

含硫化氢天然气井井喷事故后果数值模拟

穆 剑¹, 钱新明²

1. 中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司, 北京 100007
2. 北京理工大学; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

摘要 井喷事故后果严重, 特别是当井喷物质中含有 H_2S 等有毒气体时, 会造成重大的人员伤亡和财产损失, 研究含 H_2S 天然气井喷气体的扩散蔓延规律具有重要的应用价值。本文建立了含 H_2S 天然气井井喷事故模型, 对含 H_2S 天然气井井喷事故进行了数值模拟计算, 模拟得到含 H_2S 天然气井井喷事故中, 井喷气体的速度及浓度场的分布情况。数值模拟结果表明井喷气体符合气体射流规律, 并可以数值模拟结果为依据进行井喷事故发生后危险区域的划分。

关键词 硫化氢; 天然气; 井喷; 数值模拟

中图分类号 TE38

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)12-0095-04

Numerical Simulation of the Blowout Accident in a Sour Gas Well

MU Jian¹, QIAN Xinming²

1. Exploration and Production Company, PetroChina Company Limited, Beijing 100007, China
2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology; Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The blowout accident of a natural gas well, especially, one involving poison gases such as H_2S , could lead to serious consequences including casualty and property loss, and the diffusion of the sour gas from the well blowout is of great importance in the process. In this paper, a blowout accident model of sour gas well is built to simulate the blowing process. The velocity and the concentration distribution of the sour gas in the blowout accident are obtained from the numerical simulation. The velocity distribution of the blowout gas is symmetric when the gas flow is stable in air. The max velocity of the sour gas in the blowout is 875m/s in the simulation space. The safety threshold of the mass fraction of CH_4 is 0.0277, and that of H_2S is 7.722×10^{-6} . The results of the simulation show that the gas blowing from well follows the law of gas jet. The safety area is the zone 100m away from the outlet of blowout well, and the danger zone is around the well because of the higher density of H_2S , furthermore, the dangerous zone could be identified after blowout accident based on the simulation results.

Keywords sulfureted hydrogen; natural gas; well blowout; numerical simulation

0 引言

在天然气的开采过程中,存在着气体泄漏、火灾爆炸、井喷等各种风险。其中,井喷事故后果严重,特别是当井喷物质中含有 H_2S 等有毒气体时,常造成重大的人员伤亡,对周围设备、环境等也会造成极大伤害^[1-2]。20 世纪 80 年代之前,由于中国钻井技术水平低、设备性能差,井喷事故经常发生,据统计,新中国成立以来先后发生过千余起井喷事故。1957—

1981 年间,四川盆地发生严重井喷失控、着火事故达 48 起,烧毁钻机 18 台,伤亡 158 人,废井 14 口。80 年代以后,随着钻井技术的开发应用,中国在井喷事故预防方面有很大的进步,但由于各方面原因,井喷事故仍时有发生^[3]。2003 年 12 月 23 日,川东北气矿罗家 16H 天然气井发生含 H_2S 天然气井喷事故,大量含有 H_2S 的天然气喷涌而出,造成 243 人死亡,10175 人不同程度中毒,近 10 万群众被紧急疏散,直接经济

收稿日期: 2010-05-10

作者简介: 穆剑,高级工程师,研究方向为石油天然气勘探、开发及其安全管理,电子信箱: mujian@petrochina.com.cn

损失达 6432.31 万元。因此,对含 H_2S 天然气田井喷的危险性及应急技术进行研究是十分必要的^[4-6]。本文拟以含 H_2S 天然气井喷事故中 H_2S 和天然气混合气扩散规律为基础,利用计算流体力学方法对含 H_2S 天然气井喷事故过程进行数值模拟,并给出井喷气体流场分布,模拟结果可进一步说明井喷事故的原因和致灾机制,同时也为计算井喷发生后大范围 H_2S 致死区的可能性和严重性提供基础数据,对预测可能发生的事故类型及后果、编制应急预案、采取应急措施并最终减少事故伤亡和损失具有一定的现实意义^[7-8]。

1 模型的建立

1.1 数学模型

流体流动遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒三大基本定律。在气体扩散过程中,还遵守气体组分质量守恒定律。

