

· 环境风险防控 ·

冷库输氨管道氨气泄漏扩散特性分析及事故后果研究

齐晗兵^{1,2}, 吴亦萌¹, 王 迪¹, 王秋实¹, 李 栋^{1,2}

(1. 东北石油大学土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318;
2. 黑龙江省石油石化多相介质处理及污染防治重点实验室, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 针对冷库输氨管道老化腐蚀从而发生泄漏问题, 建立开放空间氨气泄漏计算流体力学模型, 分析了泄漏时间、泄漏速度和环境风速对氨气在开放空间浓度分布规律的影响。结果表明, 泄漏时间对氨气浓度分布影响很大, 随着时间增长, 空间各点氨气浓度总体逐渐增大后稳定不变, 不同点浓度增大的路径不同, 浓度达到稳定的时间也不同; 泄漏速度越大, 氨气在同一时间内扩散范围越大, 对大气环境危害更严重; 风速越大, 扩散区域有所偏移, 但区域内氨气浓度变化不大。研究结论可为冷库氨泄漏事故处理提供借鉴。

关键词: 氨气泄漏; 输氨管道; 数值模拟; 开放空间; 事故处理

中图分类号: X933

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.02.023

Analysis of Ammonia Leakage Diffusion Characteristics and Accident Consequence of Ammonia Transport Pipeline for Cold Storage

QI Hanbing^{1,2}, WU Yimeng¹, WANG Di¹, WANG Qiushi¹, LI Dong^{1,2}

(1. School of architecture and civil engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2. Heilongjiang Key Laboratory of Petroleum and Petrochemical Multiphase Treatment and Pollution Prevention, Daqing 163318, China)

Abstract: In view of leakage problems of ammonia pipelines in the cold storage caused by aging corrosion, a computational fluid dynamics model of ammonia leakage in open space was established, and the effects of the leakage time, leakage velocity and ambient wind speed on the concentration distribution of ammonia in open space were analyzed. The results showed that the leakage time had a great influence on the ammonia concentration distribution. With the increase of time, the ammonia concentration at all points in the space increased gradually and then remained stable. The paths of the concentration increase of different points were different, and the time to reach a stable concentration was also different. The larger the leakage speed was, the greater the diffusion range of ammonia at the same time was, and the more serious harm to the atmospheric environment was. With the larger the wind speed, the diffusion area was shifted, but the ammonia concentration in the area was not changed much. The research conclusions could provide some reference and help for the accident treatment of the ammonia leakage in the cold storage.

Keywords: Ammonia Leakage; Ammonia Transport Pipeline; Numerical Simulation; Open Space; Accident Treatment

CLC number: X933

冷库输氨管道长期处于高压运行工况, 年久失修, 由于紧固件脱落、腐蚀穿孔和法兰连接失效等原因时常导致泄漏事故^[1-3]。氨气具有毒性或易燃易爆性, 一旦发生泄漏, 将会对周围的环境以及人员造成难以挽回的损失和伤害^[4-5]。

近年来, 国内外一些学者进行了氨气泄漏扩散

规律的研究。陈彦平^[6]总结了液氨储罐泄漏的外在原因, 基于 MATLAB 软件实现了气体泄漏扩散的快速动态模拟。董晓强等^[7]选取氨制冷机房作为典型场景, 应用计算流体力学方法研究氨气泄漏扩散规律, 采用 Fluent 软件对无通风及上下通风情况下的制冷机房氨气泄漏扩散进行了数值模拟。

收稿日期: 2019-09-26

基金项目: 中国博士后科学基金特别项目(2018T110267); 中国石油科技创新基金研究项目(2018D-5007-0608); 黑龙江省教育厅成果研发培育项目(TSTAU-R2018018); 杭州市农业与社会发展科研计划项目(20180533B20)

作者简介: 齐晗兵(1975-), 男, 博士、教授。研究方向: 气体泄漏及激光检测。E-mail: 38830874@qq.com

通信作者: 吴亦萌(1994-), 女, 硕士研究生。研究方向: 气体泄漏及激光检测。E-mail: 761455431@qq.com

引用格式: 齐晗兵, 吴亦萌, 王 迪, 等. 冷库输氨管道氨气泄漏扩散特性分析及事故后果研究[J]. 环境保护科学, 2020, 46(2): 117-122.

