

大型原油储罐区池火灾热辐射危险性分析

李 峡

(兰州市消防支队 兰州 730060)

摘要: 油罐发生火灾时,通常是火势猛,火焰高,对周围的热辐射强度大,是难以扑救的火灾之一。本文对现有的火灾经验模型进行了比较和分析,选择合适的经验公式对油库区油罐火灾的燃烧过程进行了计算。通过分析计算结果,获得了油罐的辐射热场的分布规律以及风速对它影响。同时对现有火灾模型进行了比较和分析,选择基于大涡模拟的 FDS 模型作为计算平台,对油罐火灾的燃烧过程进行了数值模拟。通过分析计算结果,获得了油罐的辐射强度分布等特性的变化趋势。

关键字: 消防 池火灾 辐射热场 FDS 模拟

1 引言

油罐火灾的燃烧特性是预测火灾发展趋势和评估火灾对周围环境影响的基础和前提,国内外的学者对其进行了多方面的研究。Khudiakov 和 Blinov^[1]在 1957 年采用 4 种不同的燃料进行了池火实验研究,实验油池直径范围从小于 10m 直到 22m。通过实验研究发现燃料的燃烧速度并不取决于油池的大小。Hottel^[2]研究了他们的实验数据后,认为在紊流池火灾中,火焰主要是通过热辐射的形式向燃料表面传递热量。Hiroshi Koseki^[3]对不同燃料的辐射热流开展了研究,总结出辐射热随油罐直径的变化规律。Hiroshi Koseki^[4]在油罐直径为 6m 的庚烷池火燃烧实验中采用 60 只热电偶对其火焰温度场进行了测量,得到了火焰的等温线图。西班牙的 Eulalia Planas - Cuchi^[5]1989 年通过对面积为 4m² 的乙烷油池和面积为 12m² 的煤油油池燃烧实验的研究,得出了一个火焰温度随时间和轴向高度变化的关系式。HAMINSA 和 FISHER^[6]在直径为 0.3m 的油盘上分别对甲苯、庚烷和甲醇进行了实验。实验结果表明,小直径油池火向燃料表面辐射的热流沿油罐半径方向是均匀的,其热流强度大约在 30kW/m² 左右,根据油品种类的不同而有所差异。Gritz 和 Nicoletter^[7]等人通过对大直径的油罐实验研究得出其值是不均匀的,在内部贫氧区其热流强

度为 20kW/m²,而主火焰区其热流强度为 100 kW/m²,差别很明显。Alger^[8]等人测量研究了直径为 3m 的甲醇罐,研究发现辐射热从罐中心到罐边缘的数值逐渐减小,推断可能是由于火焰不同部位的热传递方式不同而造成的,罐中心的热量以辐射为主,而周围的热量以对流为主。

然而,由于油罐火灾实验的特殊性,加之资金、安全、环保等因素的限制,直接进行大型实验是非常困难的。因此利用经验模型和计算机模拟来计算油罐燃烧中各种特性参数的变化成为研究油罐火灾的重要手段。本文利用经验模型和计算机模拟对大型原油储罐区池火灾的辐射特性进行计算。

2 计算场景

该罐区共建设 60 × 10⁴ m³ 油罐,其中建设 3 座 10 × 10⁴ m³ 罐及 2 座 15 × 10⁴ m³ 罐,本文考察的是原油储罐,罐体高度为 22m,体积为 10 × 10⁴ m³,燃烧物质为原油,参考油库所处区域常年的气象条件,有风条件下的风速设为 8m/s,环境温度为 29.5℃。罐体材料为钢板,钢板的导热系数为 49.8W/(m·K),比热容为 0.47kJ/(kg·K),热扩散率为 1.77E-5,材料厚度为 10cm;地面材料为混凝土地面,导热系数为 1.0W/(m·K),比热容为 0.8kJ/(kg·K),热扩散率为 5.7E-7,材料厚度为 20cm。

3 经验模型

国外许多研究者对池火灾进行过试验研究,并取得了丰富的试验数据。分析这些数据,在一定假设的基础上,提出了各种池火灾模型和经验公式,包括火焰尺寸、火焰表面热通量、热辐射在空间的传播规律等。这些经验公式都有各自的适用范围和适用条件,计算结果误差也较大。