1) 质量守恒方程

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

2) 动量守恒方程

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

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i}k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j h_j J_j + u_j(\tau_{ij})_{eff} + S_h \quad (3)$$

式中, ρ 为密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u 为速度, m/s ; S_m 为源项; p 为静压, Pa ; τ_{ij} 为应力张量; ρg_i 、 F_i 为重力体积力和其他体积力(如源于两相之间的作用), N ; k_{eff} 为有效导热系数; h 为焓, J/mol ; J_j 为组分 j 的扩散通量; S_h 为包括化学反应热和其他体积热源的源项; $E = h - p/\rho + u_i^2/2$ 。

4) $k-\varepsilon$ 湍流方程

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt}(\rho k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{D}{Dt}(\rho \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, k 为湍动能; ε 为耗散率; μ 为动力黏度; μ_t 为湍流黏性系数; 湍动能 k 与耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 σ_k 和 σ_ε ; G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能; $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 均为参考系数。

5) 组分质量守恒方程

危险气体的扩散体系中至少存在两种或两种以上的组分,各组分分别遵守质量守恒定律。对一个确定的系统而言,组分质量守恒定律可表述为:系统内某种化学组分质量对时间的变化率,等于通过系统界面净扩散流量与通过化学反应产生的该组分的生产率之和。根据组分质量守恒定律,组分 s 的组分质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_s) + \text{div}(\rho u c_s) = \text{div}[D_s \text{grad}(\rho c_s)] + S_s \quad (5)$$

式中, c_s 为组分 s 的体积浓度, mol/L ; ρc_s 为该组分的质量浓度, g/L ; D_s 为该组分的扩散系数; 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,即生产率, $kg/(m^3 \cdot s)$ 。

1.2 几何模型和边界条件

本文以重庆开县境内川东北气矿罗家 16H 天然气井为数值模拟对象,其天然气埋藏压力为 40.45MPa,设计井深 4322m,垂深 3410m,水平段长 700m。井喷发生时,采用放喷管线放喷,井口内部压力大约 9.25MPa,即天然气井井喷前的井口压力 $P_0=9.25MPa$ ^[9]。

假设无风条件下,井喷可视作三维的轴对称紊动射流,可简化为二维问题进行数值计算。数值模拟计算中设计模拟区域高 500m,长 2000m。井喷口为直径为 0.44m 的圆形断面。物理模型及边界条件选取如图 1 所示,采用结构化不均匀法^[10]对模拟计算区域进行网格划分,如图 2 所示。

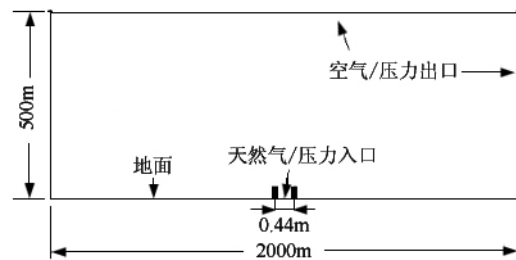


图 1 井喷场景几何模型及边界条件示意图

Fig. 1 Blowout accident model and boundary conditions

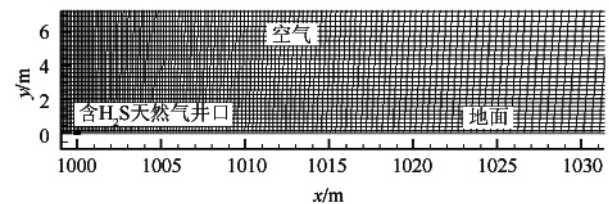


图 2 井喷井口附近网格图

Fig. 2 Grid near the natural gas well

数值模拟计算中设定井喷天然气中仅含 CH_4 和 H_2S 两种气体, H_2S (即 151mg/L)取重庆开县境内的川东北气矿为例进行计算。其 H_2S 体积百分数为 10%, 质量百分数为 19%。 CH_4 体积百分数为 90%, 质量百分数为 81%。

