

中文引用格式:白刚,万伟,杨再华,等. 陶坛白酒库酒类火灾燃烧特性全尺寸试验研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(9):145-152.
英文引用格式:BAI Gang, WAN Wei, YANG Zaihua, et al. Experimental study on fire combustion characteristics of liquor in full-size pottery jar liquor warehouse[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 145-152.

陶坛白酒库酒类火灾燃烧特性全尺寸试验研究^{*}

白刚¹教授, 万伟¹, 杨再华², 卢节², 周立汐², 陈兵³教授

(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 葫芦岛 250105; 2 贵州茅台酒股份有限公司, 贵州 仁怀 564501; 3 中国安全生产科学研究院, 北京 100012)

中图分类号: X959 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.0008

资助项目: 国家自然科学基金科研资助项目(52274204, 52104195, 52074147); 中国科协青年人才托举工程项目(2022QNRC001); 白酒陶坛贮存酒库火灾特性与惰性气体(二氧化碳)灭火技术装备研究项目(MTGF2023008)。

【摘要】 为明确陶坛白酒库火灾特性, 通过搭建陶坛白酒库全尺寸试验平台, 模拟体积分数为53度的酱香型白酒发生坛口火和流淌火。结果表明: 坛口火焰温度约为380~550℃, 热辐射通量峰值约为2.5kW/m²; 流淌火焰温度及辐射通量均随燃烧面积增加显著上升, 10m²流淌火焰温度为400~760℃, 热辐射通量峰值为8.2kW/m²。2点式温度探测报警系统对大面积流淌火火灾响应迅速, 耗时约为3~39s, 但对坛口火无效; 外物坍塌时会引发短暂的燃爆现象, 使热辐射通量峰值增加, 火灾蔓延风险增大。建议酒库相邻温度探测器最大直线距离小于6m, 增加红外等图像探测器, 同时, 设置防火隔离, 降低火灾蔓延及热辐射对相邻陶坛影响。

【关键词】 陶坛白酒库; 坛口火; 火灾燃烧特性; 全尺寸; 顶棚温度; 热辐射; 火焰温度

Experimental study on fire combustion characteristics of liquor in full-size pottery jar liquor warehouse

BAI Gang¹, WAN Wei¹, YANG Zaihua², LU Jie², ZHOU Lixi², CHEN Bing³

(1 College of Safety Science & Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China; 2 Kweichow Moutai Co., Ltd., Renhuai Guizhou 564501, China; 3 China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: To clarify the fire combustion characteristics of the pottery jar liquor warehouse, a full-scale experimental platform for the pottery jar liquor warehouse was built to simulate the mouth fire and flowing fire using the Maotai-flavor Baijiu jar with a volume fraction of 53% vol. The flame temperature at the mouth of the pottery altar ranges from approximately 380 °C to 550 °C, and the peak heat radiation flux is approximately 2.5 kW/m². Both the flame temperature and radiant flux of the flowing fire increase significantly as the combustion area increases. Under a 10m² flowing fire, the flame temperature is approximately 400~760 °C, and the peak value of the thermal radiant flux is 8.2 kW/m². The response conditions of different fire scenarios were simulated by arranging the thermocouple matrix on the ceiling.

The results show that the two-point temperature detection and alarm system responded rapidly to 4–10 m² fire, with a response time of approximately 3 to 39 seconds, but failed to detect fires at the mouth of the jar. Besides, the test observed that the collapse of external objects can cause a fire and a brief explosion phenomenon, resulting in a sharp increase in the peak of thermal radiation. The flying combustion droplets will intensify the risk of fire spread. It is recommended to install infrared and other image monitoring detectors in the liquor warehouses. The maximum linear distance between adjacent temperature detectors during installation should not be more than 6 meters to enhance the rapid response to fires in the liquor warehouses. Additionally, the fire isolation should be implemented to reduce the impact of fire spread and thermal radiation on adjacent pottery jars.

Keywords: pottery jar liquor warehouse; pottery jar mouth fire; fire combustion characteristics; full-scale; ceiling temperature; thermal radiation; flame temperature

0 引言

白酒厂具有火灾风险高、火灾扑救难度大、易造成重大伤亡等特点^[1]。近年来,白酒库火灾事故时有发生^[2-3]。陶坛贮存工艺^[4]能够降低白酒温度的波动,稳定发酵和陈化过程,但是,陶坛在火灾时易破裂导致白酒泄漏形成流淌火,同时,会加热周围物体,引起火灾蔓延^[5-6]。因此,有必要研究陶坛白酒库火灾燃烧特性,以预防此类事故。

