

油品扬沸火灾特征参量实验研究

谭家磊¹, 宗若雯^{1,2}, 廖光焯¹, 刘益民¹, 支有冉¹

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027;

2. 中国科学技术大学苏州研究院, 苏州市城市公共安全重点实验室, 江苏苏州 215123)

摘要:大型储油罐区内发生扬沸火灾时危害巨大,其危害程度与扬沸火灾时油品的燃烧特征参量有密切的关系.建立了小型扬沸火灾模拟实验台和数据采集系统,对混合原油和混合油品(煤油与机油)两种油品,在不同直径的小尺度油罐内,扬沸发生前后燃烧速率(线性燃烧速率和质量燃烧速率)、热释放速率、火焰温度、火焰热辐射和高度的变化规律进行了实验研究.发现这些特征参量在扬沸前后都发生了突变,其中扬沸阶段的燃烧速度、热释放速率和火焰辐射为平均值的几倍甚至几十倍.在对这些特征参量的突变进行定性和定量分析的基础上对引起突变的原因进行了分析,可为防控全尺度油罐扬沸火灾的危害提供参考依据.

关键词:扬沸;燃烧速度;热释放速率;热辐射;火焰高度

中图分类号:X937 **文献标识码:**A

Characteristic parameter analysis of boilover fires

TAN Jia-lei¹, ZONG Ruo-wen^{1,2}, LIAO Guang-xuan¹, LIU Yi-min¹, ZHI You-ran¹

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China,

and Suzhou Urban Public Safety Laboratory, Suzhou 215123, China)

Abstract: Boilover fires in large-scale oil storage tanks can lead to significant losses, and the damage degree of boilover fires is closely related to combustion characteristic parameters. A series of small-scale boilover experiments were carried out, and the variety regulation of parameters including burning velocity (linear burning rate and mass burning rate), heat release rate, flame temperature, radiation and flame height in the combustions of mixed crude oil and mixed oil(kerosene and lubrication oil) during and before boilover were investigated. The experimental results show that these parameters of boilover mutate, so that the values of burning velocity, heat release rate and radiation during boilover can be several times and even dozens of times of those mean values. Based on the qualitative and quantitative analysis, the reason for the mutation was discussed, which can provide a theoretical basis for controlling the loss of boilover during full-scale oil tank fires.

Key words: boilover; burning velocity; heat release rate; radiation; flame height

0 引言

油罐扬沸火灾是油罐火灾中一种突变的灾害现象,它难以扑灭、危害巨大.油罐发生扬沸火灾时火势猛,火焰高,对周围的热辐射强度非常大,直接威胁周围物体和邻近油罐.因此,研究油罐扬沸火灾发生、发展的内在规律,从而揭示油罐扬沸火灾的危害程度,对于保障国家和人民生命财产安全是十分必要而有现实意义的.油罐扬沸火灾猛烈程度与油品燃烧时的特征参量密切相关,因此,掌握油品燃烧时特征参量的变化对于防控油罐扬沸火灾的危害有十分重要的意义.

国内外的研究主要是对非扬沸火灾中,油品的燃烧速度、火焰高度、火焰跳动频率、平均温度和辐射热分布等特征参量进行实验研究和理论分析^[1~4];另外还对扬沸火灾中油品沸溢喷溅时火焰的热辐射强度^[5]、扬沸火灾时火焰的温度^[6~8]、油品的燃烧速率^[9,10]、热释放速率和火焰高度^[11]进行了实验研究和理论分析.通过对国内外的研究分析发现,缺少把扬沸火灾时油品燃烧特征参量(燃烧速度、热释放速率、火焰热辐射、火焰高度变化)作为整体而进行的系统研究.因此本文以小尺度实验为基础,对扬沸火灾时的线性燃烧速率、质量燃烧速率、热释放速率、火焰温度、火焰热辐射和火焰高度变化进行了实时的实验研究,得到了这些特征参量的变化规律,可为防控油罐扬沸火灾的危害提供理论参考.

