

圆管内正丁醇火焰传播行为研究

李满厚^{1,2}, 许治国¹

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽省氢安全国际联合研究中心, 合肥 230009)

摘要: 本文通过自行设计的高透石英玻璃管道模拟狭长受限空间, 以正丁醇为燃料通过控制不同的封堵率研究受限空间液体火蔓延行为。研究表明, 狭长管道内的火蔓延行为与开放空间火蔓延存在显著差异, 对长 100 cm、内径 10 cm 的管道表现为: 火焰蔓延到右端、火焰蔓延到右端并发生火焰穿梭, 火焰无法蔓延至另一端。管道内火焰分离, 中间没有连续稳定燃烧区域。当封堵率超过 63%时, 火焰无法蔓延至另一端; 管道内火焰分离位置随着封堵率增加而减小。

关键词: 火蔓延; 液体燃料; 受限空间; 火焰分离; 火焰穿梭

中图分类号: X91 文献标志码: A 文章编号: 1006-8740(2024)06-0575-05

Oscillatory Behavior of Flame Spread on n-Butanol Fuel in a Tube

Li Manhou^{1,2}, Xu Zhiguo¹

(1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui International Joint Research Center on Hydrogen Safety, Hefei 230009, China)

Abstract: In recent years, oil pipeline accidents have occurred frequently, causing large economic losses, casualties and environmental pollution. Previous work has mainly studied spilling fires and pool fires caused by oil leaks in open space, but less research has been conducted involving flame spread on liquid surface inside long-narrow confined space (i.e., underground culverts and sewer pipes). In this paper, a self-designed highly transparent quartz glass pipe is used to simulate long-narrow confined space. The behavior of flame spread over n-butanol is investigated by controlling the sealing ratio of the tube. The result shows that the flame spread behavior in confined space is significantly different from that in open space. For flame spread in a 100 cm-long and 10 cm-inner diameter tube, there are three regimes: pulsating flame spread, flame shuttle spread, and incomplete flame spread. As the sealing ratio is beyond 63%, the incomplete flame spread occurs. The longitudinal flame zone is separated during the flame propagation, and there is no continuous burning area in the middle of the tube. The flame separation position decreases as the sealing ratio increases.

Keywords: flame spread; liquid fuel; long-narrow confined space; flame separation; flame shuttle

狭长受限空间是指通道、隧道、管道、储罐等形状狭长的结构物。液体火蔓延在这种狭长受限空间

内, 由于氧气供应不足和空间限制等因素, 液体火灾会呈现出特殊的蔓延特性, 造成灭火难度大、扑救风

收稿日期: 2024-04-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176103); 安徽省重点研究与开发计划资助项目(2022m07020012); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2024HGTO303).

作者简介: 李满厚(1986—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 李满厚, mhli@hfut.edu.cn.

险高. 例如 2013 年山东青岛东黄输油管道原油泄漏, 进入市政排水暗渠并在其中积聚油气, 发生火灾后, 导致原油流入排水暗渠和海面并发生燃烧. 2014 年, 在山西晋城岩后隧道内, 两辆运输甲醇的列车追尾相撞, 造成车内甲醇泄漏着火, 在隧道内高温烟气集聚, 造成 40 人死亡, 直接经济损失 8 197 万元. 前人研究表明, 液体燃料表面的火蔓延行为受多种因素的影响, 如燃料初始温度、油池尺寸、侧壁、风速等^[1]. 对于受限空间液体火灾的研究主要集中在船舶、隧道、地下管廊等受限空间, 前人研究了开口大小、开口形状、封堵率、通风方式等对封闭空间池火和通风不良受限空间火灾的影响^[2].

