

中文引用格式:李聪,许文博,牛力婷,等. 不同初始温度影响下油池火燃烧特性研究[J]. 中国安全科学学报,2026,36(5):159-164.

英文引用格式:Li Cong, Xu Wenbo, Niu Liting, et al. Study on combustion characteristics of pool fire under different initial temperatures[J]. China Safety Science Journal,2026,36(5):159-164.

不同初始温度影响下油池火燃烧特性研究*

李聪 副教授,许文博,牛力婷,宋畅鹏,吴建松 教授

(中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院,北京 100083)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.0814

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3014601);贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2023]一般121);民机火灾科学与安全工程四川省重点实验室开放基金资助(MZ2023KF01);国家自然科学基金资助(52304274)。

【摘要】 为研究初始温度对油池火燃烧行为的影响,基于自主搭建的初始温度可控油池火试验平台,开展不同初始温度(5、10、20、40、60和80℃)的油池火试验,分析油池火燃烧过程、质量损失速率、火焰高度和火羽流温度的变化特征。研究表明:当初始温度为5~60℃时,油池火燃烧过程分为增长、稳定和衰减3个阶段;当初始温度升高至80℃时,燃烧过程分为增长、稳定、沸腾过渡、沸腾和衰减5个阶段;质量损失速率、火焰高度和火羽流温度均与初始温度呈正相关;初始温度由5℃升高至80℃时,质量损失速率、火焰高度和火羽流温度分别增加12.13 g/(s·m²)、170.4 mm和130℃;质量损失速率随正庚烷沸点与初始温度的温差非线性递减;火焰高度与油池直径之比为正庚烷初始温度与沸点之比的幂函数。

【关键词】 初始温度; 油池火; 燃烧特性; 燃烧过程; 质量损失速率; 火焰高度; 火羽流温度

Study on combustion characteristics of pool fire under different initial temperatures

Li Cong, Xu Wenbo, Niu Liting, Song Changpeng, Wu Jiansong

(School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To study the influence of initial temperature on the combustion behavior of pool fires, pool fire tests at different initial temperatures (5, 10, 20, 40, 60 and 80℃) were conducted using a self-built initial temperature controlled pool fire test platform. The characteristics of variations in combustion process, mass loss rate, flame height, and plume temperature were analyzed. The results show that when the initial temperature ranges from 5 to 60℃, the combustion process of oil pool fire is divided into three stages: growth, steady and decay. When the initial temperature increases to 80℃, the combustion process is divided into five stages: growth, steady, boiling transition, boiling and decay. The mass loss rate, flame height and plume temperature are all positively correlated with the initial temperature. When the initial temperature increases from 5℃ to 80℃, the mass loss rate, flame height and plume temperature increased by 12.13 g/(s·m²), 170.4 mm, and 130℃, respectively. The mass loss rate decreases nonlinearly with the temperature difference between the boiling point of n-heptane and the initial

temperature. The ratio of flame height to pool diameter follows a power-law function of the ratio between the initial temperature and the boiling point of n-heptane point.

Keywords: initial temperature; pool fire; combustion characteristics; burning process; mass loss rate; flame height; fire plume temperature

0 引言

随着工业化的不断发展,液体燃料的需求与日俱增^[1]。液体燃料在生产、运输和储存过程中,一旦接触火源极易发生火灾事故,造成巨大的人员伤亡和财产损失^[2-3]。液体燃料火灾事故可能发生在不同地区,如温度较低的极地或温度较高的赤道。因此,有必要开展初始温度影响下的油池火燃烧特性研究。

