

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.06.005

# 长输天然气管道泄漏扩散影响范围的数值模拟研究

纪虹<sup>1,2</sup>, 张高<sup>1,2</sup>, 赵恭宇<sup>1</sup>, 王德起<sup>1,2</sup>, 黄维秋<sup>1,2</sup>

(1.江苏省油气储运技术重点实验室(常州大学), 江苏常州 213164; 2.常州大学石油工程学院, 江苏常州 213164)

**摘要:**长输天然气管道泄漏可能引发火灾爆炸等事故, 天然气泄漏的范围决定了灾害的影响程度。因此, 基于组分传输模型, 建立了长输天然气管道泄露扩散数值模型并选取风速、泄漏孔径和大气温度3个因素对泄漏影响范围进行单因素和多因素耦合分析。结果表明:随着风速的增大, 天然气喷射形成的射流与水平方向的夹角不断减小, 天然气射流扩散的高度在逐渐降低, 泄漏扩散面积也不断减小, 单位面积甲烷体积分数在增大。随着泄漏孔径的增大, 天然气的泄漏量在增大, 天然气泄漏所形成的射流的高度和宽度都在逐渐增大, 射流的范围逐渐增大, 且高度方向的增长要大于水平方向的增长。大气温度对泄漏扩散无太大影响。泄漏孔径、风速和大气温度对泄漏扩散范围的影响程度依次减弱。

**关键词:**天然气管道; 泄漏范围; 数值模拟; 多因素耦合分析

中图分类号: TE 88

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2018)06-0031-10

## Numerical Simulation on Influence Range of Leakage and Diffusion of Long-Distance Natural Gas Pipelines

Ji Hong<sup>1,2</sup>, Zhang Gao<sup>1,2</sup>, Zhao Gongyu<sup>1</sup>, Wang Deqi<sup>1,2</sup>, Huang Weiqiu<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Leakage of long-distance natural gas pipelines may cause accidents such as fire and explosion, and the extent of natural gas leakage determines the extent of the impact of the disaster. Therefore, based on the species transport model, a numerical model for leakage and diffusion of long-distance natural gas pipelines was established, and selecting three factors of wind speed, leakage aperture and atmospheric temperature, the single-factor and multi-factor coupling effects on the leakage range were

收稿日期: 2018-08-25。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574044); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20150269); 常州大学高层次人才引进启动基金(ZMF14020055)。

作者简介: 纪虹(1986—), 女, 天津人, 博士, 讲师。E-mail: jihong@cczu.edu.cn

引用本文: 纪虹, 张高, 赵恭宇, 等. 长输天然气管道泄漏扩散影响范围的数值模拟研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2018, 30(6): 31-40.

analyzed. The results show that with the increase of wind speed, the angle between the jet formed by natural gas injection and the horizontal direction is decreasing, and the height of natural gas jet diffusion is gradually decreasing, and the leakage diffusion area is also decreasing; the methane volume fraction per unit area is increasing. As the leakage pore size increases, the leakage of natural gas increases, and the height and width of the jet formed by natural gas leakage are gradually increasing, and the range of the jet is gradually increasing, and the growth in the height direction is greater than that in the horizontal direction. Atmospheric temperature does not have much effect on leakage diffusion. The effects of leakage aperture, wind speed and atmospheric temperature on the extent of leakage diffusion is reduced successively.

**Key words:** natural gas pipelines; leakage range; numerical simulation; multi-factor coupling analysis

近年来,受国内天然气价格竞争激烈和“煤改气”等各种有利因素的影响,中国天然气需求量持续迅猛增长。天然气管道运输具有经济、高效、可靠等优势,我国 99% 的天然气运输是通过管道进行的<sup>[1]</sup>,但长输天然气管道在运输过程中可能由于设备材料自身问题及腐蚀、地质灾害、第三方破坏等因素的影响造成管道泄漏等问题<sup>[2-4]</sup>。长输天然气管道发生泄漏时,首先会影响输气系统,造成巨大的经济损失,而且还会影响下游居民正常用气,特别严重的是,在泄漏孔附近泄漏出的天然气容易形成可燃云造成爆轰危害,直接威胁到附近人员的安全<sup>[5-8]</sup>,因此对长输天然气管道泄漏扩散数值模拟研究势在必行。

对天然气泄漏相关的研究,EGIG(欧洲输气管道事故数据组织)根据泄漏孔径将天然气管道泄漏分为小孔泄漏( $20\text{mm} \leq d$ )、大孔泄漏( $20\text{mm} < d < D$ ,其中  $D$  为管道直径)和管道断裂( $d = D$ )3 种泄漏模型,同时国外学者建立了比较经典的高斯模型、BM 模型、FEM3 模型等泄漏模型。国内主要集中在利用声波检测及定位的研究<sup>[9-11]</sup>,李柯<sup>[12]</sup>针对无风和有风情况下天然气长输管道泄漏工况进行了数值模拟,王翠平<sup>[13]</sup>用单因素法对长输天然气管道泄漏模拟与风险控制措施进行了研究,李朝阳<sup>[14]</sup>对埋地与架空输气管道泄漏进行了数值模拟对比分析。

