

中文引用格式:张玉涛,边静,郭强,等. 液态 CO₂ 扑灭白酒池火特性研究[J]. 中国安全科学学报,2025,25(8):93-99.

英文引用格式:ZHANG Yutao, BIAN Jing, GUO Qiang, et al. Study on characteristics of Chinese liquor pool fire under action of liquid CO₂[J]. China Safety Science Journal,2025,25(8):93-99.

液态 CO₂ 扑灭白酒池火特性研究^{*}

张玉涛 教授, 边 静, 郭 强, 柏可心, 李 星, 张园勃

(西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

中图分类号:X931

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.1319

基金项目:辽宁省重点联合开放基金资助(2022-KF-23-01);国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20232138);
中国博士后科学基金资助(2023M742817);陕西省博士后科研项目(2023BSHEDZZ299)。

【摘 要】 为探索更为高效的酒库灭火技术,基于相似理论搭建 5 000 mm×2 400 mm×2 900 mm 的缩尺寸液态 CO₂ 灭火试验平台,分析液态 CO₂ 灭火系统扑灭不同燃烧盘直径的白酒池火过程中的酒体质量变化特性、温度分布和气体体积分数变化特性。结果表明:液态 CO₂ 能够有效扑灭白酒火灾;燃烧盘直径越大,白酒质量损失越明显,燃烧盘直径一定时,白酒质量变化量 Q 与时间 t 呈一次函数关系。燃烧盘直径越大,白酒池火能达到的温度越高,最高可达 340 ℃;燃烧盘直径越大,灭火所需要的液态 CO₂ 量越大,灭火时间也越长,3 种燃烧盘直径下灭火时间分别为 32、36 和 38 s,且无复燃现象发生,火场空间 CO₂ 体积分数最高可达到 26%;不同燃烧盘直径下 G_1 — G_4 测点 CO₂ 含量大小分布为: $G_4>G_3>G_2>G_1$;CO 含量大小分布为: $G_3>G_4>G_1>G_2$;O₂ 含量大小分布为 $G_1>G_2>G_3>G_4$ 。

【关键词】 液态 CO₂ 灭火; 白酒池火; 质量变化量; 温度; 气体体积分数

Study on characteristics of Chinese liquor pool fire under action of liquid CO₂

ZHANG Yutao, BIAN Jing, GUO Qiang, BAI Kexin, LI Xing, ZHANG Yuanbo

(College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology,
Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: To explore more efficient fire extinguishing techniques for Chinese liquor warehouses, based on the similarity theory, an experimental bench for liquid CO₂ fire extinguishing with dimensions of 5 000 mm×2 400 mm×2 900 mm was constructed. An in-depth study was conducted on the changes in Chinese liquor quality, temperature distribution, and gas volume fraction during the process of extinguishing Chinese liquor pool fire using liquid CO₂ fire extinguishing systems with different combustion disk diameters. The research results indicate that liquid CO₂ can effectively extinguish Chinese liquor fires. The larger the diameter of the combustion disk, the more significant the change in mass. The larger the diameter of the combustion disk, the higher the temperature that can be reached by the Chinese liquor pool fire, up to 340 ℃. The extinguishing time under three different combustion disc diameters is 32, 36, and 38s respectively, and there is no re-ignition phenomenon. The highest gas volume fraction of CO₂ in the fire scene space can reach 26%. The distribution of CO₂ content at measurement points G_1 - G_4 under

different combustion disc diameters is as follows: $G_4 > G_3 > G_2 > G_1$. The distribution of CO content is: $G_3 > G_4 > G_1 > G_2$. The distribution of O_2 content is $G_1 > G_2 > G_3 > G_4$.

