

自然通风条件下炼钢厂煤气泄漏扩散研究

刘祖德¹, 蔡香萍¹, 王晶²

1. 中国地质大学工程学院, 武汉 430074

2. 北京理工大学机电学院, 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

摘要 为评估炼钢厂中突发煤气泄漏的后果, 通过建立二维简化平面模型, 采用 LES 湍流模型对煤气在厂区的泄露扩散过程进行了数值模拟, 得到了 CO 浓度随时空的分布规律。计算结果表明, 在泄露过程中, 泄漏口近的 CO 浓度分布比较集中; 泄漏停止后, 在自然风的作用下 CO 浓度并不能很快降低, 而是呈现一个平缓的发展过程。本结果对突发煤气泄漏的报警和预案的制定有一定参考价值。

关键词 炼钢厂; 煤气; 扩散; 数值模拟

中图分类号 X962, X924.4

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)16-0040-04

Coal Gas Diffusion by Natural Ventilation in Steel Works

LIU Zude¹, CAI Xiangping¹, WANG Jing²

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The coal gas sudden leakage from the storage tank to air can be disastrous. The diffusion law of coal gas (as light gas) must be carefully studied to prevent the damaging consequence to the workers. This paper presents a simulation of the leakage and diffusing process of coal gas using a simplified two-dimensional plane model combined with LES turbulence model, from which the law of CO concentration versus time and space is obtained. The simulation results show that (1) at the initial stage, the CO concentration near the mouth of leak is more concentrated during disclosure process; (2) when the leak is stopped, the concentration of CO is not immediately reduced and it is followed by a gentle process of development, due to bulky tanks up the wind, which induce the wind turbulence. With the leakage, its leaked CO around the mouth of pressure and velocity disturbance, a disturbance will spread. In the horizontal direction of leakage mouth upward, the CO

concentration is significantly higher than that in windward direction. In the natural and ventilated conditions, when leakage stops, the concentrations of CO are not quickly reduced, but take a gentle development process. The results of the study may help to establish the emergency gas leak alarm and preventive measures.

Keywords steel works; gas diffusion; numerical simulation

0 引言

在化工、石油、染料等行业, 尤其是冶金行业中存在许多危险性有害气体。在生产或运输过程中由于操作失误或其他原因, 引起危险物质泄漏, 极易引发火灾或人员中毒等特重大伤害事故。因此, 研究有害气体在自然通风条件下的扩散规律十分必要, 这里以某炼钢厂储罐煤气为研究对象, 对其扩散规律进行研究。

长期以来, 人们对危险性气体的扩散问题做了大量的研究工作, 建立了一系列扩散模型^[1-8], 例如: 高斯烟羽模型、高斯烟团模型、BM 模型 (Briter 和 McQuaid)、Sutton 模型及 FEM3 模型等。但上述理论模型是基于开放空间研究中性和重气的扩散过程, 不适用于密闭或半密闭空间的轻质气体。针对轻质气体的泄漏扩散研究较少, 尤其是数值模拟研究尚未见报道; 许多文献提到危险性气体的泄漏扩散受泄漏源位置、泄漏速度、方向及气象条件、风速等因素的影响, 但很少针对以上因素对危险性气体扩散浓度场和危险性区域进行具体的研究^[1-10]。因此, 本文假设炼钢厂中煤气意外泄露扩散, 研究自然通风条件下煤气泄漏后其浓度场扩散规律和危险性区域范围, 期望其结果能用于改进车间监控和通风系统的设计。

收稿日期: 2009-04-16

作者简介: 刘祖德, 副教授, 研究方向为有毒有害气体监测监控技术, 电子信箱: liu_zude@163.com

1 问题描述

1.1 自然通风模型的建立

根据武汉钢铁集团炼钢车间的现场设备分布,建立二维简化模型,其尺寸为 $30\text{ m} \times 50\text{ m}$,如图 1 所示。煤气泄露口为 $0.7\text{ m} \times 0.7\text{ m}$,其位于 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的位置上,以泄露口为圆心,在半径 2 m 的位置上每隔 45° 设置一监测点,分别为 1,2, ..., 8;在距离地面高度为 1.5 m 上设置监测点 9,10, ..., 14,其距离泄露口的水平距离分别为 $-0.55, 7.7, 10.7, 19.7, 22.7$ 和 30.7 m 。其网格采用结构化网格,节点间距为 10 cm 。

