

基于 SAFETI 模拟的大气条件对天然气扩散影响的研究

彭星煜¹ 范张川² 朱敏³ 李杭杭² 吴云冬² 程坚²

(西南石油大学储运研究所¹,石油与天然气工程学院²,成都 610500;
中国石油集团工程设计有限责任公司青海分公司³,敦煌 736202)

摘要 为了确定在大气条件影响下天然气泄漏的燃烧影响和毒性影响,采用高斯模型对天然气泄漏后的扩散进行分析,确定了大气对其浓度分布影响的两大因素:风速和大气稳定度。通过 SAFETI 软件对容器内天然气瞬时泄漏的场景进行模拟,并结合控制变量法对模拟结果“泄漏发生 18.75 s 时,浓度 4.4×10^{-2} 天然气云的水平分布情况”、“下风向最大爆炸半径天然气浓度随时间变化的关系”进行分析,研究了天然气扩散过程中受风速和大气稳定度影响的浓度变化趋势和扩散分布规律。研究得出:天然气在泄漏的过程中,以聚集再分散的方式进行扩散,天然气总体分布的几何中心向下风向移动;泄漏天然气在扩散过程中,扩散速度随着风速和大气稳定度的增大而增大;天然气聚集的饱和浓度,随着风速的增大而增大,随着大气稳定度的增大而减小;在一定的时间内,风速越大,大气稳定度越大,天然气的扩散范围越大。

关键词 高斯模型 天然气扩散 大气影响 模拟 控制变量 风速 大气稳定度
中图法分类号 X937; **文献标志码** A

天然气的泄漏事故,导致天然气从容器和管道暴露到大气中。在大气中的天然气,由于自身压力发生膨胀,并在大气中扩散。当天然气扩散达到一定浓度时,在一定条件下会发生火灾或爆炸。火灾和爆炸将会可能引起极大的热辐射和压力波,对周围人员及财产造成极大的损害,即燃烧影响。此外,高含硫的天然气,在一定的浓度条件下具有极强的毒性,会对人体健康和生命造成伤害,即毒性影响。总的来说,天然气在泄漏过程中所产生的燃烧影响与其在大气中浓度的分布情况有关;而含硫天然气所产生的毒性影响也是取决于其浓度分布的。因此,关于天然气泄漏后在大气中的扩散的研究对于评估天然气泄漏后果显得尤为重要。

为了燃烧影响和毒性影响对人员和财产造成的伤

害和损失,已有学者对易燃及有毒气体的扩散进行研究。如丁信伟等^[1]通过风洞试验中得出了易燃及有毒气体在风速、泄漏速率、气体密度等因素影响下的规律;全纪龙等^[2,3]运用不同类型的有毒气体使用的重力和非重力模型对气体扩散过程及扩散后形成的伤害时期、伤害区域的研究;陈新华等^[4,5]通过模型计算、实验、模拟分析等方法对有毒气体浓度场在不同的环境、天气情况下的分布情况的环境参数对毒气扩散过程影响的分析。何潇楠^[6]从气体理论出发研究了湿空气下天然气扩散,以菲克理论进行理论分析重点提出了气体扩散的影响因素:天然气的密度和浓度。

现有的研究主要集中于一般性的规律研究,针对天然气的研究很少;关于天然气泄漏在受大气影响浓度变化和扩散的规律也不具体。本文针对天然气在大气中扩散的特点,重点研究天然气在泄漏入大气后的特点,选用非重力模型。在选用非重力模型时,采用高斯模型;并对该模型进行分析,得出了大气影响天然气扩散的两大因素:风速和大气稳定度。通过对容器中天然气瞬时泄漏的模拟分析,得到了天然气在扩散过程中受大气影响的浓度变化趋势和扩散分布规律。

1 天然气扩散模型

天然气在泄漏根据泄漏发生时间的长短可以分为瞬时泄漏和持续泄漏。瞬时泄漏一般发生在容器或设备的失效中,持续泄漏一般发生在管道的泄漏

2016年5月11日收到

中国石油化工股份有限公司天然

分公司省部级科研项目(部762)资助

第一作者简介:彭星煜(1982—),男,四川邻水人,副教授,博士,研究生导师。研究方向:油气管道系统安全可靠评价、风险评价与最优维护决策分析以及油气管道系统完整性管理技术等。E-mail: pengxy1949@163.com。

引用格式:彭星煜,范张川,朱敏,等.基于 SAFETI 模拟的大气条件对天然气扩散影响的研究[J].科学技术与工程,2017,17(1):125—131

Peng Xingyu, Fan Zhangchuan, Zhu Min, et al. Study on the influence of atmosphere condition for natural gas dispersion based on SAFETI[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(1): 125—131

