

文章编号:1673-5005(2015)05-0144-06

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2015.05.020

# 炼油装置有害气体泄漏区域风险等级划分

章博,王磊,王志刚

(中国石油大学机电工程学院,山东青岛 266580)

**摘要:**以典型场景为代表开展的气体泄漏扩散模拟研究未能体现炼油装置的真实泄漏风险。提出一种基于泄漏场景集的炼油装置有害气体泄漏区域风险等级划分方法。融合泄漏源和风场等重要随机因素生成泄漏场景集,定量预测场景发生概率,采用计算流体力学方法(CFD)预测气体泄漏扩散体积分数场。基于场景概率和泄漏后果,得到各场景有害气体泄漏区域风险矩阵。结果表明:构建的有害气体泄漏场景集能够定量预测场景发生概率;建立的炼油装置有害气体泄漏精细CFD模型能够预测有害气体泄漏场景后果;表征各场景有害气体泄漏区域风险的区域风险矩阵可以划分符合真实情况的炼油装置有害气体泄漏区域风险等级。

**关键词:**区域风险等级;计算流体力学;泄漏场景集;优化布置;炼油装置

**中图分类号:**X 928.03; X 928.5; X 937 **文献标志码:**A

**引用格式:**章博,王磊,王志刚. 炼油装置有害气体泄漏区域风险等级划分[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2015,39(5):144-149.

ZHANG Bo, WANG Lei, WANG Zhigang. Area risk level classification for hazardous gas release in petroleum refining installations[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(5):144-149.

## Area risk level classification for hazardous gas release in petroleum refining installations

ZHANG Bo, WANG Lei, WANG Zhigang

(College of Mechanical and Electrical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** The prediction results obtained from simulation of typical release scenarios for petroleum refining installations have difficulties in reflecting the real risk of hazardous gas release. In order to solve this problem, a new method of area risk level classification for hazardous gas release was proposed. It combines wind field set and release source set to build the release scenario set and predicts the probability of each release scenario. Computational fluid dynamics (CFD) method was used to predict the concentration field of gas leakage diffusion. Based on the leakage probability and consequences, the risk matrix of hazardous gas leakage area could be achieved. The research results indicate that the release scenario set for hazardous gas could predict the probability of each scenario quantitatively and the CFD model of hazardous gas leakage in a petroleum refining installation could predict its consequence. The risk matrix of hazardous gas leakage area would provide useful reference for classifying the area risk level in petroleum refining installations.

**Keywords:** area risk level; CFD; release scenario set; optimization of placement; petroleum refining installation

石油炼制过程易产生硫化氢( $H_2S$ )、氢气( $H_2$ )等多种有害气体,有害气体泄漏扩散研究可采用现场试验、风洞试验和数值模拟等方式,现场试验和风洞试验均因成本过高而难以普遍开展。数值模拟因

成本低且场景设置方便而成为研究气云扩散规律的重要手段<sup>[1]</sup>。目前 Siddiqui 等<sup>[2-10]</sup>用CFD模拟方法得到了有害气体泄漏扩散规律。柯道友等<sup>[11]</sup>提出了一种可迅速预测  $H_2$  泄漏扩散规律的模型,并以

收稿日期:2014-12-28

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2012EEQ026);中央高校基本科研业务费专项(13CX02079A);2012年安全生产重大事故防治关键技术科技项目(2012-487);山东省安全生产科技发展计划项目(LAK2012-6)

