

大型原油储罐扬沸事故热辐射伤害计算模型

陈 阵¹, 王 霁², 刘馨泽³

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国人民武装警察部队学院, 河北 廊坊 065000;

3. 河北省桃林口水库管理局, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:运用圆柱模型、点源模型和温度模型三种常见模型对实际案例进行计算分析,得到了三组不同的计算结果。分析计算结果可知,这三种模型适用于大型原油储罐扬沸火灾辐射强度的计算,具有较高的可信度。结合热辐射伤害判定依据可知,罐区发生扬沸事故后,邻近的设备全部被损坏,1 min 内人员全部死亡。

关键词:大型原油储罐; 扬沸火灾; 火焰辐射; 热辐射强度; 数学模型

中图分类号:X913.4, TK121, TE82 文献标志码:A

文章编号:1009-0029(2014)02-0131-03

储罐是大型原油储备基地储存油品的最重要的设备,储罐内储存的各种油品一般都具有易挥发、易流失、易燃烧、易爆炸等性质,一旦发生火灾,燃烧猛烈,火焰温度高,辐射热强,控制和扑救难度很大。在油罐直径 $D > 300$ mm 的池火中,火焰热辐射对燃烧过程起控制作用。

笔者在适当的假设下,对原油池火焰在扬沸期的辐射进行了计算模型的应用研究,讨论了在不同计算模型

下火焰热辐射的变化规律。

1 原油储罐火灾辐射计算模型

1.1 圆柱火焰模型

运用圆柱火焰辐射模型对准稳态燃烧阶段火焰辐射进行计算时,首先要计算火焰高度。火焰高度 H_f 的计算,可根据 Thomas 提出的计算公式,如式(1)所示。

$$H_f = 42D \left[\frac{m''}{\rho_0 \sqrt{gD}} \right]^{0.61} \quad (1)$$

火焰面对物体微元的辐射热通量 dQ 见式(2):

$$dQ = V \epsilon \sigma (T_f^4 - T_a^4) X \quad (2)$$

式中: Q 为热辐射通量, kW/m^2 ; H_f 为火焰高度, m ; D 为油池直径, m ; ρ_0 为空气密度,取 $1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$; m'' 为燃烧速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; ϵ 为物体表面放射率,黑体取 1; σ 为常数,取 $5.5 \times 10^{-11} \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_f 与 T_a 分别为火焰中心与周围空气的温度, K ; V 为火焰有限面元 X 对垂直微元的视角系数,参看文献[6]。

1.2 点源模型

由于扬沸阶段火焰形状变得复杂,因而采用点源模

1999,13:1097-1104.

[10] Hertzberg M, Zlochower I A. Devolatilization rates and interparticle wave structures during the combustion of pulverized coals and polymath methacrylate[A]. 23rd Symposium (International) on Combustion[C]. The Combustion Institute, 1990:1247-1255.

[11] Dreizin E L. Effect of phase changes on metal-particle combustion processes[J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2003, 39: 681-693.

[12] Dreizin E L, Hoffmann V K. Constant pressure combustion of aerosol of coarse magnesium particles in microgravity[J]. Combustion and Flame, 1999, 118:262-280.

[13] Kuai N S, Huang W X, Yuan J J, et al. Experimental investigations of coal dust-inertant mixture explosion behaviors[J]. Process Engineering, 2011, 26:1337-1345.

Experimental investigation on the inhibition effectiveness of CaCO_3 on dust explosions

GAN Yuan¹, KUAI Nian-sheng², LIU Long¹,
DU Bing¹, HUANG Wei-xing¹

(1. School of Chemical Engineering, Sichuan University, Sichuan Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Academy of Safety

Science and Technology, Sichuan Chengdu 610045, China)

Abstract: Based on the experimental data of dust explosion obtained from a Siwek 20 L vessel, explosion behaviors of dust- CaCO_3 mixtures were comparatively analyzed. Results showed that: the explosion mechanism of bituminous coal dust corresponds to the homogeneous deflagration, while the explosion mechanism of anthracite and magnesium dusts is mainly the heterogeneous deflagration. It is indicated that the inhibition effectiveness of CaCO_3 on homogeneous-deflagration-dust is better than the other one. The inhibition effectiveness is hardly related to the calorific value of dusts, but affected by particle size of CaCO_3 significantly. Finer CaCO_3 shows better inhibition effectiveness than the coarser.