Glassman 等^[3]通过实验研究提出, 液体表面的火蔓延速度不仅受初温的影响, 还与燃料的闪点温度有关. 当闪点高于初温时, 表面流运动占主导, 称为液相控制火蔓延; 反之, 称为气相控制火蔓延. 火焰脉动传播是液体火蔓延的独特行为, 是固体火蔓延过程中所没有的现象^[4]. Glassman 等^[5]研究发现, 只有当初始温度低于闪点时才发生火焰脉动, 并指出火焰脉动主要受控于表面流的运动. Wang 等^[6]通过实验研究了油池侧壁黏滞力与表面张力之间的竞争关系对于表面流运动的影响, 发现表面流经过油池中心线与侧壁的时间差随油池宽度增加先减小后保持不变. Xu 等^[7]通过实验研究了不同油层厚度丙醇火蔓延行为, 发现火蔓延速度与表面流速度密切相关. Zhang 等^[8]实验证实了初始温度和油池宽度通过改变高温表面的传热来影响火焰的传播速度和火焰脉动频率, 发现表面流动主要由表面张力驱动, 液相对流换热占总热流的比例远大于火焰辐射.

对于受限空间液体火灾的研究, 主要集中在封闭空间池火和隧道火灾中. 美国海军实验室^[9]在无开口密闭舱室内以甲醇作为燃料, 研究燃烧过程中氧气浓度和压力的变化. 研究表明, 由于舱室密闭, 氧气体积分数从 21% 降低到 12% 左右, 火焰会发生熄灭. 由于无开口, 舱室内部氧气体积分数和压力随燃烧的进

行而不断变化, 这类火灾问题呈现非稳态特性. 由于气密空间没有与外界进行物质交换, 内部质量守恒, 从热力学守恒定律出发, Tatem 等^[10]利用多区思想, 得到了气密空间内压力、氧气浓度、温度, 以及燃烧速率等随时间的变化关系. 最终发现, 氧气浓度的下降通过影响空气夹带速率和火焰高度来降低质量损失速率. Shi 等^[11]在隧道中以丙烷为燃料探索了不同封堵率(0、65%、75%、85%~100%)对火灾自熄灭的影响. Li 等^[12]研究了隧道内连续溢油流淌火行为和燃烧特征, 并与开放空间火蔓延行为进行了对比, 结果表明, 隧道内溢油流淌火稳定燃烧面积小于开放空间稳定燃烧面积. Ingason 等^[14]进行了隧道内泄漏流淌火的研究, 给出了不同情况下泄漏率、泄漏尺寸和热释放率的估计模型. Zamashchikov 等^[15]研究了狭长矩形/圆形通道内丁醇火蔓延行为, 研究发现, 火焰的传播速度与氧化剂速度和通道高度有关. 随着氧化剂速度的增加, 火焰的传播速度会随着氧含量的增加而增加.

综上所述, 受限空间相对于油池大得多, 类似于开放空间, 关于火焰在狭窄冗长空间的脉动行为, 以及燃烧产物气体特性研究较少. 考虑到发生火灾后, 一般先采用围堵隔离等方式控制火情扩大, 如组织人员对火灾部位用黄土或消防毛毡等物进行围堵, 然后进行灭火. 本文通过自行搭建的实验平台, 以圆管模拟狭长受限空间这一特殊空间发生的液体火蔓延行为及管内气体变化, 并研究了封堵率对火蔓延的影响, 为消防安全和救援提供理论支撑和指导.

1 实验设计

本文通过自行设计的圆柱形石英玻璃管储存燃料, 石英管透光性好便于观察火焰行为如图 1 所示. 管长 100 cm, 内径 10 cm, 壁厚 4 mm. 管道两端通过石英玻璃片封堵, 通过封堵高度来控制不同的封堵率, 如图 2 所示. 用防火泥加以密封防止漏油.

