

骆正山, 顾建荣, 何宏璧. 陆上长输石油管道泄漏池火灾害分析[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 1-3, 53. [Luo Zhengshan, Gu Jianrong and He Hongbi. The Hazard Analysis of the Pool Fire Based on the Long-distance Onshore Oil Pipeline Leakage[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 1-3, 53.]

# 陆上长输石油管道泄漏池火灾害分析\*

骆正山, 顾建荣, 何宏璧

(西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 基于国内外研究的基础并结合试验统计分析, 建立和改进陆上长输石油管道泄漏池火灾害定量分析模型, 对石油管道泄漏形成的池火火灾的一些基本属性, 如危害半径、危害强度以及危害机理进行研究, 为陆上长输石油管道风险评估、风险管理、管道维护以及灾害发生后的危害后果评估提供决策支持。

**关键词:** 陆上; 长输管道; 石油泄漏; 池火灾害; 计算模型

**中图分类号:** TU996; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)02-0001-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.02.001

陆上石油管道泄漏, 根据泄漏量的大小和泄漏模式会形成池火、喷射火或蒸汽云爆炸<sup>[1]</sup>, 造成人员伤亡和财产损失<sup>[2-3]</sup>, 本文重点研究石油管道泄漏池火火灾造成的危害。陆上石油管道泄漏, 油品将沿地面流向低洼处聚集形成液池, 遇火源燃烧形成池火<sup>[4-5]</sup>。因而, 研究池火火灾的基本属性, 如危害半径、危害强度以及危害机理, 对保护人民生命财产安全以及对危害后果进行预测和评估具有重要意义<sup>[6]</sup>。

近年, 国内外学者在该领域进行了一些研究, 但大都集中在对密闭容器内液体的燃烧、爆炸过程的模拟, 如 R Merrifield 和 T A Roberts 提出可燃性液体引起的池火火灾, 热辐射是其主要危害<sup>[7-8]</sup>, 陈志华等研究钢管壁对火焰的加速作用的影响等<sup>[9-10]</sup>。对池火灾害的研究集中在定性研究方面<sup>[11]</sup>。本文通过建立池火火灾模型, 对陆上长输石油管道泄漏池火灾害的形成机理、破坏规律、危害范围以及危害后果进行定量分析研究, 为陆上输油管道泄漏池火火灾危害的预防以及危害发生后造成的后果进行较为准确的评估提供指导。

## 1 石油管道泄漏火灾模型

池火若发生在开放空气环境中, 燃烧比较完全, 产生的有毒、有害气体和烟尘在短时间内不至于危害生命, 人员可以逃离火灾现场<sup>[12]</sup>。因而

石油管道泄漏池火灾害在室外裸露空间的主要危害源是热辐射<sup>[13-14]</sup>, 因此, 下面重点研究石油管道泄漏池火灾害在室外裸露空间热辐射造成的危害。

### 1.1 热辐射强度计算模型

发生池火灾害后, 计算不同范围内的热辐射强度, 最终可以估算死亡人数和财产损失情况。基于国内外研究并结合我国陆上石油管道的实际, 本文对热辐射强度的计算采用下面修正模型:

$$I = EF\tau. \quad (1)$$

式中:  $E$  为表面辐射能力( $\text{kW}/\text{m}^2$ );  $F$  为视角因子;  $\tau$  为大气透射率, 通常情况下, 该值取 1。

对不同的火焰来讲, 视角因子的计算方法不同<sup>[15]</sup>。对池火而言, 视角因子的计算比较复杂<sup>[16]</sup>, 本文通过试验得出下面简化计算模型<sup>[17]</sup>:

$$F = 1.143(D/2r)^{1.757}. \quad (2)$$

式中:  $D$  为液池的直径(m);  $r$  为离火焰中心的距离(m)。

### 1.2 热辐射的影响

石油泄漏池火产生的热辐射对周围人员和建筑物造成危害, 如建筑物着火、人员伤亡等。池火灾害对人体的伤害程度最终取决于所接受的热辐射强度和在危害范围内的暴露时间(表1)。实验研究表明: 伤害程度与辐射剂量(dose)有关<sup>[18]</sup>, 且是暴露时间和热辐射强度的函数, 辐射剂量可由下式计算。

