

天然气井喷点火空间范围和热辐射对井场周边设施的影响

刘墨山^{1,2}, 黄平³, 刘振翼³

1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083
2. 中国石油天然气股份有限公司勘探与生产分公司, 北京 100007
3. 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 天然气开发过程中,井喷事故后果非常严重,井喷天然气燃烧产生的热辐射会对井场周边人员及设施造成严重伤害。本文以实际工程项目为例,利用计算流体动力学软件 CFD,以 3 种不同压力、外界风速和 2 种出口直径为边界条件,分别对井喷情况下的流场分布进行了数值模拟计算,并对模拟结果及其对周边设施的影响进行了分析。数值模拟结果表明,其他参数不变的情况下,压力或出口直径的变化不会导致出口流速的变化,井喷后气流的出口速度约为 400m/s,而火焰表面温度超过 1500K,喷射火对周边建筑物的损伤半径在 40m 左右,对人员的伤害半径在 104m 左右。

关键词 井喷;流场分布;数值模拟;爆炸极限;空间点火范围

中图分类号 TE38

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)09-0059-04

Ignition Range of Natural Gas Well Blowout and Its Heat Radiation Effect on Circumjacent Facilities

LIU Moshan^{1,2}, HUANG Ping³, LIU Zhenyi³

1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Exploration and Production Company, PetroChina Company Limited, Beijing 100007, China
3. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In the process of natural gas exploration and development, the well blowout will lead to serious consequences. Among the damage forms, the heat radiation from the natural gas fire flame can threaten the onsite and surrounding workers as well as the facilities dramatically. With a practical natural gas well exploration project as an example, using a Computational Fluid Dynamics (CFD) software, the flux field is simulated with well pressures of 10, 20 and 30MPa. In this study, 3 different air velocities and 2 well diameters (63.5 and 88.5mm) are considered in the well blowout and eighteen groups of simulation results are obtained. The simulation results, as well as the heat radiation effects on the circumjacent facilities, are analyzed. It is indicated that both the well pressure and diameter have little influence on the blowout gas velocity with other parameters fixed. With the same well pressure and diameter, the greater the air velocity is, the lower and smaller the effective ignition area will be. Under the simulation conditions, the gas ejection velocity is about 400m/s and the surface temperature of the natural gas flame exceeds 1500K. For the facilities, the damage diameter of the project fire is about 40m; meanwhile the injury diameter of the project fire for human beings is about 104m.

Keywords natural gas well blowout; flux field distribution; numerical simulation; explosion limits; available ignition range

0 引言

井喷是一种地层中流体喷出地面或流入井内其他地层

的现象,大多发生在开采石油天然气的现场。出现井喷事故,天然气喷出后与空气摩擦,容易发生燃烧,会对环境和人身

收稿日期: 2010-01-07

作者简介: 刘墨山,高级工程师,研究方向为油气田勘探与开发,电子信箱:liumsh@petrochina.com.cn

安全造成很大危害,因此非常危险。2003 年 12 月^[1],重庆市开县川东北气矿 16H 井发生特大井喷事故,造成 243 人死亡,4000 多人受伤,疏散转移 6 万多人,9.3 万多人受灾的严重后果。井喷事故一旦发生,后果将非常严重,因此对于井喷事故的科学研究工作刻不容缓。国内已有学者对酸性气田井喷后的流场、点火位置、点火过程等进行一些研究工作,取得了一些成果,但井喷点火后热辐射的伤害研究较少^[2-4]。本文拟采用计算流体动力学(CFD)方法^[5],对井喷流场进行数值模拟研究,得到井喷后气体流场分布,并对井喷点火后对周边井和集气站的影响进行分析,提出相应的防护措施,为今井喷事故的科学研究提供有益的参考。

1 物理模型的建立

1.1 流场控制方程

在质量守恒、动量守恒、能量守恒方程的基础上,建立天然气井喷流场数值模拟的基本方程组。控制流场的微分方程可以写成通用形式,即

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)+\text{div}(p u\phi)=\text{div}(\Gamma\text{grad}\phi)+S_{\phi}$$

式中的 4 项分别为时间项、对流项、扩散项和源项。其中, ρ 为密度, ϕ 为通用变量, u 为速度, Γ 为扩散系数。

井喷时,井下压力在短时间内下降很小,所以研究中假设在井喷过程中,喷发的压力不变。在开放空间内,由于井口尺度相对很小,可认为它是一个稳定的气流点源。井筒流道及出口的几何特征复杂,但可视作圆形自由紊流正浮力射流过程,符合一元定常等熵气体运动规律^[6-8]。