Key words: dust explosion; calcium carbonate; explosion mechanism; inhibition effectiveness

作者简介:甘 媛(1989-),女,陕西渭南人,四川大学化学工程学院硕士研究生,主要从事粉尘爆炸过程研究,四川省成都市一环路南一段 24 号四川大学化工学院 305 室,610065。

收稿日期:2013-10-12

型对扬沸阶段的热辐射进行计算可以简化计算过程。扬沸阶段热辐射应包括两部分：油罐火热辐射与沸溢油火热辐射。按照以下步骤对扬沸阶段的热辐射进行计算。首先用式(3)计算扬沸阶段的火源热释放速率。

$$Q = m'' H_c (1 - e^{-k\beta D}) A_f \quad (3)$$

式中： H_c 为燃烧热，kJ/kg； k 、 β 为修正系数； A_f 为火源面积， m^2 。

距离火源中心不同的辐射强度可用公式(4)计算。

$$I = Q\chi / 4\pi r^2 \quad (4)$$

式中： I 为目标位置处热辐射强度， kW/m^2 ； r 为目标距离火源中心的距离， m ； χ 为效率系数，取 0.3。

1.3 温度法计算模型

对沸溢前后燃烧油罐火焰热辐射强度，可利用火焰温度进行计算。对火焰表面划分出不同的温度区域，并测定各温度区的相应平均温度值，再根据各温度区的相对表面分率，利用式(5)计算火焰平均热辐射强度。

$$Q_r = \sum Q_i \cdot S_j = \sum \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot S_j \quad (5)$$

式中： Q_r 为火焰平均热辐射强度， kW/m^2 ； T 为火焰平均温度， K ； S_j 为各温度区的相对表面分率。

2 热辐射计算模型的应用与分析

2.1 火灾场景设定

以天津市某原油储备库为案例进行计算分析。该原油储备总库容 $10^6 m^3$ ，统一采用 $10^5 m^3$ 储罐。储罐进行分组布置，库内建有 2 个罐组，其中一个罐组设 6 座 $10^5 m^3$ 原油储罐，一个罐组设 4 座 $10^5 m^3$ 原油储罐，预留 2 座原油储罐的位置，罐组内储罐的数量及总容量符合规范的要求。储备库与周围居住区、工矿企业交通线路等的设计距离均满足 GB 50074—2002《石油库设计规范》的要求，假设储罐区西北角靠近计量间的储罐发生罐内池火灾，并且没有得到及时控制，发生油品扬沸事故。储罐区平面图见图 1，储罐与其他建筑、设施的间距见表 1。

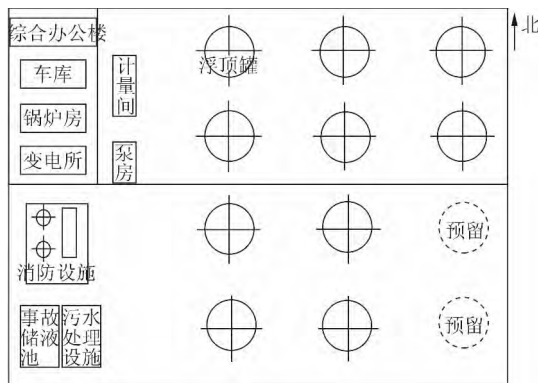


图 1 储备库平面布局图

2.2 计算过程

原油扬沸过程火焰高度为 $H=287 m$ ；总热释放速率为 $Q=3.7106 kJ$ 。

根据上文提供的圆柱模型、点源模型、温度模型的计算公式，对案例中的扬沸火灾辐射强度进行计算，如表 2 所示。其中原油燃烧热为 $41820 kJ/kg$ ；原油燃烧速度为 $0.022 kg/(m^2 \cdot s)$ ；效率值取 0.24；热传导系数取 1。

表 1 储罐与周围建筑、设施间距表

建筑名称	与邻近储罐间距/m	建筑名称	与邻近储罐间距/m
储罐	32.6	锅炉房	83.0
计量间	32.6	变电所	83.0
泵房	32.6	消防设施	41.5
综合办公楼	83.0	炼油成品油罐区	112.6
车库	83.0	炼油中间原料罐区	112.6

表 2 不同计算模型计算结果

与火焰中心距离/m	辐射强度/ kW/m^2		
	圆柱模型	点源模型	温度模型
32.6	289	312	340
40	253	276	304
50	201	207	225
60	165	169	177
70	133	138	145
80	105	110	114
90	80.7	83.1	86.4
100	62.8	64.3	65.2
110	50.3	51.3	51.5
120	40.9	41.4	39.4
130	34.6	34.1	31.7
140	29.7	28.5	25.5
150	25.2	24.1	22.6
160	22.7	20.6	18.7
170	19.1	17.8	14.9
180	17.2	15.5	13.5
190	15.3	13.6	11.5
200	14.4	12.0	9.8
250	8.9	7.0	6.2
300	5.1	4.5	3.7

为了更直观地对比不同计算模型下扬沸火焰辐射强度的不同，将上述三种模型的计算结果在同一平面图中表示出来，进行对比分析，如图 2 所示。

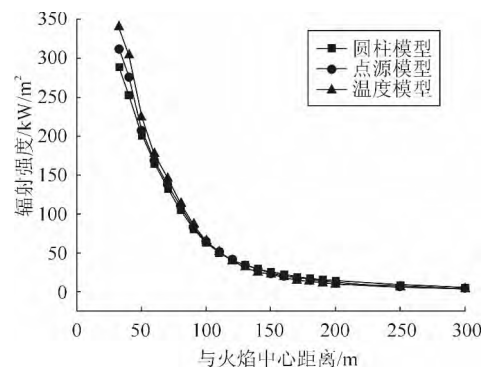


图 2 计算结果对比分析图

2.3 结果分析

根据上文的计算结果,采用曲线回归法,对计算结果进行处理,得出不同计算模型下辐射强度值 Y 与目标位置到火焰中心距离 X 之间关系式。选择 $X = \{32.6 \text{ m}, 40 \text{ m}, 50 \text{ m}, \dots, 190 \text{ m}, 200 \text{ m}, 250 \text{ m}, 300 \text{ m}\}$ 为训练集,进行曲线回归分析,得到曲线拟合如表 3 所示。