近年来,国内外学者逐渐关注温度条件对油池火的影响。张佳庆^[4]研究了初始油温对变压器油燃烧特性的影响,分析了变压器油沸溢池火温度特征及传热模型,发现随着初始油温升高,热释放速率和CO生成速率增大。Bellino^[5]和Farahani^[6]等研究了冰腔内原油池火的燃烧行为,得出冰腔的冷边界对燃烧速率起抑制作用,冰腔池火燃烧存在2种对流驱动模式。Kong Depeng等^[7-8]针对冰腔、热表面等特殊温度边界开展了大量研究,探究了冰腔形状、碎冰含量以及燃料温度对油池火燃烧行为的影响,分析了不同液体燃料在热表面的燃烧特性,发现碎冰和初始温度显著影响油池火的燃烧速率。Chen Bin等^[9]研究了初始燃料温度对油池火燃烧速率的影响,发现油池火燃烧速率呈现5个典型阶段,沸腾阶段的燃烧速率随着初始温度的增加而升高。Hu Longhua等^[10]以汽油和酒精为燃料开展了不同直径的油池火试验,发现油池壁面温度在一定程度上影响了油池火燃烧速率,壁面温度越高对应的油池火燃烧速率越大。White等^[11]开展了不同燃料初始温度的油池火焰蔓延试验,发现当燃料温度高于沸点时,火焰蔓延速度明显增加。赵金龙等^[12]开展了不同初始温度的变压器油燃烧行为研究,结果表明初始温度越高,对应的质量损失速率越大,这一趋势在稳定燃烧阶段更为明显。张纪元等^[13]开展了低温低压条件下油池火试验,发现当环境压力相同时,边界温度越低对应的油池火燃烧速率越小,火焰热辐射能力也越低。综上所述,现有研究大多通过冰腔、热表面等边界研究冰腔内池火燃烧行为或燃料着火特性,对于不同初始温度影响下油池火燃烧行为及模型研究相对较少。

为此,笔者拟自主搭建初始温度可控的油池火试验平台,开展初始温度(5、10、20、40、60和80℃)的油池火试验,研究不同初始温度影响下油池火燃烧特性,明确油池火质量损失速率、火焰高度和火羽流温度的定量关系式,以期为油池火灾防控提供理论参考。

1 不同初始温度油池火试验设计

初始温度可控的油池火试验平台主要由恒温循环仪、双层燃烧油池以及数据采集系统组成,如图1所示。恒温循环仪可实现恒温液体外循环,温度范围为-30~200℃。双层燃烧油池由304不锈钢材料制成,直径D为300mm,壁厚为40mm。油池内层为燃烧区,外层为恒温液循环区。双层燃烧油池设有进水口和出水口,用于连接恒温循环仪实现恒温液体在油池的外循环,进而改变初始温度。数据采集系统主要包括高精度电子天平、K型热电偶(Thermal Couple, TC)以及高清摄像机。高精度电子天平位于油池下方,记录油池火燃烧过程中的质量数据,最大量程为60kg,数据采集频率为10Hz。油池正上方以100mm为间距设置一组TC,编号分别为TC1—TC10,用于测量火羽流温度数据。油池正前方放置高清摄像机记录油池燃烧全过程,高清摄像机分辨率为2560×1440像素,帧率为60帧/s。