\* 收稿日期: 2013-09-24 修回日期: 2013-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目“陆上油气管线风险评估技术研究”(61271278); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(E08001)

作者简介: 骆正山(1969-), 男, 陕西汉中, 博士, 教授, 主要从事管道风险评估理论、建模与方法、企业信息化方面的教学和科研工作。E-mail: luozhengshan@163.com

表 1

不同热辐射强度引起的伤害

辐射强度 / (kW/m <sup>2</sup> )	对设备的损害	对人的伤害	伤害半径 / m
37.5	操作设备完全损坏	1% 死亡 /10 s;100% 死亡 /1 min	$R_1 = 2.847 \sqrt{Q_m}$
25	无火焰,辐射使木材燃烧最小能量	重大损伤 /10 s;100% 死亡 /1 min	$R_2 = 3.520 \sqrt{Q_m}$
12.5	有火焰使木材燃烧,塑料熔化最低能量	1° 烧伤 /10 s;1% 死亡 /1 min	$R_3 = 4.978 \sqrt{Q_m}$
4.0		20 s 以上感觉疼痛	$R_4 = 8.799 \sqrt{Q_m}$
1.6		长期辐射无不舒服感	$R_5 = 13.913 \sqrt{Q_m}$

$$dose = t \cdot I^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式中:  $t$  为暴露时间(s);  $I$  为辐射强度(kW/m<sup>2</sup>)。

结合式(1)、(2)、(3) 得:

$$dose = t \cdot I^{\frac{1}{4}} = t^{\frac{1}{4}} \sqrt{(E \times 1.143 (D/2r)^{1.575})^3} \quad (4)$$

由辐射剂量 dose 可求得相应目标点的热辐射阈值,进而得到池火灾害的危害半径。结果如表 1 所示,  $Q_m$  为排放率(kg/s)。

### 1.3 池火灾模型

假定石油液池为圆形,直径  $D$  为常数,池火燃烧火焰为圆柱形,火焰截面直径也为  $D$ 。则

(1) 泄漏油品质量燃烧速率  $m''$  用下式计算<sup>[19]</sup>:

$$m'' = m''_{\infty} [1 - \exp(-k\beta D)] \quad (5)$$

式中:  $m''_{\infty}$  为油品的最大质量燃烧速率(kg/m<sup>2</sup>·s);  $k$  为火焰的吸收衰减系数(m<sup>-1</sup>);  $\beta$  为平均光线长度校正系数;  $D$  为油池直径(m)。

(2) 总放热速率  $\dot{Q}$  用下式计算:

$$\dot{Q} = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot \eta_1 \cdot H_c \cdot m'' \quad (6)$$

式中:  $\eta_1$  为燃烧效率;  $H_c$  为燃烧热(kJ/kg)。

(3) 火焰高度  $L$  分两种情况计算:

$$\text{当 } \dot{Q}/D < 7, L = 42D [m''/\rho_0 \sqrt{gD}]^{0.61} \quad (7)$$

式中:  $\rho_0$  为空气密度(kg/m<sup>3</sup>);  $g$  为引力常数,取 9.81 m/s<sup>2</sup>。

否则,  $L = -1.02D + 0.230\dot{Q}^{\frac{2}{3}}$ , ( $7 \leq \dot{Q}^{\frac{2}{3}}/D \leq 700$ )。 (8)

