

含二氧化碳天然气云团扩散危险区域确定的数值模拟

马世海¹, 黄平², 杨智超³, 蔡晓军⁴

1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012
2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081
3. 中国石油吉林油田分公司乾安采油厂, 吉林松原 131400
4. 中国石油吉林油田分公司勘察设计院, 吉林松原 138001

摘要 为确定含二氧化碳天然气云团扩散的危险区域范围, 借助数值模拟方法建立了含二氧化碳天然气云团扩散模型, 详细研究了含二氧化碳天然气云团扩散过程, 确定了包括窒息和燃爆在内的 2 种危险区域。研究结果表明, 含二氧化碳天然气云团扩散中燃爆区域呈不规则圆环状分布, 燃爆区域的横风向尺度变化不大, 而平行于风向的方向变化较大。无论横风向还是顺风向, 燃爆区域尺度随时间的变化都呈开口朝下的抛物线形分布。高含二氧化碳天然气云团扩散后形成的燃爆区域无论从时间还是空间尺度看, 波及的范围都远小于窒息性危险区域。

关键词 含二氧化碳天然气; 扩散; 数值模拟; 危险; 燃爆

中图分类号 X937

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.21.007

Numerical Simulation on Hazard Zone Determination During the Dispersion of Natural Gas Containing Carbon Dioxide

MA Shihai¹, HUANG Ping², YANG Zhichao³, CAI Xiaojun⁴

1. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China
2. School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
3. Qian'an Extraction Plant of Jilin Oilfield Company of PetroChina, Songyuan 131400, Jilin Province, China
4. Survey Design Institute of Jilin Oilfield Company of PetroChina, Songyuan 138001, Jilin Province, China

Abstract The explosion characteristics and hazards caused by dispersion of the natural gas containing carbon dioxide are concerned about. In order to confirm the hazard zone determination during the dispersion of natural gas containing carbon dioxide, explosion characteristics and the accuracy evaluation for the numerical model, mechanism of the puff dispersion and dispersion issues caused by blowout were investigated by numerical simulation methods. A dispersion model of natural gas containing carbon dioxide was set up, and the dispersion evolution was researched in detail, furthermore, the hazard zone concluding asphyxiation and explosion or flammability is defined. The numerical simulation results show that the flammability zone caused by the puff dispersion of the natural gas containing carbon dioxide takes on an irregular cirque distribution. Along-wind variation of flammability-zone dimension is larger than that for crosswind. For both cases of along-wind and crosswind, the distribution of variations of flammability zone with time presents the shape of parabola whose peak point is up. Besides, it does not matter to judge explosive zone based on time or on space, the affected area for flammability zone is way smaller than that for the asphyxia zone.

Keywords natural gas containing carbon dioxide; dispersion; numerical simulation; hazard; explosion

收稿日期: 2011-06-24; 修回日期: 2011-07-14

作者简介: 马世海, 高级工程师, 研究方向为系统安全分析和安全评价, 电子信箱: smarmt@163.com; 黄平 (通信作者), 副教授, 研究方向为含能材料与安全工程, 电子信箱: ph6111@bit.edu.cn

0 引言

在含二氧化碳天然气(含 CO₂ 天然气)的生产、运输和存储过程中,由于操作失误或外界的撞击、加热或设备老化甚至恐怖分子袭击,会导致高压容器、储罐破裂甚至发生爆炸。含 CO₂ 天然气全部瞬时泄漏或在极短的时间内泄漏出来会导致典型的最坏情形释放,即云团瞬时释放^[1-3]。此时如果缺乏对以云团方式扩散的有害气体迁移和输运规律的把握,就可能发生人员疏散延误和盲目疏散等现象。相对于烟羽扩散,云团瞬时释放扩散的研究较少,因此对云团扩散迁移和分布规律的研究显得尤为重要^[4-6]。本文采用计算流体力学(CFD)方法对含 CO₂ 天然气重气云团的扩散规律进行研究,在假定重气云团瞬时释放并扩散的条件下,获得计算域中气体浓度随时间的变化曲线和燃爆范围云图,确定气团扩散导致的危险区域范围(主要包含窒息危险区域和燃爆危险区域 2 类),以期今后相似事故情况下的紧急人员疏散和应急救援工作提供科学指导和技术支撑。