1 实验装置

图1为实验中建立的油品扬沸特征参量测量系统,使用的油罐内径分别为0.1 m,0.2 m和0.3 m,壁面厚度为3 mm,材料为普通碳钢.使用的热电偶为K型镍铬-镍硅铠装热电偶,型号为WRNK-331,其中热电偶可以通过支架上的滑动螺母调节高度,热电偶之间的距离为2 cm;红外热像仪为SAT-HY6850型红外热像仪,属于非制冷焦平面红外热像仪;使用的电子天平型号为Sartorius LA64001S,精度为0.1 g,平均响应时间为1.5 s.

实验中油品线性燃烧速率的测量原理是根据静水力学原理,在单位时间内,油面的下降高度 ΔH_o 与水面的下降高度 ΔH_w 的关系满足下式^[2]:

$$\Delta H_o = \frac{\rho_w}{\rho_o} \Delta H_w \quad (1)$$

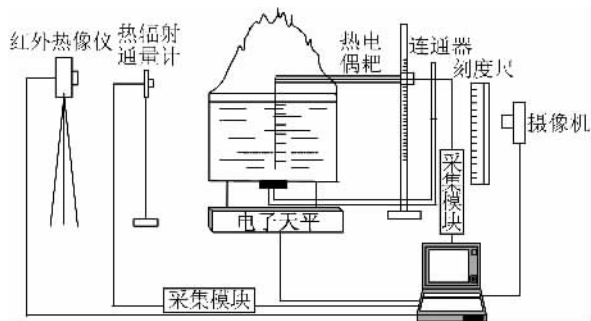


图1 特征参量测量系统示意图

Fig. 1 Sketch of characteristic parameters measuring system

式中, ρ_w 为水的密度; ρ_o 为油品密度,混合原油(杰拉索原油24%+达混原油5%+胜利原油71%)在20℃时密度为900 kg/m³,混合油品(煤油与机油,体积比1:1)在20℃时密度为845 kg/m³.

2 扬沸火灾中油品燃烧特征参量测量结果及讨论

2.1 油品线性燃烧速率测量

描述扬沸火灾猛烈程度的一个特征参数就是燃烧速度,它表示单位时间内烧掉油品的数量.为了预测油品在燃烧过程的各项燃烧特性及变化规律,需要掌握油品从开始燃烧到最终熄灭所经历的整个历程中参数的变化.

图2和图3分别为0.1 m和0.2 m罐内含2 cm水垫层时,混合油品(煤油与机油)和混合原油(油层厚度都为3 cm)燃烧时的线性燃烧速率.

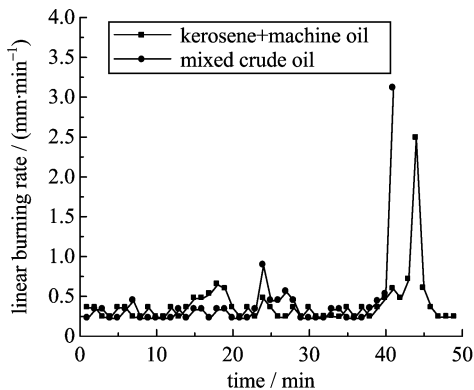


图2 油品线性燃烧速率(0.1 m罐)

Fig. 2 The linear burning rate of oil (0.1 m tank)

实验测得两种油品在两种罐内不同阶段的线性燃烧速率结果表明,油品在扬沸阶段的燃烧速率明显增大;其中混合原油增大最为明显,其在0.1 m和0.2 m罐内扬沸阶段与扬沸前的平均线性燃烧

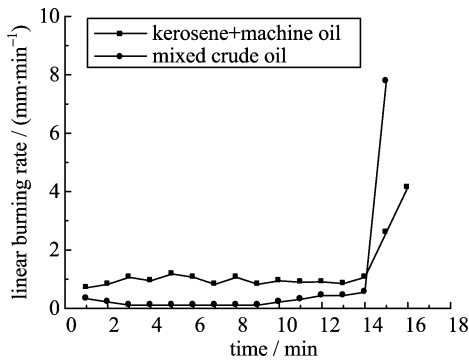


图 3 油品线性燃烧速率(0.2 m 罐)

Fig. 3 The linear burning rate of oil (0.2 m tank)

速率之比分别为 11 和 25.6.

