

天然气泄漏燃烧规律模拟研究

乔楠 (山东莱克工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 天然气小孔泄漏后, 如遇到明火, 会发生喷射燃烧现象, 为了较为清晰的了解天然气泄漏燃烧后的情况, 对天然气泄漏燃烧工况进行模拟, 对燃烧后组分的浓度场、压力场、速度场、温度场、密度场的分布情况进行了分析。

关键词: 天然气; 泄漏; 浓度场; 温度场

0 引言

天然气泄漏会对环境造成污染, 当遇到明火时, 会引发泄漏天然气的燃烧现象, 严重时还会产生爆炸事件发生, 严重危害人身财产安全。因此, 对天然气泄漏事故危害模型进行分析, 对掌握天然气泄漏可能引发的工况具有重要意义^[1-2]。

1 燃烧后浓度场分布

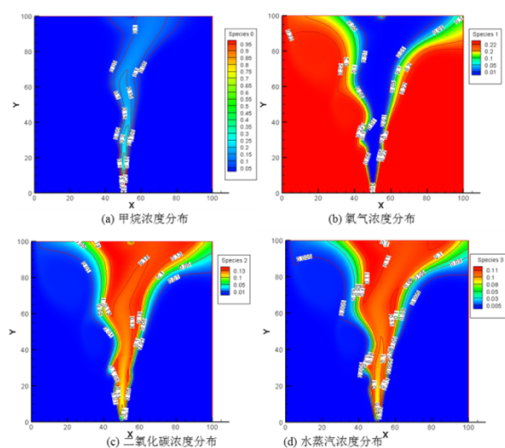


图1 燃烧后不同组分的浓度场分布模拟图

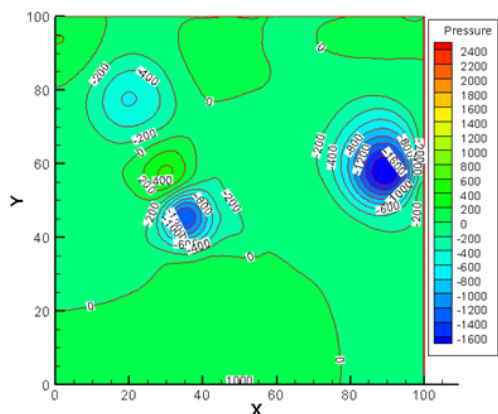


图2 燃烧后压力场分布

天然气泄漏燃烧后各组分浓度分布情况如图1所示。由燃烧后不同组分的浓度场分布情况可知, 各组分的分布情况不一致。因甲烷作为主要反应物质, 当燃烧后, 因燃烧不可能非常充分, 从泄漏口喷射的部分剩余甲烷的分布情况呈现带状分布, 浓度在泄漏口附近最大, 远离泄漏口降低, 且分布的形状与未燃烧时喷射形状类似。氧气浓度分布规律如(b), 在泄漏带处最低, 几

乎为零, 远离泄漏带时浓度逐渐增加, 当距离泄漏带较远处, 浓度不再变化, 为空气中的含量。二氧化碳的浓度分布规律与水蒸气的浓度分布规律类似, 呈现带状分布, 但此分布带要大于甲烷的浓度分布, 因此二者为反应产物, 故而主要分布在甲烷分布带附近, 泄漏口附近浓度分布较低, 在距离泄漏口较远处, 燃烧充分时, 浓度分布较高。二氧化碳和水蒸气的浓度分布与氮气和氧气的浓度分布呈现互补形式。

2 燃烧后压力场分布

天然气泄漏燃烧后的压力场分布规律不明显, 在距离泄漏口较远, 且距离泄漏带也较远处, 出现若干小范围的低气压带, 尤其在下风向出现分布范围略大的低压圈。天然气燃烧后压力场分布如图2所示。

3 燃烧后温度场、密度场和速度场分布

燃烧后的温度场分布反应的是泄漏气体燃烧的剧烈程度, 由图可知, 泄漏口附近温度相对较低, 在距离泄漏口较远的上方, 燃烧程度最为剧烈, 温度最高, 且在泄漏带中心处温度不是最高, 因为此处氧气浓度不够高, 在泄漏带边缘处出现温度最高值, 此时燃烧后所需的氧气能得到及时的补充。

燃烧后的组分密度场分布与氧气的浓度场分布规律类似, 低密度区呈现较宽的泄漏带状分布, 且泄漏带内密度值基本相同, 逐渐远离泄漏带, 密度增大, 当增大到与空气值相同时, 不再发生变化。呈现此规律主要是因为, 喷出的甲烷与氧气反应生成的水蒸气和二氧化碳的平均分子量小于空气, 因而呈现低密度区。

由燃烧时组分的速度场分布规律可知, 速度场为喷射高度较矮的泄漏带状分布, 在泄漏口附近速度最大, 越远离泄漏口速度越小, 当达到一定高度时, 速度与自然风速类似, 此时泄漏的气体燃烧最为剧烈, 初期喷射时所具有的动能已经不能在为其上升其决定性作用, 分布呈现较为紊乱的状态。

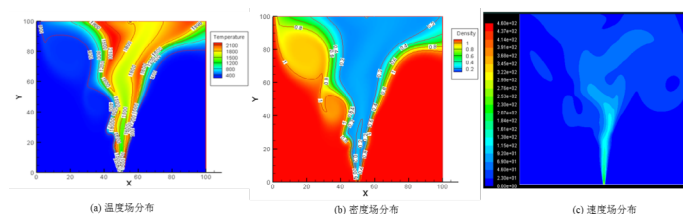


图3 燃烧时组分温度场、密度场合速度场分布模拟图

4 天然气泄漏燃烧辐射热分析研究

若泄漏事故发生之后,为了防止管内天然气泄漏污染环境或者造成其他安全隐患,往往将管段内剩余的天然气在泄漏口处点着,让其喷射燃烧,对泄漏燃烧辐射规律进行分析。

4.1 喷射口气体流速

本文以国内某天然气输送管道为例进行模拟分析。输气管道年输量为 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$, 假设一年的有效输送时间为 360 天, 则标况下的气体体积为:

$$Q_v = \frac{50 \times 10^8}{360 \times 24 \times 3600} = 160.75 \text{ m}^3 / \text{s} \quad (1)$$