表 3 曲线拟合表

计算模型	方程式
圆柱模型	$y = 324\ 200x^{-1.884}$
点源模型	$y = 4\ 512\ 000x^{-2.432}$
温度模型	$y = 1\ 135\ 000x^{-2.432}$

由该拟合方程可以得出已知辐射强度值的目标位置,根据不同热辐射强度与伤害/破坏准则,给定辐射强度值下,目标到池中心的距离 X 如表 4 所示。

表 4 不同模型下伤害目标到池中心距离 X 造成的损失

辐射通量 / $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$	目标位置与火焰中心距离/m			建筑物或设备的 伤害程度、人员的伤害
	圆柱模型	点源模型	温度模型	
37.5	131	128	119	操作设备与建筑物全部损坏,1 min 内人员全部死亡
25.0	152	149	136	木材被点燃的最小辐射强度,设备钢结构变形,人员 10 s 内受重伤,1 min 内人员全部死亡
12.5	220	193	176	塑料熔化的最低辐射强度,人员 10 s 内受轻伤,1 min 内死亡 1%
4.0	356	311	289	较长时间辐射玻璃破碎,人员受辐射 20 s 以上才会有疼痛感,但不会受伤
1.6	512	469	413	无伤害

依据表 4 的计算结果可知,由于与扬沸储罐相邻的所有设备,包括邻近储罐、计量间、泵房、办公楼、车库、锅炉房、消防设施等,间距都小于 119 m。因此,在扬沸火灾下罐区内所有设备都会被损坏,人员的生命安全也会受到直接威胁。

3 总结

(1) 圆柱模型、点源模型和温度模型三种计算结果较为接近,由于缺乏大型原油储罐的试验资料,具体的验证对比还需要通过其他方法作进一步的研究。

(2) 由计算结果可以看出,当热辐射强度值较高时,圆柱形模型计算所得的距离较小,温度模型计算距离较大;当热辐射强度值较低时,圆柱模型计算结果较大,温度模型计算结果较小;点源模型计算结果居中。

(3) 针对实际案例进行计算分析后,可以更直观地发现罐区扬沸事故危害性极大,与扬沸储罐相邻的设备距离都小于 119 m,在此范围内操作设备与建筑物全部损坏,1 min 内人员全部死亡。

参考文献:

- [1] 傅智敏,黄金印,付敏. 烃类流体火灾伤害破坏作用定量分析[J]. 中国安全科学学报,2008,18(9):29-36.
- [2] 谭家磊. 油品扬沸火灾重构与防治对策研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008.
- [3] 胡超,朱国庆,吴维华,等. 池火危害模型化计算分析研究[J]. 消防科学与技术,2011,30(7):570-573.
- [4] Hiroshi Koseki, Yasutada Nastume, Yasaku Iwata, *et al.* A study on lame-scale boilover using crude oil containing emulsified water [J]. Fire Safety Journal,2003,38:665-667.
- [5] Bemd Broeckmann, Hans-Georg Scheeker. Heat transfer mechanisms and boilover in burning water systems[J]. J. Loss. Prev. Ind., 1995,8(3):137-147.
- [6] K S MUDAN. Geometric view factors for thermal radiation hazard assessment [J]. Fire Safety Journal,1987, 12(2):89-96.
- [7] Gueds Soares C, Teixeira A P. Probabilistic modeling of off shore fires [J]. Fire Safety Journal, 2000,34(1):25-45.
- [8] 朱建华,褚家成. 池火特性参数计算及其热辐射危害评价[J]. 中国安全科学学报,2003,13(6):25-28.

Calculation model of radiation damage/injury of large crude oil storage tank boilover accident

CHEN Zhen¹, WANG Ji², LIU Xin-ze³

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. The Chinese people's armed police forces academy, Hebei Langfang 065000, China; 3. Hebei Provincial Administration of Taolinkou Reservoir, Hebei Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Based on analysis of actual case, three different results were gained by the cylindrical model, point source model and temperature model. According to analysis of the results, some conclusions are shown as follow: the three models for radiation intensity of large crude oil storage tank boilover have high credibility. Combined heat radiation injury determination, after boilover fire occurred, all the equipments around tanks will be damaged, and the person will died within 1 min.

Key words: large crude oil storage tanks; boilover fire; flame radiation; thermal radiation intensity; mathematical model

作者简介:陈 阵(1988—),男,河南沈丘人,中国科学院力学研究所助理工程师,主要从事燃烧与火灾的数值模拟研究,北京市海淀区北四环西路 15 号,100190。

收稿日期:2013-09-27