作者简介:章博(1980-),男,副教授,博士,研究方向为油气安全工程、安全工程信息化技术、安全管理工程。E-mail:zhangbo@upc.edu.cn。

CFD模拟验证了该方法的正确性。Khan等<sup>[12]</sup>介绍了化工装置的泄漏风险分析方法ORA(optimal risk analysis)。于立见等<sup>[13]</sup>提供了任意尺寸孔径泄漏概率的计算方法。目前有害气体泄漏风险研究均借助单一或较少典型泄漏场景进行泄漏模拟定量分析,其泄漏概率大多只考虑炼化装置本身的基础泄漏概率,很少融合气象条件概率,故结论难以代表真实泄漏风险。笔者以实际生产中影响有害气体泄漏扩散的风场条件和泄漏源工况为基础,定量构建炼油装置有害气体泄漏场景集。融合炼化装置基础泄漏概率与风场联合分布概率得到泄漏场景概率集,并结合CFD模拟计算,定量分析炼油装置有害气体泄漏区域风险,划分有害气体泄漏不同风险等级区域,为装置开展气体探测器优化布置、区域分级管理、应急决策等诸多领域提供基础支持。

## 1 区域风险等级划分概念和分析步骤

气体泄漏区域风险等级划分是在构建炼油装置泄漏场景集基础上借助CFD模拟和数据处理定量划分有害气体泄漏区域风险等级的方法。推荐步骤如下:确定炼油装置有害气体泄漏场景集及其对应的泄漏场景概率;建立有害气体泄漏CFD模型,对泄漏场景进行泄漏模拟计算,获取不同泄漏场景中各位置气体泄漏扩散体积分数值,据此预测有害气体泄漏后果;基于场景概率和泄漏后果,得到表征各场景有害气体泄漏不同区域的风险系数,对各场景风险系数累加,划分出炼油装置区域风险等级。

## 2 区域风险等级划分原理

炼油装置有害气体泄漏扩散不仅受泄漏源影响,也受风场影响。融合泄漏源集和风场集构建炼油装置有害气体泄漏场景集,通过在不同风场下泄漏源发生泄漏的条件概率得出泄漏场景的发生概率。

### 2.1 风场集构建

风场主要受风向和风速影响,其中风向决定泄漏气体扩散的主要方向,风速影响泄漏气体的扩散速度和被空气稀释的速度<sup>[14]</sup>。可通过风向和风速构建炼油装置有害气体泄漏风场集。

按照风向和风速观测相关规范,将风向划分为 $a$ 个风向,分别用 $1 \sim a$ 表示;对装置所在地近十年间最大风速取整值作为 $\max(v)$ 上限,以 $\Delta a$ 为区间长度,将 $0 \sim \max(v)$ 分为 $b$ 个子区间。将不同风向与各风速子区间进行组合构建风场集,表示为

$$F = \{f_{\partial v} \mid 1 \leq \partial \leq a, 1 \leq v \leq b\}. \quad (1)$$

式中, $F$ 表示风场集; $f_{\partial v}$ 表示风向为 $\partial$ 、风速为 $v$ 的风场。

通过装置所在地历年来气象数据可得各风场出现的频数。由大数定理推得风场概率集 $[P_{f_{\partial v}}]$ 。

### 2.2 泄漏源集构建

#### 2.2.1 基于泄漏孔径描述的泄漏源集

进行炼油装置泄漏概率分析,须首先辨识炼油装置有害气体泄漏危险源,明确研究边界。选取泄漏孔径尺寸对泄漏事故进行描述。以 $d_{\text{HZ}}$ 表示泄漏孔径,可分为小孔泄漏(small): $1 \text{ mm} < d_{\text{HZ}} < 10 \text{ mm}$ ;中孔泄漏(medium): $10 \text{ mm} < d_{\text{HZ}} < 50 \text{ mm}$ ;大孔泄漏(large): $50 \text{ mm} < d_{\text{HZ}} < 150 \text{ mm}$ ;灾难性破裂(catastrophic) $d_{\text{HZ}} > 150 \text{ mm}$ 四种情形,分别用数字 $1 \sim 4$ 表示<sup>[15-16]</sup>。忽略多个设备同时泄漏的可能性,仅考虑单个设备发生泄漏的情况,则泄漏源集可表示为