标准状态下天然气的密度为 0.7174 kg/m^3 , 则质量流量为:

$$Q_m = Q_v \rho = 160.75 \times 0.7174 = 115.32 \text{ kg/s} \quad (2)$$

管道泄漏口的总表面积为 1 m^2 , 则喷射口的气体流速为:

$$v = \frac{4Q_v}{\pi D^2} = \frac{4 \times 160.75}{3.1416 \times 1^2} = 204.67 \text{ m/s} \quad (3)$$

由此可见,天然气喷射速度很大。

4.2 喷射燃烧时火焰高度

发生泄漏时天然气喷射速度高,雷诺数大,流场属于湍流射流。计算火焰喷射高度主要有 Hawthorne 法、Hustad 和 Sonju 法、Brzustowski 法和 Guenther 法^[3]。其中最常用的就是 Hustad 和 Sonju 法,该方法适合大孔甲烷泄漏,具体的方程如下列公式所示:

$$\frac{H}{D_c} = A \left(\frac{v^2}{g D_c} \right)^{0.2} \quad (4)$$

式中: A- 系数,天然气中主要成分为甲烷是取值 21; v- 喷射火焰的速度, m/s;

对于管道内的介质主要成分为甲烷, $D_c = 0.1 \text{ m}$, 代入 (4) 可得:

$$\frac{H}{D_c} = 21 \left(\frac{v^2}{g D_c} \right)^{0.2} = 21 \times \left(\frac{204.67^2}{9.8 \times 0.1} \right)^{0.2} = 177.17 \quad (4)$$

$$H = 177.17 \times D_c = 177.17 \times 0.1 = 17.71 \text{ m}$$

即为火焰喷射高度。

4.3 热辐射计算

甲烷气体的高发热值为 37.505 MJ/kg , 点源辐射通量按公式 (4) 计算^[4]:

$$q_p = \eta Q_m H_c \quad (6)$$

式中: η - 燃烧效率,一般取值 0.35; H_c - 甲烷高燃烧值, J/kg ; q_p - 点热源热辐射通量, W ; Q_m - 泄漏气体质量流量, kg/s 。

故此:

$$q_p = \eta Q_m H_c = 0.35 \times 115.32 \times 37.505 \times 10^3 = 151.3776 \times 10^4 \text{ kW} \quad (7)$$

以该喷射源为一个热源点,以该点为中心,距离其 x 处的热辐射强度可按照公式 (8) 估算^[5]:

$$q_i = \frac{q_p R_o}{4\pi R_x^2} \quad (8)$$

式中: q_i - 热源 i 距离 x 处的热辐射强度, W/m^2 ; R_o - 喷射火焰的辐射率,燃烧介质为甲烷时该值可取 0.2; R_x - 喷射点与 x 点的距离, m。

根据公式 (8) 得到不同辐射强度下的危险半径及对人体伤害程度如表 1 所示。

表 1 不同辐射强度下的危险半径及对人体的伤害程度

热辐射强度 (kW/m ²)	37.5	25	12.5	6.4	1.6
危险半径 (m)	10.62	5.31	3.80	2.69	2.19
对人体伤害 程度	10s 内 人死亡	10s 内人 严重烧伤	10s 内人 1 度烧伤	20s 以上 引发疼痛	接触会引 发不适感

5 结论

本文对天然气长输管线泄漏可能造成的事故危害进行了分析,天然气泄漏除了对大气环境带来污染、对能源造成浪费意外,如遇到明火或者其他火源,可能会产生燃烧、爆炸两种事故,对人身财产安全造成严重伤害。本章重点对天然气泄漏后的燃烧伤害模型进行了分析,并对燃烧后的浓度场、温度场、压力场、速度场和密度场分布情况进行了分析,通过对泄漏事故危害的分析,认识到了泄漏可能引发的具体危险指数,对充分掌握泄漏规律、减免所引起的人身损失起到指导作用。

参考文献:

- [1] Guo X, Ling Z, Liu F, et al. Research on the Real-Time Calculation of Gas Leakage and Diffusion and Hazards Prediction of Fire and Explosion for Nature Gas Pipeline[C]//Reston,VA:ASCE copyright Proceedings of the International Conference on Pipelines and Trenchless Technology 2011 October 26.29,2011,Beijing,China d 20110000. American Society of Civil Engineers,2011.
- [2] Wang C Q,Chai J S,Niu W. Research on the Consequence Assessment System of Natural Gas Pipeline Leakage Accidents[C]Applied Mechanics and Materials.2013,295: 744-748.
- [3] Si H, Ji H, Zeng X. Quantitative risk assessment model of hazardous chemicals leakage and application[J].Safety science,2012,50(7):1452-1461.
- [4] 张瑾. 天然气泄漏火灾爆炸危险性分析与研究 [J]. 中国化工贸易,2015(11):45-50.
- [5] 陈玉亮,胡峻,赵万里等. 天然气泄漏火灾爆炸危险性定量分析 [C]. 第三届全国油气储运科技、信息与标准技术交流大会,2013.

作者简介:

乔楠,女,山东滨州人,2015年毕业于中国石油大学(华东),从事油气田地地面工程设计。