燃烧科学与技术
Journal of Combustion Science and Technology
2026,32(5):525-532
DOI 10.11715/rskxjs.R202510006

乙醇池火燃烧行为实验分析

宋广恒[1]，赵利宏[1,2]，董佳其[1]
（1. 中国建筑科学研究院建筑防火研究所，北京 100013；2. 河南理工大学土木工程学院，焦作 454000）

摘　要：为了探究乙醇池火的火焰和燃烧特性，在全尺度隧道内搭建了油池火实验平台，研究了单一火源与双火源燃烧工况下油池火的燃烧行为，分析了燃烧过程中火焰高度、温度分布及脉动频率的变化规律. 结果表明：油池火的火焰高度与油盘当量直径呈显著线性关系；纵向火焰温度分布与 McCaffrey 无量纲模型高度吻合，但双油盘燃烧时因火焰规模扩大导致无量纲温度略有升高；基于实验数据修正了火焰脉动频率的比例系数 K 为 0.52. 根据以上结果，修正了矩形乙醇池火无量纲火焰温度、火焰高度和火焰脉动频率的预测模型.

关键词：油池火；燃烧行为；火焰高度；脉动频率
中图分类号：X932　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-8740(2026)05-0525-08

Burning Behavior of Ethanol Pool Fire

Song Guangheng[1], Zhao Lihong[1,2], Dong Jiaqi[1]
(1. Institute of Building Fire Research, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;
2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: To investigate the flame and burning characteristics of ethanol pool fires, a pool fire experimental platform was built in a full-scale tunnel. The burning behavior of pool fires under single-fire and double-fire burning conditions was studied, respectively. The variation of flame length, temperature distribution and pulsation frequency during the burning process was analyzed. The results show that there is a significant linear relationship between the flame length of pool fires and the equivalent diameter of the fuel pan. The longitudinal flame temperature distribution is in good agreement with the McCaffrey dimensionless model, but the dimensionless temperature increases slightly in the case of double-fuel-pan burning due to the expanded fire scale. The proportional coefficient K of the flame pulsation frequency is revised to 0.52 based on the experimental data. According to the above results, the prediction models for the dimensionless flame temperature, flame length and flame pulsation frequency of rectangular ethanol pool fires are modified.

Keywords: pool fire; burning behavior; flame length; pulsation frequency

乙醇作为一种常见的清洁燃料，被广泛应用到化工、能源等领域. 高浓度乙醇在储存、运输过程中容易发生泄漏，一旦被点燃，极易形成持续燃烧的油池火，通常伴随高温火焰和强烈辐射，对周围人员和装置造成较大威胁. 例如，2014 年 7 月 19 日，沪昆高速公路一辆运载乙醇的轻型货车与大客车碰撞，大量

收稿日期：2026-01-13.
基金项目：建筑安全与环境国家重点实验室/国家建筑工程技术研究中心开放基金资助项目(BSBE2023-09).
作者简介：宋广恒(1997—　　)，男，硕士，工程师，guanghengsong@163.com.
通信作者：赵利宏，男，博士，高级工程师，zleehom@163.com.

乙醇瞬间泄漏起火燃烧，致使 5 辆车被烧毁，造成 54 人死亡、6 人受伤，直接经济损失 5 300 余万元[1].

油池火的危险性与其火焰行为密切相关[2-3]. 几十年来，学者们对其火焰高度和火焰脉动频率进行了广泛实验研究. Zukoski 等[4]开展了一系列不同热释放速率下的燃烧实验，并将平均火焰高度定义为发生概率为 50% 的火焰高度. Heskestad[5]利用汽油、酒精等燃料开展了不同尺寸下的油池火实验，定义了无量纲火焰高度，并发现其与无量纲热释放速率的 2/5 次方呈正比. 对于浮力湍流扩散火焰的火焰脉动频率，Cetegen 和 Ahmed[6]使用圆形和方形燃烧器开展了一系列实验，系统地研究了扩散火焰的振荡现象，并提出了频率 f 和燃烧直径 D 之间的关系，被其他学者广泛使用[7-9]. Zhang 等[8]使用 5 个不同边长（10 cm、15 cm、20 cm、25 cm 和 30 cm）的方形气体燃烧器研究了不同限制条件（自由、墙壁和角落火焰）下的火焰行为，发现了自由燃烧火焰的火焰脉动频率最高，其次是墙壁火焰，然后是角落火焰. Huang 等[9]在不同尺寸的侧壁高度下开展了油池火燃烧实验，发现侧壁对空气卷吸造成的堵塞显著降低了火焰脉动频率. 上述研究表明，火焰高度、火焰脉动频率等火焰行为与热释放速率、燃烧器直径和边界条件密切相关.