2.2 油品质量燃烧速率测量

质量燃烧速率为表征燃烧速度的另一个特征变量,图 4 和图 5 为 0.1 m 和 0.3 m 罐内(1 cm 水层 3 cm 油层)两种油品燃烧时质量燃烧速率曲线.从图 4 和图 5 中可以得到,在准稳态燃烧阶段混合油品(煤油与机油)的质量燃烧速率要大于混合原油的质量燃烧速率,但是在扬沸阶段时混合原油的质量燃

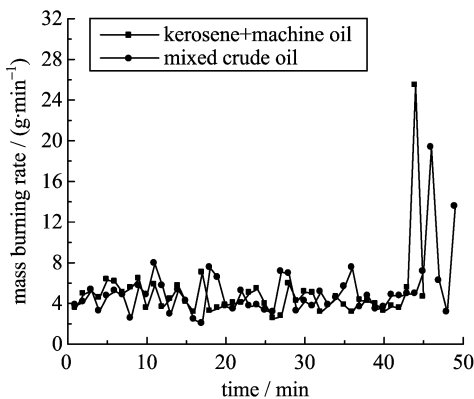


图 4 油品质量燃烧速率(0.1 m 罐)

Fig. 4 The mass burning rate of oil (0.1 m tank)

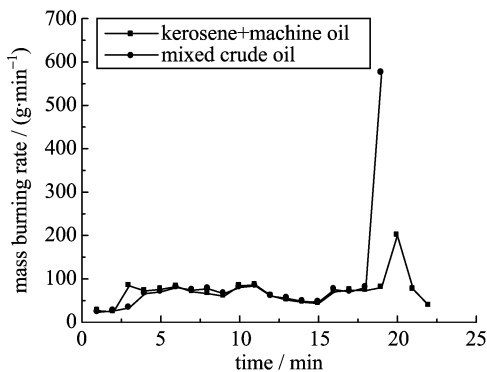


图 5 油品质量燃烧速率(0.3 m 罐)

Fig. 5 The mass burning rate of oil (0.3 m tank)

烧速率远大于混合油品(煤油与机油)的质量燃烧速率.通过实验发现,扬沸阶段的质量燃烧速率会随着油品粘度(混合油品(煤油与机油)20 °C 时的粘度在 10.5 mPa·s 左右,混合原油 20 °C 时的粘度为 19~22 mPa·s)的增大而增大.

在小尺度扬沸火灾中影响油品燃烧速率的因素很多,如油罐直径、水层厚度、水层温度、风速和罐壁有无隔温层等,其中影响最大的是油罐直径.图 6 和图 7 为实验测得 0.1 m,0.2 m 和 0.3 m 罐内具有 2 cm 水垫层时,混合原油(油层厚度为 4 cm)的质量燃烧速率曲线,在扬沸阶段质量损失分别为 15 g,428 g 和 574 g,质量损失中大部分油品参与到燃烧中,其中还有一部分被喷溅到较远处;说明在小尺度范围内,扬沸阶段的油品质量燃烧速率随着罐径的增大而增大.