Keywords: liquid CO₂ fire extinguishing; Chinese liquor pool fire; quality change quantity; temperature; gas concentration

0 引言

白酒具有闪点低、易挥发等特点,是一种易燃、易爆的甲类危险品,火灾危险性较大。白酒仓库作为集中储存场所,空间密度高,火灾风险集中,一旦发生火灾,灭火救援难度大,容易造成巨大的人员伤亡和财产损失^[1]。2023年4月,泸州市国之荣耀酒业试验区域发生火灾,造成4人死亡^[2]。2022年5月,贵州省仁怀市张尊酒业酒库发生一起火灾事故,财产损失高达100万元^[3]。因此,探索更为安全高效的酒库火灾扑灭方法具有极其重要的研究意义。

DOMNITCH^[4]提出,应开发个性化的葡萄酒酒窖自动喷水灭火系统和火灾警报系统等消防设施。国内扑灭酒类火灾的措施有水喷雾灭火系统、泡沫灭火系统和干粉灭火系统等,通过对比其灭火特性,发现水喷雾系统为适合用于扑灭酒厂火灾的灭火方式^[5]。《酒厂设计防火规范》^[6]明确了可采用水喷雾灭火系统作为白酒库的固定灭火系统。宋晓勇^[7]论述了适用于酒库的灭火系统的关键设计参数。CHEN Qinpei等^[8]发现,乙醇-水混合物与白酒的热释放速率和闪点差异不大。ZHOU Yang等^[9]对乙醇池火的灭火试验结果表明:细水雾不能彻底扑灭乙醇池火。罗振敏等^[10]对乙醇池施加细水雾150 s时火仍未被扑灭。在灭火试验中,水喷雾及细水雾灭火系统对白酒的灭火效果不稳定。泡沫灭火系统会对白酒造成二次污染。宋东平等^[11]将液态CO₂作为冷却源处理热灾问题,试验研究了液态CO₂的有效制冷作用。液态CO₂灭火技术具有安

全性高、灭火速度快等显著特点,且本身温度较低,喷射后迅速气化^[12],可有效降低火场温度,并稀释空气中的氧气,达到灭火的目的。因此,液态CO₂灭火技术已在煤矿^[13]、船舶^[14]、火力发电厂^[15]、油池储罐^[16]及锂电池火灾^[17]等多个领域得到广泛应用。但目前针对酒类火灾的防灭火研究仍较为有限。

鉴于此,笔者拟以燃烧盘直径表示实体酒坛坛口直径,搭建缩尺寸液态CO₂灭火试验台,分析不同燃烧盘直径对白酒池火灾特性的影响,以期为防控酒库火灾事故、提升白酒酒库安全性提供一定的参考。

1 液态CO₂灭火试验台搭建及工况设置

1.1 液态CO₂灭火试验台搭建

自建液态CO₂灭火试验台如图1所示。试验台尺寸为5 000 mm×2 400 mm×2 900 mm,由燃烧系统、液态CO₂灭火系统、实时质量记录系统、温度采集系统和气体体积分数监测系统组成。燃烧系统包含燃料、燃烧盘和隔热板用于模拟白酒池火;液态CO₂灭火系统由液态CO₂储罐、不锈钢管道和液态CO₂喷头等组成,喷头布置间距为200 mm。实时质量记录系统由电脑软件端、电子秤和隔热板组成,电子秤放置在燃烧台与隔热板之间,用于记录白酒质量变化。温度采集系统由K型热电偶和多通道温度记录仪组成,试验台内部放置有4个热电偶树(1—4),用于监测不同空间位置处温度的变化特征。为测量距离火源最远位置处温度变化特征,热

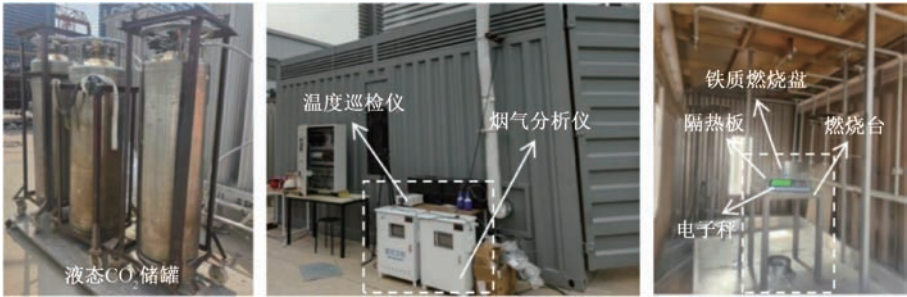


图1 白酒池火灾灭火系统现场试验台

Fig.1 Scene diagram of Chinese liquor fire extinguishing system experimental bench

