

DOI:10.11918/202105073

侧开缝竖井内多池火融合燃烧特性

尹凯路, 霍岩, 邹高万, 董惠

(哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为深入掌握有侧开缝的竖井内多个彼此临近池火融合燃烧特性,在2 m高试验竖井内分别对2,3和4个正庚烷池火形成的融合火焰进行了试验。通过对不同数量的多池火在各典型摆放方式时受池间距和竖井侧开缝宽度的影响分析,以及与相同多池火在没有竖井结构约束时的自由燃烧进行了试验。结果表明:有侧开缝的竖井所形成的独特引射空气来流改变了多池火之间火焰融合形态以及对燃料液面热反馈,形成的融合旋转火焰强化了液体燃料的燃烧效率并提升了融合火焰高度;竖井结构一定时,各池液面均匀接收融合火焰热量反馈的油池摆放方式更有利于形成相对强烈的融合旋转火焰,且油池数量的增加强化融合旋转火焰的生成能力;融合旋转火焰参数受油池的数量、相对位置以及竖井侧开缝宽度耦合影响,适宜的竖井侧开缝宽度以及能使各池液面均匀接收融合火焰热量反馈的摆放方式可使燃烧效率提高近3.7倍,峰值火焰高度提升30%以上。另外,基于浮力池火叠加环量的思想,推导并拟合得到了竖井内典型形式多池火融合旋转火焰燃烧速率与火焰高度理论模型。

关键词: 多池火; 竖井; 融合火焰; 旋转火焰; 燃烧速率; 火焰高度

中图分类号: TU998.1;X932 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)12-0135-08

Combustion characteristics of multi-pool fusion flame in a vertical shaft with side slits

YIN Kailu, HUO Yan, ZOU Gaowan, DONG Hui

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To grasp the fusion combustion characteristics of multiple pool fires adjacent to each other in a shaft with side slits, we carried out tests on the fusion flames formed by two, three, and four pool fires in a 2 m-high test shaft. The influence of the spacing between the pools and the width of the side slits of the vertical shaft with typical arrangements of multiple pool fires was analyzed, and the results were compared with free combustion test results of the same multiple pool fires without the constraints of the shaft structure. Results show that the unique jet air flow formed by the shaft with side slits changed the flame fusion form between multiple pool fires and the thermal feedback to the fuel surface. The fusion rotating flame formed in the shaft strengthened the combustion efficiency and raised the flame height. With fixed structure of shaft, relative strong fusion rotating flame was formed by adopting a pool placement form that enables the fuel surface of each pool to receive the heat feedback of the fusion flame uniformly, and the generating capacity of the fusion rotating flame was strengthened by increasing the number of pools. The parameters of the fusion rotating flame were affected by the coupling of the number and relative position of the fuel pools and the width of the slits on the side of the shaft. With proper slit width on the side of the shaft and the placement method that allows the fuel surface of each pool to evenly receive the heat feedback of the fusion flame, the combustion efficiency was increased by nearly 3.7 times and the peak flame height by more than 30%. In addition, on the basis of the idea of buoyant pool flame superposition circulation, the theoretical models of the burning rate and flame height of the typical multi-pool fusion flame in the shaft were derived and fitted.

Keywords: multi-pool fire; shaft; fusion flame; rotating flame; burning rate; flame height

火灾是火失去控制而蔓延的一种灾害性燃烧现象,它是各种灾害中发生最频繁且极具毁灭性的灾害之一^[1]。若多个起火点位置相近时,由于各火焰

之间复杂的相互影响与耦合作用,极有可能形成融合火焰,尤其是在火焰区周围存在切向来流时,甚至可形成融合旋转火焰,进一步增加了火灾破坏性和扑救难度。在上世纪60年代,学者们就曾对多池火燃烧时相互作用与火焰融合等方面展开研究。Putnam等^[2]利用天然气阵列形成火源研究了多个湍流浮力扩散火焰的相互作用,并推导了火焰高度的量纲一的表达式。Thomas等^[3]研究了平行放置

收稿日期: 2021-05-17
基金项目: 国家自然科学基金(51976041,51676051)
作者简介: 尹凯路(1995—),男,硕士研究生;
霍岩(1980—),男,教授,博士生导师
通信作者: 霍岩,huoyan205@126.com

的火源的火焰融合问题,并进行火焰受力分析,推导火焰融合的临界判据。在此基础上 Bladwin^[4]将其应用到多油池火源的研究中。Chigier 等^[5]就环形多池火进行研究,发现火焰高度、稳定性与环形阵列旋流水平、火源间距相关。Huffman 等^[6]曾通过实验较早地测量了环形池火阵列的燃烧速率随各池火大小及间距的变化情况。Schalike 等^[7]和 Vasanth 等^[8]对多池火之间的火焰互相融合情况进行了实验研究和理论分析。在国内,刘琼^[9]设计了等间距火方阵试验平台,模拟大量火源同时燃烧的情况,分析了空气卷吸和辐射热反馈两种作用机制对多源火燃烧的影响。王佳文等^[10]利用多个竖井结构并排时各自内部火源所形成的火旋风试验获得了多个相对独立的火旋风同时发生时的质量燃烧速率及火焰高度的半经验公式。林圣泽等^[11]构建了离散可燃物燃烧速率计算模型。焦艳^[12]以正庚烷及乙醇作燃料,对正六边形及正方形的阵列进行研究,分析了火点直径 D 以及间距 S 等因素对燃烧速率、温度及速度分布、火焰高度、空气卷吸和热量反馈等的影响,揭示了多油池火源的流动、热反馈与燃烧耦合机制。然而,截至目前,国内外学者对多池火研究较多集中在火焰区引射空气没有物理结构约束时的非受限空间的多火源自由燃烧,而对竖井内有侧开缝处引射空气所形成的特殊切向来流作用于多池火时形成的融合旋转火焰研究相对较少。本文通过对竖井内多个池火融合火焰在侧开缝引射切向来流作用下所形成的融合旋转火焰进行试验,对典型多油池融合旋转火焰的燃烧速率与火焰高度进行了分析,所得结果对于此类特殊形式的燃烧速率、融合火焰高度预测等理论模型构建及其灾害防治等均有参考价值。

