

大藤峡水利枢纽工程液氨泄漏风险预测与评价

闭小棉¹ 吴文强²

1. 广西大藤峡水利枢纽开发有限责任公司; 2. 中国水利水电科学研究院

摘要: 大藤峡水利枢纽建设混凝土降温工艺中液氨是工程最大的风险源。为科学评估液氨泄漏事件的风险, 运用SLAB大气模型, 设定预测范围与风险受体、事故源强参数、气象参数、大气毒性终点浓度值等, 进行液氨泄漏预测分析, 模拟计算出最不利气象条件、最常见气象参数条件液氨扩散变化情景, 得到24个特殊敏感点受泄漏事件影响的时序浓度过程, 结果表明, 最不利条件大气终点浓度1超出最大距离为1014m, 耗时1170秒, 同时本研究还对危害区域范围进行实地模拟, 对液氨泄漏导致的事故后果进行等级划分, 为液氨泄漏事故应急管理及企业安全决策提供可靠依据。

关键词: 大藤峡; 液氨; SLAB大气模型; 风险预测
【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.13.052

一、前言

大藤峡水利枢纽位于珠江流域西江水系的黔江河段, 坝址在广西桂平市黔江彩虹桥上游6.6km处。工程作为国务院确定的172项节水供水重大水利工程的标志性工程, 集防洪、航运、发电、水资源配置、灌溉等综合效益于一体, 是珠江流域关键控制性水利枢纽。工程规模为I等大(1)型工程。大藤峡水利枢纽建设过程中, 左岸中水八局拌和系统设置有2个拌和楼, 生产规模分别为180m³/h, 内设有液氨制冷系统, 液氨制冷车间存储均采用卧罐形式, 共有液氨储罐4个, 单罐容积15m³, 高压循环桶5个, 单罐容积15m³, 加上管道中存量, 合计储量75m³。

工业制冷系统液氨泄漏致死伤事件时有发生, 例如2013年6月3日, 吉林省长春市吉林宝源丰禽业有限公司液氨泄漏爆炸事故, 共造成121人死亡、76人受伤, 直接经济损失1.82亿元^[1]。根据应急管理部统计103起重(特)大典型泄漏事故中, 液氨泄漏发生次数最高^[2]。氨气为2类有毒气体, 液氨无色透明流动液体, 有特殊的刺激气味(臭), 易溶于水、乙醇、乙醚, 具有易燃、有毒、具有刺激性, 在氧气中能燃烧分解。对人体具有毒性, 当氨的浓度在0.5~1%时, 人在环境中停留30分钟就会患重症或死亡。当氨的浓度达到15.2~27%时, 遇明火即有爆炸的危险。液氨泄漏扩散途径主要为液氨泄漏氨气或蒸汽云爆炸产生的毒气均通过空气传输扩散, 若在工程施工过程中发生液氨泄漏突发环境事故, 将对工程区域参建单位、周边村民造成影响。加强风险管理, 确保在环境污染事故发生时及时予以控制, 保护工程区域生态环境。

二、研究方法

(一) 典型事故设计

1. 泄漏速率

典型事故为常温常压下一个储液氨罐与输送管道的连接处(接头)发生泄漏, 连接管道管径100mm, 设定泄漏孔径为管径的100%, 对于高压(低温)液化储罐, 当裂口处位于液相空间时, 尽管液体流出并可能发生闪蒸, 但由于液体的流出阻力大, 内压下降速度缓慢, 储罐内过热液体不会发生蒸汽爆炸。闪蒸所需能量来自过热液体中所储存的能量, 即 $Q = mC_p(T_0 - T_b)$, m 为过热液体的质量, C_p 是液体的定压热容, T_0 是降压前液体的温度, T_b 是降压后液体的沸点。当 Q 远远小于液体的蒸发热 ΔH_v 时, 可认为泄漏的液体不会发生闪蒸, 此时的瞬时泄漏量用流体力学的伯努利方程计算:

$$Q_L = C_d A_p \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{\rho} + 2gh}$$

$$W_T = Q_L \cdot t$$

式中: Q_L ——液体泄漏速度, kg/s;