刘丽艳等^[8]从气体扩散机理出发,以特定事故罐区为环境,设定氨气泄漏位置为储罐封头上接管处,应用 CFD 研究意外泄漏后氨气浓度场、速度场的变化情况,并根据模拟结果对氨气意外泄漏的危险区域范围进行预测。江南等^[9]运用 Fluent 数值模拟软件计算分析液氨泄漏扩散浓度场及扩散规律,并与基于高斯烟羽模型的理论计算结果相对比,验证其结果的可靠性。结合数值模拟结果和暴露时间,对人员在静止状态及疏散状态下的死亡百分率进行定量评估。GALEEV et al^[10]采用 Fluent 软件对氨泄漏时气液两相扩散进行数值分析,得出风速和障碍物对液氨蒸发特性及扩散浓度的影响。GALEEV et al^[11]通过 Fluent 软件分析了液氨瞬时泄漏过程中风速对有毒冲击区域的扩散特性的影响。然而,针对冷库输氨管道在开放空间下的氨气泄漏扩散规律研究较少。

文章采用 CFD 模拟方法,针对开放空间输氨管道的氨气泄漏,考虑不同泄漏时间、不同泄漏速度和环境风速,分析氨气在开放空间内的扩散规律。

1 模型的建立

1.1 物理模型

冷库室外环境计算区域长为 160 m, 高为 50 m; A、B 冷库尺寸均为 45 m×20 m; 泄漏点位于 A、B 冷库之间的 DN80 输氨管道, 泄漏孔径为 5 mm。冷库室外环境物理立面模型见图 1。

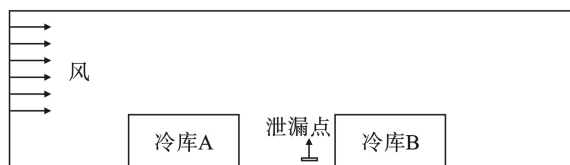


图 1 冷库室外环境立面几何模型

1.2 基本假设

泄漏的氨气和空气均视为理想气体; 把空气质点的平均运动看作是是不可压缩流体的运动; 氨气出现泄漏后, 泄漏孔在应力作用下口径保持不变, 且泄漏速度不随时间改变; 氨气扩散过程中, 不发生化学反应和相变反应, 室外环境温度不发生变化, 重力加速度不随空间高度改变。

1.3 数学模型

建立开放空间氨气泄漏扩散过程数学模型, 见式(1~8)。

1) 连续方程 (质量守恒)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \tau}{\partial c} + (\rho - \rho_a) g_i \quad (2)$$

3) 能量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = & \frac{1}{c_p} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{c_{p_p} - c_{p_p}}{c_p} \cdot \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_i}{\sigma_c} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial T}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3)$$

4) 组分输送方程

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

5) 湍动能 k 方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ & G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (5)$$

6) 湍动耗散率 ε 方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k \varepsilon_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

式(1~6)中, G_k 为由平均速度梯度引起的湍动能; G_b 为由浮力作用引起的湍动能; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, Fluent 软件中的默认值分别为 1.44、1.92 和 0.09。

7) 氨气泄漏初始速度

$$v = \varphi \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{RT}{M} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} p_a / p_2 > CPR \quad (7)$$

$$v = C_h \sqrt{\frac{RT_2}{M} \times \frac{2k}{k+1}} p_a / p_2 < CPR \quad (8)$$

式(7~8)中, C_h 为泄放系数, 取 0.9; k 为氨气绝热指数, 取 1.313; R 为氨气气体常数, 8.314 J/(mol·K); M 为氨气摩尔质量, 0.017 kg/mol。管道泄漏可看成小孔持续泄漏, ϕ 一般取 0.97~0.98^[12-13]。

1.4 边界条件

根据输氨管道工况(15℃, 0.12 MPa)得出初始泄漏速度为 194.64 m/s, 所以设定泄漏口大小为 5 mm。定义泄漏源与室外环境左边界为速度入口, 室外环境上边界和右边界为自由流出口, 自然风速

为 1.3 m/s。

2 模拟结果与分析

2.1 泄漏时间对泄漏扩散的影响

输氨管道泄漏口的坐标(110.495 ~ 110.500 m, 1.08 m)。取泄漏口附近 5 个点作为氨气浓度观测点, 横纵坐标分别为($X=100$ m, $Y=1.6$ m), ($X=110$ m, $Y=1.6$ m), ($X=110$ m, $Y=5$ m), ($X=115$ m, $Y=1.6$ m), ($X=115$ m, $Y=5$ m)。观测点位置分布情况见图 2。

