

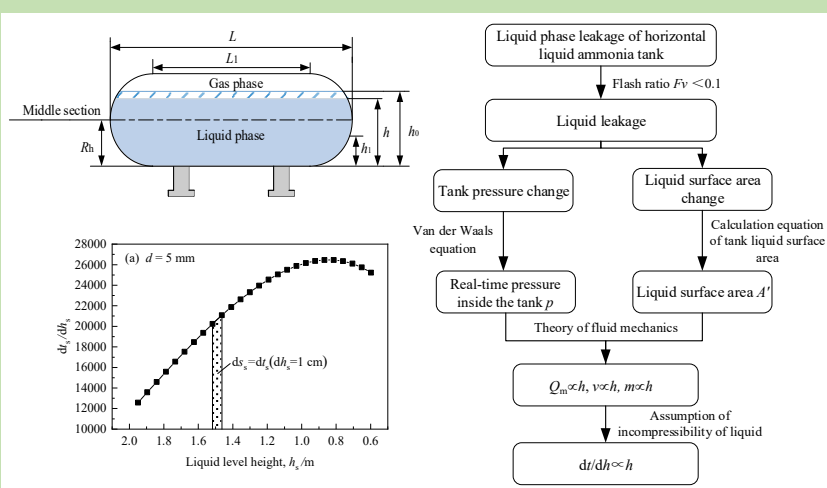
## Modeling and analysis of liquid real-time continuous leakage in horizontal liquid ammonia tank

Juanxia HE<sup>1,2\*</sup>, Dongmei ZHOU<sup>1</sup>, Lei LIU<sup>1</sup>, Qiyong ZHOU<sup>1</sup>, Liwen HUANG<sup>1</sup>, Jianting YAO<sup>1</sup>

1. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China

2. College of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

**Abstract:** Based on Van der Waals equation and theory of fluid mechanics, the liquid real-time continuous leakage model of horizontal liquid ammonia tank was established considering the changes of tank pressure and liquid surface area. Mathematical modeling of a horizontal liquid ammonia tank in a refrigeration company was performed by this model, and the calculation results were compared with PHAST simulation results. The results showed that the decreasing range



of liquid level height  $h$  grew slowly and then increased quickly, the decreasing range of liquid leakage mass flow rate  $Q_m$  and liquid leakage rate  $v$  and the increasing range of liquid leakage mass  $m$  decrease slowly. At the beginning of leakage,  $Q_m$  and  $v$  were the maximum values, at the end of leakage,  $m$  was the maximum values. When the diameters of leakage hole were 5, 30 and 100 mm, leakage time  $t$  were 29884.027, 837.289, 77.550 s,  $Q_m(\text{max})$  were 0.552, 19.913 and 221.160 kg/s,  $v(\text{max})$  was 46.733 m/s,  $m(\text{max})$  were 10255.649, 10339.923 and 10572.760 kg, respectively. The deviation between the calculation results of the model and the PHAST simulation results was less than 24%. From the analysis of parameter variation and risk emergency, the model had the certain applicability for the theoretical calculation of liquid leakage in horizontal liquid ammonia tank.

**Key words:** Van der Waals equation; horizontal liquid ammonia tank; continuous leakage; model; mathematical modeling

收稿: 2020-06-03, 修回: 2020-07-04, 网络发表: 2020-07-28, Received: 2020-06-03, Revised: 2020-07-04, Published online: 2020-07-28

基金项目: 2016 年度广西科技厅重点研发计划(编号: 桂科 AB16380288)

作者简介: 何娟霞(1979-), 女, 陕西省兴平市人, 博士研究生, 讲师, 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, E-mail: hejuanxia2005@126.com.

**引用格式:** 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. 过程工程学报, 2021, 21(6): 731-740.

He J X, Zhou D M, Liu L, et al. Modeling and analysis of liquid real-time continuous leakage in horizontal liquid ammonia tank (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(6): 731-740, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220171.

# 液氨卧罐液体实时连续泄漏建模及分析

何娟霞<sup>1,2\*</sup>, 周冬梅<sup>1</sup>, 刘磊<sup>1</sup>, 周琪勇<sup>1</sup>, 黄丽文<sup>1</sup>, 姚健庭<sup>1</sup>

1. 广西大学资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004

2. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510641

**摘要:** 基于范德瓦耳斯方程和流体力学理论, 考虑液氨卧罐泄漏时罐压和液面面积变化, 建立了液氨卧罐液体实时连续泄漏模型。利用模型对某制冷企业液氨卧罐进行数学模拟, 并将计算结果与 PHAST 模拟结果进行对比分析。结果表明, 液面高度  $h$  下降幅度先减缓后变大, 液体泄漏质量流率  $Q_m$  和泄漏孔处液体泄漏速率  $v$  的下降幅度及泄漏液体质量  $m$  的增加幅度逐渐减缓。泄漏开始时,  $Q_m$  和  $v$  值最大; 泄漏停止时,  $m$  值最大。泄漏孔径为 5, 30 和 100 mm 时, 泄漏时间  $t$  为 29884.027, 837.289 和 77.550 s,  $Q_m(\max)$  为 0.552, 19.913 和 221.160 kg/s,  $v(\max)$  为 46.733 m/s,  $m(\max)$  为 10255.649, 10339.923 和 10572.760 kg。模型计算结果与 PHAST 模拟结果偏差小于 24%, 从参数变化规律和风险应急分析, 模型对液氨卧罐液体泄漏理论计算具有一定适用性。

**关键词:** 范德瓦耳斯方程; 液氨卧罐; 连续泄漏; 模型; 数学模拟

中图分类号: TQ113.5; TQ053.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2021)06-0731-10

## 1 前言

液氨作为一种重要的工业原料, 广泛应用于冷库、化肥、塑料、制药、石油精炼和合成纤维等工艺。由于氨的特殊理化性质, 一旦泄漏将导致人员中毒, 甚至引发火灾、爆炸事故<sup>[1-3]</sup>。因此研究液氨泄漏过程各参数动态变化规律, 准确评价液氨泄漏影响范围及事故后果严重程度具有重要意义。

卧罐结构性能稳定, 是液氨常用的存储容器。目前常温常压立式储罐液体泄漏建模研究验证已经比较成熟<sup>[4-7]</sup>。由于罐体结构差异性, 对加压卧罐储存的低沸点液化物质的泄漏计算若仍沿用该模型则存在一定偏差。Crowl 等<sup>[8]</sup>根据泄漏过程动力学和热力学特征, 对不同泄漏源模型进行了研究并建立了泄漏扩散、蒸发模型; Kaiser<sup>[9]</sup>概述了液氨卧罐泄漏模型的研究进展, 分析了泄漏模式的影响因素; Cavanaugh II 等<sup>[10]</sup>建立了一种立式储罐多组分液体泄漏改进模型, 包含液体闪蒸、气溶胶卷吸和液池蒸发三种气相转化机制; Horvat<sup>[11]</sup>利用 CFD 模拟分析了液化天然气液态泄漏、液池扩展、气液相变及扩散行为; Wu 等<sup>[12]</sup>建立了基于体积平移 Peng-Robinson 状态方程(VTPR EOS)的热力学模型, 并根据天然气凝析液的压力-体积-温度等焓膨胀原理, 对储罐压力和温度进行了数值模拟, 计算了泄漏孔压力、温度和泄漏质量流率; Xie 等<sup>[13]</sup>研究了立式液化天然气储罐泄漏时液体闪蒸随环境温度和罐内介质的变化规律, 建立了动态参数与泄漏质量流率关系模型; Zhu 等<sup>[14]</sup>以宏观流体动