电偶树(1)置于距离火源最远的角落位置。将热电偶树放置在与火源一定距离的不同直线上,以减小热电偶树间的影响。气体浓度监测系统由烟气分析仪

仪探头和气体体积分数在线测试仪组成,烟气分析仪用于监测试验箱体内部纵向烟气体积分数变化特征。如图 2 所示。

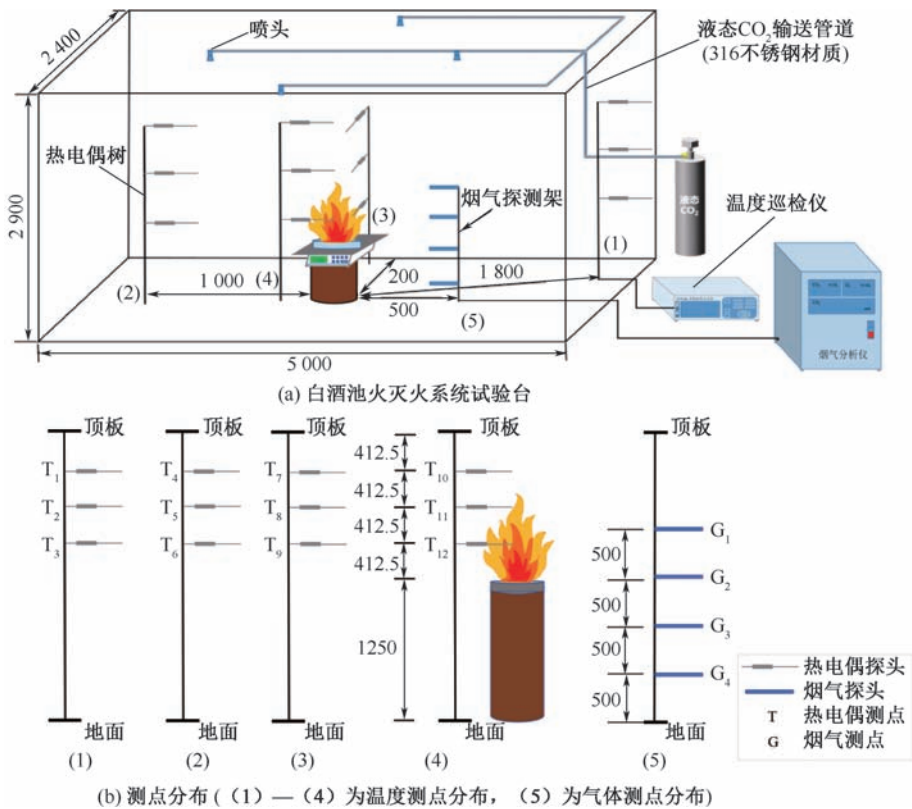


图 2 白酒池火灭火系统试验台

Fig. 2 Chinese liquor fire extinguishing system experimental bench

1.2 液态 CO₂ 灭火工况设置

铁质燃烧盘直径 d 分别为 0.1、0.3 和 0.5 m。燃烧 90 s 时启动液态 CO₂ 灭火系统,喷射时长为 40 s。每个工况进行 3 次重复试验,试验数据取 3 次重复试验的均值。

2 白酒池火灭火特性分析

2.1 白酒质量变化特性

图 3 为不同 d 时白酒池火燃烧过程中酒体的质量变化,从中可以看出, $d = 0.5$ m 的白酒质量变化量 Q 最大,约为 17.5 g; $d = 0.3$ m 次之; $d = 0.1$ m 的 Q 最小,仅为 3.1 g 左右。火焰熄灭初期 Q 呈增大的趋势且增长速率与燃烧时增长速率接近,主要原因是白酒在高温环境下的挥发作用。 d 越大,白酒燃烧面积越大,质量变化也越明显。3 种 d 下 Q 随燃烧时间 t 的变化为:

$$Q = (0.55d - 0.029) \cdot t \tag{1}$$

拟合度 R^2 均在 0.99 以上。

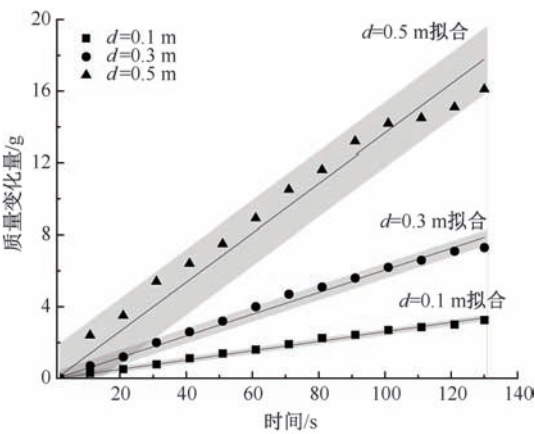


图 3 不同 d 下白酒质量变化量及拟合曲线

Fig. 3 Change and fitting of liquor quality of different d

2.2 温度分布特征

图 4 为不同 d 时白酒池火燃烧及扑灭过程中的温度分布。温度均随时间推移先迅速增长、后逐渐下降。这是由于燃烧 90 s 时开启液态 CO₂ 灭火系

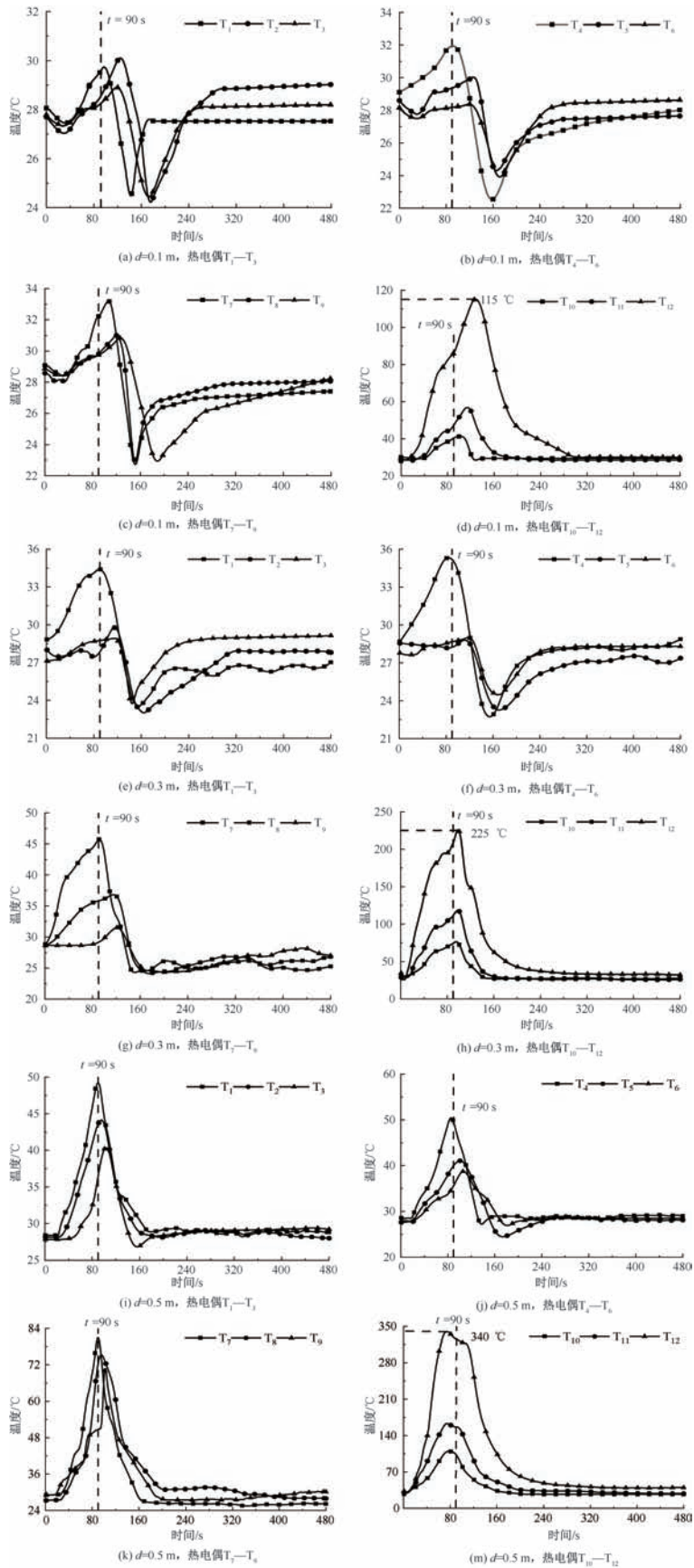


图 4 不同 d 时的温度分布特征

Fig. 4 Temperature distribution characteristics of different d

统,液态 CO₂ 气化降低了空间温度;CO₂ 体积分数升高,火焰熄灭,空间内温度逐渐降低至室温。在同一位置,最高温度随 d 的增大而增加, d 较大时热释放量更大。喷射开始后, $d=0.1\text{ m}$ 时各位置温度开始降低所需要的时间最长, $d=0.3\text{ m}$ 次之, $d=0.5\text{ m}$ 时温度开始降低所需要的时间最短。 d 越大,燃烧面积越大,温度越高,开启液态 CO₂ 后空间温差大,热对流效果明显。虽然 $d=0.5\text{ m}$ 时降温开始时间早,但降温所需时间也长。

在不同 d 的白酒池火燃烧及灭火过程中,热电偶树(1—3)所测温度自上而下呈现递减趋势,各热电偶树顶端温度峰值显著,随高度下降而衰减,高温热烟气与下层空气发生热对流效应,同时与顶部壁面产生热传导作用,致使热流能量逐级耗散,进而引发下方温度的小幅回升并伴有时间滞后现象。热电偶树(4)的温度从上到下呈上升趋势,燃烧过程中热辐射从火焰中心向外传递,距离火焰越近的位置,接收到的热辐射越强,温度越高。