诸多学者针对乙醇火灾开展了研究,如 HAKKARAINEN 等^[7]发现,酒精饮品中乙醇体积分数为 20% 时,燃烧热达到 3.5 MJ/kg,火灾负荷显著。张笑驰等^[8]试用锥形量热仪测试乙醇-水混合溶液,获得了燃料热释放速率与乙醇含量的线性关系。CHEN Qinpei 等^[9]发现,不同体积分数的乙醇-水混合物和白酒在热释放速率和闪点方面有差异,白酒的危险性最高。赵利宏等^[10]试验发现,低压环境下的乙醇池火燃烧速率较慢,但火焰的波动性更大。郝苗等^[11-12]发现,含水量增加使含水乙醇闪点升高、燃烧时间缩短;体积分数大于 28% 的含水乙醇易燃;火焰蔓延速度、火焰高度及亮度随乙醇体积分数和初始温度升高而增大。张军等^[13]通过近墙乙醇池火点源辐射模型,计算了墙壁及火焰热反馈下燃烧速率的理论增量。翟东^[14]研究了白酒库火灾后温度场和热辐射场的分布及其对储罐和构筑物安全的影响。

综上,现有研究多聚焦于乙醇在特定体系下的燃烧,还鲜少涉及实际酒库环境下的燃烧,为此,笔者拟搭建全尺寸燃烧试验台,通过采集空间温度、火焰温度、烟气含量、热辐射通量等试验数据,研究陶坛白酒库的火灾特性及危险性,以期为酒库火灾精准防控提供一定的参考。

1 火灾燃烧特性全尺寸试验设计

1.1 火灾燃烧特性试验系统

陶坛白酒库酒类火灾试验区域长 17.2 m、宽 13.4 m、楼层高 3.9 m,如图 1 所示。全尺寸火灾试验测量系统主要包括录像、烟气采集及温度监测等系统。录像系统采用高清摄像机进行可见光拍摄,采用热像仪进行红外拍摄。采用烟气分析仪测量顶棚烟气中 CO 和 O₂ 含量。温度监测系统采用 K 型铠装热电偶监测顶棚温度。采用辐射计来测量火灾热通量,量程 0~120 kW/m²。

火源保护装置主要包括火源周围的防火板等,以防止试验过程中火焰和高温对周围设备设施造成破坏。



图 1 尺寸火灾燃烧特性试验测量系统
Fig. 1 Full-size fire combustion characteristic test measurement system

1.2 火灾燃烧特性试验工况

由于实际白酒成分复杂,包含少量的酯类、醛类、酸类等风味物质,难以准确模拟。乙醇作为白酒中的主要可燃成分,其燃烧特性对陶坛白酒库火灾发展起主导作用。将 99.7% 的无水乙醇与纯净水按照 53:47 的体积比进行调配,所得到的“酱香型 53 度模型酒”(简称模型酒)在理化性能和火灾燃烧特性方面与实际的酱香型 53 度基酒高度相似,满足试

验需要^[3]。陶坛白酒库全尺寸火灾燃烧特性试验工况见表1。陶坛口处燃烧、但陶坛不破裂的现象为坛口火,采用直径 $D=50\text{ cm}$ 圆形油盘模拟。坛口火高度 $h=1.2\text{ m}$,位于2号顶棚测点正下方,坛口火上方 $h=2.0、2.5\text{ m}$ 处布置热电偶。酒库中相邻陶坛间距离为 $0.3\text{ m}\sim1\text{ m}$,坛口火试验中,热辐射计布置距坛口边缘 0.25 和 1 m 处。 10 m^2 流淌火采用2个 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 油盘与2个 $2\text{ m}\times2\text{ m}$ 油盘拼接形成,分别在 1 和 4 m^2 油盘中加入 11 和 45 L 模型酒,共计 112 L 。流淌火试验热辐射计距火源边缘 1.0 及 1.5 m 。

表1 陶坛白酒库全尺寸火灾燃烧试验工况

Table 1 Full-scale fire combustion experimental conditions for the pottery jar liquor warehouse

工况	火源类型-面积/ m^2	模型酒总量/ L
1	坛口火-0.2	2.20
2	流淌火-1	11.0
3	流淌火-4	45.0
4	流淌火-10	112

常温、相对湿度90%以上条件下池火的发展和蔓延会受到显著抑制^[15]。为保证试验结果贴合酒库实际环境,试验环境温度约为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度约为85%;采用自然通风,不启动排烟风机;在火源上方顶棚布置15个热电偶测点(图2);顶棚热电偶2号测点处布置烟气测点。坛口火和不同面积的流淌火具有不同的火灾燃烧特性,试验过程中热辐射计及录像监测系统的布置略有差异。

