

# 通风环境中不同油水比例柴油池火的燃烧特性

张培红<sup>1</sup>, 曹宇<sup>2</sup>, 潘龙涛<sup>1</sup>

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006)

**摘 要:** 在不同风速和油水比例条件下进行柴油池火实验,通过对火场温度、辐射热通量、燃料质量损失速率的测定和喷溅现象的观察,分析通风环境和油水比例对柴油池火燃烧特性的影响。结果表明,自然通风条件下,油水体积比 1:1 的柴油池火在旺盛阶段一直处于沸溢的状态,并伴随连续性喷溅,火焰温度及辐射热通量均达到了最大值;随油水体积比的减小,火焰温度和辐射热通量降低,喷溅频率和剧烈程度降低。当风速增加至 1.0 m/s 时,通风对柴油池火的促进作用占主导地位,池火旺盛阶段持续时间增长;风速增加到 1.5 m/s 时,柴油池火旺盛阶段持续时间缩短,通风对池火的负面影响占据了主导地位。

**关 键 词:** 柴油池火;机械通风;喷溅;沸溢;油水体积比

中图分类号: TK 121

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)07-1022-05

## Combustion Characteristics of Diesel Pool Fire with Different Water Ratios in Ventilation Environment

ZHANG Pei-hong<sup>1</sup>, CAO Yu<sup>2</sup>, PAN Long-tao<sup>1</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Grid Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, China. Corresponding author: ZHANG Pei-hong, professor, E-mail: zhangpeihong@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Diesel pool fire experiments on different diesel water ratios were conducted under various ventilation conditions. The flame temperature, the radiation heat flux and the mass loss rate were measured, and the fire splash phenomenon was observed in order to analyze the combustion characteristics and the diesel pool fire spread rules. Results show that the diesel pool fire with 1:1 diesel water ratio is always in the boilover status and the splash continuously occurs in the fire developed stage under natural ventilation conditions; both the temperature and the radiant heat flux reach the maximum value in the continuous splash. With the decreasing of the diesel water ratio, the flame temperature and the radiant heat flux are reduced and the frequency and the intensity of splashing are reduced either. If the air velocity is increased to 1.0 m/s, the combustion is intensified significantly by the ventilation speed and the duration time of the developed stage of fire is increased. When the air velocity is further increased to 1.5 m/s, the pool fire is hard to reach the developed stage or only last for a short time, which illustrates the negative impact of ventilation velocity increasing.

**Key words:** diesel pool fire; mechanical ventilation; splash; boilover; diesel water ratio

在复杂多变的通风环境中,受油品成分、物化特性、油水比例等因素的影响,池火火灾的发展和蔓延呈现特殊的规律性<sup>[1]</sup>。Garo 等利用油水比例预测薄层池火喷溅的强度<sup>[2]</sup>。Ferrero, Kozanoglu 等利用数值模拟和实验研究,对薄层池火喷溅进行了热分析,预测了喷溅发生的时间<sup>[3-4]</sup>。Yang,

康泉胜等分析了沸溢现象发生的基本条件、喷溅开始时间、喷溅时火焰的高度和突变程度<sup>[5-6]</sup>。Woods, Hu, 童琳等分析了风速对不同种类、不同尺寸池火燃烧特性的影响<sup>[7-9]</sup>。Carvel 等认为在狭长受限空间中机械通风对池火的影响取决于池火的尺寸<sup>[10]</sup>。本文搭建通风环境下油池火灾实验

平台,通过实验研究,分析含有不同油水比例的柴油池火的火焰温度、辐射热通量、火焰高度及喷溅现象等燃烧特性参数随油池的油水体积比、环境风速的变化规律.

### 1 油池火灾实验平台的搭建

实验平台长、宽、高分别为 6 m × 1.5 m × 2 m,于末端设置 1 m × 1 m 纵向通风口,变频风机最大风量为 22 000 m<sup>3</sup>/h. 距离地面高度 700 mm 设置 1#, 3#, 5# 和 7# 热电偶; 距离地面高度 1 700 mm 布置 2#, 4# 和 6# 热电偶,以测试火场温度分布和变化. 8#, 9#, 5# 和 10# 热电偶位于火源正上方,用以测量池火火焰温度变化. 在与火源同一高度,距火源 500 mm 和 1 000 mm 处分别布置 1# 和 5# 辐射热流计,在火源上方 500 mm、距火源 1 000 mm 处布置 3# 辐射热流计,测试火焰的辐射热通量. 在油盘下方布置量程为 4 100 g 梅特勒电子天平,测量精度为 0. 01 g,以监测燃烧过程中燃料的质量损失速率. 实验平台测点布置见图 1. 实验过程中首先在 250 mm × 200 mm 油盆底部加入 50, 100 或 250 mL 水作为水垫层,然后再加入 100 mL 柴油作为燃料. 具体实验安排和典型实验现象详见表 1.