3.1 油池火焰几何形状

池火灾危险性分析中首要参量是火焰的平均高度,火焰高度有许多关系模型^[9]。

(1) Thomas 基于实验以及量纲分析,得到了湍流火焰的平均高度的关系模型。计算式为:

$$H/D = 42 (m''/\rho_a \sqrt{gD})^{0.61} \quad (\text{不考虑风速}) \quad (1)$$

$$H/D = 55 (m''/\rho_a \sqrt{gD})^{0.67} (\omega^*)^{-0.21} \quad (\text{考虑风速}) \quad (2)$$

式中: H ——火焰高度; D ——池直径; m'' ——为燃料燃烧速率;

g ——引力常数; ω^* ——无量纲风速, $\omega^* = \omega_w / (gm''D/\rho_w)^{1/3}$, ω_w 为 10m 高时的风速。

(2) Heskestad 对广泛的实验数据进行数学处理,得到了下面的火焰高度公式:

$$H/D = -1.02 + 0.230Q_c^{2/5}/D \quad (3)$$

$$(7 \leq Q_c^{2/5}/D \leq 700)$$

式中: Q_c ——热释放速率, kJ/s; $Q_c = 0.25 \times$

$$3.14D^2 \times \eta_1 \times H_c \times m''$$

D ——池直径, m; η_1 ——燃烧效率;

H_c ——燃烧热, kJ/kg; m'' ——燃料燃烧速率, kg/s · m²;

(3) Brotz 根据池火灾的实验结果推导了下面的火焰高度公式:

$$H/D = 1.73 + 0.33D^{-1.43} \quad (4)$$

(4) Moorhouse 于 1982 年根据实验确定有风时 [10m 高度, 并且 $u_w \geq 1$ (m/s) 时] 的关系模型为:

$$H/D = 6.2 (m''/\rho_a gD)^{0.254} (u_{10}^*)^{-0.044} \quad (5)$$

式中: H ——火焰高度, m; D ——池直径, m; ρ_a ——空气密度, kg/m³;

m'' ——为燃料燃烧速率, kg/(m² · h); g ——引力常数; u_{10}^* ——无量纲风速 (高度为 10m 处)。

3.2 火焰表面热辐射通量

火焰表面的热辐射通量是指单位时间,单位火焰表面积辐射出的热能。它与燃料性质、燃烧充分程度、火焰几何形状、尺寸及火焰表面位置等因素有关,准确值应由实验确定。Schneider 等人建议根据池直径的不同选取不同的火焰表面辐射通量 E 。而在荷兰政府的一份研究报告中,则假定能量从圆柱形火焰的顶部和侧面向四周均匀的辐射,按下式计算表面的辐射通量^[10]:

$$E = Q\eta_2 / (0.25\pi D^2 + 3.14DH_f) = 0.047\text{MW}/\text{m}^2 \quad (6)$$

3.3 热辐射传播

油罐火的危险性分析需要知道目标接受的热辐射通量 q , 为此就必须知道热辐射在空气中的传播规则,对于圆柱形火焰,热辐射在空气中的传播用下式来表达^[11]:

$$q = \tau EF \quad (7)$$

式中: τ 为大气透射率,可用 $\tau = 1 - 0.058 \ln(R)$; F 为视角系数。

无风状态下,火焰的视角系数 $F_{1 \rightarrow 2}$ 由下面这个假定辐射热源是圆柱体的方程决定,其视角系数用下式来表示:

$$F_{1 \rightarrow 2, H} = \left[\frac{(B - \frac{1}{S})}{\pi \sqrt{B^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(B+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}} - \frac{(A - \frac{1}{S})}{\pi \sqrt{A^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \right] \\ F_{1 \rightarrow 2, V} = \left[\frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) - \frac{h}{\pi S} \right] \tan^{-1} \\ \sqrt{\frac{(S-1)}{(S+1)}} + \frac{Ah}{\pi S \sqrt{A^2 - 1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \\ F_{1 \rightarrow 2} = \sqrt{F_{1 \rightarrow 2, V}^2 + F_{1 \rightarrow 2, H}^2} \quad (8)$$

$$\text{式中: } A = \frac{h^2 + S^2 + 1}{2S}; B = \frac{S^2 + 1}{2S}; S = \frac{2R}{D};$$