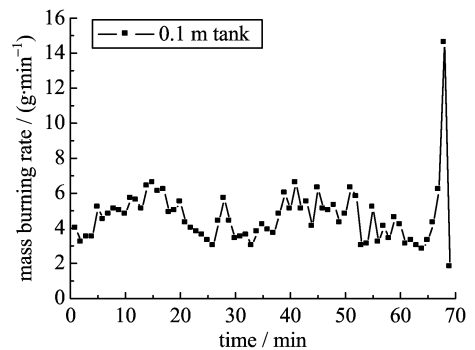


图 6 混合原油质量燃烧速率(0.1 m 罐)

Fig. 6 The mass burning rate of mixed crude oil (0.1 m tank)

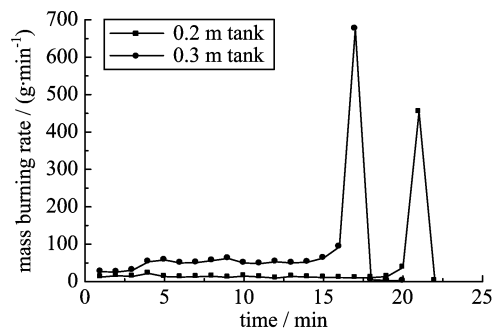


图 7 混合原油质量燃烧速率(0.2 和 0.3 m 罐)

Fig. 7 The mass burning rate of mixed crude oil (0.2 and 0.3 m tank)

2.3 油品燃烧热释放速率变化

燃烧速率、热释放速率和燃烧效率是描述油罐火灾火源的三个基本参数.热释放速率(火源功率)表征油罐火的强度,为单位时间内油罐火向外释放的热量,也可用单位面积的热释放速率来表示.燃烧速

率的变化必然会引起热释放速率的变化,利用 SFPE 文献[12]中计算池火热释放速率的公式,可以计算得到混合原油在不同阶段的热释放速率:

$$Q = m'' \Delta H_c (1 - e^{-k\beta D}) A_f \quad (2)$$

其中, $m''/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 为单位面积的质量燃烧速率; $\Delta H_c/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$ 为燃烧热值(混合原油为 $42\,600 \text{ J/g}$); A_f/m^2 为油罐火的面积; $k\beta$ 为经验系数(混合原油系数为 2.8); D 为油罐直径。

把图 6 和图 7 中的油品质量燃烧速率实验值代入公式(2)中,可以得到油品在不同时刻的热释放速率 HRR 值,结果如图 8 和图 9 所示。从图 8 和图 9 可以得到,油品的热释放速率不同于普通池火的热释放速率,存在一个突然上升的突变过程。从计算得到的结果可知,最大热释放速率与平均热释放速率的比值,在小尺度范围内也随着罐径的增大而增大。

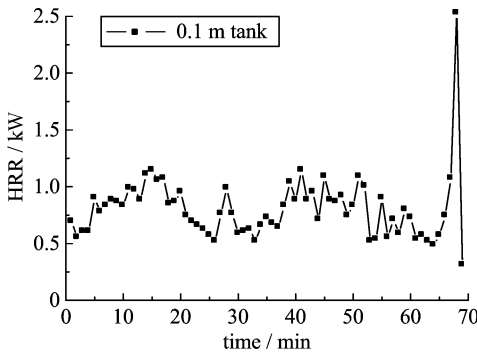


图 8 混合原油热释放速率(0.1 m 罐)

Fig. 8 The heat release rate of mixed crude oil (0.1 m tank)

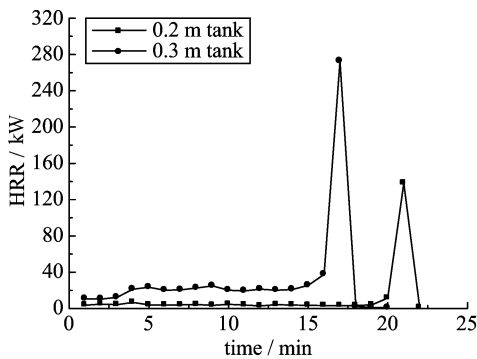


图 9 混合原油热释放速率(0.2 和 0.3 m 罐)

Fig. 9 The heat release rate of mixed crude oil (0.2 and 0.3 m tank)