同时,火焰加热周围空气,热空气上升形成对流,距离火源越近的热电偶对流效果越强,温度越高,因此温度峰值随着高度的升高而逐渐降低。 $d=0.1\text{ m}$ 时最高温度位置为 T_{12} ,约为 $115\text{ }^{\circ}\text{C}$,该温度出现于液态 CO₂ 开启后的 30 s 。这是因为 d 小, T_{10} 和 T_{11} 热电偶位置较高,先受液态 CO₂ 冷却灭火作用,温度降低; T_{12} 位置较低,降温时间延后。 $d=0.3\text{ m}$ 的时最高温度约为 $225\text{ }^{\circ}\text{C}$; $d=0.5\text{ m}$ 时最高温度约为 $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 火场气体体积分数演变特性

图 5 为不同 d 时白酒池火燃烧及扑灭过程中 CO₂ 气体体积分数变化曲线。白酒燃烧及液态 CO₂ 灭火系统作用初始阶段,CO₂ 气体体积分数基本恒定;液态 CO₂ 灭火系统在 90 s 启动后,气化形成的 CO₂ 气体体积急剧膨胀,CO₂ 气体体积分数急剧升高至 26% 左右;液态 CO₂ 喷射结束后,CO₂ 气体体积分数继续增加约 25 s 后趋于平稳。 G_1 — G_4 测点处 CO₂ 气体体积分数分布为: $G_4>G_3>G_2>G_1$ 。

图 6 为不同 d 时白酒池火燃烧及扑灭过程中 G_1 — G_4 测点的 CO 气体体积分数变化。由于 $d=0.5\text{ m}$ 时灭火时间较长,不完全燃烧持续时间也长,产生的 CO 最多, $d=0.3\text{ m}$ 次之, $d=0.1\text{ m}$ 产生的 CO 量最少。 G_1 和 G_2 处 CO 气体体积分数随着时间的增大而升高,且 G_1 处的 CO 气体体积分数普遍高于 G_2 处。白酒不完全燃烧释放的 CO 气体随燃烧的持续逐渐累积,同时热烟气自火源处向上蔓延。