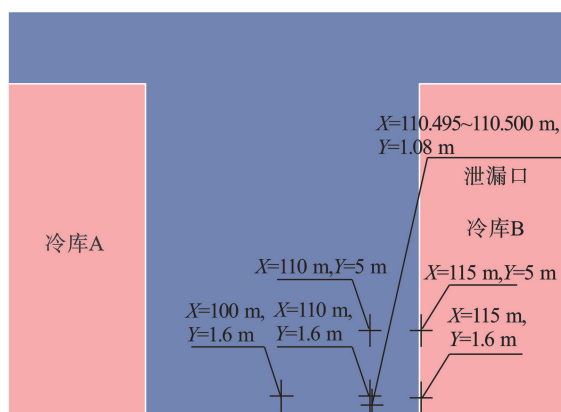


图2 观测点位置分布图

全部观测点氨气浓度随时间变化曲线图见图 3。

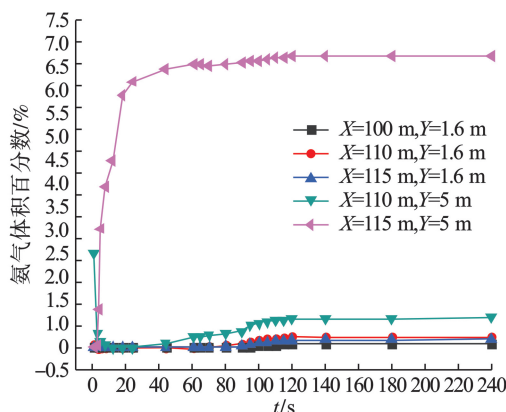


图3 全部观测点氨气浓度随时间变化曲线图

点($X=115$ m, $Y=5$ m)在氨气泄漏后的 20 s 内, 氨气浓度迅速上升至 6%, 这是由于氨气泄漏速度很大, 在自然风的影响下, 射流气柱向右侧偏移。遇到冷库 B 阻碍后浓度上升, 20 s 后稳定在 6%。

部分观测点氨气浓度随时间变化曲线图见图 4。

点($X=110$ m, $Y=1.6$ m)离泄漏口正上方较近, 氨气初始泄漏时, 该点浓度接近 0.01%。随着泄漏进行, 射流气柱在自然风的条件下向右偏移, 此点的浓度迅速降低接近 0。60 s 后氨气浓度不断上升, 120 s 后趋于稳定, 氨气浓度接近 0.22%。

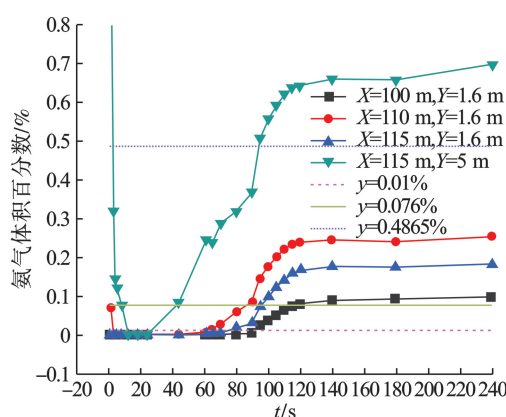


图4 部分观测点氨气浓度随时间变化曲线图

点($X=110$ m, $Y=5$ m)在氨气泄漏后的短时间内浓度达到了 2%, 随着泄漏进行, 射流气柱在自然风的条件下向右偏移, 该点的氨气浓度迅速下降接近零。40 s 后由于射流氨气卷吸空气使该点的氨气浓度增高, 120 s 后氨气浓度趋于稳定, 浓度为 0.5%。

点($X=115$ m, $Y=1.6$ m)靠近建筑物, 距离管道泄漏点较远, 且射流氨气密度小于空气, 运移路线向上, 所以在泄漏初始阶段, 该点氨气浓度一直接近零, 泄漏 70 s 后, 由于射流轴线右侧氨气遇到障碍物运移方向向下, 形成涡流区, 使该区域浓度不断升高。120 s 后, 氨气浓度达到 0.22%。

点($X=100$ m, $Y=1.6$ m)在泄漏口左侧, 逆风向, 在氨气泄漏初始阶段, 氨气浓度较低, 随着时间推移, 氨气膨胀扩散, 此点的氨气浓度不断增加。120 s 后, 氨气浓度稳定在 0.08%。