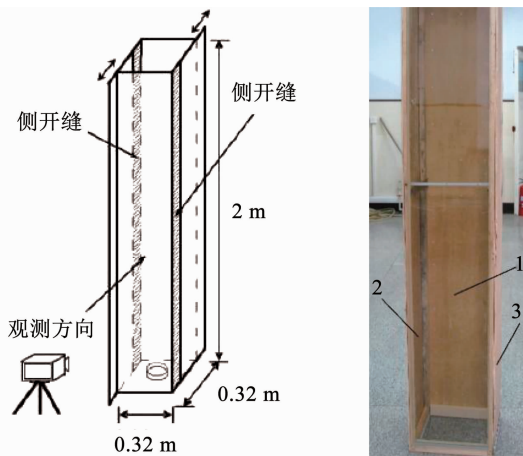
1 试验装置

多池火耦合燃烧试验竖井如图 1 所示。顶部开口的试验竖井尺寸为:长 0.32 m × 宽 0.32 m × 高 2.00 m。竖井左右两侧配有可前、后滑动的侧面板,以便调整形成设定宽度的对称开缝,从而在火源区形成切向引射空气来流。竖井底部按设定摆放形式放置多个直径为 0.05 m 的圆形油池,燃料质量变化通过 BK-D 电子称(精度 0.01 g)测量和记录。

为与竖井内试验结果进行对比,同时还在没有竖井结构约束时进行了相同试验条件下的多池火自由耦合燃烧试验。多池火自由融合燃烧试验装置如图 2 所示。

根据试验竖井空间对油池个数的容纳程度,考虑多油池以相对规则的摆放方式融合燃烧场景。试验时,分别对不同油池最外缘间距 S 的双油池(S 为

2.50, 5.00, 7.50, 10.00 cm), 一字摆放的 3 油池(S 为 1.25, 2.50, 5.00 cm)、等边三角形摆放的 3 油池(S 为 1.25, 2.50, 3.75 和 5.00 cm)及口字型摆放的 4 油池(S 为 2.50, 5.00, 7.50 cm)分别以竖井侧开缝宽度 d 为 3.0, 5.0, 7.0, 9.0 cm 进行试验,并以相同试验条件进行多油池自由融合燃烧试验。每条次试验的各油池均使用 5 ml 正庚烷(纯度 98%)液态燃料。多油池的各种摆放方式如图 3 所示。



1-正面耐高温钢化玻璃; 2、3-可移动侧壁面

图 1 有侧开缝的试验竖井

Fig. 1 Vertical shaft with side slits in test



图 2 自由融合燃烧时的多池火试验装置

Fig. 2 Multi-pool fire test device during free fusion combustion

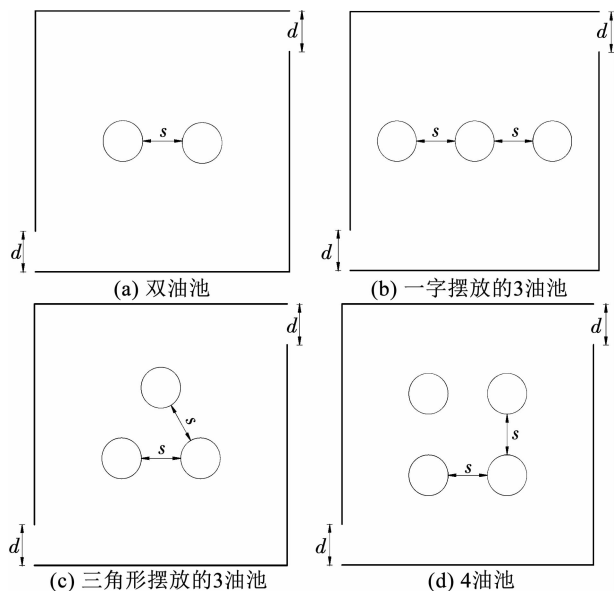


图 3 各组油池摆放方式

Fig. 3 Arrangement of multi-fuel pools

2 燃料质量消耗速率结果分析

试验中由电子称获取的液体燃料质量变化近似为化学反应消耗产生^[13], 因此本文由燃料质量随时间变化获取燃烧速率以及热释放速率。

图 4 为油池间距为 5.00 cm 4 油池自由燃烧与相同条件下侧开缝为 5.0 cm 竖通道内融合旋转火焰燃烧时燃料质量随时间变化曲线。可见多池火均经历了初始阶段、剧烈燃烧阶段和衰减阶段, 其中初始阶段和衰减阶段还可能包含火焰间彼此融合以及

衰减分离阶段。与自由融合燃烧相比, 竖井内多池火融合燃烧过程的各典型阶段对应的融合火焰具有明显更高的亮度, 且在剧烈燃烧阶段形成多池火融合旋转火焰的同时, 还因剧烈旋转产生向上的抽吸力而使燃料质量出现一定程度的“失重”, 致使各阶段持续时间与质量变化速率也与自由融合燃烧明显不同。说明竖井内多池火融合燃烧虽在整体变化趋势上与自由融合燃烧过程相似, 但在燃烧过程中 (尤其是剧烈燃烧阶段) 的燃烧强度发生改变。