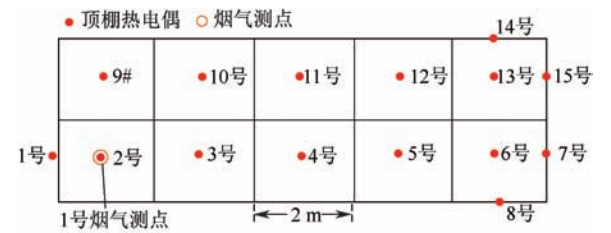


图2 顶棚热电偶矩阵及烟气测点布置

Fig. 2 Layout of ceiling thermocouple matrix and flue gas measurement points

2 火灾燃烧特性试验结果与分析

2.1 顶棚温度

2.1.1 坛口火

陶坛白酒库坛口火的诱发原因较为复杂。静电火花、白酒发酵的高温都可能引发坛口火产生。图3为坛口火顶棚温度变化曲线。点火后14 s,顶棚高度 $Z=2.7\text{ m}$ 处温度达到 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 $100\sim250\text{ s}$ 火源处于稳定燃烧阶段,火源上方温度主要呈现 $90\sim$

$120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 波动的变化趋势。由于 $Z=2\text{ m}$ 处热电偶最接近火焰温度最高,在火焰脉冲影响下,其温度波动范围更大,能达到最高温度 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于坛口火的热烟气总量较小,顶棚处热量集聚缓慢,除火源正上方(2号测点)达到探测器响应值,其余在 $30\sim50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内波动。实际酒库中2个及以上点式感温火灾探测器均达到 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时才发出“火灾报警”^[16]。若温度探测器若未及时响应易导致陶坛白酒库坛口火火灾演变为流淌火。因此,酒库现场温度探测器应与火焰探测器(如红外、光纤)等联合使用。

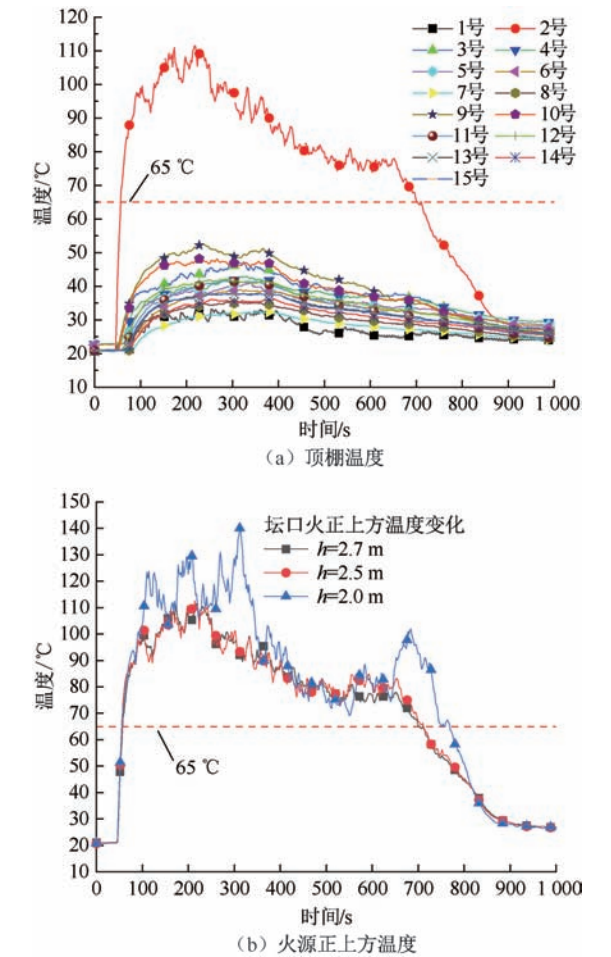
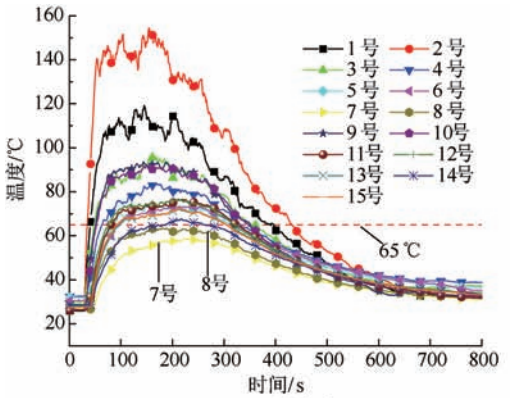


图3 坛口火温度变化曲线

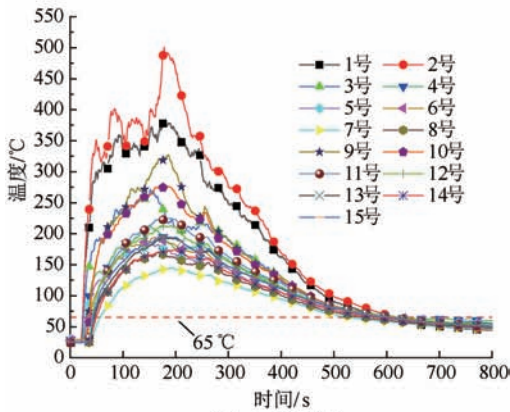
Fig. 3 Temperature curve fire at mouth of altar

