

文章编号: 1001-1455(2010)01-0096-05

井喷失控气云爆炸的3维数值模拟*

艾志久¹, 吴光武², 王其华³, 雷文章^{1,3}, 陈高松³

(1. 西南石油大学, 四川 成都 610500;

2. 中海油研究总院, 北京 100027;

3. 中国石油集团公司安全环保技术研究院, 北京 100083)

摘要: 基于 $K-\epsilon$ 模型和改进的 EBU 模型, 考虑甲烷-空气混合气云形成过程, 建立了井喷失控甲烷喷射流扩散及混合气云爆炸的理论模型, 选用 SIMPLE 方法求解差分方程, 模拟甲烷-空气混合气云形成过程, 分析了不同点火点对混合气云爆炸影响程度。结果表明, 点火点方位及点火点所在气体体积分数对气云爆炸都有明显的影响, 点火点越靠近气云中心和所在甲烷体积分数越高爆炸效果越强, 最后为井喷失控人工点火提出了合适的点火方位。

关键词: 流体力学; 爆炸效果; EBU 模型; 井喷失控; 气云; 点火

中图分类号: O351.2; X932

国标学科代码: 130·2521

文献标志码: A

1 引言

井喷失控后大量甲烷从井口喷出, 如果没有立即点火, 而是先扩散形成甲烷-空气混合气云, 当气云在可燃浓度范围内遇到明火, 很可能导致气云爆炸。气云爆炸由于破坏性大, 长期以来一直受到广泛关注。D. C. Bull^[1]、K. J. Hunghe^s 等^[2] 和丁信伟等^[3] 的气云爆燃实验揭示了气云爆炸超压和火焰速度均随气云尺寸增大而增大; 杨国刚等^[4] 进行的开敞空间气云爆炸实验表明, 随着混合气云内可燃气体浓度偏离最危险浓度, 爆炸威力将逐渐下降; 同时也开展了一些数值模拟研究, 如毕明树等^[5] 利用气体动力学方程导出无约束气云爆炸压力的计算式。以上所研究的气云均为理想形状模型, 比如球形或半球形, 且可燃气云都为均匀混合, 模型内部不存在浓度梯度。而在开敞空间如天然气管道泄漏、井喷失控所形成的可燃气云很可能没有均匀混合, 而是存在着浓度梯度, 与以上的研究模型有较大差别。

为了使数值模拟结果更逼近实际情况, 本文中基于 $K-\epsilon$ 模型和改进的 EBU 模型, 考虑可燃混合气云的形成过程, 建立甲烷喷射流扩散及混合气云爆炸理论模型, 模拟甲烷-空气混合气云形成过程和不同点火点引发气云爆炸的现象, 探讨开敞空间下气云爆炸威力最小的合适点火方位。

2 数学模型

2.1 天然气喷射流扩散

井喷失控天然气对流扩散流动的连续方程、动量方程、组分方程、能量方程和气体状态方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla^2 \cdot \mu_{\text{eff}} \mathbf{U} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho w_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} w_l) = \nabla \cdot \left(\rho \left(\frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_l}{\sigma_l} \right) \nabla w_l \right) \quad (3)$$

* 收稿日期: 2008-10-29; 修回日期: 2009-02-27

基金项目: 中国石油集团公司 2006 年重点项目(06B7101)

作者简介: 艾志久(1954—), 男, 教授, 博士生导师。

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}h) = \nabla \cdot \left(\rho \left(\frac{\mu}{\sigma} + \frac{\mu_l}{\sigma_l} \right) \nabla h \right) \quad (4)$$

$$p = \rho RT \sum \frac{\omega_l}{M_l} \quad (5)$$

式中： \mathbf{U} 为雷诺平均后的速度， μ_{eff} 为有效粘性系数， $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_l = \mu + C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ ， ω_l 为第 l 种组分气体的质量分数，本文中为纯甲烷气体， h 为气体的焓， M 为气体分子量。