火焰温度与火焰的传播机制和周围热辐射密切相关[7]. Hasemi 等[10]利用不同形状的油盘开展了一系列油池火实验，开发了与各种燃烧器配置相对应的火焰高度预测模型，提出了方形、矩形和线性火源的标准化预测框架. Zhao 等[11]在 1∶10 比例的隧道中进行了双火源油池火实验，研究了油盘尺寸和间距对顶棚温度分布的影响，通过引入燃烧器间距，建立了最大温升模型. Tao 等[12]利用直径 15 ~ 55 cm 的环形油盘开展了乙醇燃烧实验，分析了空气卷吸效应对火焰高度和火焰温度的影响.

目前，对乙醇池火火焰行为的研究相对较少，尤其很少探讨火焰脉动行为的变化. 此外，大部分实验研究都集中在实验室尺度，与实际火灾场景下的油池燃烧相差较大. 因此，本文开展不同工况下的乙醇池火燃烧实验，研究不同油盘组合下，分析其火焰高度、火焰脉动频率及火焰温度的变化规律，为油池火灾风险评估及消防救援提供参考.

1　实验装置和方法

1.1　实验装置

实验设计及测量装置的布置见图 1. 实验中，采用了 84 cm × 60 cm 的铁盘作为燃烧容器，油盘侧壁高度为 10 cm，油盘中加入 16 L 乙醇作为燃料. 为防止燃烧过程中铁盘受热变形，将其放置在 100 cm × 70 cm 的承水盘中，承水盘中加入足量的冷却水. 实验前，在油盘中心轴线上布置 5 根间距为 50 cm 的 K 型铠装热电偶，用于测量纵向火焰温度，最底端的热电偶距油品表面 25 cm. 为了监测火焰辐射变化，距离油盘中心 2.5 m 处布置了量程 20 kW 的热流计. 采用 Fluke 采集模块记录热电偶实时采集的数据信号，采集间隔为 1 s. 利用索尼高清相机（SONY HDR-CX450）正面记录火焰形态，主要用于提取火焰脉动频率和火焰高度. 本实验分别研究了单油盘和双油盘乙醇池火的火焰行为，油盘布置见图 2.

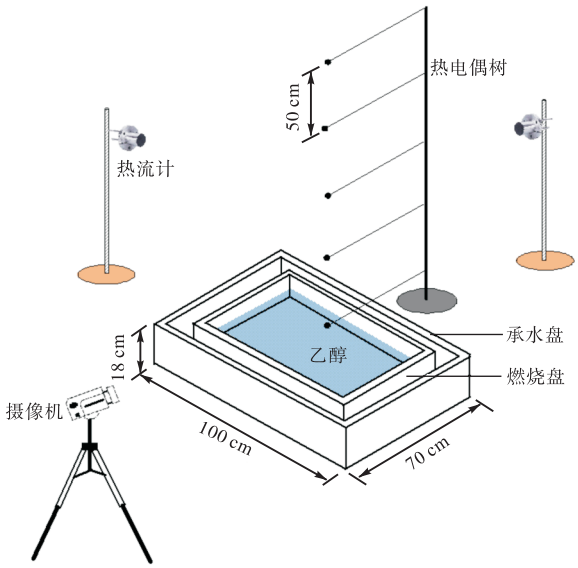
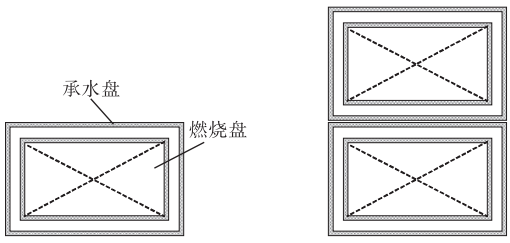


图 1　实验装置示意

Fig.1　Schematic diagram of the experimental apparatus



（a）工况 1　　（b）工况 2

图 2　工况 1 及工况 2 油盘示意

Fig.2　Diagram of the fuel pan for Test 1 and Test 2

整个实验是在全尺度独头隧道内完成，隧道长 300 m、宽 45 m、高 9 m，整个隧道内部开阔，不考虑空间环境对油池火燃烧的限制. 实验期间，隧道洞口关闭，忽略风速对实验的影响. 隧道内，环境温度为（27 ± 1）℃. 实验的具体工况见表 1.