$$L = \{l_{ed} \mid 1 \leq e \leq h, 1 \leq d \leq 4\}. \quad (2)$$

式中, $L$ 为泄漏源集; $l_{ed}$ 为设备 $e$ 以孔径类型 $d$ 发生泄漏的泄漏源; $h$ 为可能发生泄漏的设备个数。

#### 2.2.2 泄漏源泄漏概率分析

预测泄漏源集中各场景发生概率,则可得泄漏源概率集。根据挪威船级社公布的石化工艺过程装置或部件的泄漏统计数据,推算装置泄漏概率<sup>[13]</sup>为

$$P_x = \exp\left[\frac{\ln(P_{r_z}) - \ln(P_{r_q})}{\ln(z-q)} \ln(x-q) + \ln(P_{r_q})\right]. \quad (3)$$

式中, $x$ 为所要计算泄漏孔径尺寸,mm; $q$ 、 $z$ 分别为孔径区间最小、最大孔径尺寸,mm; $P_x$ 为泄漏孔径为 $x$ 的泄漏源泄漏概率; $P_{r_q}$ 、 $P_{r_z}$ 分别为孔径大小为 $q$ 、 $z$ 的泄漏孔径基础泄漏概率;下标 $r$ 表示装置或部件类型,包括容器、管道、泵体、阀门等。

### 2.3 基于风场集和泄漏源集的泄漏场景集

根据炼油装置泄漏源和风场的相互独立性,结合式(1)、(2)可得泄漏场景集:

$$N = \{N_{\partial ved} \mid 1 \leq \partial \leq a, 1 \leq v \leq b, 1 \leq e \leq h, 1 \leq d \leq 4\}. \quad (4)$$

式中, $N$ 表示泄漏场景集,其元素个数为泄漏源集与风场集所有组合总数。

泄漏场景集中各场景发生概率为

$$P(N_{\partial ved}) = P(f_{\partial v}) \cdot P(l_{ed}) = P(f_{\partial v}) \cdot P_x. \quad (5)$$

式中, $P(N_{\partial ved})$ 为泄漏场景 $N_{\partial ved}$ 的发生概率。

### 2.4 有害气体泄漏区域风险等级划分

定量风险评价(QRA)一般仅考虑设备基础泄漏概率。在事故场景概率中考虑风场概率与设备泄

漏基础概率两方面因素。借助 CFD 模拟获得泄漏场景中不同监测位置有害气体扩散体积分数,表征不同监测位置泄漏后果严重程度。通过无量纲化数据处理,将有害气体扩散体积分数转化为表征该监测位置泄漏后果严重程度的风险系数,通过泄漏场景概率和风险系数的综合分析,确立该场景下炼油装置区域风险等级划分依据。

根据有害气体监测规范要求,在已建立的炼油装置泄漏模型特定高度平面内,按照一定的间隔有规律地设置一层监测点并编号,组成一个监测点方阵。假设所建立的监测点共有  $m$  行  $n$  列,则监测点方阵中各监测点监测体积分数数据可组成监测体积分数矩阵,以此表征各场景不同位置有害气体泄漏后果严重程度,其形式为

$$C_o = [a_{ij}]_{m \times n}. \quad (6)$$

式中,  $C_o$  表示泄漏场景为  $o$  的泄漏模型监测点体积分数所构成的监测体积分数矩阵;  $a_{ij}$  表示监测点监测体积分数。

为了避免不同泄漏场景下气体监测体积分数数量级之间的悬殊差别带来的消极影响,对监测体积分数矩阵作无量纲化处理。无量纲化常用直线型、折线型和曲线形等方法,此处选取直线型无量纲化方法进行处理<sup>[17]</sup>。即  $C_o$  中各监测点体积分数均除以该场景下最大监测体积分数  $\max(a_{ij})$ , 得到风险系数矩阵  $C'_o$ 。