2.4 油品燃烧时火焰温度

扬沸是火灾中的一种突变灾害现象。从油品燃

烧时的燃烧速率来看,多于稳定燃烧时几倍甚至几十倍的油品在短时间内参与到燃烧过程中,势必会造成火焰温度的变化。

图 10 为 0.2 m 罐内含 2 cm 水垫层时,混合原油(油层厚度为 4 cm)燃烧时的火焰温度曲线。从图 10 可以得到,火焰温度在扬沸发生时有一个突然上升和急剧下降的过程,上升幅度大约在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。火焰温度急剧上升的过程是由于扬沸发生时燃烧速率突变,大量的油品短时间内燃烧造成火焰温度的突变。

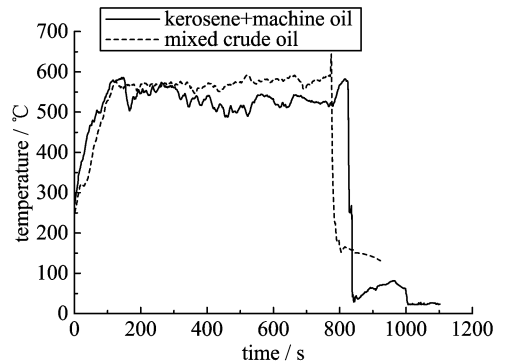


图 10 混合原油燃烧火焰温度(0.2 m 罐)

Fig. 10 The flame temperature of mixed crude oil (0.2 m tank)

为了观测扬沸时整个火焰温度场的变化,采用非接触式红外测温技术对火焰温度进行了测量,它的优点是热电偶等点式测量方法相比,不破坏火焰温度场的结构。在测量之前首先用热电偶和红外热像仪对不同油品在不同罐径内燃烧时的火焰发射率进行了标定,结果如图 11 所示。图 12(a)和 12(b)为 0.1 m 罐内混合原油在准稳态燃烧阶段和扬沸阶段火焰的温度场等温线图,可以得到:扬沸阶段火

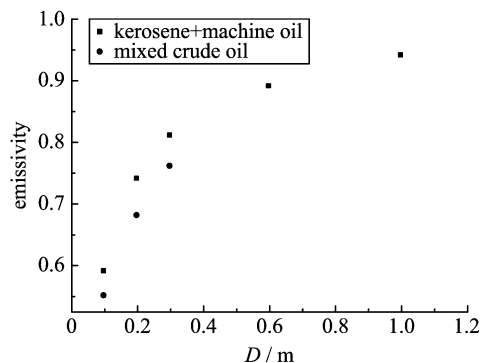


图 11 油罐火火焰发射率

Fig. 11 The flame emissivity of tank fire

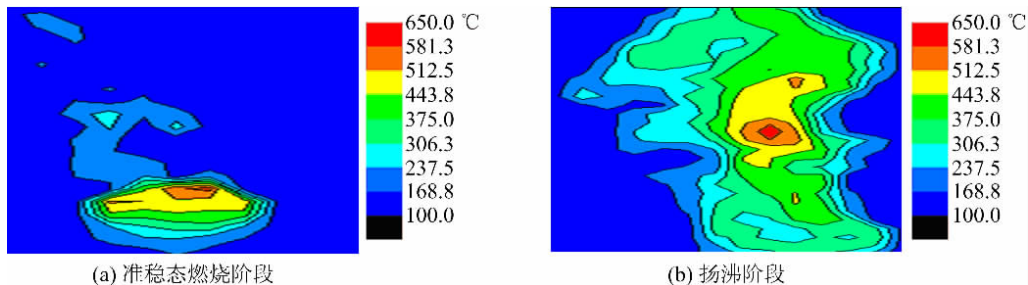


图 12 0.1 m 罐内混合原油准稳态燃烧和扬沸阶段的火焰温度场

Fig. 12 The flame temperature field of mixed crude oil (0.1 m tank) on quasi-steady combustion (a) and on boilover (b)