2.1.2 流淌火

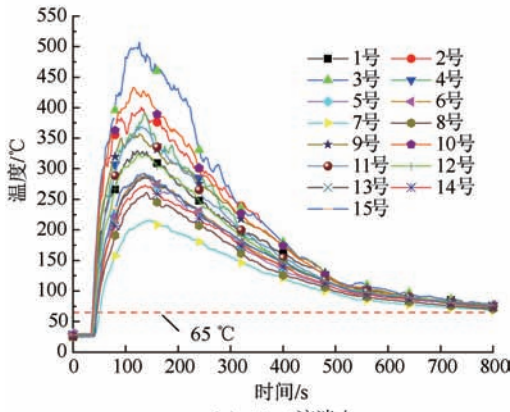
坛口火演变为流淌火时,局限于坛口的火焰会蔓延至更大的区域。图4为 $1、4、10\text{ m}^2$ 流淌火自由燃烧条件下顶棚温度变化。随着火源面积增加,顶棚温度增加。点燃模型酒后,火源正上方1号、2号测点温度响应较迅速。 $1、4$ 和 10 m^2 流淌火顶棚最高温分别约为 $154、491$ 和 $507\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。距火源较远的顶棚测点(6号—8号及13号—15号)由 $60\sim100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度波动范围增加至 $150\sim200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $250\sim400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内波动。



(a) 1 m²流淌火



(b) 4 m²流淌火



(c) 10 m²流淌火

图4 流淌火下顶棚温度变化曲线

Fig.4 Temperature curve of ceiling under flowing fire

图5为不同燃烧面积下顶棚测点的响应耗时。着火面积为1 m²时8号、9号测点未达到响应温度;4与10 m²流淌火顶棚温度探测器响应迅速,分别在6~39 s、3 s~13 s达到探测器响应温度。由于白酒形成的火灾初期产热相对较低,为提高酒库现场2点式温度探测器对陶坛白酒库火灾早期快速响应能力,实现在1 min内火灾监测的响应,建议2个相邻温度探测器的布置最大直线距离不应超过6 m,高于“安装间距小于10 m”^[17]要求。

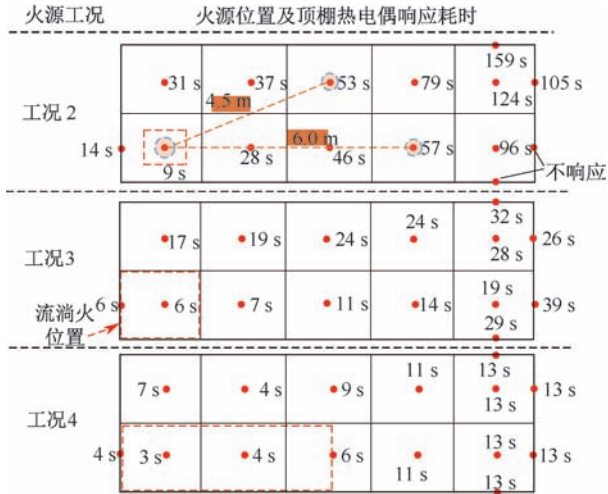


图5 不同火源面积下顶棚热电偶响应耗时

Fig.5 Response time of ceiling thermocouple under different fire areas

2.2 火灾烟气变化

图6为不同火源工况下烟气顶棚气体体积分数变化曲线。坛口火时,烟气生成量相对较少,在火源发展初期顶棚O₂和CO体积分数变化较平缓;火源衰减阶段不完全燃烧时CO体积分数最高,约为25×10⁻⁶。坛口火条件下火源于900 s左右熄灭,环境风流动导致烟气回流至1号烟气测点位置,使在1 000 s时CO体积分数出现短暂回升。

在1、4和10 m²流淌火火源上方烟气中CO体积分数峰值分别为52×10⁻⁶、125×10⁻⁶和356×10⁻⁶。火源面积增加,烟气中有毒有害气体增加,火灾危险性增加。烟气成分的变化能够反映火势的发展情况,在白酒库防火设计中,应考虑安装烟气监测设备,实时监测有害气体浓度,合理设计通风系统,确保在火灾发生时能够及时排出烟气,以及保证灾后恢复工作时的环境安全,可有效降低火灾危害程度。

2.3 火灾热辐射通量变化

池火灾热辐射是造成人员伤害和设备损坏的重要形式^[18]。图7为不同工况下的热辐射通量变化曲线。距离火源越近,热辐射通量越大。在距离火源边缘0.25 m处,测点1处热辐射峰值约为2.5 kW/m²。当距离坛口火1 m,水平高度越高热辐射越大(3号测点>4号测点),此时热辐射主要来源于顶棚热烟气,辐射通量约为0.25 kW/m²。质量10 g棉花样品的临界点燃热辐射强度^[19]为2~3 kW/m²,烟丝及烟箱包装用纸板的最小引燃热辐射强度^[20]分别为2.56和3.57 kW/m²。这与坛口火燃烧时测得的最大热辐射通量相近,表明坛口火在长时间未被发现的情况下,