2 模拟结果及分析

2.1 井喷气体速度场分布

数值模拟计算得到含 H_2S 天然气井喷事故后井喷气体流场分布情况。天然气井喷射流在井口附近的速度分布如图 3 所示,整体的速度分布如图 4 所示。由图 3 和图 4,井喷天然气在整个计算空间中的速度最大值为 875m/s,出现在井口附近区域。同一截面上中心处的流速最大,离中心线越远气体

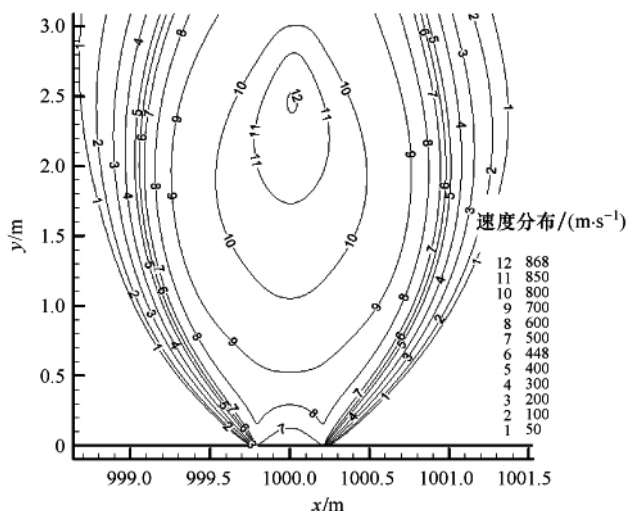


图3 井口气体速度场分布
Fig. 3 Velocity distribution of gas near well

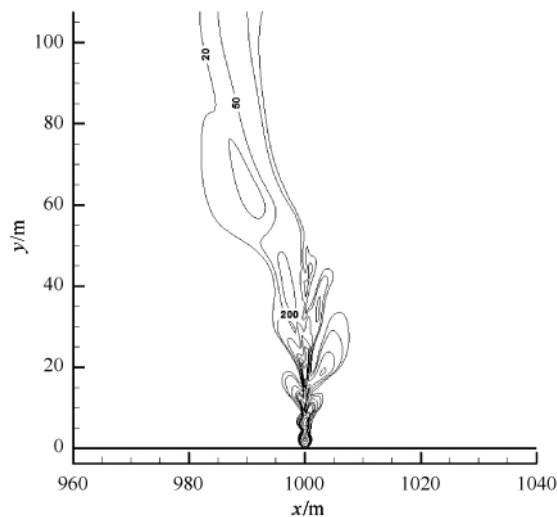


图4 井喷气体速度场全局分布 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Fig. 4 Overall velocity distribution of gas

流速越小。随着井喷气流向上流动,其中心线上的流速逐渐减小,气柱宽度逐渐增大。同时,流场中的轴向分速度要比横向分速度大很多,故射流分析计算中,一般可将流场的横向分速度忽略,射流的轴向速度即视为射流的总速度。

另外,井喷射流在其流动过程中,不同截面上的气流参数分布彼此间保持一种相仿关系,即射流的自似性。自似性的出现是因为射流与周围介质的混合呈线性渐进性,且在射流各截面上,射流与周围介质的混合长度与射流宽度成正比,反映在速度分布图上就是边界层的外边界一般为斜直线。

2.2 井喷气体浓度场分布

甲烷(CH_4)气体的危险性在于其燃烧爆炸特性。 CH_4 在空气中的爆炸下限体积百分数为5%,为便于进行模拟,将其转

换为质量浓度,即 $0.03585\text{kg}/\text{m}^3$,在此浓度以下, CH_4 不具有燃烧爆炸危险性。硫化氢(H_2S)的危险性主要体现为毒性。 H_2S 对人体安全的质量浓度的安全阈值是 $10^{-5}\text{kg}/\text{m}^3$ 。也就是说,井喷后,空气中 CH_4 浓度应小于 $0.03585\text{kg}/\text{m}^3$,同时 H_2S 的浓度应小于 $10^{-5}\text{kg}/\text{m}^3$ 才是安全的。经过换算,在空气中 CH_4 安全阈值的质量分数是0.0277, H_2S 安全阈值的质量分数是 7.722×10^{-6} 。