1 扩散模型的建立

1.1 扩散方程

流体流动遵循质量、动量和能量守恒基本定律,在气体扩散过程中还遵守气体组分质量守恒定律^[7-9]。其控制方程如下:

质量(连续性)方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = S_m \quad (1)$$

式中, ρ 为密度, kg·m⁻³; t 为时间, s; $\mathbf{v}$ 为速度矢量, m·s⁻¹; S_m 为源项,表示扩散相增加到连续相中的质量,如液体蒸发或其他质量源项, kg。

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \text{div}(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\text{div} p + \text{div}(\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中, p 为静压, Pa; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量; $\rho \mathbf{g}$ 和 $\mathbf{F}$ 分别是重力和外部体积力, N。

能量方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} T) = \text{div}[k \cdot (\text{grad} T)]/c_p + S_T \quad (3)$$

式中, c_p 为比热容; T 为温度, K; k 为流体传热系数, J·m⁻²·s⁻¹·K⁻¹; S_T 为黏性耗散项, J。

另外,大气边界层内的气体扩散运动通常处于湍流状态,基本的控制微分方程还包括 κ - ε 湍流方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}[u_j(\rho k)] = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}[u_j(\rho \varepsilon)] = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\mu_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (6)$$

式中,常数 $c_\mu=0.09$, $c_{1\varepsilon}=1.44$, $c_{2\varepsilon}=1.92$, $\sigma_k=1.3$, $\sigma_\varepsilon=1.0$ 。

气体的扩散体系中至少存在 2 种或 2 种以上的组分,每一组分都遵守质量守恒定律。组分 s 基于组分质量守恒定律的组分质量守恒方程是:

$$\frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v} c_s) = \text{div}[D_s \cdot \text{grad}(\rho c_s)] + S_s \quad (7)$$

式中, c_s 是组分 s 的体积浓度; ρc_s 是该组分的质量浓度; D_s 是该组分的扩散系数; S_s 为系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的该组分的质量,即产率, kg。

1.2 几何模型

根据重气扩散数值模拟的需要,研究中所建立的几何模型相关尺寸如图 1 所示。

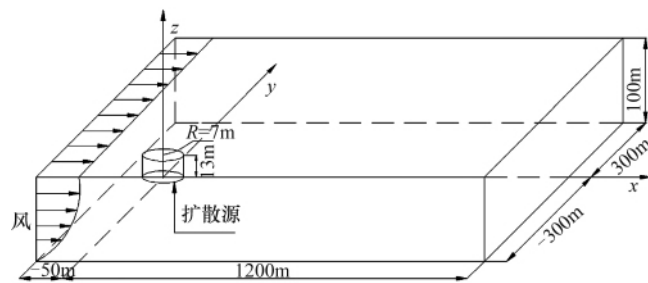


图 1 几何模型示意图

Fig.1 Sketch of geometrical model

1.3 边界条件

重气扩散的初始条件非常复杂,因具体释放条件不同而异,没有普适的初始条件。本文采用圆柱模型作为初始源。只考虑惰性、单相气体的等温瞬时释放的情况,不考虑云团与环境空气的热力交换以及化学反应过程,同时忽略初始气云的形成过程,即不考虑源排放方式,只考虑形成云团后的扩散过程^[9-10]。

考虑到模拟既要体现混合气体非被动扩散的特性,又要使混合气体在扩散过程中具有燃爆的可能性,确定含 CO₂ 天然气的 CO₂ 与 CH₄ 物质的量之比是 3:1^[11]。含 CO₂ 天然气中 CO₂ 的初始质量分数为约 0.89,混合气体的平均摩尔质量是 0.037kg·mol⁻¹,相对密度约为 1.28。

