

高压输气管道喷射火几何尺寸和危险半径的研究

王兆芹^{1,2}, 冯文兴¹, 程五一²

(1. 中国石油管道研究中心, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质大学工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 针对高压输气管道主要火灾形式——喷射火, 利用 Thornton 模型分析了工程实例中喷射火几何尺寸与风速之间的关系, 得出危险半径与泄漏孔径之间的关系曲线, 并将利用该方法计算的管道破裂时的危险半径与依据 SY/T 6621-2005 标准计算的结果进行比较和分析, 结果表明该方法更经济、合理。

关键词: 输气管道; 喷射火; 危险半径; Thornton 模型

中图分类号: X932

文献标识码: A

文章编号: 1671-1556(2009)05-0108-03

Analysis of Geometry and Hazardous Radius of Jet Flame from High-pressure Natural Gas Pipeline

WANG Zhao-qin^{1,2}, FENG Wen-xing¹, CHENG Wu-yi²

(1. PetroChina Pipeline R&D Center, Langfang 065000, China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Fires from high-pressure natural gas pipeline may cause serious casualties and destruction of the property. Jet fire, as one of the main forms of fire incidents, is analyzed in this paper to demonstrate the danger. Thornton Model is applied to one practical case to calculate the relationship between the geometry of jet fire and the wind speed. The relationship between the diameter of the leakage hole and the hazardous radius is calculated and compared with the result from the standard SY/T 6621.

Key words: natural gas pipeline; jet flame; hazardous radius; Thornton Model

0 引言

长输高压天然气管道是解决经济发展中能源问题的重要方式之一。近年来, 高压输气管道事故时有发生, 大多数管道事故都会造成天然气泄漏^[1,2]。由于天然气的易燃、易爆性, 天然气管道泄漏将很可能引发火灾和爆炸, 造成严重的人员伤亡和财产损失。管道泄漏主要有两种形式: 孔泄漏和破裂, 而喷射火是失效泄漏后果中最常见的一种火灾形式, 因此对喷射火形貌和危害进行研究, 不仅可为输气管道的安全管理提供科学依据和参考, 而且有助于企业制定防范措施和事故应急预案, 从而减少人员伤亡和财产损失。

《输气管道系统完整性管理》(SY/T 6621-

2005)^[3]确定输气管道高后果区半径的公式中考虑了管道破裂后喷射火的情况, 采用有效释放因子对管道模型进行简化, 采用点源模型对喷射火进行简化, 这样与实际火焰形状相差较大。另外, 管道孔泄漏是最为常见的失效方式, 而目前对其泄漏危险半径评估的研究较少。为此, 笔者采用经过风洞和场地实验验证的 Thornton 模型描述喷射火, 根据不同泄漏孔径, 得出某工程状况中喷射火几何尺寸、热辐射伤害区域、危险半径, 并将危险半径与根据 SY/T 6621-2005 标准计算出的半径进行了比较分析, 从而验证了该方法的合理性和可行性。

1 喷射火后果模型

高压气体泄漏时形成射流, 如果在裂口处被点

燃,则形成喷射火。目前,计算热辐射的经典数学模型主要有两种:点源模型和固体火焰模型^[4]。笔者采用固体火焰模型(Thornton 模型)^[5]来描述喷射火的几何形状及辐射强度。该模型假定喷射火形状为平截头圆锥形,描述平截头圆锥体的参数有火焰长度、火焰锥体长度、锥体抬升高度等,有风条件下的喷射火形状如图1所示。