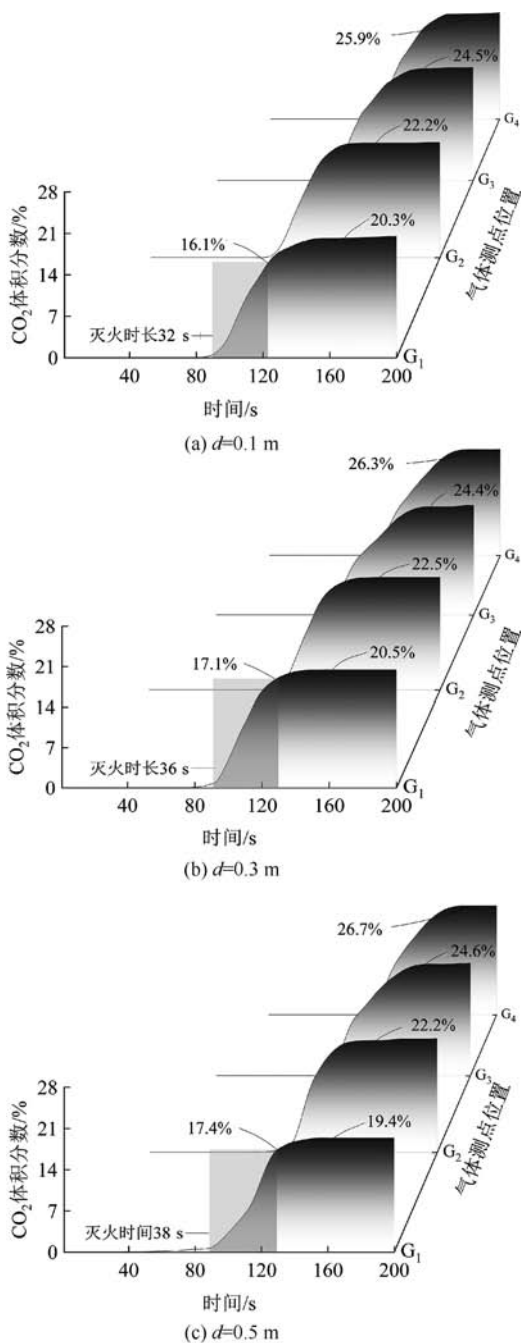


图 5 不同 d 时的 CO₂ 体积分数变化

Fig. 5 Changes in CO₂ volume fraction of different d

G_3 和 G_4 处未探测到白酒燃烧产生的 CO,这是由于 G_3 与火源处于相近高度,而 G_4 位于火源下方; 90 s 后 CO 气体体积分数随着时间增加迅速升高, 120 s 后趋于平稳。CO₂ 灭火系统开启后,白酒燃烧更不完全,且液态 CO₂ 不断从上向下扩散,故 G_3 测点处 CO 气体体积分数明显高于其余 3 个测点。

