

# 氨制冷压缩机低压管道泄漏冷媒扩散特性研究

田志强<sup>1</sup>, 门海东<sup>1</sup>, 廖晓玲<sup>2</sup>, 王迪<sup>3</sup>, 郭曦<sup>3</sup>, 刘延雷<sup>2</sup>, 赵哲明<sup>2\*</sup>

(1.上海和中合检测技术有限公司, 上海, 201600; 2.杭州市特种设备检测研究院, 浙江 杭州, 310051; 3.东北石油大学土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆, 163318)

**摘要:** 针对氨制冷压缩机低压吸气管道在长期运行中存在疲劳强度下降的问题, 容易导致氨气泄漏。考虑低压管道泄漏方向分别为竖直向上、水平迎风 and 水平背风, 采用 Fluent 进行小孔持续泄漏模拟计算, 研究了某制冷机房非开放空间内气流速度分布对氨气扩散的影响。结果表明: 由于低压管道初始泄漏速度低, 喷射阶段持续时间短, 在受限空间内的涡流扰动作用下, 氨气沿不同方向泄漏时射流方向均发生偏转, 扩散区域集中在泄漏源的上风侧; 水平迎风方向泄漏时, 氨气在扩散区域浓度相对于其他两种情形较高, 并且在上风侧越靠近泄漏源, 氨气堆积越高; 在机房日常工作空间范围内, 水平背风方向泄漏时的易燃易爆区域占比为 76.96%, 稍高于其他两种泄漏情形。研究结论为合理有效地进行氨制冷压缩机低压吸气管道无损检测及运行维护提供根据。

**关键词:** 压力管道; 氨气; 低压; 泄漏方向; 扩散特性

中图分类号:TQ053.6

文献标识码:A

## Refrigerant diffusion characteristics of low-pressure pipe leakage in ammonia refrigeration compressor

Tian Zhiqiang<sup>1</sup>, Men Haidong<sup>1</sup>, Liao Xiaoling<sup>2</sup>, Wang Di<sup>3</sup>, Guo Xi<sup>3</sup>, Liu Yanlei<sup>2\*</sup>

1. Shanghai Hezhonghe Testing Technology Co., Ltd, Shang Hai, 201600; 2. Hangzhou Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou Zhejiang, 310051; 3. Northeast Petroleum university, school of civil engineering and architecture, Daqing Heilongjiang, 163318

**Abstract:** For the low-pressure suck pipe of ammonia refrigeration compressor, there is a problem of fatigue strength decline in long-running process, which can easily lead to ammonia leakage. The leakage direction of low-pressure suck pipe are vertical upward, horizontal upwind and horizontal leeward respectively, micro pore leakage characteristic is simulated by using Fluent, the relationship between the velocity distribution of the airflow field in the confined space and the diffusion concentration distribution of ammonia in different leakage directions is analyzed. Analytical results show that the low initial leakage velocity of the low-pressure pipeline, the duration of the injection stage is short. Under the influence of the vortex disturbance in the confined space, the direction of the jet is deflected when the ammonia leaks in different directions, and the diffusion region is mainly located on the windward side of the leakage source; When the ammonia leaked along the horizontal upwind direction, the concentration of ammonia in the

**作者简介:** 田志强, 大学本科, 中级注册安全工程师, 从事化工安全检测相关研究; 赵哲明 (通信作者) 大学本科, 从事承压类特种设备健康监测。

**基金项目:** 杭州市农业与社发科技计划项目 (20201203B159); 浙江省自然科学基金基础公益项目 (LGF21E040002)

diffusion region was higher than the other two cases, and in the upwind region, the closer to the leakage source, the higher the ammonia accumulation; Within the spatial scope of the daily working of the machine room, the proportion of flammable and explosive areas is 76.96% when the ammonia leaked along the horizontal leeward direction, slightly higher than the other two kinds of leakage situation. The research results provide the basis for the nondestructive testing and operation maintenance of low-pressure suck pipe of ammonia refrigeration compressor.