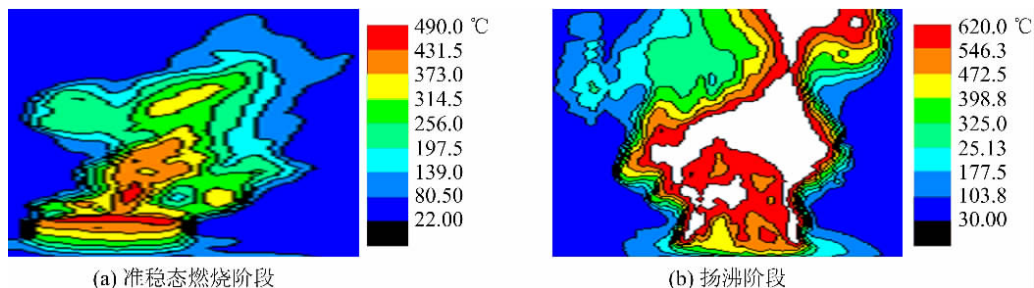


图 13 0.3 m 罐内混合原油准稳态燃烧和扬沸阶段的火焰温度场

Fig. 13 The flame temperature field of mixed crude oil (0.3 m tank) on quasi-steady combustion (a) and on boilover (b)

焰明显不同于准稳态燃烧时的火焰,火焰的中上部存在一个高温区域;火焰最高温度区域的形成是由于扬沸时大量油品被抛入火焰,油品在火焰中迅速分解形成蒸气,油蒸气与火焰卷吸的空气在中上部剧烈燃烧,从而在火焰的中上部形成高温区域.通过实验发现形成高温区域的位置与油水界面压力、油品油蒸气的生成速度和扬沸时油层厚度等有关.从图 12(a)和 12(b)中可以得到,对于小尺度油罐火,这一高温区域要比准稳态燃烧的高温区域高出 100 °C 左右,这个高温区域将会增大火焰辐射的危害.

图 13(a)和 13(b)为 0.3 m 罐内混合原油准稳态燃烧阶段和扬沸阶段时火焰的温度场图.从图 12(b)和图 13(b)中可以发现,0.3 m 罐内混合原油扬沸阶段高温区域要大于 0.1 m 罐内混合原油扬沸阶段的高温区域,主要原因是由于 0.3 m 罐内混合原油扬沸阶段燃烧的混合原油的质量(676 g)要大于 0.1 m 罐内混合原油扬沸阶段燃烧的混合原油的质量(15 g).

2.5 火焰热辐射变化

油罐发生扬沸火灾时热辐射是其主要危害之

一.在实验中对扬沸火灾中不同阶段的火焰热辐射进行了实时测量,其中两个罐内都有 2 cm 的水垫层和 4 cm 的混合原油层,热辐射通量计距两个罐水平距离和垂直高度分别为 0.3 m 和 0.15 m,测量结果如图 14(a)和 14(b)所示.从图中可以得到,在 0.1 m 罐内,混合原油扬沸阶段时火焰的最大热辐射为 2.1 kW/m²,为准稳态燃烧阶段火焰平均热辐射的 7~9 倍;在 0.3 m 罐内,混合原油扬沸阶段时火焰最大热辐射为 50.7 kW/m²,为准稳态燃烧阶段火焰平均热辐射的 15~20 倍.根据热辐射伤害准则,当热辐射强度大于等于 4 kW/m² 时,超过 20 s 人会感到疼痛;当大于等于 37.5 kW/m² 时,在 1 min 内人的死亡率 100%,在 10 s 中内人的死亡率 1%^[13].

2.6 火焰高度变化

编制了测量火焰高度变化幅度的程序,它能计算所拍摄的火焰录像中火焰高度在各帧(1 Fps 为 0.04 s)的变化幅度.计算结果如图 15(a)和图 15(b)所示,其中横坐标表示所拍摄录像的帧数(以每秒 25 帧拍摄),纵坐标表示火焰最高点在图像中的像素点(其中所拍摄图像规格为 320×240).