图 7 为不同 d 下 G_1 — G_4 测点 O₂ 体积分数变化。可以看出,不同 d 下 O₂ 先基本保持不变,液态

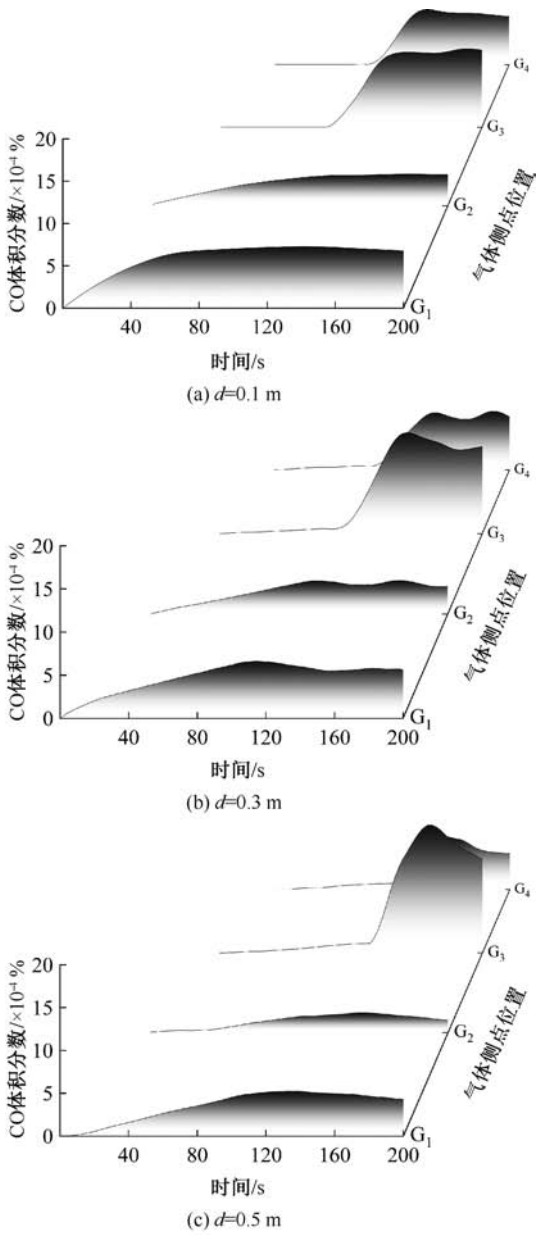


图6 不同 d 时的CO体积分数变化
Fig. 6 Changes in CO volume fraction of different d

CO₂ 灭火系统开启后, O₂ 的体积分数迅速降低至 17% 左右。白酒燃烧时会消耗 O₂, 但由于燃烧时间较短, O₂ 的体积分数基本不变; 燃烧 90 s 后喷入的液态 CO₂ 气化, 降低了 O₂ 体积分数; 随着 CO₂ 下沉, 下部 O₂ 体积分数逐渐降低, 因此, G₁—G₄ 测点 O₂ 含量大小分布为 G₁>G₂>G₃>G₄。通常, 当空气中的氧气体积分数降低至约 12% 时, 火焰才会熄灭。而使用液态 CO₂ 灭火, 即使 O₂ 体积分数在 17% 左右, 火焰也会熄灭。这主要是因为液态 CO₂ 气化吸热冷却和窒息灭火的双重作用。

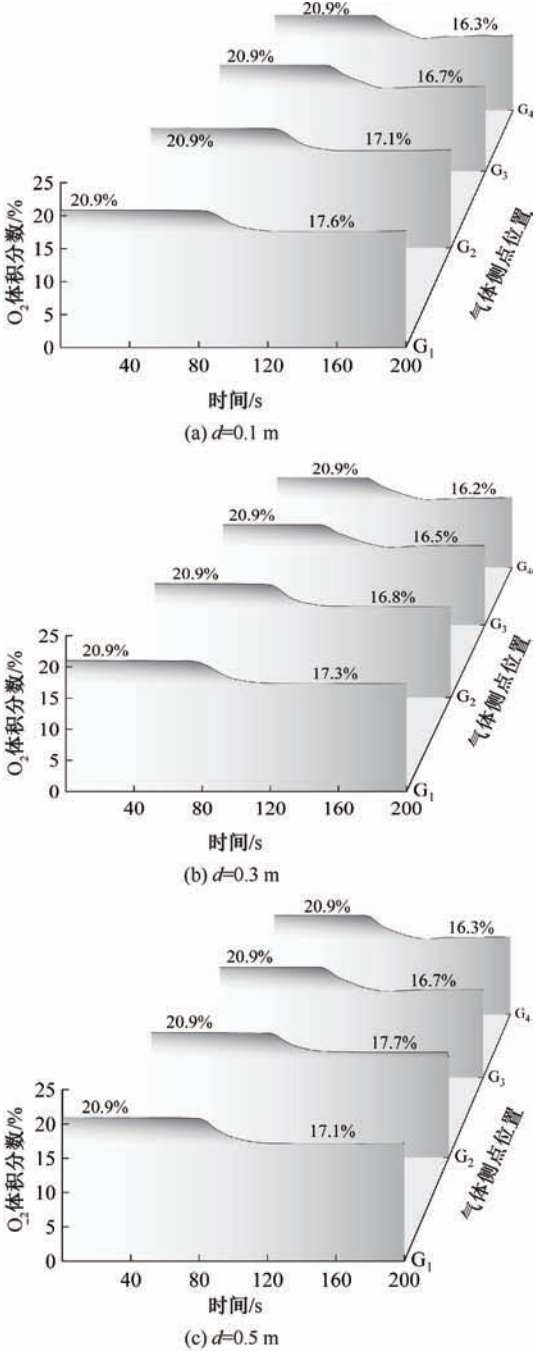


图7 不同 d 时的O₂体积分数变化
Fig. 7 Changes in O₂ volume fraction of different d

3 结 论

- 1) 液态 CO₂ 灭火系统开启后 40 s 内可以完成灭火, 空间温度显著下降, CO₂ 体积分数约为 26%。燃烧盘直径为 0.5 m 时, 灭火时间最长, 为 38 s。
- 2) 白酒燃烧时间及液态 CO₂ 喷射时长相同时, 燃烧盘直径越大, 白酒质量变化量越大。燃烧盘直径一定时, 白酒质量变化量 Q 与时间 t 呈一次函数关系。