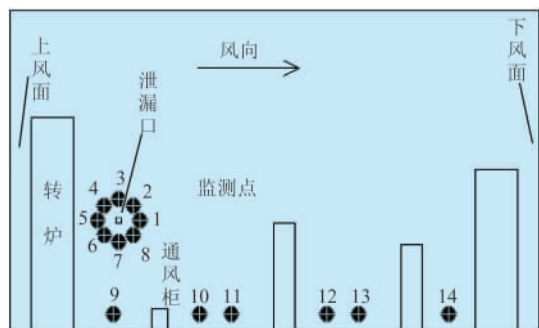


图 1 计算模型示意

Fig. 1 Sketch of computational model

利用该计算模型模拟煤气发生泄露后,在空间和时间上 CO 浓度的分布情况。湍流模型采用 LES 模型,这样就直接将尺度比网格大的湍流运动通过 Navier-Stokes 方程计算出来,而小尺度的涡对大尺度运动的影响通过 LES 模型模拟。

1.2 边界条件的设定

泄露口压力为 15 kPa ,面积为 0.49 m^2 ,泄露时间设置为 2 s ;自然风速为 3 m/s ;壁面为绝热无滑移边界。

1.3 计算方程的离散格式

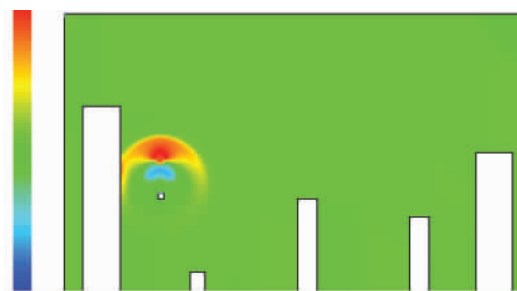
LES 方法在某种程度上属于直接数值模拟 (DNS),在时间积分方案上,选择具有二阶精度的 Crank-Nicolson 半隐式方案。在基于有限体积法的空间离散格式上,为克服假扩散,应该选择具有至少二阶的离散格式^[11-14]。因为湍流模型采取的是 LES 模型,所以只需将 Flow 方程离散为二阶迎风格式。

2 计算结果与分析

在自然通风条件下,假设泄露口朝上。图 2 是泄露发生 12.5 ms 后的压力和速度分布图。由图 2 分析可知,煤气泄露初期的膨胀过程可视为一个绝热膨胀过程,由于其孔径较小,所以又可看作是一个平壁圆孔口。因此,输气管道煤气泄露的膨胀过程是一个在平壁圆孔口上的绝热膨胀过程,其膨胀形状可模拟为半球球状。

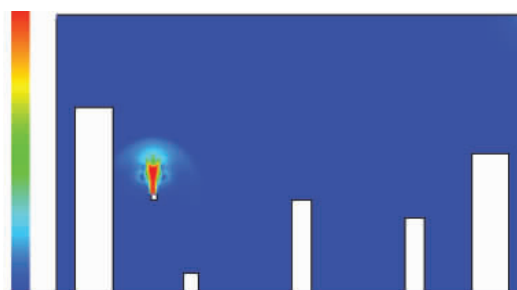
2.1 CO 的空间分布

沿泄露口水平面上设置一条监测线,观察其上静压力 P ,水平方向 (x) 速度以及 CO 的浓度在各时间点空间的分布规律,分别如图 3~图 5 所示。



(a) 压力分布

(a) Distribution of pressure



(b) 速度分布

(b) Distribution of speed

图 2 泄露发生后 12.5 ms 的压力和速度分布

Fig. 2 Distribution of pressure and speed after leakage for 12.5 ms

由图 3 和图 4 分析可知,在初始时刻 (0.1 s),整个压力场和速度场是比较平缓的,随着泄露的发生,由于 CO 的大量涌出,引起了泄露口周围压力和速度场剧烈地变化,并通过这种扰动以波动的形式向前传播。