力学和气体扩散理论为基础, 利用 CFD 对液化天然气源泄漏和大气扩散进行了数值模拟, 并与实验数据进行对比验证; 孙东亮等<sup>[15]</sup>考虑液氨立式储罐泄漏实际情况, 根据泄漏闪蒸导致罐压变化, 改进了现有泄漏扩散模型; 李野等<sup>[16]</sup>和曾晓等<sup>[17]</sup>引入时间变量, 利用数值模拟研究了卧罐泄漏过程中罐内液面高度的变化规律。

综上, 本工作针对液氨泄漏闪蒸特点及卧罐结构特征, 利用范德瓦耳斯方程(简称范氏方程)<sup>[18]</sup>分析了泄漏后罐内实时压力和液面面积的变化关系, 建立了液氨卧罐液体实时连续泄漏的计算模型。最后以某制冷企业液氨卧罐为研究对象, 对泄漏过程液面高度、液体泄漏质量流率、泄漏孔处液体泄漏速率、泄漏液体质量随泄漏时间的变化规律进行了分析。该研究为液氨卧罐液体连续泄漏事故定量风险评估提供理论计算参考数据, 有助于增强救援指挥人员对泄漏现场的判断, 最大程度的减少事故损失和人员伤亡。

## 2 罐体泄漏分析

### 2.1 氨的储存条件

常温常压下气态氨转变为液态氨的本质是增大氨的密度<sup>[19]</sup>, 可通过将气态氨加压或降温得到液态氨储存在压力储罐或钢瓶内, 若储罐因撞击、强烈震动等外部因素导致罐压急剧升高或因自身缺陷导致承压能力下降, 则极易发生压力容器爆炸<sup>[20]</sup>。液氨储罐储存系数不应大于 0.9<sup>[21]</sup>, 因此罐内氨以气、液两相存在, 如图 1 所示, 储罐上方为氨饱和蒸气、下方为液氨。

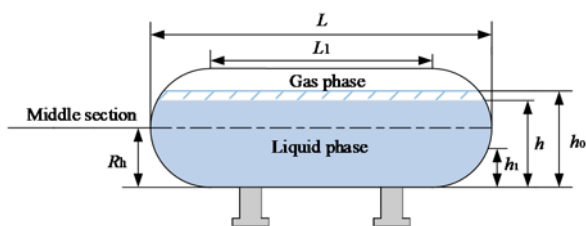


图1 液氨卧罐结构示意图

Fig.1 Structure diagram of horizontal liquid ammonia tank

液氨的储存通常分为常温加压和低温常压。常温加压储存的容器属于压力容器,且储存温度与环境温度相同或相近,此储存工艺流程简单、操作及运行费用低,且工程依赖程度低,但工程投资较高;低温常压储存首先将液氨冷冻至温度不高于其沸点 $-33^{\circ}\text{C}$ ,此时罐内气相压力与大气压力相同或相近,采用常压容器储存,最大限度地降低储罐投资,工艺流程复杂,对公用工程的依赖程度较高,但工程投资成本较低<sup>[22,23]</sup>。

## 2.2 泄漏原因分析

液氨储罐泄漏的主要原因由两方面导致,液氨的腐蚀易挥发性<sup>[24]</sup>和储罐罐体结构性失稳。储罐因受应力、压力、环境(温度、过量充装、腐蚀介质)等多因素作用,导致结构失稳,罐体出现损伤、变形甚至断裂<sup>[25,26]</sup>。卧罐复杂的结构特征,使其在承载时应力分布不均匀,且罐内压力随液氨温度而变化<sup>[27]</sup>。对于液面以下的罐壁,由于液氨的腐蚀和压力作用更易产生结构失效,且罐底受水分、盐分和微生物的侵蚀,腐蚀失效速率更快<sup>[28]</sup>,因此对液氨卧罐液相区泄漏的研究十分必要。

## 3 液体实时连续泄漏模型构建

### 3.1 模型构建框架

液氨卧罐液相区一旦泄漏,罐内外压差将导致液氨闪蒸、罐压缓慢下降。若泄漏液体闪蒸比小于0.1,闪蒸现象可忽略,此时可认为发生液体泄漏<sup>[29]</sup>。

由于卧罐的特殊结构特征使泄漏过程液面面积不断变化。考虑罐压及液面面积的变化,根据范氏方程、流体力学理论和液体不可压缩假设等方法,将泄漏过程各参数变化关系量化,得到一种液氨卧罐液体实时连续泄漏计算模型,其建模流程见图2。

### 3.2 模型关键参数及关系

#### 3.2.1 液体泄漏质量流率与液面高度

液体经储罐孔洞泄漏质量流率为

$$Q_m = \rho A C_0 \sqrt{2\left(\frac{p - p_0}{\rho} + gh_L\right)} \quad (1)$$

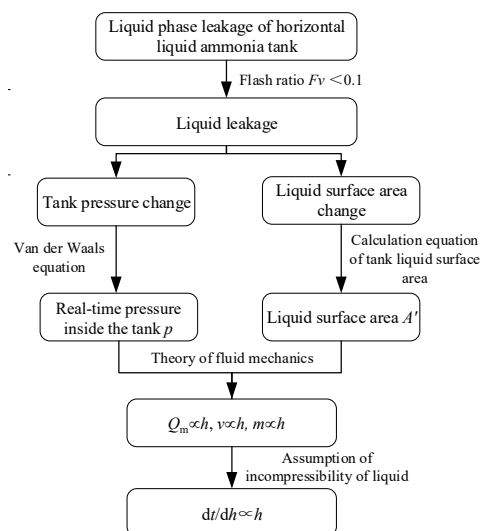


图2 液氨卧罐液体实时连续泄漏建模流程图

Fig.2 Modeling flow chart of liquid real-time continuous leakage in horizontal liquid ammonia tank

式中, $\rho$ 为泄漏液体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $A$ 为泄漏孔面积( $\text{m}^2$ ), $C_0$ 为液体泄漏系数, $p$ 为罐内实时压力(Pa), $p_0$ 为环境压力(Pa), $g$ 为重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ , $h_L$ 为泄漏孔上方液面高度(m)。