C_d ——泄漏系数, 取0.62;

A ——裂口面积, 取连接管径的100%;

ρ ——泄漏液体密度, 658.5kg/m³;

P ——设备内物质压力, 1720000Pa;

P_0 ——环境压力, 取当地多年平均气压101000Pa;

g ——重力加速度, 9.81m/s²;

h ——裂口之上液位高度, 取最高液位2m;

t ——泄漏时间, s。

计算结果: 典型情景液氨泄漏速率最大为15.70kg/s。

2. 泄漏量

由于氨的比重在标准状态下是0.59 kg/m³仅为空气的54.6%, 而且其扩散能力较强, 它难以聚集到爆炸极限的浓度, 因此, 评价主要针对液氨发生泄漏后, 氨气烟团对于下风向环境的影响进行预测分析。假定泄漏10 min后采取应急措施切断泄漏源, 最大泄漏量达到 $W_T=8406\text{kg}$, 549秒内可以全部泄漏完一个储存罐。对于液氨加压液化气体的泄漏, 由于液氨的标况下的沸点为-33.5℃, 过热液体低于周围环境温度时, 液体经过裂口时由于压力较小而突然蒸发, 考虑闪蒸时带走液滴的量, 液体蒸发量为93.66 kg/s, 泄漏量即为蒸发量。

(二) 气体扩散模型选择

根据《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ 169-2018)(以下简称《导则》)推荐方法^[3], 液氨泄

漏气体为重质气体，应选取SLAB模型进行大气风险预测。SLAB大气模型是大气环境风险评价过程中使用频率较高的模型。

SLAB模型是由美国能源部的劳伦斯利弗莫尔(Lawrence Livermore)国家实验室开发的，通过云层分布的空间平均浓度和某些假定分布函数来计算时间平均扩散气体浓度。模型以空气卷吸作用为假设前提，计算大气湍流云层混合和源于地面摩擦影响的垂直风速变化。SLAB 瞬时烟团模型建立在质量、动量、能量和元素等守恒方程基础上，用空气携带概念来理解周围大气中涡流扩散云团。烟团模型方程为：

$$C(x, y, z, t) = 4 \cdot B_x \cdot B_y \cdot h \cdot C(t) \cdot C_1(x - X_c \cdot b_x \cdot \beta_x) \cdot C_1(y - b_y \cdot \beta_y) \cdot C_2(z - Z_c \cdot \sigma)$$

式中：C(t)为出口处平均体积浓度；C₁(y, b_y, β_y)为侧风向浓度；C₂(z, Z_c, σ)为垂直风向浓度；b_y、β_y、Z_c、σ为时刻t的函数；X_c为烟团质量中心；B_x和b_x为烟团长度；B_y和b_y为烟团宽度^[4]。

(三) 风险评价标准

根据《导则》附录H.1重点关注的危险物质大气毒性终点浓度值选取分为1、2级。其中1级为当大气中氨气浓度低于770mg/m³时，绝大多数人员暴露1h不会对生命造成威胁，当超过该限值时，有可能对人群造成生命威胁；2级为当大气中氨气浓度低于110mg/m³时，暴露1h一般不会对人体造成不可逆的伤害，或出现的症状一般不会损伤该个体采取有效防护措施的能力。

三、风险事故影响预测模拟

(一) 预测范围与计算点

(1) 预测范围即预测物质浓度达到评价标准时的最大影响范围，预测范围一般不超过10 km^[5]。本次模型设置范围是以液氨车间为中心，半径范围10km的区域。

(2) 计算点主要为特殊计算点。根据环境风险受体调查评估范围的规定^[6]，涉及大气环境风险受体的调查评估范围为周边5km内的区域。根据液氨车间周边村庄与建设单位分布情况设置了周边24个特殊敏感点，其中5km范围内较大规模敏感目标16处，见表3-1，另外还有小规模施工附属设施及自然村屯80余处。

表3-1 风险评价范围内主要大气环境敏感目标

编号	主要敏感目标	与风险源方位、距离	人口数(人)
坝区左岸			
1	联江村	NW, 3100m	3235
2	金龙村	N, 4100 m	3435
3	新村	N, 4400 m	4054
4	弩滩村	N, 2500 m	6280
5	洛莲村	N, 2200m	4558
6	黎明村	E, 2900m	5050