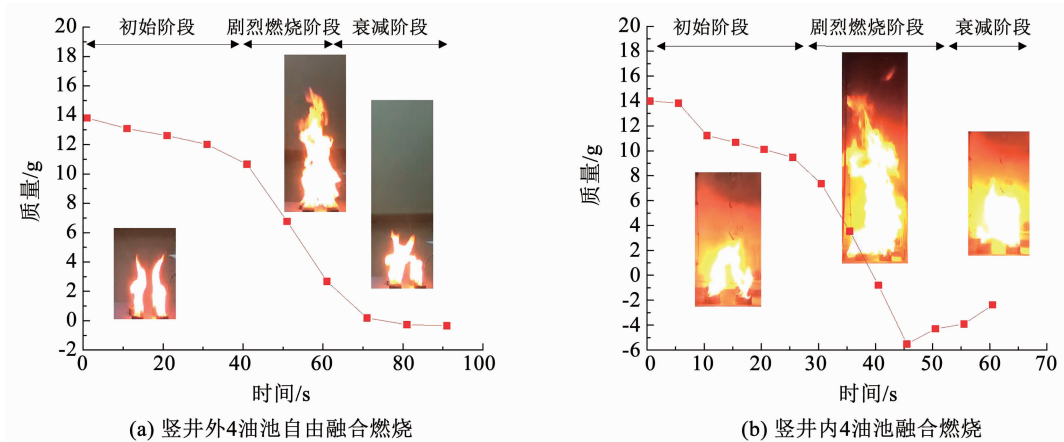


图 4 燃料质量随时间变化(4 油池)
Fig. 4 Fuel quality varying with time(four pools)

针对剧烈燃烧阶段, 不同个数油池和摆放形式时的燃料质量损失速率随油池间距的变化如图 5 所示。由图 5 可见, 与自由融合燃烧相比, 竖井内的融合燃烧明显具有更高的燃料质量损失速率, 说明竖井内的多池火燃烧被明显强化。同时, 竖井侧开缝宽度为 3.0 cm 时质量损失速率约为自由燃烧时的 2.0~3.7 倍, 而在竖井侧开缝分别为 5.0, 7.0, 9.0 cm 时约为 1.1~2.0 倍, 说明过大的开缝形成的引射空气来流相对不利于多池火融合旋转火焰形成, 从而降低了竖井内的多池火燃烧效率。另外, 随着油池数量增加, 侧开缝变化带来的质量损失速率增益有所减小, 双油池质量损失速率约为自由燃烧时的 3.7 倍, 而 4 油池时仅为 2.0 倍。

在获取单位面积燃烧速率 $\dot{m}$ 基础上, 引入量纲一的单位面积燃烧速率 $\dot{m}^*$:

$$\dot{m}^* = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} \tag{1}$$

式中 $\dot{m}_0$ 为间距为 2.50 cm 的双油池自由燃烧时单位面积质量燃烧速率。同时, 考虑到多池火每个火源可以看成是低压、外加辐射热流的独立燃烧火

源^[11], 其质量燃烧速率与火源间距及油池摆放有关。因此参照文献[9], 引入燃料面比率 r_s 来表征各火源总燃料表面积与整个燃烧区域面积之比:

$$r_s = \frac{\text{火源数量} \times \text{油池面积}}{\text{燃烧区域面积}} \tag{2}$$

各试验工况的量纲一的单位面积燃烧速率与燃料面比率如图 6 所示。可见针对一定摆放形式的多油池来说, 其 $\dot{m}^*$ 与 r_s 之间在一定范围内近似呈线性关系。

王佳文等^[10]曾提出多源火旋风质量燃烧速率的半经验公式为

$$\ln \bar{m}^* = a + b \ln \Gamma^* \tag{3}$$

式中: $\bar{m}^*$ 为量纲一的单位面积燃烧速率, a, b 为拟合常数, Γ^* 为量纲一的环量, 其中 $\Gamma^* = \Gamma / \sqrt{gD^3}$, D 为油池直径。旋转环量的计算方法可表示为 $\Gamma = 2\pi r V_\theta$, 其中 V_θ 为旋转火焰切向速度。对于竖井内多池火融合旋转火焰而言, 旋转环量随径向距离增加先增加后几乎保持不变^[14], 因此结合试验数据获取的便利性考虑, 采用竖井侧开缝入口速度作为旋转火焰切向速度进行计算。