表 1　实验工况设置

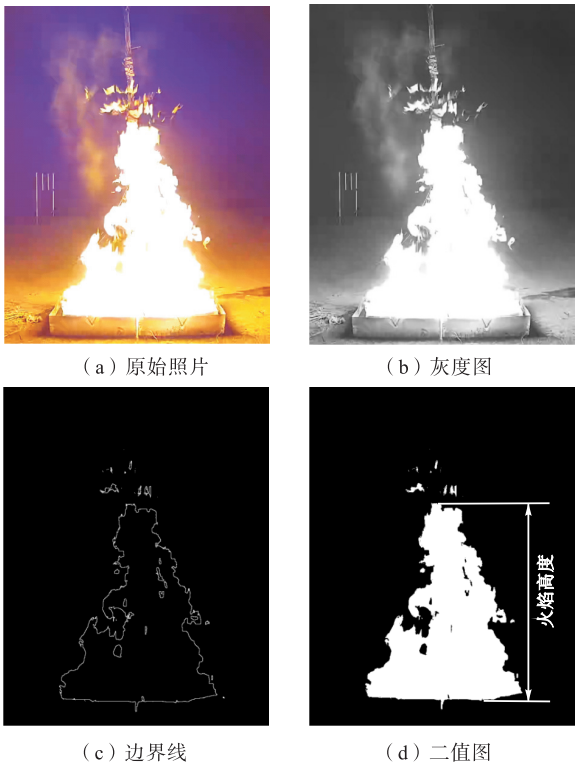
Tab.1　Experimental condition setup

工况	油盘数量	油品量/L	油品类型
1	1	16	95% 乙醇
2	2	32	95% 乙醇

1.2　火焰高度处理方法

在油池火实验的研究中，通常采用识别火焰 RGB 值的方法识别火焰燃烧区域，再结合比例尺确定火焰的实际高度. 本研究中，开发了专门用于处理火焰高度的程序，通过代码识别火焰与环境的亮度差别，从而确定实验中的火焰高度和扩散前沿位置. 为了使火焰识别更加准确，本研究中的乙醇燃烧实验选择在光线较暗的环境下进行.

以双油盘乙醇池火的火焰高度处理过程为例. 首先，通过高清摄像机记录油池火的整个燃烧过程，然后将所记录的视频文件（MTS 文件）中每一帧转换为图片（JPG 格式），具体见图 3(a)；同时，基于每个像素处的亮度去除火焰的颜色信息，并将原始火焰图像转换为灰度图像（图 3(b)）；然后，通过设置阈值对获得的灰度图像进行二值化和分割，并获得火焰的边界线（图 3(c)），本实验中火焰背景干扰较小，为得到清晰的火焰轮廓所取帧间稳定性 σ 值为 0.8；最后，通过对边界线进行功能化，可以获得清晰的二值图像，并基于一定的尺度确定火焰高度. 使用相同的方法来处理由摄像机记录的火焰面积可以进一步得到实时燃烧半径.



（a）原始照片　（b）灰度图

（c）边界线　（d）二值图

图 3　火焰高度处理过程

Fig.3　Flame length extraction process

对于平均火焰高度，Zukoski 等[13]将其定义为火焰间歇率为 0.5 时的火焰高度. 在本实验中，采用相同的方法确定了双火源油池火的平均火焰高度，具体见图 4.

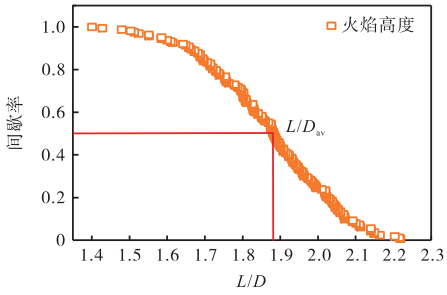
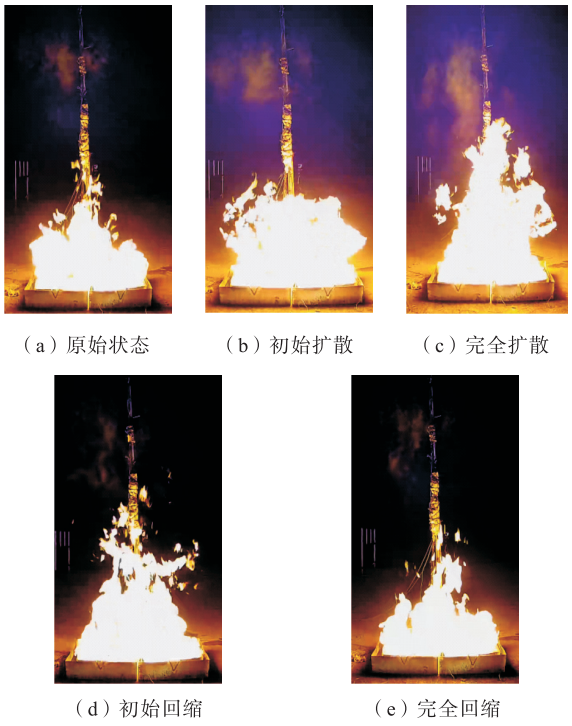


图 4　工况 2 中平均火焰高度

Fig.4　The mean flame length in Test 2

1.3　火焰脉动处理方法

火焰脉动频率是油池火的重要参数之一[14]. 根据火焰脉动机制，浮力扩散火焰在停滞环境中加速时，会在燃烧表面上方的一个燃烧器直径内形成环形涡旋结构，而这种环形涡旋结构会导致向上运动的浮力扩散火焰逐渐衰减，以及浮力气体在火焰内的积累，并加速形成下一个涡旋结构，具体见图 5. 对于