含 H_2S 天然气井喷事故后, H_2S 、 CH_4 浓度场分布情况如图5和图6所示, CH_4 安全阈值等值线(0.0277;质量分数形式)以外区域,与 H_2S 安全阈值等值线(7.722×10^{-6} ;质量分数形式)以外区域的交集部分为安全区域,约是井口周围100m外的区域。需要说明的是,这里安全区域计算是在无风条件且井喷瞬时稳态假设下的计算,尚未考虑有风的情况。

比较图5和图6,还可以发现相对 CH_4 而言,在井口附近, H_2S 的危险区域更接近地面。这是因为 H_2S 的密度大于空气,而 CH_4 空气密度小于空气。在扩散一定时间以后, H_2S 分子由于重力作用将沉降下来,导致地面附近 H_2S 的积聚和浓度增高,这一区域属于高危险区域。

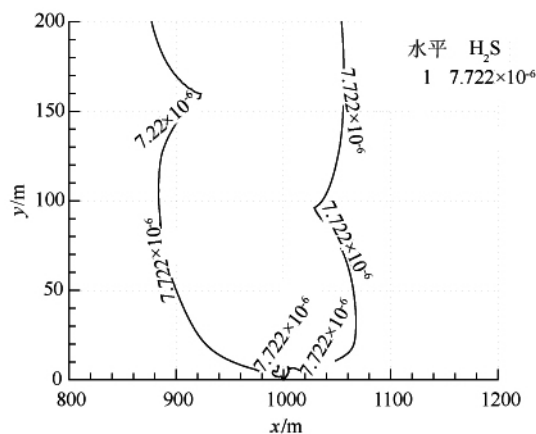


图5 H_2S 安全阈值等值线
Fig. 5 Contour line of H_2S safety threshold

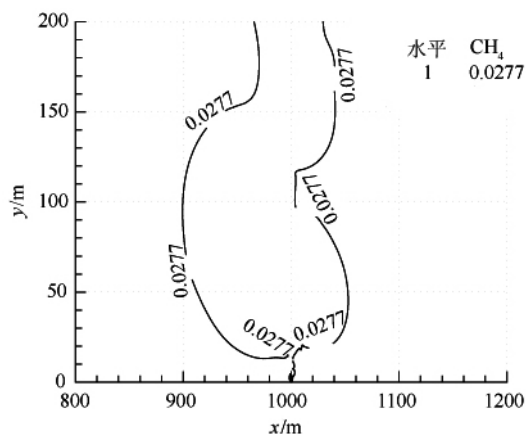


图6 CH_4 安全阈值等值线
Fig. 6 Contour line of CH_4 safety threshold

井口位置 H_2S 浓度场分布情况如图 7 所示。由图可知, H_2S 的浓度等值线基本上沿中心线成对称分布, 这一现象也证明了湍流标度率的存在, 即湍流在雷诺数很大的时候, 出现宏观对称性。其次, 从喷口开始向外的空间里, H_2S 浓度依次逐渐降低, 直至空气中的 H_2S 浓度降至安全值以下。

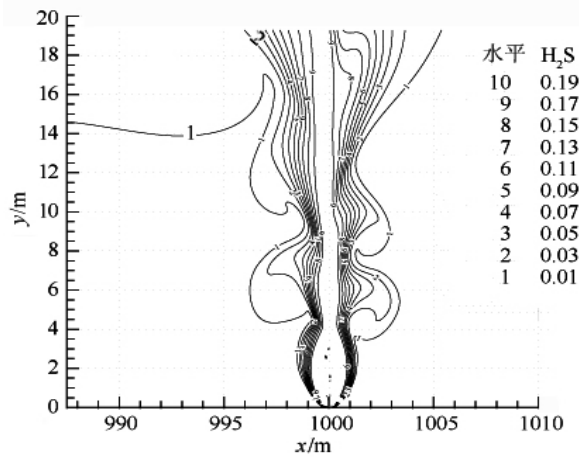


图 7 H_2S 局部质量分数

Fig. 7 Partial concentration distribution of H_2S

3 结论

1) 建立了含 H_2S 天然气井井喷事故数值模拟数学模型和几何模型, 通过数值模拟计算, 得到了含 H_2S 天然气井井喷事故后气流速度场及 CH_4 、 H_2S 浓度场分布情况, 对数值模拟结果进行的分析表明含 H_2S 天然气井喷气体在井口以射流形式涌出, 其轴向速度远大于横向速度, 气体喷射满足喷射流动的自似性规律。由于压能、内能转化为动能, 井喷流速度从井口的临界速度增大到一个最大值, 然后再持续变小。在大气中自由扩散稳定后, 井喷气体速度分布基本对称。