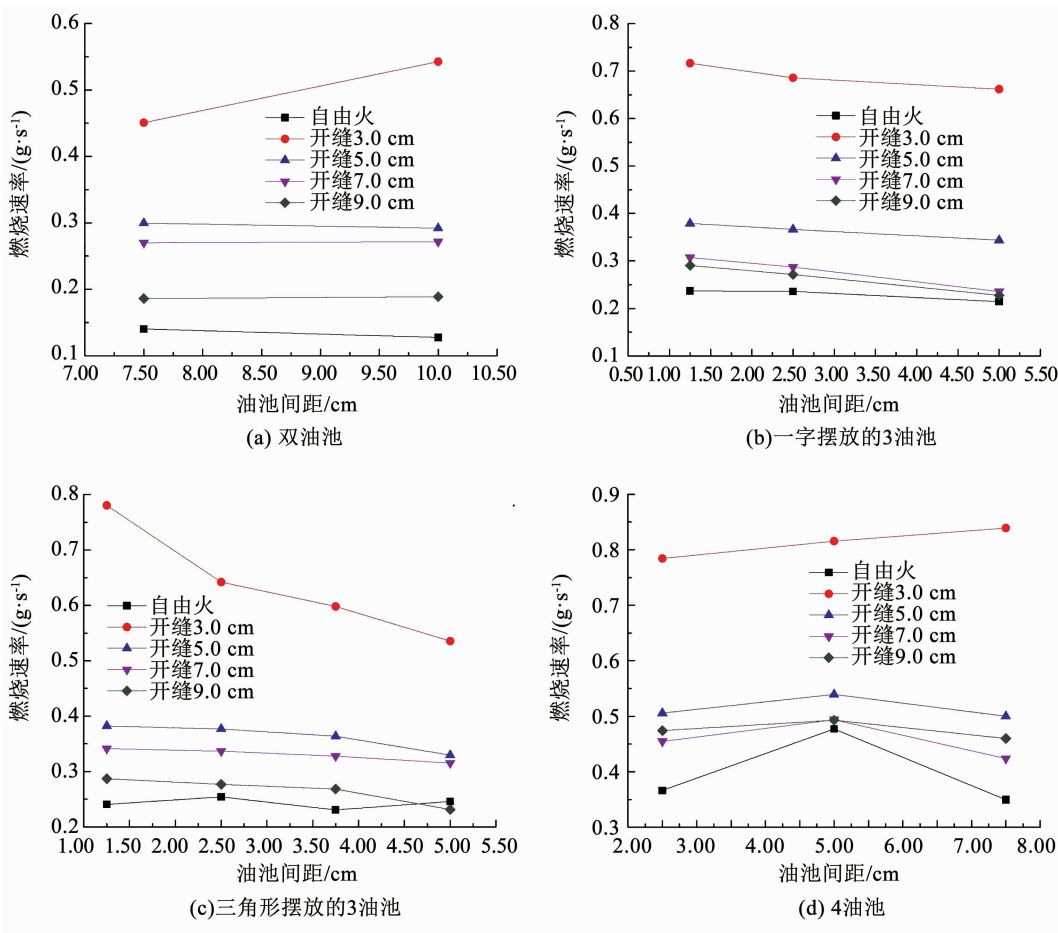


图 5 质量损失速率随油池间距的变化

Fig. 5 Mass loss rate varying with fuel pool spacing

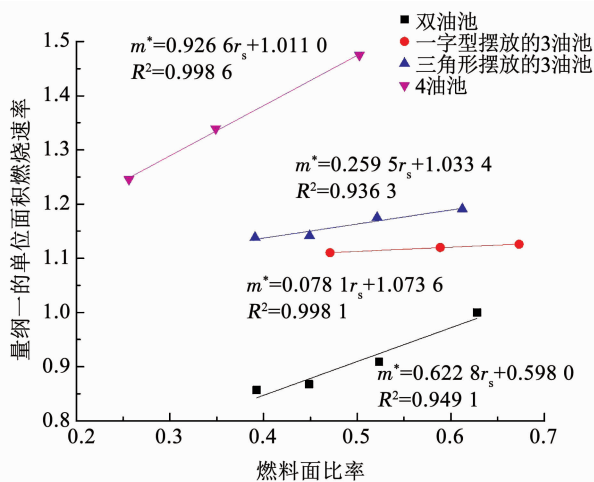


图 6 量纲一的单位面积燃烧速率随燃料面比率的变化

Fig. 6 Dimensionless burning rate per unit area varying with fuel surface ratio

以高度为 dz 的竖通道微元体为控制体, 根据质量守恒, 向上流动的热流体质量等于由侧开缝进入的流体质量, 即:

$$\frac{d}{dz}(\rho u_z L^2) = 2\rho_\infty u d \quad (4)$$

$$\Gamma^* = \frac{2\pi u L / \sqrt{2}}{\sqrt{g D_{eq}^3}} = \frac{d}{dz}(\rho u_z) \frac{\sqrt{2} \pi L^3}{2\rho_\infty d \sqrt{g D_{eq}^3}} = c \left(\frac{L^3}{d} \right) \quad (5)$$

式中: ρ 为竖通道内流体密度, ρ_∞ 为竖通道外的环境气体密度, u_z 为竖通道内流体向上的运动速度, u 为竖通道侧开缝入口速度, d 为侧开缝宽度, L 为竖通道边长, c 为待定系数, $c = \frac{d}{dz}(\rho u_z) \frac{\sqrt{2} \pi}{2\rho_\infty \sqrt{g D_{eq}^3}}$, D_{eq} 为特征直径, 以多油池与其液面表面积相等的圆池直径表示。

将式(5)代入式(3)可得到:

$$\ln \bar{m}^* = a + b \ln(c) + b \ln\left(\frac{L^3}{d}\right) \quad (6)$$

对于竖通道内多池火融合旋转火焰而言, 若将其看作为自由浮力池火叠加上旋转环量, 则式(6)中系数 a 可假设是与池火自由燃烧时量纲一的单位面积燃烧速率相关量, 即 $a = p \ln \dot{m}^* + q$, 其中 p, q 为系数。

将燃料质量损失数据带入式(6)中进行拟合得到竖井内多池融合旋转火焰燃料质量消耗关系式:

双油池 ($R^2 = 0.942 9$)

$$\ln \dot{m}^* = 2.909 0 + 11.690 0 \ln \dot{m}^* + 1.056 0 \ln\left(\frac{L^3}{d}\right) \quad (7)$$

一字摆放的 3 油池 ($R^2 = 0.938 7$)

$$\ln \dot{m}^{**} = 0.455\,7 + 3.516\,0 \ln \dot{m}^{*} + 0.762\,2 \ln \left(\frac{L^3}{d} \right) \quad (8)$$

三角形摆放的 3 油池 ($R^2 = 0.930\,8$)

$$\ln \dot{m}^{**} = 0.455\,7 + 3.516\,0 \ln \dot{m}^{*} + 0.762\,2 \ln \left(\frac{L^3}{d} \right) \quad (9)$$