（a）原始状态　（b）初始扩散　（c）完全扩散

（d）初始回缩　（e）完全回缩

图 5　典型火焰脉动图像

Fig.5　Typical sequential flame images of the pool fire

火焰脉动的处理，前人大多采用快速傅里叶变换（fast Fourier transform，FFT）的方式，其中，火焰脉动频率是由连续图像序列的时间变化确定的. 对于本文中的乙醇池火，火焰脉动频率可以通过火焰投影区域的 FFT 分析得到. 图 6 给出了双火源乙醇池火的火焰脉动频率处理结果.

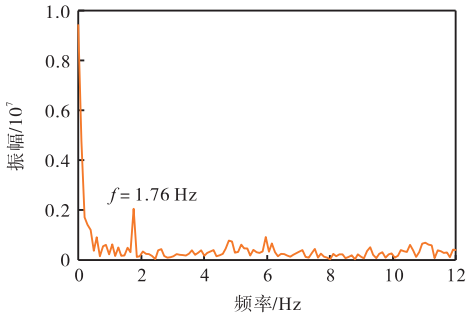


图 6　工况 2 中提取到的火焰脉动频率

Fig.6　Flame pulsation frequency extraction in Test 2

2　实验结果与讨论

2.1　燃烧过程

乙醇在不同燃烧阶段下火焰形态和火焰温度如图 7 所示. 乙醇点燃后，火焰迅速燃烧至整个油品表面，在隧道阴暗环境下，火焰呈金黄色，火焰高度逐渐增大. 燃烧持续约 200 s 后，火焰高度逐渐趋于稳定，但仍能观察到明显的火焰脉动. 稳定燃烧持续约 600 s，火焰高度开始下降，标志着燃烧进入熄灭阶段. 在熄灭阶段，火焰逐渐进入油盘，油品蒸汽和空气在油盘内部混合，形成预混燃烧. 根据火焰高度变化规律，整个燃烧过程可分为燃烧发展阶段、稳定燃烧阶段和燃烧熄灭阶段[11].

2.2　火焰高度

根据图 8 中火焰高度和火焰辐射处理结果，两种工况下实时火焰高度具有较好的重复性，整个燃烧过程具有清晰的阶段性变化. 在稳定燃烧阶段（Ⅱ），油池火火焰高度较大，持续时间较长，会对消防救援造成较大困难，为了预测矩形乙醇池火稳定阶段火焰高度，定义油盘的当量直径为[15]