中。根据泄漏场景的不同,泄漏孔的形状也有圆形、多边形、三角形、长方形几种。而在泄漏过程中,泄漏点的高度也将对泄漏后的状态造成影响。而在瞬时泄漏的过程中,还应当考虑泄漏容器内天然气的重力因素的影响,选用重力扩散模型或非重力模型。

由于研究内容主要是大气对天然气的影响研究,所以对于泄漏源情况的考虑可以忽略。在模拟时的控制变量法中,将泄漏源作为一个不变量。在确定密度因素时,选取非重力扩散模型,只考虑天然气在泄漏一段时间后,压力达到稳定,密度小于空气时的情况。

高斯模型是非重力扩散模型的一种,并广泛用于对易燃、易爆、有毒有害气体的点源的扩散研究。模型不考虑重力的影响,适用于本处天然气影响因素的研究^[7]。

高斯模型包括烟羽模型和烟团模型,其中烟羽模型适用于持续点源的扩散;而烟团模型适用于短时间电源泄漏的扩散(对应于天然气泄漏中的瞬时泄漏和持续泄漏)。

在运用高斯模型时,通常做出以下假设:

(1) 天然气形成蒸气云团中心的移动速度或云团轴向蔓延速度等于环境风速;

(2) 天然气蒸气云团内部或云羽横截面上浓度、密度等参数服从高斯分布(即正态分布)。

1.1 天然气瞬时泄漏后的大气扩散模型

天然气瞬时泄漏的过程,可以理解成在很短暂的时间里容器或设备内的天然气瞬间释放到大气当中。对于瞬间释放,可以采用高斯烟团模型来进行数学描述。

$$C(x, y, z) = \frac{Q'}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \quad (1)$$

式(1)中: C 为天然气在地面的浓度(kg/m^3); Q' 为天然气的泄漏率(kg/s); h 为泄漏点的高度(m); u 为环境平均风速(m/s); t 为泄漏后扩散时间(s); x, y 和 z 为预测点的坐标; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y 和 z 轴上的扩散系数。

扩散系数主要受大气温度、风速、地面状况等多种因素的影响,而这些因素可综合表现为大气稳定度对扩散系数的影响。瞬时泄漏扩散系数可以由下式计算:

$$\sigma_y = \sigma_x = \gamma_1 \chi^{\alpha_1}; \sigma_z = \gamma_2 \chi^{\alpha_2} \quad (2)$$

式(2)中: χ 为下风向计算点到泄漏点的距离; $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2$ 为大气稳定度的函数,可以通过查表确定不同大气稳定度条件下的各值。

1.2 天然气持续泄漏后的大气扩散模型

天然气持续泄漏的过程,可以理解成一种随着

时间的变化天然气稳定泄漏的一个过程。对于持续泄漏,可以采用高斯烟羽模型进行描述。

$$C(x, y, z) = \frac{Q'}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right] \quad (3)$$

式(3)中: C, Q', u, h 的意义同式(1);持续泄漏扩散系数可以由式(4)计算。

$$\sigma_y = \gamma_1 \chi (1 + \beta_1 \chi)^{\alpha_1}, \sigma_z = \gamma_2 \chi (1 + \beta_2 \chi)^{\alpha_2} \quad (4)$$

式(4)中: χ 为下风向计算点到泄漏点的距离; $\gamma_1, \gamma_2, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 为大气稳定度的函数,可以通过查表确定不同大气稳定度条件下的各值。

2 软件模拟分析

研究大气对天然气扩散影响,将采用 SAFETI 软件对扩散后果进行模拟,通过控制变量法对模拟结果进行分析。通过对天然气扩散模型的分析,知道影响泄漏天然气扩散浓度分布的主要因素有:计算点到泄漏点的距离、泄漏点的高度、风速、大气稳定度。其中,大气对于天然气扩散的影响因素主要是风速和大气稳定度。值得注意的是,风速也是影响大气稳定度的因素之一。相对而言,风速越大,大气稳定度越低。具体的风速与大气稳定度对应情况如表 1 所示。

表 1 大气稳定度级别划分

Table 1 Classification of atmospheric stability

地面风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	白天日照条件			夜间云层条件		
	强	中等	弱	薄(云 层覆盖 <3/8)	中等(云 层覆盖 >3/8)	厚(云 层覆盖量 >4/5)
<2	A	A~B	B	—	—	D
2~3	A~B	B	C	E	F	D
3~5	B	B~C	C	D	E	D
5~6	C	C~D	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D