基于场景发生概率以及泄漏风险系数矩阵可得炼油装置有害气体泄漏区域风险矩阵,表示为

$$R = \sum_{o=1}^r R_o = \sum_{o=1}^r P(N_{\text{aved}}) \cdot \frac{[a_{ij}]_{m \times n}}{\max(a_{ij})}. \quad (7)$$

式中,  $R$  为累加后的炼油装置整体区域风险矩阵;  $R_o$  为泄漏场景为  $o$  的区域风险矩阵,表征了该场景下炼油装置各个位置的相对泄漏风险大小,其值由有害气体泄漏场景发生概率  $P$  与炼油装置有害气体泄漏区域风险系数矩阵  $C'_o$  乘积表示;  $r$  为泄漏场景集元素个数。

由于泄漏场景集概率  $P(N_{\text{aved}})$  数量级较小,为了直观对比炼油装置不同监测位置相对风险大小,将  $R$  做归一化处理作为炼油装置区域风险等级划分依据。

## 3 应用

### 3.1 泄漏场景集

以某柴油加氢精制装置  $H_2S$ 、 $H_2$  泄漏为对象进行区域风险等级划分。该套装置长 215 m, 宽 60 m,

占地面积 12 900  $m^2$ , 主要包括反应器、换热器、空冷器和加热炉等设备。

通过硫化氢、氢气泄漏危险源辨识,该装置共有 17 个可能发生硫化氢( $H_2S$ )、氢气( $H_2$ ) 泄漏的设备。现取其中 4 个发生  $H_2S$ 、 $H_2$  泄漏可能性较大的设备作为泄漏源,分别是  $L_1$  含硫污水罐(含 66.29%  $H_2S$ )、 $L_2$  脱硫化氢汽提塔底管(含 62.82%  $H_2S$ 、37.18%  $H_2$ )、 $L_3$  冷高压分离器(含 56.1%  $H_2S$ )、 $L_4$  循环氢压缩机冷却出口管线(含 56.1%  $H_2S$ 、78.65%  $H_2$ )。

本文理论上已提出完备泄漏场景集,工程计算中为兼顾计算经济性,在泄漏场景概率分析基础上取其中可信度较大的泄漏场景,共构建出包含 16 种工况的泄漏场景集。构建过程如下:以装置所在地东、南、西、北 4 个风向、近十年平均风速 3 m/s 构建风场集。根据该装置所在地近十年气象观测数据,统计出该地区 4 种风向频率,北风:0.063 8/a;南风:0.189 2/a;东风:0.038 6/a;西风:0.069 8/a。

由于设备发生灾难性破裂( $d_{HZ} > 150$  mm)可能性较小,且在相同泄漏气体流速下,泄漏口越大,单位时间内泄漏量越大,则装置各处有害气体体积分数越大,结果越直观。故选取大孔泄漏( $50 \text{ mm} < d_{HZ} < 150 \text{ mm}$ )描述设备泄漏情形。根据挪威船级社公布的石化泄漏数据,孔径为 50 ~ 100 mm 的基础泄漏概率为  $5 \times 10^{-6}$ /a。由式(3)可预测: $L_1$  含硫污水罐发生 100 mm 孔径泄漏的概率为  $1.28 \times 10^{-6}$ /a;  $L_2$  脱硫化氢汽提塔底管发生 80 mm 孔径泄漏的概率为  $1.52 \times 10^{-6}$ /a;  $L_3$  冷高压分离器发生 80 mm 孔径泄漏的概率为  $1.52 \times 10^{-6}$ /a;  $L_4$  循环氢压缩机冷却出口管线发生 70 mm 孔径泄漏的概率为  $1.75 \times 10^{-6}$ /a。

由式(5)可得有害气体泄漏场景概率集,表示为

$$[P(N_{\text{aved}})] = [P_{f_{\text{av}}}]_{1 \times 4}^T \cdot [P_{l_{\text{ed}}}]_{1 \times 4} = [P_{f_{\text{av}}}]_{1 \times 4}^T \cdot [P_x]_{1 \times 4}. \quad (8)$$

