



含硫气井定量风险分析方法

吴庆善^{1,2}, 钱新明¹, 郭再富³, 黄平¹

1. 北京理工大学; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081
2. 中国石油天然气集团公司安全环保部, 北京 100007
3. 中国安全生产科学研究院公共安全研究所, 北京 100029

摘要 随中国经济对石油天然气能源依赖程度的加深, 大力开发含硫化氢气田成为重要任务, 而定量评价含硫气井的风险显得更加必要和迫切。提出了含硫气井井喷事故硫化氢泄漏扩散过程中个人风险定量计算方法, 根据相关统计资料, 提出了井喷事故概率的参考值, 将该方法应用于川渝地区某含硫气井, 获取了该井周边区域个人风险等值线, 并与可接受风险水平进行对比分析。结果表明, 由于地形条件的影响, 在气井周边不同方向的个人风险水平差异很大, 可接受风险水平上限值等值线距井口的距离在不同方位上相差可达 1 000 m, 在对气井进行定量风险分析时必须充分加以考虑。该方法可为油气田开发企业、安全监管部门对含硫气井开发过程实施定量风险评价和管理提供有效技术手段, 并为应急计划区的划分及边界确定提供参考。

关键词 含硫气井; 定量风险分析; 井喷事故概率; 地形条件

中图分类号 TE99

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)22-0072-04

Quantitative Risk Assessment for Natural Gas Well with Hydrogen Sulfide

WU Qingshan^{1,2}, QIAN Xinming¹, GUO Zaifu³, HUANG Ping¹

1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology; Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Department of HSE, China National Petroleum Corporation, Beijing 100007, China
3. Institute of Public Safety, China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100029, China

Abstract With the heavy dependence of domestic economy on oil and gas, the exploitation of natural gas fields with hydrogen sulfide is an urgent project in China. The quantitative risk assessment for natural gas wells with hydrogen sulfide is a necessary and impending requirement. A quantitative calculation method for an individual risk for leakage and dispersion process of hydrogen sulfide in blowout of gas wells is proposed in this paper. Based on

the statistical analysis of data in literature, the probability of blowout incident is brought forward for reference. The method is applied to a typical gas well in Sichuan and Chongqing district as a practical example. The contour curves of individual risks in the area around the well are obtained, and compared with the acceptable level of the individual risks. The results show that the topographic conditions of the gas well greatly influence the calculation results of the individual risks, the distance between the upper limit isoline of acceptable risk and the well in different directions can reach 1 000 m. So it must be fully considered when performing the quantitative risk assessment of gas wells. This method offers an effective technical measure for administration departments and enterprises to conduct quantitative risk assessments and risk managements during the exploitation process of natural gas fields with hydrogen sulfide. The method can be used in dividing emergency planning zones and deciding the boundary for natural gas wells with hydrogen sulfide.

Keywords natural gas well with hydrogen sulfide; quantitative risk assessment; probability of blowout; topographic condition

0 引言

随着中国经济对石油天然气能源依赖程度的加深, 大规模投入开发含硫化氢天然气田成为迫切任务。近年来, 中国

收稿日期: 2009-11-03

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAK22B05, 2008BAB37B05)

作者简介: 吴庆善(中国科协所属全国学会个人会员登记号 E520000997L), 博士研究生, 研究方向为油气田勘探开发安全研究与管理, 电子信箱: qswu@petrochina.com.cn; 钱新明(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E520001513L), 教授, 研究方向为系统安全分析与安全评价技术、危险物质安全性分析与检测技术, 电子信箱: qsemon@bit.edu.cn



含硫气田勘探开发的安全生产形势严峻,如 2003 年“12·23”井喷事故造成 243 人死亡,疏散群众 6 万余人,直接经济损失 9 262.7 万元;2006 年“3·25”井漏事故导致周边群众 1 万余人疏散。这些事故造成的严重后果直接反映出事故前未对含硫天然气井周边区域公众所处风险水平进行定量分析并采取应对措施,而目前国内外在重大危险源定量风险评价的事故概率及后果分析方面取得了很多研究成果^[1]。事故概率分析的方法主要包括统计分析方法、事故树分析方法,事故后果模拟分析方法也从简单的经验模型逐步发展到三维流体力学模型,但具体到含硫气井井喷事故定量风险分析方面的研究却并不多见。本研究探讨含硫气井的个人风险定量计算方法,并选取川渝地区的某含硫气井进行应用。