液氨卧罐泄漏时罐内压力和液面面积不断变化。利用范氏方程对罐内实时压力进行修正,同时将液氨卧罐看作中间是垂直截面半径为 $R_h$ 、长为 $L_1$ 的圆柱体,两端是半径为 $R_h$ 的半球,以此对罐内液面面积进一步精进<sup>[30]</sup>,整理得到式(2)所示的罐内实时压力与式(3)所示的液面面积:

$$p = \frac{\left(p_n + \frac{an_0^2}{V_0^2}\right)(V_0 - n_0b)}{V_0 + A'(h_0 - h) - n_0b} - \frac{an_0^2}{[V_0 + A'(h_0 - h)]^2} \quad (2)$$

$$A' = 2L\sqrt{R_h^2 - (h - R_h)^2} + (\pi - 4)[R_h^2 - (h - R_h)^2] \quad (3)$$

式中, $p_n$ 为初始罐压,即储存压力(Pa), $a$ , $b$ 为范德瓦耳斯修正量,氨气取值为 $0.424 \text{ J} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-2}$ 和 $3.73 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$ , $n_0$ 为罐内初始气体的摩尔量(mol), $V_0$ 为罐内初始气体体积( $\text{m}^3$ ), $A'$ 为液面面积( $\text{m}^2$ ), $h_0$ 为初始液面高度(m), $h$ 为液面高度(m), $L$ 为卧罐罐长(m), $R_h$ 为储罐垂直截面半径(m)。

联立式(1),(2)和(3),整理得到式(4)所示的液体泄漏质量流率 $Q_m$ 与液面高度 $h$ 关系。式(4)中, $h_1$ 为泄漏孔中心距储罐底部高度(m), $d$ 为泄漏孔直径(m)。

#### 3.2.2 泄漏孔处液体泄漏速率与液面高度

在液体泄漏质量流率与液面高度关系的基础上,根

据流体力学中的伯努利方程、质量流量与体积流量的转换关系<sup>[31]</sup>,得到式(5)所示的泄漏孔处液体泄漏速率  $v$  与液面高度  $h$  关系。

$$Q_m = \rho A C_0 \sqrt{2 \left[ \frac{\left( p_n + \frac{a n_0^2}{V_0^2} \right) (V_0 - n_0 b)}{\rho V_0 + \rho (h_0 - h) \left\{ \frac{2L\sqrt{R_h^2 - (h - R_h)^2} + (\pi - 4) [R_h^2 - (h - R_h)^2]}{a n_0^2} \right\} - \rho n_0 b} - \frac{p_0}{\rho} + g \left( h - h_1 - \frac{d}{2} \right)} \right]} \quad (h_1 - d/2 \leq h \leq h_0) \quad (4)$$

$$v = C_0 \sqrt{2 \left[ \frac{\left( p_n + \frac{a n_0^2}{V_0^2} \right) (V_0 - n_0 b)}{\rho V_0 + \rho (h_0 - h) \left\{ \frac{2L\sqrt{R_h^2 - (h - R_h)^2} + (\pi - 4) [R_h^2 - (h - R_h)^2]}{a n_0^2} \right\} - \rho n_0 b} - \frac{p_0}{\rho} + g \left( h - h_1 - \frac{d}{2} \right)} \right]} \quad (h_1 - d/2 \leq h \leq h_0) \quad (5)$$

### 3.2.3 泄漏液体质量与液面高度

将液氨视为不可压缩液体,则泄漏液体质量的微小变化  $dm$  为

$$dm = -\rho A'(h) dh = -\rho \left\{ \frac{2L\sqrt{R_h^2 - (h - R_h)^2} + (\pi - 4) [R_h^2 - (h - R_h)^2]}{a n_0^2} \right\} dh \quad (h_1 - d/2 \leq h \leq h_0) \quad (6)$$

式中,  $A'(h)$  为液面高度为  $h$  时的液面面积( $m^2$ ),  $dh$  为液面高度的微小变化( $m$ )。对上式进行不定积分,整理得到泄漏液体质量  $m$  与液面高度  $h$  关系:

$$m = \rho L R_h^2 \arctan \left[ \frac{R_h - h}{\sqrt{h(2R_h - h)}} \right] - \rho L (h - R_h) \sqrt{h(2R_h - h)} - \rho (0.2866666667 h^3 - 0.86 R_h h^2 - 0.2866666667 R_h^3) + C \quad (h_1 - d/2 \leq h \leq h_0) \quad (7)$$

式中,  $C$  为常数,根据泄漏场景的罐体参数而定。

### 3.2.4 液面高度与泄漏时间

根据伯努利方程,液体泄漏质量流率  $Q_m$  是泄漏液体质量与泄漏时间的微分,则:

$$Q_m = -\frac{dm}{dt} \quad (8)$$

式中,  $dt$  为泄漏时间的微小变化( $s$ )。

联立式(4)、(6)和(8),整理得到泄漏时液面高度  $h$  与泄漏时间  $t$  的微分关系见式(9)。

该模型引入变量泄漏时间  $t$ ,建立了液面高度与泄漏时间的微分函数关系,实现了对液面高度  $h$  的准确计算,从而得到泄漏时间  $t$  与各参数的数学关系,为液氨卧罐液体连续泄漏事故定量风险评估提供理论计算参考数据。

$$\frac{dt}{dh} = \frac{2L\sqrt{R_h^2 - (h - R_h)^2} + (\pi - 4) [R_h^2 - (h - R_h)^2]}{\sqrt{2} A C_0} \times \left[ \frac{\left( p_n + \frac{a n_0^2}{V_0^2} \right) (V_0 - n_0 b)}{\rho V_0 + \rho (h_0 - h) \left\{ \frac{2L\sqrt{R_h^2 - (h - R_h)^2} + (\pi - 4) [R_h^2 - (h - R_h)^2]}{a n_0^2} \right\} - \rho n_0 b} - \frac{p_0}{\rho} + g \left( h - h_1 - \frac{d}{2} \right)} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (h_1 - d/2 \leq h \leq h_0) \quad (9)$$

4 实例分析

利用上述模型对液氨卧罐液体泄漏进行数学模拟, 分析泄漏过程各参数与泄漏时间的变化关系。表 1 是液氨卧罐储存和泄漏的相关参数。

表 1 液氨卧罐储存和泄漏相关参数  
Table 1 Parameters related to storage and leakage of horizontal liquid ammonia tank

Parameter	Data
Tank type	Horizontal tank
Storage material	Liquid ammonia
Volume, $V/\text{m}^3$	30
Specification	$\Phi 2.6 \times 5.6 \text{ m}$
Filling factor	0.8
Initial liquid level height, $h_0/\text{m}$	1.95
Storage temperature, $T/^\circ\text{C}$	25
Storage pressure, $p_n/\text{MPa}$	1.65
Ambient pressure, $p_0/\text{MPa}$	0.1
	5
Diameter of leakage hole, $d/\text{mm}$	30
	100
Height of leakage hole center from tank bottom, $h_l/\text{m}$	0.6