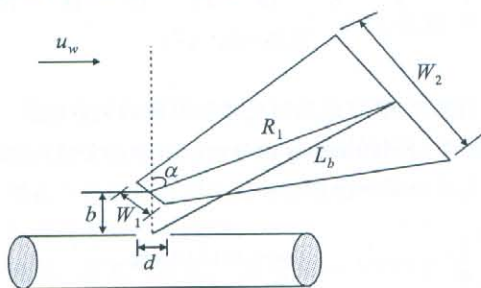


图1 有风条件下喷射火形状示意图

Fig.1 Schematic of the geometry of jet fire in the wind

注:图中各符号的物理意义见下面公式

1.1 喷射火焰几何尺寸的计算

(1) 火焰在风中的长度 L_b 。火焰在风中的长度 L_b 为泄漏孔中心到平截头顶端中心的距离,它通过静止空气中的火焰长度 L_{b0} 来计算。下式是 H. A. Berker^[6] 给出的计算静止空气中火焰长度的计算式:

$$\begin{cases} L_{b0} = Y \times D_s \\ L_b = L_{b0} \times [(0.51 \times e^{-0.4u_w} + 0.49)] \times [(1.0 - 0.00607) \times (\Theta_{fv} - 90^\circ)] \\ D_s = [4 \times Q / (\pi \times \rho_0 \times u_j)]^{1/2} \\ M_j = \{[(k+1) \times (P_c / P_0)^{\frac{k-1}{k}} - 2] / (k-1)\}^{1/2} \\ \rho_0 = P_0 \times W_0 / (8.314 \times T_0) \\ u_j = M_j \times (k \times 8.314 \times T_j / W_g)^{1/2} \\ P_c = P_{init} \times [2 / (k+1)]^{[k / (k-1)]} \\ T_j = T_s \times (P_0 / P_{init})^{[(k-1) / k]} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_b 为有风条件下火焰长度(m); L_{b0} 为静止空气条件下火焰长度(m); D_s 为燃烧等效直径(m); Q 为泄漏速率(kg/s); ρ_0 为空气的密度(kg/m³); W_0 为空气的摩尔质量(kg/mol); T_0 为空气的温度(K); u_j 为泄漏孔处气体流速(m/s); u_w 为风速(m/s); M_j 为气体泄漏的马赫数; P_0 为大气压力(Pa); P_c 为泄漏孔处的静态压力(Pa); P_{init} 为管道初始压力(Pa); W_g 为天然气的摩尔质量(kg/mol); T_j 为气体泄漏孔膨胀之前的温度(K); T_s 为气体最初的温度(K); Θ_{fv} 为孔口轴线与水平线之间的夹角($0^\circ \sim 90^\circ$); k 为气体绝热系数,天然气取 1.306。

式(1)中, Y 通过解下列方程得到:

$$\begin{cases} C_a \times Y^{5/3} + C_b \times Y^{2/3} - C_c = 0 \\ C_a = 0.024 \times (g \times D_s / u_j^2)^{1/3} \\ C_b = 0.2 \\ C_c = (2.85 / W)^{2/3} \\ W = W_g / (15.816 \times W_g + 0.0395) \end{cases} \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度(m/s²); W 为混合气体中燃烧气体的质量分数; C_a 、 C_b 、 C_c 为中间系数。

(2) 火焰倾角 α 。火焰倾角 α 是火焰在风的作用下产生的一定倾斜度,如图1中孔口轴线与圆锥体轴线的夹角 α ,其计算公式为

$$\begin{cases} \alpha = (\Theta_{fv} - 90^\circ) \times (1 - e^{-25.6R_w}) + 8000 \times R_w / R_i(L_{b0}) \quad (R_w \leq 0.05) \\ \alpha = (\Theta_{fv} - 90^\circ) \times (1 - e^{-25.6R_w}) + [134 + 1726 \times (R_w - 0.026)^{1/2}] / R_i(L_{b0}) \quad (R_w > 0.05) \end{cases} \quad (3)$$

式中: α 为火焰倾角($^\circ$); $R_i(L_{b0})$ 为过渡参数(理查森数),计算式为 $R_i(L_{b0}) = [g / D_s^2 \times u_j^2]^{1/3} \times L_{b0}$; R_w 为喷射速度与风速的比值, $R_w = u_j / u_w$ 。

(3) 火焰抬升高度 b 。火焰抬升高度 b (m)是沿孔口轴线方向孔口中心到圆锥体轴线与孔口轴线相交处的距离,计算式为

$$\begin{cases} b = 0.2 \times L_b \quad (\alpha = 0) \\ b = \frac{\sin(K \cdot \alpha)}{\sin \alpha} \times L_b; K = 0.185 \times e^{-20R_w} + 0.015 \quad (0 < \alpha < 180^\circ) \\ b = 0.015 \times L_b \quad (\alpha = 180^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