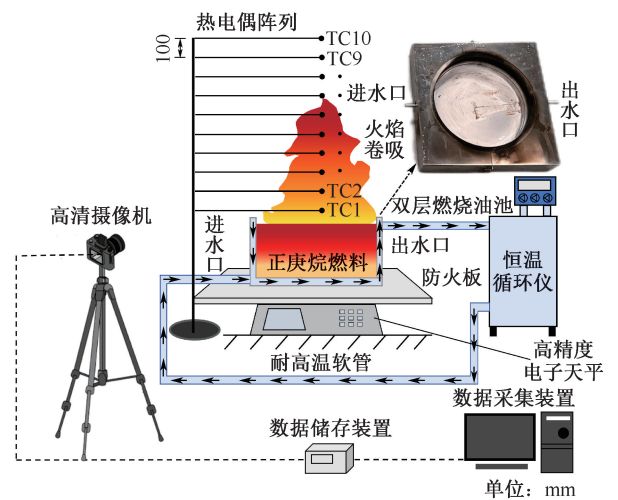


图1 试验平台

Fig. 1 Diagram of experimental platform

选用纯度 98% 的正庚烷作为试验燃料。试验开始前,首先称取适量的正庚烷加入双层燃烧油池。其次,通过恒温液体外循环调节正庚烷初始温度。当正庚烷温度达到设定值后,关闭恒温循环仪。然后,依次打开高清摄像机、电子天平以及温度采集系统,并点燃正庚烷。最后,燃烧结束后,保存油池火燃烧试验数据。通过改变初始温度 t_0 与正庚烷厚度 h_f 开展 24 组试验, t_0 分别为 5、10、20、40、60 和 80 °C, h_f 分别为 5、10、15 和 20 mm。

2 油池火燃烧特性分析

2.1 质量损失速率

图 2 为 $h_f=5、20\text{ mm}$ 时不同 t_0 下的燃烧过程和质量损失速率 $\dot{m}$ 。正庚烷点燃后产生微弱火焰。随后火焰迅速蔓延至整个油池,在此过程中,火焰高度和火焰面积显著增加。最终,随着正庚烷不断消耗,火焰逐渐衰弱直至熄灭。 t_0 越高对应的点火高度越大,这是由于较高的 t_0 促使正庚烷挥发。 t_0 与油池燃烧持续时间呈负相关。当 $h_f=20\text{ mm}$ 、 t_0 由 5 升高至 80 °C 时,燃烧持续时间减少 210 s。 t_0 与 $\dot{m}$ 呈正相关。当 $h_f=20\text{ mm}$ 、 t_0 由 5 升高至 80 °C 时, $\dot{m}$ 增加 12.13 g/(s·m²)。当 t_0 为 5~60 °C 时,油池火燃烧过程分为增长、稳定和衰减 3 个阶段;当 t_0 升高至 80 °C 时,燃烧过程分为增长、稳定、沸腾过渡、沸腾和衰减 5 个阶段。

在油池火燃烧过程中,正庚烷除去向外界释放的热量,其余热量用于燃烧。油池火主要传热方式为热辐射, $\dot{m}$ 可表示为^[14-17]:

$$\dot{m}'' = (\dot{q}_r - \dot{q}_f - \dot{q}_1) / \Delta H_g \tag{1}$$

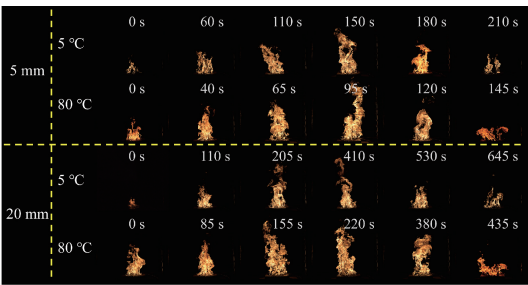
$$\dot{q}_r = \sigma(t_h^4 - t_f^4) [1 - \exp(\kappa\beta D)] \tag{2}$$

$$\dot{q}_f = \rho_f c_f \int_0^{h_f} \frac{dt}{d\theta} dh \tag{3}$$

$$\dot{q}_1 = (t_f - t_0)^{4/3} [(k_f^3 g \alpha_v Pr) / v^2]^{1/3} \tag{4}$$

式中: $\dot{q}_r$ 为火焰的热辐射通量,kW/m²; $\dot{q}_f$ 为正庚烷蒸发所需的热量,kW/m²; $\dot{q}_1$ 为热损失,kW/m²; ΔH_g 为气化潜热,kJ/kg; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数,W/(m²·K⁴); t_h 为火焰温度,°C; t_f 为正庚烷沸点,°C; κ 为发射系数,m⁻¹; β 为平均光束校正系数; ρ_f 为正庚烷密度,kg/m³; c_f 为正庚烷比热容,kJ/(kg·K); θ 为时间,s; k_f 为正庚烷导热系数,W/(m·K); g 为重力加速度,m/s²; α_v 为膨胀系数,°C⁻¹; v 为运动黏度,m²/s; Pr 为普朗特数。