$$\bar{D}=\frac{2lw}{l+w} \tag{1}$$

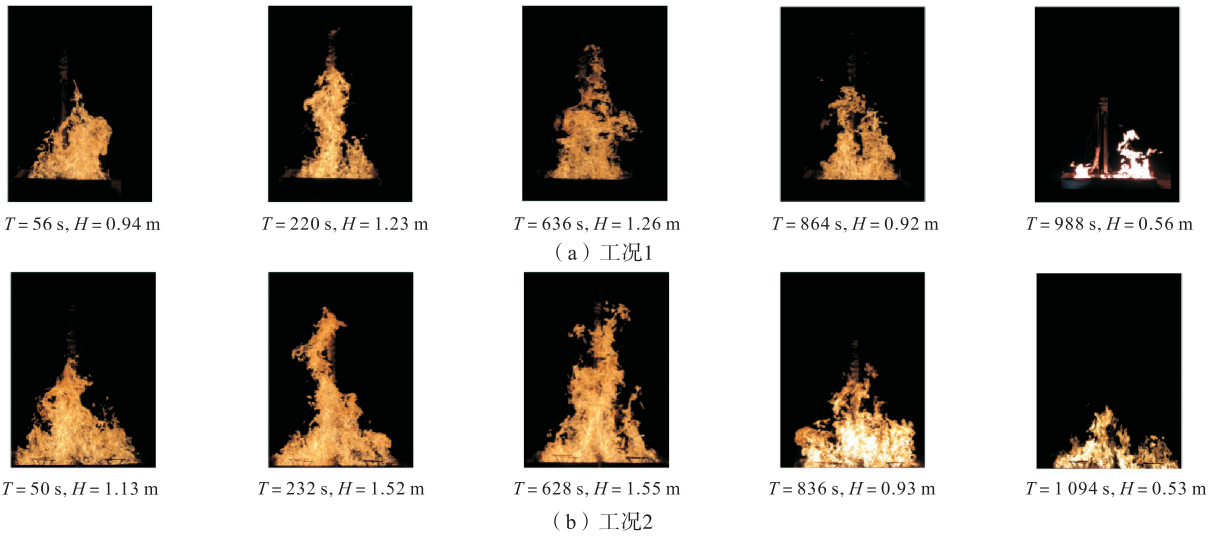


图 7　不同时刻下的油池火图像

Fig.7　Images of pool fire at different times

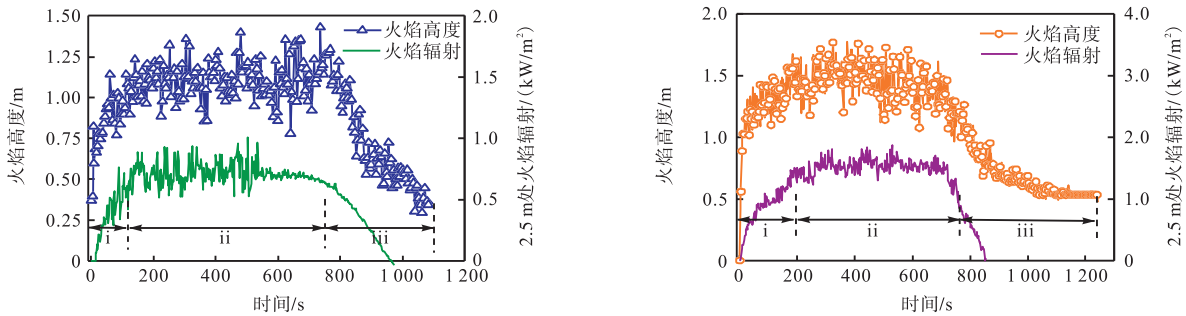


图 8　工况 1 和工况 2 中火焰高度及辐射随时间的变化

Fig.8　The flame length and thermal radiation as a function of time for Test 1 and Test 2

式中：l 为油盘长度，w 为油盘宽度. 计算得出工况 1 和工况 2 中油盘的当量直径分别约为 0.7 m 和 1.0 m.

对于火焰高度，前人通常采用无量纲火焰高度进行分析，其可与无量纲量 $\dot{Q}^*$ 有关[5]：

$$L_s / D = a(Q^*)^b + c \tag{2}$$

式中：a、b 和 c 是拟合参数，部分油池火的相关参数值列于表 2 中. L_s 为稳定燃烧阶段的火焰高度，m；$\dot{Q}^*$ 为无量纲热释放速率，对于本实验中的矩形油池火燃烧，取 $D=\bar{D}$，在油池火稳定燃烧阶段，无量纲热释放速率可以表示为

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_{pa} T_\infty g^{1/2} D^{5/2}} \tag{3}$$

式中：ρ_∞ 为空气密度，kg/m^3；T_∞ 为环境温度，K；g 为重力加速度，9.81 m/s^2；c_{pa} 为常压下空气的比热，kJ/(kg · K)；$\dot{Q}$ 为热释放速率，kW.

表 2　不同火焰高度条件下参数取值

Tab.2　The values of the parameters in the existed flame length correlations

名称	公式	a	b	c	备注
Heskestad[5]	$\frac{m'\Delta H_c \pi}{4\rho_\infty c_{pa} T_\infty \sqrt{gD}}$	3.7	0.4	−1.02	湍流火焰
Mangialavori 等[16]	$\frac{m'}{\rho_\infty \sqrt{gD}}$	31.6	0.58	0	D 取 1 ~ 6 m
Fay[17]	$\frac{m'}{\rho_\infty \sqrt{gD}}$	13.8 ± 2.15	2/3	0	LNG 池火

表 2 中，m' 为稳定燃烧速率，kg/s；ΔH_c 为燃烧热，kJ/kg. 通过表 2 可以看出，公式(3)中参数的取值差异较大，这与具体燃烧规模、油品种类等条件有关，若考虑燃烧规模，本实验中的火焰高度可以通过 Heskestad[5]模型计算. 为了清晰表达出火焰高度与燃烧直径之间的关系，图 9 给出了相关研究数据与本实验结果的比较，通过拟合，得出平均火焰高度与燃烧直径之间的拟合公式 $L_{pool} = 2.78D + 0.3$，该公式可以较好地预测本实验中的火焰高度.

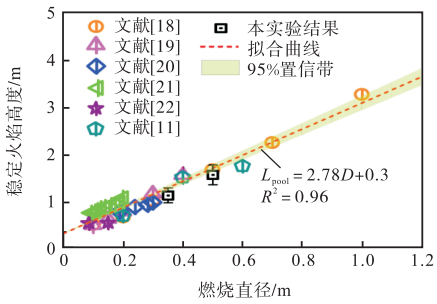


图 9　实验结果与前人数据比较

Fig.9　Comparison of flame length between this experiments and other pool fires

2.3　火焰温度

油池火在燃烧时，池火上方的火焰与火焰上方的烟气运动称为火羽流[23]. 根据火羽流区域中不同高度处的特点，自下而上，火羽流可以被分成 3 个区域[13]：连续火焰区，间歇火焰区和浮力羽流区. 在连续火焰区通常会产生恒定的火焰. 在间歇火焰区，由于火焰的脉动作用，火焰会呈现出不连续的闪烁效果. 连续火焰区与间歇火焰区统称为下部发光火焰区. 浮力羽流区，即火焰上方烟气流动区域，对于大尺度油池火，通常呈现出剧烈的黑烟现象，这一区域也叫做上部非发光区. 本实验中，使用乙醇作为燃料，几乎没有黑色烟气产生.