风速、地形、地面粗糙度等因素对扩散具有实质性的影响,在数值模拟中必须予以体现,才能使模拟结果与实际扩散情形具有可比性^[11]。在本文的模拟中,10m 高速设置为 1m·s⁻¹,地形假设为平坦的草地,风速随高度的变化符合幂指数率:

$$\mathbf{u}_z = \mathbf{u}_1 \cdot (z/z_1)^m \quad (8)$$

式中, $\mathbf{u}_z$ 为离地 z 高度上的平均风速, m·s⁻¹; $\mathbf{u}_1$ 为离地 z_1 高度上的平均风速, m·s⁻¹,通常 $z_1=10\text{m}$; m 为无量纲数,取决于大气稳定度类型与地面粗糙度,通常取值在 0—1 之间。国外观测试验表明,平坦乡村的 m 值是 0.16,城市近郊是 0.28,城市市区是 0.4^[12]。本文中 m 值取 0.16。

2 数值模拟结果

2.1 窒息危险区域

含 CO_2 天然气中,窒息危险物质主要指 CO_2 ,若需考虑对应点的 CH_4 浓度则可以根据 CO_2 的浓度换算,因为二者在短时扩散过程中保持均匀混合。此外, CO_2 等重气具有贴地扩散的特征,地表附近是影响人员安全的最重要区域,因此有必要研究其地面附近浓度的分布,特别是有害气体达到某一阈值时所对应的时间和范围。对含 CO_2 天然气云团扩散的窒息效应,只需要考虑 CO_2 的短时接触浓度阈值即 $18000\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,相当于体积分数为 10000×10^{-6} 或 1%(GBZ 2.1—2007)。云团扩散特征参数如到达时刻、离开时刻、持续时间等都以上述阈值(即临界浓度)作为计算基准。图 2 给出了具有相同 x 坐标而不同 y 坐标的地面监测点的 CO_2 浓度-时间曲线。以 1% 的 CO_2 体积分数作为临界浓度值,给出了表示临界浓度的参考线(水平虚线)。如果某幅图中没有出现临界浓度参考线,说明这些监测点上的浓度一直都小于临界浓度。临界浓度参考线与 CO_2 浓度-时间曲线的左侧和右侧交点对应的时刻

分别表示云团的到达时刻和离开时刻。

从图 2(a)—2(h)可知,含 CO_2 天然气有显著的逆风扩散现象,这主要是由重力坍塌效应造成的。而对中性气体扩散,逆风扩散现象则是由湍流造成的,浓度值和影响的范围都很小,而且当风速稍有增大就会消失。虽然 10m 高风速只有 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,但上风向 15m 处并没有出现临界浓度的 CO_2 (图 2(b)),可以认为临界浓度扩散的最远距离达到上风向 10m 处。可以推断,风速提高以后,逆风扩散区域将进一步缩小。但图 2(a)的浓度-时间曲线表明,在上风向至少 25m 的地方出现了体积分数为 100×10^{-6} 的 CO_2 ,如果释放的气体属于中毒阈值很低的甚至是不允许有任何程度暴露的物质,则上风向危险区域将更大,这表明重气危险区域的评价与特定物质的毒性阈值相关联。

从图 2(f)—2(h)可知,临界浓度的下风向扩散距离介于 $130\text{—}140\text{m}$ 之间。临界浓度的横风向位置最大出现在距离中心轴线 50m 的地方。因此扩散发生后,保守估计逆风向上窒息危险区域是 x 坐标范围 $-15\text{—}0\text{m}$,横风向 y 坐标范围 -25—