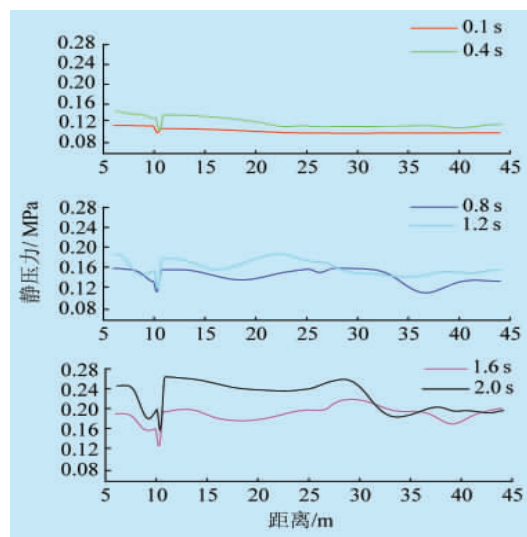


图 3 不同时刻与泄露口齐平方向静压力
随距离变化曲线

Fig. 3 Static pressure with leakage vent in the same direction with distance at different time

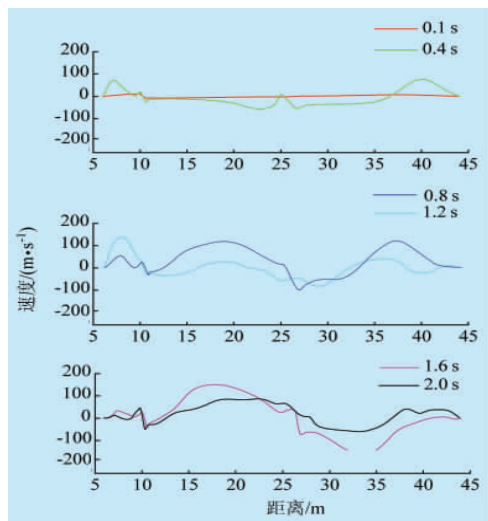


图4 不同时刻与泄漏口齐平方向 x -速度
随距离变化曲线

Fig. 4 x -speed with leakage vent in the same direction with distance at different time

由图5分析可知,在初始时刻(0.1 s)内,与泄漏口齐平方向上,CO的浓度分布比较集中,主要集中在泄漏口上;随着泄漏时间的推移(0.4~0.8 s),由于转炉的存在,泄漏口上风处比下风向的CO浓度显著提高。究其原因,其一自然风在通过障碍物时发生绕流,推动泄漏口竖直方向上的CO向下运动,提高了上风处的浓度;其二在自然风的作用下,下风处的CO还会进一步朝 x 正方向运动。两个原因的叠加作用,上风处的CO浓度明显高于下风处。进一步随时间发展(0.8~2.0 s),上风处的CO浓度变化不大,趋于稳定,但下风处除CO浓度在自然通风状态下呈波动形式往下风口运动。

2.2 监测点CO浓度随时间的变化

以泄漏口为圆心,半径为2 m的圆上均匀分布8个监测点,如图1所示,监测点上的CO浓度随时间变化规律如图6所示。

图7是距离地面1.5 m高度的6个监测点CO浓度随时间变化过程,其具体位置见图1。这6个监测点上的瞬时CO浓度变化趋势是一致的。在CO泄漏过程中,其是一个增长过

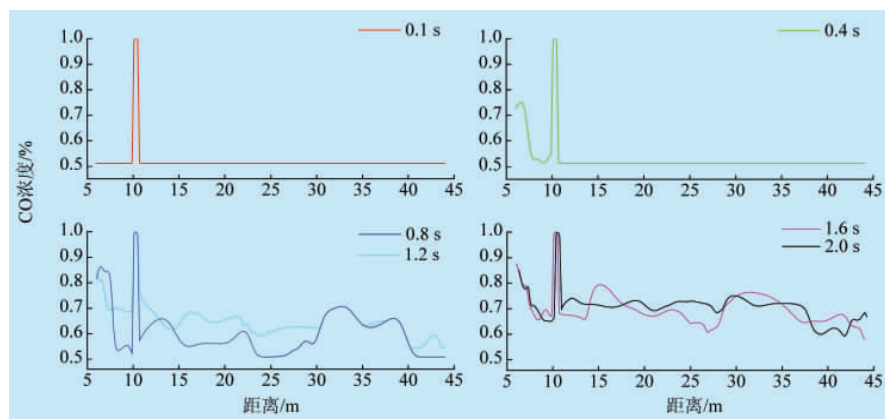


图5 不同时刻与泄漏口齐平方向CO浓度随距离变化曲线

Fig. 5 CO concentration with leakage vent in the same direction with distance at different time

