

## 液氨储罐液体泄漏建模及分析

何娟霞<sup>1a</sup>, 周冬梅<sup>1a,2</sup>, 段青山<sup>1b</sup>, 马野<sup>1a</sup>

(1.广西大学 a.资源环境与材料学院 b.轻工与食品工程学院, 南宁 530004;  
2.中南大学 土木工程学院, 长沙 410075)

**摘要:** **目的** 为了分析液氨储罐纯液体泄漏后的事故影响, 探究液氨纯液体泄漏量的计算。**方法** 针对液氨储罐(卧罐、球罐及立式罐)液体泄漏罐压变化及不同类型储罐结构特征导致液面面积变化的特点, 利用范德瓦尔斯方程和流体力学方法, 建立液氨储罐液体泄漏模型。利用模型对3种液氨储罐液体泄漏进行数值模拟, 对比 PHAST 计算与模型模拟结果。**结论** 结果发现液面高度  $h_{v,s,h}$  的下降呈现先减缓后增大的趋势, 泄漏质量流率  $Q_{m-v,s,h}$  的下降幅度及泄漏质量  $m_{v,s,h}$  呈现先增加后减缓的趋势。泄漏初始时刻,  $Q_{m-v,s,h}$  值最大, 分别为 0.555, 0.553, 0.552 kg/s; 泄漏停止时,  $m_{v,s,h}$  值最大, 分别为 11.245 846, 11.084 621, 7.730 932 t。模型计算结果与 PHAST 模拟结果规律相似,  $Q_{m-v,s,h(max)}$  的偏差较小, 介于 16.577%~16.667%;  $m_{v,s,h}$  偏差差别较大, 立式罐、球罐及卧罐泄漏液体质量偏差分别为 4.565%, 5.764% 和 17.630%。**结论** 根据各参数的变化规律可得, 模型适于计算液氨储罐液体泄漏及风险分析。

**关键词:** 液氨储罐; 泄漏; 范德瓦尔斯方程; 模型; 数值模拟

**中图分类号:** TB489; X937 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)11-0211-09

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.11.031

## Modeling and Analysis of Liquid Leakage in Liquid Ammonia Tank

HE Juan-xia<sup>1a</sup>, ZHOU Dong-mei<sup>1a,2</sup>, DUAN Qing-shan<sup>1b</sup>, MA Ye<sup>1a</sup>

(1a.School of Resources, Environment and Materials b.College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2.School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to scientifically analyze the impact of the pure liquid leakage accident and explore the leakage calculation of pure liquid ammonia from the liquid ammonia storage tank. Based on Van der Waals equation and fluid mechanics method, the liquid leakage model of liquid ammonia tank was established considering the tank pressure change of liquid leakage in liquid ammonia tank (vertical tank, horizontal tank and spherical tank) and the characteristics of different types of tank structure features resulting in the change of liquid surface area. Numerical simulation of liquid leakage for three liquid ammonia tanks was performed by the model, which were then compared with PHAST simulation results. The results show that the decreased range of liquid level height  $h_{v,s,h}$  decreases slowly and then increases fastly, the decreased range of liquid leakage mass flow rate  $Q_{m-v,s,h}$ , as well as the increased range of liquid leakage mass  $m_{v,s,h}$ , decreases gradually and slowly. At the beginning of the leakage, the  $Q_{m-v,s,h}$  reached the maximum values of 0.555, 0.553, and 0.552 kg/s; at the end of leakage when tank leaks,  $m_{v,s,h}$  reached the maximum values of 11.245 846, 11.084 621, and 7.730 932 t, respectively. Model calculation results are similar to PHAST simulation results, the deviation of

收稿日期: 2020-10-05

基金项目: 广西科技厅重点研发计划(桂科 AB16380288)

作者简介: 何娟霞(1979—), 女, 博士, 广西大学讲师, 主要研究方向为城市公共安全、生产事故应急预案预防和化工设备失效分析。

$Q_{m-v,s,h(max)}$  was small and in the range of 16.577%~16.667%, while the deviation of  $m_{v,s,h}$  was relatively large, and the deviation of leakage liquid mass in vertical tank, spherical tank and horizontal tank were 4.565%, 5.764% and 17.630% respectively. From the analysis of parameters' variation, these model is suitable for calculation of liquid leakage in liquid ammonia tank and its risk analysis.

**KEY WORDS:** liquid ammonia tank; leakage; Van der Waals equation; model; numerical simulation

根据危险品事故信息网事故统计信息, 2009—2019年国内外共发生危化品事故 27 466 起; 其中危化品泄漏事故 13 220 起、氨泄漏事故 474 起<sup>[1]</sup>。利用科学方法预测危化品泄漏事故后果影响, 对危化品包装安全和事故应急救援工作具有重要的意义。氨是一种常见的工业原料和产物, 用于石油精炼、化肥、制药及冷库等行业。在工业领域中将加压、降温后的液氨储存, 常见的液氨储罐有立式储罐、球形储罐和卧式储罐。因液氨的腐蚀及挥发性, 当罐体结构失稳、失效时将导致液氨泄漏。因液氨罐体材质受应力、压力及外界环境等影响, 可能导致储罐失稳、失效近断裂<sup>[2]</sup>。液面以下罐壁因长期受介质的腐蚀和压力影响, 可能导致罐体结构失稳, 罐底因水分、盐分及微生物侵蚀影响, 加快了罐壁腐蚀速率<sup>[3]</sup>, 因此研究液氨储罐的液体泄漏过程各参数动态变化规律, 可为液氨储罐泄漏事故定量风险评估和现场救援提供计算分析依据, 有助于减少人员伤亡和财产损失。