表 1 实验安排  
Table 1 Test cases

工况	柴油体积 mL	水体积 mL	油水 体积比	风速 m·s <sup>-1</sup>	实验现象
1	100	50	2:1	0. 12	连续喷溅
2	100	100	1:1	0. 12	连续喷溅
3	100	250	2:5	0. 12	喷溅间隔长
4	100	100	1:1	0. 5	多次喷溅
5	100	100	1:1	1	多次喷溅
6	100	100	1:1	1. 5	喷溅间隔长

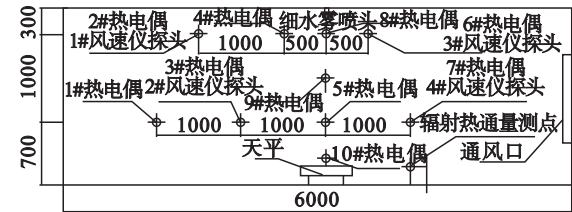


图 1 实验平台布置图(单位:mm)  
Fig. 1 Experimental platform

### 2 油水体积比 1:1 柴油池火的燃烧过程

首先,在实验平台内进行自然通风条件下油

水体积比 1:1 (100 mL 柴油 + 100 mL 水垫层) 的柴油池火实验,自然通风条件下实验平台内平均风速为 0. 12 m/s. 图 2 为火焰以及火场各测点温度的变化曲线,图 3 为各测点火焰辐射热通量变化曲线.