1 含硫气井个人风险计算方法

定量风险分析方法采用个人风险值、社会风险值等定量化风险值,对系统的危险性进行描述,本研究主要探讨个人风险的计算方法。个人风险是指在某一特定位置长期生活的、未采取任何防护措施的人员遭受特定危害的频率,是社会可接受风险的最小单元。针对含硫气田,个人风险是指不同危险源在区域内某一固定位置人员发生个体死亡的概率,也即单位时间内(通常为年)的死亡率。个人风险体现为区域地理图上的风险等值线。个人风险是空间位置坐标的函数,在区域的地图上,将个人风险值相等的点连接起来,就构成不同水平个人风险值的等值线。个人风险值给出了给定条件下位置的风险信息,而不考虑此处是否存在人员。因此,个人风险不是针对具体人员,而是针对装置/设施以外某一被计算的具体位置。个人风险关注的是点,结合不同水平的个人风险等值线和不同功能区(如工业区、商业区、居民区、医院等)的风险承受标准进行风险决策,通常针对某一需要保护的具体目标。

个人风险的计算方法为

个人风险=频率×事故后果

对于含硫气井井喷时的个人风险而言,通常采用 RWDI 工程咨询公司研究提出的公式,个人风险由事故概率、点火概率、气象条件概率、风角度概率、受体暴露概率、某位置受体致死概率等决定^[2]:

$$R_{L_{\text{井}}}(x,y)=F_{\text{H}}P_{\text{L}}P_{\text{M}}P_{\text{am}}(x,y)P_{\text{R}}P_{\text{L}_{\text{井}}}(x,y) \quad (1)$$

式中, F_{H} 为井喷事故概率, P_{L} 为点火概率, P_{M} 为气象条件概率, $P_{\text{am}}(x,y)$ 为风角度概率, P_{R} 为受体暴露概率, $P_{\text{L}_{\text{井}}}(x,y)$ 为某位置受体致死概率。本研究中假设井喷失控后 15 min 点火且人员充分暴露在大气环境中,因此将点火概率及某位置受体暴露概率均设为 1。气象条件概率和风角度概率根据当地实际气象资料确定,而井喷事故概率和受体致死概率需进一步分析。需说明的是,研究中主要考虑硫化氢扩散对公众造成的大范围毒性危害,不考虑火灾、爆炸等影响范围较小的事故后果。

2 井喷事故概率分析

对井喷事故概率,主要采用数值统计、故障树分析 2 种方式分析研究。由于故障树分析还需要井口不同设备的基础数据,因此,本研究建议采用数值统计方法来分析井喷事故概率。数值统计的方法通常建立在泊松分布、二项式分布等分布假设规律上,通过历史事故数据的回归分析,从回归方程可得某年的井喷失控事故概率。

中国报道和研究井喷的总体数据较少,收集到的井喷文献资料往往也只是基于某个单井的数据,总体数据尚不清楚。国外 20 世纪后期井喷统计数据较多,而近年公开发表的数据较少,Rezaei 等^[3]提出针对所研究的酸气井,垂直敞喷发生的概率是 4.9×10^{-4} 次/a,加拿大阿尔伯塔省能源资源保护委员会(ERCB)钻井事故统计数据及能源与公用事业局(EUB)井喷统计资料等^[2]见表 1 和表 2。综合以上研究成果,在国内数据暂缺的情况下,本研究建议的井喷事故概率参考值为 4.5×10^{-4} 次/a。

表 1 加拿大 ERCB 钻井事故统计
 Table 1 Statistics of drilling incidents by ERCB of Canada

事故类型	事故数/钻井数
溢流	3.48×10^{-2}
井涌	1.07×10^{-3}
井喷	4.53×10^{-4}

表 2 加拿大 EUB 钻井事故统计
 Table 2 Statistics of drilling incidents by EUB of Canada

年份	钻井数	溢流事故数	井喷事故数	事故数/钻井数
1996	10 396	215	5	4.8×10^{-4}
1997	13 212	184	2	1.5×10^{-4}
1998	7 094	99	9	12.7×10^{-4}

3 可接受风险水平

个人风险可接受水平是针对需要保护的具体目标而提出的。通常依据最低合理可行原则(As Low As Reasonable Practicable,ALARP)给出可容许风险的上限和下限值^[4],ALARP 原则将风险分为不可接受区、合理可行的最低限度区、广泛接受区 3 个区域(图 1)。若风险评估值在不可接受区,必须采取强制性措施减少风险。在广泛接受区,风险处于很低的水平,完全可以接受,可不采用任何风险减少措施。在合理可行的最低限度区,则需要在可能的情况下尽量减少风险,即对各种风险处理措施方案进行成本效益分析等,以决定是否采取这些措施。ALARP 原则包含可接受风险水平线、可忽略风险水平线 2 个风险分界线。国外根据自身实际情况对这两条风险线进行了研究,提出了不同的风险容许标准,

国外一般事件的平均个体风险统计资料表明^[5],如相对于汽车等意外事故的死亡风险而言, $1\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-6}$ 次/a的基准是合理的可接受风险。