### 3.2 柴油加氢装置 CFD 泄漏模拟

#### 3.2.1 装置建模及网格划分

为减少计算区域边界对气体流场的影响,设定计算区域长 306 m、宽 110 m、高 30 m,装置模型位于计算域中心,在计算区域内可认为气体流动已充分发展,边界不对区域内气体流动造成影响<sup>[18]</sup>。依据装置设计图纸进行简化后构建装置物理模型、划分网格并按计算要求设置边界条件。



### 3.2.2 网格依赖性及风场一致性分析

网格依赖性分析可保证在计算精度与计算成本之间获得最佳平衡点。通过网格依赖性分析,在保证计算精度的前提下网格数量大幅减少,由最初的  $5.14 \times 10^6$  降至  $1.32 \times 10^6$ , 网格如图 1 所示。

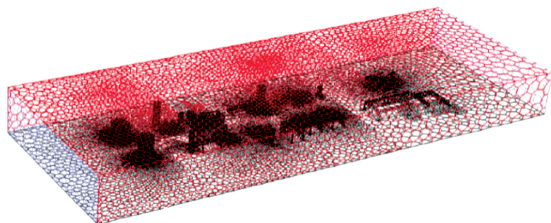


图 1 柴油加氢装置网格模型

Fig. 1 Grid model of diesel-hydrogenated unit

风场一致性分析可保证计算中心区域风速在设定范围内,以确信有害气体在所设定风速条件下泄漏,保证计算结果的准确性<sup>[19-20]</sup>。对已确定的网格模型,在其上、中、下游设定 3 条风速监测线,通过采集对比风速监测数据发现,风速在上、中、下游基本一致,可认为整个计算域风场均匀有效分布,可开展工程模拟计算。

### 3.2.3 监测点设置

为得到不同泄漏场景下装置各区域  $H_2S$ 、 $H_2$  泄漏扩散体积分数,须根据泄漏气体不同的理化性质,

$$R_{H_2S} = \begin{pmatrix} 7.98 \times 10^{-2} & 7.43 \times 10^{-2} & \cdots & 2.65 \times 10^{-2} & 2.87 \times 10^{-2} \\ 9.06 \times 10^{-2} & 8.56 \times 10^{-2} & \cdots & 5.58 \times 10^{-2} & 5.52 \times 10^{-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1.89 \times 10^{-2} & 1.74 \times 10^{-2} & \cdots & 9.16 \times 10^{-3} & 1.04 \times 10^{-2} \\ 1.06 \times 10^{-2} & 1.05 \times 10^{-2} & \cdots & 1.83 \times 10^{-2} & 1.09 \times 10^{-2} \end{pmatrix}$$

$$R_{H_2} = \begin{pmatrix} 2.81 \times 10^{-3} & 2.64 \times 10^{-3} & \cdots & 9.96 \times 10^{-4} & 1.09 \times 10^{-3} \\ 3.31 \times 10^{-3} & 3.11 \times 10^{-3} & \cdots & 2.56 \times 10^{-3} & 2.42 \times 10^{-3} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1.30 \times 10^{-2} & 1.31 \times 10^{-2} & \cdots & 1.79 \times 10^{-2} & 1.81 \times 10^{-2} \\ 1.16 \times 10^{-2} & 1.19 \times 10^{-2} & \cdots & 2.56 \times 10^{-2} & 2.11 \times 10^{-2} \end{pmatrix}$$