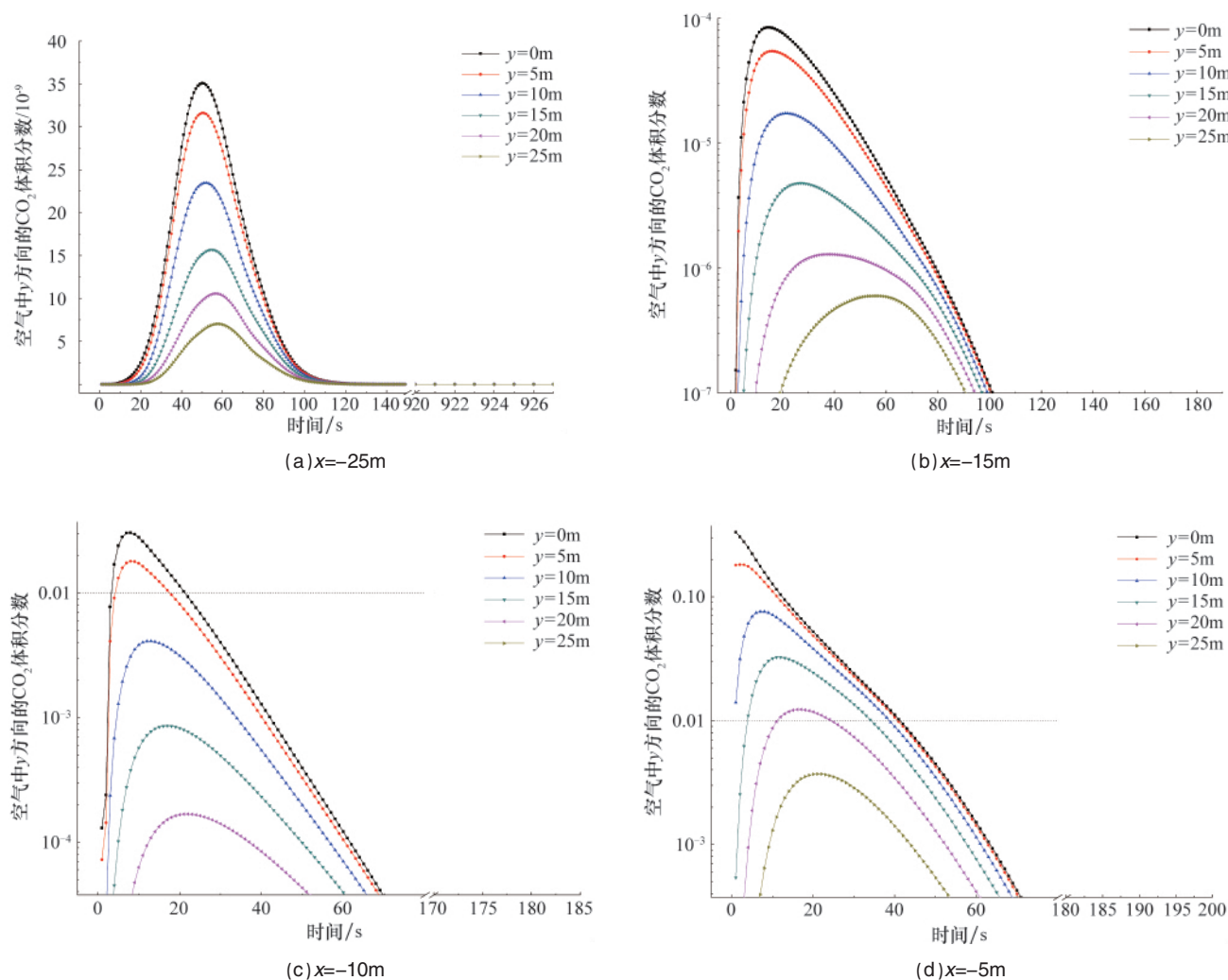


图 2 地面 y 方向 CO_2 浓度-时间曲线

Fig. 2 Concentration versus time curve in the y direction on the ground

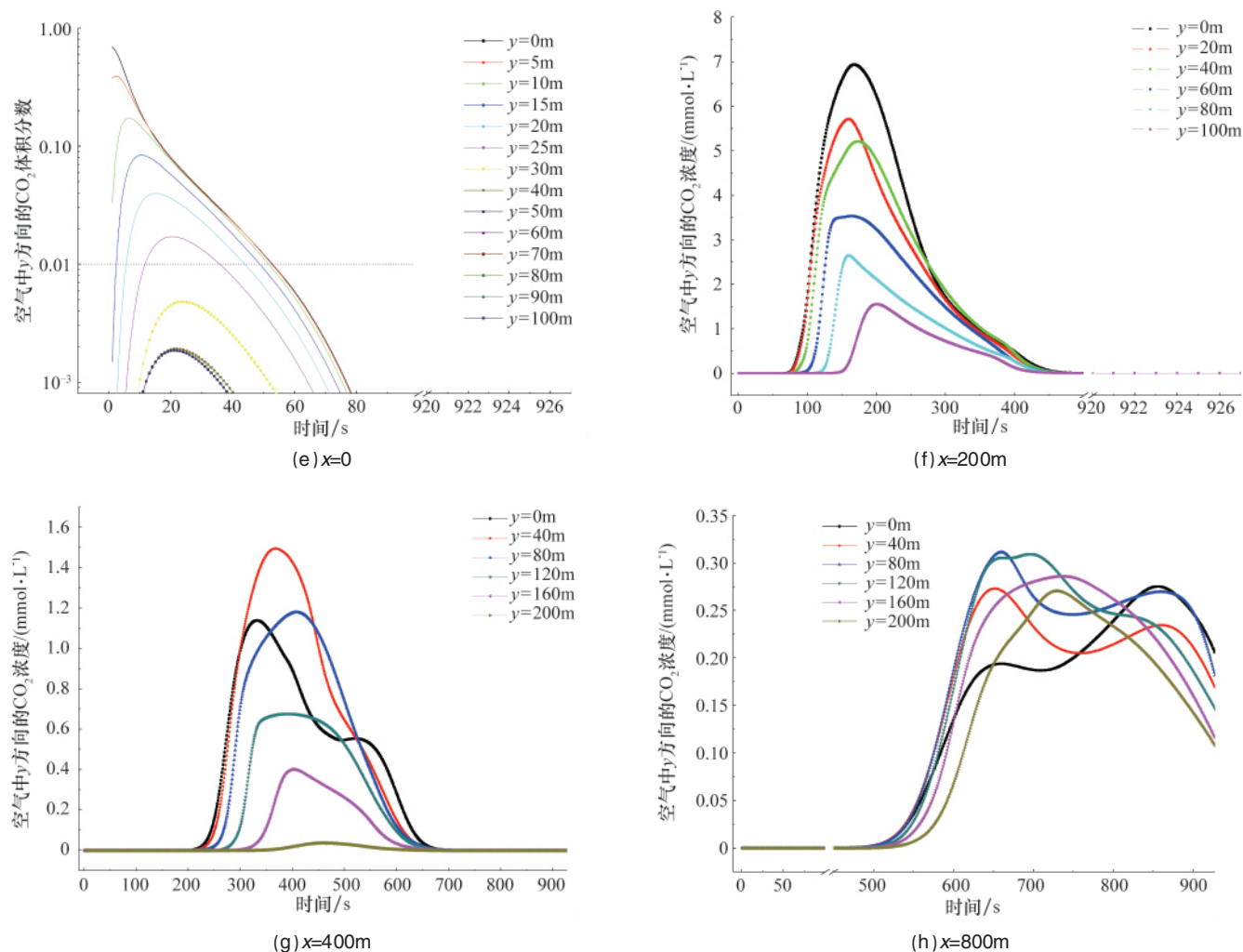


图2 地面 y 方向 CO_2 浓度-时间曲线(续)

Fig. 2 Concentration versus time curve in the y direction on the ground (continued)

25m。下风向上窒息危险区域是, x 坐标范围 0—140m,横风向 y 坐标-50—50m。下风向危险浓度扩散距离不但远远大于逆风向上的扩散距离,也远大于在横风向上的扩散距离,这表明即使对重气扩散,有风情况下浓度影响范围最远的方向仍然在下风向轴线方向。