$h = \frac{2H_f}{D}$; R 表示火焰中心和目标物体之间的距离, m; H_f 表示火焰的高度, m; D 表示火焰的直径, m。

在有风的情况下,对于处在油池底面的目标物体时,其与火焰之间的视角系数的表达式如下:

$$\pi F_{1 \rightarrow 2, H} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{\frac{b+1}{b-1}}}{\pi \sqrt{B^2 - 1}} -$$

$$\frac{a^2 + (b + 1)^2 - 2(b + 1 + a \sin \theta)}{\sqrt{AB}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{A}{B}} \times \sqrt{\frac{b-1}{b+1}} + \frac{\sin \theta}{\sqrt{C}} \left[\tan^{-1} \frac{ab - (b^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{b^2 - 1} \sqrt{C}} \right] + \tan^{-1} \frac{(b^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{b^2 - 1} \sqrt{C}} \quad (9)$$

$$\pi F_{1 \rightarrow 2, v} = \frac{a \cos \theta}{b - a \sin \theta} \times \frac{a^2 + (b + 1)^2 - 2b(1 + a \sin \theta)}{\sqrt{AB}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{A}{B}} \sqrt{\frac{b-1}{b+1}} + \frac{\cos \theta}{\sqrt{C}} \left[\tan^{-1} \frac{ab - (b^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{b^2 - 1} \sqrt{C}} \right] + \tan^{-1} \frac{(b^2 - 1) \sin \theta}{\sqrt{b^2 - 1} \sqrt{C}} - \frac{a \cos \theta}{b - a \sin \theta} \tan^{-1} \sqrt{\frac{b-1}{b+1}}$$

$$\pi F_{1 \rightarrow 2} = \sqrt{F_{1 \rightarrow 2, H}^2 + F_{1 \rightarrow 2, v}^2} \quad (9)$$

$$a = \frac{H_f}{r} \quad b = \frac{R}{r}$$

式中: $A = a^2 + (b + 1)^2 + 2a(b + 1) \sin \theta$; $B = a^2 + (b - 1)^2 - 2a(b - 1) \sin \theta$; $C = 1 + (b - 1)^2 \cos \theta$;

H_f 表示倾斜圆柱体 (火焰) 的高度 (m); r 表示圆柱体 (火焰) 的半径 (m); R 表示油池火的中心与目标物体边界之间的距离 (m); θ 表示倾斜火焰的倾斜角度 (弧度)。

通过前面一系列关于火焰几何形状和尺寸、火焰表面的热辐射通量、热辐射的传播以及视角系数等经验模型, 计算设定的假想火情, 结果见表 1 所示。

表 1 火灾危险性分析热辐射结果列表

| 与油罐中心距离 R/D | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 |
|----------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 场景 1 火灾危险性分析热辐射结果列表 | | | | | |
| 视角系数 F | 0.1294 | 0.0480 | 0.0248 | 0.0151 | 0.0102 |
| 目标接受热通量 q/kWm^{-2} | 4.5361 | 1.6296 | 0.8225 | 0.4916 | 0.3270 |
| 场景 2 火灾危险性分析热辐射结果列表 | | | | | |
| 视角系数 F | 0.2988 | 0.2017 | 0.1588 | 0.1400 | 0.1324 |
| 目标接受热通量 q/kWm^{-2} | 10.4743 | 6.8476 | 5.2666 | 4.5580 | 4.2447 |

由表 1 可知, 在靠近油罐区域, 视角系数随着 R/D 的增加而急剧减少。无风情况下 $R/D = 1$ 处视角系数为 0.1294, 而在 $R/D = 1.5$ 处的视角系数为 0.0480; 当 R/D 增大到 2.5 之外的区域时, 视角系数的变化渐趋缓慢, 在 $R/D = 3$ 处视角系数为 0.0102。在油罐直径相同情况下, 距油罐中心相同距离处的视角系数, 有风情况比无风情况大得多。例如无风情况下 $R/D = 1$ 处的视角系数为 0.1294, 而在有风情况下视角系数为 0.2988。