编号	主要敏感目标	与风险源方位、距离	人口数(人)
7	樟村	ES, 5000m	2200
8	中水八局砂石项目部	WN, 230m	160
9	葛洲坝船闸项目部	ES, 500m	650
10	桂平移民指挥部、金结加工厂	ES, 2000m	256
11	永久营地	ES, 3100m	340
12	八局厂坝机电金结厂	ES, 3300m	330
13	大藤峡公司	ES, 2000m	350
坝区右岸			
1	白兰村	S, 1800m	6000
2	前进村	S, 4100m	1757
3	中水八局右岸项目部	S, 1500m	1520

(二) 事故源参数

以中水八局液氨车间单罐15m³储量液氨罐管道接口泄漏为典型事故。事故源参数，详表3-2。应急堵漏时间为10分钟，平均浓度扩散时间分别设定为10分钟、20分钟、30分钟、1小时、2小时、3小时、4小时、5小时、10小时、24小时。

(三) 气象参数

桂平市最不利气象条件，取F类稳定度，1.5 m/s风速，温度25℃，相对湿度50%；最常见气象条件，多年统计常见风向为SSW，风速1.2m/s，近10年日最高平均气温37℃，年平均湿度79%。

四、预测结果与评价

(一) 最不利气象条件预测

1. 下风向预测

在最不利气象条件下，事故发生10分钟截断事故源。伴随截断泄漏污染源，终点浓度1、2范围逐渐缩小，下风向氨气浓度除去喷射口附近外，在11.8m处达到最高浓度82431.7mg/m³，至1380m处浓度降为6.67mg/m³。大气终点浓度1超出最大距离为1014m，耗时1170秒；大气终点浓度2超出最大距离为1322.2m，耗时1340秒。泄漏1小时后，终点浓度1超出最大距离已经收缩至厂区内130.7m范围，终点浓度2超出最大距离已经收缩至696.15m范围；至2小时，终点浓度1超出最大距离已经收缩至泄漏口60m范围内，终点浓度2超出最大距离已经收缩至482.56m范围；至泄漏事故10小时后，所有氨气已经基本扩散消失。

在最大大气1级终点浓度伤害半径范围内包括了大成塘移民安置点、八局厂坝拌和系统、葛洲坝钢筋加工厂、葛洲坝船闸项目部、中水八局右岸项目部，涉及人口约2500人；2级终点浓度伤害半径又扩散至桂梗岭屯、船闸与大藤峡左岸厂坝建筑物，涉及人口约3000人。

表3-2 事故源参数表

容器名称:	中水八局液氨储罐	位置(经度)	110.05	位置(纬度)	23.456626
容器距地面高度(m)	2	容器体积(m ³)	15	容器装填度(%)	85
容器压力P(Pa)	1002035	环境压力P ₀ (Pa)	101325	容器内物质	氨
混合物温度(℃)	25	分子量M(kg/mol)	0.017	常压下沸点温度(℃)	-33.43
液体密度(kg/m ³)	660	液体定压比热容CP(J/kgK):	4665	汽化热(J/kg):	1166742
液体燃烧热(J/kg):	18603000	饱和气压常数(SPB):	-1	饱和气压常数(SPC):	0
伤害概率参数At:	7.93668	伤害概率参数Bt:	1	伤害概率参数n:	2
大气终点浓度2(mg/m ³):	110	大气终点浓度1(mg/m ³):	770		

2. 敏感点氨气浓度随时间变化

根据模拟结果, 距离泄漏点较近受影响的关心点主要是八局拌和系统与葛洲坝拌和系统(砂石料拌和系统厂区)、大成塘移民安置点、葛洲坝钢筋加工厂、葛洲坝船闸项目部、中水八局砂石项目部、桂梗岭屯。