上述进行的研究主要考虑各影响因素对天然气泄漏扩散形态的影响,对影响因素的主次关系不能确定,因此建立泄漏扩散模型,模拟事故全过程,首先通过单因素分析研究风速、泄漏孔径、温度对长输天然气管道泄漏扩散的影响,在此基础上通过正交试验分析影响区域范围,从而得到 3 种影响因素对长输天然气管道泄漏扩散影响的主次关系。为制定有效的风险控制措施提供科学的依据。

## 1 数学模型

长输天然气管道泄漏扩散过程中,天然气与周围环境发生能量和动量交换,泄漏扩散过程普遍遵守连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程<sup>[15]</sup>。

### 1.1 控制方程

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{-1}}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i E + u_j p) - \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i \tau_{ij} + u_i \tau_{ij}^{-1}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(q_j + q_j^{-1}) = 0 \quad (3)$$

式中:  $\rho$ ,  $u$ ,  $p$  分别为气体密度、速度、静压;  $\tau_{ij}$  为黏性应力张量;  $E$  为总能;  $q_j$  为热通量;  $t$  为时间。

## 1.2 湍流运动方程

在长输天然气管道泄漏扩散过程中,由于管线压力较高,射流速度较大,气体运动呈现高度湍流状态,综合考虑计算的精度和经济性,选用  $k$ - $\epsilon$  两方程湍流模型<sup>[16-17]</sup>,模型中的湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\epsilon$  通过以下方程求解:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 3} G_b) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (5)$$

式中

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

式中:  $C_{\epsilon 1} = 1.44$ ;  $C_{\epsilon 2} = 1.92$ ;  $C_{\epsilon 3} = 1.0$ ;  $C_\mu = 0.09$ ;  $\sigma_k = 1.0$ ;  $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

## 2 试验设计

以西气东输二线工程相关资料为参考,设定某段管线年任务输量为  $100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,管径为  $1\,016 \text{ mm}$ ,设计压力是  $10 \text{ MPa}$ ,泄漏环境为空气。为了更准确全面的模拟,考虑天然气只有甲烷( $\text{CH}_4$ )和硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )两种组分,其中  $\text{CH}_4$  体积分数为  $99.5\%$ ,则  $\text{H}_2\text{S}$  体积分数为  $0.5\%$ 。

选取泄漏孔径、风速、大气温度这3种影响因素作为研究对象。各因素的基本设定选取如下:

1) 泄漏孔径的选取:根据 EGIG 在 2018 年最新发布的统计数据,2007 年至 2016 年期间,输气管道发生事故时出现小孔泄漏、大孔泄漏和断裂的概率分别为  $40\%$ ,  $47\%$  和  $13\%$ <sup>[18]</sup>,因此主要研究小孔泄漏和大孔泄漏,将泄漏孔径设置为  $0.02$ ,  $0.10$ ,  $0.20 \text{ m}$ ,同时设定泄漏孔径为圆形。

2) 风速的选取:为了更好的模拟扩散的影响,考虑了风速这一因素,结合相关的研究背景,设定风速为  $2$ ,  $5$ ,  $8 \text{ m/s}$  时 3 种情况来进行研究。

3) 大气温度的选取:结合相关气象资料,设定大气温度分别为  $278$ ,  $288$ ,  $300 \text{ K}$  情况时来研究。

最终选取的因素及水平见表 1。

表 1 长输天然气管道泄漏扩散因素水平

因素	水平		
	1	2	3
泄漏孔径/m	0.02	0.10	0.20
风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	2	5	8
大气温度/K	278	288	300

### 2.1 单因素试验设计

使用控制变量进行单因素逐个分析,研究泄漏孔径、风速、大气温度对长输天然气管道泄漏扩散的影响。试验方案设计见表 2。

### 2.2 正交试验设计

通过单因素试验,使用控制变量法对各因素逐个分析,能够清晰的得到各影响因素对长输天然气管道泄漏扩散的影响规律,但不能确定各因素影响的主次关系。因此在此基础上采用正交试验法设

表 2 单因素试验模拟方案

试验号	泄漏孔径/m	风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	大气温度/K
S1	0.10	2	300
S2	0.10	5	300
S3	0.10	8	300
S4	0.02	5	300
S5	0.20	5	300
S6	0.10	5	278
S7	0.10	5	288

计试验,通过分析各种方案下天然气泄漏扩散的最大高度、水平范围,计算出计算区域的泄漏面积并进行比较,从而得到 3 个影响因子的主次关系。采用  $L_9(3^4)$  正交表设计试验方案如表 3 所示。

### 3 模型设置

表 3 正交试验模拟方案

试验号	泄漏孔径/m	风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	大气温度/K
O1	0.02	2	278
O2	0.02	5	288
O3	0.02	8	300
O4	0.10	2	288
O5	0.10	5	300
O6	0.10	8	278
O7	0.20	2	300
O8	0.20	5	278
O9	0.20	8	288

#### 3.1 天然气泄漏速率计算

标准状态下,输气管的设计年任务输量为  $100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,该数据是管道内天然气处于标准状态下测量得到的,在实际情况下,输气管内温度可以取  $T=300 \text{ K}$ ,压力  $P=10 \text{ MPa}$ ,所以实际情况下的输气管内年任务输量为

$$Q = \frac{Q_N P_N T}{T_N P} = \frac{100 \times 10^8 \times 0.1 \times 10^6 \times 300}{273 \times 10 \times 10^6} \approx 1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a} \quad (7)$$