分析以上现象可知, 泄漏时间对各点氨气浓度影响很大, 随着时间推移, 各点氨气浓度不断上升。当空气中氨气的体积分数达 11% ~ 14% 时, 遇明火即可点燃, 所以氨气浓度在此范围的为火灾区; 体积分数达 16% ~ 25% 时, 遇明火即会发生爆炸, 所以氨气浓度在此范围的为爆炸区。氨气体积百分数在 0.01% 会对人体造成轻微危害, 氨气体积百分数在 0.076% 会对人体造成重度危害。氨气体积百分数在 0.486 5% 时, 人在这种环境中会即可死亡。因此, 氨气体积百分数高于 0.01% 的为轻微危害区, 氨气体积百分数高于 0.076% 为重度危害区, 氨气体积百分数高于 0.486 5% 为死亡区。

点($X=115$ m, $Y=5$ m)达到稳定浓度时间最早, 仅为 20 s, 稳定浓度最高。但是稳定浓度为 6%, 未能达到火灾爆炸的浓度。点($X=110$ m, $Y=1.6$ m)($X=115$ m, $Y=1.6$ m)($X=100$ m, $Y=1.6$ m)在 60 ~ 90 s 之间先后达到轻微危害区, 在 90 ~ 120 s 之间先后

达到重度危害区,在 120 s 后始终在重危害区,未能达到致死区。

虽然泄漏空间内每个点天然气浓度最终都能达到稳定,但每个点达到稳定的路径不同,点 ($X=115\text{ m}$, $Y=1.6\text{ m}$) ($X=110\text{ m}$, $Y=1.6\text{ m}$) ($X=100\text{ m}$,

$Y=1.6\text{ m}$) 达到稳定的路径更为相似, ($X=110\text{ m}$, $Y=5\text{ m}$) ($X=115\text{ m}$, $Y=5\text{ m}$) 达到稳定的路径与其他 3 点差异较大。

2.2 泄漏速度对泄漏扩散的影响

不同泄漏速度下氨气的浓度分布见图 5。

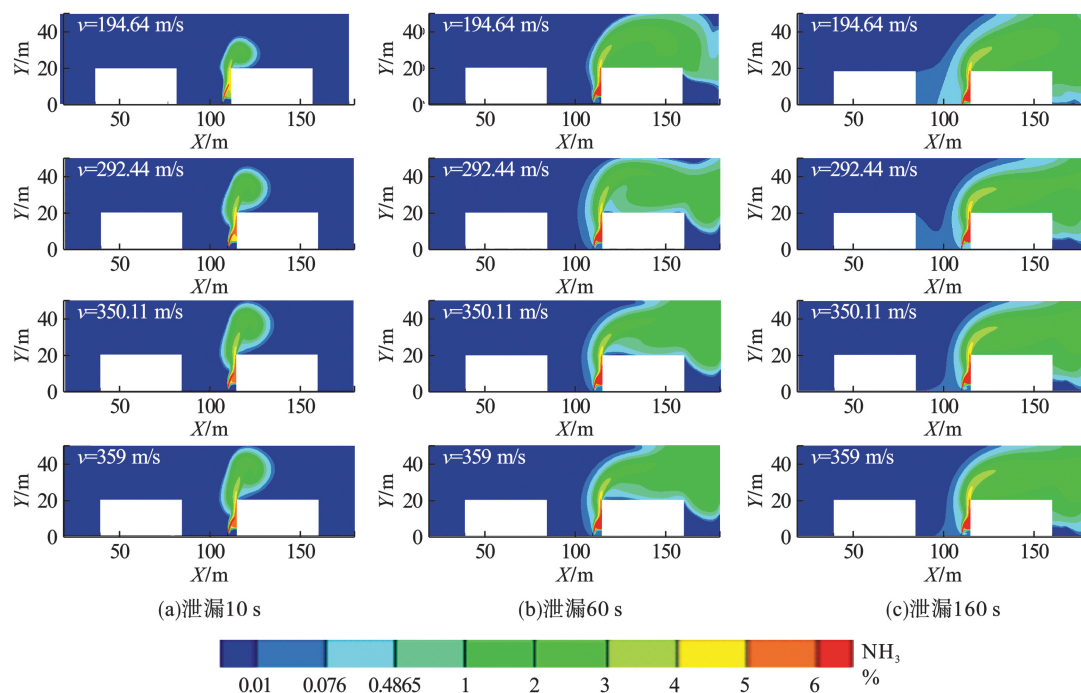


图 5 不同泄漏速度下氨气的浓度分布图

氨气泄漏 10 s 时,不同泄漏速度下的氨气扩散区域均集中在泄漏口的上部,未能向右侧偏移,泄漏高度均超过了冷库高度。氨气泄漏 60 s 和 160 s 时,在自然风作用下,氨气扩散区域从泄漏口上方,扩散到了冷库上方区域。