表 1 中, A 为非常不稳定; B 为不稳定; C 为一般不稳定; D 为中等稳定; E 为一般稳定; F 为稳定。

2.1 场景设置

如图 1 所示,假设天然气储罐中压力 2 bar(0.2

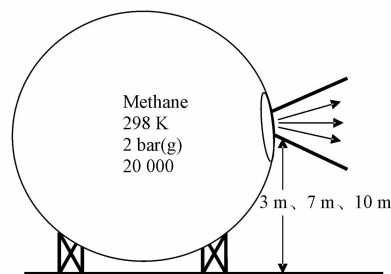


图 1 球罐泄漏场景图

Fig. 1 The scenario of spherical tanks discharge

MPa)、温度为 298 K,天然气的容量为 20 t(20 000 kg),泄漏孔径满足瞬间泄放,泄漏的方向为水平。分别对储罐在 B 3 m/s、B/C 5 m/s、C 2 m/s、C 3 m/s、C 3.5 m/s、C 5 m/s、D 1.5 m/s、D 3 m/s、D 5 m/s、D 8 m/s、E 3 m/s、E 5 m/s 大气条件下的泄漏情况进行模拟,天然气泄漏高度为分别选取 3 m、7 m、10 m。模拟结果如图 2~图 5 所示。

2.2 风速对天然气扩散的影响

挪威船级社(DNV,SAFTI 的开发者)认为在气体的扩散过程中,由于大气湍流的作用使得气体的扩散并不均匀。特别是在稳定度较低的大气中,扩散气体的浓度并不稳定。因此,他们选取泄漏时间 18.75 s 时的气体浓度来表征气体扩散的影响。对于天然气爆炸极限的取值方面,DNV 更加保守,分