4 油池 ($R^2 = 0.810\,7$)

$$\ln \dot{m}^{**} = 0.930\,8 + 0.031\,0 \ln \dot{m}^{*} + 0.512\,4 \ln \left(\frac{L^3}{d} \right) \quad (10)$$

针对竖井内多池火融合旋转火焰剧烈燃烧阶段的燃料质量损失速率,由式(7)~(10)计算结果与试验数据对比如图 7 所示。可以看出双油池和 3 油池场景的吻合相对较好,而 4 油池时受试验竖井及侧开缝宽度限制,油池间相互竞争空气而相互抑制彼此燃烧反应,导致关系式与试验数据有一定偏差。

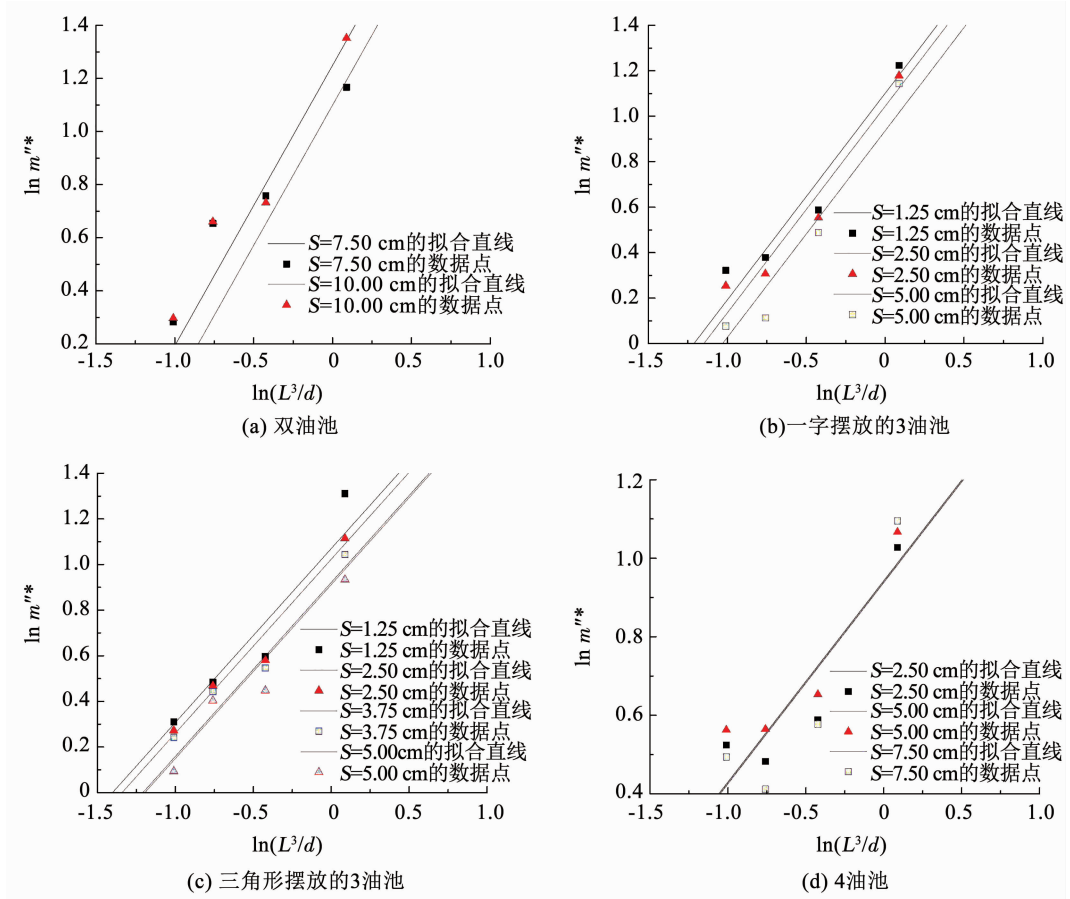


图 7 竖井内多池火融合旋转火焰的燃料质量消耗速率试验数据与关系式计算结果对比

Fig. 7 Comparison between test data and calculation results of fuel mass consumption rate of multi-pool fusion rotating flame in shaft

3 融合火焰高度结果分析

实验中的多池火融合火焰高度 H 可由获取的图像结果获取。以 Zukoski 等^[15]引入的间歇率 0.5 时对应的 H 值来定义平均火焰高度 H_c 。图 8 为油池间距 2.50 cm 时,自由燃烧火焰与双池融合旋转火焰燃烧过程的对比,图像的时间间隔 7 s。由图 8 可见,在燃料被引燃后,竖井内的各池火随即展现出比自由融合燃烧时更明显的相互融合趋势;随着时间的推移,竖井内多池火全面融合并发生整体旋转与倾斜,而自由融合燃烧的多池火仅在火焰中部以上区域发生相互融合,底部火焰依然保持各池火相对独立的火焰形式;在燃烧后期阶段,自由融合燃烧的火焰彼此分开保持各自独立,而竖井内多池火融合旋转火焰状态保持则保持至近乎燃料耗尽。

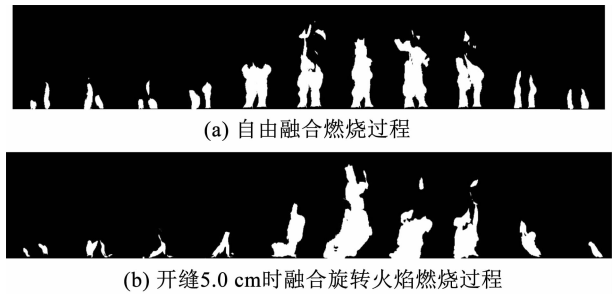


图 8 双池融合火焰形态变化 ($S = 2.50\text{ cm}$)