不同 t_0 下 $\dot{m}$ 可表示为:



(a) 油池火燃烧过程

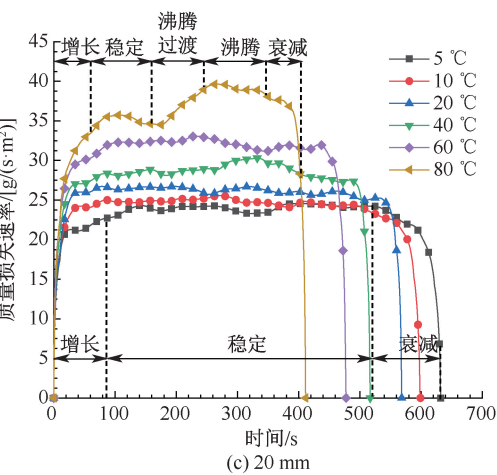
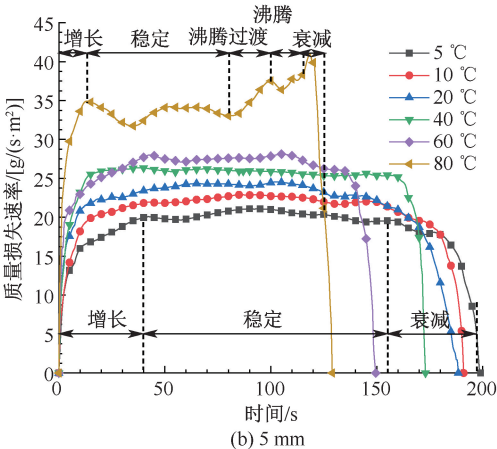


图 2 不同初始温度下的燃烧过程和质量损失速率
Fig. 2 Combustion process and mass loss rate at different initial temperatures

$$\dot{m}'' \sim \left[\sigma(t_h^4 - t_f^4) [1 - \exp(\kappa\beta D)] - \rho_f c_f \int_0^{h_f} \frac{dt}{d\theta} dh - (t_f - t_0)^{4/3} \left(\frac{k_f^3 g \alpha_v Pr}{v^2} \right)^{1/3} \right] \tag{5}$$

考虑到 h_f 较薄,正庚烷内部温度均匀。式(5)可简化为:

$$\dot{m}'' \sim [C_1 + C_2 \exp(-\kappa\beta D) + C_3(t_f - t_0)h_f + C_4(t_f - t_0)^{4/3}] \tag{6}$$

式中 $C_1、C_2、C_3$ 和 C_4 为拟合系数。

图3为由式(6)得到的 $\dot{m}$ 随 $(t_f - t_0)$ 变化曲线。可以看出,试验数据拟合结果较好, R^2 均大于0.98。 $\dot{m}$ 与 $(t_f - t_0)$ 和 $(t_f - t_0)^{4/3}$ 呈非线性递减关系。

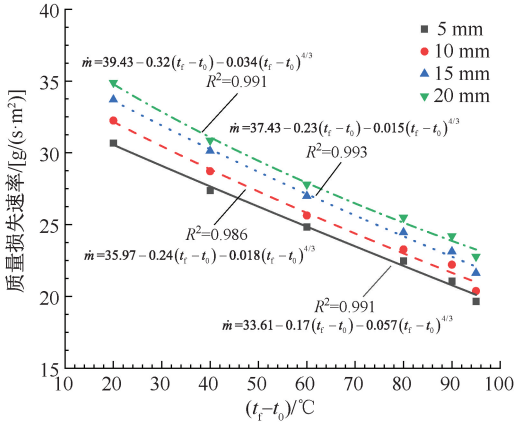


图3 $\dot{m}$ 与 $(t_f - t_0)$ 的定量关系

Fig. 3 Quantitative relationship between $\dot{m}$ and $(t_f - t_0)$

2.2 火焰高度

图4为 $h_f = 5, 20$ mm时火焰高度 H 随时间的变化。油池点燃后, H 在短时间内迅速增加;当燃烧进入稳定阶段, H 基本保持稳定;正庚烷不断消耗, H 降低。当 $t_0 = 5$ °C、 h_f 由5增加至20 mm时, H 升高90.8 mm。这是因为随着 h_f 增加,正庚烷内部聚集更多热量促进燃烧, H 随之增加。