式中: $Q_N, T_N, P_N$  为标准状态下的输气量、温度(273K)、压力( $0.1 \times 10^6 \text{ Pa}$ ); $Q, T, P$  分别为常温下的输气量、温度(300 K)、压力(10 MPa); $R$  为气体常数,约等于  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

输气管内的天然气流速

$$u = \frac{Q}{S} = \frac{1 \times 10^8}{365 \times 24 \times 3600 \times 3.14 \times 0.508^2} \approx 4 \text{ m/s} \quad (8)$$

式中  $S$  为输气管道的横截面积,  $\text{m}^2$ 。

根据天然气中有 99.5% 的  $\text{CH}_4$  和 0.5% 的  $\text{H}_2\text{S}$ ,可以得到该天然气的摩尔质量

$$M = 99.5\% \times 16.04 + 0.5\% \times 34.0758 = 16.13 \text{ g/mol} \quad (9)$$

当输气管道内的压力为 10 MPa 时,该天然气的密度为

$$\rho = \frac{PM}{RT} = \frac{10 \times 10^6 \times 16.13 \times 10^{-3}}{8.314 \times 300} \approx 64.67 \text{ kg/m}^3 \quad (10)$$

泄漏孔径大小以及管内天然气的具体流态等因素决定着天然气泄漏口速度有着不同的计算方法。因为所选泄漏孔  $d/D \leq 0.2$ ,可根据式(11)计算天然气的泄漏速率<sup>[19]</sup>

$$u_1 = \frac{P}{\rho} \sqrt{\frac{M}{RT} \cdot \gamma \cdot \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} = \frac{10 \times 10^6}{64.67} \times \sqrt{\frac{16.13 \times 10^{-3}}{8.314 \times 300} \times 1.305 \times \left( \frac{2}{1.305+1} \right)^{\frac{1.305+1}{1.305-1}}} = 262.74 \text{ m/s} \quad (11)$$

式中: $d$  为泄露孔径; $D$  为管道直径; $\gamma$  为比热比,该天然气的比热比为 1.305。

#### 3.2 物理模型网格及边界条件

计算区域设置为  $100 \text{ m} \times 60 \text{ m}$  的二维面域,管道直径为 1 016 mm,管道的输送压力为 10 MPa,计算天然气的泄漏速率约为 262.74 m/s,泄漏孔直径分别为 0.02, 0.1, 0.2 m,建立物理模型。物理模型确定之后对计算区域进行离散,网格划分时考虑到结构化网格易收敛故采用结构化网格,考虑到泄漏口附近流场变化较为剧烈,对泄漏孔附近进行加密处理。在天然气泄漏过程中设泄漏速度恒定,天然气泄漏口设置为速度入口边界条件,天然气在空气中泄漏因此顶部设置为压力出口边界条件,设定风从左边界水平匀速吹入,从右边界吹出,因此左侧设置为速度入口边界条件,右侧设置为压力出口边界条件,底面设置为无滑移、无渗流壁面边界。边界条件如图 1(a)所示,网格划分如图 1(b)所示。

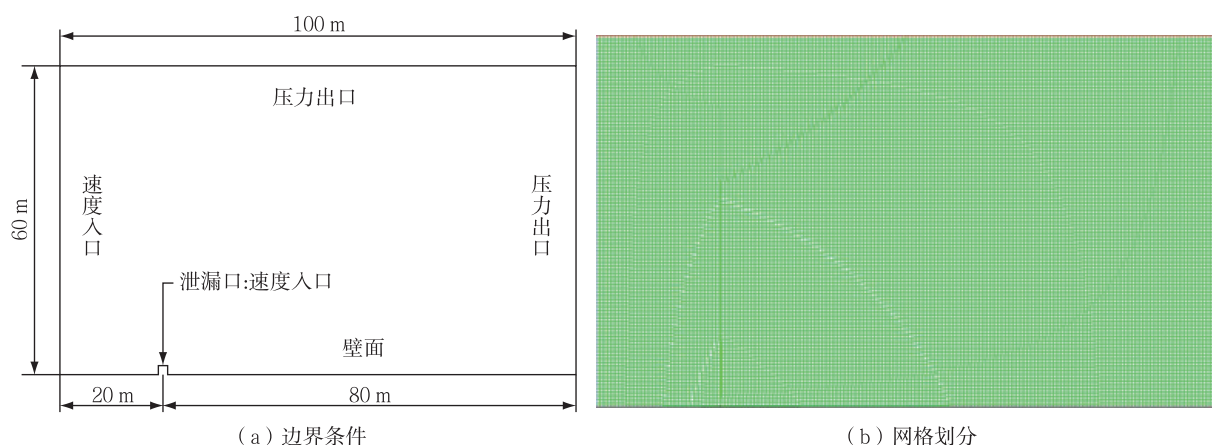


图 1 物理模型的边界条件与网格划分图

## 4 数值模拟结果及分析

将模拟计算结果进行后处理分析,根据天然气泄漏扩散后,周围环境中天然气的浓度不同来划分不同的区域,用体积分数来表征研究区域的浓度,从而得到天然气泄漏扩散分布图。

### 4.1 单因素试验数值模拟结果及分析

#### 4.1.1 风速对长输天然气管道泄漏扩散的影响

通过试验 S1, S2, S3 研究泄漏扩散 5 s 和 10 s 时计算区域内  $\text{CH}_4$  的体积分数分布规律以及距离泄漏点(5 m, 5 m)处的甲烷体积分数动态变化过程,从而可以得到风速对长输天然气管道泄漏扩散的影响规律。