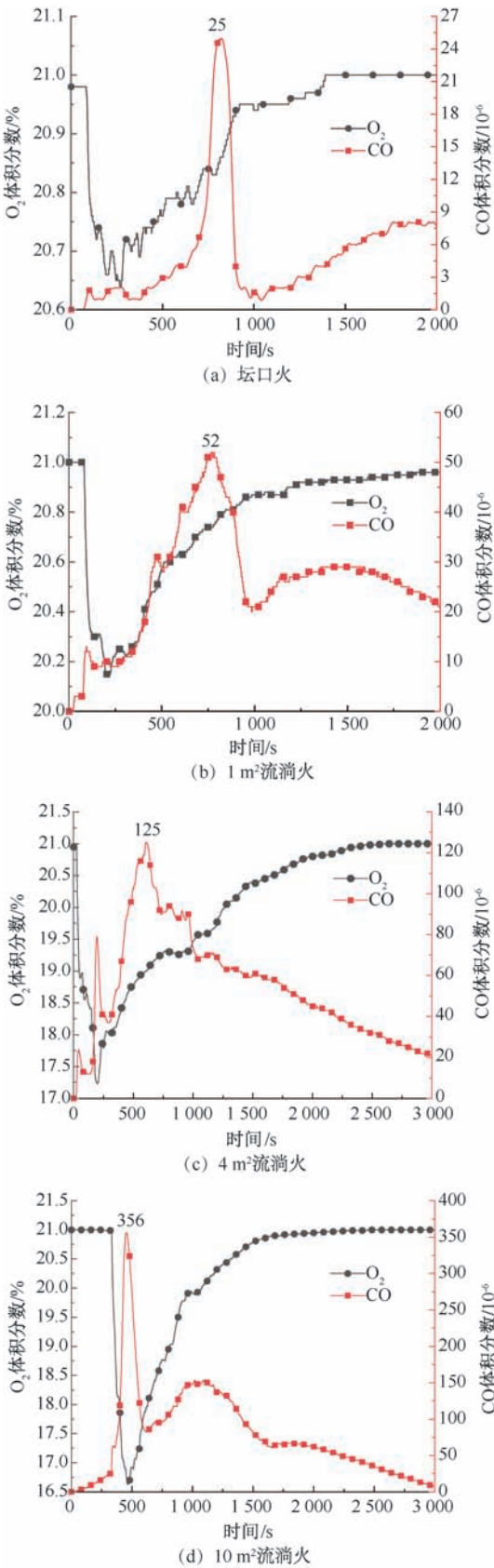


图 6 顶棚烟气 O_2 及 CO 体积分数变化

Fig. 6 Variation curve of volume fractions of O_2 and CO on ceiling

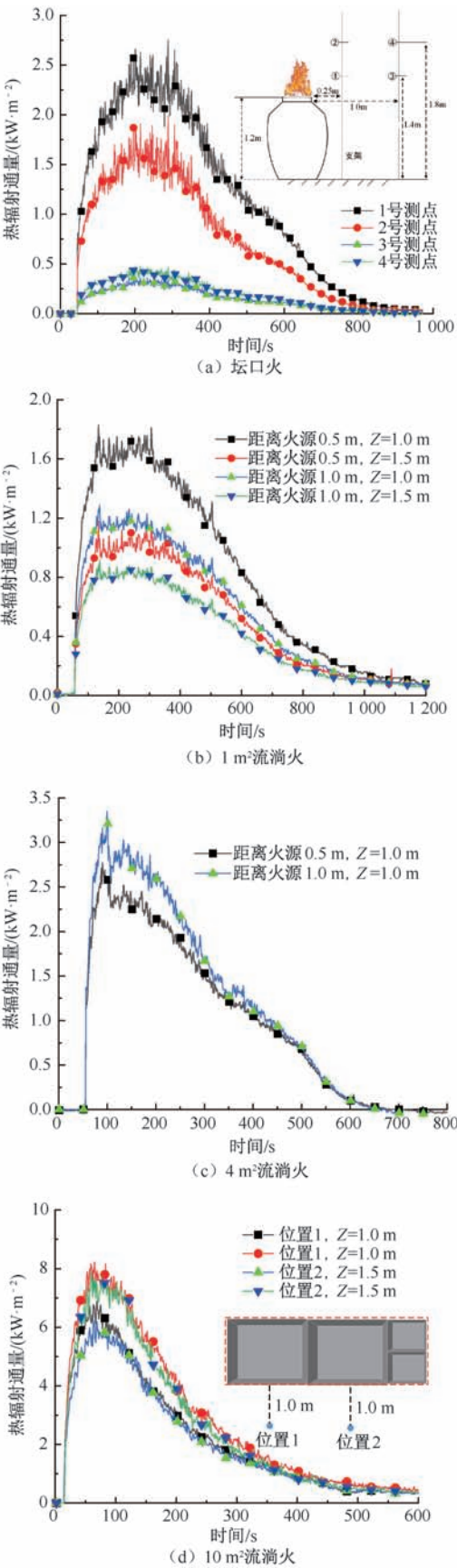


图 7 热辐射通量变化曲线

Fig. 7 Variation curves of thermal radiation flux

坛口火持续热辐射输出可能会点燃相邻陶坛口上微小可燃物形成火星,从而造成火灾蔓延。

流淌火时,热辐射通量峰值随火源面积增大而增大。1 和 4 m² 流淌火在高 1 m 处测点的热辐射通量峰值分别约为 1.3 和 3.35 kW/m²。10 m² 流淌火时,火灾热辐射通量迅速增加,峰值达 6.7~8.2 kW/m²。

2.4 火焰形态及温度

图 8 为坛口火红外热成像。点火后火焰发展初期最高温度约为 380 ℃; $t=180$ s 时火源稳定燃烧,温度可达 380~550 ℃;火源进入衰减阶段时,火焰高度逐渐降低。

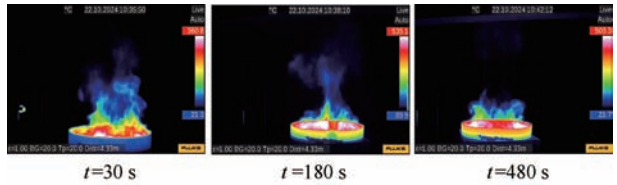


图 8 坛口火焰温度变化情况