目前, 针对危化品泄漏的研究可分为 3 类。第 1 类是针对泄漏过程中的动力学和热力学变化以及数学模型进行理论研究, 如: 潘旭海等<sup>[4]</sup>基于液氨泄漏过程的演化机理研究了液氨经储罐和管道孔洞泄漏; 李萍等<sup>[5]</sup>采用 Eulerian-Lagrangian 方法分析过热液体丙烷从喷嘴释放后射流的发展变化过程; Daniel 等<sup>[6]</sup>研究发现具有恒定截面积的矩形罐和立式罐泄漏后, 具有明确的数值解; 当球罐和卧罐泄漏时, 最大泄漏量会因泄漏孔距罐底的高度不同而不同。Körner 等<sup>[7]</sup>考虑泄漏时突然压降导致闪蒸液体的瞬态热力学不平衡状态, 分析温度场随时间的变化, 计算了液体温度和质量流率随时间的变化关系; Xie 等<sup>[8]</sup>对 LNG 储罐泄漏阶段和蒸汽扩散阶段的外部行为进行了详细分析, 提出了罐内压力、温度变化的快速计算方法。He 等<sup>[9]</sup>改进了储罐连续实时泄漏期间泄漏液池面积的计算方法, 实现了储罐泄漏快速探测报警计算。第 2 类是改进泄漏扩散理论模型并研究事故后果, 如: 孙东亮等<sup>[10]</sup>考虑液氨常压沸点的影响, 修正了泄漏过程压力变化与对应沸点的关系, 进而修正了液氨泄漏扩散模型, 经计算分析发现, 环境温度和罐内初始压力是影响计算的关键参数。李野<sup>[11]</sup>、曾晓<sup>[12]</sup>等根据各参数随时间的变化, 利用数值模拟对液氨卧罐泄漏液面高度变化进行了研究; Cavanaugh 等<sup>[13]</sup>根据泄漏后多组分的液池闪蒸、蒸发及气溶胶卷吸, 对立式罐

的泄漏模型进行了改进; Wu 等<sup>[14]</sup>分析了 LNG 储罐在泄漏过程中需要考虑压力、温度、罐内气液相态及泄漏孔的参数, 根据 LNG 的凝析液压力-体积-温度等变化关系, 提出了计算泄漏孔处压力、温度计泄漏质量流率的计算模型。第 3 类主要是通过设计实验, 模拟实际液体泄漏过程的变化规律, 如: 周超等<sup>[15]</sup>通过实验模拟立式罐液体孔洞泄漏过程, 分析了泄漏量、泄漏质量流率与泄漏时间的变化关系; 任荣亭等<sup>[16]</sup>通过建立压力容器泄漏模拟实验系统, 对不同流态下的泄漏速率、过程影响参数、泄漏后果检测等进行一系列实验, 分析了实际压力容器液体泄漏的变化规律; Zhu 等<sup>[17]</sup>通过分析 1.4 t LNG 泄漏扩散实验的气液相态转化、热传递及扩散浓度参数, 经对比模拟扩散参数发现, 实验与模拟的偏差主要是因泄漏源和大气扩散, 实验中甲烷浓度最大偏差为 4.1%、模拟浓度最大偏差为 4.6%。

虽然诸多学者对危化品泄漏领域进行了大量研究, 但现有危化品液体泄漏计算模型缺乏针对液氨特定储存容器泄漏的研究。由此, 文中根据液氨性质及不同类型储罐结构特征, 使用范德瓦尔斯方程<sup>[18]</sup>(即范氏方程)和罐体液面面积计算基本方程, 对罐内实时压力和液面面积进行修正<sup>[19]</sup>, 建立适用于不同类型储罐的液氨液体泄漏模型。最后利用模型对 3 种类型储罐的液氨泄漏进行模拟计算, 以验证模型的有效性。

## 1 数学模型

### 1.1 建模框架

泄漏质量流率是储罐泄漏后果计算的基础, 在计算时通常将储罐压力作为一个已知参数, 且将泄漏孔处压力视为大气压力。液氨具有特殊的理化性质及储存条件, 一旦液相区发生泄漏, 则罐内外压差导致液氨闪蒸, 且罐压会缓慢下降, 当闪蒸比例小于 0.1 时, 可忽略闪蒸, 视为液体泄漏<sup>[20]</sup>。不同类型储罐泄漏时液面面积变化会不同, 考虑到罐内实时压力和液面面积的变化, 提出以下假设条件: 泄漏孔位于液面以下, 闪蒸比例小于 0.1, 罐内温度不变。利用流体力学理论、范德瓦尔斯方程、液体不可压缩的假设条件, 定量分析泄漏过程各参数的变化, 根据液氨储罐不同罐体结构(见图 1), 建立液氨储罐液体泄漏模型, 液氨储罐液体泄漏建模流程见图 2。

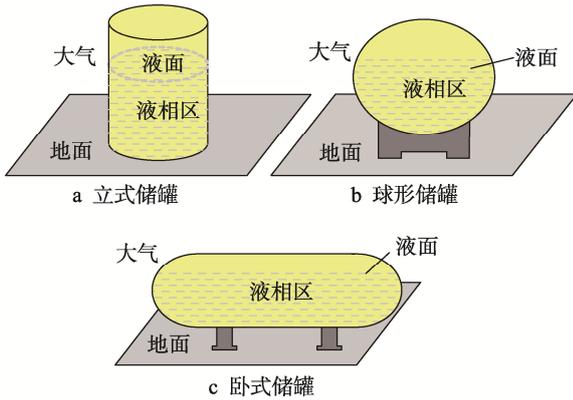


图 1 液氨储罐结构

Fig.1 Structure diagram of liquid ammonia tank

## 1.2 数学模型的修正

针对危化品泄漏事故控制,建立液氨储罐液体泄漏计算模型,该模型获取了 3 个基本参数:泄漏时间,估计泄漏持续时间和救援时限;泄漏质量流率,估计某一瞬间或某段时间泄漏量;泄漏质量,估计泄漏事故后果的影响范围。

### 1.2.1 液体泄漏质量流率

液体经储罐孔洞泄漏质量流率<sup>[21]</sup>为:

$$Q_{m-v,s,h} = \rho AC_0 \sqrt{2 \left[ \frac{p_{v,s,h} - p_0}{\rho} + gh_{L-v,s,h} \right]} \quad (1)$$

式中:  $Q_{m-v,s,h}$  为液体经储罐孔洞泄漏质量流率 (kg/s), 其中下标 v 代表立式罐, s 代表球罐, h 代表卧罐;  $\rho$  为液体密度 (kg/m<sup>3</sup>);  $A$  为泄漏孔面积 (m<sup>2</sup>);  $C_0$  为泄漏系数;  $p_{v,s,h}$  为罐内实时压力 (Pa);  $p_0$  为环