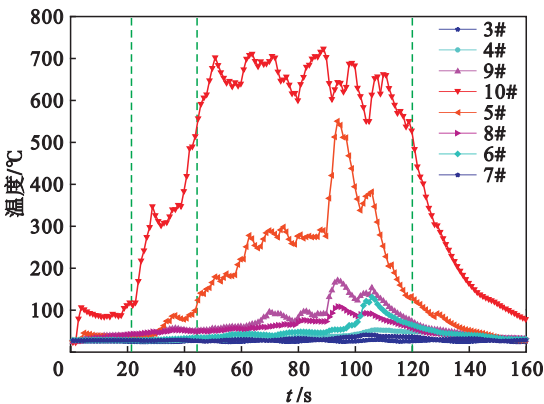


图 2 池火温度场发展  
Fig. 2 Pool fire temperature development

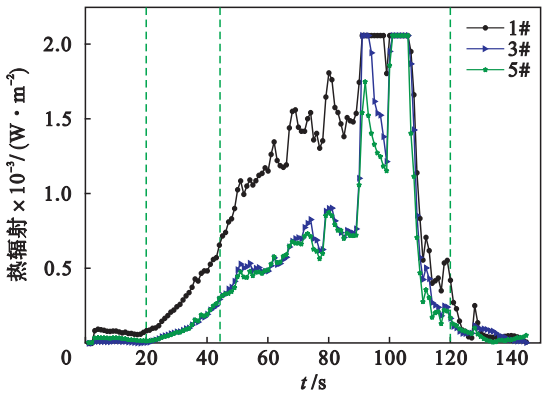


图 3 池火辐射热通量变化图  
Fig. 3 Pool fire radiant heat flux

由图 2 可见,火灾的初起阶段持续了 20 s 左右. 初起阶段火焰最高温度瞬间升高到 100 ℃ 左右后呈缓慢增长趋势,此间火焰热辐射通量较低(见图 3). 池火的成长阶段持续了 30 s 左右,火焰最高温度迅速由 100 ℃ 上升到 600 ℃ 左右(见图 2),火源附近环境的温度也不断升高,热辐射持续增加到 700 W/m<sup>2</sup> (见图 3),成长阶段末期,即油池在点火后大约 50 s 开始出现气泡,间歇有火星溅出,通常被称为“准沸溢”现象. 旺盛阶段持续的时间大约为 70 s,火焰最高温度在 550 ℃ 与 720 ℃ 之间剧烈波动,这是由于在这一阶段发生了沸溢及多次喷溅现象. 在点火后 77 s 出现沸溢现象,此时火焰温度的波动幅度开始变大. 85 s 开始发生间歇性喷溅,喷溅高度约 60 ~ 70 cm. 95 s 开始发生连续喷溅,持续 6 s 左右. 油池火发生沸溢、喷溅现象时,水蒸气的膨胀力使得油品向上喷出,增加了油品与空气的接触面积,火焰中油气的

含量也随之增加,燃烧更加充分剧烈,火焰高度迅速增高到最大值 125 cm. 火焰辐射热通量激增,最大值达 2 060 W/m<sup>2</sup> (见图 3). 连续喷溅结束后,又发生多次高度低于 60 cm 的间歇性喷溅. 120 s 以后,火焰温度和热辐射强度迅速下降. 在此过程中仍有高度低于 30 cm 的喷溅间歇产生,伴有零星爆破声音,直至最终熄灭.

### 3 油水体积比对池火燃烧特性的影响

在自然通风条件下进行不同油水体积比 (2:1,1:1,2:5) 柴油池火实验,见表 1 工况 1,2,3. 图 4 为不同油水体积比柴油池火火焰温度发展变化图. 可以看出,随着油水体积比的减小,池火灾初起阶段持续时间显著增加. 成长阶段持续时间基本相同,均为 30 s. 随油水体积比的减小,柴油池火旺盛阶段到来的时间延迟,旺盛阶段持续的时间略有增加,火焰所能达到的最高温度由 800 ℃降低至 600 ℃左右. 这是因为随油水体积比的减小,柴油质量损失速率也随之降低 (见图 5),表明柴油的气化率下降,燃烧热释放速率随之下降.

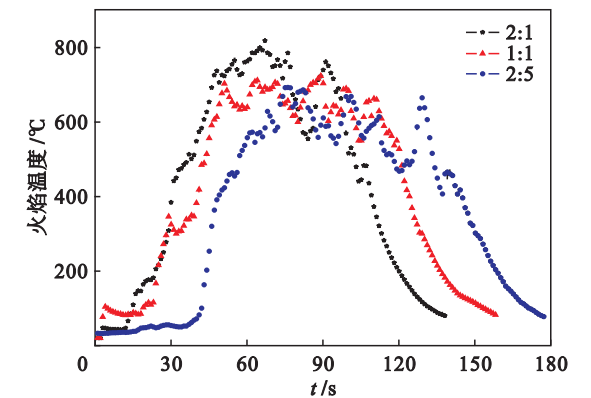


图 4 不同油水体积比柴油池火火焰温度  
Fig. 4 Flame temperature under different diesel and water ratio

图 6 为不同油水体积比柴油池火火焰辐射热通量的发展变化图. 由图 6 可见,随着油水体积比的减小,柴油池火火焰辐射热通量增长趋势减缓,但两种油水体积比工况下,热辐射所能达到的最大值 (2 060 W/m<sup>2</sup>) 相同. 当油水体积比为 1:1 时,辐射热通量在旺盛阶段后期才达到最大值,且只保持 15 s. 当油水体积比减小至 2:5 时,火焰热辐射增长最缓慢,旺盛阶段持续时间较长,辐射热通量长时间稳定于 750 W/m<sup>2</sup>,实验现象观察表明油水体积比 2:5 的柴油池火没有发生连续的喷溅

现象,喷溅间隔时间进一步增加. 由实验过程观察可见,当油水体积比为 2:1 和 1:1 时,在火灾的成长阶段后期和旺盛阶段均多次发生连续的喷溅现象. 到了火灾的衰减阶段,一方面,油水体积比很小,另一方面,燃料燃烧产生的热量不足以使得水垫层气化,因此,火灾衰减阶段喷溅现象减弱,喷溅次数减小,间隔增长,直至不再发生喷溅. 这个现象与油水体积比 2:5 的工况 3 观察到的实验现象是一致的.