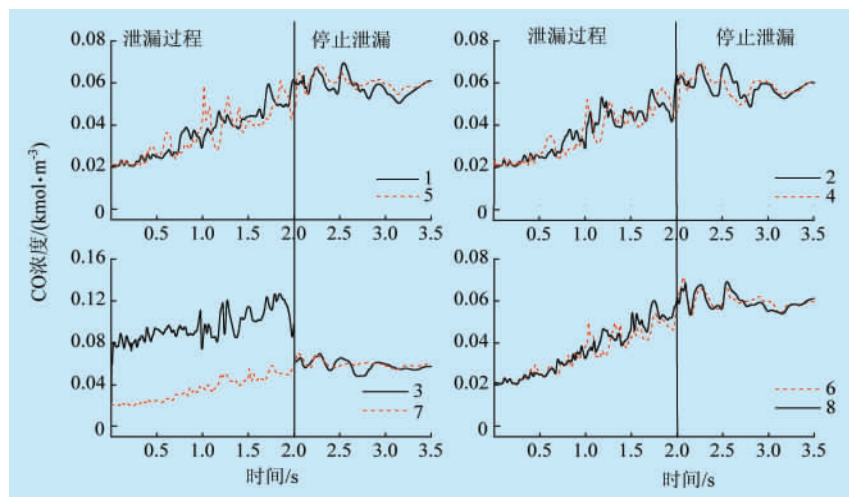


图6 与泄漏口齐平的8个监测点上的CO浓度随时间的变化

Fig. 6 CO concentration on 8 monitoring points with leakage vent in the same direction with time

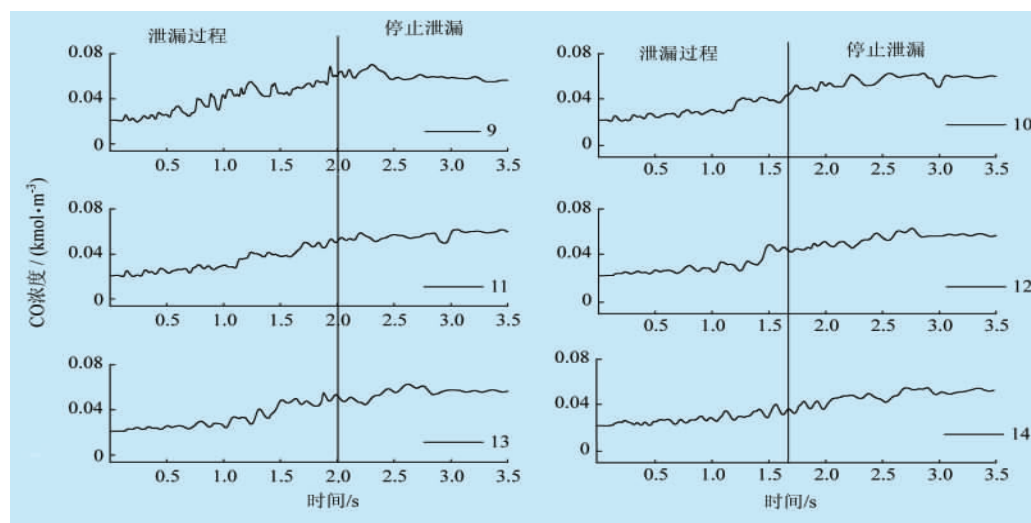


图 7 距离地面 1.5 m 处 6 个监测点上的 CO 浓度随时间变化的关系

Fig. 7 CO concentration on 6 monitoring points in the same level 1.5 m from the ground with time

程;泄露停止后,由于自然风速比较低,不利于 CO 的扩散,所以各监测点处的 CO 浓度变化不大(图 7)。

3 结论

1) 在泄漏初始时刻,整个压力场和速度场是比较平缓的,随着时间的推移,CO 的大量泄漏,引起了泄漏口周围压力和速度场的变化,以波动的形式将这种扰动向前传播。

2) 在初始时刻内,与泄漏口齐平方向上,CO 的浓度分布比较集中,主要集中在泄漏口上;随着泄漏时间的推移(0.4~0.8 s),由于转炉的存在,泄漏口上风处比下风向的 CO 浓度显著得到提高。