根据图 2 中  $\text{CH}_4$  体积分数分布情况可知,当泄漏孔径为 0.10 m、大气温度为 300 K 时,随着风速的增大,天然气发生泄漏后喷射形成的射流与 X 轴(即风速方向)的夹角在不断减小,射流的高度也不断减小,泄漏扩散面积也不断减小,但单位面积甲烷体积分数在增大。这是因为天然气在泄漏发生时泄漏口附近泄漏速度较大,距离泄漏口越远泄漏速度越小,当风速较小时风只能对距离泄漏口较远且泄漏速度较小的气体产生影响,随着风速的增大,风对泄漏口附近泄漏速度较大的气体产生影响,而且风速越大泄漏的天然气沿 X 轴方向分速度越大,天然气下风向泄漏的距离越远。考虑到天然气发生泄漏后的危险性,随着风速的增大,天然气发生泄漏后导致的危险区域逐渐向右下方移动。

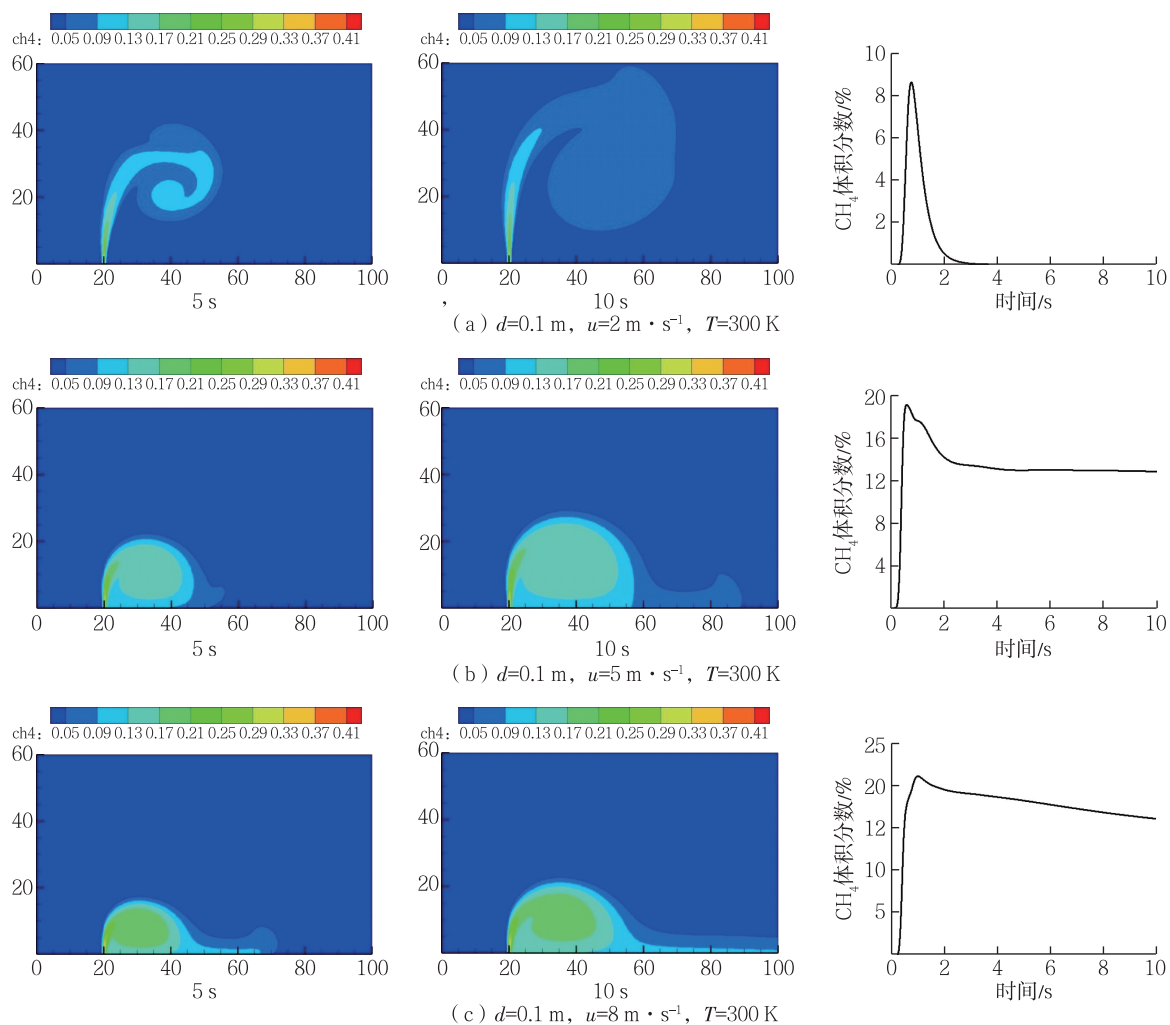
根据图 2 中监测点处  $\text{CH}_4$  体积分数变化图,可以发现:在上述方案中,当泄漏孔径为 0.10 m 时,在低风速(2 m/s)的情况下监测点处  $\text{CH}_4$  体积分数为 0;而在风速较高(5, 8 m/s)情况下监测点处  $\text{CH}_4$  体积分数会最终稳定在较高值。同时,由于风速的影响,监测点处  $\text{CH}_4$  体积分数趋于稳定的所需时间各不相同。