(4) 火焰锥体长度 R_1 、火焰下截面宽度 W_1 、上截面宽度 W_2 、火焰锥体表面积 A 。这些参数的计算公式为

$$\begin{cases} R_1 = (L_b^2 - b^2 \times \sin^2 \alpha)^{1/2} - b \times \cos \alpha \\ W_1 = D_s \times (13.5 \times e^{-6R_w} + 1.5) \times [1 - (1 - (\rho_0 / \rho_j)^{1/2} / 15) \times e^{(-70 \times R_i(D_s) \times C'R_w)}] \\ W_2 = L_b \times (0.18 \times e^{-1.5R_w} + 0.31) \times [1 - 0.47 \times e^{-25R_w}] \\ A = \frac{\pi}{4} \times (W_1^2 + W_2^2) + \frac{\pi}{2} \times (W_1 + W_2) \times [R_1^2 + (\frac{W_2 - W_1}{2})^2]^{1/2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: R_1 为火焰锥体长度(m); W_1 为火焰的下截面宽度(m); W_2 为火焰的上截面宽度(m); A 为火焰锥体的表面积(m²); $R_i(D_s)$ 为过渡参数(与静止空中火焰有效直径相关的理查森数),计算式为 $R_i(D_s) = [g / (D_s^2 \times u_j^2)]^{1/3} \times D_s$; $C' = 1000e^{-100R_w} + 0.8$ 。

1.2 喷射火焰表面热辐射率的计算

喷射火焰表面热辐射率由下式计算:

$$\begin{cases} SEP = F_s \times E / A \\ F_s = 0.21 \times e^{-0.00323u_j} + 0.11 \\ E = Q \times H_c \end{cases} \quad (6)$$

式中: SEP 为喷射火焰表面热辐射率 [$J/(m^2 \cdot s)$]; F_s 为喷射火焰表面热辐射比率; H_c 为物质的燃烧热 (J/kg); E 为每秒的燃烧能量 (J/s);

1.3 喷射火辐射强度的计算

目标所受辐射强度由下式计算:

$$I(r) = \frac{\eta Q H_c T_{jet}}{4\pi[r^2 + (\frac{R_1}{2})^2]} \quad (7)$$

式中: r 为目标距离泄漏口的距离 (m); $I(r)$ 为 r 处的辐射强度 (kW/m^2); T_{jet} 为辐射率系数; H_c 为甲烷的燃烧热 (kJ/kg); η 为效率因子。

2 工程实例

取西气东输二线输气管道某段 20 km, 管径 $D=1\,219\text{ mm}$, 管内起点压力 $P_1=12\text{ MPa}$, 气体温度为 288.15 K, 管道粗糙度为 46 μm , 摩尔质量为 17.097 $kg/kmol$ 。

2.1 喷射火几何尺寸

根据式(1)~式(5), 求解泄漏孔径 $d=100\text{ mm}$ 时, 不同风速条件下的喷射火焰几何尺寸, 结果见图 2。由图 2 可以看出: 随着风速的增加, 火焰倾角 α 增大, 火焰抬升高度 b 减小, 火焰锥体的下截面宽度减小; 风速增加, 空气卷吸率的增加导致喷射火焰长度 L_b 降低, 并逐渐趋于恒定; 火焰锥体长度 R_1 随着风速的增加经历先增大、后减小、再增大、再减小的反复过程; 火焰锥体的上截面宽度则随着风速的增大而减小, 然后又逐渐呈增大的趋势。

2.2 喷射火辐射强度

图 3 为风速 $u_w=5\text{ m/s}$ 、泄漏孔径 $d=20\text{ mm}$ 、244 mm 和管道破裂 ($d=1\,219\text{ mm}$) 所产生的喷射火热辐射与距离之间的关系曲线。由图 3 可以看出: 随着人距离管道泄漏点距离的增加, 人体所受到的火焰热辐射强度迅速降低; 当热辐射强度为 15.8 kW/m^2 时 (人员 1% 死亡概率^[7]), 3 种泄漏情况下人距离泄漏点的距离分别为 21 m、276 m 和 345 m。