Fig. 8 Temperature change of fire flame at mouth of pottery jar

图 9 为坛口火稳定燃烧时火焰形态,火焰主要为淡蓝色,并呈现周期性振荡^[21]。该振荡周期主要为乙醇蒸汽在液面竖直方向形成火焰团,在火焰卷吸作用下,油盘边缘的火焰向油盘中心靠拢,火焰团根部收缩,在浮力作用下火焰快速拉升形成火焰柱,由于浮力作用而继续上升燃烧的火焰团,使火焰被拉断,火焰重新形成竖直方向短暂稳定的火焰团,从而火焰进入下一个振荡周期。在该过程中火焰高度为 0.3~0.5 m。

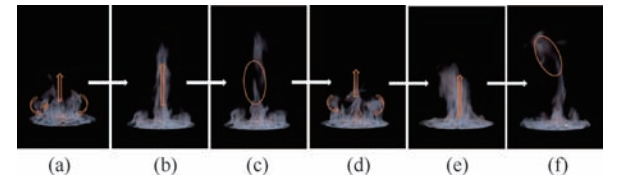


图 9 坛口火稳定燃烧火焰形态变化

Fig. 9 Changes in morphology of stable combustion of fire at mouth of pottery jar

图 10 为不同面积流淌火焰温度变化情况,流淌火燃烧初期,火焰沿模型酒液面迅速蔓延,火势发展迅速。随流淌火面积增大,火焰高度显著增加,火场温度提高。 $t=30\sim180$ s 时,1、4 和 10 m² 流淌火焰温度分别为 360~520、400~680 和 400~760 ℃;空间温度(房屋中心高 0.5 m~2 m 位置)在 30~45、40~70 和 50~150 ℃。 $t=420$ s 时火源进入衰减阶段,火焰高度及温度显著减低。