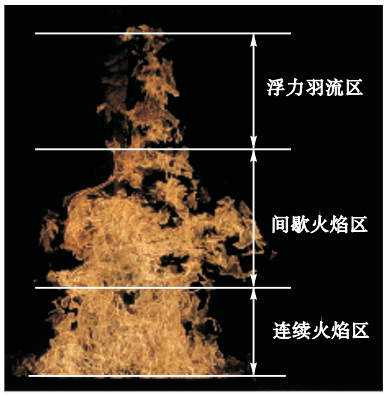


图 10　乙醇池火火焰分区

Fig.10　Zoning of ethanol pool fire

本实验中，工况 2 为双油盘燃烧，燃烧规模相对较大，更贴合实际火灾场景，图 11 给出了以该工况下的油池火纵向温度的变化.

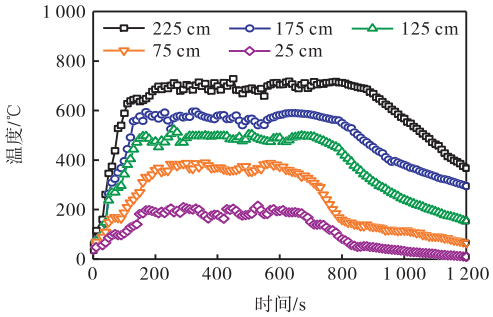


图 11　实验结果与前人数据比较

Fig.11　Comparison of flame length between this experiments and other pool fires

图 11 中的纵向火羽流温度梯度分布明显，油品被点燃后，纵向热电偶温度立即升高，约 200 s 后，进入稳定燃烧阶段，火焰温度基本稳定，纵向温度梯度明显，其中，距离燃料表面 225 cm 处中心的平均温度约 698 ℃.

对于浮力扩散火焰，McCaffrey 等[25]基于一系列

油池火实验提出了火焰轴向温升ΔT的相关性：

$$\Delta T_z = T_\infty \left(\frac{k}{C\sqrt{2g}}\right)^2 \left(\frac{Z}{\dot{Q}^{2/5}}\right)^{2\eta-1} \tag{4}$$

在实际计算中，通常采用其无量纲形式：

$$\frac{\Delta T_z}{T_\infty} = \left(\frac{k}{c\sqrt{2g}}\right)^2 \left(\frac{Z}{\dot{Q}^{2/5}}\right)^{2\eta-1} \tag{5}$$

式中：ΔT_z为纵向不同高度相对环境温度的温升；T_∞为环境温度；g 为当地重力加速度；η和k为经验系数；c为常数，其值约为 0.9；Z为测点纵向高度.

McCaffrey 等[25]将火焰的 3 个分区单独计算，并通过实验确定了各项参数的具体值，具体见表 3.

表 3　McCaffrey 模型

Tab.3　McCaffrey model

火焰分区	k	η	$(Z/\dot{Q}^{2/5})$ /(m/kW$^{2/5}$)
连续火焰区	6.8	1/2	<0.08
间歇火焰区	1.9	0	0.08≤ $Z/\dot{Q}^{2/5}$ ≤0.2
浮力羽流区	1.1	−1/3	>0.2

根据表 3 中的各项参数取值，在图 12 中给出了 McCaffrey 无量纲温度模型曲线，同时与本实验中的实验数据进行了比较.

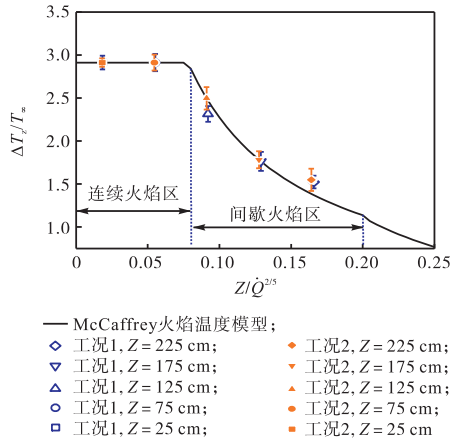


图 12　实验结果与 McCaffrey 无量纲火焰温度模型比较

Fig.12　Comparison of experimental results with McCaffrey's dimensionless flame temperature model

根据图 12，McCaffrey 无量纲火焰温度模型较好地预测了本实验中纵向火焰温度分布. 本实验中，所测量的温度主要分布在间歇火焰区内，相比于工况 1 中的单油盘油池火燃烧，工况 2 中的无量纲火焰温度略有升高，这可能是由于双火源空气卷吸增强导致的，卷吸增强导致火焰高度增大，测点温度略有升高；同时，火焰辐射增强导致燃烧速率增大，$Z/\dot{Q}^{2/5}$略有减小，而无量纲火焰温度相对增大.