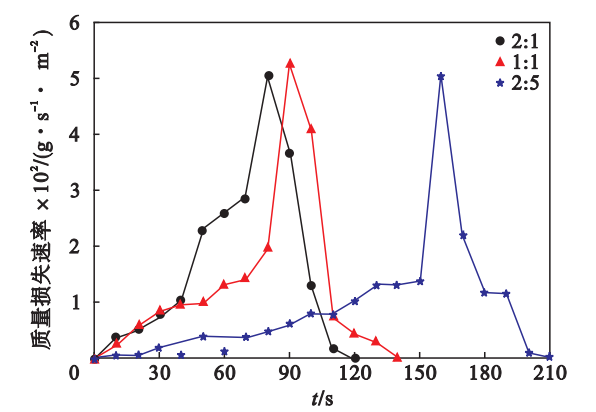


图 5 不同油水比例柴油质量损失速率  
Fig. 5 Mass loss rate under different diesel and water ratio

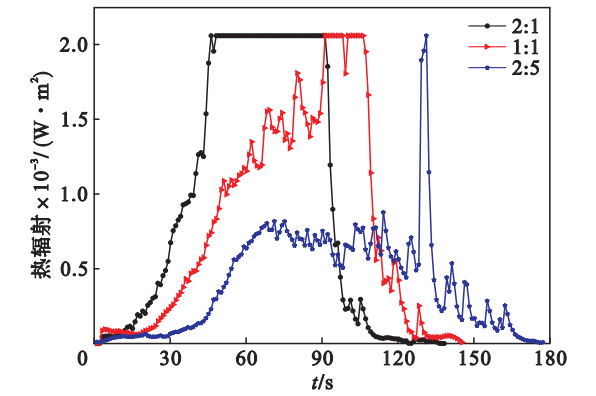


图 6 不同油水比例池火火焰辐射热通量发展图  
Fig. 6 Radiant heat flux under different diesel and water ratio

### 4 机械通风对柴油池火燃烧特性的影响

根据火灾燃烧学理论,当油池直径大于 200 mm 时,池火中液体燃料燃烧释放的热量  $Q_{\text{fire}}$  的大小主要取决于燃料表面接受到的辐射热反馈  $q''$ , 燃料蒸发的气化潜热  $h_{\text{vap}}$ , 燃料的热值  $h_c$ , 燃烧热效率  $\chi$  和油池面积  $A_f$ , 见式 (1):

$$Q_{\text{fire}} = \chi A_f (q''/h_{\text{vap}}) h_c.$$

(1)

在机械排烟情况下,受限空间围护结构以及烟气和周围空气的对流换热损失增加,会在一定

程度上降低受限空间上部热烟气层温度  $T_g$ , 并最终造成燃料表面接受到的辐射热反馈  $q''$  降低. 同时, 由于排烟的诱导作用, 受限空间氧气供应增加, 燃烧热效率  $\chi$  会得到一定程度的提高. 在机械排烟的降温效应和促进燃烧效应的耦合作用下, 柴油池火的火焰温度、火焰辐射热通量、燃料的质量损失情况和喷溅的激烈程度, 受油盆尺寸、柴油层厚度的影响更显著. 机械通风条件下油水体积比 (2:1 和 2:5) 对柴油池火燃烧特性的影响与自然通风条件下的规律相同.

在环境平均风速分别为 0.12 (自然通风), 0.5, 1.0 和 1.5 m/s 的条件下, 进行油水体积比 1:1 (100 mL 柴油 + 100 mL 水垫层) 的柴油池火实验, 见表 1 中工况 2, 4, 5, 6. 对于同样油盆尺寸、同样柴油层厚度和不同油水体积比 (2:1 和 2:5) 的其他柴油池火工况, 其燃烧特性受通风条件的影响与下文所述情况相同.

图 7 ~ 图 9 分别为不同风速条件下, 柴油池火火焰温度、柴油质量损失速率和火焰辐射热通量的变化曲线.