2.2 气云爆炸

采用 EBU(eddy break up)模型来描述爆炸湍流，同时引入湍流脉冲动能 K 和湍流耗散率 ϵ 使方程封闭

$$\frac{\partial(\rho m_F)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}m_F) - \nabla \cdot \left(\left(\frac{\mu_T}{\sigma_T} + \frac{\mu}{\sigma_L} \right) \nabla m_F \right) = \max(R_L, R_T) \quad (6)$$

$$R_T = -23.6 \left(\frac{\mu \epsilon}{\rho k^2} \right)^{0.25} \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left(m_F, \frac{m_O}{i}, \frac{m_P}{i+1} \right) \quad (7)$$

$$R_L = \frac{\rho W_F (S_L + 0.88FK^{-0.3} (2k)^{0.5})}{d_B} \min \left(m_F, \frac{m_O}{i} \right) \quad (8)$$

$$S = \begin{cases} \frac{\phi - \phi_l}{\phi_m - \phi_l} S_{L, \max} & \phi < \phi_m \\ \frac{\phi - \phi_r}{\phi_m - \phi_r} S_{L, \max} & \phi > \phi_m \end{cases} \quad (9)$$

$$K = 0.157 \frac{2k}{S_L^2} \left(\frac{\mu}{\mu_T} \right)^{0.5} \quad (10)$$

上述式中各常数因子分别为： $C_\mu = 0.09$ ， $C_1 = 1.44$ ， $C_2 = 1.92$ ， $C_3 = 1.0$ ， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\epsilon = 1.217$ ， $\sigma_\rho = 1.0$ ， $\sigma_T = 0.9$ ， $\sigma_L = 0.7$ ， $W_F = 2.0$ ， $F = 1.0$ ， $d_B = 0.125$ 。

3 初、边值条件及计算方法

如图 1 所示， x 轴正方向为风向，计算区域为底面半径 100 m、高 100 m 的圆柱体，井口中心轴与 z 轴同轴，井口离地面 10 m，井口直径 180 mm。假设计算过程中风速维持在 $v = 3$ m/s，天然气从井口喷出质量流 40 kg/s，甲烷-空气混合气云燃烧为单步完全反应，采用弱点火点进行点火，点火能量 100 mJ^[5]。

控制方程的离散采用控制容积法，差分方程求解采用 SIMPLER 方法；为了缩短计算时间，提高计算速度，同时又必须满足中心区域精度高的要求，对井口周围中心区域进行细化并采用棱角细化方法划分网格。

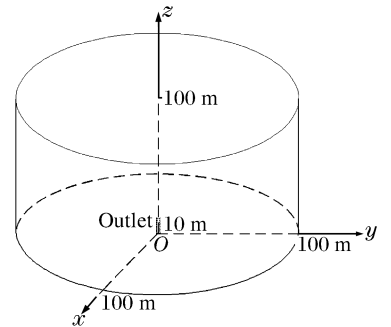


图 1 计算区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation domain

4 模拟结果与分析

4.1 气云形成

图 2 为井喷失控后甲烷-空气混合气云大小随时间变化关系，图 3 为井口下风方向各区域所在截面上甲烷最高体积分数随时间变化关系。由图 2~3 得出，井喷失控最开始阶段甲烷体积分数随时间不断增加，甲烷-空气混合气云尺寸也增大，经过一段时间后该气云（最低体积分数大于 1%）形状基本不发生变化，气云体积分数梯度达到动态稳定值，100 s 以后气云形状基本没有发生变化。

甲烷-空气混合气云的爆炸上、下限分别为 15% 和 5%，高于 15% 或低于 5% 都不会发生爆炸，5%~15% 范围为危险点火区域^[6]。根据 ERCB Directive 071^[7]，天然气井发生井喷 15 min 后，如果仍无法压井成功，则要求必须点火放喷。由以上可知 15 min 时气云已经达到稳定，本文中取 15 min 时气云作为爆炸数值模拟的气云，图 4 为 15 min 时甲烷-空气混合气云及点火点设定。