氨气泄漏 10 s 时,管道泄漏口泄漏速度越大,氨气扩散的范围变大:泄漏速度 $v=194.64\text{ m/s}$ 时,氨气纵向扩散高度为 37.89 m,横向扩散宽度为 22 m;泄漏速度 $v=292.44\text{ m/s}$ 时,氨气纵向扩散高度为 15.31 m,横向扩散宽度为 28 m;泄漏速度 $v=350.11\text{ m/s}$ 时,氨气纵向扩散高度为 49.26 m,横向扩散宽度为 30 m;泄漏速度 $v=359\text{ m/s}$ 时,氨气纵向扩散高度为 50 m,横向扩散宽度为 31 m。

氨气泄漏 10 s 和 60 s 时,同一时间,泄漏速度增大,氨气扩散区域越来越大;氨气泄漏 160 s 时,泄漏口左侧氨气扩散区域越来越小,可能是由于泄漏速度越大,射流气柱将泄漏口周围的空气卷吸至上空,导致此区域氨气浓度减小。

在物理模型中长度 110 ~ 115 m 之间,高度为 1.6 m,每 0.5 m 选择 1 个点,作为观测点。横坐标

为时间,纵坐标为浓度,画出 4 个不同泄漏速度下,部分观测点氨气浓度随时间变化图,见图 6。图中去掉了 $X=110.5\text{ m}$, $Y=1.6\text{ m}$ 观测点,因为该点浓度远高于选取此区间内的其他点,该点的氨气浓度高达 17%,遇明火即可发生爆炸,这主要是此观测点在氨气泄漏点正上方,所以浓度很高。而与此点仅相差 0.5 m 的两点 $X=110\text{ m}$, $Y=1.6\text{ m}$ 和 $X=111\text{ m}$, $Y=1.6\text{ m}$ 处,氨气浓度很低,从 0 ~ 160 s,氨气浓度均未超过人体的致死区浓度见图 6。

图 6 可见,所选取 10 个观测点在发生泄漏的 0 ~ 50 s,氨气泄漏速度越大,这 10 个观测点氨气浓度越高;氨气泄漏 50 s 后,泄漏速度越大,氨气浓度越低。这可能是由于泄漏初期,氨气泄漏速度越大,扩散在空气中的浓度越高,随着时间增加,氨气泄漏速度越大,携带泄漏口附近空气越多,氨气气柱卷吸空气向上空运移,导致所选点区域氨气浓度降低。

随着泄漏速度的增加,泄漏口附近人能接触到的氨气浓度先增大后减小,以 50 s 为界。泄漏速度越大,冷库上方的云团大小在泄漏前期越来越大,后期大小变化不大,云团内部浓度增加。