2.3 危险半径

图 4 是计算得到的危险半径与泄漏孔径的关系曲线。由图 4 可以看出: ①危险半径随着泄漏孔径

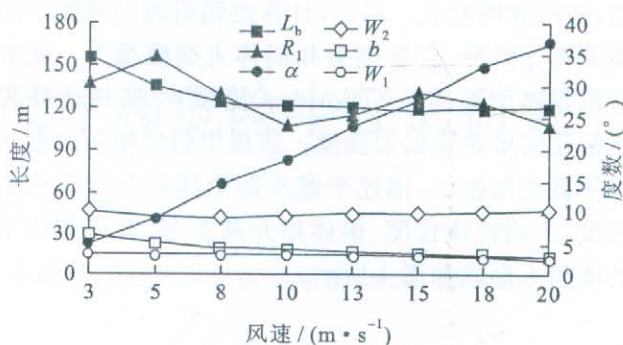


图 2 喷射火几何尺寸与风速的关系曲线

Fig. 2 Relationship between geometry of jet fire and wind speed

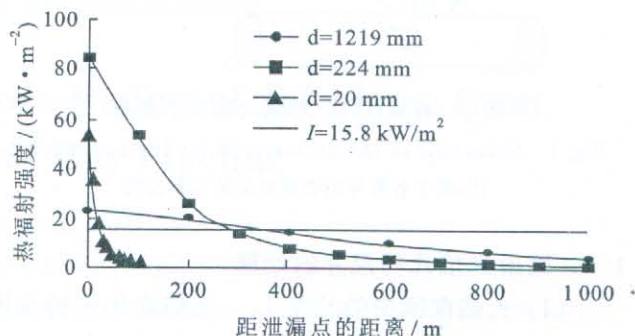


图 3 $u_w=5\text{ m/s}$ 时不同泄漏孔径的热辐射强度与距离之间的关系曲线

Fig. 3 Relationship between heat flux and distance at $u_w=5\text{ m/s}$

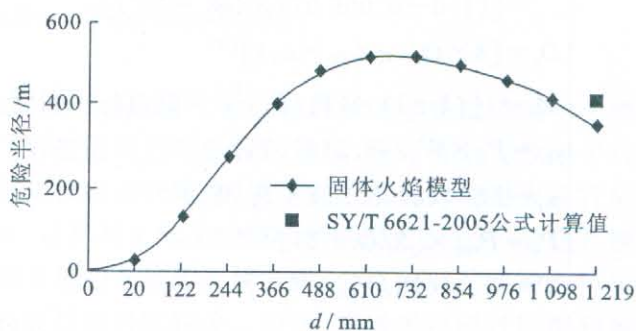


图 4 危险半径与泄漏孔径的关系曲线 ($I=15.8\text{ kW/m}^2$)

Fig. 4 Relationship between hazardous radius and aperture of leakage

的增加呈现先增加后减小的趋势, 最大危险半径并不处于管道破裂时, 这是因为泄漏孔径增加到 650 mm 的过程中, 质量泄漏率迅速增加, 而火焰锥体的表面积增加平缓, 使得喷射火焰表面辐射率迅速增加, 从而危险半径增大, 而随着泄漏孔径进一步增大, 质量泄漏率增加趋于平缓, 而锥体的表面积迅速增加, 使得喷射火焰表面辐射率迅速下降, 从而危险

(下转第 118 页)

软件系统,使之理论科学、处理功能齐备,解决工程问题更加准确,实际应用价值更加突显。

(4) 对锚杆锚固质量检测的激发、接受装置、仪器设备开展系统的研究,以更好地服务工程建设、解决实际问题。

4 结 语

随着检测技术的进步,锚杆锚固质量检测从单纯的抗拔力检测向无损检测方向发展,这为保证工程质量和提高效率起到了重要的作用。但由于目前检测原理和检测手段方面存在缺陷和不足,在实际工程应用时检测结论仍存在不确定性,因此对锚杆加固理论做进一步的深入研究,将为锚杆支护施工工艺的改进和锚杆支护技术的推广起到有益的促进作用。

参考文献:

- [1] 程良奎,张作幅,杨志银. 岩土加固实用技术[M]. 北京:地震出版社,1994.
- [2] 江杰. 应力波法锚杆加固无损检测与锚固效果评价的研究[D].