#### 4.1.2 泄漏孔径对长输天然气管道泄漏扩散的影响

可通过试验 S2, S4, S5 研究泄漏扩散 5 s 和 10 s 时计算区域内  $\text{CH}_4$  的体积分数分布规律以及距离泄漏点(5 m, 5 m)处的甲烷体积分数动态变化过程,从而可以得到泄漏孔径对长输天然气管道泄漏扩散的影响规律。

根据图 3 中  $\text{CH}_4$  体积分数分布情况可知,当风速为 5 m/s、大气温度为 300 K 时,随着输气管泄漏孔径的增大,天然气发生泄漏后所形成的射流的高度和宽度在逐渐增大,且在高度方向的增长要大于水平方向的增长。这是因为泄漏孔径增大时,天然气泄漏量增大,泄漏速度衰减变慢,扩散的高度明显增



图2 风速分别为 2, 5, 8 m/s 时 CH<sub>4</sub> 体积分数分布情况

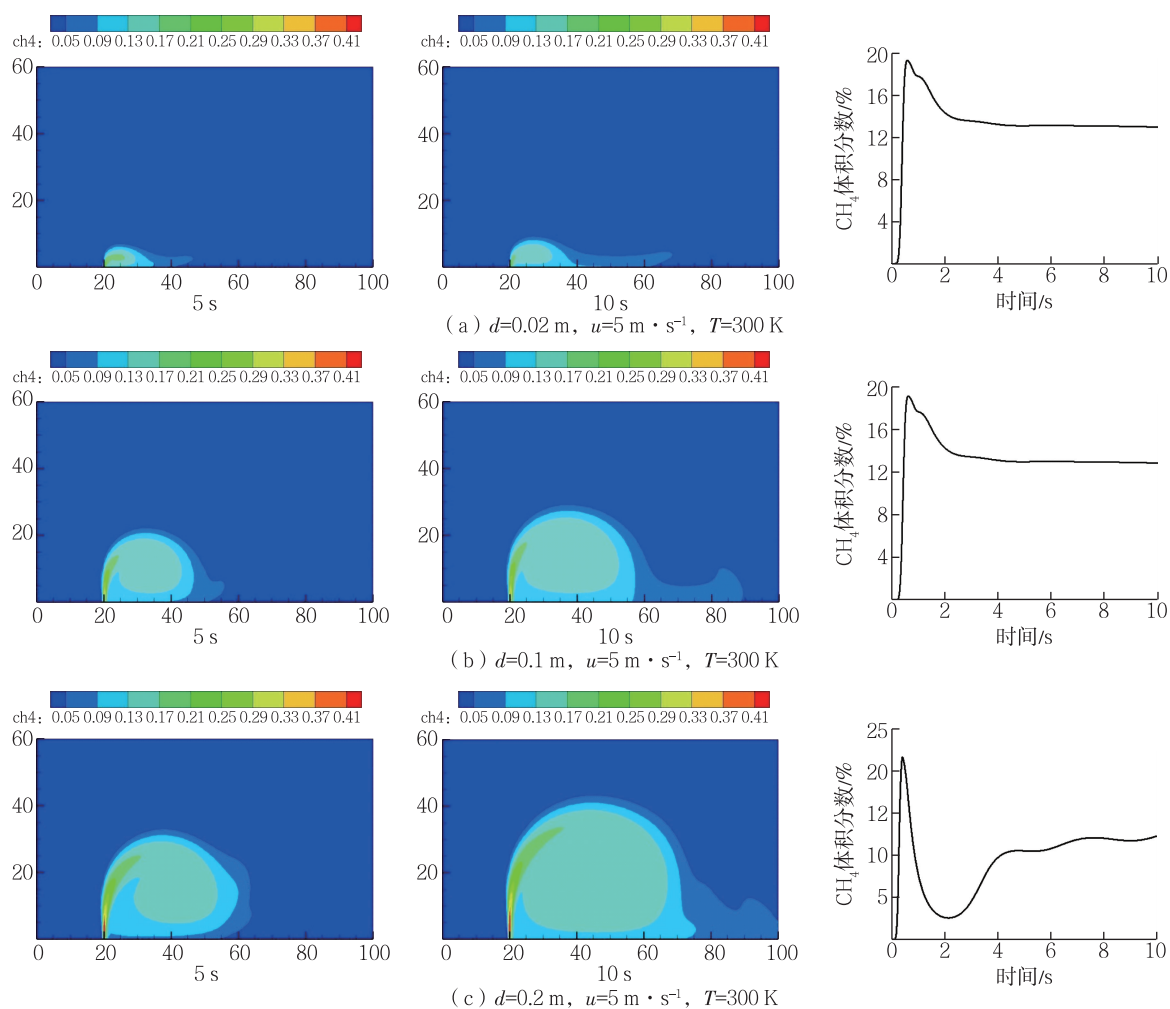
加,致使整个扩散面积都增大。在输气管道的上方和下风向,会出现危险区域,当长输天然气管道发生泄漏事故时,附近人员应向上风向进行逃生。