2.2 燃爆危险区域

当 CO_2 和 CH_4 物质的量比例为 3:1 时,经过计算,只有 CH_4 在全部混合物中的体积分数介于 6.1%—7.5%或质量分数介于 2.2%—2.5%之间时 $\text{CH}_4/\text{Air}/\text{CO}_2$ 三组分气体才具有燃爆性^[2]。对燃爆气体扩散,处于燃爆上下限浓度区间的气体在空间和时间上的分布是研究重点,也是确定疏散区域的主要依据。图 3(a)—3(h)给出了含 CO_2 天然气云团释放扩散 1—15s 过程中地面燃爆气云的时空分布,图中虚圆区域为初始圆柱形云团在地面的投影。

从数值模拟的结果看,在释放发生 15s 后,整个气云中 CH_4 的质量分数均小于 2.2%,因此,即使发生燃爆也必然出现在云团扩散的前 15s 内。

表 1 给出了在图 3(a)—3(h)中含 CO_2 天然气云整体燃

表 1 地面气云燃爆范围坐标分布

Table1 Coordinate distribution of explosion extension

t/s	$x_{\min}/\text{m}$	$x_{\max}/\text{m}$	y/m
1	-8	10	±09
2	-8	13	±09
3	-8	15	±10
4	-8	17	±11
5	-8	19	±12
6	-7	20	±13
7	-7	21	±14
8	-6	21	±14
9	-6	21	±14
10	-5	20	±14
11	-4	19	±14
12	-3	16	±13
13	-2	12	±12
14	-1	7	±10