图 1 为辐射强度随 R/D 变化曲线, 从图中可以看出无风情况与有风情况下, 油罐燃烧产生的辐射强度均随着距离 R 的增大呈指数衰减的规律, 且有风条件接受辐射强度较大。

4 FDS 数值模拟

图 2 ~ 图 7 分别为 $X = 80m$ 、 $Y = 75m$ 、 $Z = 25m$ 截面的辐射强度分布。从图中可以看出, 有风时

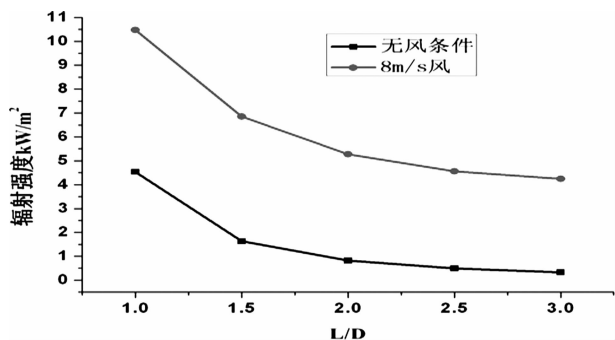


图 1 辐射强度随 R/D 的变化规律

$X = 80m$ 、 $Y = 75$ 、 $Z = 25m$ 截面的最高辐射强度保持不变为 $150kW/m^2$ 左右。而无风时 $X = 80m$ 、 $Y = 75$ 、 $Z = 25m$ 截面的最高辐射强度分别为 $600kW/m^2$ 、 $750kW/m^2$ 和 $200kW/m^2$ 。

图 8 ~ 图 15 分别为无风和有风条件下火焰、防火堤、邻近管壁及侧面防火堤上方不同高度处的辐射强度变化曲线。有风时火焰上方辐射强度较低, 且

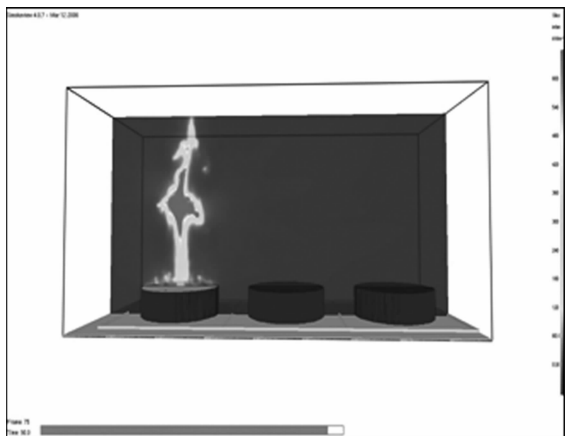


图2 $X = 80\text{m}$ 截面辐射分布图 (无风)

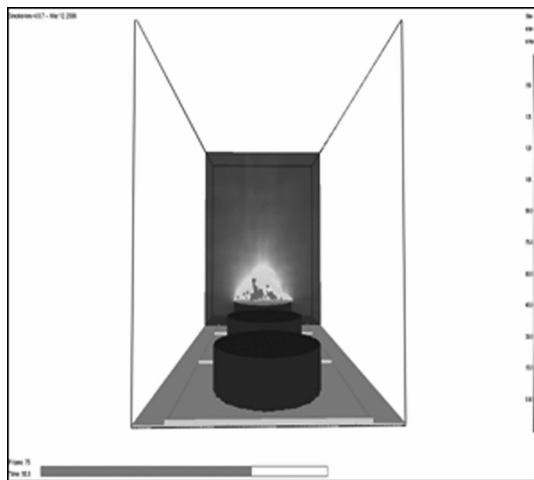


图5 $Y = 75\text{m}$ 截面辐射分布图 (8m/s 风)



图3 $X = 80\text{m}$ 截面辐射分布图 (8m/s 风)