4.1 液面高度与泄漏时间关系

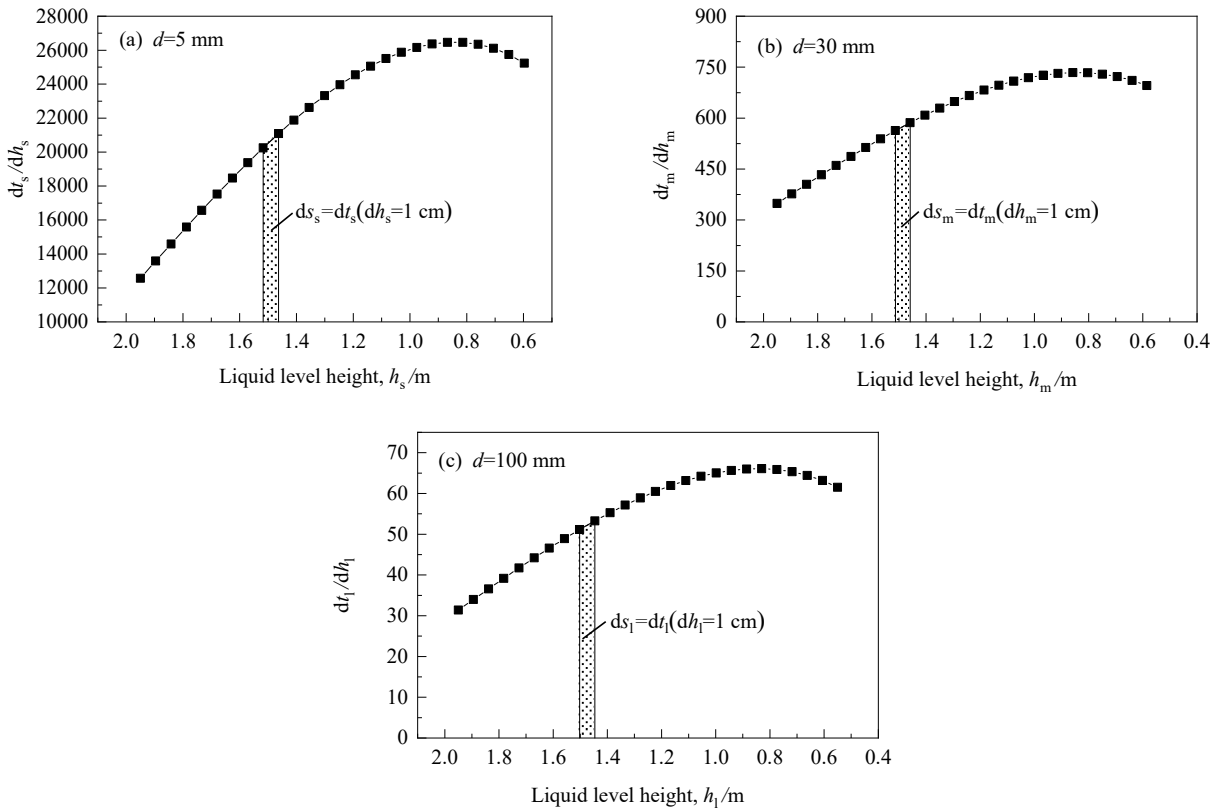


图 3 液面下降单位高度所需时间与液面高度关系  
Fig.3 Relationship between  $dt_{s,m,l}/dh_{s,m,l}$  and  $h_{s,m,l}$

根据式(9), 得到图 3 所示的  $dt_{s,m,l}/dh_{s,m,l}$  与  $h_{s,m,l}$  的变化规律, 其中下标 s 代表泄漏孔径  $d=5 \text{ mm}$ , m 代表泄漏孔径  $d=30 \text{ mm}$ , l 代表泄漏孔径  $d=100 \text{ mm}$ 。从整体变化趋势来看, 随液面高度  $h_{s,m,l}$  下降, 每下降单位液面高度所需时间先增大后减少, 这一变化结果与卧罐结构特征高度吻合。图 1 中卧罐内液面面积先增大后减少, 则每下降单位液面高度对应体积先增加后减少。当罐内液面在中截面上方时泄漏, 液面面积逐渐增大; 当液面下降到中截面时, 液面面积达到最大; 当液面继续下降时, 液面面积逐渐减少。

以  $h_{s,m,l}=1 \text{ cm}$  为步长, 求  $h_{s,m,l}-dt_{s,m,l}/dh_{s,m,l}$  曲线下的面积, 则每个步长曲线下对应面积为液面高度下降  $1 \text{ cm}$  所消耗的时间。按该方法计算每个步长对应液面高度点曲线下的面积, 得到图 4 所示的实时泄漏过程中液面高度  $h_{s,m,l}$  与对应泄漏时间  $t_{s,m,l}$  之间的变化规律, 对图 4(a), 4(b) 和 4(c) 曲线数据分别进行公式拟合, 得到式 (10)~(12) 所示的  $h_{s,m,l}$  与  $t_{s,m,l}$  的数学关系。若在泄漏过程中, 不采取任何措施, 理论上当液面高度达泄漏口时, 泄漏停止, 此时通过上述方法计算处理可知, 泄漏孔径为 5, 30 和 100 mm 时, 液氨卧罐液体泄漏持续时间分别为 29884.027, 837.289 和 77.550 s。

$$h_s = -2.33467 \times 10^{-14} t_s^3 + 1.47986 \times 10^{-9} t_s^2 - 6.84776 \times 10^{-5} t_s + 1.94077 \quad (10)$$

$$h_m = -1.08205 \times 10^{-9} t_m^3 + 1.91121 \times 10^{-6} t_m^2 - 0.00247 t_m + 1.94063 \quad (11)$$

$$h_l = -1.43672 \times 10^{-6} t_l^3 + 2.31397 \times 10^{-4} t_l^2 - 0.02729 t_l + 1.94026 \quad (12)$$