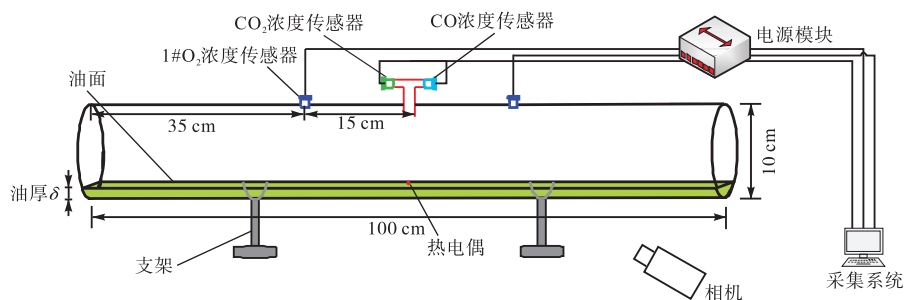


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental apparatus

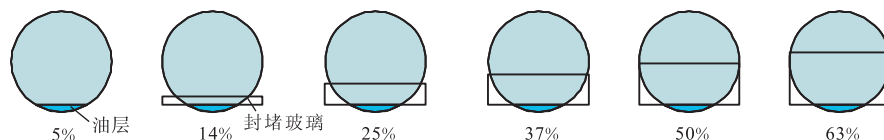


图2 封堵率示意

Fig.2 Sealing ratio diagram

玻璃管上面开 3 个圆孔用于布置气体浓度传感器,从左到右孔径依次为 13 mm、25 mm、13 mm. 通过量筒倒入丁醇. 距离两端管口 35 cm 各布置 1 个 O2S-FR-T4-4P 氧气浓度传感器,耐高温 400 °C,响应时间小于 4 s,每秒记录一个数据. 中间 50 cm 处通过两通弯管布置 1 个 Min IR 型二氧化碳浓度传感器,响应时间 10 s,每秒记录 1 个数据;一个 K-5S 型一氧化碳浓度传感器,响应时间小于 25 s,每秒记录 1 个数据. 传感器测得浓度数据皆为体积浓度. 侧面有一台佳能 6D 相机拍摄火焰运动轨迹. 油膜厚度为 δ . 管道中间 50 cm 处布置一根 K 型铠装热电偶,用于监测油面温度变化,采样频率为 1 Hz.

燃料种类为丁醇,封堵率用 β 表示. 通过封堵高度来控制不同的封堵率,实验中采用蘸有庚烷的棉签引燃,实验在一个密闭房间进行,避免环境风对实验的影响,每组实验至少重复 3 次. 实验期间油温 20 °C 左右,空气温度 15 ~ 22 °C,实验工况见表 1.

表 1 实验工况

Tab.1 Experimental condition

管道直径 D/mm	油膜厚度 δ/mm	封堵高度 h/mm	封堵率 $\beta/\%$
100	10	10	5
		20	14
		30	25
		40	37
		50	50
		60	63

2 结果与讨论

2.1 火焰蔓延现象

火焰序列图如图 3 所示,图中 $\delta=10\text{ mm}$,从左侧引燃正丁醇,当 $\beta=5\%$ 时,引燃后火焰缓慢向前蔓延,火焰向前蔓延的同时,火焰面积逐渐变大,属于初始阶段. 随着火焰面积持续增大,而管道属于狭长受限空间,燃烧所需要的氧气通过两端管口卷吸补给^[10]. 在火焰向右蔓延的过程中存在一个临界面积使得火焰燃烧所消耗的氧气速率大于通过管口卷吸的氧气速率,导致火焰在向右蔓延的过程中由于缺少氧气熄灭导致发生火焰分离^[9]. 图 3(a)中,在 10 s 时距离左端管口 15 cm 左右,火焰完全发生分离. 火焰

发生分离后,由于氧气浓度降低,火焰呈现微弱的蓝色,火焰蔓延到右端之后,只有两端管口处燃烧,中间部分无火焰,将一直燃烧下去. 在整个过程中能明显发现两端管口火焰向里收缩,呈现一定的角度,这是因为只有管内有燃料支持燃烧. 将火焰分离前定义为初始阶段,分离后定义为稳定蔓延阶段.