图5为不同 t_0 下的 H 。 H 与 t_0 呈正相关,当 $h_f = 20$ mm、 t_0 由5升高至80 °C时, H 增加170.4 mm。随着 t_0 的升高,底部正庚烷更容易达到沸点,可燃气向上运动加剧,导致 H 增加。

火焰高度经验关系式为^[18]:

$$H/D = 3.7Q^{*2/5} - 1.02 \quad (7)$$

式中: H/D 为无量纲火焰高度; Q^* 为无量纲热释放速率。将无量纲初始温度(t_0/t_f)代入式(7):

$$H/D \sim Q^{*2/5} (t_0/t_f)^{C_h} \quad (8)$$

式中 C_h 为拟合系数。

图6为由式(8)得到的 H/D 与 $Q^{*2/5} (t_0/t_f)^{0.018}$ 定量关系。 H/D 与 $Q^{*2/5} (t_0/t_f)^{0.018}$ 呈线性关系, $R^2 = 0.965$ 。

2.3 火羽流温度

图7为 $h_f = 5$ mm、 $t_0 = 5, 80$ °C下的火羽流温度 t_p 随时间的变化。 t_p 呈迅速升高-趋于稳定-缓慢下降的趋势。 $t_0 = 5$ 和 80 °C时, t_p 稳定阶段持续时间分别为166和95 s。 t_0 升高,燃烧速率加快, t_p 稳定阶段持续时间减少。

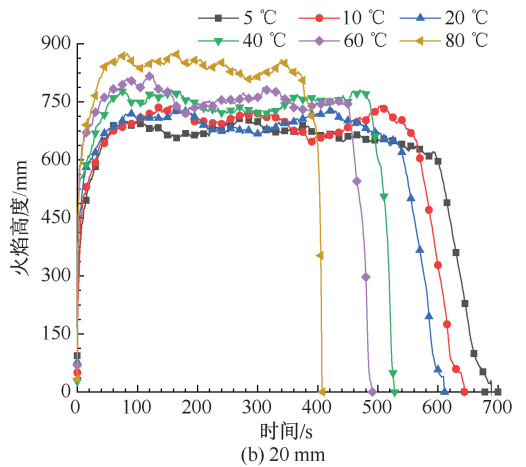
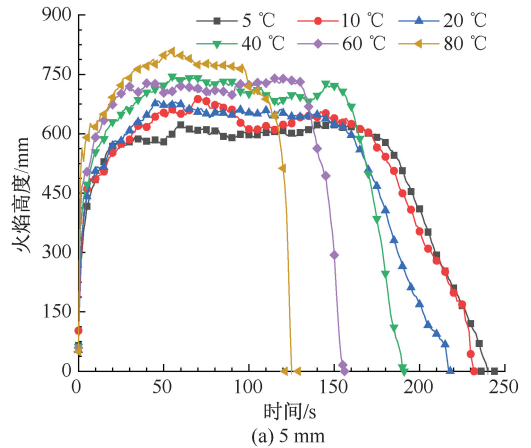