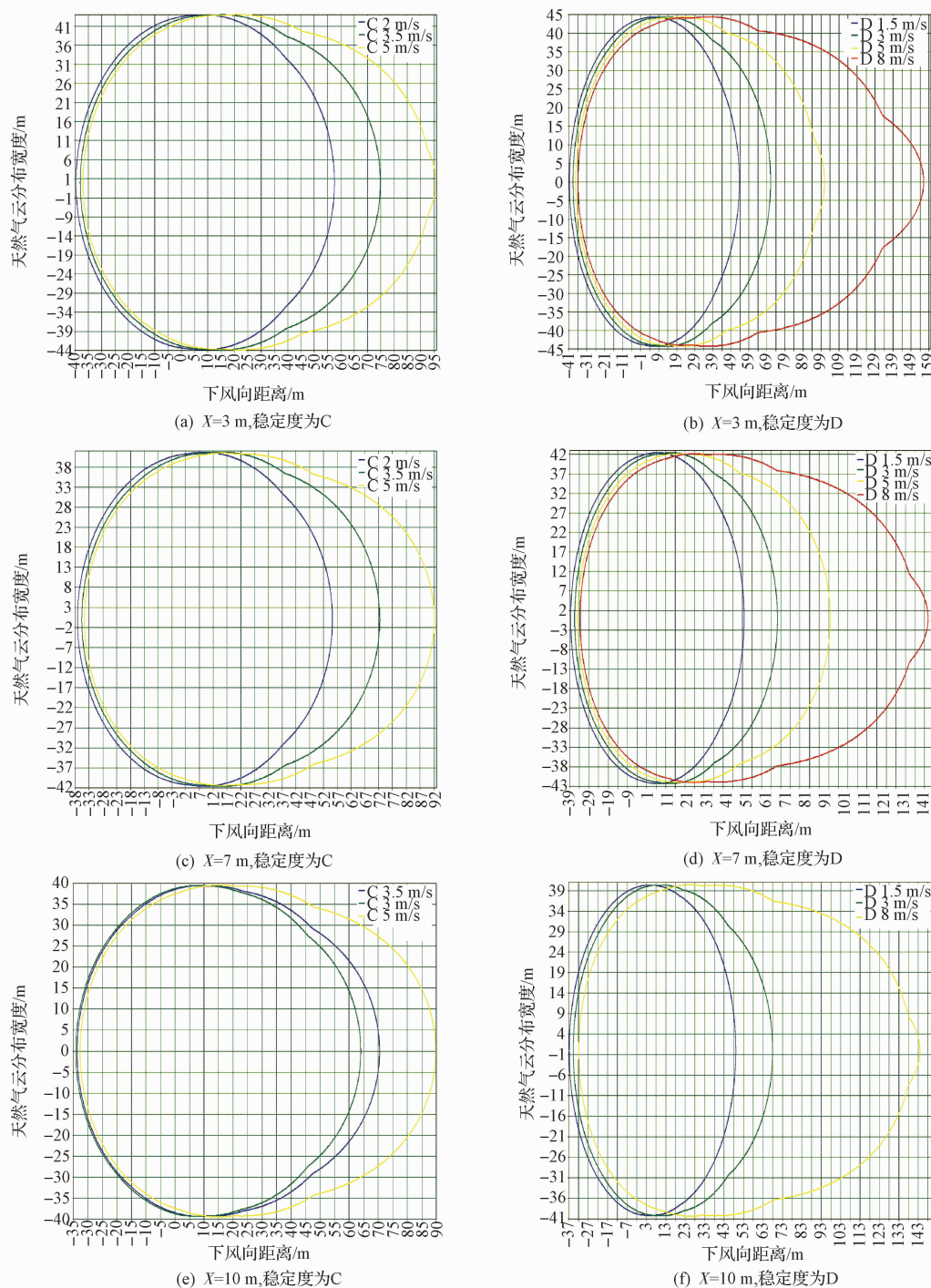


图2 天然气云 4.4×10^{-2} 浓度的水平分布情况

Fig. 2 Concentration 4.4×10^{-2} footprint at 18.75 s

别选取 4.4×10^{-2} 、 16.5×10^{-2} 作为天然爆炸的上下限。高于爆炸上限的天然气浓度总会随着扩散作用降低,直至到达天然气的爆炸极限。因此,天然气的爆炸范围主要通过 18.75 s 的爆炸下限来表征。

泄漏 18.75 s 时,在同一稳定度下,不同风速条件下的天然气云爆炸下限的水平分布情况如图 2 中 (a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 所示。图中,选取泄漏点离地面的高度和稳定度作为定量,风速作为变量

进行模拟。泄漏点离地面的高度分别选取 3 m、7 m、10 m,稳定度选取 C、D。

通过各条件下天然气云爆炸极限分布情况的分析,我们发现天然气的爆炸浓度分布在大气作用下轮廓线总体向下风向移动。随着风速的增加,轮廓线前端向下风向扩张,后端向下风向收缩,轮廓线的几何中心向下移动。轮廓线前端的变化趋势明显大于后端的收缩趋势,轮廓线覆盖的面积随着风速的