Fig. 8 Morphological change in fusion flame from two fuel pools ($S = 2.50\text{ cm}$)

图 9 为侧开缝宽度 d 为 5.0 cm 时,竖井内多油池融合旋转火焰与自由融合燃烧火焰高度对比。图 9 中同时给出了对应峰值火焰高度 $H_{\max}$ 。由图 9 可以看出,双油池时,竖井内融合旋转火焰峰值高度约为自由融合燃烧时的 1.10 倍,但平均高度仅约为

自由融合燃烧时的 80%,而油池数量增加后,竖井内融合旋转火焰平均高度则与自由融合燃烧时接近或稍高。这是由于竖井内多池火燃烧初始阶段尚未形成剧烈的融合旋转火焰时,此时多池火各自相对独立的火焰在切向来流作用下发生倾斜导致其竖直方向的高度降低,而油池数量较少时相对更易受切向来流影响而发生幅度更大的倾斜;随着竖井内多池火燃烧剧烈程度的增加,引射空气能力增强,使侧开缝进入竖井的空气来流具有更大的切向力而形成剧烈的多池火融合旋转火焰,此时火焰高度较自由融合燃烧时明显增加。对比图 9(b)、(c)可发现,三角形摆放的油池火焰平均约为一字摆放的油池火焰平均高度的 1.10 倍。这是由于三角形摆放时,各个火源之间彼此更容易相互影响,燃料表面受到相对更多的来自其他两油池火焰的热辐射,因此加速

燃料的蒸发速度,进而提升了融合火焰高度。图 9(c)中,油池间距 5.00 cm 时的竖井内融合旋转火焰峰值高度低于自由融合燃烧火焰,这是由于在此油池间距时竖井内的融合旋转火焰并不稳定,加上由侧开缝进入的气流的影响导致融合旋转火焰整体倾斜且产生明显的进动现象。由此可见,竖井内多池火融合旋转火焰燃烧过程涉及油池个数、油池摆放形式以及竖井侧开缝宽度等多个参数之间的耦合关系。另外,一字摆放的 3 油池和 4 油池工况下融合旋转火焰峰值高度约为相同条件下自由融合燃烧时的 1.32 倍和 1.25 倍,而双油池及等边三角形摆放的 3 油池融合旋转火焰峰值高度约为自由融合燃烧时的 1.10 倍。这说明在竖井结构一定时,油池数量的增加会增大相同条件下融合旋转火焰与自由融合燃烧火焰峰值高度之间的差异。