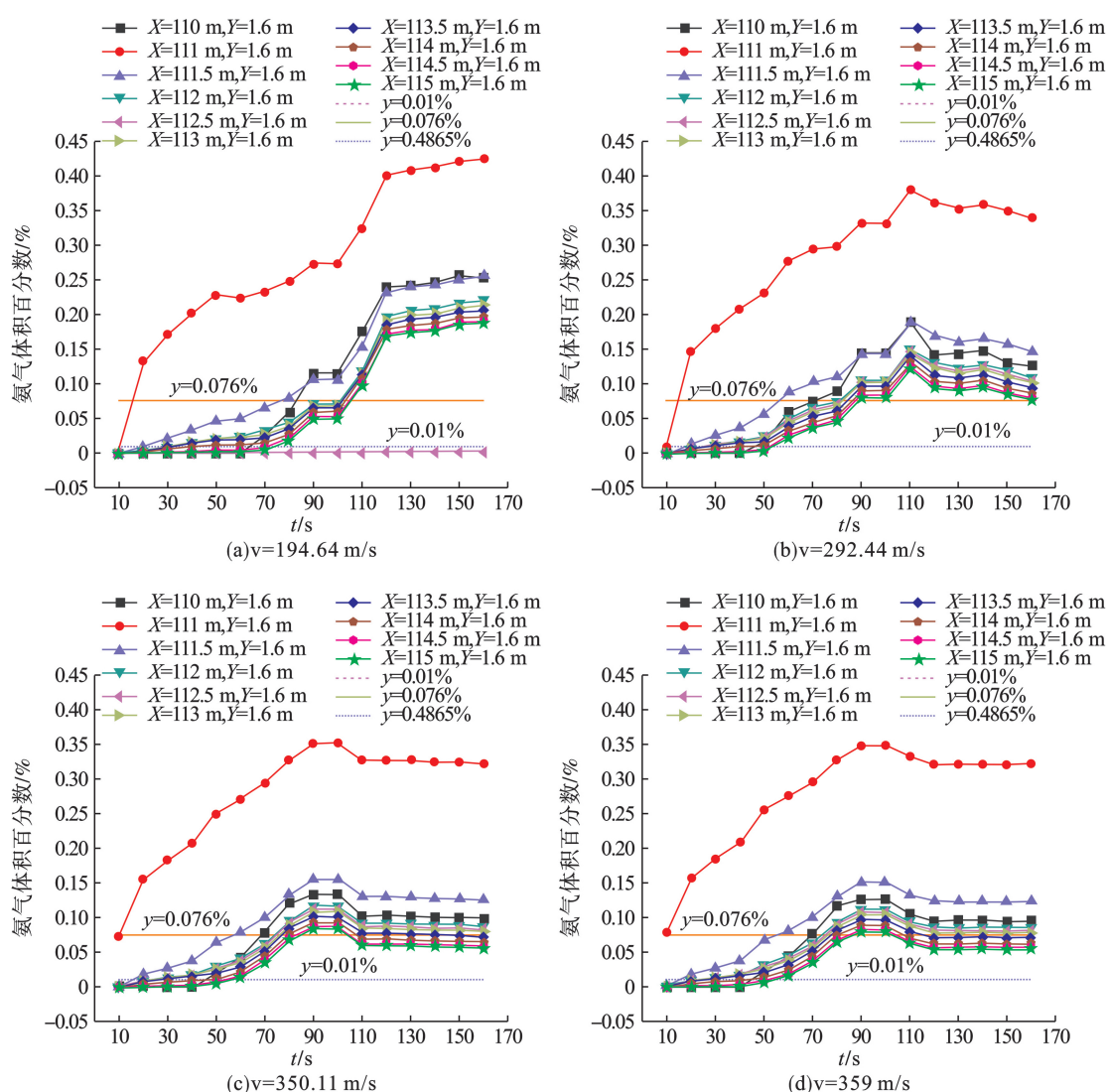


图6 不同泄漏速度下部分观测点氨气浓度随时间变化曲线图

通过分析可知,若考虑对人的影响,输氨管道压力大时,人员可选择在泄漏一定时间后逃生,输氨管道压力小时,人员可选择初始时期逃生;若考虑对空气环境的影响,可以通过降低管道压力从而降低泄漏速度来降低大气中氨的浓度,但是实际输氨管道压力的降低可实现性不高,因此对输氨管道运

行管理和维护,以及氨气泄漏的检测,事故应急处置要加以重视。

2.3 自然风速对泄漏扩散的影响

发生泄漏后 10 s 时,不同风速条件下氨气浓度的分布情况(模拟自然风速为 1.3、2.3 和 3.3 m/s 时,氨气泄漏的扩散规律)见图 7。

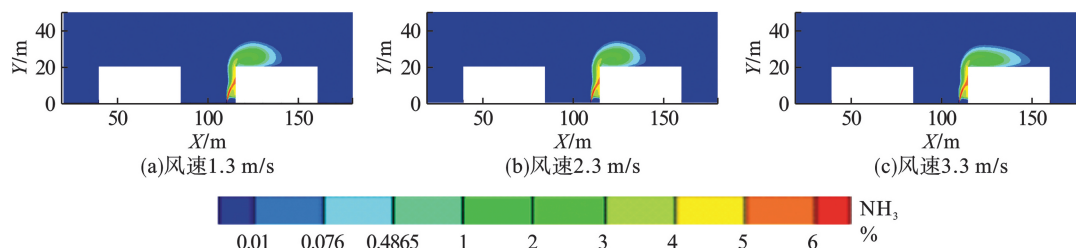


图7 不同风速条件下氨气的浓度分布图(发生泄漏后 10 s 时)