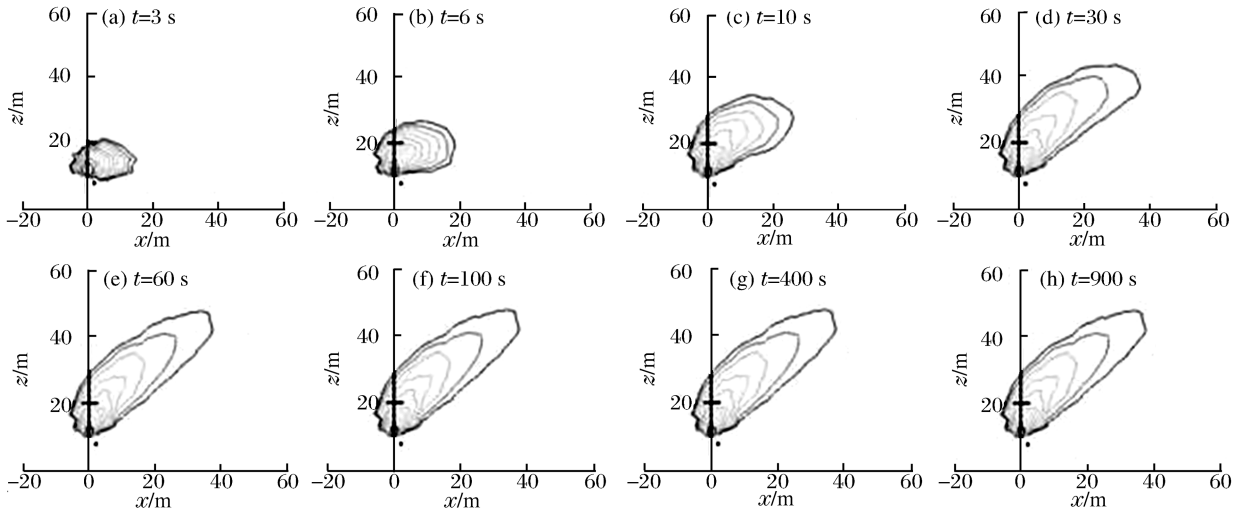


图2 甲烷-空气混合气云的变化

Fig. 2 The cloud of methane-air mixture

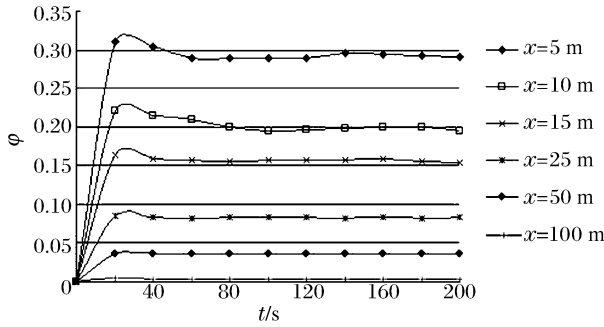


图3 下风方向甲烷体积分数

Fig. 3 Volume fraction of methane under the direction of wind

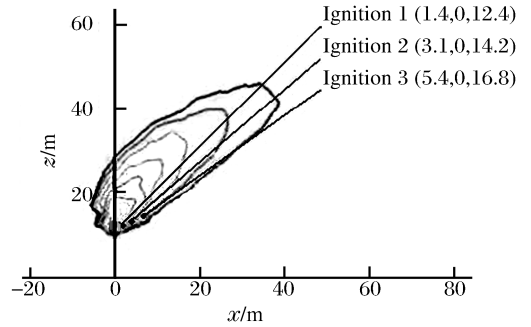


图4 爆炸计算气云及点火点设定

Fig. 4 Gas explosion cloud and ignition point

4.2 爆炸过程压力场分析

图5为在不同体积分数下点火发生爆炸后压力随时间的变化关系,由图可见,气云爆炸最大超压值随点火点所在区域甲烷体积分数增加而增大。图6为气云爆炸实验超压随时间变化关系,爆炸过程超压变化总趋势为:一次超压→负压→二次超压^[8],本文中数值模拟结果与实验数值变化过程基本吻合。