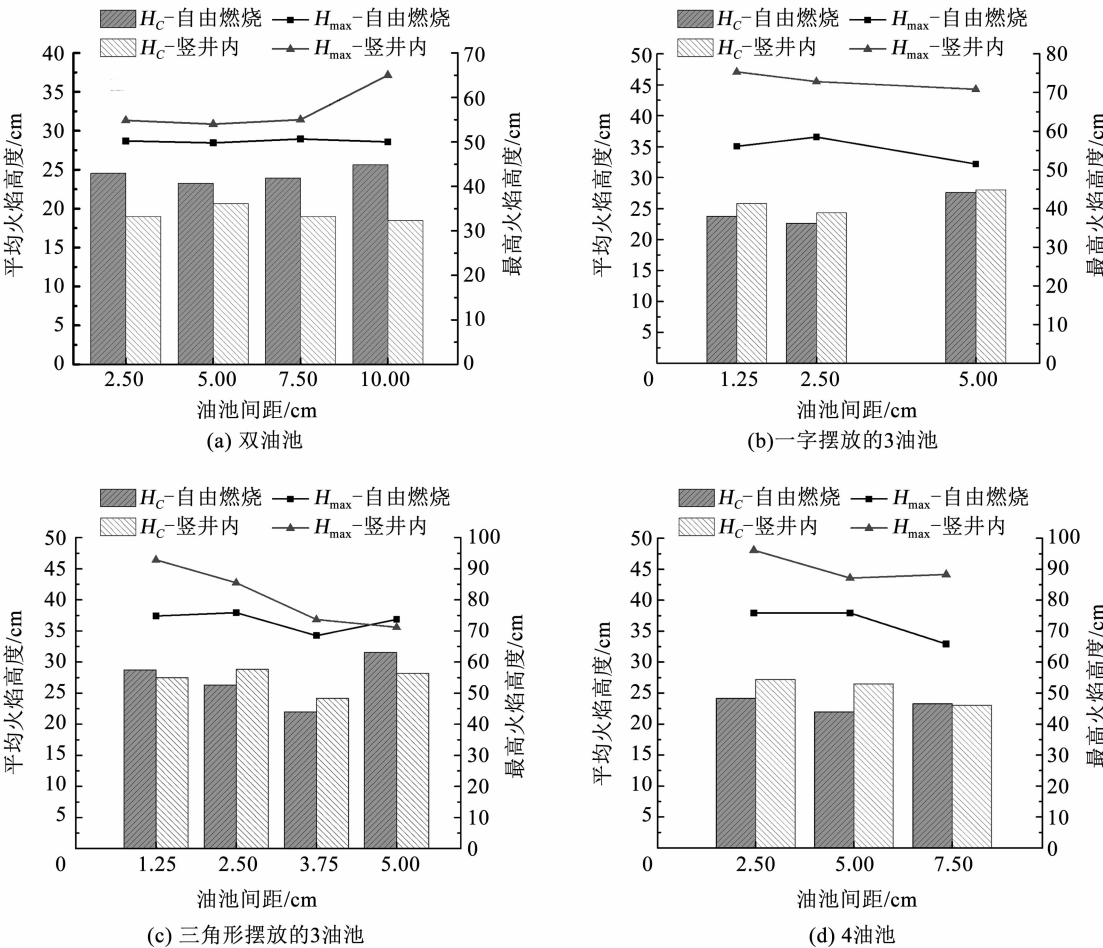


图 9 火焰平均高度及峰值随油池间距的变化

Fig. 9 Average and peak flame heights varying with fuel pool spacing

针对竖井内单池火旋风,周佼^[13]曾提出火焰高度和热释放速率与外加环量耦合公式为

$$H/D = k (\dot{Q}^* \cdot \Gamma^{*2})^m \tag{11}$$

式中: H 为火旋风火焰高度; $\dot{Q}^*$ 为量纲一的热释放

速率, $\dot{Q}^* = \dot{Q}/(\rho_{\infty} c_p T_{\infty} g^{1/2} D^{5/2})$; k, m 为系数。周魁斌^[14]在此基础上假设火旋风火焰高度与池火火焰高度的比值能够单独反应出旋转环量对火旋风火焰高度的影响,即

$$H^* = H/H_p = f(\Gamma^*) \tag{12}$$

将式(5)和式(11)带入式(12), 可得

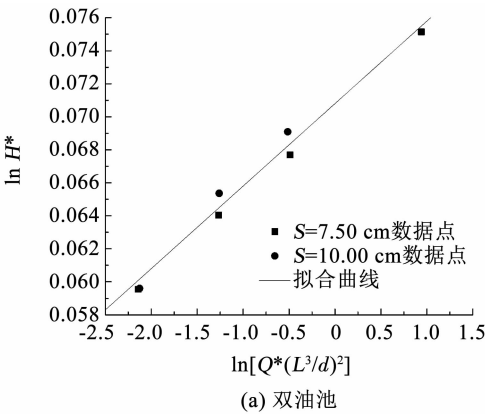
$$\ln H^* = \ln\left(\frac{H}{H_p}\right) = \ln\left(\frac{kD_{eq}}{H_p}\right) + m\ln\left[\dot{Q}^* \cdot \left(\frac{L^3}{d}\right)^2\right] + 2m\ln c \tag{13}$$

式中以 $c(L^3/d)$ 代替速度环量, 将侧开缝宽度、燃料热释放速率与旋转火焰高度结合在一起。根据前文推导, 多池融合旋转火焰的量纲一的单位质量燃烧速率可由自由池火量纲一的单位质量燃烧速率 m^* 及燃料面比率 r_s 求得, 故式(13)间接地将自由池火燃烧速率与旋转火焰高度结合在一起。

本文对于式(13)假设与推导都是建立在火焰竖直方向的前提下, 未考虑融合火焰在切向力作用下的倾斜影响。对于本文试验, 竖井内多池火融合旋转火焰形成后稳定时段对应的平均火焰高度随油池间距的变化数据带入式(13)中进行拟合计算, 可得:

双油池 ($R^2 = 0.985\ 1$)

$$\ln H^* = 0.005\ 0\ln\left[\dot{Q}^* \cdot \left(\frac{L^3}{d}\right)^2\right] + 0.070\ 8 \tag{14}$$



一字摆放的 3 油池 ($R^2 = 0.921\ 2$)

$$\ln H^* = -0.038\ 0\ln\left[\dot{Q}^* \cdot \left(\frac{L^3}{d}\right)^2\right] + 0.180\ 9 \tag{15}$$

三角形摆放的 3 油池 ($R^2 = 0.884\ 6$)

$$\ln H^* = -0.001\ 4\ln\left[\dot{Q}^* \cdot \left(\frac{L^3}{d}\right)^2\right] + 0.041\ 7 \tag{16}$$

4 油池 ($R^2 = 0.898\ 2$)

$$\ln H^* = -0.003\ 4\ln\left[\dot{Q}^* \cdot \left(\frac{L^3}{d}\right)^2\right] + 0.133\ 3 \tag{17}$$

图 10 为拟合公式计算结果与试验数据对比。可以看出多油池的融合火焰高度公式计算结果与试验数据吻合较好。另外, 双油池拟合直线对应的斜率与其余 3 个场景时相反, 说明对于双油池试验而言, 竖井内氧气相对较充足, 减小侧开缝宽度不会对燃烧速率有较大影响, 即 $\ln H^*$ 随 $\ln[\dot{Q}^*(L^3/d)^2]$ 的增加而增大; 而 3 油池和 4 油池试验时的油池数量较多, 竖井内的氧气相对不足, 侧开缝的大小影响了进气速度, 从而直接影响了油池内燃料的燃烧速率, 故 $\ln H^*$ 随 $\ln[\dot{Q}^*(L^3/d)^2]$ 的减少而减小。

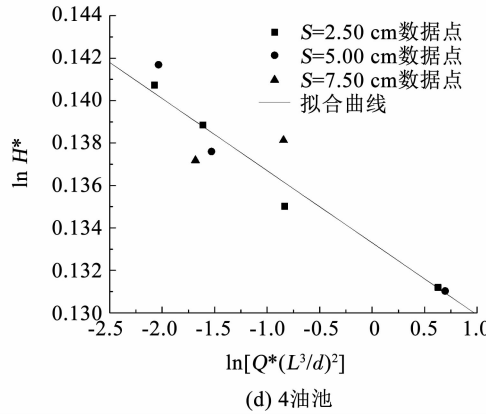
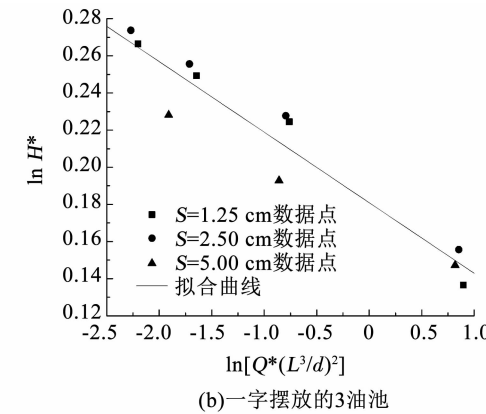
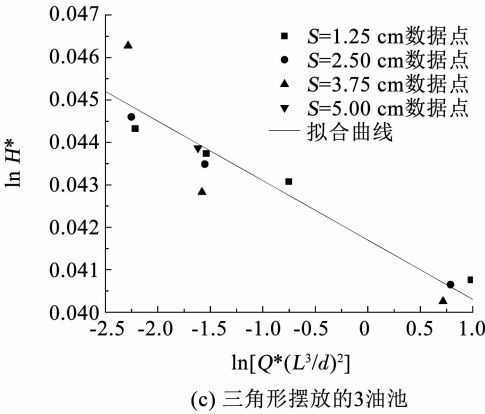