国际上常见的厂界外个人风险可接受水平如表 3 所示。

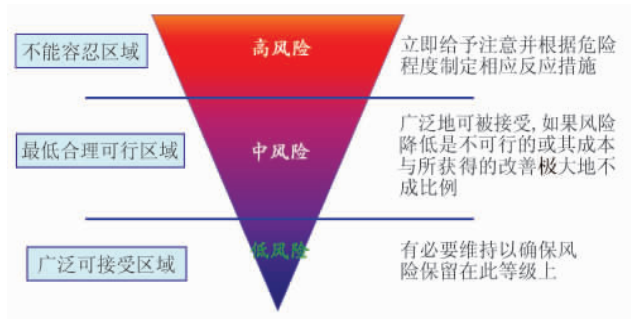


图 1 ALARP 原则
Fig. 1 Principle of ALARP

表 3 厂界外个人风险标准
Table 3 Criteria of individual risk for outside of factory

机构和应用	最大容许风险/a ⁻¹	可忽视风险/a ⁻¹
荷兰(新建设施)	1×10^{-6}	1×10^{-8}
荷兰(已建设施或结合新建设施)	1×10^{-5}	1×10^{-8}
英国(已建危险工业)	1×10^{-4}	1×10^{-6}
英国(新建核能发电厂)	1×10^{-5}	1×10^{-6}
英国(新建危险性物品运输)	1×10^{-4}	1×10^{-6}
英国(靠近已建设施的新民宅)	3×10^{-6}	3×10^{-7}
中国香港(新建和已建设施)	1×10^{-5}	—
新加坡(新建和已建设施)	5×10^{-5}	1×10^{-6}
马来西亚(新建和已建设施)	1×10^{-5}	1×10^{-6}
文莱(已建设施)	1×10^{-4}	1×10^{-6}
文莱(新建设施)	1×10^{-5}	1×10^{-7}
澳大利亚西部(新建设施)	1×10^{-6}	—
美国加利福尼亚(新建设施)	1×10^{-5}	1×10^{-7}

4 定量风险计算实例

4.1 工况选取

计算选取的川渝地区某含硫气井位于半山腰处,背靠海拔 1 230 m 的山峰,山顶和山谷的最大落差为 876 m。通过追踪该井地形等高线的轨迹,得出地形矢量图并进行不规则网格处理,通过差值计算,可以得到数字高程模型用于数值模拟。

气象条件主要根据当地气象统计数据选取 8 个风向,风速条件分别为 0.5、1.0 和 3.0 m/s,大气稳定度 F。其中 3 m/s 为计算的最大风速,若大于此风速,则计算过程中应考虑的大气逆温层将不存在;1.0 m/s 为当地常年平均风速,0.5 m/s

为流体动力学计算过程中通常采用的接近静风条件的最小风速。

泄漏流量选取该井无阻流量最大的层位进行计算^[6],即最不利情况下单井最大井喷流量为 438.5×10^4 m³/d。泄漏时间为井喷发生后 15 min,为标准中规定的含硫气井失控井口点火时间^[7],即认为点火后井口泄漏出的硫化氢气体不再参与扩散过程。

4.2 计算结果

图 2 为该井距地面 1 m 高处 8 个风向的硫化氢扩散浓度场瞬时分布典型结果。

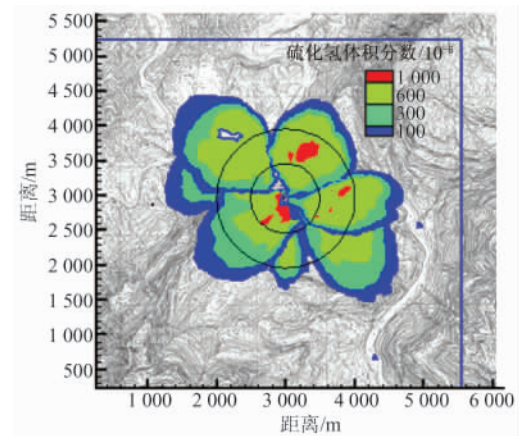


图 2 硫化氢浓度场计算结果(风速 1.0 m/s、30 min)
Fig. 2 Calculated concentration field of hydrogen sulfide (wind speed 1.0 m/s, 30 min)

受体致死概率的详细分析见文献 [8],综合井喷事故概率、受体致死概率及风向概率的计算分析结果,求得该气井周边区域的个人风险等值线(图 3)。可以看出,由于地形条件的影响,在气井周边不同方向的风险水平差异很大, 10^{-5} 等值线范围距井口最远处约 1.5 km,最近处约 550 m,相差可达 1 000 m,应采用此方法确定风险分布后对气井周边区域进行有针对性的安全规划及应急准备。