境压力 (Pa);  $g$  为重力加速度 (9.8 m/s<sup>2</sup>);  $h_{L-v,s,h}$  为泄漏孔上方液面高度 (m)。

液氨储罐泄漏时罐内压力不断变化,利用范德瓦尔斯方程修正储罐内的实时压力<sup>[22]</sup>,得到式(2)所示的罐内实时压力:

$$P_{v,s,h} = \frac{\left( P_n + \frac{an_0^2}{V_0^2} \right) (V_0 - n_0b)}{V_0 + A'_{v,s,h} (h_{0-v,s,h} - h_{v,s,h}) - n_0b} - \frac{an_0^2}{[V_0 + A'_{v,s,h} (h_{0-v,s,h} - h_{v,s,h})]^2} \quad h_1 - d/2 \leq h_{v,s,h} \leq h_{0-v,s,h} \quad (2)$$

式中:  $p_n$  为初始罐压 (Pa);  $a, b$  为修正量, 分别取 0.424 J·m<sup>3</sup>/mol<sup>2</sup>, 3.73×10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>/mol;  $n_0$  为罐内初始气体物质的量 (mol);  $V_0$  为罐内初始气体的体积 (m<sup>3</sup>);  $A'_{v,s,h}$  为罐内液面面积 (m<sup>2</sup>);  $d$  为泄漏孔直径 (m);  $h_{v,s,h}$  为罐内液面高度 (m);  $h_{0-v,s,h}$  为初始液面高度 (m)。

立式罐泄漏后任意时刻罐内液面形状为面积不变的圆形, 根据圆面积计算公式可得:

$$A'_v = \pi R_v^2 \quad (3)$$

式中:  $A'_v$  为立式罐罐内液面面积 (m<sup>2</sup>);  $R_v$  为立式罐底面半径 (m)。

球罐泄漏后任意时刻罐内液面形状与立式罐相似, 均为圆形, 但球罐罐内液面面积不断变化, 可按照式(4)计算。

$$A'_s = \pi [R_s^2 - (h_s - R_s)^2] \quad h_1 - d/2 \leq h_s \leq h_{0-s} \quad (4)$$

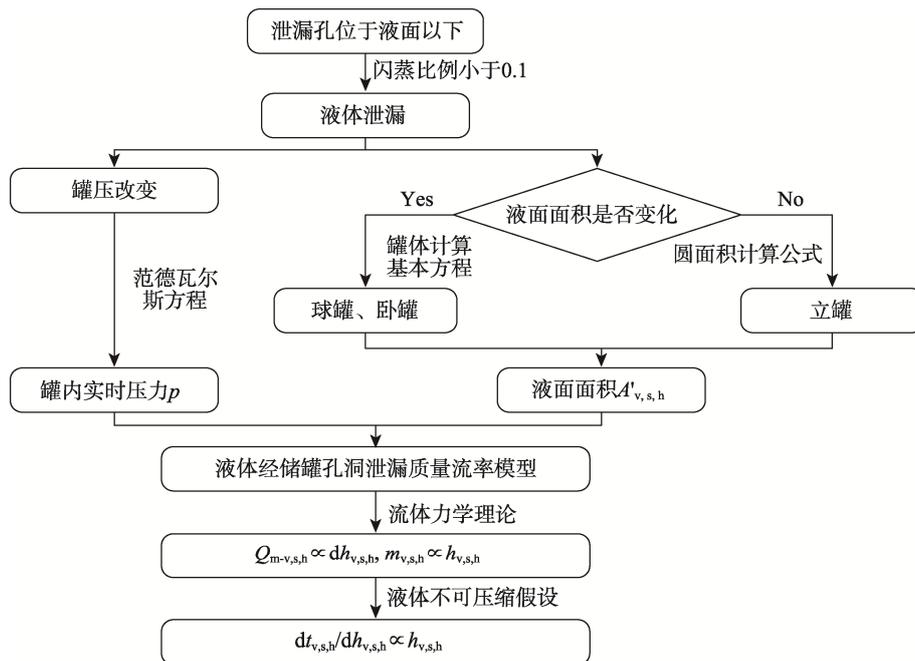


图 2 液氨储罐液体泄漏建模流程

Fig.2 Modeling flow chart of liquid leakage in liquid ammonia tank

式中： $A'_s$ 为球罐罐内液面面积（ $m^2$ ）； $R_s$ 为球罐半径（ $m$ ）。

卧罐泄漏后任意时刻罐内液面面积不断变化，其液面由垂直截面的半径为  $R_h$ 、长为  $L_1$  的圆柱体和两端半径为  $R_h$  的半球构成，可按照式（5）计算。

$$A'_h = 2L\sqrt{R_h^2 - (h_h - R_h)^2} + (\pi - 4)[R_h^2 - (h_h - R_h)^2] \quad (5)$$

$$h_1 - d/2 \leq h_h \leq h_{0-h}$$

式中： $A'_h$ 为卧罐罐内液面面积（ $m^2$ ）； $L$ 为卧罐罐长（ $m$ ）； $R_h$ 为储罐垂直截面半径（ $m$ ）。

分别将式（2）和式（3），式（2）和式（4），式

$$Q_{m-s} = \rho AC_0 \left\{ 2 \cdot \left[ \frac{\left( p_n + \frac{an_0^2}{V_0^2} \right) (V_0 - n_0b)}{\rho V_0 + \rho \pi [R_s^2 - (h_s - R_s)^2] (h_{0-s} - h_s) - \rho n_0b} - \frac{an_0^2}{\rho [V_0 + \pi [R_s^2 - (h_s - R_s)^2] (h_{0-s} - h_s)]^2} - \frac{p_0}{\rho} + g \left( h_s - h_1 - \frac{d}{2} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$h_1 - d/2 \leq h_s \leq h_{0-s}$$

$$Q_{m-h} = \rho AC_0 \left\{ 2 \cdot \left[ \frac{\left( p_n + \frac{an_0^2}{V_0^2} \right) (V_0 - n_0b)}{\rho V_0 + \rho \left[ 2L\sqrt{R_h^2 - (h_h - R_h)^2} + (\pi - 4)(R_h^2 - (h_h - R_h)^2) \right] (h_{0-h} - h_h) - \rho n_0b} - \frac{an_0^2}{\rho \left\{ V_0 + \left[ 2L\sqrt{R_h^2 - (h_h - R_h)^2} + (\pi - 4)(R_h^2 - (h_h - R_h)^2) \right] (h_{0-h} - h_h) \right\}^2} - \frac{p_0}{\rho} + g \left( h_h - h_1 - \frac{d}{2} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$h_1 - d/2 \leq h_h \leq h_{0-h}$$