2.5 外物撞击下流淌火的变化

在流淌火燃烧过程中,外物的撞击可能使白酒

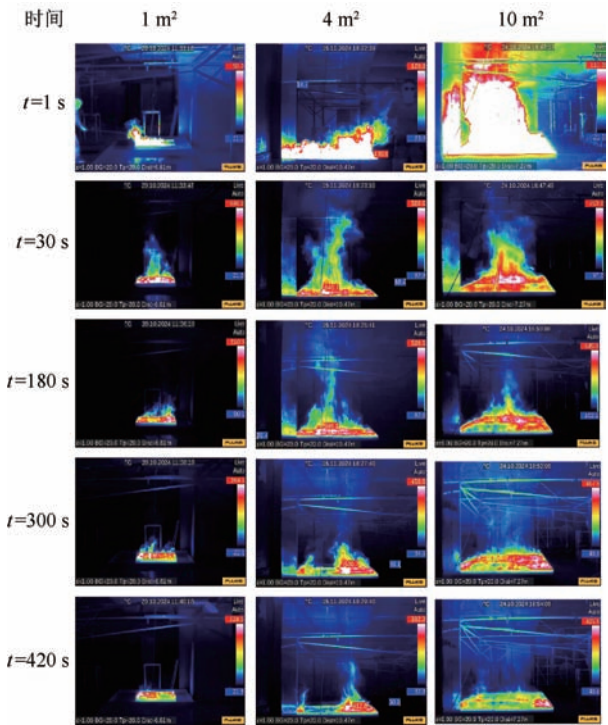


图 10 不同面积流淌火火焰温度变化情况

Fig. 10 Variation of flame temperature in different areas
液体迸溅飞散,扩大燃烧面积。图 11 为 4 m² 流淌火时,油盘一侧隔热板塌落瞬间火焰形态变化。当 4 m² 火源处于稳定燃烧时,卷吸作用下的火焰高度可达 2 m。隔热板掉落砸下瞬间,模型酒被溅起,增加高温可燃蒸气与氧气接触,形成短暂燃爆现象。该过程火焰呈明亮黄色,顶棚温度由 400 增加至 500 ℃;部分模型酒飞溅出原始油盘范围,形成不同大小的火源点,并维持了 5 s 左右燃烧。该过程与陶坛碎片溅起地面流淌的燃烧液体、形成的短暂燃爆有一定的相似性。若炸裂的陶坛内有白酒,流淌火将进一步蔓延扩大。

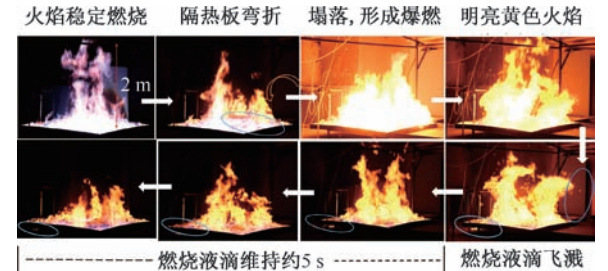


图 11 4 m² 流淌火焰形态变化

Fig. 11 Morphological changes of 4 m² flowing flames

图 12 为热隔板塌落时 4 m² 流淌火热辐射通量变化。可以看出,距火源边缘 0.5、高 1 m 处热辐射通量在稳定燃烧时峰值约为 8 kW/m²;隔热板坍塌撞击时,火势短暂迅速增大,热辐射通量急剧增加,

峰值达 12 kW/m^2 ,火灾危险性增大。

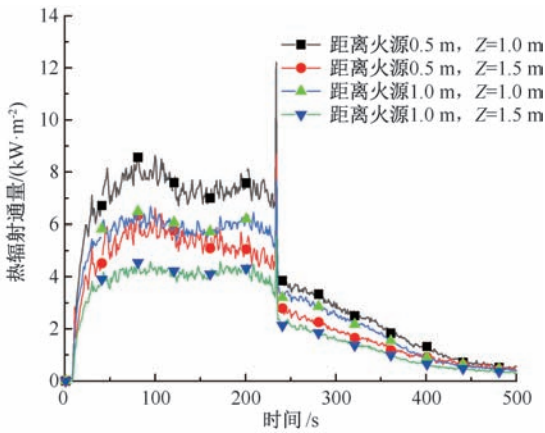


图 12 热隔板塌落时 4 m^2 流淌火热辐射通量变化
Fig. 12 Changes in thermal radiation flux of 4 m^2 fire under heat shield collapsed

3 结 论

- 1) 陶坛白酒库采用 2 个温度探测器联动报警方式,对 $4、10\text{ m}^2$ 流淌火作出迅速响应(耗时 $3\sim 39\text{ s}$),但无法有效响应坛口火类型火灾。建议现场增设红外探测器等火焰图像监测设备,且相邻温度探测器的布设间距不宜超过 6 m 。
- 2) 坛口火焰形态呈周期性振荡,火焰温度为 $380\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$;距陶坛 0.25 m 处热辐射峰值为 $0.25\sim 2.5\text{ kW/m}^2$ 。火场温度及热辐射通量与流淌火火源面积及距离呈正相关, $1、4$ 和 10 m^2 流淌火热辐射峰值分别为 $1.3、6.6$ 和 8.2 kW/m^2 。

参 考 文 献

[1] 张小虎. 白酒厂类火灾高危单位消防安全评估及应用[J]. 安全与环境学报,2017,17(3):879-882.
ZHANG Xiaohu. On the fire-risk safety evaluation and its application in the hard-liquor factories[J]. Journal of Safety and Environment,2017,17(3):879-882.

[2] LI Xueming, WAN Wei, ZHAO Youkai, et al. Feasibility assessment of a clean and efficient fire extinguishing system for pottery jar liquor warehouses[J]. Scientific Reports,2024,14: DOI:10. 1038/s41598-024-64168-4.

[3] 王晨阳,万景明,王晨,等. 不同液面高度陶坛火燃烧行为及破裂规律试验研究[J]. 消防科学与技术,2025,44(3):320-328.
WANG Chenyang, WAN Jingming, WANG Chen, et al. Experimental study on combustion characteristics and fracture rules of pottery jar with different liquid level[J]. Fire Science and Technology,2025,44(3):320-328.

[4] 毕远林,钟航,黄蓝花,等. 白酒贮存工艺研究进展[J]. 酿酒科技,2022(12):80-84.
BI Yuanlin, ZHONG Hang, HUANG Lanhua, et al. Research progress in Baijiu storage technology[J]. Liquor-Making Science and Technology, 2022(12):80-84.