(4) 池火火焰表面的热辐射通量  $E$  (kW/m<sup>2</sup>)

$$E = \dot{Q}\eta_2 / (\frac{\pi}{4}D^2 + \pi DL) \quad (9)$$

式中:  $\eta_2$  为热辐射系数。

## 2 池火灾参数计算

用上文的池火灾害模型预测某输油管线断裂介质泄漏导致的灾害后果。已知油品的燃烧热为  $4.4765 \times 10^4$  kJ/kg,燃烧效率为 1.0,最大质量燃烧速率为  $5.5 \times 10^{-2}$  kg/(m<sup>2</sup>·s)<sup>[20]</sup>,  $k \times \beta$  值为 2.1。在标准大气条件下,计算结果如表 2 ~ 4 所示。表 2 所示为池火火焰高度以及火焰高度/火焰截面直径比,不同池火火焰直径其表面辐射量如表 3 所示。若在危害区域内人员暴露时间为 60 s,则可算出池火危害半径与液池直径的关系见(表 4)。

对表 1 和表 2 中的数据分析,可以看出,石油管道泄漏池火火焰高度、表面的辐射通量都随池火直径增大而增大,而泄漏池火火焰高度与直径比则随池火直径增大反而减小。

对表 4 的数据分析可以看出:池火灾害的各种危害半径随着泄漏液池直径逐渐增大显著增大,因而,陆上管道单位时间泄漏量越大,一旦发生池火灾害,其造成的危害也必然越大。

## 3 危害后果实例分析

假设某陆上输油管线全长 465 km,管径  $d = 324$  mm,原油密度  $\rho = 832$  kg/m<sup>3</sup>,粘度  $\mu = 0.25 \times 10^{-2}$  Pa·S;起始压力  $P_1 = 4.6$  MPa,起始温度  $T_1 = 303$  K,在距离  $L = 20$  km 处因外力作用石油管道发生泄漏。管道泄漏孔径  $\varphi = 0.2D$  和  $D$  ( $D$  为输油管道直径),则两种情况下石油管道泄漏率计算结果如表 5 所示。

表 2

圆柱形火焰高度  $L$  与燃料池直径  $D$  的关系

$D/m$	1	5	10	20	40	50	70	100	200	300	500	1 000
$L/m$	3.1	9.0	14.3	22.6	35.9	41.6	52.1	66.0	104.6	137	192	305
$L/D$	3.1	1.78	1.43	1.13	0.9	0.83	0.74	0.66	0.52	0.46	0.39	0.31

表 3

火焰表面的辐射通量

火焰直径 $D/m$	0.5	1	2	3	4	5	10	15	20	30	50
火焰表面热辐射通量 $E/(kW/m^2)$	45	55	68	77	84	90	110	123	134	149	171

表 4 伤害半径与池直径的关系(人员  
暴露时间为 60 s)

石油泄漏液池直径 $D/m$	1	5	10	50
火焰表面辐射通量 $E/(kW/m^2)$	55	90	110	171
死亡半径 $/m$	1.3	7.5	16.5	93.5
1% 死亡半径 $/m$	1.5	10	21.5	125
疼痛半径 $/m$	2.5	16.5	36	210.5
安全半径 $/m$	4.0	26	56.5	330
加工设备破坏半径 $/m$	1.1	6.5	14	80
引燃木材半径 $/m$	1.3	7.5	16.5	93.5

表 5 陆上液体(原油)管线泄漏计算结果

泄漏模式	规模	泄漏率 $/(kg/s)$
穿孔	20% $D$	3.734
管线截面断裂	100% $D$	32.579

由表 5 可知,陆上石油输送管道应尽可能避免管道断裂事故的发生,因为从计算结果看:一旦发生管道断裂,其泄漏率大约是小孔泄漏时的 8.7 倍,单位时间泄漏的石油量特别大,形成的液池大,若发生池火火灾,其危害后果就非常严重。

假设原油泄漏量为  $18\ 000\ m^3$ ,液池中心深度为  $1.2\ m$ ,根据相关资料<sup>[21]</sup>查得,油料燃烧速率为  $7.81 \times 10^{-2}\ kg/m^3$ ,燃烧热为  $4.103 \times 10^4\ kJ/kg$ ,燃烧效率为 0.35,空气密度为  $1.293\ kg/m^3$ ,即可算出不同目标距离点的热辐射强度值见(表 6)。