2.4　火焰脉动

在稳定燃烧阶段，乙醇池火的火焰呈现出较为规律的周期性波动，通过火焰脉动频率的处理，得到了不同工况下乙醇池火的稳定火焰脉动频率，具体见图 13，为了便于分析和比较，图中也绘制出了前人研究中部分油池火稳定火焰脉动频率数据.

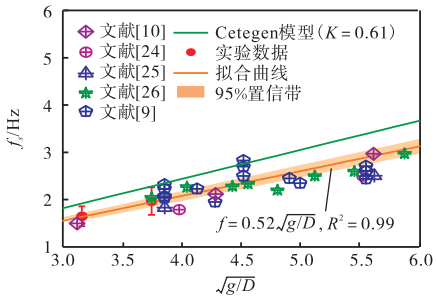


图 13　本实验稳定阶段火焰脉动实验结果与相关数据比较

Fig.13　The comparison of flame pulsation frequency between this experiments and pool fires at the quasi-steady burning phase

为了预测浮力扩散火焰的火焰脉动频率，Cetegen 和 Ahmed(1993)基于大量实验研究提出了公式(6)：

$$f = K\sqrt{\frac{g}{D}}\left[\left(1+\frac{1}{R_i}\right)^{1/2} - \frac{1}{\sqrt{R_i}}\right]^{-1} \tag{6}$$

式中：系数$K = C(\rho_\infty/\rho_f - 1)^{1/2}$，需根据具体实验条件确定；$C$ 为比例因子；ρ_∞为大气密度；ρ_f为羽流密度；g 为重力加速度，理查德森数 Ri 是浮力和惯性力的比值，即

$$R_i = \frac{(\rho_\infty - \rho_f)gD}{\rho f \mu_f^2} \tag{7}$$

式中μ_f为出气口气流的整体速度.

在本实验中，μ_f几乎为零，因此 R_i 变得非常大. 式(6)可以简化为

$$f = K\sqrt{\frac{g}{D}} \tag{8}$$

为了描述方形油池火稳定燃烧阶段下火焰脉动频率的一般规律，通过拟合本研究中的实验数据和相关实验结果，得到了具体 K 值为 0.52，相比 Cetegen 模型(K = 0.61)，该曲线能更好地描述现有实验数据的火焰脉动频率变化. 因此，公式(8)可以具体表述为

$$f = 0.52\sqrt{\frac{g}{D}} \tag{9}$$

3　结　论

本文通过开展矩形油盘乙醇池火燃烧实验，在隧道无强迫通风、燃烧直径 0.7 ~ 1.0 m 的条件下，系统

分析了不同工况下乙醇池火的典型火焰行为特征，主要结论如下：

(1)实验表明，火焰高度与油盘当量直径呈显著线性相关性，通过拟合相关研究数据，得到了火焰高度与当量直径的线性关系（$L_{pool}=2.78D+0.3$），该关系能够较准确地预测不同油盘配置下的火焰高度.

(2)分布与 McCaffrey 火焰温度预测模型较好地预测本实验中乙醇池火的火焰温度分布. 实验发现，双油盘燃烧时燃烧规模增大导致无量纲温度略有升高，表明模型需结合燃烧规模进行修正以提高预测精度.

(3)结合相关实验数据，提出了适用于预测矩形乙醇池火的火焰脉动频率公式 $f=0.52\sqrt{g/D}$，该公式在较准确地预测了油池火稳定燃烧阶段的火焰脉动频率.

参考文献：

[1] 钟 文，夏 勇. “7·19”特别重大道路交通危化品爆燃事故[J]. 中国安全生产，2014，9(12)：54-55.
Zhong Wen，Xia Yong. The “7·19” extra-major road traffic hazardous chemical deflagration accident[J]. *China Occupational Safety and Health*，2014，9(12)：54-55(in Chinese).

[2] 李满厚，许治国. 圆管内正丁醇火焰传播行为研究[J]. 燃烧科学与技术，2024，30(6)：575-579.
Li Manhou，Xu Zhiguo. Oscillatory behavior of flame spread on n-butanol fuel in a tube[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*，2024，30(6)：575-579(in Chinese).

[3] 张 璇，刘海峰，尧命发. 自燃着火与火焰传播的判别方法研究综述[J]. 燃烧科学与技术，2025，31(2)：188-196.
Zhang Xuan，Liu Haifeng，Yao Mingfa. Review of identification methods for spontaneous ignition and deflagration[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*，2025，31(2)：188-196(in Chinese).