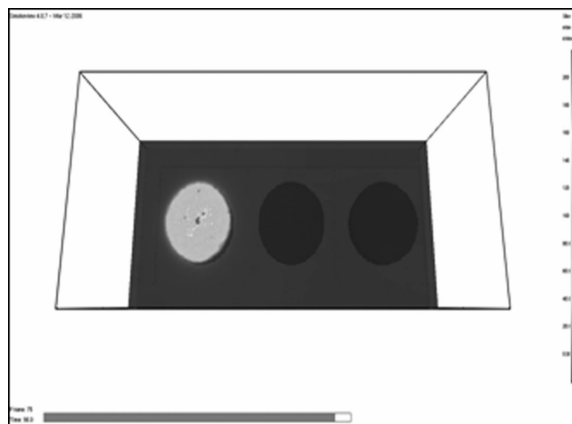


图6 $Z = 25\text{m}$ 截面辐射分布图 (无风)

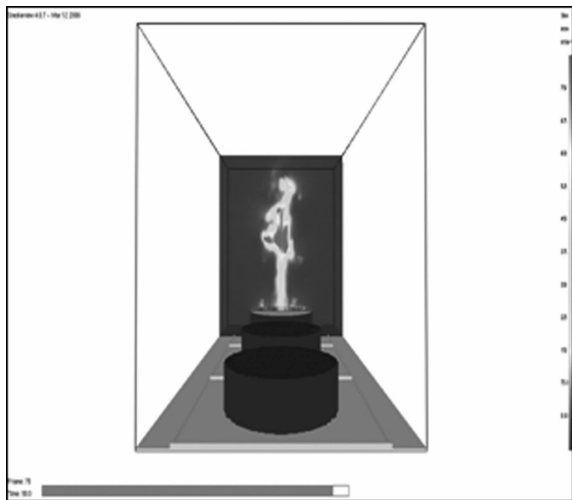


图4 $Y = 75\text{m}$ 截面辐射分布图 (无风)

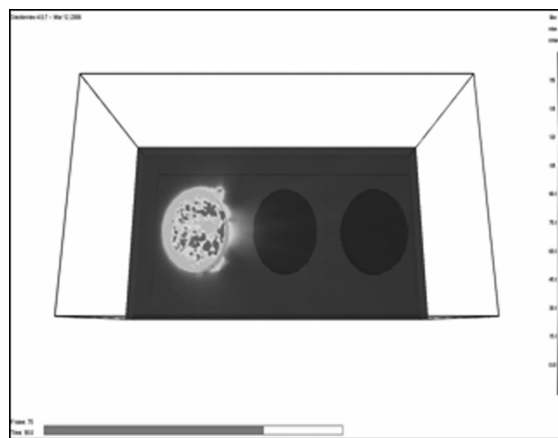


图7 $Z = 25\text{m}$ 截面辐射分布图 (8m/s 风)

达到某一高度位置后辐射强度基本不变接近于零；而无风条件时火焰上方辐射强度大，且随着高度的增加辐射强度先逐渐增大，到达最大值后随着高度

的增加辐射强度迅速降低；有风条件下防火堤、临近罐壁处的辐射强度较无风条件时较大，同样随着高度的增加辐射强度先逐渐增大，到达最大值后随着高度的增加辐射强度迅速降低；有风与无风条件

时的差别主要是由于火焰倾斜增大辐射视角系数引起的。而对于侧面的防火堤，有风与无风条件时辐射强度相差不大。

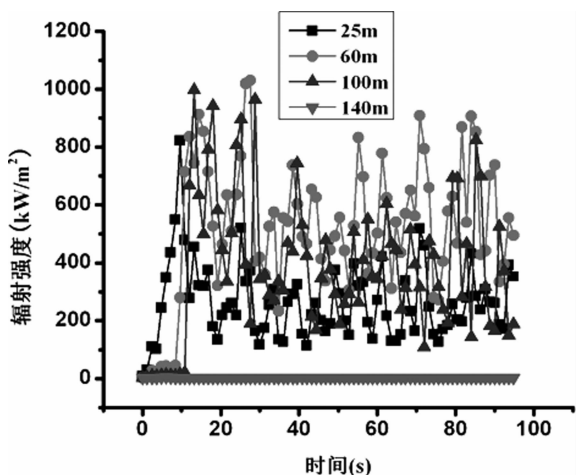


图8 火焰上方不同高度辐射分布 (无风)