表 6 不同目标距离点的热辐射强度值

距离 $/m$	火焰辐射强度/ $(kW/m^3)$	距离 $/m$	火焰辐射强度/ $(kW/m^3)$
10	764.48	80	11.94
30	84.96	100	7.68
50	37.18	120	5.36
55	25.39	140	3.95
60	21.26	160	3.06
70	15.65	180	2.45
78	12.66	215	1.66

根据表 1~表 6 计算数据,结合发生火灾周围人口密度等可以进一步估算距离池火火源中心各处的人员死亡数,建筑物损害情况(人员死亡以及建筑物损坏半径计算模型参考文献[22]),进而计算出总的经济损失。

## 4 结语

文章基于热辐射强度计算模型,综合考虑池火的各种特性建立了石油管道泄漏池火灾害模型,研究了池火火灾在不同失效模式下对泄漏点周围人员、建筑物的危害,研究结果表明:

(1)石油管道泄漏池火的火焰高度随池火直径增大而增大,池火火焰高度与直径比随池火火焰直径增大而减小;另外,池火火焰表面热辐射通量随池火火焰直径增大而增大。

(2)随着石油泄漏液池的直径增大,池火火灾的破坏半径显著增大;石油管道发生断裂时的泄漏率远远大于小孔泄漏,大约是小孔泄漏的 8.7 倍,即断裂引发的池火危害远远大于泄漏池火的危害。

实证分析结果与基于历史数据实际发生的池火灾害统计结果吻合,表明运用该模型对石油管道泄漏池火危害后果定量计算具有较高的可靠性。证明该模型对石油管道风险管理以及池火火灾发生后如何采取有效应对措施,降低灾害损失具有实际的应用价值。

## 参考文献:

- [1] 王小完,马骥,骆正山. 基于天然气管线泄漏蒸汽云爆炸危害分析[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 16-19, 53.
- [2] 冯庆善,陈峰. 管道完整性管理在应对地震灾害中的应用[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 139-143.
- [3] 翁永基. 油气管道泄漏事故的定量风险评价[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 108-112.
- [4] Minagata, Hidetaka, Yoshizaki, et al. Risk assessment of gray cast iron pipelines Source[C]// New Pipeline Technologies, Security, and Safety, 2003: 621-628.
- [5] 柏文广. 罐区安全评价方法的实证分析及研究[J]. 石油化工管理干部学院学报, 2005, 39(2): 47-52.
- [6] Cui hui, Xu zhisheng, Song wenhua, et al. Study on Critical Concentration Criteria of Toxic Gas Hazardous Zones[J]. Journal of catastrophology, 2008, 23(3): 80-84.
- [7] 陈志华. 气云与粉尘燃烧爆炸现象的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 1997.
- [8] Luo Zhengshan, Wang Xiaowan. On the models of calculating severe hazard caused by gas-leaking[C] // Proc. International Conference on Pipelines and Trenchless Technology. Shanghai: ASCE, 2009: 865-873.
- [9] KhanFI, Abbasi SA. Major accident in process industries and an analysis of causes and consequence [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999, 12(5): 361-378.
- [10] Marchenko V N, Zin'ko B F. Current trends in the development and production of steels and pipes for gas and oil pipelines: An international scientific-technical conference[J]. Metallurgist, 2008, 52(3/4): 167-174.
- [11] S E Ronnie Prediction of consequence of accidental releases from liquid pipelines[C]// Proceedings of IPC 2004 international pipeline conference Calgary. Alberta, Canada, 2004.
- [12] Zhang Peng, Chen Liqiong, Hou Xiangqin, et al. Decision based on, risk for optimum integrity maintenance of oil/gas pipeline[J]. Tianranqi Gongye/Natural Gas Industry, 2004, 24(9): 159-160, 20.

(下转第 53 页)