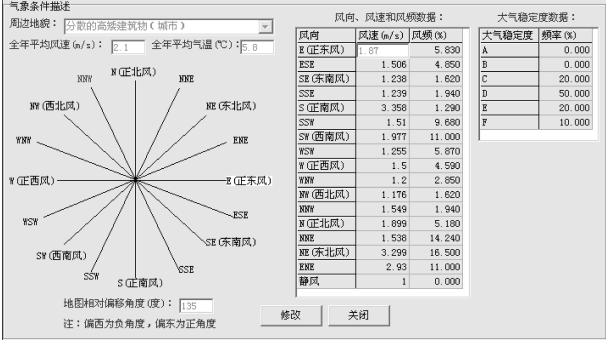


图 5 气象条件

3.3 风险计算结果

3.3.1 个人风险计算结果

双阳食品公司液氨使用、储存对周边环境所导致的个人风险计算结果如图 6 所示。根据个人风险容许标准,对处于个人风险等值线 1×10^{-6} 覆盖范围内的居民区、办公场所、集市、小型饭店内的居民,其个人风险不可接受。对于处于个人风险等值线 3×10^{-7} 覆盖范围内的重庆市綦江区土台学校小学部和初中部,其个人风险不可接受。

3.3.2 社会风险计算结果

双阳食品公司液氨使用、储存对周边环境所造成的社会风险曲线如图 7 所示。社会风险曲线处于可容许区和 ALARA 区,没有进入不可容许区。项目周边居民发生 400 人以下死亡事故的累积风险约为 $1\times 10^{-6}/a$,400~550 人死亡事故的累积风险约为 $5\times 10^{-7}/a$,550~600 人死亡事故的累积风险约为 $8\times 10^{-8}/a$,存在发生大量人员伤亡的重大事故风险,但概率相对较低。

双阳食品公司液氨使用、储存对周边环境所导致的社会风险处于可容许的范围之内,但处于尽可能降低区,须采取相应的安全措施,以降低社会风险。

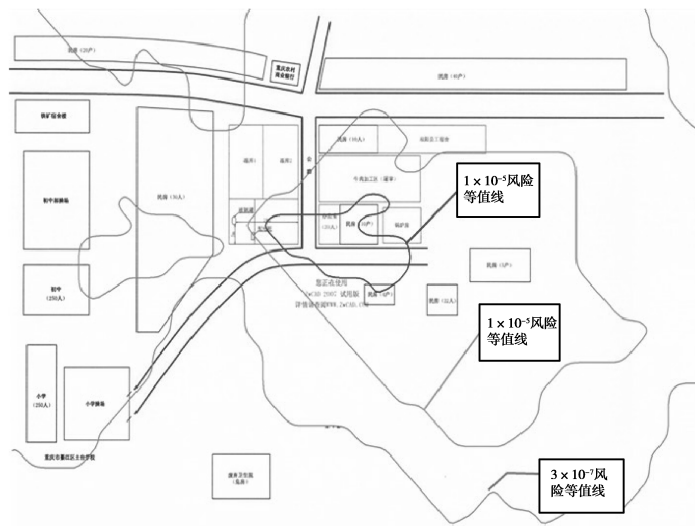


图 6 个人风险计算结果

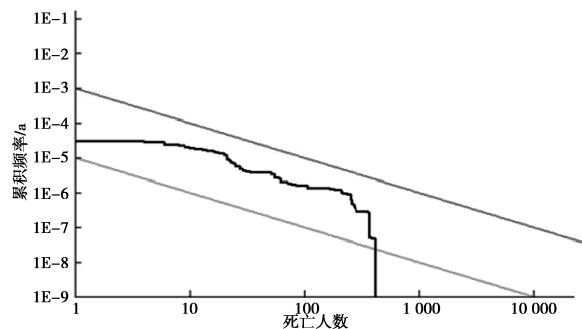


图 7 社会风险曲线计算结果

4 结论与建议

4.1 评估结论

公司液氨泄漏事故后果最严重将形成 242 m 的死亡半径、294 m 的重伤半径和 350 m 的轻伤半径。发生事故可能性较大的事故模式为管道小孔泄漏,在静风条件下的死亡半径为 26 m、重伤半径为 39 m、轻伤半径为 53 m。处于个人风险等值线 1×10^{-6} 覆盖范围内的居民区、办公场所、集市、小型饭店内的居民,其个人风险不可接受;处于个人风险等值线 3×10^{-7} 覆盖范围内的重庆市綦江区土台学校小学部和初中部,其个人风险不可接受。液氨泄露事故的社会风险曲线处于可容许区和 ALARA 区,没有进入不可容许区,存在发生大量人员伤亡的重大事故风险,但概率相对较低。