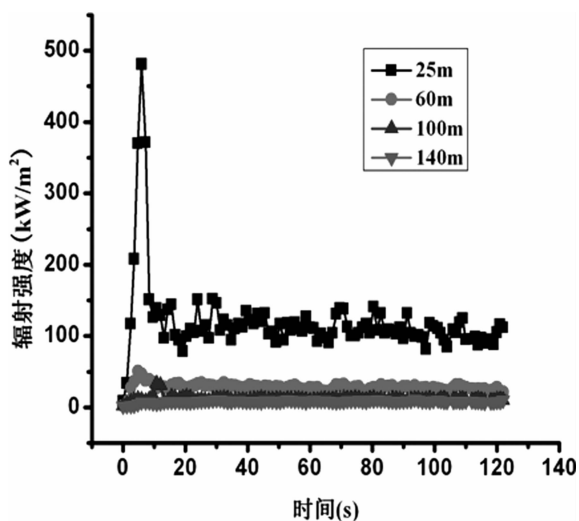


图9 火焰上方不同高度辐射分布 (有风)

图16与17分别是无风和有风条件下不同高度处辐射强度随 L/D 的变化曲线图。由图可知，在较低位置时无风条件与有风条件的辐射强度基本不变；较高位置时无风条件和有风条件油罐燃烧产生的辐射强度均随着 L/D 的增大呈指数衰减的规律，且有风条件下衰减速度更快，最终都达到 2.0 kW/m^2 ，与理论计算值吻合较好。

5 主要结论

(1) 利用经验模型对油罐火灾的热辐射危险性进行了分析，计算了油罐火灾的火焰高度，火焰对外辐射强度分布等。计算结果表明油罐燃烧产生

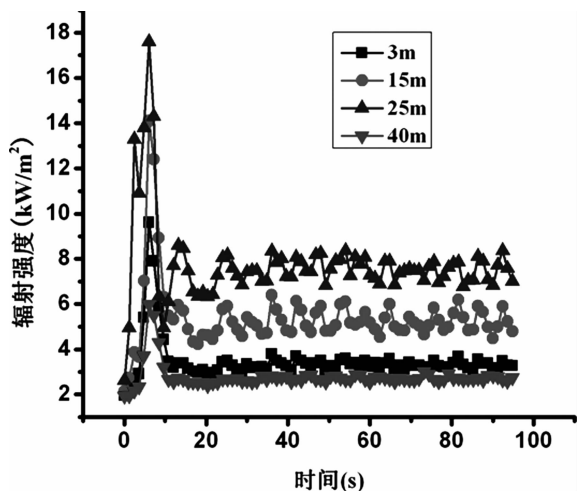


图10 防火堤不同高度辐射分布 (无风)

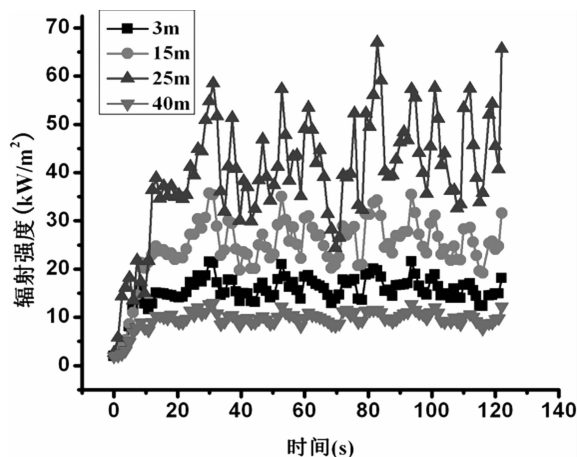


图11 防火堤不同高度辐射分布 (有风)