对  $R_{H_2S}$  和  $R_{H_2}$  做归一化处理,以装置平面布置图为基础,叠加绘制  $H_2S$ 、 $H_2$  的区域风险等级分布等值线图,如图 3(a 为中控室,b,e 为人行道,c 为压缩机,d 为维修场地,f 为分馏区)所示。水平面的纵轴和横轴分别代表该柴油加氢装置边界,根据  $H_2S$  和  $H_2$  区域相对风险矩阵,按照图例所示,对应值分别为该柴油加氢装置不同位置  $H_2S$ 、 $H_2$  泄漏的相对风险等级。图 3 中 0 级表示该区域基本不受  $H_2S$ 、 $H_2$  泄漏扩散影响,为安全区域;1 级表示相对风险最高,且随着级别的升高,区域风险随之增大。

在不同高度设置监测点记录下各位置气体体积分数。根据《石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计规划》中对有害气体探测器设置的要求,以地面为基础,分别在 0.5 m 高度和 2.3 m 高度平面中,以  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  的间隔各设置一层监测点,每层 433 个,总计 866 个,分别记录  $H_2S$ 、 $H_2$  扩散体积分数。监测点平面布置图如图 2 所示,图中空白处为设备或厂房。

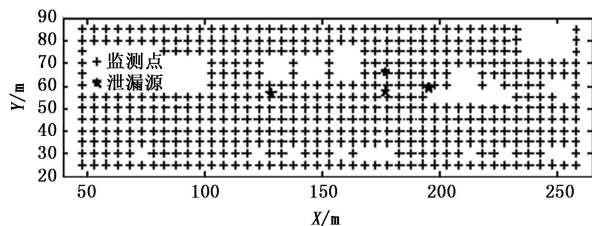


图 2 监测点布置

Fig. 2 Layout of monitoring points

## 4 计算结果及其分析

泄漏模拟采用 Intel Core (TM) i7-2600@ 3.40 Ghz 处理器计算机 4 核并行计算,步长设定为 0.5 s,每步计算耗时约 10 min。根据已取得的 16 种工况,预测  $H_2S$ 、 $H_2$  泄漏 600 s 后果,取得  $H_2S$ 、 $H_2$  监测点体积分数。由式(7)可得出  $H_2S$ 、 $H_2$  区域相对风险矩阵,为方便表达,省略其中大部分数据,显示如下:

由图 3 可见, $H_2S$ 、 $H_2$  泄漏高风险区域均主要集中在泄漏源附近的 c 区和 f 区,应适当增加该区域  $H_2S$ 、 $H_2$  探测器布置数量。由于  $H_2$  密度小,扩散系数高,在发生泄漏的情况下, $H_2$  在空气中可以向各个方向快速扩散,体积分数迅速降低<sup>[11]</sup>。在图 3 中表现为除泄漏源附近区域,对其他区域影响较小。 $H_2S$  密度大于空气,泄漏阶段受重力作用, $H_2S$  主要弥漫在地表<sup>[21]</sup>。 $H_2S$  在地表扩散会导致其泄漏影响区域较大,主要表现为装置 a 区及 b、e 过道,且这些区域也均为人员流动性较大区域,因此应在该区