**Key words:** pressure piping; ammonia; low-pressure; leakage direction; diffusion characteristics

## 0 引言

氨制冷压缩机低压排气口管道连接处由于腐蚀穿孔,机械振动导致紧固件松弛和垫片失效,以及人为操作不当等不可预见因素,均有可能造成氨制冷剂泄漏<sup>[1-2]</sup>。冷库氨泄漏事故造成的严重后果将给生命财产带来巨大的损害<sup>[3]</sup>。

计算流体力学(CFD)方法适于模拟复杂湍流流动的泄漏污染物扩散过程<sup>[4-8]</sup>。孙恩吉<sup>[9]</sup>基于 *Realizable k-ε* 方程对氨气泄漏进行有限元数值模拟,分析了不同泄漏位置、不同排风条件下氨气的运移规律。Tan<sup>[10]</sup>等利用 Fluent 软件对某食品厂冷库氨泄漏扩散进行数值模拟研究。研究了不同泄漏速度、泄漏点高度、风速等初始条件下,氨气扩散浓度分布规律。张俊飞<sup>[11]</sup>等基于 Fluent 软件对于氨气储罐的泄漏进行模拟,研究在不同风速、不同风向以及设置障碍物下对氨气扩散的影响。黄金磊<sup>[12]</sup>等基于高斯烟羽数学模型,利用 FDS 模拟研究氨泄漏扩散浓度随变化规律,氨气浓度水平方向分布呈近似蒲扇型,风力有利于氨的扩散;同时得到致死区、重伤区以及致伤区的扩散距离。然而在受限空间制冷机房内对于压缩机低压吸气管道冷媒在不同泄漏方向上对其扩散特性的研究较少。

本文将以某氨制冷机房为研究对象,考虑制冷机房内压缩机低压吸气管道泄漏方向分别为竖直向上、水平迎风和水平背风,选择 RNG *k-ε* 方程为湍流模型,采用 Fluent 软件进行小孔持续泄漏模拟计算,通过对含送风口的制冷机房受限空间流场速度分析,总结气态氨冷媒不同泄漏方向的扩散规律,为准确预测氨气泄漏危险区域提供依据。

## 1 模型的建立

### 1.1 物理模型

如图 1 所示,建立某制冷机房泄漏源所在剖面物理模型,分析氨气在受限空间内扩散特性及浓度分布规律。制冷机房尺寸为 20m×6m,送风口与出风口直径均为 1m;三台螺杆压缩机尺寸为 1m×1m,横向排列间距为 1.5m;低压循环桶直径为 1.5m,高 2.1m;排液桶尺寸为 3m×1.5m。泄漏源位于二号压缩机,分别设置垂直向上、水平迎风与水平背风三种泄漏方向。

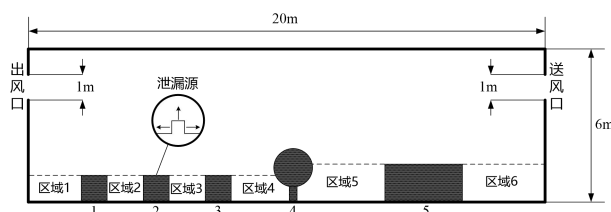


图 1 泄漏模型

(1. 一号压缩机, 2. 二号压缩机, 3. 三号压缩机, 4. 低压循环桶, 5. 贮液桶)

### 1.2 气态氨冷媒的泄漏模型

将氨制冷机房内压缩机吸气口压力管道的泄漏过程看作是小孔持续泄漏,泄漏过程管内压力不随泄漏

时间变化，其泄漏过程为等熵过程，因此氨气泄漏过程可视为匀速<sup>[13-15]</sup>。通过绝热方程和伯努利方程，并引入流量系数 $\phi$ 修正氨气在泄漏源处所受摩擦阻力的影响，可得到氨气泄漏速度模型：

$$v = \phi \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (1)$$

其中， $v$ 为氨气泄漏速度，m/s； $k$ 为气体等熵指数； $u_j$ 为速度矢量，m/s； $R$ 为气体常数； $T$ 为泄漏口处氨气温度，K； $P_0$ 为环境压力，Pa； $P_1$ 为氨气泄漏压力，Pa； $\phi$ 为流量系数，即实际流量与理论流量的比值，一般取0.97~0.98。根据压缩机低压吸气管道工况（252K，102.9Kpa）得出泄漏速度为8.2m/s。根据工业通风送风风机风速规定，机房送风速度设定为7.5m/s。定义泄漏源与送风口为速度入口，出风口为压力出口，其余计算区域边界设定无滑移 wall 壁面。为了能够准确模拟氨气的扩散过程，对泄漏源及送风口和出风口区域进行网格加密。