在自然风风向一致,风速不同的条件下,氨气的扩散区域大体一致,均在泄漏口右上侧。10 s 时,氨气泄漏扩散区域的高度已经超过冷库高度。

在冷库高度以下的泄漏扩散区域,风速越大,氨气浓度高于 0.05% 的区域面积越大,且此浓度的区域在风速大的时候能够更早的到达冷库。在冷库高

度(20 m)下的氨气扩散区域,氨气浓度低于 0.05% 的区域位置在不同风速条件下基本不变。在冷库高度(20 m)上的氨气扩散区域,随着风速的增加氨气扩散区域向右侧偏移,而浓度基本不变。

2.4 危险区域

分析泄漏时间、泄漏速度和风速对氨气泄漏扩散的影响后,发现人体呼吸的高度范围内氨气浓度未达到致死区浓度,达到致死区浓度的区域在泄漏口上方 5 m 以上高度的区域。氨气泄漏 60 s 后,人体呼吸高度范围内,在氨气泄漏点附近均达到了轻微危害区;氨气泄漏 90 s 后,人体呼吸高度范围内,在氨气泄漏点附近均达到了严重危害区。

3 结论

文章模拟分析了不同泄漏时间、不同泄漏速度和不同风速下,输氨管道氨泄漏对冷库室外环境的影响,得出以下结论:

1) 泄漏时间对氨气在冷库室外环境的扩散分布有很大影响。泄露口附近 5 m 高度处的氨气浓度高于 1.6 m 高度处,因此在监测氨气泄漏时,监测点可以放到较高的位置。60 s 内泄露口到右侧冷库之间的氨气浓度值低于 0.076%,对人体几乎无危害,因此氨气泄漏后,可利用该时间段逃生。

2) 管道压力越大,泄漏速度越大,同一时间氨气扩散面积越大,云团内部氨气浓度越高,对环境污染越严重。泄漏速度越大,泄漏初期人体高度范围内的氨气浓度越高,对人员逃生危害越高。对氨气泄漏预防一方面要尽可能降低管压,一方面对高压管段周围环境的氨气泄漏检测和人员逃生的路径设计要更加重视。

3) 风速越大,冷库高度上方的氨气云团向右偏

移越剧烈,冷库高度下方氨气浓度差异不大。

4) 人体能够呼吸到的高度范围内,氨气浓度达不到致死区浓度,仅能达到严重危害区的浓度。能达到致死区的区域在泄漏口上空较高处。

参考文献

- [1] 王静,叶海明.液氨少量泄漏事故风险预测分析[J]. *化学工程师*, 2013, 27(5): 46-49.
- [2] 韩树新,陈国柱,祝新伟,等.压力管道典型事故成因分析及预防应急措施[J]. *中国特种设备安全*, 2017, 33(2): 60-65.
- [3] 石晓嵩,祁锦成,刘金荣.从设计角度探讨如何防止液氨泄漏及次生事故[J]. *盐科学与化工*, 2017, 46(1): 1-5.
- [4] 关惠兴,刘茂,赵庆香.基于多专家决策方法的氨气泄漏应急决策[J]. *南开大学学报*, 2007, 40(6): 28-33.
- [5] 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.
- [6] 陈彦平.基于 MATLAB 的氨泄漏扩散动态模拟研究[D].合肥:安徽理工大学,2016.
- [7] 董晓强,李坤,刘玉婷,等.氨制冷机房氨气泄漏扩散的数值模拟[J]. *制冷学报*, 2017, 38(6): 12-19.
- [8] 刘丽艳,苏桐,张天宇,等.罐区环境下氨气泄漏扩散特性及事故后果研究[J]. *消防科学与技术*, 2018, 37(7): 859-862.
- [9] 江南,陈玉明.结合 Fluent 的液氨泄漏扩散模拟及中毒定量评估[J]. *甘肃科学学报*, 2016, 28(6): 69-72.
- [10] GALEEV A D, SALIN A A., PONIKAROV S I. Consequence analysis of aqueous ammonia spill using computational fluid dynamics[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(4): 628-638.
- [11] 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): 191-201.
- [12] 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[J]. *环境与安全工程*, 2009, 16(4): 108-110.
- [13] 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.