式中,  $h_{s,m,l}$  和  $t_{s,m,l}$  分别为泄漏孔径是 5, 30 和 100 mm 时的液面高度(m)和泄漏时间(s)。

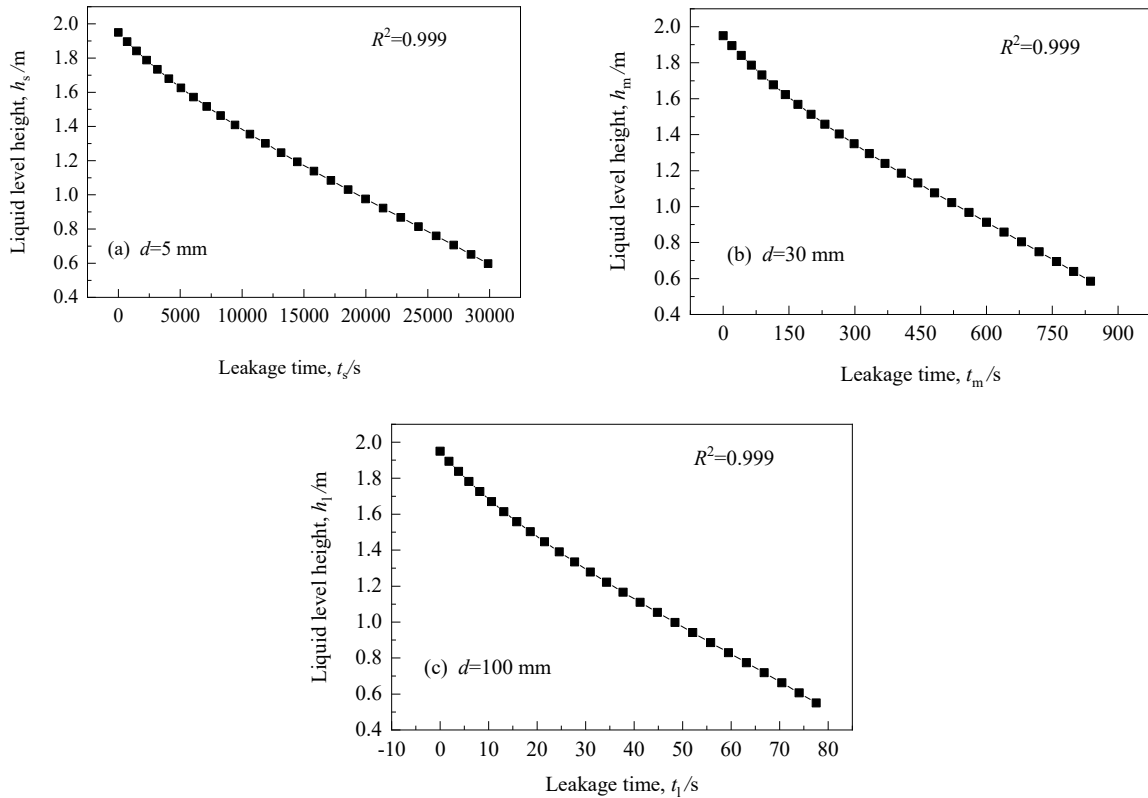


图 4 液面高度与泄漏时间关系

Fig.4 Relationship between  $h_{s,m,l}$  and  $t_{s,m,l}$

在图 4 中,  $h_{s,m,l}$  随  $t_{s,m,l}$  的增加而下降, 但由于泄漏过程中, 罐内液面面积不断变化, 所以其下降趋势呈非线性变化, 在泄漏开始阶段, 液面高度下降幅度逐渐减缓, 当液面下降到中截面后, 其下降幅度又逐渐变大。

#### 4.2 泄漏过程各参数与泄漏时间关系

利用式(7)分析实例罐体数据。当液面高度  $h_{s,m,l}=h_0=1.95$  m 时, 泄漏液体质量  $m_{s,m,l}=0$  kg, 通过计算得到常数  $C=7310.672368$ 。同时将式(10)~(12)代入式(4), (5)和确定常数  $C$  后的式子, 作图得到图 5, 6 和 7 所示的液体泄漏质量流率  $Q_{m-s,m,l}$ 、泄漏孔处液体泄漏速率  $v_{s,m,l}$ 、泄漏液体质量  $m_{s,m,l}$  与泄漏时间  $t_{s,m,l}$  的变化规律, 对图 5, 6 和 7 曲线数据分别进行公式拟合, 得到式(13)~(15)所示的  $Q_{m-s,m,l}$  与  $t_{s,m,l}$  的数学关系、式(16)~(18)所示的  $v_{s,m,l}$  与  $t_{s,m,l}$  的数学关系以及式(19)~(21)所示的  $m_{s,m,l}$  与  $t_{s,m,l}$  的数学关系。

$$Q_{m-s} = -1.81296 \times 10^{-14} t_s^3 + 1.20087 \times 10^{-9} t_s^2 - 2.89967 \times 10^{-5} t_s + 0.53938 \quad (13)$$

$$Q_{m-m} = -2.99468 \times 10^{-8} t_m^3 + 5.55822 \times 10^{-5} t_m^2 - 0.03752 t_m + 19.44493 \quad (14)$$

$$Q_{m-l} = -4.26452 \times 10^{-4} t_l^3 + 0.07337 t_l^2 - 4.56343 t_l + 215.71553 \quad (15)$$

$$v_s = -1.53447 \times 10^{-12} t_s^3 + 1.01641 \times 10^{-7} t_s^2 - 0.00245 t_s + 45.65265 \quad (16)$$

$$v_m = -7.02822 \times 10^{-8} t_m^3 + 1.30446 \times 10^{-4} t_m^2 - 0.08806 t_m + 45.63531 \quad (17)$$

$$v_l = -9.01214 \times 10^{-5} t_l^3 + 0.01551 t_l^2 - 0.96438 t_l + 45.58674 \quad (18)$$

$$m_s = 1.17225 \times 10^{-10} t_s^3 - 8.8527 \times 10^{-6} t_s^2 + 0.50242 t_s + 45.24994 \quad (19)$$