### 1.3 气态氨冷媒的扩散模型

#### (1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (2)$$

其中， $\rho$ 为流体密度，kg/m<sup>3</sup>； $t$ 为泄漏时间，s； $u_j$ 为速度矢量，m/s。

#### (2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \frac{\partial \tau}{\partial c} + (\rho - \rho_a) g_i \quad (3)$$

其中， $p$ 为压力，Pa； $\mu_t$ 为动力粘度，Pa·s； $g_i$ 为重力加速度矢量，m/s<sup>2</sup>。

#### (3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_i \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{c_{p_p} - c_{p_a}}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial w}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (4)$$

其中， $T$ 为流体温度，K； $k_i$ 为常数； $c_p$ 分别为混合物流体定压比热，J/(kg·K)。

#### (3) 组分运输方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega_i) + \nabla \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_i \omega_j) = -\nabla \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (5)$$

其中， $\omega_i$ 为*i*组分的质量分数。

#### (4) 湍流的控制方程

本文针对氨制冷机房的流场进行数值模拟，属于非开放空间并且存在各种设备作为流场障碍物，因此选择可以提高湍流流动涡旋模拟精度的 RNG  $k$ - $\varepsilon$ 模型。

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dk}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \\ \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\alpha_\varepsilon \mu_{eff}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} + G_k + C_{3\varepsilon} + G_b) G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

其中， $G_k$ 为平均速度引起的湍动能； $G_b$ 为浮升力引起的湍动能； $Y_m$ 为可压缩速度湍流脉动膨胀对总耗散率的影响。

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 竖直向上泄漏时氨气扩散规律

图2为氨气在竖直向上方向发生泄漏时，0~20s泄漏初期的扩散规律。氨气由于初始泄漏速度较低导致喷射惯性力较小，因此氨气喷射高度较低。氨气向空间喷射的过程，泄漏速度迅速下降，在重力及送风流场的主导作用下进行扩散，膨胀扩散剧烈，泄漏气团面积较大并朝着背风向偏移，浓度由泄漏中心向云团外层递减，出现明显地浓度分层。当泄漏到5s时，氨气逐渐向制冷机房左壁面及出风口扩散。由于氨气喷射的初始流场受到送风横向流场及周围设备表面的阻碍，使得在一号压缩机上方和一号压缩机与二号压缩机间隔处

形成涡流。泄漏时间达到 15s 时，积聚在机房左壁面与一号压缩机间隔处和一号压缩机与二号压缩机间隔处的氨气浓度区域稳定。但是泄漏速度流场由于受到一号压缩机与二号压缩机间隔处上方气旋的对流冲击，射流方向逐渐向迎风方向偏移。在氨气泄漏 20s 时，汇聚在机房左壁面与一号压缩机间隔处的氨气随二号压缩机上方大涡流的驱动作用朝着迎风方向运移到机房中部空间，体积分数由泄漏 15s 时的 16.09% 降低至 2.61%；一号压缩机与二号压缩机间隔处的氨气亦逐渐扩散到机房空间迎风侧，浓度由 12.09% 下降到 5.35%。而机房顶棚附近，由于送风流场速度相对于氨气扩散速度较大，在机房空间上方形成速度分层，氨气浓度较低。

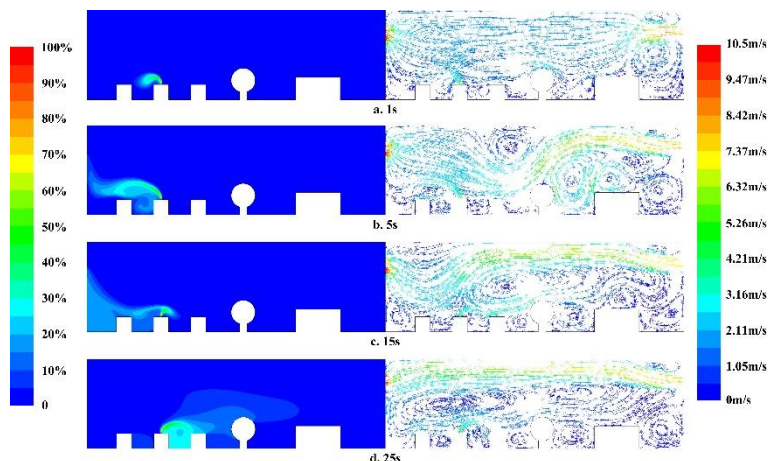


图 2 竖直向上泄漏时氨气扩散规律(左为浓度分布，右为矢量速度分布)