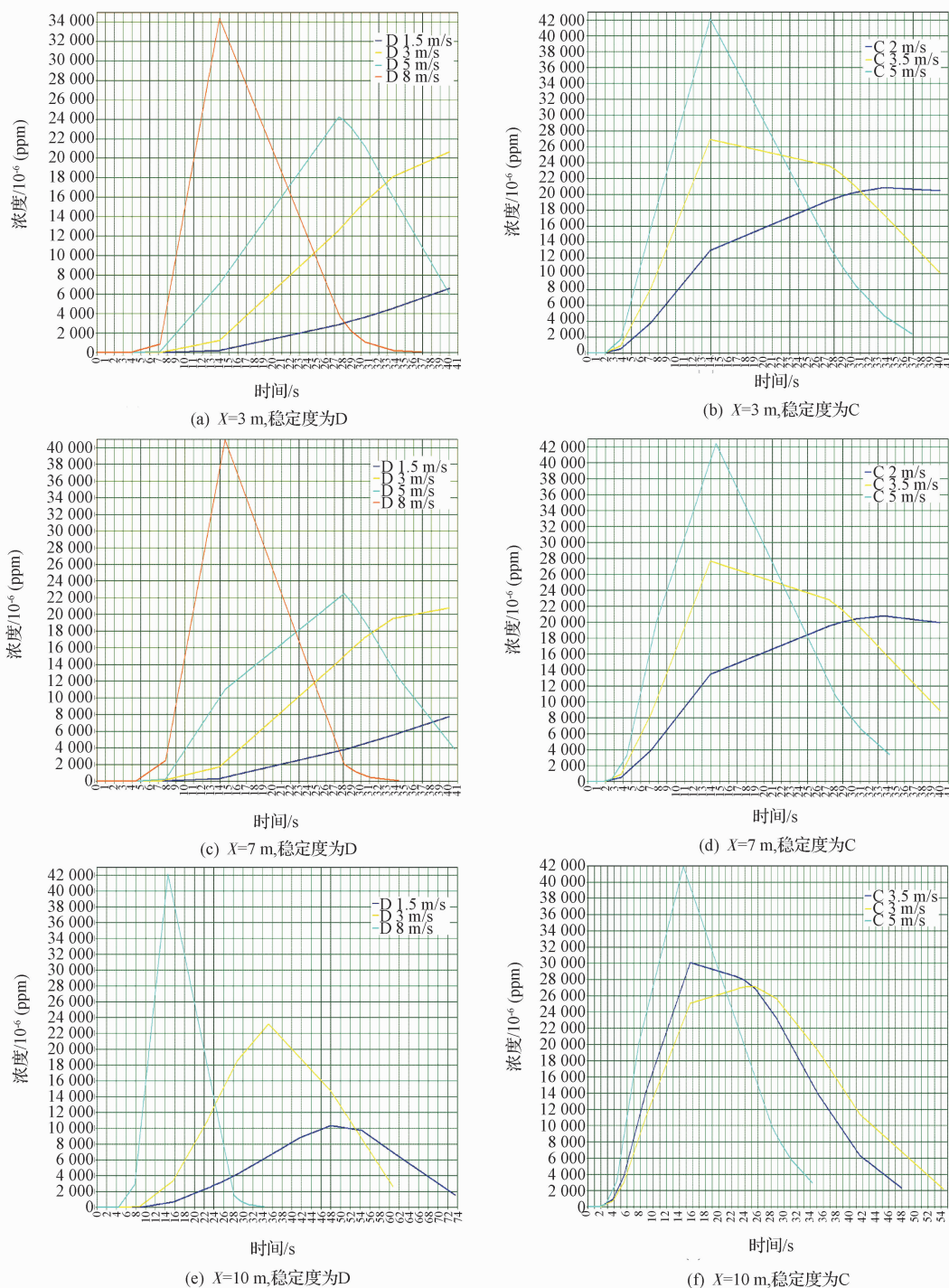


图3 下风向最大爆炸半径处,天然气浓度随时间变化的关系

Fig. 3 Concentration vs time at maximum explosion radius

增大不断地增加。这表明在一定时间内,风速越大,天然气扩散的速度越大、扩散范围越大。

通过对 18.75 s 爆炸浓度水平分布情况的模拟,还可以得出在(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)条件下,天然气爆炸浓度扩散的最远下风向距离分别为 95.5 m、156 m、92 m、148 m、90 m、144 m,即发生爆炸的最大致死半径^[8-10]。对各条件下,下风向最大爆炸半径处的天然气浓度变化情况进行模拟,该处

天然气浓度随时间变化的曲线如图 3 所示。

天然气浓度随时间的变化主要经历聚集、饱和、分散三个阶段。当泄漏刚发生时,该处天然气的浓度为 0,浓度曲线与时间轴线重合。当泄漏发生一定时间后,天然气的浓度开始一定的速度增加,天然气向该处聚集,曲线与时间轴线呈一定的角度向上延伸,但相对平缓。随着浓度的不断增加,浓度增加的速度也逐渐增大,曲线变得陡峭。当泄漏发生一