式中： $h_1$ 为泄漏孔中心距储罐底部高度（ $m$ ）。

### 1.2.2 泄漏液体质量

当储罐泄漏后，认为液态氨不可压缩，则泄漏液体质量的微小变化可表示为：

$$dm_{v,s,h} = -\rho A'(h_{v,s,h}) dh_{v,s,h} \quad h_1 - d/2 \leq h_{v,s,h} \leq h_{0-v,s,h} \quad (9)$$

式中： $dm_{v,s,h}$ 为泄漏液体质量的微小变化； $A'(h_{v,s,h})$ 为液面高度  $h_{v,s,h}$  对应的液面面积（ $m^2$ ）； $dh_{v,s,h}$ 为液面高度的微小变化（ $m$ ）。

分别将式（3—5）代入式（9），整理得到液氨立式罐泄漏液体质量的微小变化  $dm_v$ ，液氨球罐泄漏液体质量的微小变化  $dm_s$  和液氨卧罐泄漏液体质量的微小变化  $dm_h$ ：

$$dm_v = -\rho \pi R_v^2 dh_v \quad h_1 - d/2 \leq h_v \leq h_{0-v} \quad (10)$$

$$dm_s = -\rho \pi [R_s^2 - (h_s - R_s)^2] dh_s \quad h_1 - d/2 \leq h_s \leq h_{0-s} \quad (11)$$

$$dm_h = -\rho \left\{ 2L\sqrt{R_h^2 - (h_h - R_h)^2} + (\pi - 4)[R_h^2 - (h_h - R_h)^2] \right\} dh_h \quad h_1 - d/2 \leq h_h \leq h_{0-h} \quad (12)$$

（2）和式（5）分别代入式（1），整理得到液氨立式罐液体泄漏质量流率  $Q_{m-v}$ ，见式（6）；液氨球罐液体泄漏质量流率  $Q_{m-s}$ ，见式（7），液氨卧罐液体泄漏质量流率  $Q_{m-h}$ ，见式（8）。

$$Q_{m-v} = \rho AC_0 \left\{ 2 \cdot \left[ \frac{\left( p_n + \frac{an_0^2}{V_0^2} \right) (V_0 - n_0b)}{\rho V_0 + \rho \pi R_v^2 (h_{0-v} - h_v) - \rho n_0b} - \frac{an_0^2}{\rho [V_0 + \pi R_v^2 (h_{0-v} - h_v)]^2} - \frac{p_0}{\rho} + g \left( h_v - h_1 - \frac{d}{2} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$h_1 - d/2 \leq h_v \leq h_{0-v}$$

分别对上式进行不定积分，整理得到液氨立式罐泄漏液体质量  $m_v$ （式（13））、液氨球罐泄漏液体质量  $m_s$ （式（14））和液氨卧罐液泄漏液体质量  $m_h$ （式（15））。

$$m_v = -\rho \pi R_v^2 h_v + C_v \quad h_1 - d/2 \leq h_v \leq h_{0-v} \quad (13)$$

$$m_s = \frac{1}{3} \rho \pi h_s^3 - \rho \pi R_s h_s^2 + C_s \quad h_1 - d/2 \leq h_s \leq h_{0-s} \quad (14)$$

$$m_h = \rho L R_h^2 \arctan \left[ \frac{R_h - h_h}{\sqrt{h_h(2R_h - h_h)}} \right] - \rho L (h_h - R_h) \sqrt{h_h(2R_h - h_h)} - \rho (0.2866666667 h_h^3 - 0.86 R_h h_h^2 - 0.2866666667 R_h^3) + C_h \quad (15)$$

$$h_1 - d/2 \leq h_h \leq h_{0-h}$$

式中： $C_v$ 、 $C_s$ 和  $C_h$ 为根据不同罐体泄漏场景确定的常数。

### 1.2.3 液面高度与泄漏时间

分析连续实时泄漏阶段泄漏液体质量  $m$  与泄漏时间  $t$  的关系，则有：

$$Q_{m-v,s,h} = -\frac{dm_{v,s,h}}{dt_{v,s,h}} \quad (16)$$

式中： $dt_{v,s,h}$  为泄漏时间的微小变化 (s)。

分别联立式 (6, 10, 16), 式 (7, 11, 16) 以及式 (8, 12, 16), 整理得到液氨立式罐、球罐和卧罐泄漏时液面高度与泄漏时间的微分关系, 见式 (17—19)。

$$\frac{dt_v}{dh_v} = \frac{\pi R_v^2}{\sqrt{2}AC_0} \cdot \left\{ \frac{\left(P_n + \frac{an_0^2}{V_0^2}\right)(V_0 - n_0b)}{\rho V_0 + \rho\pi R_v^2(h_{0-v} - h_v) - \rho n_0b} - \frac{an_0^2}{\rho[V_0 + \pi R_v^2(h_{0-v} - h_v)]^2} - \frac{P_0}{\rho} + g\left(h_v - h_1 - \frac{d}{2}\right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$h_1 - d/2 \leq h_v \leq h_{0-v}$

$$\frac{dt_s}{dh_s} = \frac{\pi[R_s^2 - (h_s - R_s)^2]}{\sqrt{2}AC_0} \cdot \left\{ \frac{\left(P_n + \frac{an_0^2}{V_0^2}\right)(V_0 - n_0b)}{\rho V_0 + \rho\pi[R_s^2 - (h_s - R_s)^2](h_{0-s} - h_s) - \rho n_0b} - \frac{an_0^2}{\rho[V_0 + \pi[R_s^2 - (h_s - R_s)^2](h_{0-s} - h_s)]^2} - \frac{P_0}{\rho} + g\left(h_s - h_1 - \frac{d}{2}\right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$h_1 - d/2 \leq h_s \leq h_{0-s}$

$$\frac{dt_h}{dh_h} = \frac{2L\sqrt{R_h^2 - (h_h - R_h)^2} + (\pi - 4)[R_h^2 - (h_h - R_h)^2]}{\sqrt{2}AC_0} \cdot \left\{ \frac{\left(P_n + \frac{an_0^2}{V_0^2}\right)(V_0 - n_0b)}{\rho V_0 + \rho\left[2L\sqrt{R_h^2 - (h_h - R_h)^2} + (\pi - 4)(R_h^2 - (h_h - R_h)^2)\right](h_{0-h} - h_h) - \rho n_0b} - \frac{an_0^2}{\rho\left\{V_0 + \left[2L\sqrt{R_h^2 - (h_h - R_h)^2} + (\pi - 4)(R_h^2 - (h_h - R_h)^2)\right](h_{0-h} - h_h)\right\}^2} - \frac{P_0}{\rho} + g\left(h_h - h_1 - \frac{d}{2}\right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$h_1 - d/2 \leq h_h \leq h_{0-h}$