## 2.2 水平迎风泄漏时氨气扩散规律

图 3 为氨气在水平迎风方向发生泄漏时，0~20s 泄漏初期的扩散规律。由图 4 可知，当泄漏到 5s 时，在泄漏源喷射流场与横向送风流场混流作用下，氨气射流气柱先由水平迎风方向向背风向发生转折，形成“L”型喷射气柱，速度从泄漏源向运移方向递减，并在一号与二号压缩机间隔处上方的涡流作用下，形成扩散云团，并逐渐向机房左侧空间和出风口运移。泄漏时间达到 15s 时，聚集在机房左壁面与一号压缩机间隔处和一号与二号压缩机间隔处的氨气在送风气流驱动下浓度被稀释，从出风口流出。而泄漏源射流方向在三号压缩机上方的大型涡流扰动作用下恢复到水平迎风方向。氨气开始在二号与三号压缩机间隔处逐渐沉积，并向机房右侧区域扩散。在氨气泄漏 20s 时，在二号与三号压缩机间隔处的涡流作用下，氨气迅速积聚，浓度从 15s 时的 23.5% 上升到 41.66%；而且三号压缩机与低压循环桶间隔处的氨气浓度亦由 5.81% 上升到 14.78%。此时，机房内部区域的速度流场区域稳定，氨气逐渐向机房右侧空间及排液桶附近扩散。而机房顶棚附近，由于送风气流的冲释，氨气浓度较低。

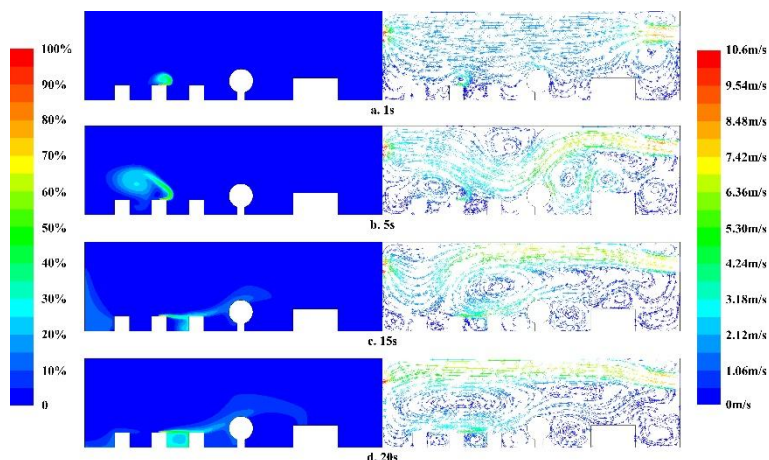


图 3 水平迎风泄漏时氨气扩散规律(左为浓度分布，右为矢量速度分布)

## 2.3 水平背风泄漏时氨气扩散规律

图 4 为氨气在水平迎风方向发生泄漏时, 0~20s 泄漏初期的扩散规律。由图 6 可知, 在泄漏 5s 时, 一号压缩机与二号压缩机间隔处的氨气不断堆积, 氨气浓度沿着一号压缩机右侧表面、地面及二号压缩机左侧表面浓度逐渐升高。喷射气柱增大, 氨气朝着机房左壁面扩散, 到达左壁面时, 部分氨气从出风口流出, 其余氨气在重力作用及壁面效应的作用下开始向下扩散。当泄漏发生 15s 时, 聚集在一号压缩机与二号压缩机间隔处的氨气浓度越来越高, 从 5s 时的 32.96% 上升到 47.07%; 机房左壁面与一号压缩机间隔处的氨气在该处的涡流作用下亦不断扩散。随着泄漏的进行, 氨气泄漏源射流气柱方向已经发生明显变化, 从初始的水平背风方向朝迎风向偏转。由于在一号压缩机上方形成的涡流区边缘流场速度增大, 汇聚在机房左壁面与一号压缩机间隔处的氨气已经被驱散到机房中部区域。并且一号压缩机与二号压缩机间隔处的氨气也不断随涡流扩散到机房中部空间, 浓度下降到 18.78%。