域增设一定数量的 H<sub>2</sub>S 探测器。

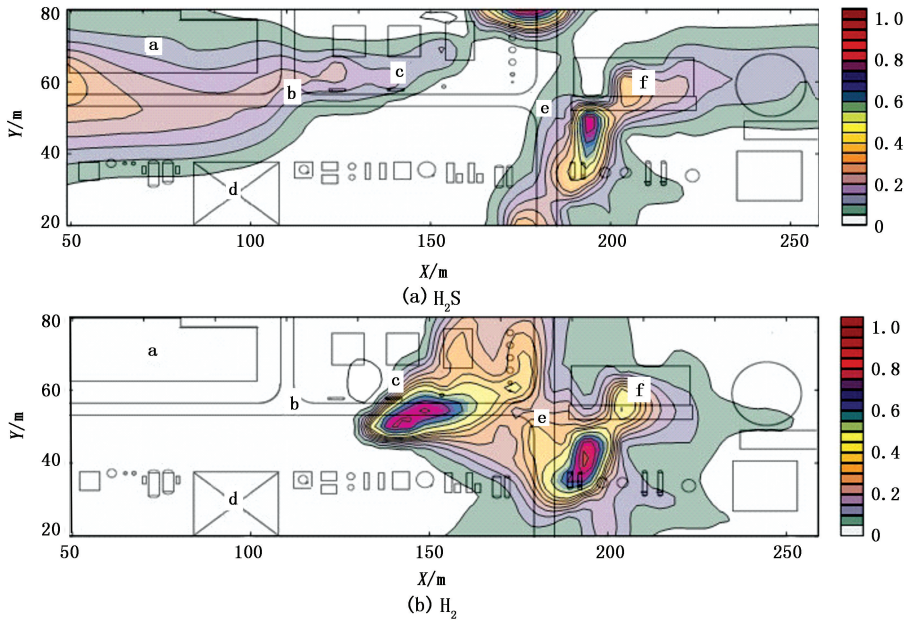


图 3 H<sub>2</sub>S 和 H<sub>2</sub> 区域风险等级等值线图

Fig. 3 Area risk level contour maps for H<sub>2</sub>S and H<sub>2</sub>

### 5 结 论

(1)以实际生产中影响有害气体泄漏扩散的风场条件和泄漏源工况为基础,构建的有害气体泄漏场景集能够定量预测场景发生概率。建立的炼油装置有害气体泄漏精细 CFD 模型能够预测有害气体泄漏场景后果。

(2)得到的表征各场景有害气体泄漏区域风险的区域风险矩阵可以划分符合真实情况的炼油装置有害气体泄漏区域风险等级。

#### 参考文献:

[1] 沈艳涛,于建国. 有毒有害气体泄漏的 CFD 数值模拟 ( I ):模型建立与校验[J]. 化工学报, 2007,58(3): 745-749.  
SHEN Yantao, YU Jianguo. Numerical simulation of hazardous gas release with CFD model(I): establishment and verification of model[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007,58(3):745-749.

[2] SIDDIQUI M, JAYANTI S, SWAMINATHAN T. CFD analysis of dense gas dispersion in indoor environment for risk assessment and risk mitigation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012,209(6):177-185.

[3] LEGG S W, BENAVIDES-Serrano A J, SIIROLA J D, et al. A stochastic programming approach for gas detector placement using CFD-based dispersion simulations[J]. Computers & Chemical Engineering, 2012,47(12):194-

201.

[4] PONTIGGIA M, DERUDI M, ALBA M, et al. Hazardous gas releases in urban areas: assessment of consequences through CFD[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,176(7):589-596.

[5] HANNA S R, HANSEN O R, ICHARD M, et al. CFD model simulation of dispersion from chlorine railcar releases in industrial and urban areas [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(2):262-270.

[6] 石铁忠, 罗兴柏, 张建礼. 基于 Fluent 的挥发性可燃气体体积分数场仿真[J]. 四川兵工学报, 2008,29(3):40-41.  
SHI Tiezhong, LUO Xingbo, ZHANG Jianli. The concentration field simulation of volatile combustible gas based on Fluent[J]. Journal of Sichuan Weaponry Industry, 2008,29(3):40-41.

[7] 李沁怡, 蔡旭晖, 王雪, 等. 太原煤化工区有毒气体泄漏环境风险分析[J]. 环境科学学报, 2012,32(3): 537-544.  
LI Qinyi, CAI Xuhui, WANG Xue, et al. The environmental risk analysis of toxic gas leakage in Taiyuan coal chemistry industrial zone[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012,32(3):537-544.