## 2 计算结果与验证

利用构建模型计算卧罐、球罐、立式罐的液体泄漏并分析各参数的变化规律。液氨储罐泄漏的关键参数见表 1。

### 2.1 计算结果与讨论

根据式 (17—19), 计算表 1 液氨储罐泄漏场景, 利用 Origin 软件对计算结果作图, 得到液面下降单位高度所需时间与液面高度的变化规律, 见图 3。立式

罐罐内液面面积恒定, 泄漏孔处主要受泄漏孔上方液体压力的影响, 泄漏时泄漏孔处因上方液体减少而导致压力降低, 使得液体泄漏速率随之减小, 因此每下降单位液面高度所需时间与液面高度几乎呈线性变化, 且在一定范围内稳定增加。球罐罐内液面面积先增大后减小, 泄漏孔上方液体逐渐减小, 但前者影响大于后者, 使得单位液面下降高度所需时间随液面高度先增大后减小, 存在峰值。卧罐结构特征与球罐相似, 但在该泄漏场景下, 后者影响大于前者, 故单位液面下降高度所需时间随液面高度下降而增加的幅度逐渐减缓。

表 1 液氨储罐泄漏关键参数

Tab.1 Critical Parameters for leakage of liquid ammonia tank

储罐类型	储存物料	容积/ m <sup>3</sup>	规格/ m	充装系数	液体泄漏系数	罐内初始液面高度/m	储存温度/°C	储存压力/MPa	环境压力/MPa	泄漏孔直径/mm	泄漏孔中心距罐底部高度/m
立式储罐			φ2.5×6			4.8					
球形储罐	液氨	30	φ3.84	0.8	0.65	2.7	25	1.65	0.1	5	1
卧式储罐			φ2.6×5.6			1.95					

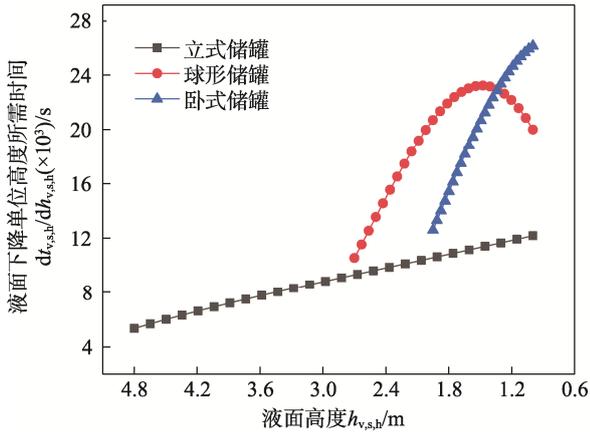


图3 液面下降单位高度所需时间与液面高度关系  
Fig.3 Relationship between  $dt_{v,s,h}/dh_{v,s,h}$  and  $h_{v,s,h}$

在图3中以液面高度  $h_{v,s,h}=1\text{ cm}$  为步长, 则其曲线下的面积为液面高度下降  $1\text{ cm}$  所需的时间, 计算得到  $h_{v,s,h}-dt_{v,s,h}/dh_{v,s,h}$  曲线下的面积。对按照该方法得到的面积值作图, 得到液面高度  $h_{v,s,h}$  与对应泄漏时间  $t_{v,s,h}$  之间的变化规律见图4。对图4曲线数据进行拟合分析, 得到  $h_{v,s,h}$  与  $t_{v,s,h}$  的拟合关系见式(20—22)。储罐泄漏后, 当液面下降到泄漏孔处, 泄漏停止。通过分析计算得到液氨立式罐液体泄漏持续时间为  $33\ 831.192\text{ s}$ , 球罐为  $33\ 120.718\text{ s}$ , 卧罐为  $19\ 453.773\text{ s}$ 。图4中  $h_{v,h}$  随  $t_{v,h}$  的下降趋势减缓以及  $h_s$  随  $t_s$  的下降趋势先减缓后变大的变化规律, 均受到罐内液面面积变化和泄漏孔上方液体压力的影响。

$$h_v = -2.8716 \times 10^{-14} t_v^3 + 2.62533 \times 10^{-9} t_v^2 - 1.68116 \times 10^{-4} t_v + 4.78097 \quad (20)$$

$$h_s = -2.69854 \times 10^{-14} t_s^3 + 1.73321 \times 10^{-9} t_s^2 - 7.89586 \times 10^{-5} t_s + 2.68595 \quad (21)$$

$$h_h = -4.19992 \times 10^{-14} t_h^3 + 2.02864 \times 10^{-9} t_h^2 - 7.24526 \times 10^{-5} t_h + 1.94576 \quad (22)$$

利用式(13—15)分别计算表1各罐体泄漏参数

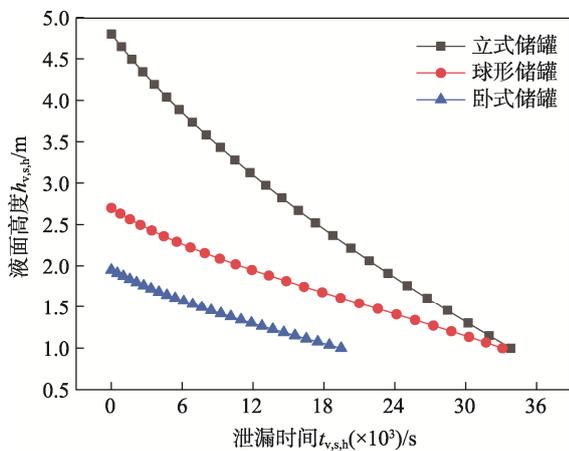


图4 液面高度与泄漏时间关系  
Fig.4 Relationship between  $h_{v,s,h}$  and  $t_{v,s,h}$

发现, 当液面高度  $h_v=h_{0-v}=4.8\text{ m}$ ,  $h_s=h_{0-s}=2.7\text{ m}$ ,  $h_h=h_{0-h}=1.95\text{ m}$  时, 泄漏液体质量  $m_{v,s,h}=0$ 、常数  $C_v=14\ 195.94$ ,  $C_s=14\ 074.423$ ,  $C_h=3796.414$ 。将式(20—22)分别代入式(6—8), 计算结果作图得到液体泄漏质量流率  $Q_{m-v,s,h}$  随泄漏时间  $t_{v,s,h}$  的变化规律, 见图5。将式(20—22)分别代入确定常数  $C_{v,s,h}$  的式(13—15), 计算结果作图得到泄漏液体质量  $m_{v,s,h}$  随泄漏时间  $t_{v,s,h}$  的变化规律见图6。对图5、图6曲线数据分别进行拟合分析, 得到液氨储罐液体泄漏质量流率  $Q_{m-v,s,h}$ 、泄漏液体质量  $m_{v,s,h}$  与泄漏时间  $t_{v,s,h}$  的数学关系, 分别见式(23—25)和式(26—28)。