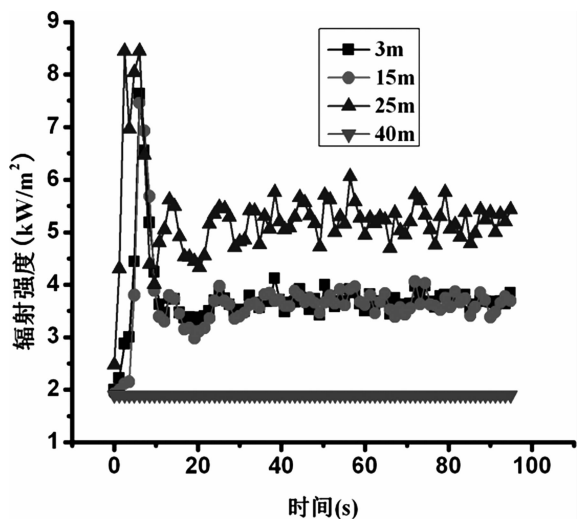


图12 邻罐壁处不同高度辐射分布 (无风)

的辐射强度随着距离的增大呈指数衰减的规律。有

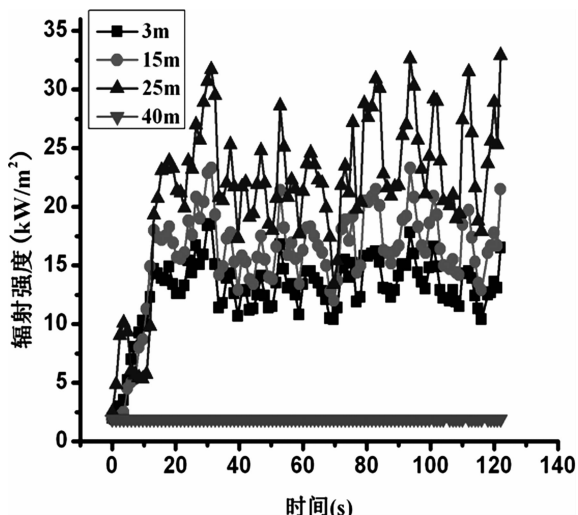


图 13 邻罐壁处不同高度辐射分布 (有风)

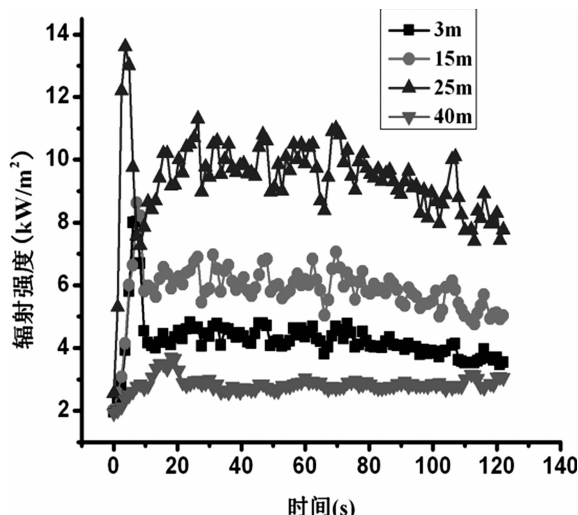


图 15 侧面防火堤不同高度辐射分布 (有风)

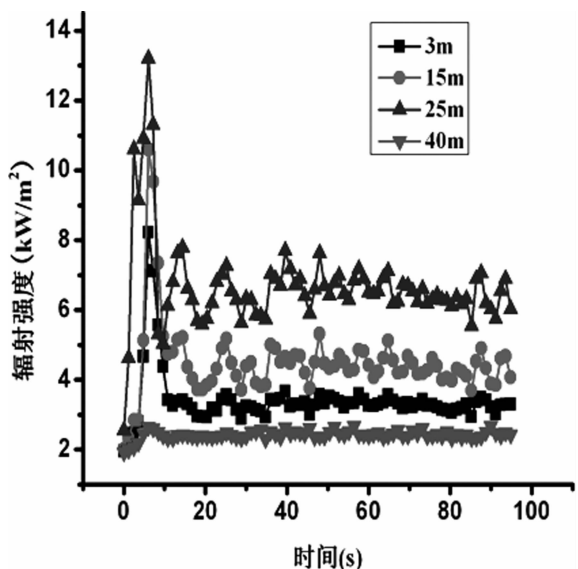


图 14 侧面防火堤不同高度辐射分布 (无风)