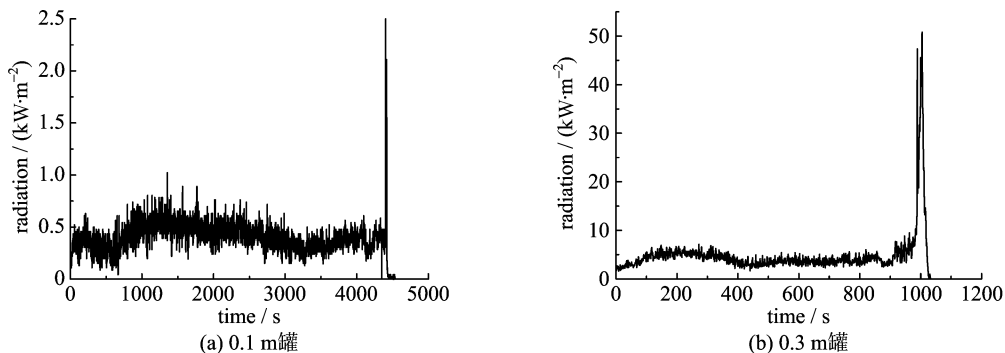


图 14 0.1 m 罐和 0.3 m 罐内混合原油燃烧时火焰热辐射

Fig. 14 The radiation of mixed crude oil combustion in 0.1 m tank (a) and in 0.3 m tank (b)

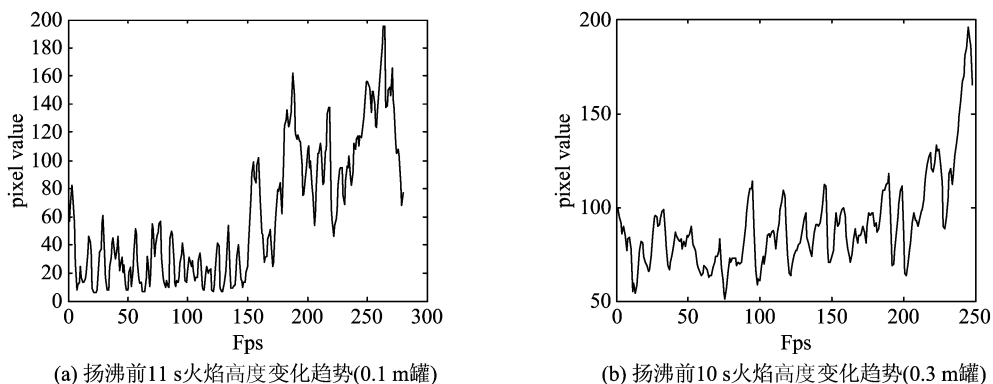


图 15 混合原油扬沸前火焰高度变化趋势

Fig. 15 Flame height changing in 11 s of mixed crude oil boilover and pre-boilover in 0.1 m tank (a) and in 10 s of mixed crude oil boilover and pre-boilover in 0.3 m tank (b)

从图 15(a)和图 15(b)中可知,火焰高度在扬沸前的 11 s 左右的时间内变化较大. 主要原因是由于扬沸前兆阶段油水界面水沸腾产生大量的气泡,部分气泡穿过油层加速油品的燃烧,随着油水界面压力的增大进入油层的气泡增多,使得火焰脉动和火焰高度变化幅度大. 但随着罐径的增大,气泡对加速油品的燃烧和火焰的扰动作用减小,火焰高度变化的幅度也会逐渐变小. 实验发现,如果以扬沸阶段火焰的最大高度与准稳态阶段火焰的最大高度的比值作为衡量扬沸强度的标准时,随着罐径的增大扬沸强度反而变小.