图 10 融合火焰高度试验数据与拟合曲线

Fig. 10 Test data of fusion flame height and its fitting curve

4 结 论

1) 有侧开缝的竖井所形成的独特射射空气来

流改变了多池火之间火焰融合形态以及对燃料液面热反馈, 形成的融合旋转火焰在一定程度上强化了燃烧效率并提升了火焰高度。

2) 竖井侧开缝过大可降低竖井内多池火燃烧效率。同时,随着油池数量增加,侧开缝变化带来的质量损失速率增益有所减小,双油池质量损失速率约为自由燃烧时 3.7 倍,而 4 油池时仅为 2.0 倍。

3) 竖井侧开缝和燃料量一定时,多油池燃烧引射空气能力和相对摆放位置决定了融合旋转火焰的形成与持续时间。竖井内双油池时,融合旋转火焰持续时间占总体燃烧过程的时间相对较短,此时融合旋转火焰峰值高度约为自由燃烧融合火焰的 1.1 倍,但平均高度仅约为自由融合燃烧时的 80%。

4) 竖井结构一定时,油池数量增加不仅强化融合旋转火焰的生成能力,而且增大融合旋转火焰与自由融合火焰峰值高度之间的差异。同时,使各池液面均匀接收融合火焰热量反馈的油池摆放方式更有利于形成相对强烈的融合旋转火焰。

5) 基于浮力火焰叠加环量的思想,推导并拟合得到了竖井内典型形式多池火耦合旋转火焰燃烧速率与火焰高度理论模型。

参考文献

- [1] 范维澄,王清安,姜冯辉,等. 火灾学简明教程[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1995: 1
FAN Weicheng, WANG Qingan, JIANG Fenghui, et al. A brief course of fire science[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 1995: 1
- [2] PUTNAM A A, SPEICH C F. A model study of the interaction of multiple turbulent diffusion flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1963, 9(1): 867. DOI: 10.1016/S0082-0784(63)80093-4
- [3] THOMAS P H, BALDWIN R, HESELDEN A J M. Buoyant diffusion flames; Some measurements of air entrainment, heat transfer, and flame merging[J]. Symposium (International) on Combustion, 1965, 10(1): 983. DOI: 10.1016/S0082-0784(65)80241-7
- [4] BALDWIN R. Flame merging in multiple fires[J]. Combustion and Flame, 1968, 12(4): 318. DOI: 10.1016/0010-2180(68)90036-9
- [5] CHIGIER N A, APAK G. Interaction of multiple turbulent diffusion flames[J]. Combustion Science and Technology, 1975, 10(5/6): 219. DOI: 10.1080/00102207508946674
- [6] HUFFMAN K G, WELKER J R, SLIEPCEVICH C M. Interaction effects of multiple pool fires[J]. Fire Technology, 1969, 5(3): 225. DOI: 10.1007/BF02591520
- [7] SCHALIKE S, MISHRA K B, WEHRSTEDT K D, et al. Limiting distances for flame merging of multiple n-Heptane and Di-tert-Butyl peroxide pool fires[J]. Chemical Engineering Transactions, 2013, 32: 121. DOI: 10.3303/CET1332021
- [8] VASANTH S, TAUSEEF S M, ABBASI T, et al. Multiple pool fires: Occurrence, simulation, modeling and management[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 29: 103. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.01.005
- [9] 刘琼. 多火源燃烧动力学机制与规律研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010
LIU Qiong. Dynamical mechanism and behaviors of multiple fires burning[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010
- [10] 王佳文, 江平, 王旭. 多火源火旋风相互作用的实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(9): 144
WANG Jiawen, JIANG Ping, WANG Xu. Experimental research on interaction of fire whirls under multiple fire sources[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(9): 144. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.09.023
- [11] 林圣泽, 刘琼. 离散分布多火源燃烧速率计算模型研究[J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23(3): 274
LIN Shengze, LIU Qiong. Burning rates calculation model of discrete fire[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2017, 23(3): 274. DOI: 10.11715/rskxjs. R201606007
- [12] 焦艳. 多油池火源燃烧特性的实验与理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018
JIAO Yan. Experimental and theoretical research on combustion characteristics of multiple pool fires[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018
- [13] 雷佼. 火旋风燃烧动力学的实验与理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012
LEI Jiao. Experimental and theoretical researches on the combustion dynamics of fire whirls[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012
- [14] 周魁斌. 火旋风的燃烧规律及其火焰移动机制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013
ZHOU Kuibin. Combustion behaviors and flame-moving mechanism of fire whirls[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013
- [15] ZUKOSKI E E, KUBOTA T, CETEGEN B. Entrainment in fire plumes[J]. Fire Safety Journal, 1981, 3(2): 107. DOI: 10.1016/0379-7112(81)90037-0

(编辑 张 红)