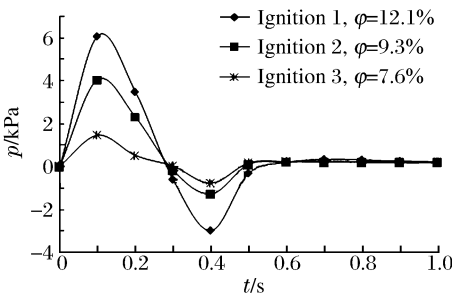


图5 不同体积分数的爆炸压力

Fig. 5 Explosion pressure with different volume fraction

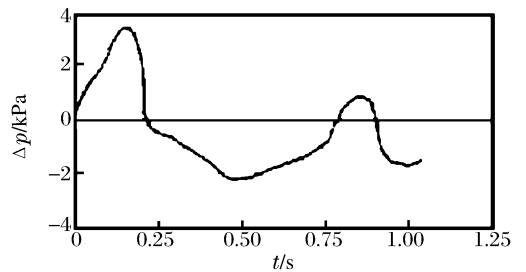


图6 气云爆炸实验的超压

Fig. 6 Overpressure in gas cloud explosion experiments

图7为在点火点1进行点火引发爆炸后空间各点超压随时间变化曲线。随着离爆源中心距离增大,最大超压值呈逐渐减小趋势,由于气云爆炸是一个由点火点逐渐向外发展的过程,在爆炸中心附近区域压力变化较小,离爆炸中心远距离处则下降很快,图中点(10,0,2)和(20,0,2)的最大超压值只相差0.72 kPa,而点(100,0,2)最大超压值只有0.55 kPa。

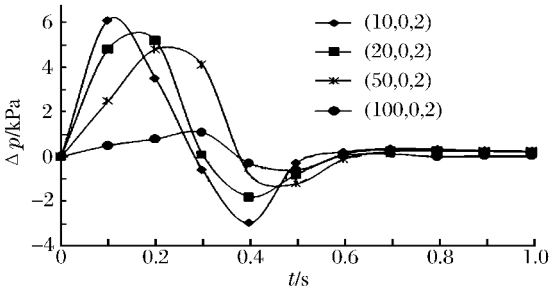


图 7 不同区域的超压
Fig. 7 Overpressure in different region

甲烷-空气混合气云爆炸所形成的最大正压为 6.09 kPa,最大负压为-2.10 kPa。而只有当超压大于 20 kPa,油罐等钢结构设备才会损坏;超压大于 10 kPa,人体才会受到较大损害^[9]。因此上述甲烷-空气混合气云爆炸超压不会对井场周围建筑物及装备造成大的损害,对人的伤害程度也较轻。

4.3 爆炸温度场结果及分析

图 8 为在点火点 1 进行点火引发爆炸后空间各点温度随时间变化关系。在爆炸初始阶段,点火点周围区域的温度急剧上升,最高温度在 3 200 K 以上,剧烈的化学反应使混合气云中可燃气体含量减小,经过一段时间后气云爆炸逐渐转化为喷射火燃烧,燃烧区域最高温度降低到约 1 900 K。

4.4 低体积分数区域点火结果

井喷失控所形成的甲烷-空气混合气云分布规律为中心体积分数高,依次向周围逐渐减小,在气云中心点火所形成超压最大,所以点火点应选取在气云中甲烷体积分数为约 5%的边缘区域。

在甲烷体积分数为 5.2%和 4.85%区域选取 2 点(22,0,15)和(34,0,15)进行点火求解计算,

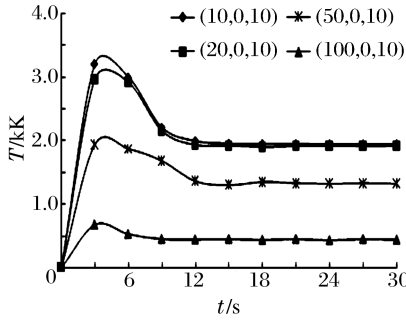


图 8 不同区域的温度
Fig. 8 Temperature in different region

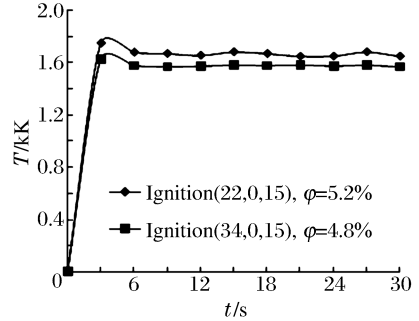


图 9 低体积分数区域的点火温度
Fig. 9 Temperature in the ignition of low volume fraction

图 9 为点火后温度随时间变化关系。在该区域点火后没有引起爆炸,而是保持在燃烧状态,火焰温度在 1 550 K 左右;由于没有发生爆炸,故超压值很小,本文中并没有列出。