2) 含 H_2S 天然气井喷气体从井口喷射而出, 并向四周扩散, 其浓度值在井口处最大, 进入大气以后浓度逐渐降低, 渐渐与大气参数平衡, 与空气稀释到基本无毒。但井口附近区域由于 H_2S 的高密度, 导致距离井口数百米的接近地面处 H_2S 浓度很高, 属于高危险区域。

3) 含 H_2S 天然气井喷事故会导致重大的人员伤亡和财产损失, 对其进行深入细致的研究十分必要。使用数值模拟的方法对井喷事故后危险气体的扩散蔓延规律进行研究, 可为灾区应急救援的开展和人员疏散范围的确定提供有效的指导意见。在今后的工作中, 对不同气象及地形条件下, 井喷气体扩散蔓延规律的研究将是重点。同时, 在事故发生后, 如何科学有效合理地组织人员撤离和事故救援活动也将是一个具有重要现实意义的研究方向。

参考文献 (References)

[1] 胡世明, 张政, 吴宗之. 危险物质意外泄漏的重气扩散数学模拟[J]. 劳动保护科学技术, 2000, 20(2): 31-36.

Hu Shiming, Zhang Zheng, Wu Zongzhi. *Science and Technology of Labour Protection*, 2000, 20(2): 31-36.

[2] 席学军, 邓云峰. 井喷 H_2S 扩散分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 3(4): 20-24.

Xi Xuejun, Deng Yunfeng. *Journal of Safety Science & Technology*, 2007, 3(4): 20-24.

[3] 谢传欣, 叶从胜, 黄飞. 国内外井喷事故回顾 [J]. 安全、健康和环境, 2004, 4(2): 9-19.

Xie Chuanxin, Ye Congsheng, Huang Fei. *Safety, Health & Environment*, 2004, 4(2): 9-19.

[4] 吴宗之, 高进东, 魏利军. 危险评价方法及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 176-177.

Wu Zongzhi, Gao Jindong, Wei Lijun. *Risk assessment method and application*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004: 176-177.

[5] 邱奎, 庞晓虹, 刘定东. 高含硫天然气井喷的扩散范围估计与防范对策[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(2): 114-118.

Qiu Kui, Pang Xiaohong, Liu Dingdong. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(2): 114-118.

[6] 魏利军. 重气扩散的数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学化学工程学院, 2000.

Wei Lijun. *Numerical simulation of heavy gas diffusion* [D]. Beijing: School of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, 2000.

[7] 孟志鹏, 王淑兰, 丁信伟. 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, Ding Xinwei. *Journal of Safety and Environment*, 2003, 3(3): 25-28.

[8] 李继兵. 有害气体运输过程中泄漏扩散的模拟与分析 [D]. 成都: 西南交通大学经济管理学院, 2006.

Li Jibing. *Numerical simulation and analysis of hazardous gas diffusion leaking during transportation* [D]. Chengdu: School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, 2006.

[9] 姜传胜, 邓云峰, 席学军. 高含硫气井周边居民疏散安全分析方法[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(9): 9-13.

Jiang Chuansheng, Deng Yunfeng, Xi Xuejun. *China Safety Science Journal*, 2009, 17(9): 9-13.

[10] 徐龙君, 吴江, 李红强. 重庆开县井喷事故的环境影响分析 [J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(5): 84-87.

Xu Longjun, Wu Jiang, Li Hongqiang. *China Safety Science Journal*, 2005, 15(5): 84-87.

(责任编辑 代丽)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在研读相当数量文献资料的基础上, 全面、深入、系统地论述某一方面的问题, 并对所综述的内容进行归纳、分析、评价, 以反映作者的观点和见解。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址: www.kjdb.org; 投稿邮箱: kjdbjb@cast.org.cn。