$$Q_{m-v} = -1.37789 \times 10^{-14} t_v^3 + 9.8496 \times 10^{-10} t_v^2 - 2.65254 \times 10^{-5} t_v + 0.53916 \quad (23)$$

$$Q_{m-s} = -1.45464 \times 10^{-14} t_s^3 + 1.07361 \times 10^{-9} t_s^2 - 2.79678 \times 10^{-5} t_s + 0.53767 \quad (24)$$

$$Q_{m-h} = -4.3095 \times 10^{-14} t_h^3 + 1.93579 \times 10^{-9} t_h^2 - 3.44225 \times 10^{-5} t_h + 0.54566 \quad (25)$$

$$m_v = 8.49272 \times 10^{-11} t_v^3 - 7.76439 \times 10^{-6} t_v^2 + 0.4972 t_v + 56.28418 \quad (26)$$

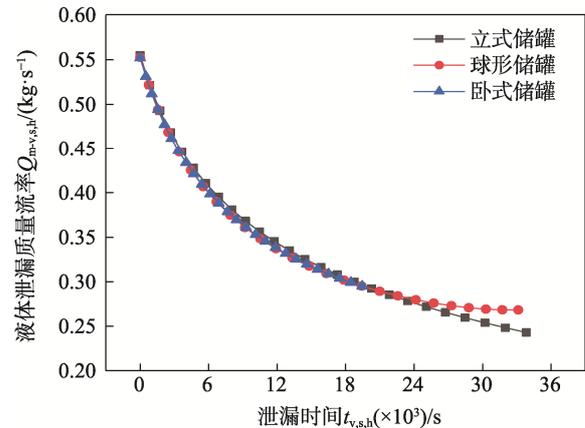


图5 液体泄漏质量流率与泄漏时间关系  
Fig.5 Relationship between  $Q_{m-v,s,h}$  and  $t_{v,s,h}$

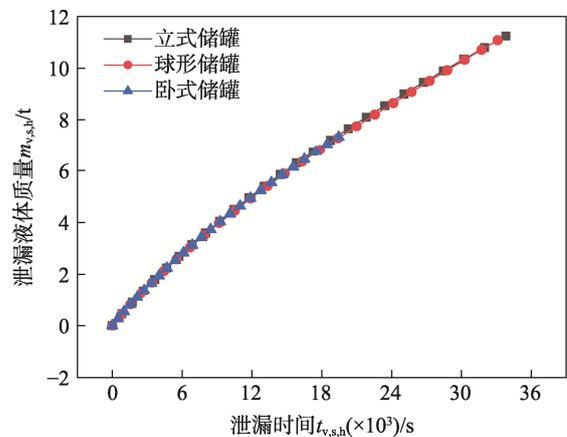


图6 泄漏液体质量与泄漏时间关系  
Fig.6 Relationship between  $m_{v,s,h}$  and  $t_{v,s,h}$

$$m_s = 1.04393 \times 10^{-10} t_s^3 - 8.32749 \times 10^{-6} t_s^2 + 0.49523 t_s + 54.74343 \quad (27)$$

$$m_h = 2.13358 \times 10^{-10} t_h^3 - 1.17089 \times 10^{-5} t_h^2 + 0.52356 t_h + 18.98618 \quad (28)$$

图 5 和图 6 中，由于泄漏孔处受上方液体压力影响，随着泄漏时间  $t_{v,s,h}$  的增加，液体泄漏质量流率  $Q_{m-v,s,h}$  减小幅度逐渐减缓，泄漏液体质量  $m_{v,s,h}$  增加幅度亦出现逐渐减缓的趋势。当  $t_{v,s,h} \rightarrow 0$  时，罐内液体对泄漏孔处压力最大， $Q_{m-v,s,h}$  值最大，立式罐、卧罐、球罐的液体泄漏质量流率分别为 0.555，0.552，0.553 kg/s；当液面下降到泄漏孔处（即  $h_{v,s,h} = h'_{v,s,h}$  时），液体泄漏停止时  $m_{v,s,h}$  最大，立式罐、卧罐、球罐的泄漏液体质量分别为 11.245 846，11.084 621，7.730 932 t。

通过对液氨立式罐、球罐和卧罐液体泄漏计算分析，各参数变化规律基本相似，且在该储存条件和泄漏场景条件下，立式罐泄漏时间持续最久、泄漏液体

质量最大。3 种类型储罐的液体泄漏质量流率  $Q_{m-v,s,h}$  计算结果几乎相同，且最大值均出现在泄漏初始时刻。

## 2.2 模型验证

PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) 商业软件在化工领域具有 40 多年的应用历史，该软件针对泄漏、火灾爆炸等不同事故场景均可实现有效计算<sup>[23]</sup>。输入上述各罐体参数及大气、物质参数（见表 1—2），采用 PHAST 8.13 对不同类型储罐的液氨液体泄漏模拟，得到数据曲线，见图 7—8。PHAST 模拟结果与模型理论计算结果中的最大液体泄漏质量流率和泄漏液体总质量，见表 3。

立式罐、球罐和卧罐的液氨在纯液体泄漏阶段，罐内氨的气液相态存在临界变化压力，当达到临界压力后，导致泄漏孔处压力变小、温度上升，因此纯液体泄漏转变为气液两相流泄漏（液体+大小不等的液

表 2 泄漏场景关键气象参数

Tab.2 Key meteorological parameters of Leakage scenario

环境温度/°C	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	相对湿度/%	大气稳定度	太阳辐射通量/(kW·m <sup>-2</sup> )	释放物的相	室外释放方向	孔处有无闪蒸
25	1.5	70	E	0.5	液体	水平	孔处无闪蒸