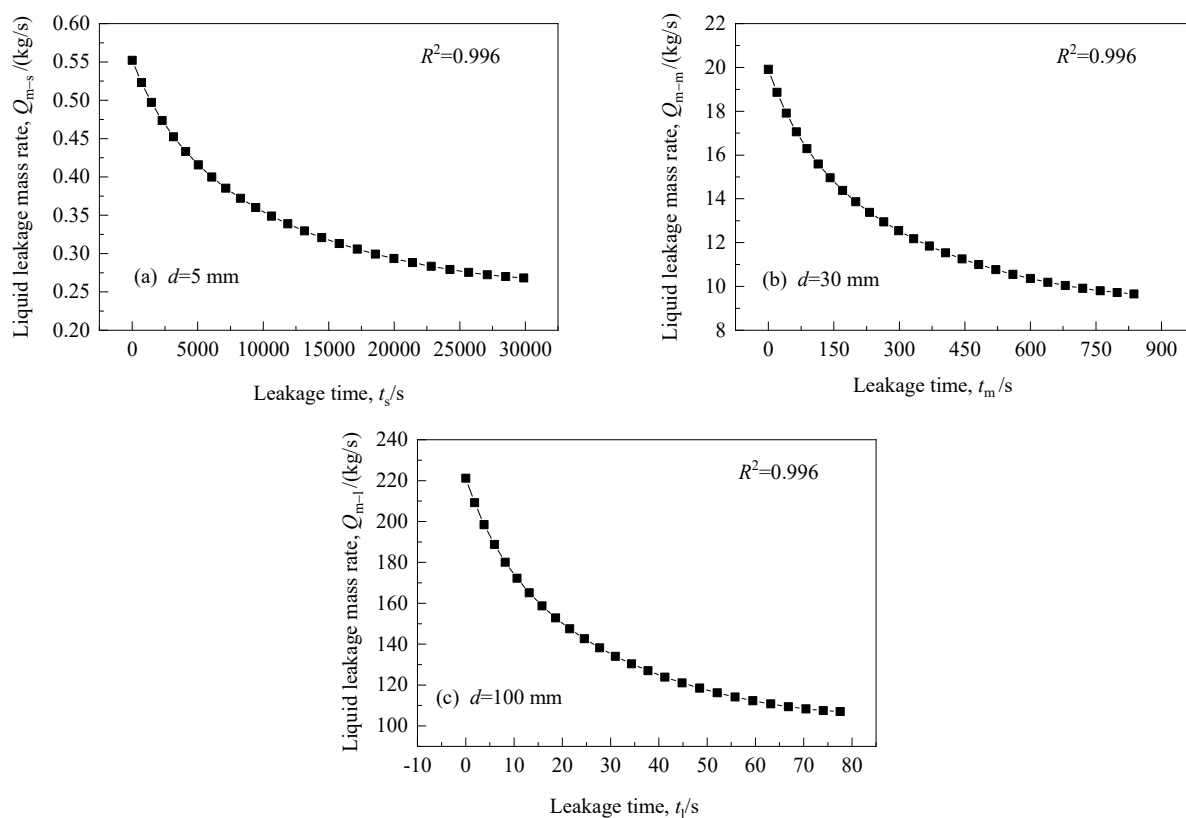


图 5 罐内液体泄漏质量流率与泄漏时间关系

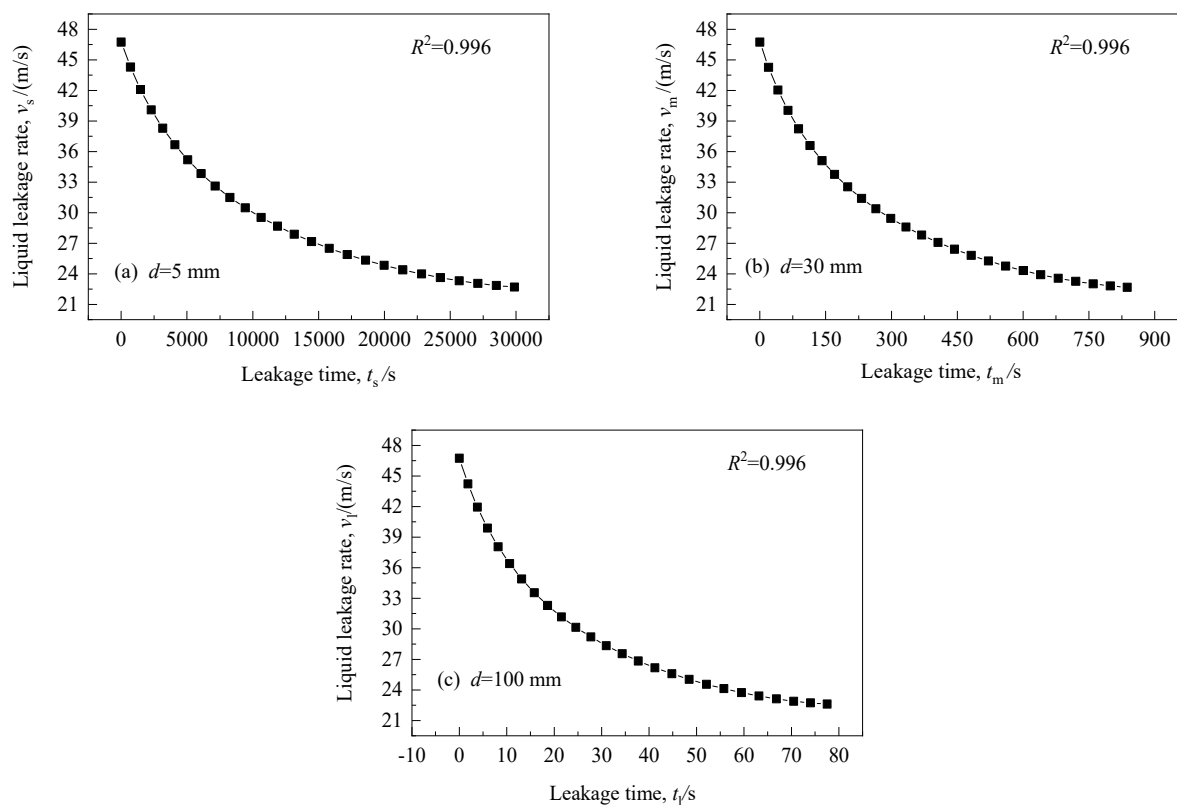
Fig.5 Relationship between  $Q_{m-s,m,l}$  and  $t_{s,m,l}$ 

图 6 泄漏孔处液体泄漏速率与泄漏时间关系

Fig.6 Relationship between  $v_{s,m,l}$  and  $t_{s,m,l}$

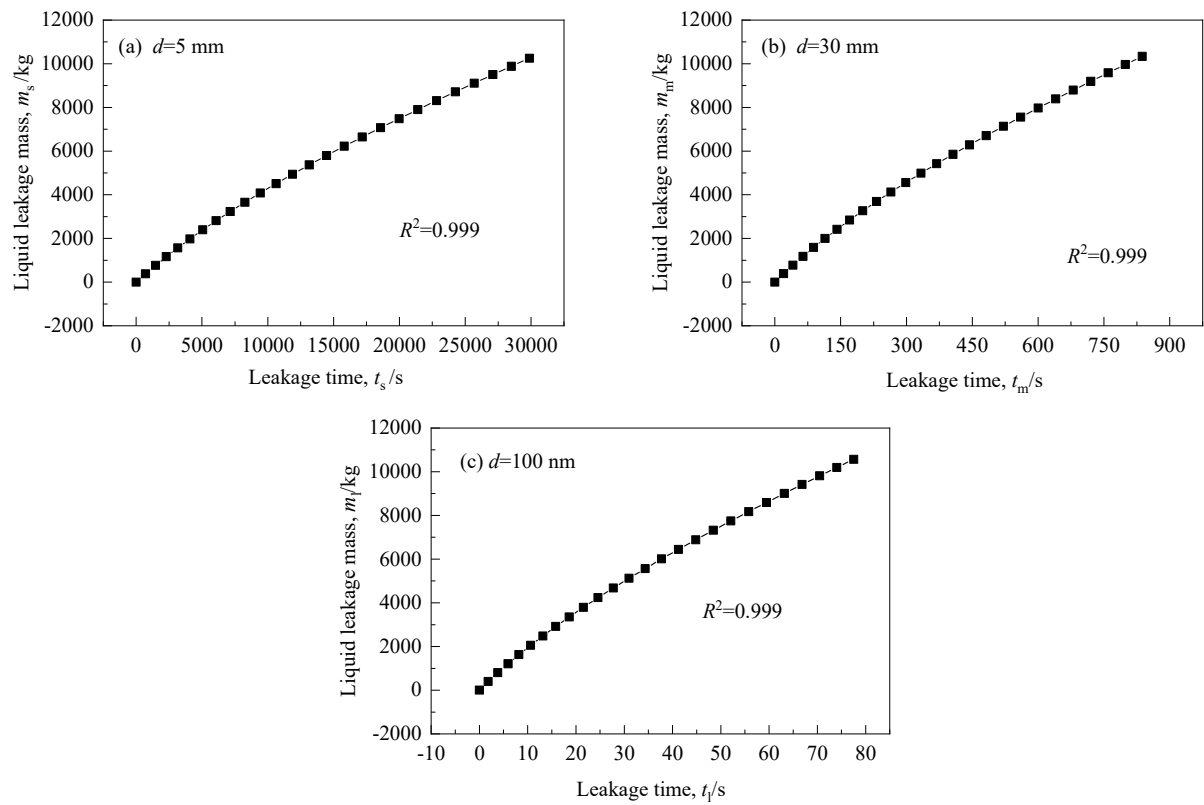


图 7 泄漏液体质量与泄漏时间关系  
Fig.7 Relationship between  $m_{s,m,l}$  and  $t_{s,m,l}$

$$m_m = 5.4196 \times 10^{-6} t_m^3 - 0.01143 t_m^2 + 18.09868 t_m + 46.11503 \quad (20)$$
$$m_l = 0.00714 t_l^3 - 1.38288 t_l^2 + 200.36965 t_l + 48.51134 \quad (21)$$