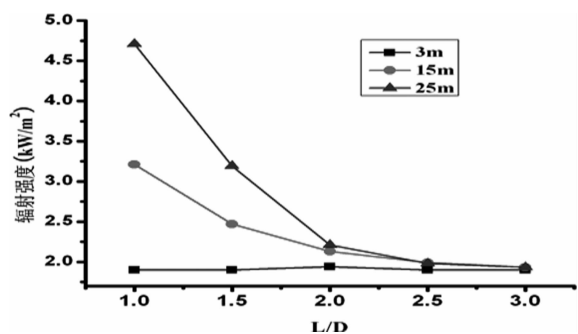


图 16 辐射强度随 L/D 变化曲线 (无风)

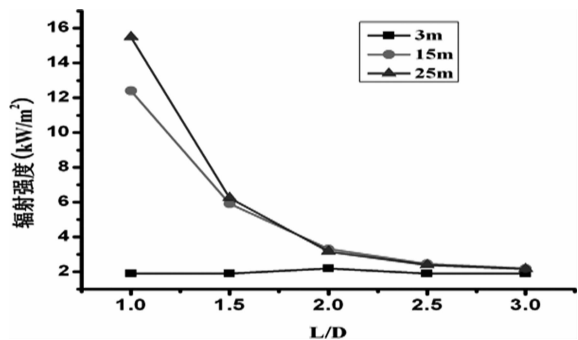


图 17 辐射强度随 L/D 变化曲线 (有风)

风情况下,下风向处接受到的热辐射强度显著增加。有风情况下油罐燃烧危险性明显增强。

(2) 利用 FDS 模型模拟油罐燃烧的过程,合理设置边界条件和初始条件,分析了油罐燃烧产生的热辐射强度。计算结果表明,在较低位置时无风条件与有风条件的辐射强度基本不变;较高位置时无风条件和有风条件油罐燃烧产生的辐射强度均随着 L/D 的增大呈指数衰减的规律,且有风条件下衰减速度更快,最终都达到 2.0 kW/m^2 。

参考文献

[1] Blinov, V. I., Khudyakov, Gn., Certain Laws Governing Diffusion Burning Of Liquids (R), Academiai Nauk, Dokla-

dy113,1094,USSR,1957

[2] Hotel, H. C., Review: Certain laws governing the diffusive burning of liquids, by Blinov and Khudiakov (1957) [R]. Fire Research Abstracts and Review, 1959, 41-43
 [3] Hiroshi Koseki, Yusaku Iwata. Tomakomai Large Scale Crude Oil Fire Experiments [R]. Fire Technology, 2000, 36 (1), 24-38
 [4] Hiroshi Koseki. Radiation properties and flame structure of large hydrocarbon pool fires [R]. Fire Research Institute, 3

- 14 - 1 Nakahara Mitaka, Tokyo 181 Japan, 2000

- [5] Eulalia Planas - Cuchi, Joaquim Casal, Modelling Temperature Evolution in Equipment Engulfed in a Pool Fire [J]. Fire Safety Journal, 1998, 30, 251—268
- [6] A. Hamins, S. J. Fischer, T. Ashiwagi, E. Klassen, J. P. Gore. Heat Feedback to the Fuel Surface in Pool Fires [J]. Combustion Science and Technology, 1994, 97(1 - 3), 37 - 62
- [7] Louis A. Gritzo, Edward A. Boucheron. Fuel Temperature Distribution and Burning Rate in Large Pool Fires [C], Gaithersburg, MD. October 28 - 31, 1996
- [8] Anthony Hamins, Takashi Kashiwagi, and Robert R. Buch, Characteristics of pool fire burning [C]. Proceedings. ASTM STP 1284. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, PA. Toten, G. E., Reichel, J., Editors., 1996
- [9] Rew P. J., Hulbert W. G., Deaves D. M. Modeling of Radiation from External Hydrocarbon Pool Fires. Chemical Engineering [J]. 1997, (11): 81—89
- [10] 刘万福, 田亮, 薛岗等. 着火油罐辐射热传递过程实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25 (2): 271 - 274
- [11] 宇德明, 冯长根, 曾庆轩等. 热辐射的破坏准则和池火的破坏半径 [J], 中国安全科学学报, 1996, 6 (2): 5 - 10