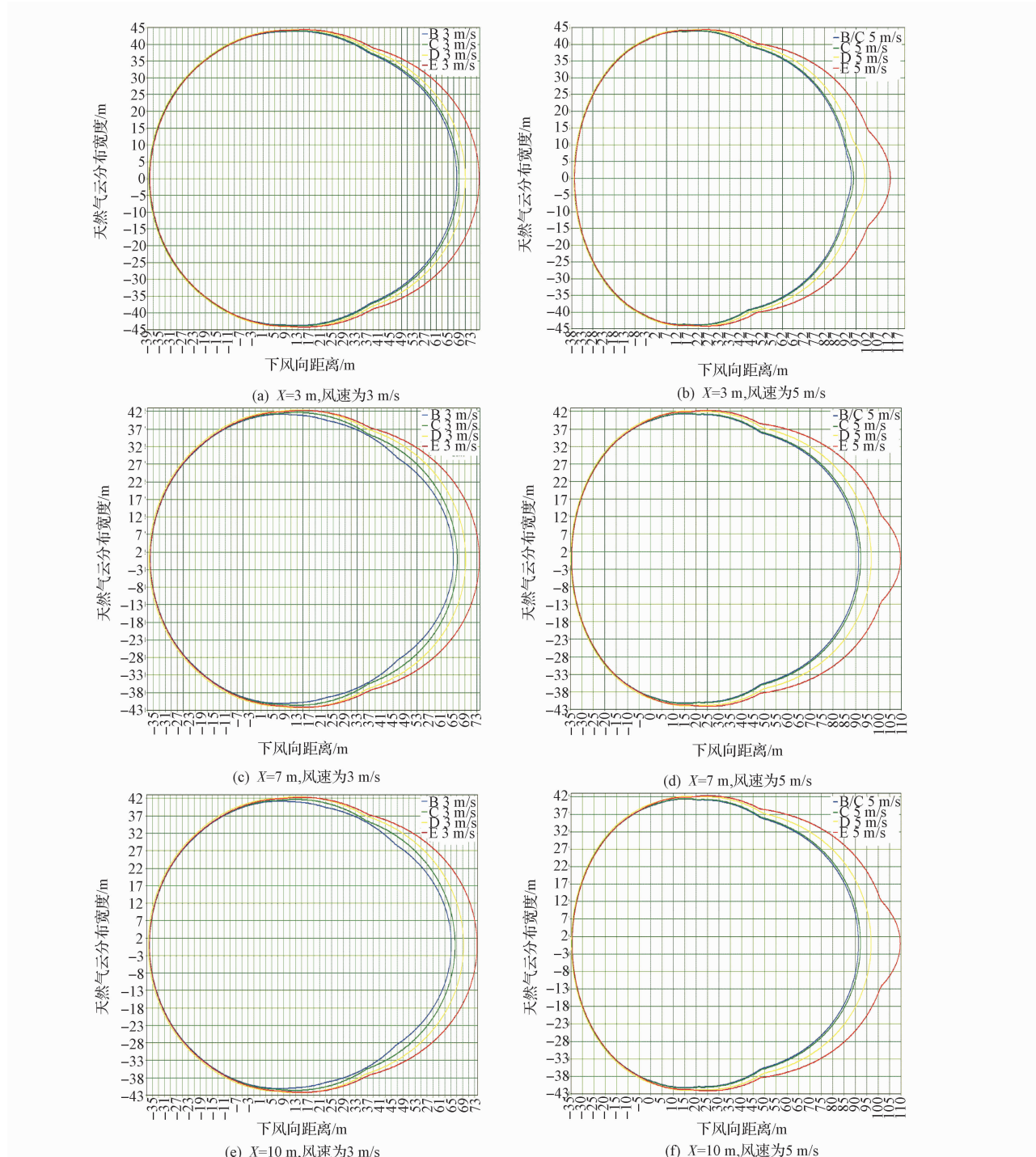


图 4 浓度 4.4×10^{-2} 天然气云的水平分布情况

Fig. 4 Concentration 4.4×10^{-2} footprint at 18.75 s

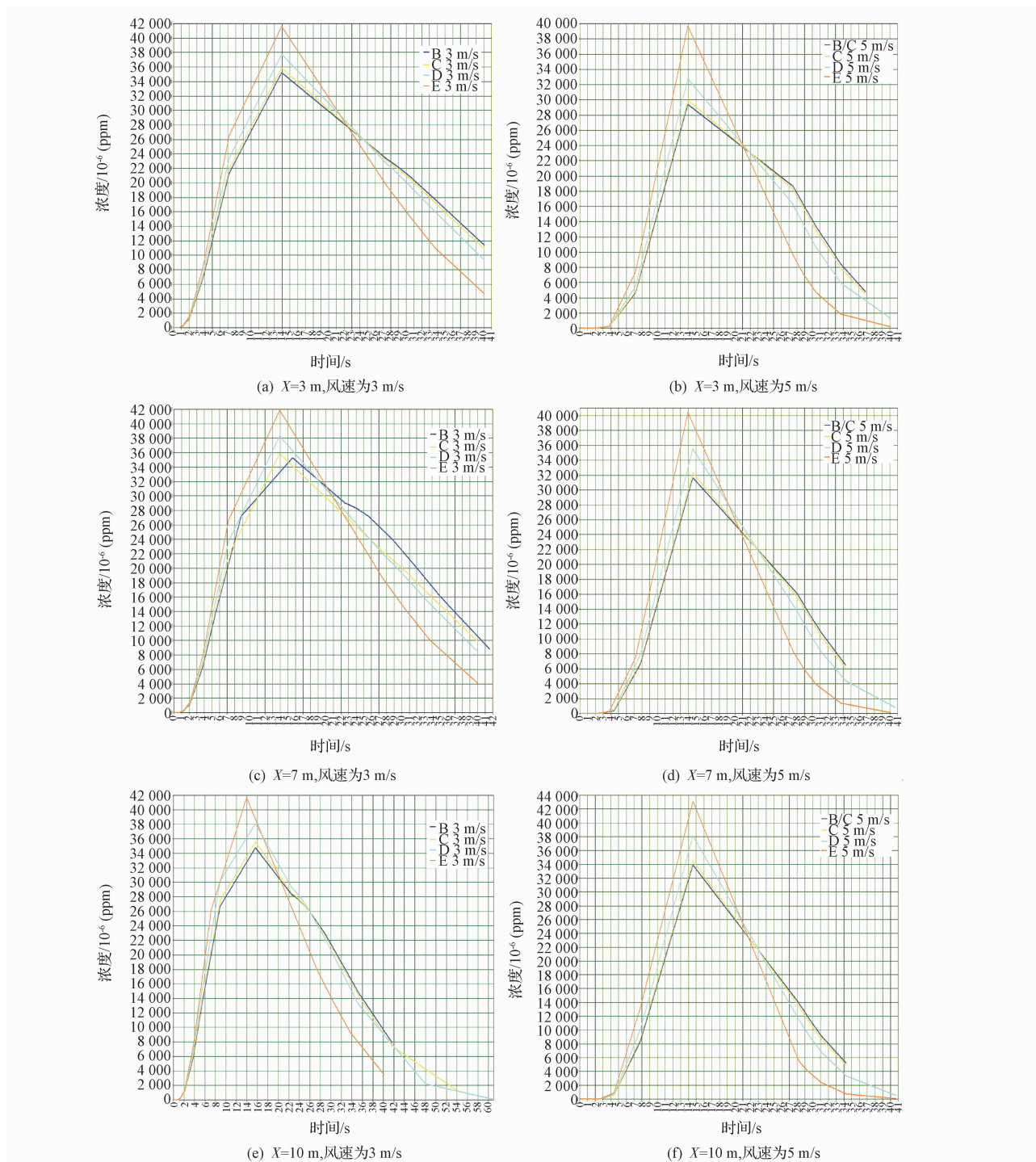


图5 下风向最大爆炸半径处,天然气浓度随时间变化的关系

Fig. 5 Concentration vs time at maximum explosion radius

定时间时,天然气浓度达到饱和到达峰值,浓度开始逐渐减小,天然气开始从该处分散。最终,通过之前相反的过程,在泄漏一定的时间过后,该处的天然气浓度再次变为0。

对比不同的风速曲线,我们发现风速较大时浓度曲线较为陡峭、曲线宽度较小。这意味着风速越大,天然气在大气中浓度变化的速度越大、向点聚集

和分散的速度越快。同时,曲线峰值较大。这表明,风速越大时天然气聚集的饱和浓度越大。

通过以上分析,我们可以得出以下结论:天然气在泄漏的过程中,以聚集再分散的方式进行扩散,天然气总体分布的几何中心向下风向移动。泄漏天然气在扩散的过程中,当风速较大时,扩散的速度更快,天然气聚集的饱和浓度越大。在一定的时间内,

风速越大,天然气的扩散范围越大。

2.3 大气稳定度对天然气扩散的影响

图 4 中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)为泄漏发生 18.75 s 时,天然气云爆炸下限的水平分布情况。图中,选取泄漏点离地面的高度和风速作为定量,稳定度作为变量进行模拟。泄漏点离地面的高度分别选取 3 m、7 m、10 m,风速选取 3 m/s、5 m/s。可以看到,天然气的浓度分布轮廓线总体向下风向移动。随着风速的增加,轮廓线的几何中心向下移动。其中,轮廓线前端向下风向扩张,但扩张的趋势没有风速变化影响那么大。后端则并未随大气稳定度增加进行收缩。天然气扩散的范围随着大气稳定度的增加而变大。

同样,通过对 18.75 s 爆炸浓度水平分布情况的模拟,可以得出在图 2 ~ 图 4 中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)条件下,天然气扩散的最大爆炸半径分别为 76 m、113 m、73.5 m、109.5 m、72 m、104 m。图 5 中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)为不同大气稳定度条件下,下风向最大爆炸半径处天然气随时间的分布曲线图。曲线的变化趋势和分布规律与图 3 相似,天然气浓度随时间的变化经历聚集、饱和、分散三个阶段。当天然气向该处聚集时,聚集速度随着大气稳定度的增加而增加。聚集时的饱和浓度随着天然气稳定度的增加而减小。当天然气从该处分散时,分散的速度随着大气稳定度的增加而增加。