(a) $\beta=5\%$ (b) $\beta=14\%$ (c) $\beta=63\%$

图 3 火焰序列图

Fig.3 Flame sequence diagram

当封堵率 $\beta=14\%$ 时,如图 3(b)所示,当火焰逐渐靠近右端管口时,由于封堵率增加,从右侧卷吸进入管道的氧气量小于左端端口火焰的氧气消耗量,导致左端管口处氧气浓度下降,火焰熄灭^[2]. 左侧管口火焰熄灭后,在氧气浓度梯度差的作用下,氧气不断通过左端管口卷吸进入管道,使左侧氧气浓度升高,随着氧气浓度升高达到燃烧下限,右端管口处火焰作为火源,火焰开始向左传播,会重复火焰分离. 但是右端蔓延到左端时,由于油面温度升高,属于气相控制火蔓延阶段不同于稳定蔓延阶段的液相控制火蔓延^[3],因此传播速度很快,称为火焰穿梭.

当封堵率 $\beta=63\%$ 时,两端管口难以进入空气. 如图 3(c)所示,火焰在引燃后向前蔓延一段距离后,由于缺少氧气,火焰变得不稳定,火焰开始周期性非稳态脉动并不断消耗管内氧气,这一过程蓝色火焰呈现前进-后退-停滞的趋势,虽然右端管口不断有空气卷吸氧气进入管道,但是由于封堵率高,右端卷吸提供的氧气量不足以支持火焰向右传播,火焰在向右蔓延的过程中不断脉动,随着氧气逐渐被消耗,火焰最终熄灭.

图 4 统计了火焰能够蔓延至右端管口时不同封堵率情况下火焰分离位置变化,火焰分离位置从封堵率为 5% 时的 15 cm,减小到封堵率为 50% 时的 4.8 cm. 可以看出火焰分离位置随着封堵率增加逐渐

靠近左端管口。

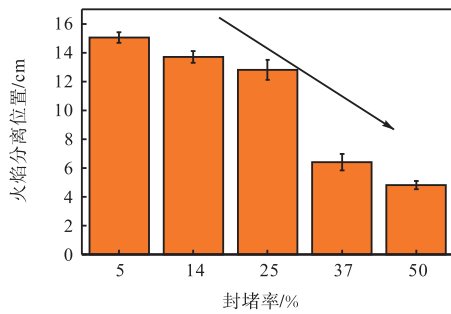


图4 火焰分离位置变化

Fig.4 Variation of flame separation position

2.2 火蔓延速度

为便于将稳定蔓延阶段和火焰穿梭过程进行对比,取管内 30~70 cm 位置,取火焰在各个点处邻域 5 cm 距离除以对应时间的平均速度进行对比^[17],由图 5 可知,在火焰穿梭阶段,火蔓延速度大于 10 cm/s,属于气相控制火蔓延^[18];而初始蔓延由于燃料初温低于闪点,火蔓延速度约为 3 cm/s,与开放空间火蔓延速度接近,属于液相控制液体火蔓延。油面温度变化如图 6 所示,每当火焰经过油面时会有一次明显的温升。由于初始蔓延后油面温度已经升高,且越靠近左端管口处,由于处于引燃端,燃烧产生的丁醇蒸气浓度越高且在左端管口集聚,从左侧卷吸进入管道的氧气与丁醇蒸气提前预混,燃空当量比大于化学计量比,正丁醇预混层流燃烧速度随燃空当量比的