1.2 边界条件

在酸性天然气发生井喷时,高压气体自喷孔中快速喷出。这一过程为压缩流体喷射过程,模拟中采用 Gambit 软件进行建模,Fluent 软件进行数值计算。根据某工程现场的实际情况,建立了 200m×100m×100m(长×对称半宽×高)的三维几何模型^[7]。喷孔直径为气管直径^[8],取常用直径约为 62mm。模型的网格划分见图 1。

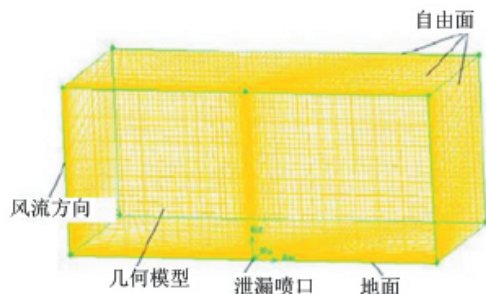


图 1 模拟的几何模型及网格划分

Fig. 1 Geometric model and grid mesh for simulation

在模拟研究中,对酸性天然气(主体成分 CH_4)含有不同体积分数的 CO_2 或 H_2S 井喷泄漏后的浓度与速度场进行模拟,分别计算纯 CH_4 、 $\text{CH}_4(90\%)/\text{CO}_2(10\%)$ 、 $\text{CH}_4(90\%)/\text{H}_2\text{S}$

(10%)、 $\text{CH}_4(80\%)/\text{H}_2\text{S}(20\%)$ 4 种气体成分,气井井口压力分别为 10、20、30MPa,外界风速分别为 1m/s(静风)、3m/s(平均风速)、24m/s(最大风速)条件下, CH_4 爆炸极限 5%~15%(质量分数 2.8%~8.0%)时的分布情况。

计算中,空气从模型侧端进入,并视之为不可压缩气体,用进口质量流量表示相应的压力或风速。模拟中,井喷气体密度参数见表 1,泄漏进口的质量流量等参数见表 2。对风速进口的质量流量由空气密度与模型左侧面面积相乘得到。

表 1 模拟中井喷气体密度参数

Table 1 Density parameters of well blowout gases

气体组分	CH_4	CO_2	O_2	N_2	H_2S	空气
气体密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.6679	1.7878	1.2999	1.138	1.46	1.225

表 2 喷口气体质量流量

Table 2 Mass flux of project gas at the spout

喷口气体参数	泄漏压力/MPa		
	10	20	30
喷口压力/Pa	5457277	10914555	16371832
喷口气体密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	40.23	80.46	120.69
62mm 喷口质量流量/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	25.50	51.00	76.51
89mm 喷口质量流量/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	52.55	105.10	157.65

2 数值模拟结果和分析

分别模拟泄漏压力为 10、20、30MPa,出口直径为 62、89mm,外界风速为 1、3、24m/s,纯 CH_4 泄漏的 18 种组合情况。

以压力 10MPa,出口直径 62mm,风速 1m/s 为例。三维模型高 100m,从流线可以看出, CH_4 喷出后,30m 以下,侧向风对其的影响很小,气柱可以上升到 40m 以上,被微风吹向下风侧,并形成较小的涡流区。模拟得到的 CH_4 气柱的最大速度为 423m/s,通过理想气体的泄漏流速公式^[6]计算的结果大约为 419m/s,两者吻合程度较好。

2.1 酸性气体井喷有效点火空间范围

2.1.1 含 CO_2 天然气的有效点火空间范围

发生井喷时,确定混合气体的爆炸上下限的空间位置,从而确定有效点火的空间范围是保证可靠点火的技术关键。相关研究和实验表明,当天然气中 CO_2 的含量超过 15%时,此类混合气体将不具有爆炸性,而此时 CH_4 的爆炸下限约为 10%体积浓度。因此本研究只详细讨论模拟混合气体中 CO_2 含量为 10%时,混合气体的有效点火范围。在天然气中 CO_2 含量为 10%的情况下, CH_4 的爆炸极限约为 5.9%~12%,质量分数为 3%~8%,在此范围内,气体可有效点燃。模拟得到的井喷流场速度流线如图 2 所示, CH_4 质量浓度等值线如图 3 所示。根据模拟结果,有效点火的空间范围(z 方向)如表 3 所示。从表 3 可知,风速越大,有效点火范围越偏下,点火范围也越窄,井口压力对点火高度的影响比较小。