[8] 凌晓东, 党文义, 于安峰, 等. 环己烷泄漏事故模拟与风险控制措施研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2013,9(8):33-39.  
LING Xiaodong, DANG Wenyi, YU Anfeng, et al. Research on simulation of cyclohexane leakage accidents and

- development of risk control measures[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013,9(8):33-39.
- [9] 苑伟民,袁宗明,毕建伟,等. LNG 泄漏扩散模拟研究[J]. 天然气与石油, 2011,29(4):1-5,91.
- YUAN Weimin, YUAN Zongming, BI Jianwei, et al. Study on LNG leakage and diffusion simulation [J]. Natural Gas And Oil, 2011,29(4):1-5,91.
- [10] 于辉,刘茂,刘付衍华. 毒气泄漏场景下基于蒙特卡罗的工厂布局研究[J]. 中国安全科学学报, 2011,21(2):171-176.
- YU Hui, LIU Mao, LIUFU Yanhua. Research on facility layout of factories under toxic release based on Monte-Carlo simulation [J]. China Safety Science Journal, 2011,21(2):171-176.
- [11] 柯道友,毕景良,李雪芳. 氢气泄漏过程的理论模型计算及 CFD 模拟[J]. 化工学报, 2013,64(9):3088-3095.
- KE Daoyou, BI Jingliang, LI Xuefang. Integral model and CFD simulations for hydrogen leaks[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2013,64(9):3088-3095.
- [12] KHAN F I, ABBASI S A. Risk analysis of a typical chemical industry using ORA procedure[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14(1):43-59.
- [13] 于立见,多英全,师立晨,等. 定量风险评价中泄漏概率的确定方法探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2007,3(6):27-30.
- YU Lijian, DUO Yingquan, SHI Lichen, et al. Method for determining probabilities of leaks in quantitative risk assessment[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2007,3(6):27-30.
- [14] 于洪喜,李振林,张建,等. 高含硫天然气集输管道泄漏扩散数值模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008,32(2):119-123.
- YU Hongxi, LI Zhenlin, ZHANG Jian, et al. Numerical simulation of leakage and dispersion of acid gas in gathering pipeline[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(2):119-123.
- [15] 成松柏,陈国华. 石化装置泄漏易发性预测方法应用研究[J]. 灾害学, 2008,23(2):106-111.
- CHENG Songbai, CHEN Guohua. Study on the application of petrochemical equipment leakage prediction method[J]. Journal of Catastrophology, 2008,23(2):106-111.
- [16] 王磊,陈国华,蒋利军. 石化装置泄漏易发性评估方法及其应用研究[J]. 石油化工设备, 2009,38(1):79-84.
- WANG Lei, CHEN Guohua, JIANG Lijun. Research and application of leak susceptibility assessment method in petrochemical plant[J]. Petro-chemical Equipment, 2009,38(1):79-84.
- [17] 马立平. 统计数据标准化—无量纲化方法:现代统计分析方法的学与应用(三)[J]. 北京统计, 2000(3):34-35.
- MA Liping. Statistical data standardization:infinitude no dimension method: learning and using of modern statistical analysis method(III) [J]. Beijing Statistics, 2000(3):34-35.
- [18] TOMINAGA Y, AKASHI M, RYUICHIRO Y, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environmt[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008(96):1749-1761.
- [19] 章博,陈国明. 气体扩散 CFD 建模敏感性分析[J]. 科技导报, 2011,29(13):57-61.
- ZHANG Bo, CHEN Guoming. Stnsitivity analysis on computational fluid dynamics modeling of gas dispersion [J]. Science & Technology Review, 2011,29(13):57-61.
- [20] ZHANG Bo, CHEN Guoming. Quantitative risk analysis of toxic gas release caused poisoning: a CFD and dose-response model combined approach[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2010,88(4):253-262.
- [21] 章博,陈国明. 化工装置硫化氢泄漏对周边居民影响的 CFD 评估[J]. 石油化工高等学校学报, 2009,22(4):72-76.
- ZHANG Bo, CHEN Guoming. CFD assessment of impact caused by hydrogen sulfide leakages from petrochemical installations on nearby residents[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2009,22(4):72-76.

(编辑 沈玉英)