根据图 3 中监测点处 CH<sub>4</sub> 体积分数变化图,可以发现:天然气在发生泄漏时监测点的 CH<sub>4</sub> 体积分数在达到最大值之后,会逐渐衰减然后再达到稳定,这是由于天然气的密度比空气小,扩散到空气中的天然气在风的动能和泄漏天然气的动能共同作用下趋于稳定之后还会受到向上的浮力作用,之后随着时间的推移,天然气的体积分数趋于稳定。

#### 4.1.3 大气温度对长输天然气管道泄漏扩散的影响

通过试验 S2, S6, S7 研究泄漏扩散 5 s 和 10 s 时计算区域内 CH<sub>4</sub> 的体积分数分布规律,以及距离泄漏点(5 m, 5 m)处的甲烷体积分数动态变化过程,从而可以得到大气温度对长输天然气管道泄漏扩散的影响规律。

根据图 4 中 CH<sub>4</sub> 体积分数分布情况和监测点处的 CH<sub>4</sub> 体积分数变化图可知,当泄漏孔径为 0.10 m、风速为 5 m/s 时,随着大气温度的变化,天然气泄漏扩散情况基本不变,大气温度的变化对长输天然气管道泄漏扩散过程的影响并不显著,这可能是因为实际大气温度变化较小的原因导致的。

图3 泄漏孔径分别为0.02, 0.10, 0.20 m时 $\text{CH}_4$ 体积分数分布情况

## 4.2 正交试验数值模拟结果及分析

通过单因素分析模拟结果,可以看出泄漏孔径、风速和大气温度分别对天然气管道泄漏扩散结果的影响,但不能确定各影响因素的主次关系和显著性,需要对试验结果进一步分析,以泄漏气体10s后扩散的总面积为试验指标,进行正反试验分析。泄漏气体10s后的扩散区域如图5所示。

在 Tecplot 中导出扩散区域边界上的点的坐标,然后通过 Origin 对导出的点围成的区域进行面积计算,从而得到泄漏气体10s后扩散的总面积,其结果如表4所示。其中, $k_i$ 为各因素*i*水平所对应的指标和的平均值, $R$ 为各因素的极差。

以泄漏气体10s后扩散的总面积为指标,从表4可以看出,影响极差*R*最大的因素为泄漏孔径,其次为风速,最后则是大气温度,各因素的主次关系从大到小为:泄漏孔径、风速、大气温度。