爆范围的坐标分布。可见,燃爆区域的横风向尺度变化不大,介于 ± 9 — ± 14 m之间。在平行于风向的方向,燃爆区域的尺寸

变化较大,燃爆区域前锋介于7—21 m,燃爆区域后缘介于-1—-7 m。

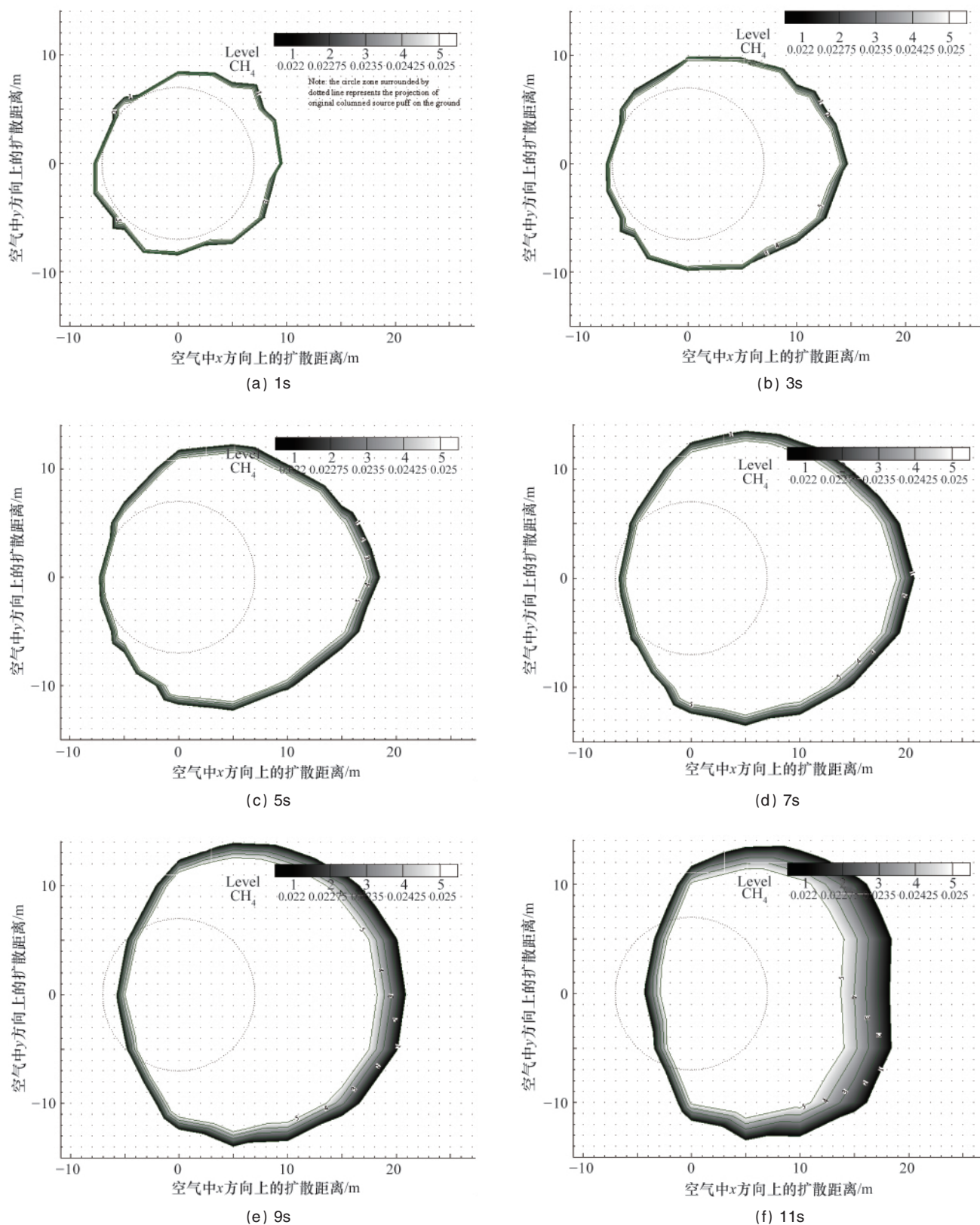


图3 地面气云燃爆范围分布

Fig. 3 Distribution of explosion extension zone of gas cloud on the ground

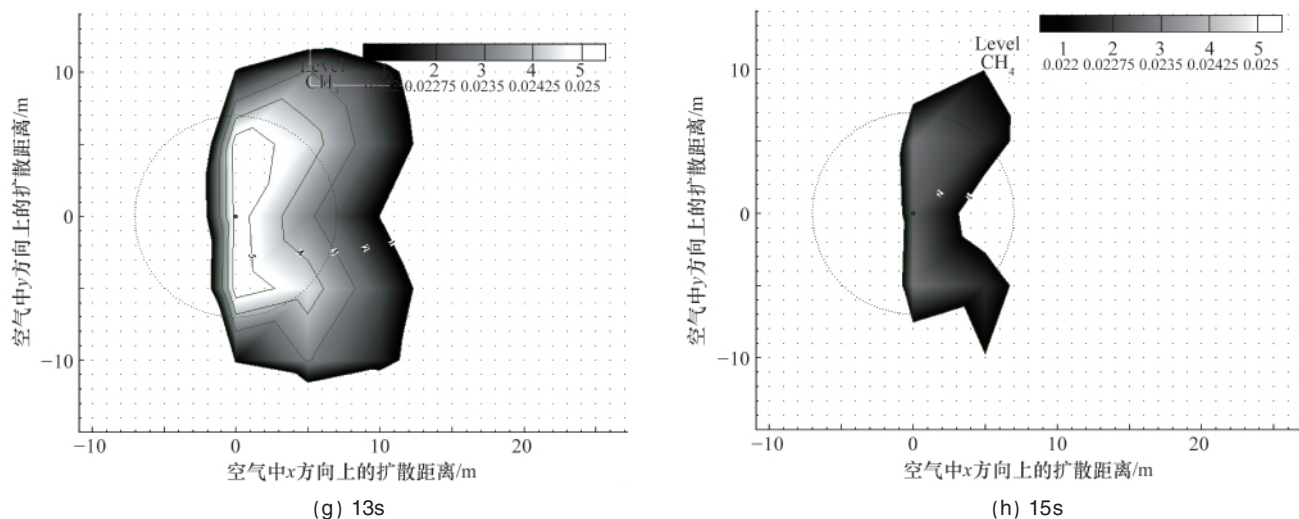


图 3 地面气云燃爆范围分布 (续)