3 结论

本文对油品在扬沸火灾中不同燃烧阶段的特征参量进行了实验研究,通过实验结果分析得到以下结论:

(I) 通过实验测得了扬沸火灾中,油品燃烧时实时的线性燃烧速率和质量燃烧速率. 结果表明,油

品在扬沸前兆阶段的燃烧速率会增大,在扬沸阶段的燃烧速率会急剧增大;

(II) 通过实验测得油品在扬沸阶段的线性燃烧速率和质量燃烧速率为非扬沸阶段的几倍甚至几十倍;扬沸火灾中热释放速率曲线同普通池火火源的热释放速率不同,出现急剧上升的突变过程,最大热释放速率与平均热释放速率的比值,在小尺度范围随着罐径的增大而增大;

(III) 在扬沸火灾阶段,火焰的高温区域和火焰热辐射随着燃烧速率的增大而增大,火焰高温区域增大的原因是大量油品被抛入火焰中生成大量油蒸汽后迅速燃烧所致;

(IV) 通过自编程序得到,扬沸前兆阶段和扬沸阶段火焰高度变化幅度大,但随着罐径的增大火焰高度变化幅度反而减小,如果以扬沸阶段火焰最大高度与准稳态燃烧时火焰最大高度的比值作为衡量扬沸强度的标准时,随着罐径的增大扬沸强度反而变小;

(V) 对小尺度油罐扬沸火灾中不同阶段的线性燃烧速率、质量燃烧速率、热释放速率、火焰温度、火焰热辐射和火焰高度变化进行了实时的实验研究,得到了这些特征参量的变化规律,可对防控全尺度油罐扬沸火灾的危害提供参考依据。

参考文献(References)

- [1] Wei Dong, Zhao Da-lin, Du Yu-long, et al. Experimental study on the burning rate of oil tank fires [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(3): 286-291.
魏东,赵大林,杜玉龙,等. 油罐火灾燃烧速度的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(3):286-291.
- [2] 魏东,赵大林,薛岗,等. 油罐火灾燃烧速度的动态变化特性[J]. 消防技术与产品信息, 2005, (1):33-37.
- [3] Wei Dong, Yang Jun-tao, Dong Xi-lin. Thermal radiation distribution of steady burning of oil tank[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4(3): 241-245.
魏东,杨君涛,董希琳. 着火油罐稳定燃烧时的辐射热分布[J]. 热科学与技术, 2005, 4(3):241-245.
- [4] Yang Jun-tao, Wei Dong, Zhang Xue-kui, et al. The theoretical analysis of the burning characteristics for oil tank fires[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1): 151-154.
杨君涛,魏东,张学魁,等. 着火油罐燃烧特性的理论分析[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(1):151-154.
- [5] Huang Zheng-hua, Li Jian-hua, Li Yuan-fu. The analysis and study of boil-over characteristics of burning oil [J]. China Public Security: Academy Edition, 2005, (3):46-50.
黄郑华,李建华,李元福. 燃烧油品的沸溢喷溅特性分析研究[J]. 中国公共安全:学术版, 2005, (3):46-50.
- [6] Hua Jin-song. Study on boilover phenomenon and its prediction approach[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1995.
花锦松. 扬沸火灾机理及预测的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 1995.
- [7] Koseki H, Natsume Y, Iwata Y, et al. A study on large-scale boilover using crude oil containing emulsified water[J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(8): 665-677.
- [8] Koseki H, Iwata Y, Natsume Y, et al. Tomakomai large scale crude oil fire experiments [J]. Fire Technology, 2000, 36(1): 24-38.
- [9] Torero J L, Olenick S M, Garo J P, et al. Determination of the burning characteristics of a slick of oil on water [J]. Spill Science & Technology Bulletin, 2003, 8(4): 379-390.
- [10] Ferrero F, Muñoz M, Kozanoglu B, et al. Experimental study of thin-layer boilover in large-scale pool fires[J]. Journal of Hazardous Materials. 2006, 137(3): 1 293-1 302.
- [11] Evans D, Walton W, Baum H, et al. Measurement of large scale oil spill burns [C]//Proceedings of the Thirteenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar. Edmonton: Environment Canada, 1990:1-38.
- [12] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering[M]. 3rd ed. Quincy, MA, USA:NFPA, 2002: 3-25.
- [13] Zhu Jian-hua, Chu Jia-cheng. Calculation of characteristic parameters of pool fire and assessment of its thermal radiation hazard[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(6): 25-28.
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.