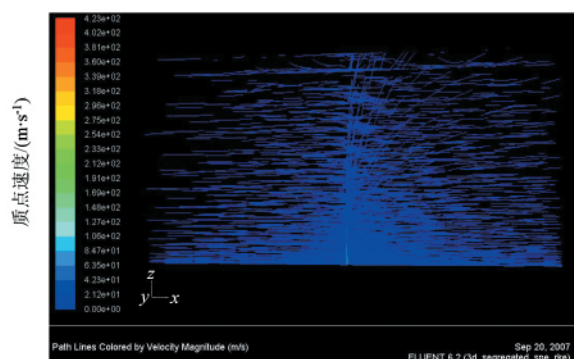
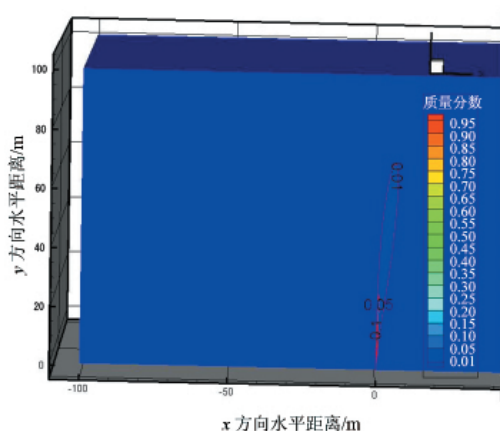


图 2 井喷流场速度流线图

Fig. 2 Simulation streamline of well blowout

图 3 CH_4 质量浓度等值线图

(显示范围:1%~100%,标高:0~75m)

Fig. 3 Mass concentration isolines of CH₄
(display range 1%~100%, elevation is about 0~75m)

表 3 含 10%CO₂ 的天然气点火范围模拟结果
(单位:m)

Table 3 Simulated ignition range of natural gas containing 10% CO₂ (unit: m)

井口压力 P_0/MPa	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		
	1	3	24
10	14~29	8~14	0.6~2.4
20	15~31	9~15	0.6~2.4
30	16~35	9~15	0.6~2.4

2.1.2 含 H_2S 天然气的有效点火空间范围

模拟了 H_2S 含量为 10%、20% 两种天然气在不同压力和风速条件下的井喷情况。理论上,空气中 CH_4 最小点火能量为 0.47mJ,空气中 H_2S 最小点火能量仅为 0.068mJ,含 H_2S 的天然气理论上更易点燃。 H_2S 含量较低时,不会对甲烷的爆炸极限造成明显影响。表 4 和表 5 分别列出了 H_2S 含量为 10% 和 20% 的天然气井喷射流有效点燃空间范围。

由于在模拟爆炸极限时没有考虑硫化氢对爆炸极限的影响, 爆炸极限应该更宽。模拟结果表明, 在泄漏口直径

表 4 含 10% H₂S 的天然气井喷射流点火空间范围(单位:m)

Table 4 Simulated ignition range of natural gas containing 10% H₂S (unit: m)

井口压力 P_0/MPa	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		
	1	3	24
10	16~33	7~15	0.7~2.6
20	14~35	6~16	0.6~2.6
30	15~40	7~17	0.7~2.6

表 5 H₂S 含量 20%天然气井喷射流点火
空间范围(单位:m)

Table 5 Simulated ignition range of natural gas containing 20% H₂S (unit: m)

井口压力 P_0/MPa	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		
	1	3	24
10	18~29	7~14	0.7~2.4
20	15~33	6~16	0.6~2.4
30	16~37	7~16	0.7~2.4

62mm 情况下,风速为 1m/s 时,点火位置的高度范围应在 14~40m;风速为 3m/s 时,点火位置的高度范围应在 7~17m;风速为 24m/s 时,点火位置的高度范围应在 0.5~2.6m。也就是说,在极限风速条件下,点火高度的范围较小,比较困难。而模拟结果也表明,井口压力对点火高度的影响比较小。

2.2 井喷点火后对周边的影响

井喷时的气体泄漏破口直径取气管直径(62mm),压力取10MPa,当地气温取20℃,大气稳定度选择E类,混合层高度和光照条件以一般条件为准。取天然气燃烧热为 $3.6 \times 10^7 \text{J/kg}$,密度为 0.68kg/m^3 。

1) 喷射口处气体流量与速度

由数值模拟,压力为 10MPa 时,井口气体的泄漏速度为 421m/s,需要指出的是,在压力为 10MPa 时,按照理想状态方程,甲烷的密度为 68kg/m³,此时的泄漏质量速率为 86.4kg/s。

2) 热辐射伤害

井喷点火后热辐射视为点源热辐射,伤害等级依据热辐射强度确定^[9]。

点热源的热辐射通量为

$$q_p = \eta Q H_c = 1.088 \times 10^6 \text{ kW}$$

式中, H_c 为燃烧热, J/kg ; q_p 为点热源热辐射通量, W ; Q 为泄漏气体质量流量, kg/s ; η 为效率因子, 取 0.35。

喷射火焰射流轴线上某点热源到距离该点 x 处的热辐射强度为

$$q = \frac{q_p R_0}{4\pi R^2}$$

式中, q 为点热源到目标点 x 处的热辐射强度, W/m^2 ; R_0 为辐射率, 取 0.2; R 为点热源到目标点的距离, m 。