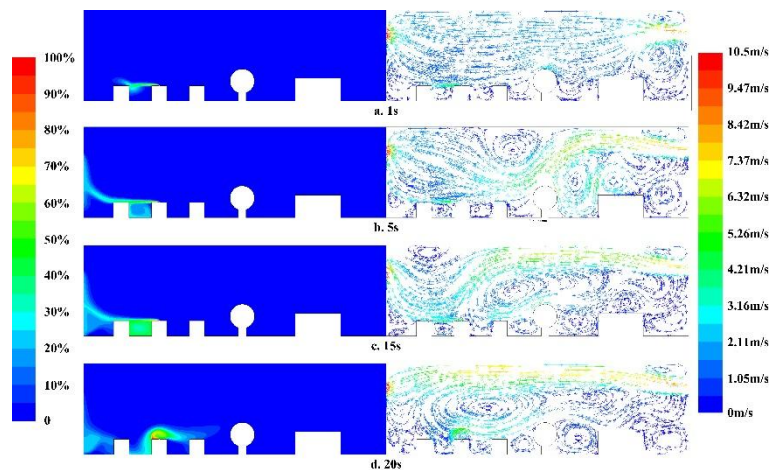


图 4 水平背风泄漏时氨气扩散规律(左为浓度分布, 右为矢量速度分布)

#### 2.4 三种泄漏方向氨气扩散危害性对比

当泄漏氨气与空气混合后, 体积分数达到 11%~14% 时, 遇明火即可点燃; 达到 16%~25% 时, 遇明火即会发生爆炸, 而制冷机房地面是设备聚集和人员活动的主要区域, 摩擦起电、点火作业等明火产生频繁, 存在较高的安全隐患, 因此取距离地面高度为 0~2.1m 区域的浓度分布进行分析研究, 图 8 为氨气在三种泄漏方向时扩散稳定时机房工作区域的易燃易爆分布情形。通过计算得到竖直方向泄漏时扩散稳定时所需时间为 1607s, 水平迎风泄漏时为 1555s, 水平背风泄漏时为 1602s。由图 8 可知, 氨气沿竖直向上和水平迎风方向泄漏时, 机房左壁面至二号压缩机左侧表面的区域危险性相对较小; 而水平背风泄漏时, 一号压缩机与二号压缩机间隔处上方区域氨气浓度已经达到燃烧爆炸极限。三种泄漏方向情形中易燃易爆区域面积约分别占比 74.35%、72.38% 和 76.96%, 因此, 氨气沿水平背风泄漏时, 易燃易爆区域范围相比于其他两种情形稍大一些。

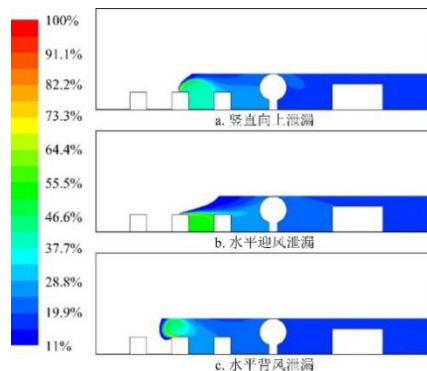


图 5 不同泄漏方向氨气扩散稳定状态时易燃易爆区域范围

氨气沿水平迎风方向泄漏时，其空间扩散浓度要明显高于其余两种情形，尤其在二号与三号压缩机间隔处。以水平迎风泄漏方向为例，分析不同扩散区域泄漏氨气的浓度随时间变化的规律。由图 6 可知，不同区域在泄漏发生 180s 后氨气聚积的浓度逐渐趋于最高值。泄漏口处右侧各区域的氨气浓度显著高于左侧区域，其中区域 1 浓度最高，沿机房右侧空间的区域浓度依次降低，说明泄漏源上风侧是氨气主要扩散区域。区域 1 与区域 2 的氨气浓度低于燃烧爆炸极限；区域 6 的氨气浓度随泄漏时间的进展，危险性增加。