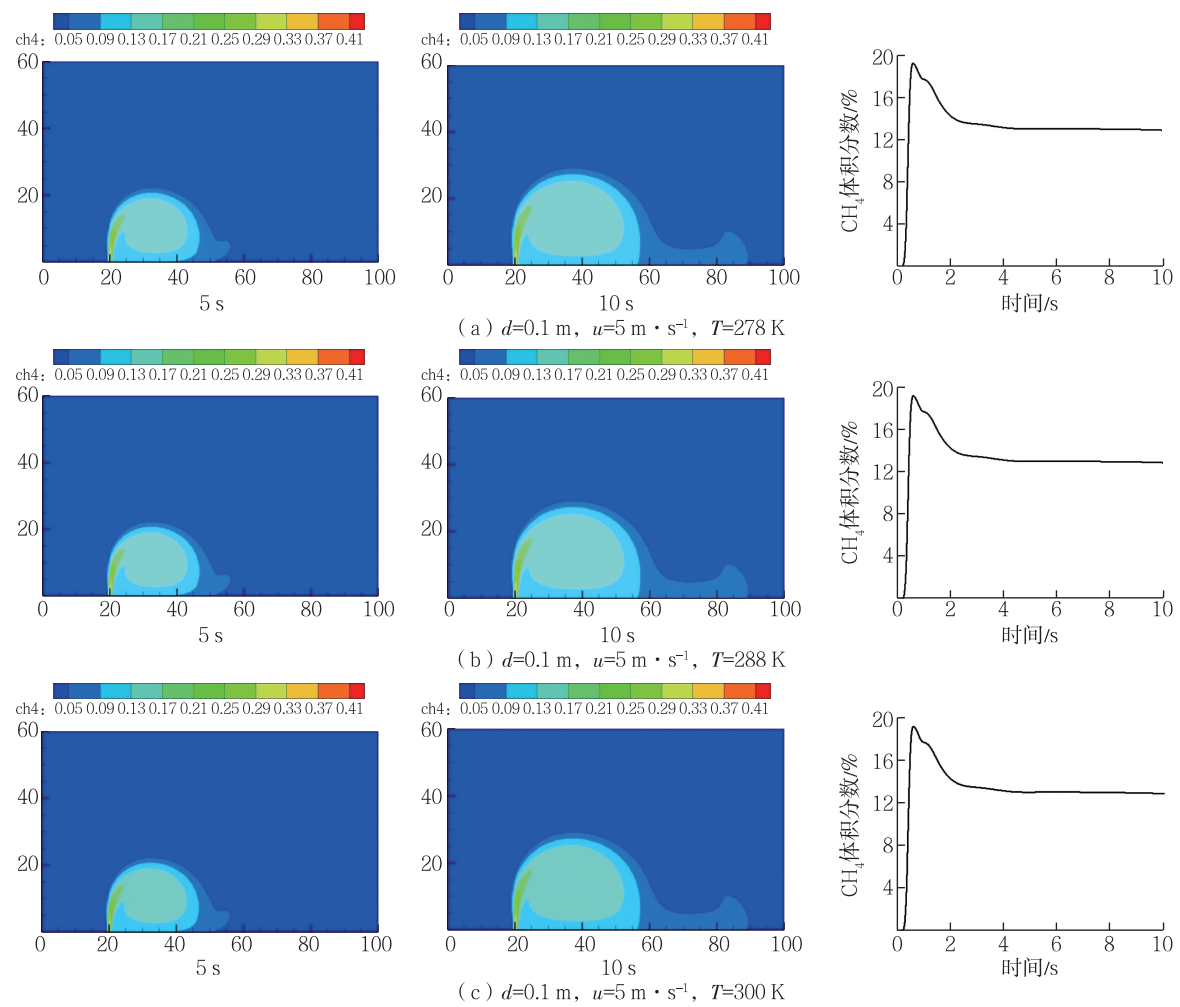


图 4 环境温度分别为 278, 288, 300 K 时 CH<sub>4</sub> 体积分数分布情况

表 4 正交试验方案设计及结果分析

试验号	泄漏孔径/m	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	大气温度/K	最大扩散范围/m <sup>2</sup>
O1	0.02	2	278	310.10
O2	0.02	5	288	261.50
O3	0.02	8	300	260.52
O4	0.10	2	288	1 741.98
O5	0.10	5	300	1 241.72
O6	0.10	8	278	988.79
O7	0.20	2	300	3 292.84
O8	0.20	5	278	2 382.00
O9	0.20	8	288	1 678.00
k <sub>1</sub>	277.37	1 781.64	1 226.96	
k <sub>2</sub>	1 324.16	1 295.07	1 227.16	
k <sub>3</sub>	2 450.95	975.77	1 589.36	
R	2 173.57	805.87	371.40	