图4 燃料厚度为5和20 mm下的火焰高度

Fig. 4 Flame height at fuel thicknesses of 5 and 20 mm

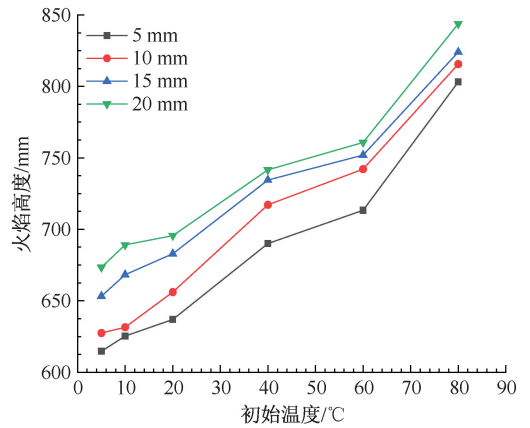


图5 不同初始温度下的火焰高度

Fig. 5 Flame height at different initial temperatures

图8为不同测点高度下的 t_p 。 t_p 随着测点高度增加,呈现先升高后降低趋势。 t_p 与 t_0 呈正相关。当测点高度为200 mm, t_0 由5 °C升高至80 °C时, t_p 增加130 °C。 t_0 越高对应的火羽流连续火焰区增加,因此 t_p 升高。

高度 z 处的火羽流温度 t_z 表达式为^[19]:

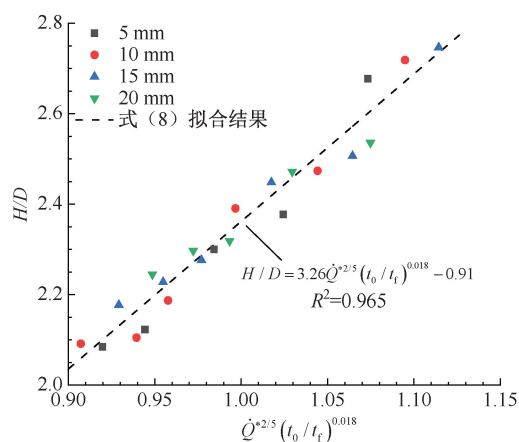


图 6 H/D 与 $Q^{*2/5}(t_0/t_f)^{0.018}$ 的定量关系

Fig. 6 Quantitative relationship between H/D and $Q^{*2/5}(t_0/t_f)^{0.018}$

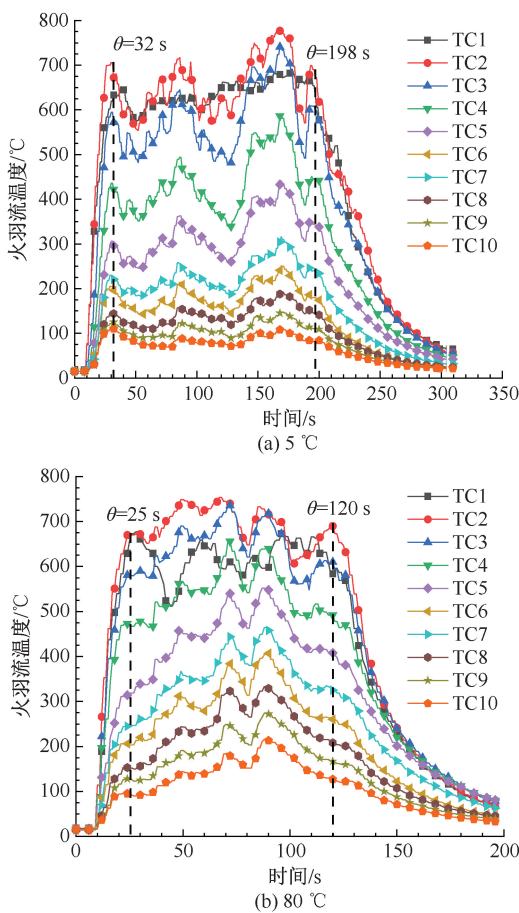


图 7 初始温度为 5 和 80 °C 下的火羽流温度

Fig. 7 Temperature of fire plume at initial temperature of 5 and 80 °C

$[(t_z - t_\infty)/t_\infty]/Q^{*2/3} \sim [(z - z_0)/D]^{-5/3}$ (9)
式中: t_∞ 为环境温度, °C; z 为火羽流高度, m; z_0 为虚拟火源高度, m。