参考国外通常采用的个人风险允许标准,设定个人风险可接受水平的上限值为 10^{-5} 次/a,下限值为 10^{-7} 次/a。图 3 中

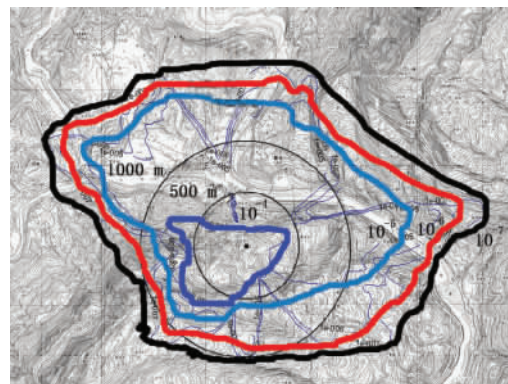


图 3 个人风险等值线
Fig. 3 Contour curves of individual risk

10^{-5} 等值线范围内必须采取技术及管理措施,如点火、疏散、避难、个体防护、警报等,以降低风险,保护公众安全; $10^{-5}\sim 10^{-7}$ 等值线范围内应尽量采取技术及管理措施保护公众安全。

5 结论

提出了含硫气井井喷事故硫化氢泄漏扩散过程个人风险定量计算方法,分析了井喷事故概率等关键参数,并针对川渝地区某含硫气井进行了应用。结果表明,中国含硫气井通常所处的山区地形条件对硫化氢浓度场及定量风险计算结果影响很大,在对气井进行安全规划及应急准备前应加以考虑。

参考文献 (References)

- [1] 中国安全生产科学研究院. “十五”国家科技攻关计划“城市重大工业危险源评价与监测关键技术研究”专题总结报告[R]. 北京: 中国安全生产科学研究院, 2006.
China Academy of Safety Science and Technology. The 10th National Key Technologies R & D Program of China "Research on key technologies of evaluation and monitoring of urban major industrial hazard installations" subject concluding report [R]. Beijing: China Academy of Safety Science and Technology, 2006.
- [2] Dowsett I, Holizki L. Public safety considerations near critical sour gas facilities[R]. Beijing: RWDI West Inc, 2004.
- [3] Rezaei C, Al Mehairy M M K, Al Marzooqi A, et al. Health, safety and

environment impact assessment for onshore sour gas wells [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 30 September–3 October 2001: 71439–MS.

- [4] 丁厚成, 万成略. 风险评价标准值初探 [J]. 工业安全与环保, 2004, 30 (10): 45–47.
Ding Houcheng, Wan Chenglue. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2004, 30(10): 45–47.
- [5] 高建明, 王喜奎, 曾明荣. 个人风险和社会风险可接受标准研究进展及启示[J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 3(3): 29–34.
Gao Jianming, Wang Xikui, Zeng Mingrong. *Journal of Safety Science and Technology*, 2007, 3(3): 29–34.
- [6] Canada Alberta Energy and Utilities Board. Directive 071: Emergency preparedness and response requirements for the upstream petroleum industry (formerly Guide 71) [EB/OL]. http://www.ercb.ca/docs/documents/directives/Directive071_2005.pdf, 2003.
- [7] 张兴凯, 邓云峰, 曹登泉, 等. AQ 2016–2008 含硫化氢天然气井失控井口点火时间规定[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
Zhang Xingkai, Deng Yunfeng, Cao Dengquan, et al. AQ 2016–2008. Specification for ignition time of out of control on wellhead of natural gas well involving hydrogen sulfide [S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2009.
- [8] 吴庆善, 钱新明, 郭再富. 含硫气井井喷事故受体致死概率分析[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(5): 641–645.
Wu Qingshan, Qian Xinming, Guo Zaifu. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(5): 641–645.

(责任编辑 代丽)

《中国学术期刊文摘》

欢迎垂询 欢迎订阅



《中国学术期刊文摘》遴选了中国近500种高水平科技期刊为文摘收录源期刊, 致力于全面、快速地向广大科技工作者交流和传播中国科学技术各领域的原创性学术成果, 每期收录学术论文文摘和中国科协系统学术会议论文题录共4000余条; 它是科研单位、高等院校、图书馆以及广大科技工作者了解中国科技研究成果、学术研究动向的重要参考工具书。

《中国学术期刊文摘》(半月刊) 2010年定价为45.00元/册, 全年定价1080.00元, 邮发代号: 82–707。

《中国学术期刊文摘(英文版)》遴选了近400种中国高水平科技期刊作为收录源期刊, 是海外科技工作者了解中国科技发展动态、最新科研成果的重要窗口。

《中国学术期刊文摘(英文版)》(月刊), 2010年定价30.00元/册, 全年定价360.00元, 邮发代号: 80–487。

中国科协所属全国学会个人会员订刊8折优惠。

通信地址: 北京市海淀区学院南路86号
科技日报社 (100081)
订刊电话: 010–62194182
传 真: 010–62118198
联 系 人: 华起新
订刊信箱: kjdb@cast.org.cn
网 站: www.csciabs.org.cn