式中,  $Q_{m-s,m,l}$ ,  $v_{s,m,l}$ ,  $m_{s,m,l}$  分别为泄漏孔径 5, 30 和 100 mm 时的液体泄漏质量流率(kg/s)、泄漏孔处液体泄漏速率(m/s)、泄漏液体质量(kg)。

在图 5, 6 和 7 中, 随泄漏时间  $t_{s,m,l}$  延长, 液体泄漏质量流率  $Q_{m-s,m,l}$  和泄漏孔处液体泄漏速率  $v_{s,m,l}$  不断减小, 而泄漏液体质量  $m_{s,m,l}$  不断增加, 且  $Q_{m-s,m,l}$  和  $v_{s,m,l}$  的下降趋势幅度逐渐减缓,  $m_{s,m,l}$  的增加趋势幅度亦逐渐减缓。当  $t_{s,m,l} \rightarrow 0$  时, 罐内液体对泄漏孔处压力最大,  $Q_{m-s,m,l}$  和  $v_{s,m,l}$  值最大。泄漏孔径为 5, 30 和 100 mm 时,  $Q_{m-s,m,l}$  的最大值分别为 0.552, 19.913 和 221.160 kg/s, 而  $v_{s,m,l}$  的最大值都为 46.733 m/s。液面高度到达泄漏孔时, 即  $h_{s,m,l}=h_1$  时, 液体泄漏逐渐停止,  $m_{s,m,l}$  值最大。泄漏孔径为 5, 30 和 100 mm 时,  $m_{s,m,l}$  最大值分别为 10255.649, 10339.923 和 10572.760 kg。

根据上述图表和数据可知, 无论泄漏孔尺寸大小,

液氨卧罐液体泄漏过程各参数变化规律相似。但随泄漏孔径增大, 液体泄漏质量流率  $Q_m$  和泄漏液体质量  $m$  逐渐增大, 泄漏时间  $t$  逐渐减小, 而泄漏孔处液体泄漏速率  $v$  主要受罐内压力和初始液面高度的影响, 当泄漏孔尺寸改变, 其值几乎无变化。

4.3 PHAST 模拟对比分析

4.3.1 PHAST 参数设置

PHAST(Process Hazard Analysis Software Tool)软件是 DNV 公司开发的一款专门用于石油化工和天然气领域事故影响范围预测和安全计算的商业软件, 拥有 40 多年的工业应用经验, 计算准确度高, 各个模块经实验认证和比对, 在同类软件中较权威且功能完整<sup>[32]</sup>。输入工艺、设备和天气等事故场景相关参数后, 即可得到该场景下的泄漏、火灾、爆炸和扩散等计算结果。本工作采用 PHAST7.2 版本进行相关模拟计算。输入上述案例中的罐体数据及表 2 所示参数, 对液氨卧罐液体泄漏进行模拟。

表 2 PHAST 模拟关键气象参数  
Table 2 Key meteorological parameters of PHAST simulation

Ambient temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Wind speed/(m/s)	Relative humidity	Atmospheric stability	Sun radiation	Phase of release	Outdoor release direction	Whether flashing is allowed at the hole
25	1.5	0.7	E	0.5	liquid	Level	No flashing



表 3 模型理论计算结果与 PHAST 模拟结果  
Table 3 Calculation results of theoretical model and PHAST simulation

Diameter of leakage hole, $d/\text{mm}$	Parameter	Calculation result of theoretical model	PHAST simulation result	Deviation
5	$Q_{m-s}(\text{max})/(\text{kg/s})$	0.552	0.644	16.667%
	$t_s/\text{s}$	29884.027	22746.600	23.884%
	$m_s/\text{kg}$	10255.649	11618.140	13.285%
30	$Q_{m-m}(\text{max})/(\text{kg/s})$	19.913	23.187	16.442%
	$t_m/\text{s}$	837.289	655.176	21.750%
	$m_m/\text{kg}$	10339.923	11900.820	15.096%
100	$Q_{m-l}(\text{max})/(\text{kg/s})$	221.160	257.613	16.483%
	$t_l/\text{s}$	77.550	60.633	21.814%
	$m_l/\text{kg}$	10572.760	12188.870	15.286%

4.3.2 结果与分析

模型理论计算结果与 PHAST 模拟结果见表 3。通过对比分析，在相同泄漏场景下，两者计算结果规律相似，泄漏初始时刻泄漏质量流率最大，结果偏差小于 17%，泄漏持续时间偏差小于 24%，泄漏液体质量偏差小于 16%。

泄漏孔径增大，泄漏液体下降高度增加，泄漏液体质量增加。从泄漏持续时间来看，模型计算结果比 PHAST 模拟结果偏大，说明模型对于事故风险的分析及应急时间的预测更严格，对事故的控制更有效。

模型理论计算结果与 PHAST 模拟结果虽存在一定偏差，但整体趋势吻合。因此，本工作所建模型对液氨卧罐液体泄漏理论计算及风险应急具有一定适用性。

5 结 论

本工作针对液氨卧罐液体泄漏特点及卧罐结构特征，在范氏方程和流体力学理论基础上，考虑罐内实时压力及液面面积变化，对液面高度  $h$ 、液体泄漏质量流率  $Q_m$ 、泄漏孔处液体泄漏速率  $v$ 、泄漏液体质量  $m$  与泄漏时间  $t$  的变化关系进行分析，得出以下结论：

(1) 建立了液氨卧罐液体连续泄漏时液体泄漏质量流率  $Q_m$ 、泄漏孔处液体泄漏速率  $v$ 、泄漏液体质量  $m$  与液面高度  $h$  的计算模型。

(2) 液面高度  $h$  随泄漏时间  $t$  增加而下降的趋势呈非线性变化，初始泄漏时下降幅度减缓，随后又逐渐变大，即下降单位液面高度所需时间先增大后减少。

(3) 随泄漏时间  $t$  延长，液体泄漏质量流率  $Q_m$  和泄漏孔处液体泄漏速率  $v$  的减小幅度逐渐变缓，泄漏液体质量  $m$  的增加幅度亦逐渐变缓。泄漏开始时， $Q_m$  和  $v$  值最大；泄漏停止时， $m$  值最大。泄漏孔径为 5、30 和 100 mm 时，泄漏持续时间  $t$  为 29884.027、837.289 和 77.550 s， $Q_m(\text{max})$  为 0.552、19.913 和 221.160 kg/s， $v(\text{max})$  为 46.733 m/s， $m(\text{max})$  为 10255.649、10339.923 和

10572.760 kg。

(4) 模型理论计算结果与 PHAST 模拟结果最大偏差小于 24%，从参数变化规律和事故风险应急角度分析，本工作所建模型对液氨卧罐液体泄漏理论计算具有一定的适用性。

参考文献

[1] 王丹, 赵江平, 刘冬华, 等. 基于高斯模型的液氨储罐泄漏扩散仿真分析 [J]. 环境工程, 2016, 34(7): 140–144.  
Wang D, Zhao J P, Liu D H, et al. Simulation of liquid ammonia storage tank leakage diffusion based on Gaussian model [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(7): 140–144.