通过以上分析,我们可以得出结论:风速一定的条件下,扩散的速度随着大气稳定度的增加而变大,天然气聚集的饱和浓度随天然气稳定度的增大而减小。在一定的时间内,大气稳定度越大,天然气的扩散范围越大。

3 结语

通过对天然气扩散模型的分析,找出了大气中影响天然气扩散的因素。在此基础上,运用 SAFETI 软件模拟了天然气在容器中瞬时泄漏的场景。通过控制变量法对风速和大气稳定度的影响进行分析,确定了天然气在扩散过程中受该两种因素影响的浓度变化趋势和扩散分布规律。对于评估天然气风险,有一定的实际意义。

参 考 文 献

1 丁信伟,王淑兰,徐国庆. 可燃及毒性气体扩散研究. 化学工程,

2000;28(1):33—36

Ding Xinwei, Wang Shulan, Xu Guoqing. Study on dispersion of combustible and toxic gases. Chemical Engineering(China), 2000;28(1):33—36

2 全纪龙,王皓,袁九毅. 毒性气体大气扩散过程及伤害时、区的分析方法. 环境工程, 2010;28(S1):187—190

Tong Jilong, Wang Hao, Yuan Jiuyi. The method to analysis the dispersion process and damage zone of toxic gas. Environmental Engineering, 2010;28(S1):187—190

3 马树超,潘峰,袁九毅,等. 有毒气体大气扩散特点·数学模型及其伤害浓度作用时间分析. 安徽农业科学杂志, 2007;35(32):10425—10426,10429

Ma Shuchao, Pan Feng, Yuan Jiuyi, et al. Characteristics of atmospheric dispersion of toxic Gases · mathematical model and its damage concentration effect time analysis. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007;35(32):10425—10426,10429

4 陈新华,武江涛,佟连捷,等. 液体火箭爆炸后有毒气体扩散研究. 推进技术, 1999;20(5):6—10

Chen Xinhua, Wu Jiangtao, Dong Lianjie, et al. Research on toxic gas diffusion after liquid propellant rocket explosion. Journal of propulsion GY Technology, 1999;20(5):6—10