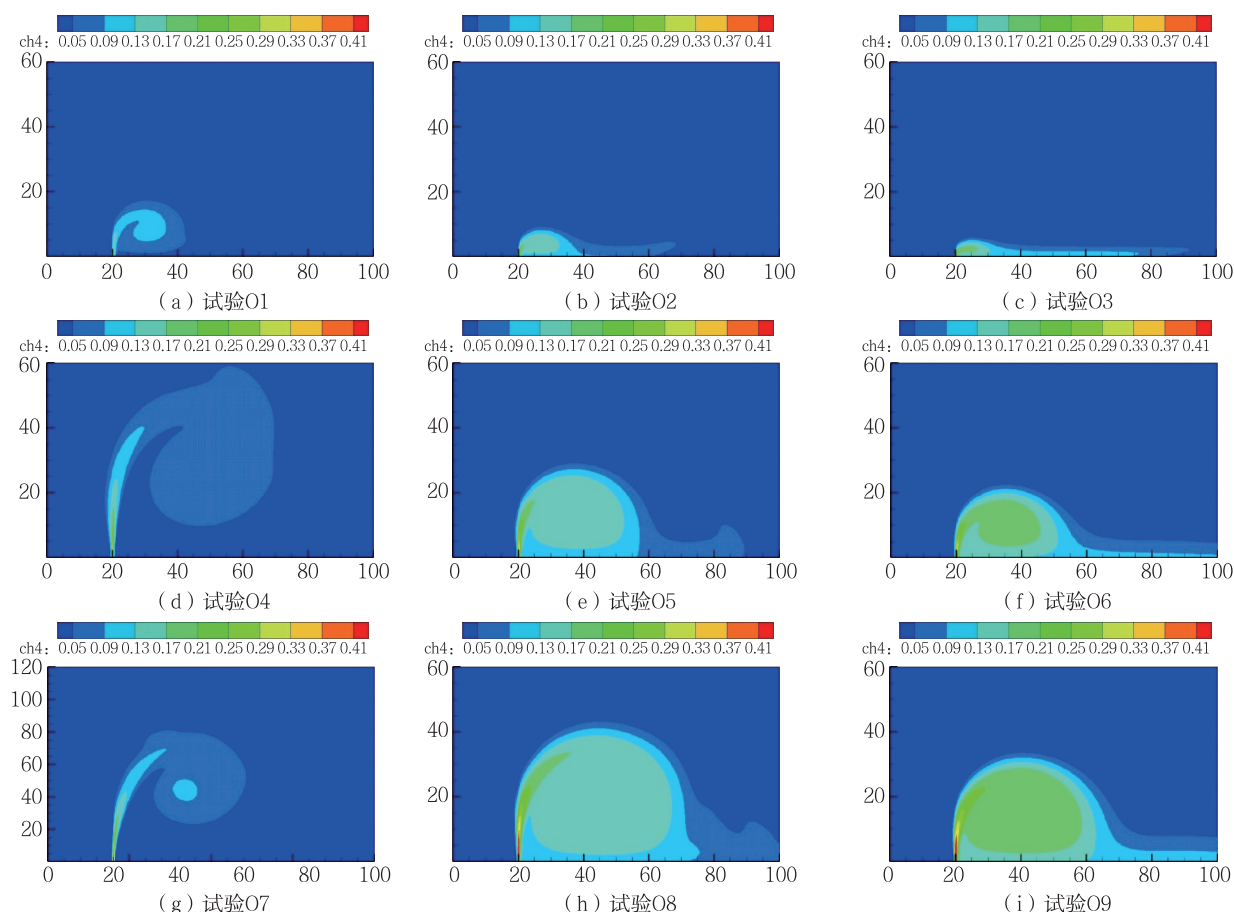


图 5 正交试验模拟结果

## 5 结 论

1) 基于组分传输模型,建立了长输天然气管道泄露扩散模型,对泄露的影响范围进行分析得到以下结论:随着风速的增大,天然气喷射形成的射流与水平方向的夹角不断减小;天然气射流发展的高度在逐渐降低;泄漏扩散面积也不断减小;单位面积甲烷体积分数在增大;天然气泄漏扩散逐渐向下风向倾斜。随着泄漏孔径的增大,天然气的泄漏量在增大;天然气泄漏所形成的射流的高度和宽度都在逐渐增大,射流的范围逐渐增大,且高度方向的增长要大于水平方向的增长。大气温度对泄漏扩散无太大影响。

2) 以泄漏气体 10 s 后扩散的总面积为指标,通过正交试验,对泄露扩散的影响因素进行综合分析,从结果可以看出泄漏孔径对泄漏扩散影响最为显著,风速对泄漏扩散影响也有显著影响,大气温度对泄漏扩散基本无影响。

3) 通过单因素和多因素相结合的研究方式,得到的结论更加清晰科学,对探究长输天然气管道泄漏扩散影响范围的研究提供了参考,为制定有效的风险控制措施提供了科学的依据。

## 参考文献:

- [1] 黄维和, 郑洪龙, 王婷. 我国油气管道建设运行管理技术及发展展望[J]. 油气储运, 2014, 33(12): 1259-1262.

- [2]狄彦, 帅健, 王晓霖, 等. 油气管道事故原因分析及分类方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(7): 109-115.
- [3]赵汉青. 我国油气管道的事故成因及环境预防措施[J]. 油气储运, 2015, 34(4): 368-372.
- [4]MAJID Z A, MOHSIN R, YAACOB Z, et al. Failure analysis of natural gas pipes[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(4): 818-837.
- [5]KHALIL Y F. A probabilistic visual-flowcharting-based model for consequence assessment of fire and explosion events involving leaks of flammable gases[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 50(1): 190-204.
- [6]王大庆, 高惠临. 天然气管线泄漏扩散及危害区域分析[J]. 天然气工业, 2006 (7): 120-122, 162.
- [7]BARIHA N, MISHRA I M, SRIVASTAVA V C. Hazard analysis of failure of natural gas and petroleum gas pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 40: 217-226.
- [8]纪虹, 杨克, 黄维秋, 等. 超细水雾协同甲烷氧化菌降解与抑制甲烷爆炸的实验研究[J]. 化工学报, 2017, 68 (11): 4461-4468.
- [9]武伟强, 赵会军, 王克华, 等. 次声波法输气管道泄漏检测系统的信号处理[J]. 油气储运, 2012, 31(5): 376-378, 407-408.
- [10]刘翠伟, 李雪洁, 李玉星, 等. 基于音波法的输气管道泄漏检测与定位[J]. 化工学报, 2014, 65(11): 4633-4642.
- [11]孟令雅, 李玉星, 宋立群, 等. 输气管道泄漏声波传播特性及监测定位[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 74-79, 123.
- [12]李柯. 天然气长输管道泄漏工况数值模拟[J]. 油气储运, 2014, 33(1): 20-27.
- [13]王翠平. 长输天然气管道泄漏模拟与风险控制措施研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- [14]李朝阳, 马贵阳. 埋地与架空输气管道泄漏数值模拟对比分析[J]. 天然气工业, 2011, 31(7): 90-93, 113.
- [15]EBRAHIMI-MOGHADAM A, FARZANEH-GORD M, DEYMI-DASHTEBAYAZ M. Correlations for estimating natural gas leakage from above-ground and buried urban distribution pipelines[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 185-196.
- [16]刘雪东, 刘佳阳, 朱小林, 等. 结构参数对拉伐尔喷管空化特性影响的数值模拟[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2014, 26(2): 43-47.
- [17]陶进峰, 徐学慧. 平焰燃烧三维热态速度场的数值模拟[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2012, 24(1): 33-36.
- [18]EGIG. Gas pipeline incidents, 10<sup>th</sup> report of the European gas pipeline incident data group[R]. Groningen: EGIG, 2018.
- [19]程淑娟. 天然气管道小孔泄露扩散规律研究[D]. 重庆: 西南石油大学, 2014.

(责任编辑: 殷丽莉)