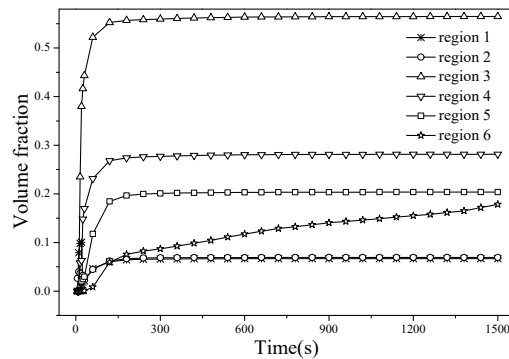


图 6 水平迎风泄漏时不同区域氨气浓度随时间变化规律

### 3 结论

通过对含送风口制冷机房内氨制冷压缩机低压吸气冷媒泄漏扩散进行数值模拟，考虑竖直向上、水平迎风及水平背风泄漏方向，分析了氨气泄漏后在制冷机房受限空间内的扩散浓度分布特征。研究得到如下主要结论：(1) 由于氨制冷压缩机低压吸气管道发生泄漏时，初始射流速度小，喷射阶段持续时间短，在送风流场和泄漏源附近设备的阻碍作用下，受限空间内形成不同强度涡流区，沿不同泄漏方向的氨气射流方向均会发生偏转，导致氨气扩散方向主要朝着上风侧发展。(2) 氨气沿水平迎风方向泄漏时，扩散区域浓度要明显高于其余两种情形，并且在上风向越靠近泄漏源的区域，氨气聚积的浓度越高。(3) 在距离机房地面高度为 2.1m 的日常工作空间范围内，水平背风方向泄漏时的易燃易爆区域占比为 76.96%，稍高于其他两种泄漏情形。

#### 参考文献：

- [1] 蒋红辉.氨制冷压力管道焊接接头质量检测及分析 [J].压力容器, 2014, 05(31), 51-57.
- [2] 周波,许林涛,朱保赤.在用氨制冷压力管道定期检验风险评价研究[J].工业安全与环保,2013,39 (4):81-82.
- [3] 杨宗政,熊发,袁雪竹,等. 翁牌冷藏实业有限公司氨泄漏事故的警示[J].制冷技术,2014,34(3): 57-59.
- [4] 王莉莉,王梦珠,吕妍,等.泄漏位置对激光检测天然气管道泄漏影响分析[J].压力容器,2016, 33(8):60-64.
- [5] 袁朝庆,郝佳宁,马良.海底悬跨石油管道泄漏流场和温度场耦合分析[J].压力容器,2013, 30(5):23-27.
- [6] 邵斌,秦敬芳,应家仪,等. 稳态情况下天然气管道泄漏数值模拟研究 [J]. 化工机械,2023,50(01):83-87.0254-6094.202301013.
- [7] Galeev A D, Starovoytova E V, Ponikarov S I. Numerical simulation of the consequences of liquefied ammonia instantaneous release using FLUENT software [J]. Process Safety & Environmental Protection, 2013, 91(3): 191-203.
- [8] Ohba R, Kouchi A, Hara T, et al. Validation of heavy and light gas dispersion models for the safety analysis of LNG tank [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, 17(5): 325-337.
- [9] 孙恩吉,李红果,王敏.基于 Realizable k-ε 湍流模型的氨气泄漏数值模拟研究 [J].中国安全生产科学技术,2017,13(2):114-118.
- [10] Tan W, Du H, Liu L Y, et al. Experimental and numerical study of ammonia leakage and dispersion in a food factory[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 47:129-139.
- [11] 张俊飞,夏新,李德生,等. 基于 Fluent 软件的氨气泄漏扩散研究[J].天津理工大学学报, 2017, 33(5): 60-64.
- [12] 黄金磊,朱国庆,俞梦玮.基于 CFD 的氨泄漏扩散危险性定量分析[J].消防科学与技术,2015, 34(6):812-815.
- [13] 冯文兴,王兆芹,程五一.高压输气管道小孔与大孔泄漏模型的分析比较[J].环境与安全工程,2009, 16(4):108-110.
- [14] 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):1255-1260.
- [15] 关义,王博,王卫强.埋地热油管道弯管的热应力分析[J].当代化工, 2020(008):049.

[16] 张鹏,任淑娟.埋地天然气管道小微孔泄漏规律研究[J].中国安全科学学报,2014,24(2):52-58.