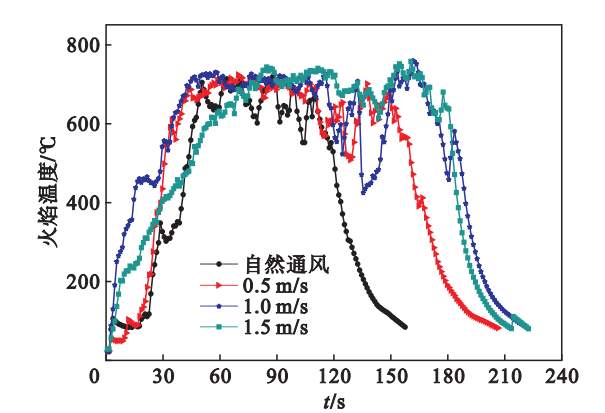


图 7 不同风速条件下池火火焰温度  
Fig. 7 Flame temperature under different air velocity

由图 7 可见, 在不同风速条件下柴油池火火焰所能达到的最高温度基本相同. 随着风速的增加, 池火初起阶段所需时间明显缩短. 这是因为, 风速的增加使得初起阶段柴油质量损失速率显著增加 (见图 8).

成长阶段持续时间随风速的增大而延长. 这是由于, 通风使得火焰与空气的对流热损失增加了, 火焰辐射热通量降低 (见图 9), 柴油质量损失速率降低 (见图 8), 池火发展至旺盛阶段所需的时间延迟.

在旺盛阶段, 当风速由 0.12 m/s 增加至 1.0 m/s 时, 油池火在旺盛阶段的持续时间因通风而延长. 这是由于通风带来了大量的氧气, 此时通

风对池火的促进作用远大于对流热损失的负面作用. 但是, 当风速进一步增加到 1.5 m/s 时, 通风带来的对流热损失对于池火的影响占主导作用, 同时, 由于火焰向下风向区域大幅度偏移, 最大偏移可达 1 400 mm, 导致火焰对燃料表面的热反馈减弱, 没有发生连续的喷溅现象, 喷溅高度减小, 旺盛阶段的持续时间随风速的持续增大而缩短. 这说明存在一个临界的风速值, 当风速超过该临界值时, 通风对燃烧产生的负面影响越来越显著.

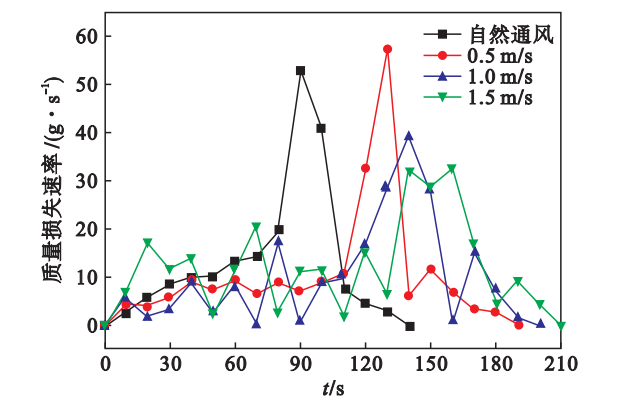


图 8 不同风速条件下柴油质量损失速率  
Fig. 8 Mass loss rate of diesel under different air velocity

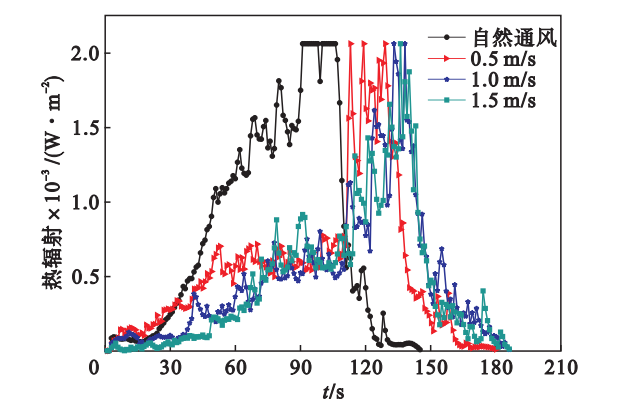


图 9 不同风速条件下火焰辐射热通量  
Fig. 9 Radiant heat flux under different air velocity

## 5 结 论

1) 相同通风条件下, 水垫层厚度的增加可以减缓喷溅的激烈程度和延迟喷溅发生的时间. 自然通风条件下, 油水体积比 1:1 的柴油池火喷溅时火焰高度最高达到 125 cm, 火焰温度及辐射热通量均在连续喷溅时达到了最大值. 在旺盛阶段, 随油水体积比的减小, 柴油的质量损失速率降低, 火焰温度和热辐射减小, 喷溅频率和剧烈程度降低, 喷溅现象的发生时间有所延后.

(下转第 1059 页)