Fig. 3 Distribution of explosion extension zone of gas cloud on the ground (continued)

从图 3(a)—3(h)中还可看出,无论横风向还是平行于风向的方向,燃爆区域的尺度都从初始的较小增加到最大,然后再回落到较小的尺度,即燃爆区域尺度随时间的变化呈开口朝下的抛物线形状分布,直至最终消失。在释放发生第 7s 时,具有燃爆危险性的云团在地面的覆盖范围最广。

地面燃爆范围的持续时间较短,主要是因为数值模拟中含 CO_2 天然气云团释放源的 CH_4 质量分数本身较小,在开放空间中释放后很快被周围空气稀释到更小的浓度。另外,物质的量比是 1:3 的 CH_4/CO_2 混合气体的燃爆范围太小也是原因。地面燃爆范围呈近似圆环分布是因为不论对负浮力扩散还是中性浮力扩散,周围空气的稀释作用只能通过气团的顶部和四周侧向发生,故而必然形成一个中心浓度较高而径向浓度较低的云团,在地面上则表现为圆环状分布。扩散初始,由于云团整体浓度较高,圆环不断增长,随着空气稀释作用的加剧,云团整体浓度下降,圆环面积也趋于收缩。

3 结论

本文以重气扩散的基本理论和分析方法为基础,建立了含 CO_2 天然气扩散数学模型,对低风速条件下含 CO_2 天然气的等温扩散过程进行了基于 CFD 平台的数值模拟研究。研究表明,含 CO_2 天然气云团扩散中燃爆区域呈不规则圆环状分布,燃爆区域的横风向尺度变化不大,而平行于风向的方向变化较大。无论横风向还是平行于风向的方向,燃爆区域的尺度都从初始的较小增加到最大,然后再回落到比较小的尺度,即燃爆区域尺度随时间的变化都呈开口朝下的抛物线形状分布,直至最终消失。高含 CO_2 天然气云团扩散后形成的燃爆区域无论在时间还是空间尺度上,波及的范围都远小于窒息性危险区域。

参考文献 (References)

[1] Crowl D A, Louvar J F. Chemical process safety: Fundamentals with

applications[M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2001.

[2] Hanna S R, Britter R, Franzese P. A baseline urban dispersion model evaluated with Salt Lake City and Los Angeles tracer data [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(36): 5069–5082.

[3] Sweatman W L, Chatwin P C. Dosages from instantaneous releases of dense gases in wind tunnels and into a neutrally stable atmosphere[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1996, 77(3): 211–231.

[4] Doran J C, Allwine K J, Flaherty J E. Characteristics of puff dispersion in an urban environment[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(16): 3440–3452.

[5] Zhou Y, Hanna S. Along-wind dispersion of puffs released in a built-up urban area[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 125(3): 469–486.

[6] Khan F I, Abbasi S A. Modelling and control of the dispersion of hazardous heavy gases [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1999, 12(3): 235–244.

[7] Kisa M, Jelemsky L. CFD dispersion modelling for emergency preparadnes[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(1): 97–104.

[8] Sklavounos S, Rigas F. Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 108 (1–2): 9–20.

[9] Havens J. Review of dense gas dispersion field experiments[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1992, 5(1): 28–41.

[10] Heidorn K C, Murphy M C, Irwin P A. Effects of obstacles on the spread of a heavy gas—wind tunnel simulations[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1992, 30(2): 151–194.

[11] Patra A K. Influence of wind speed profile and roughness parameters on the downwind extension of vulnerable zones during dispersion of toxic dense gases [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(5): 478–480.

[12] 魏利军. 重气扩散过程的数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2000. Wei Lijun. Numerical simulation of heavy gas dispersion [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2000.

(责任编辑 孙秀云)