[2] 潘旭海, 蒋军成. 基于模拟计算的液氨储罐泄漏潜在危险性分析 [J]. 石油化工高等学校学报, 2006, (1): 64–67.  
Pan X H, Jiang J C. Potential hazard analysis on liquefied ammonia tank release based on mathematics simulation calculation [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2006, (1): 64–67.

[3] 吴欣甜, 丁峰, 赵保成, 等. 液氨泄漏事故的污染扩散研究 [J]. 南开大学学报(自然科学版), 2014, 47(4): 21–25.  
Wu X T, Ding F, Zhao B C, et al. Research on liquid ammonia tank leakage accident pollution diffusion [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2014, 47(4): 21–25.

[4] 潘旭海. 事故性泄漏动力学过程的理论与实验研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2004: 14–135.  
Pan X H. Theoretical and experimental study on dynamics process for accident of release [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2004: 14–135.

[5] 丁晓晔, 蒋军成, 黄琴. 液氨储罐事故性泄漏扩散过程模拟分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2007, (3): 7–11.  
Ding X Y, Jiang J C, Huang Q. Simulation analysis on release and dispersion process of liquefied ammonia tank [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2007, (3): 7–11.

[6] 胡园园, 王志荣. 危险性液体储罐泄漏过程的建模及工程应用 [J]. 化学工程, 2010, 38(12): 93–96.  
Hu Y Y, Wang Z R. Modeling and engineering application of leakage process of hazardous liquid storage tank [J]. Chemical Engineering (China), 2010, 38(12): 93–96.

[7] 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 X H, Jiang J C. Progress of accidental release source and mechanism models [J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural

- Science Edition), 2002, 24(1): 105–110.
- [8] Crowl D A, Louvar F J. Chemical process safety: fundamentals with applications [M]. Boston: Paul Boger, 2011: 758.
- [9] Kaiser G D. A review of models for predicting the dispersion of ammonia in the atmosphere [J]. Plant/Operations Progress, 1989, 8(1): 58–64.
- [10] Cavanaugh II T A, Siegel J H, Steinberg K W. Simulation of vapor emissions from liquid spills [J]. Journal of Hazardous Materials, 1994, 38(1): 41–63.
- [11] Horvat A. CFD methodology for simulation of LNG spills and rapid phase transition (RPT) [J]. Process Safety & Environmental Protection, 2018, 120: 358–369.
- [12] Wu X, Li C J, He Y F, et al. Dynamic modeling of the two-phase leakage process of natural gas liquid storage tanks [J]. Energies, 2017, 10(9): 1399.
- [13] Xie Q Y, Xiang L, Zhang J, 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: 104029.
- [14] Zhu G R, Guo X Y, Yi Y, 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: 104041.
- [15] 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, 40.
- Sun D L, Jiang J C, Zhang M G. Study on liquid ammonia storage vessel release and diffusion models improvement [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2011, 37(1): 27–29, 40.
- [16] 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, 1120.
- Li Y, Li J X, Ding J G, et al. Study on numerical simulation horizontal tank leaking [J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(12): 1114–1115, 1120.
- [17] 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, 476.
- Zeng X, Zhang L J, Tao G, et al. Study on hole leakage of variable cross section tanks [J]. Gas Storage and Transportation, 2010, 29(7): 519–521, 476.
- [18] 王鑫, 申杨, 赵杰, 等. 论范氏气体方程和理想气体状态方程的关系 [J]. 大学物理, 2010, 29(4): 8–10.
- Wang X, Shen Y, Zhao J, et al. On the relationship between equations of state for van der Waals and ideal gas [J]. College Physics, 2010, 29(4): 8–10.
- [19] 王修彦, 张晓东. 热工基础 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 45–71.
- Wang X Y, Zhang X D. Fundamental of thermodynamics and heat transfer [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 45–71.
- [20] 周德红, 赵云胜, 胡敏涛, 等. 合成氨厂液氨储罐泄漏环境风险分析 [J]. 安全与环境工程, 2009, 16(2): 101–104.
- Zhou D H, Zhao Y S, Hu M T, et al. Environment risk analysis on leakage of liquid ammonia tank in synthetic ammonia plant [J]. Safety and Environmental Engineering, 2009, 16(2): 101–104.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 石油化工企业设计防火标准: GB 50160-2008 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Fire prevention code of petrochemical enterprise design: GB 50160-2008 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [22] 王浩然. 液氨储罐泄漏事故应急救援体系可靠性研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017: 12–30.
- Wang H R. Reliability study of emergency rescue system for liquid ammonia tank leakage accident [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017: 12–30.
- [23] 张金霞. 液氨储罐区设备布置和配管设计 [J]. 上海化工, 2013, 38(8): 42–44.
- Zhang J X. Equipment layout and piping design for liquid ammonia spherical tank area [J]. Shanghai Chemical Industry, 2013, 38(8): 42–44.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 危险货物分类和品名编号: GB 6944-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification and code of dangerous goods: GB 6944-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [25] 李骁骅, 王晶禹. LPG 储罐的失效原因分析 [J]. 工业安全与环保, 2007, (6): 44–46.
- Li X Y, Wang J Y. Analysis on the inactivation causes of LPG tank [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2007, (6): 44–46.
- [26] Chang J I, Lin C C. A study of storage tank accident [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 19(1): 51–59.
- [27] 武永红. 液氨储罐腐蚀裂纹成因分析 [J]. 山东化工, 2018, 47(12): 82–84.
- Wu Y H. Analysis on the causes of corrosion cracking of liquid ammonia tank [J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(12): 82–84.
- [28] 程四祥, 蒋金玉. 常压储罐腐蚀的风险分析 [J]. 理化检验(物理分册), 2011, 47(6): 356–360.
- Cheng S X, Jiang J Y. Risk analysis on corrosion of atmospheric storage tanks [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2011, 47(6): 356–360.
- [29] 陈彦平. 基于 MATLAB 的氨泄漏扩散动态模拟研究 [D]. 安徽: 安徽理工大学, 2016: 14–45.
- Chen Y P. Dynamic simulation of ammonia leakage and diffusion based on MATLAB [D]. Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2016: 14–45.
- [30] 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 J X, Zhou D M, Liu L, 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.
- [31] 任玉新, 陈海昕. 计算流体力学基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 145–176.
- Ren Y X, Chen H X. The base of computational fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 145–176.
- [32] 陈利琼, 冯雨翔, 宋利强, 等. 大型油罐火灾爆炸危害范围研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(1): 100–105.
- Chen L Q, Feng Y X, Song L Q, et al. Study on damage range of fire and explosion of large oil tank [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(1): 100–105.