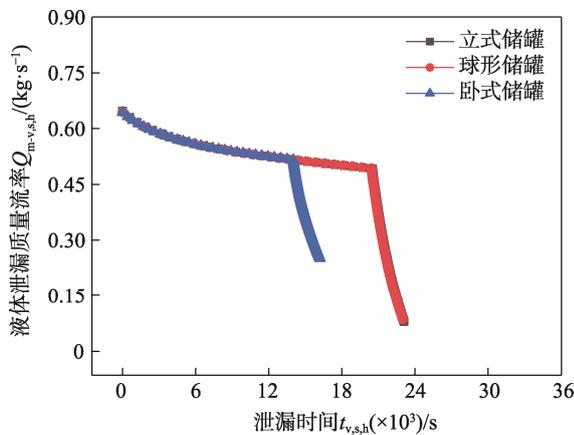


图 7 液体泄漏质量流率与泄漏时间关系  
Fig.7 Relationship between  $Q_{m-v,s,h}$  and  $t_{v,s,h}$

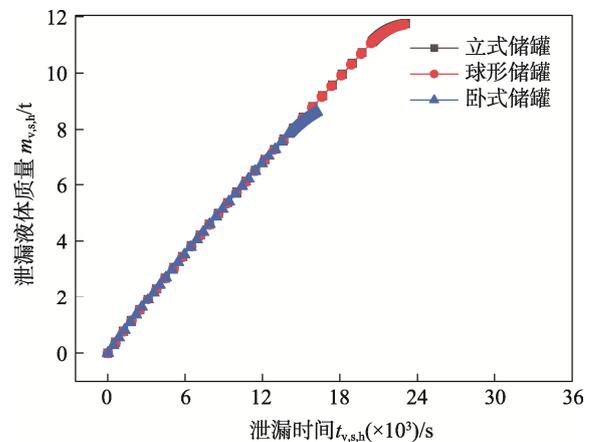


图 8 泄漏液体质量与泄漏时间关系  
Fig.8 Relationship between  $m_{v,s,h}$  and  $t_{v,s,h}$

表 3 模型计算与 PHAST 模拟的结果对比

Tab.3 Calculation results of theoretical model and PHAST simulation

储罐类型	参数	模型理论计算结果	PHAST 模拟结果	偏差/%
立式储罐	$Q_{m-v(max)}/(kg \cdot s^{-1})$	0.555	0.647	16.577
	$m_v/kg$	11 245.846	11 759.190	4.565
球形储罐	$Q_{m-s(max)}/(kg \cdot s^{-1})$	0.553	0.645	16.637
	$m_s/kg$	11 084.621	11 723.550	5.764
卧式储罐	$Q_{m-h(max)}/(kg \cdot s^{-1})$	0.552	0.644	16.667
	$m_h/kg$	7730.932	8623.380	17.630

滴),从而进一步导致泄漏液密度变小<sup>[24]</sup>。PHAST 模拟计算  $Q_m$  出现突变值,由于卧罐内气液相态临界压力大于立式罐和球罐内气液相态临界压力,因此卧罐液体泄漏质量流率出现突变值的时间早于立式罐和球罐。

文中建立的模型基于3种假设(泄漏孔位于液面以下、闪蒸比例小于0.1,罐内温度不变),计算结果较为理想,使得理论模型结果与 PHAST 模拟结果存在一定的偏差,但3种储罐泄漏时,其理论模型计算与 PHAST 模拟计算的最大液体泄漏质量流率  $Q_{m-v,s,h(max)}$  偏差较小,且整体趋势吻合,规律相似,对于泄漏液体质量而言,其变化规律吻合度更高。不同液氨储罐在泄漏初始时刻液体泄漏质量流率最大,且  $Q_{m-v(max)} > Q_{m-s(max)} > Q_{m-h(max)}$ 。3种类型储罐  $Q_{m-v,s,h(max)}$  的偏差较小,介于16.577%~16.667%; $m_{v,s,h}$  偏差差别较大,立式罐、球罐及卧罐泄漏液体质量偏差分别为4.565%,5.764%和17.630%。分析参数变化规律和偏差数据,构建的模型适用于计算液氨3类储罐的液体泄漏及事故风险评估。

### 3 结语

利用流体力学计算方法及范德瓦尔斯方程,分析了液氨3类储罐结构及液体泄漏,进一步分析了储罐泄漏过程中罐内实时压力、液面变化等参数的变化,得出如下结论。

1) 建立液氨3类储罐纯液体泄漏质量流率  $Q_{m-v,s,h}$ 、泄漏液体质量  $m_{v,s,h}$  与液面高度  $h_{v,s,h}$  计算模型。

2) 液氨立式罐、球罐和卧罐纯液体泄漏计算结果规律相似,随着泄漏时间  $t_{v,s,h}$  的增加,液面高度  $h_{v,s,h}$  呈现先减后增的趋势; $Q_{m-v,s,h}$  的减小幅度逐渐变缓; $m_{v,s,h}$  的增加幅度亦逐渐变缓。泄漏开始时, $Q_{m-v,s,h}$  值最大,立式罐、球罐及卧罐的液体泄漏质量流率分别为0.555,0.553,0.552 kg/s;泄漏停止时, $m_{v,s,h}$  值最大,立式罐、球罐及卧罐的液体泄漏质量分别为11.245846,11.084621,7.730932 t;且在该储存条件和泄漏场景下,立式罐泄漏时间持续最久、泄漏液体质量最大。

3) 模型理论计算结果与 PHAST 模拟结果规律相似,3种储罐液体泄漏质量流率偏差非常接近,介于16.577%~16.667%,泄漏液体质量偏差最大为17.630%。从参数变化规律分析,在不借助专业软件的情况下,利用文中所建模型可直接计算液氨储罐纯液体泄漏结果。

#### 参考文献:

[1] 化学品事故信息网. 统计分析——事故空间分布

[EB/OL]. [2020-07-25]. <http://accident.nrcc.com.cn:9090/Portalsite/Chart.aspx?pmenu=24f6a25c-3ba7-4f77-b8a5-8a0ffae1ccdc&menu=f9568679-35b9-46f7-bd5d-cf047724692e>.