4.2 建议

双阳食品公司周边敏感目标较多,距离不足的问题是随着乡镇的发展而逐渐形成的。对公司液氨使用、储存系统进行大规模改造和整改不会明显降低其个人风险值。鉴于以上原因,建议双阳食品公司计划搬迁。在双阳食品公司完成搬迁之前,应采取相应的工程技术措施和安全管理措施,尤其是事故应急措施,以降低生产安全事故风险。建议相关监管部门在双阳食品公司完成搬迁之前,对双阳食品公司应采取的有关安全措施的落实情况进行监督检查,督促双阳食品公司对事故应急预案进行修订、备案与演练。

参考文献:

- [1] 柳红卫,黄沿波.液氨泄漏风险评估和风险分级方法[J].安全与环境工程,2010,17(1):70-74
- [2] 曾小红,毕海普,甘元庆.灰色理论在我国化工园区事故预测中的应用[J].重庆工商大学学报:自然科学版,2011,28(2):186-190
- [3] 赵庆跃.轻视安全必尝恶果!——吉林省长春市宝源丰禽业有限公司“6·3”特别重大火灾爆炸事故案例分析[J].吉林劳动保护,2013(7):32-35
- [4] 国家安全监管总局监管三司.突出重点加强管理——《首批重点监管的危险化学品名录》解读[J].劳动保护,2011(8):16-17
- [5] 杜喜臣,蔡敏琦.液氨泄漏事故树分析及风险预测[J].环境工程学报,2008,10(2):1430-1432
- [6] 孟凡亭,吴欣甜,张苗,等.液氨泄漏爆炸的模糊事故树分析研究[J].南开大学学报:自然科学版,2014(4):14-20
- [7] 陈杰,李文,邓利民,等.工艺流程中氨泄漏事故后果分类研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(1):157-160
- [8] 孙东亮,蒋军成,张明广.液氨储罐泄漏扩散模型的改进研究[J].工业安全与环保,2011,37(1):27-29
- [9] 张杰,赵明.液氨泄漏事故的定量风险评价研究[J].安全与环境工程,2012,19(1):69-72
- [10] 顾建伟,张小平,王颖.电厂脱硝工程液氨储罐泄漏环境风险分析[J].安全与环境学报,2012(6):108-112
- [11] 王洪德,莫朝霞.基于高斯模型的液氨储罐泄漏扩散仿真分析[J].中国安全科学学报,2012,22(9):102-106
- [12] 宋占兵,于立见,多英全,等.定量风险评价在炼化一体化项目中的应用[J].中国安全生产科学技术,2011,7(5):91-95
- [13] 多英全,魏利军,于立见,等.基于风险的重大危险源选址规划研究[J].中国安全生产科学技术,2007,3(6):20-23
- [14] 吴宗之,多英全,魏利军,等.区域定量风险评价方法及其在城市重大危险源安全规划中的应用[J].中国工程科学,2006,8(4):46-49
- [15] 翁韬,朱霁平,麻名更,等.城市重大危险源区域风险评价研究[J].中国工程科学,2006,8(9):80-84
- [16] BOULT M. Risk Management of LPG Transport Activities in Hong Kong[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 71: 85-100
- [17] ELSAYED T, LEHETA H, SHEHADEH M. Multi-attribute Risk Assessment of LNG Carriers During Loading/offloading at Terminals[J]. Ships and Offshore Structures, 2009, 4(2): 127-131
- [18] 王新.天然气管道泄漏扩散事故危害评价[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010
- [19] 冯云飞,吴明,闫明龙,等.燃气管道泄漏模型的研究进展[J].当代化工,2011,40(12):1255-1257
- [20] 冯文兴,王兆芹,程五一.高压输气管道小孔与大孔泄漏模型比较分析[J].安全与环境工程,2009,16(4):108-110
- [21] 张毅,沈郁,于安峰,等.油品码头定量风险评估方法及应用[J].工业安全与环保,2014,40(1):79-81
- [22] 高建明,王喜奎,曾明荣.个人风险和社会风险可接受标准研究进展及启示[J].中国安全生产科学技术,2007,3(3):29-34

Simulation Analysis and Quantitative Risk Assessment of Liquid Ammonia Tank Leakage Accidents

ZHOU Yu-xi¹, CAI Zhi-yong¹, WANG Wen-song^{2*}

(1.Chongqing Safety Engineering Institute, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2.College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Based on the major hazard quantitative risk assessment software CASST-QRA V2.0, liquid ammonia storage tank of Shuangyang Foods Co., Limited in Chongqing is taken as the project case by this paper, liquid ammonia leakage accident result is calculated by simulation, and the risk and acceptability on the surrounding environment is quantitatively analyzed. Research results provide not only guidance and basis for safety management of the company and safety supervision of the relevant administrative departments, but also reference for management and operation of other liquid ammonia tank.

Key words: liquid ammonia; leakage; accidents; quantitative risk assessment; simulation analysis