定义无量纲火羽流温度 $t_z^* = [Q^{*2/3}t_\infty/(t_z -$

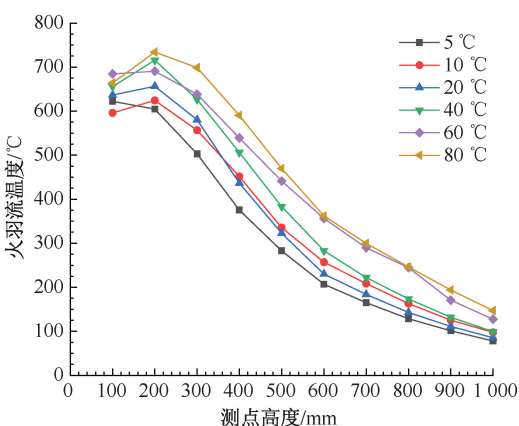


图 8 不同测点高度下的火羽流温度

Fig. 8 Temperature distribution of fire plume at different measuring point heights

$t_\infty)]^{3/5}$, 同时引入 (t_0/t_f) , 式(9)写为:

$$t_z^*(t_0/t_f)^{C_p} \sim z - z_0 \quad (10)$$

式中 C_p 为拟合系数。

图 9 为由式(10)得到的 $t_z^*(t_0/t_f)^{0.46}$ 随 $(z - z_0)$ 的变化。可以看出, 二者呈明显的线性关系, $R^2 = 0.927$ 。

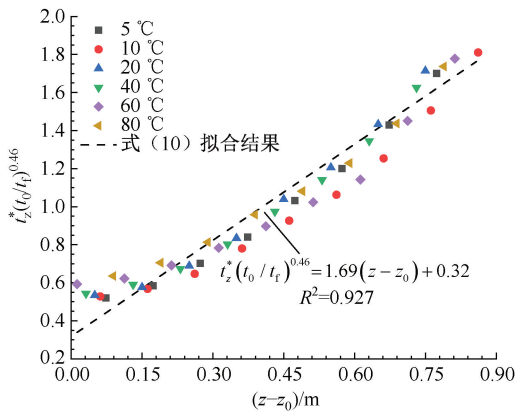


图 9 $t_z^*(t_0/t_f)^{0.46}$ 与 $(z - z_0)$ 的定量关系

Fig. 9 Quantitative relationship between $t_z^*(t_0/t_f)^{0.46}$ and $(z - z_0)$

3 结 论

1) 初始温度为 5~60 °C 时, 油池火燃烧过程分为增长、稳定和衰减 3 个阶段; 初始温度升高至 80 °C 时, 燃烧过程分为增长、稳定、沸腾过渡、沸腾和衰减 5 个阶段。质量损失速率与初始温度呈正相关。初始温度由 5 °C 升高至 80 °C 时, 质量损失速率增加 12.13 g/(s · m²)。质量损失速率随正庚烷沸点与初始温度的温差非线性递减。

2) 随着初始温度升高, 火焰高度和火羽流温度

显著增加。初始温度由 5 ℃ 升高至 80 ℃ 时,火焰高度和火羽流温度分别增加 170.4 mm 和 130 ℃。火羽流温度呈迅速升高-趋于稳定-缓慢下降的趋势。火焰高度与油池直径之比为正庚烷初始温度与沸点之比的幂函数。