砂石料拌和系统250秒至1040秒之间浓度达到最大8230mg/m³, 17分35秒浓度降至2级终点浓度。葛洲坝钢筋加工厂350秒至1200秒之间浓度达到最大5806mg/m³, 20分5秒浓度降至2级终点浓度。大成塘移民安置点670秒至1760秒之间浓度达到最大2200mg/m³, 29分30秒浓度降至2级终点浓度。葛洲坝船闸项目部590秒至1600秒之间浓度达到最大2771mg/m³, 26分50秒浓度降至2级终点浓度。中水八局砂石项目部820秒至1970秒之间浓度达到最大1685mg/m³, 33分5秒浓度降至2级终点浓度。桂梗岭屯930秒至2350秒之间浓度达到最大179mg/m³, 39分15秒浓度降至2级终点浓度。

(二) 最常见气象参数条件预测

1. 下风向预测

在最常见气象条件下, 10分钟切断污染源。扩散发生10分钟时, 下风向氨气浓度除去喷射口附近外, 在7.23m处达到最高浓度115755.1mg/m³, 至4560m处浓度为7.9mg/m³。

在最常见气象条件下, 大气终点浓度1超出最大距离为364.9m, 耗时549秒; 大气终点浓度2超出最大距离为1091m, 耗时997秒。伴随截断泄漏污染源, 终点浓度1、2范围逐渐缩小。泄漏1小时后, 终点浓度1超出最大距离已经收缩至厂区内60.88m范围, 终点浓度2超出最大距离已经收缩至193.13m范围; 至2小时, 终点浓度1收缩至泄漏口37m范围内, 终点浓度2缩小至128.8m; 至泄漏事故10小时后, 终点浓度1的影响范围基本消失, 终点浓度2缩小至47.4m。

2. 敏感点氨气浓度随时间变化

根据模拟结果, 距离泄漏点较近受影响的关心点主要是中水八局拌和系统与葛洲坝拌和系统(砂石料拌和系统厂区)、大成塘移民安置点、葛洲坝钢筋加工厂、葛洲坝船闸项目部、中水八局砂石项目部、桂梗岭屯。

砂石料拌和系统180秒至890秒之间浓度达到最大

2810mg/m³, 15分40秒浓度降至2级终点浓度。葛洲坝钢筋加工厂250秒至1000秒之间浓度达到最大1558mg/m³, 16分50秒浓度降至2级终点浓度。大成塘移民安置点490秒至1250秒之间浓度达到最大355mg/m³, 21分8秒浓度降至2级终点浓度。葛洲坝船闸项目部420秒至1180秒之间浓度达到最大507mg/m³, 19分50秒浓度降至2级终点浓度。中水八局砂石项目部590秒至1370秒之间浓度达到最大223mg/m³, 23分10秒浓度降至2级终点浓度。桂梗岭屯770秒至1680秒之间浓度达到最大100mg/m³, 浓度始终低于2级终点浓度。

五、结论

(1) 在大藤峡水利枢纽施工建设过程中, 液氨制冷加工车间的事故应急措施保障条件下, 在最不利气象条件下, 泄漏事件氨气大气终点浓度1超出最大距离为1014m, 耗时1170秒; 大气终点浓度2超出最大距离为1322.2m, 耗时1340秒。液氨泄漏可能影响的范围最大为1322m, 主要影响人群为厂区内的参建单位职工及少量移民新村群众。

(2) 根据本研究模拟预测结果并据此合理设置应急专项预案进行演练, 可以提高事故时的应急反应能力救援工作水平, 做到有效预防、控制和消除突发风险事故的危害, 最大限度地减少事故带来的环境危害和损失, 保障生命财产安全。

参考文献

[1] 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, (07): 32-35.
 [2] 吴洁. 淮化液氨储罐泄漏扩散规律及风险区域研究[D]. 安徽理工大学, 2021(04): 80.
 [3] 马飞. 建设项目环境影响评价过程中风险评价技术导则的应用研究[J]. 环境与发展. 2019, 31(12): 11-12
 [4] 杨静翎, 凌敏. SLAB模型在某工厂液氨泄漏应急响应中的应用[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(1): 102-106.
 [5] 徐中轩, 韩文辉, 孙辽东. 液氨储罐泄漏事故模拟及对策[J]. 石油化工设备技术. 2017, (4): 13-17.