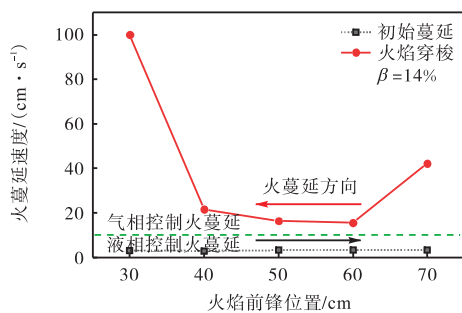


图5 火蔓延速度对比

Fig.5 Comparison of spilling fire rate

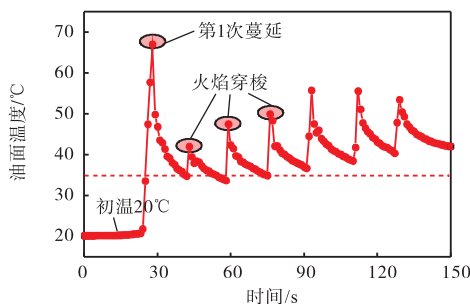


图6 油面温度变化

Fig.6 Variation of oil surface temperature

增加而增加^[19],所以在 30 cm 处的火蔓延速度达到 100 cm/s。

2.3 气体浓度变化

图 7 展示了管内二氧化碳和一氧化碳浓度变化,尽管在受限空间内,氧气供应不足,但燃烧产物仍以二氧化碳为主,产生一氧化碳峰体积分数值为 $5\,000 \times 10^{-6}$,远低于二氧化碳体积分数峰值 $62\,000 \times 10^{-6}$ 。

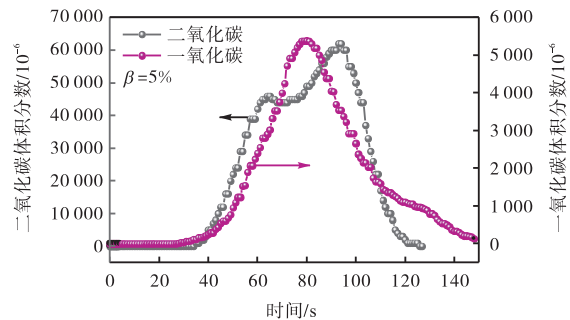


图7 二氧化碳和一氧化碳体积分数变化

Fig.7 Variation in carbon dioxide and carbon monoxide concentrations

图 8 展示了 1#氧气浓度传感器数值变化,随着火焰向前蔓延,在不同封堵率情况下,由于管道属于狭长受限空间,火焰向前蔓延,消耗管内氧气,而两端端口卷吸进入管道的氧气速率小于消耗速率,导致管内氧气浓度降低,氧气浓度降低导致火焰无法维持燃烧而发生火焰分离,这一过程呈现先大幅度下降而后趋于平缓的趋势。能明显发现在火蔓延过程中管内氧气浓度在一段时间内维持在 12% 左右,接近醇类燃烧下限,这与前人研究结论一致^[9]。

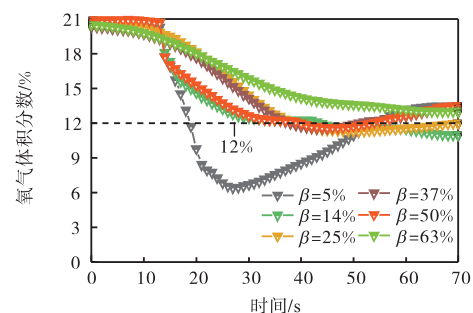


图8 不同封堵率情况下氧气体积分数变化

Fig.8 Oxygen concentration vs time under different sealing ratios

3 结论

狭长受限空间一旦发生火蔓延行为,由于空间的封闭性导致新鲜空气无法及时补充,火焰会发生分离而变得不连续,且火焰在封堵率增加时会发生火焰穿梭。火焰以两端燃烧为主,中间区域由于氧气浓度较

低无法维持稳定燃烧, 是一种复杂的非稳态燃烧行为. 对长 100 cm、内径 10 cm 的管道, 油层厚度为 10 mm 时有以下结论:

(1) 狭长管道内的火蔓延行为与开放空间火蔓延存在显著差异, 管道内不出现连续稳定燃烧区域, 封堵率较小时, 管道两端火焰由于空气卷吸作用向里收缩并维持燃烧, 管道内剩余氧气体积分数维持在 12% 左右.