[5] 孙玉佳. 基于大涡模拟的油池火焰瞬态辐射传热研究[J]. 中国安全科学学报, 2022,32(4):65-71.
SUN Yujia. Transient radiative heat transfer of pool fires based on large eddy simulation[J]. China Safety Science Journal, 2022,32(4): 65-71.

[6] 杨小松,杨再华,王元波,等. 环形池火炙烤情形下陶坛破裂特性研究[J]. 消防科学与技术,2025,44(2):202-209.
YANG Xiaosong, YANG Zaihua, WANG Yuanbo, et al. A study on the rupture characteristics of ceramic jar under conditions of heating in circular oil pool fire[J]. Fire Science and Technology,2025,44(2):202-209.

[7] HAKKARAINEN T, KORHONEN T, VAARI J. Heat release characteristics of ethanol-water mixtures: small-scale experiments[J]. Fire Safety Journal,2017,91:174-181.

[8] 张笑驰,刘家豪,谢启苗. 小尺寸乙醇-水混合溶液池火燃烧特性研究[J]. 消防科学与技术,2019,38(11):1 502-1 505.
ZHANG Xiaochi, LIU Jiahao, XIE Qimiao. Study on combustion characteristics of small-scale ethanol-water mixtures pool fire[J]. Fire Science and Technology,2019,38(11):1 502-1 505.

[9] CHEN Qinpei, WANG Xuehui, ZHOU Tiannian, et al. Investigation on the fire hazard characteristics of ethanol-water mixture and Chinese liquor by a cone calorimeter[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 135: 2 297-2 308.

[10] 赵利宏,张清元,王晓天,等. 高原乙醇油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 in China, 2022, 18(5): 66–71.
- [11] 郝苗, 赵炬, 李梦函, 等. 含水乙醇表面火蔓延及燃烧特性研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(18): 57–65.
- [12] 郝苗, 孙得盛. 含水乙醇溶液火灾危险性影响研究[J]. 科学技术创新, 2023(4): 31–36.
- [13] 张军, 方俊, 王静舞, 等. 近墙乙醇池火热反馈对燃烧速率的影响[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(5): 85–89.
ZHANG Jun, FANG Jun, WANG Jingwu, et al. Effect of heat feedback on the fire-burning rate of ethanol pool fire close to the wall[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(5): 85–89.
- [14] 翟东, 章光, 何明礼. 半敞开式白酒库泄漏事故火灾风险分析[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(1): 58–66.
ZHAI Dong, ZHANG Guang, HE Mingli. Fire risk analysis of leakage accident in semi-open liquor depot[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(1): 58–66.
- [15] 张培红, 郝宇军, 李子建. 环境湿度影响受限空间池火的实验[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2019, 40(9): 1 355–1 359.
ZHANG Peihong, HAO Yujun, LI Zijian. Experiment on the effect of environmental humidity on the pool fire in confined space [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2019, 40(9): 1 355–1 359.
- [16] GB 4716—2024, 点型感温火灾探测器[S].
GB 4716–2024, Point type heat fire detectors[S].
- [17] GB 50116—2013, 火灾自动报警系统设计规范[S].
GB 50116–2013, Code for design of automatic fire alarm system[S].
- [18] 冯娇娇, 王静虹, 李佳, 等. 火灾事故下人群承受热辐射阈值差异分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 134–140.
FENG Jiaojiao, WANG Jinghong, LI Jia, et al. Difference in the thermal radiation threshold of people under fire accidents[J]. China Safety Science Journal, 2022, 30(10): 134–140.
- [19] 赵志新, 蔡伟, 王鑫, 等. 热辐射强度对棉花燃烧特性的影响[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(2): 167–170.
ZHAO Zhixin, CAI Wei, WANG Xin, et al. Influence of heat radiation intensity on the combustion characteristics of cotton[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(2): 167–170.
- [20] 付丽华, 张瑞芳, 石龙. 基于锥形量热仪实验的卷烟及其包装材料燃烧特性研究[J]. 火灾科学, 2009, 18(1): 20–25.
FU Lihua, ZHANG Ruifang, SHI Long. Experimental research on fire behavior of cigarettes and its packing materials using cone calorimeter[J]. 火灾科学, 2009, 18(1): 20–25.
- [21] 黎昌海, 吴迎春, 陆守香, 等. 封闭空间油池火灾火焰振荡特性研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(4): 380–386.
LI Changhai, WU Yingchun, LU Shouxia, et al. Study on flame pulsation of pool fires in closed compartments [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010, 40(4): 380–386.

作者简介: 白刚 (1991—), 男, 安徽灵璧人, 博士, 副教授, 主要从事煤层增透瓦斯高效抽采技术研究、液态 CO₂ 防控煤矿灾害等方面的研究。E-mail: baigang0210@163.com。