3) 在停止泄漏后的一段时间内,其 CO 浓度并没有很快降低,而是一个平缓的发展过程。在自然通风条件下,流场内各点处 CO 浓度随时间的变化过程,在自然通风状态下,即使是像武汉钢铁厂这样的大车间,车间 CO 浓度不能得到有效稀释,并且易于聚集,1.5 m 高度为人群呼吸带,因此依靠自然通风不能解决煤气扩散问题,需要采取机械通风来稀释 CO 浓度,以保障人的安全。

致谢 感谢吴后兵、朱春梅、刘召平对本研究的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Ermak D L, Chan S T, Morgan D L, et al. A comparison of dense gas dispersion model simulations with Burro series LNG spill test results[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1982, 76(6): 129-160.
- [2] Hanna S R, Strimaitis D G, Chang J C. Report prepared by sigma research corporation for AFESC[R]. Washington DC, 1990: 1-324.
- [3] 魏利军. 重气扩散的数值模拟[J]. *中国安全科学学报*, 2000, 10(2): 26-34. Wei Lijun. *Journal of Safety Science and Technology*, 2000, 10(2): 26-34.
- [4] 潘旭海, 蒋军成. 危险性物质泄漏事故扩散过程模拟分析 [J]. *中国职业安全卫生管理体系认证*, 2001(3): 44-46. Pan Xuhai, Jiang Juncheng. *China Occupational Safety and Health*

Management System Certification, 2001(3): 44-46.

- [5] 赵振东, 余世舟. 地震次生毒气泄漏与扩散的数值模拟与动态仿真[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(5): 137-142. Zhao Zhendong, Yu Shizhou. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(5): 137-142.
- [6] 邵辉, 施志荣. 化工重大泄漏事故扩散过程的模拟研究 [J]. *江苏工业学院学报*, 2006, 18(2): 26-29. Shao Hui, Shi Zhirong. *Journal of Jiangsu Polytechnic University*, 2006, 18(2): 26-29.
- [7] Wang T, Hutchinson T C. gas leakage rate through reinforced concrete shear walls: Numerical study[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, 235(21): 2246-2260.
- [8] 刘海群, 孟宪林. 哈尔滨市某化工厂毒气泄漏危害预测 [J]. *黑龙江气象*, 1996, 15(4): 26-29. Liu Haiqun, Meng Xianlin. *Heilongjiang Meteorology*, 1996, 15(4): 26-29.
- [9] 马存栋. 高压天然气管道破裂气体扩散规律模拟结果分析[J]. *油气田地面工程*, 2005, 24(3): 8-10. Ma Cundong. *Oil-gasfield Surface Engineering*, 2005, 24(3): 8-10.
- [10] 梁栋, 张海英. 建筑环境中有害气体扩散及分布的分析[J]. *广州大学学报: 自然科学版*, 2004, 3(4): 338-341. Liang Dong, Zhang Haiying. *Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition*, 2004, 3(4): 338-341.
- [11] 孟志鹏, 王淑兰. 可燃性气体泄漏扩散时均湍流场的数值模拟[J]. *安全与环境学报*, 2003, 3(3): 25-28. Meng Zhipeng, Wang Shulan. *Journal of Safety and Environment*, 2003, 3(3): 25-28.
- [12] 潘旭海, 蒋军成. 重气云团瞬时泄漏扩散的数值模拟研究[J]. *化学工程*, 2003, 31(1): 35-39. Pan Xuhai, Jiang Juncheng. *Chemical Engineering*, 2003, 31(1): 35-39.
- [13] Blackmore D R, Herman M N, Woodward J L. Heavy gas dispersion models[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1982, 6: 107-128.
- [14] 许雅娟, 罗挺. FLUENT 用于大气污染扩散的数值模拟 [J]. *后勤工程学院学报*, 2005, 21(2): 23-31. Xu Yajuan, Luo Ting. *Journal of Logistical Engineering University*, 2005, 21(2): 23-31.

(责任编辑 吴晓丽)