参 考 文 献

- [1] 程关兵,叶豪辉. 基于 FDS 的风扇舱双油池火温度变化特征[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 133-139.
Cheng Guanbing, Ye Haohui. Temperature variation characteristics of double fuel-pool fire in fan cavity based on software FDS[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 133-139.
- [2] 李苗,李凌波,左志恒,等. 基于机器学习的成品油管道运行工况识别[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 127-135.
Li Miao, Li Lingbo, Zuo Zhiheng, et al. Machine learning-based recognition for recognizing operating conditions of multi-product pipelines[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 127-135.
- [3] Nakakuki A. Heat transfer in pool fires at a certain small lip height[J]. Combustion and Flame, 2002, 131(3): 259-272.
- [4] 张佳庆,尚峰举,何旭,等. 变压器油沸溢池火温度特征及传热模型试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 106-113.
Zhang Jiaqing, Shang Fengju, He Xu, et al. Study on temperature characteristics and heat transfer model of boilover in transformer oil pool fires[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 106-113.
- [5] Bellino P W, Rangwala A S, Flynn M R. A study of in situ burning of crude oil in an ice channel[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 2 539-2 546.
- [6] Farahani H F, Jomaas G, Rangwala A S. A study on burning behavior and convective flows in methanol pool fires bound by ice[J]. International Oil Spill Conference Proceedings, 2017, 2017(1): 1 983-1 998.
- [7] Kong Depeng, Zhang Zhen, Ping Ping, et al. Experimental study on burning behavior of crude oil pool fire in annular ice cavities[J]. Fuel, 2018, 234: 464-472.
- [8] Kong Depeng, Zhang Zhen, Ping Ping, et al. Effects of the initial fuel temperature on burning behavior of crude oil pool fire in ice cavities[J]. Experimental Heat Transfer, 2018, 31(5): 436-449.
- [9] Chen Bin, Lu Shouxiang, Li Changhai, et al. Initial fuel temperature effects on burning rate of pool fire[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 188(1/2/3): 369-374.
- [10] Hu Longhua, Liu Shuai, Xu Yong, et al. A wind tunnel experimental study on burning rate enhancement behavior of gasoline pool fires by cross air flow[J]. Combustion and Flame, 2011, 158(3): 586-591.
- [11] White D, Beyler C L, Fulper C, et al. Flame spread on aviation fuels[J]. Fire Safety Journal, 1997, 28(1): 1-31.
- [12] 赵金龙,袁杰,田逢时,等. 初始油温对变压器油燃烧特性的影响[J]. 化工学报, 2020, 71(7): 3 379-3 386.
Zhao Jinlong, Yuan Jie, Tian Fengshi, et al. Effect of initial fuel temperature on burning characteristics of transformer oil[J]. CIESC Journal, 2020, 71(7): 3 379-3 386.
- [13] 张纪元,黄鑫,周晓猛. 低温低压环境下正庚烷池火燃烧特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(7): 148-154.
Zhang Jiyuan, Huang Xin, Zhou Xiaomeng. Study on combustion characteristics of n-heptane pool fire in low-temperature and low-pressure environment[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(7): 148-154.
- [14] Zhao Jinlong, Huang Hong, Jomaas G, et al. Experimental study of the burning behaviors of thin-layer pool fires[J]. Combustion and Flame, 2018, 193: 327-334.
- [15] Garo J P, Koseki H, Vantelon J P, et al. Combustion of liquid fuels floating on water[J]. Thermal Science, 2007, 11(2): 119-140.
- [16] Li Cong, Xu Wenbo, Wang Yuqing, et al. Analysis of internal energy and mass loss rate of fuel with water sublayer at different initial temperatures[J]. Energy, 2023, 283: DOI: 10.1016/j. energy. 2023. 129037.
- [17] Garo J P, Vantelon J P, Koseki H. Thin-layer boilover: prediction of its onset and intensity[J]. Combustion Science and Technology, 2006, 178(7): 1 217-1 235.
- [18] Morgan J H, Daniel G, John R H, et al. SFPE handbook of fire protection engineering[M]. New York: Springer, 2016: 396-428.
- [19] McCaffrey B J. Momentum implications for buoyant diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 1983, 52: 149-167.

作者简介: 李 聪 (1991—),男,安徽淮南人,博士,副教授,主要从事低温边界油池燃烧、森林火灾动力学研究。E-mail:18600156862@163.com。