(2) 火蔓延过程中出现火焰分离, 火焰分离位置随着封堵率增加而减小, 封堵率大于 63% 时, 火焰无法蔓延至另一端.

(3) 管道属于受限空间, 随着封堵率增加可能导致一端管口熄灭, 发生火焰穿梭现象, 火焰穿梭时火蔓延属于气相控制阶段.

参考文献:

- [1] 李满厚. 液体表面火焰传播及表面流传热特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
Li Manhou. Flame Spread over Liquid Fuels and Heat Transfer Characters of Subsurface Convection Flow[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015 (in Chinese).
- [2] 黎昌海. 船舶封闭空间池火行为实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
Li Changhai. Experimental Study on Pool Fire Behaviors in Closed Compartment on Ship[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010 (in Chinese).
- [3] Sirignano W A, Glassman I. Flame spreading above liquid fuels: Surface-tension-driven flows[J]. *Combustion Science and Technology*, 1970, 1(4): 307-312.
- [4] Ross H D. Ignition of and flame spread over laboratory-scale pools of pure liquid fuels[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1994, 20(1): 17-63.
- [5] Glassman I, Hansel J G. Some thoughts and experiments on liquid fuel flame spreading, steady burning and ignitability in quiescent atmospheres[J]. *Fire Research Abstracts and Reviews*, 1968, 10: 217-234.
- [6] Wang C, Hu H W, Zhang H, et al. Experimental study of the horizontal subsurface flow trajectory and dynamic external radiation of flame spread over diesel[J]. *Energy*, 2022, 260: 125078.
- [7] Xu B, Wen J X. Computational analysis of the mechanisms and characteristics for pulsating and uniform flame spread over liquid fuel at subflash temperatures [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 238: 111933.
- [8] Xie W, Zhang Y C, Li J K, et al. Experimental study on characteristics of flame spread over diesel and n-butanol pool fires in tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 79: 286-292.
- [9] Bailey J L, Williams F W, Tatem P A. Methanol Pan Fires in an Enclosed Space: Effect of Pressure and Oxygen Concentration[R]. The United States: Naval Research Laboratory, 1993.
- [10] Tatem P A, Williams F W, Ndubizu C C, et al. Influence of complete enclosure on liquid pool fires[J]. *Combustion Science and Technology*, 1986, 45(3/4): 185-198.
- [11] Shi J-K, Zuo C, Xiong Y-Y, et al. Experimental study of different sealing ratios on the self-extinction of tunnel fires[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 112: 103894.
- [12] Li H H, Liu J H, Ge J W. Phenomenological characteristics of continuous spill fires in a tunnel with longitudinal ventilation[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 138: 108-116.
- [13] Li H H, Liu J Q, Liu J H, et al. Spread and burning characteristics of continuous spill fires in a tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 109: 103754.
- [14] Ingason H, Li Y Z. Spilled liquid fires in tunnels[J]. *Fire Safety Journal*, 2017, 91: 399-406.
- [15] Zamashchikov V V, Korzhavin A A, Chinnov E A. Combustion of liquid fuel in the flat micro- and minichannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 102: 470-478.
- [16] Zamashchikov V V. Flame spread across shallow pools in modulated opposed air flow in narrow tube[J]. *Combustion Science and Technology*, 2008, 181(1): 176-189.
- [17] 林圣辉. 柴油及柴油混合燃料的火蔓延特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
Lin Shenghui. Studies on Flame Spread Characteristics of Diesel and Diesel Blends[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018 (in Chinese).
- [18] Li M H, Li R R, Wang C C. Characteristics of flame velocity and burning rate of large-scale continuous leakage spilling fire of n-butanol fuel[J]. *Fuel*, 2023, 332: 126148.
- [19] 董 璠. 正丁醇掺混燃料预混层流燃烧特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
Dong Fan. Study on Laminar-Premixed Combustion Characteristics of Butanol Blended Fuels[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014 (in Chinese).