5 陈新华,向四桂. 液体火箭爆炸地面有害气体生成与扩散分析. 爆炸与冲击, 2005;25(4):355—360

Chen Xinhua, Xiang Sigui. Research on harmful gas formation and diffusion after liquid propellant rocket explosion. Explosion and Shock Waves, 2005;25(4):355—360

6 何潇楠. 湿度对天然气扩散影响的理论分析. 科技视界, 2015;(13):5—7

He Xiaonan. Theoretical analysis of the influence of humidity on the dispersion of natural gas. Science & Technology Vision, 2015;(13):5—7

7 陈国华. 风险工程学. 北京:国防工业出版社, 2007

Chen Guohua. The risk of Engineering. Beijing: National Defense Industry Press, 2007

8 彭星煜,梁光川,张鹏,等. 天然气管道失效个人生命风险评价技术研究. 中国安全科学学报, 2012;22(4):139—143

Peng Xingyu, Liang Guangchuan, Zhang Peng, et al. Study on individual life risk assessment technology for long-distance natural gas pipeline. China Safety Science Journal, 2012;22(4):139—143

9 彭星煜,张鹏. 城市天然气管道泄漏燃爆灾害评价. 油气储运, 2007;26(10):28—31

Peng Xingyu, Zhang Peng. Evaluating the city natural gas pipelines leaking fire and burst. Oil/gas Storage and Transportation, 2007;26(10):28—31

10 Center for Chemical Process Safety. Guidelines for evaluation the characteristics of vapor cloud explosion, flash fires, and BLEVE. New York: AIChE, 1994;25—30

(下转第 147 页)

- mabugang area, Guangdong Province. Geophysical and geochemical exploration, 2014;38(1):10—17
- 7 臧金生,王东晓,赵瑞强. 化探异常定量评价. 物探与化探, 2014;38(6):1114—1118

- Zang J S, Wang D X, Zhao R Q. Quantitative evaluation of geochemical anomalies. Geophysical and geochemical exploration, 2014;38(6):1114—1118

Metallogenic Geological Characteristics and Prospecting Potential of Gaodi Silver Polymetallic Deposit in Zhaluteqi, Inner Mogolia

LIU Jian-quan, ZHAO Peng, WANG Jian-qing, DONG Shuai, YU Da, DONG Hong-wei
(Tianjin North China Geological Exploration General Institute, Tianjin 300170, P. R. China)

[**Abstract**] Gaodi silver polymetallic deposit is located in the Tuquan—Linxi metallogenic belt of iron (tin), copper, lead, zinc, silver and niobium (tantalum) in Variscan and Yanshan period. Two integrated anomalies of stream sediment survey and one anomaly of ground magnetic survey, both with scale of 1:50 000, were delineated in this mining area. Based on the anomaly verification, geochemical anomalies have good reproducibility, and the apparent polarization anomalies coincide with the geochemical anomalies. 10 mineralization and alteration zones with certain silver mineralization were delineated in these abnormal areas, which controlled by faults. This mining area has good ore-forming material sources and conditions for ore-forming material activation, migration and enrichment. It will be a good prospecting for hydrothermal silver polymetallic ore, and should focus on prospecting the silver polymetallic deposit which associates with nearly N-S-trending faults and magmatic hydrothermal fluids.

[**Key words**] Inner Mogolia Gaodi silver polymetallic deposit geological characteristics prospecting potential

(上接第 131 页)

Study on the Influence of Atmosphere Condition for Natural Gas Dispersion Based on SAFETI

PENG Xing-yu¹, FAN Zhang-chuan², ZHU Min³, LI Hang-hang², WU Yun-dong², CHENG Jian²
(Storage and Transportation Research Institute¹,
School of Petroleum and Natural Gas Engineering², Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China;
China Petroleum Engineering CO. LTD Qinghai Company³, Dunhuang 736202, P. R. China)

[**Abstract**] In order to ascertain the combustion impact and toxic effect of natural gas discharge, the Gauss model was used to analyze the dispersion of natural gas release, with two main factors that affect the distribution of gas concentration, the wind speed and atmospheric stability were determined. With Simulation of container natural gas instantaneous discharge scenario carried by means of SAFETI, control variables is used to analysis the simulation result “Concentration 4.4×10^{-2} Footprint at 18.75 s” and “Concentration vs Time at Maximum explosion radius” and the concentration varying trend and distribution characteristics of the released natural gas influenced by the wind speed and atmospheric stability in the gas dispersion process. It is concluded that the in the process of the natural gas discharge, the gas will disperse after its gathering, geometry center of the general distribution moves in the direction of the wind direction; in the process of the dispersion the dispersing speed will gain with the increasing wind speed and atmospheric stability, the gathering concentration of the natural gas will increase with the raising wind speed and decreasing stability. Within a certain period of time, the higher wind speed and stability, the larger dispersion range.

[**Key words**] Gauss model natural gas dispersion the influence of atmosphere simulation control variables wind speed atmospheric stability