在甲烷体积分数 4.8%~5.5%之间多个点进行点火求解均没有发生爆炸,故该区域为推荐的人工安全点火区域。

5 结 论

针对井喷失控后多种工况气云形成及点火引爆过程进行数值模拟研究,讨论了进行人工点火的合适安全点火区域,结果表明:

- (1)井喷失控发生 15 min 后易爆范围甲烷-空气混合气云尺寸不会再继续扩大,15 min 时气云可以作为研究井喷失控爆炸计算气云。
- (2)点火点离气云中心越近,或点火点甲烷体积分数越大,都使气云爆炸最大超压越大。
- (3)井喷失控气云爆炸属于 3 维开敞空间爆炸,产生的超压值较小。对周围环境以及人员伤害主要是爆炸引起的高温火焰,爆炸引起的超压对周围环境建筑以及人员伤害影响范围较小。
- (4)井喷失控人工点火区域为甲烷体积分数为 4.8%~5.5%的可燃气云边缘区域。

参考文献:

[1] Bull D C. Review of large-scale explosion experiments[J]. Plant/Operations Progress, 1991,11(1):33-40.
 [2] Hughes K J, Tomlin A S, Hampartsoumian E, et al. An investigation of important gas-phase reactions of nitrogenous species from the simulation of experimental measurements in combustion systems[J]. Combustion and Flame, 2001,124:573-589.

- [3] 丁信伟,李志义,李应博. 可燃气体云爆炸实验[J]. 化工学报, 1999, 50(4):558-562.
DING Xin-wei, LI Zhi-yi, LI Ying-bo. Experimental investigation into deflagrations of combustial vapor clouds [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1999, 50(4):558-562.
- [4] 杨国刚,丁信伟,毕明树. 燃料浓度对可燃气体云爆炸影响的实验研究与数值模拟[J]. 石油学报(石油加工), 2004, 20(5):53-58.
YANG Guo-gang, DING Xin-wei, BING Ming-shu. Experimental and simulation study of the effect of fuel concentration on flammable vapor cloud explosion[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2004, 20(5): 53-58.
- [5] 毕明树,王淑兰,丁信伟. 无约束气云爆炸压力场的计算[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(2):148-151.
BING Ming-shu, WANG Shu-lan, DING Xin-wei. A calculations of deflagration pressure field of unrestricted flammable gas cloud[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(2):148-151.
- [6] 赵衡阳. 气体和粉尘的爆炸原理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996.
- [7] ERCB Directive 071, Emergency preparedness and response requirements for the petroleum industry[R]. Energy Resources Conservation Board, 2008.
- [8] 毕明树,王淑兰,丁信伟,等. 无约束气云弱点火爆炸压力实验研究[J]. 化工学报, 2001, 52(1):68-71.
BING Ming-shu, WANG Shu-lan, DING Xin-wei, et al. Experimental study on explosion pressures of unrestricted gas cloud explosions[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2001, 52(1):68-71.
- [9] 冯肇瑞,杨有启. 化工安全技术手册[M]. 北京:化学工业出版社, 1993.

Three-dimensional numerical simulation of gas cloud explosion induced by well blowout*

AI Zhi-jiu¹, WU Guang-wu², WANG Qi-hua³, LEI Wen-zhang^{1,3}, CHEN Gao-song³

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China;

2. China National Offshore Oil Corporation Research Institute, Beijing 100027, China;

3. Research Institute of Safety and Environment Technology,
China National Petroleum Corporation, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the $K-\epsilon$ model and the improved eddy break-up (EBU) model, a new theoretical model was established to describe the methane jet diffusion induced by well blowout and the methane-air cloud explosion. And the methane-air cloud diffusion was considered in the new model. By using the new model, the SIMPLE algorithm was adopted to solve differential equations. The formation process of the methane-air cloud was numerically simulated to investigate the effects of different ignitions on the mixture cloud explosion. The results show that the ignition locations and the gas cloud concentrations at the ignition points can affect markedly the gas cloud explosion. The nearer the ignition point away from the gas cloud center and the higher the gas concentration at the ignition point, the more intensely the gas cloud explodes.

Key words: fluid mechanics; explosion effect; eddy break-up (EBU) model; well blowout; gas cloud; ignition

* Received 29 October 2008; Revised 27 February 2009

Supported by the China National Petroleum Corporation (06B7101)

Corresponding author: AI Zhi-jiu, aizhijiu1954@163.com