Chemical Incident Information Network. Statistical Analysis-Spatial Distribution of Accidents [EB/OL]. [2020-07-25]. <http://accident.nrcc.com.cn:9090/Portalsite/Chart.aspx?pmenu=24f6a25c-3ba7-4f77-b8a5-8a0ffae1ccdc&menu=f9568679-35b9-46f7-bd5d-cf047724692e>.

[2] 王宝轩,沈功田,闫河,等. 大型石油储罐健康管理方法应用研究[J]. 机械工程学报,2017,53(16):125—133.

WANG Bao-xuan, SHEN Gong-tian, YAN He, et al. Research and Application of Health Management Method of Large Oil Storage Tank[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 125—133.

[3] YIN Hai-long, LIU Chang-hua, WU Wei, et al. Safety Assessment of Natural Gas Storage Tank Using Similarity Aggregation Method based Fuzzy Fault Tree Analysis (SAM-FFTA) Approach[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 66: 104159.

[4] 潘旭海,蒋军成. 事故泄漏源模型研究与分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2002,24(1):105—110.

PAN Xu-hai, JIANG Jun-cheng. Progress of Accidental Release Source and Mechanism Models[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition), 2002, 24(1): 105—110.

[5] 李萍,丁珏,翁培奋. 气液两相流泄漏扩散的数值模拟[J]. 应用力学学报,2006(2):182—186.

LI Ping, DING Jue, WENG Pei-fen. Numerical Simulation to Leakage Dispersion Process in Two-Phase Jet[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006(2): 182—186.

[6] CROEL D A. Liquid Discharge from Process and Storage Vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1992, 5(2): 73—80.

[7] KORNER S, FRIEDEL L. Assessment of the Maximum Possible Liquid Superheat during Flashing Leak Flow[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1997, 10(5): 345—350.

[8] XIE Qi-yuan, LI Xiang, ZHANG Jie, et al. Mutual Effects between Dynamic Leakage Behavior and the Pressure/Temperature in a LNG Tank with External Heat Fluxes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 63: 1—10.

[9] HE Juan-xia, YANG Li-liang, MA Ye, et al. Simulation and Application of a Detecting Rapid Response Model for the Leakage of Flammable Liquid Storage Tank[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 141: 390—401.

[10] 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.

- SUN Dong-liang, JIANG Jun-cheng, ZHANG Ming-guang. Study on Liquid Ammonia Storage Vessel Release and Diffusion Models Improvement[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 37(1): 27—29.
- [11] 李野, 厉建祥, 丁建国, 等. 卧式罐泄漏数值模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(12): 1114—1115.  
LI Ye, LI Jian-xiang, DING Jian-guo, et al. Study on Numerical Simulation Horizontal Tank Leaking[J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(12): 1114—1115.
- [12] 曾晓, 张礼敬, 陶刚, 等. 变截面储罐孔洞泄漏研究[J]. 油气储运, 2010, 29(7): 519—521.  
ZENG Xiao, ZHANG Li-jing, TAO Gang, et al. Study on Hole Leakage of Variable Cross Section Tanks[J]. Gas Storage and Transportation, 2010, 29(7): 519—521.
- [13] CAVANAUGH T A, SIEGELL J H, STEINBERG K W. Simulation of Vapor Emissions from Liquid Spills[J]. Journal of Hazardous Materials, 1994, 38(1): 41—63.
- [14] WU Xia, LI Chang-jun, HE Yu-fa, et al. Dynamic Modeling of the Two-phase Leakage Process of Natural Gas Liquid Storage Tanks[J]. Energies, 2017, 10(9): 1—26.
- [15] 周超, 王志荣. 立式储罐液体泄漏过程的模拟实验[J]. 油气储运, 2011, 30(4): 308—311.  
ZHOU Chao, WANG Zhi-rong. Leakage Process Simulation of Vertical Tank[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30(4): 308—311.
- [16] 任荣亭, 韩兵奇, 韩正伟, 等. 压力容器液相流体泄漏实验研究[J]. 液压气动与密封, 2013, 33(7): 12—14.  
REN Rong-ting, HAN Bing-qi, HAN Zheng-wei, et al. Experimental Study about the Liquid Leakage of Pressure Vessels[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2013, 33(7): 12—14.
- [17] ZHU Guo-rui, GUO Xi-yan, YI Yan, et al. Experiment and Simulation Research of Evolution Process for LNG Leakage and Diffusion[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 64: 1—11.
- [18] RODRIGUES F K, SALAI N P G, DOTTO G L. New Insights about Reactive Red 141 Adsorption onto Multi-Walled Carbon Nanotubes Using Statistical Physics Coupled with Van der Waals Equation[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 224: 290—294.
- [19] 何娟霞, 周冬梅, 刘磊, 等. 液氨卧罐泄漏气云的形成及事故后果分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(2): 369—377.  
HE Juan-xia, ZHOU Dong-mei, LIU Lei, et al. Formation of Leakage Cloud in Horizontal Liquid Ammonia Tank and Accidental Consequence Analysis[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2020, 45(2): 369—377.
- [20] 陈彦平. 基于 MATLAB 的氨泄漏扩散动态模拟研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016: 14—45.  
CHEN Yan-ping. Dynamic Simulation of Ammonia Leakage and Diffusion Based on MATLAB[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016: 14—45.
- [21] CROWL D A, LOUVAR F J. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications[M]. Boston: Paul Boger, 2011: 758.
- [22] 何娟霞, 周冬梅, 刘磊, 等. 液氨卧罐液体实时连续泄漏建模及分析[J/OL]. 过程工程学报: 1—10 [2021-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4541.TQ.20200727.1110.004.html>.  
HE Juan-xia, ZHOU Dong-mei, LIU Lei, et al. Modeling and Analysis of Liquid Real-Time Continuous Leakage in Horizontal Liquid Ammonia Tank[J/OL]. The Chinese Journal of Process Engineering: 1—10 [2021-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4541.TQ.20200727.1110.004.html>.
- [23] NISHANT P, NADINE G, ERIC M. Sensitivity Analysis of Phast's Atmospheric Dispersion Model for Three Toxic Materials (Nitric Oxide, Ammonia, Chlorine)[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25(1): 20—32.
- [24] GANT S, WEIL J, MONACHE L D, et al. Dense Gas Dispersion Model Development and Testing for the Jack Rabbit II Phase 1 Chlorine Release Experiments[J]. Atmospheric Environment, 2018, 192: 218—240.