[4] Zukoski E E，Cetegen B M，Kubota T. Visible structure of buoyant diffusion flames [J]. *Proceedings of The Combustion Institute*，1984，20(1)：361-366.

[5] Heskestad G. Luminous heights of turbulent diffusion flames [J]. *Fire Safety Journal*，1983，5：103-108.

[6] Cetegen B M，Ahmed T A. Experiments on the periodic instability of buoyant plumes and pool fires[J]. *Combustion and Flame*，1993，93(1/2)：157-184.

[7] Heskestad G. Fire Plumes，Flame Length，and Air Entrainment[G/OL]. Hurley M J，et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York，NY：Springer，2016：396-428.

[8] Zhang Xiaolei，Fang Xu，Miao Yanli，et al. Experimental study on pulsation frequency of free-，wall- and corner buoyant turbulent diffusion flames[J]. *Fuel*，2020，276：118002.

[9] Huang Xianjia，Huang Tao，Zhuo Xunjia，et al. A global model for flame pulsation frequency of buoyancy-controlled rectangular gas fuel fire with different boundaries [J]. *Fuel*，2021，289：119857.

[10] Hasemi Y，Tokunaga T. Some experimental aspects of turbulent diffusion flames and buoyant plumes from fire sources against a wall and in a corner of walls [J]. *Combustion Science and Technology*，1984，40：1-17.

[11] Zhao Jinlong，Cui Xinyuan，Yao Yongzhneg，et al. The burning process and temperature profile of double fires in a tunnel：An experimental study [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*，2022，125：104500.

[12] Tao Changfa，Liu Yongqiang，Tang Fei，et al. An experimental investigation of the flame length and air entrainment of ring pool fire[J]. *Fuel*，2018，216：734-747.

[13] Zukoski E E，Cetegen B M，Kubota T. Visible structure of buoyant diffusion flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*，1984，20(1)：361-366.

[14] 赵利宏，张清元，王晓天，等. 高原乙醇池火燃烧特性实验研究[J]. 中国安全生产科学技术，2022，18(5)：66-71.
Zhao Lihong，Zhang Qingyuan，Wang Xiaotian，et al. Experimental study on burning characteristics of ethanol pool fire in plateau [J]. *Journal of Safety Science and Technology*，2022，18(5)：66-71(in Chinese).

[15] 梁震寰，朱国庆，田承飞. 综合管廊内线型火源烟气温度场研究[J]. 消防科学与技术，2018，37(12)：1635-1637，1641.
Liang Zhenhuan，Zhu Guoqing，Tian Chengfei. Study

on smoke temperature field of linear fire source in utility tunnel[J]. *Fire Science and Technology*, 2018, 37(12): 1635-1637, 1641(in Chinese).

[16] Mangialavori G, Rubino F. Experimental tests on large hydrocarbon pool fires [C]//*7th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries Taormina*. Italy, 1992: 4-8.

[17] Fay J A. Physical processes in the spread of oil on a water surface [C]// *Proceedings of the International Oil Spill Conference*. American, 1971: 463-467.

[18] Raj P K. Evaporating liquid flow in a channel(an integral model based on shallow water flow approximation) [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, 24(6): 886-899.

[19] Ji Jie, Ge Fanliang, Qiu Tingting. Experimental and theoretical research on flame emissivity and radiative heat flux from heptane pool fires [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 4877-4885.

[20] Tu Ran, Fang Jun, Zhang Yongming, et al. Effects of low air pressure on radiation-controlled rectangular ethanol and n-heptane pool fires [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2591-2598.

[21] Li Yuntao, Huang Hong, Shuai Jian, et al. Experimental study of continuously released liquid fuel spill fires on land and water in a channel [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 52: 21-28.

[22] Shi Congling, Deng Lei, Ren Fei, et al. Experimental study on the flame length evolution of two adjacent hydrocarbon pool fires under transverse air flow[J]. *Energy*, 2023, 262, 125520.

[23] 周星宇，郑晨旭，黄伟明，等. 基于 TA-LIF 的射流火焰温度场测量[J]. 燃烧科学与技术，2025，31(6)：659-670.
Zhou Xingyu, Zheng Chenxu, Huang Weiming, et al. Measurement of jet flame temperature field based on TA-LI[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2025, 31(6): 659-670(in Chinese).

[24] Byram G M, Nelson R M. The modeling of pulsating fires [J]. *Fire Technology*, 1970, 102: 102-110.

[25] Baum H R, McCaffrey B. Fire induced flow field-theory and experiment [J]. *Fire Safety Science*, 1989, 2: 129-148.

[26] Liu Chunxiang, Ding Long, Jangi M, et al. Experimental study of the effect of ullage height on flame characteristics of pool fires [J]. *Combustion and Flame*, 2020, 216: 245-255.