武汉:武汉理工大学,硕士学位论文,2005.

- [3] Thurner, H. F. Boltometer-instrument for non-destructive testing of grouted rock bolts[A]. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Filed Measurements in Geomechanics* [C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1988. 135-143.
- [4] Baedr, M. D., M. J. S. Lowe, P. Cawley. Development of a guided wave inspection technique for rock bolts[J]. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2002, (21): 318-325.
- [5] 田凯. 岩土工程锚杆检测技术发展现状[J]. 岩土工程, 2007, 36(1): 344-345.
- [6] 汪明武, 王鹤龄. 声频应力波在锚杆锚固状态检测中的应用[J]. 地质与勘探, 1998, 34(4): 54-56.
- [7] 汪明武, 王鹤龄. 锚固质量的无损检测技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 126-129.
- [8] 夏代林, 吕绍林, 肖柏勋. 基于小波时频分析的锚固缺陷诊断方法[J]. 物探与化探, 2003, 27(4): 312-315.
- [9] 李义, 王成. 应力反射波法检测锚杆锚固质量的实验研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 160-164.
- [10] 许明. 锚固系统质量的无损检测与智能诊断技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 博士学位论文, 2002.

通讯作者: 章 光(1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事采矿工程、岩土工程、环境工程等方面的研究. E-mail: gzhang58@163.com

(上接第110页)

半径变小;②当 d 为1 219 mm时,根据SY/T 6621-2005标准计算得到的危险半径为420 m,而笔者计算的危险半径为352 m,比SY/T 6621-2005标准计算得到的结果小68 m。这是因为SY/T 6621-2005标准在计算泄漏率时对压力进行了简化假设,过高地估计了质量泄漏率,使计算得到的危险半径偏大。在管道安全管理中,如果输气管道危险半径估计过大,则会导致风险控制和管理成本增加,也会造成资源的浪费。

3 结 论

(1) 喷射火的平截头锥体所对应的几何尺寸随着风速的变化,呈现不同的变化趋势,较为复杂。

(2) 输气管道发生喷射火灾形成的危险半径随着泄漏孔径的增加先增加后减小,最大危险半径并不处于管道破裂时,这主要是由气体泄漏率和火焰锥体表面积随着孔径变化不一致所引起。

(3) 通过工程实例分析发现,依据笔者所述方法计算的管道破裂时的危险半径比依据SY/T 6621-2005标准计算的结果小,表明笔者介绍的方法更经济、合理。

参考文献:

- [1] 张甫仁. 燃气管线动态泄漏扩散的危险性分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(2): 103-109.
- [2] 沈斐敏, 伍良. 燃气泄漏风险评价中不确定问题的探讨[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(1): 30-33.
- [3] SY/T 6621-2005, 输气管道系统完整性管理[S].
- [4] 肖建兰, 吕保和, 王明贤, 等. 气体管道泄漏模型的研究进展[J]. 煤气与热力, 2006, 26(2): 7-9.
- [5] 王大庆, 高惠林, 霍春勇, 等. 天然气管道泄漏射流火焰形貌研究[J]. 油气储运, 2006, 25(2): 47-49.
- [6] Berker, H. A., D. Liang. Visible length of vertical free turbulent diffusion flames[J]. *Combust Flame*, 1978, (32): 115-137.
- [7] 王曰燕, 罗金恒, 赵新伟, 等. 天然气输送管道火灾事故危险分析[J]. 天然气与石油, 2005, 23(3): 34-36.

通讯作者: 冯文兴(1979—), 男, 博士, 工程师, 主要从事风险评价方面的研究. E-mail: wxwfeng@mail.ustc.edu.cn