3) 温度随燃烧盘直径增大而升高,燃烧盘直径为 0.5 m 时温度最高为 340 ℃;火源附近温度最高并随距离增加而降低。垂直方向上,火源高温区温度自顶向底升高;高温区之外则自顶向底降低。

4) 不同燃烧盘直径下 G₁—G₄ 测点 CO₂ 气体体积分数大小分布为:G₄>G₃>G₂>G₁;CO 气体体积分数大小分布为:G₃>G₄>G₁>G₂;O₂ 气体体积分数大小分布为 G₁>G₂>G₃>G₄。

参考文献

- [1] 周勇. 某半敞开式白酒库消防设计探讨[J]. 给水排水, 2024, 60(4):131-136.
ZHOU Yong. Discussion on fire protection design of a semi-open liquor warehouse[J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 60(4):131-136.
- [2] 田向煜, 杨亚文, 林如法, 等. 华安 HSE 之声:近三年化学实验室事故统计与分析报告(2021—2023 年)[J]. 化工安全与环境, 2024, 37(12):7-10.
TIAN Xiangyu, YANG Yawen, LIN Rufa, et al. Hua'an HSE voice: statistical and analysis report on chemical laboratory accidents in the past three years(2021-2023)[J]. Chemical Safety & Environment, 2024, 37(12):7-10.
- [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] DOMNITCH C L. Fire safety in wine caves Installing fire protection features allows for expanded and safe use of wine caves[J]. Wine Business Monthly, 2006, 8:66-71.
- [5] HAO Jiaoshun, LIU Lijuan, LONG Zhaoyue, et al. Scenario deduction of Natech accident based on dynamic Bayesian network: a case study of landslide accident in a liquor storage tank area in Guizhou province[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 83: DOI:10.1016/j.jlp.2023.105067.
- [6] GB 50694—2011, 酒厂设计防火规范[S].
GB 50694—2011, Fire prevention code for liquor factory design[S].
- [7] 宋晓勇. 酒厂防火防爆关键技术研究及应用[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(3):221-227, 242.
SONG Xiaoyong. Studies and applications of fire protection and explosion prevention key technologies in distillery[J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(3):221-227, 242.
- [8] 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.
- [9] ZHOU Yang, BU Rongwei, ZHANG Xiaonan, et al. Performance evaluation of water mist fire suppression: a clean and sustainable fire-fighting technique in mechanically-ventilated place[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 1 319-1 331.
- [10] 罗振敏, 王欣, 王涛, 等. 细水雾-惰性气体协同灭火性能试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10): 63-68.
LUO Zhenmin, WANG Xin, WANG Tao, et al. Experimental study on synergetic fire extinguishing performance of water mist and inert gas[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(10):63-68.
- [11] 宋东平, 周西华, 李景阳, 等. 液态 CO₂ 相变制冷降温试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(8):120-125.
SONG Dongping, ZHOU Xihua, LI Jingyang, et al. Experimental study on cooling by phase transition of liquid CO₂[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(8):120-125.
- [12] 黄江, 金建泉, 赵梁, 等. 锂离子电池火灾灭火剂及灭火策略研究进展[J]. 工程科学学报, 2024, 46(11): 2 121-2 132.
HUANG Jiang, JIN Jianquan, ZHAO Liang, et al. Review of fire extinguishing agents and fire suppression strategies for lithium-ion battery fire[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(11):2 121-2 132.
- [13] 吴虎, 陆伟, 李金亮, 等. 液态 CO₂ 防火管路输送特性影响分析[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9):157-161.
WU Hu, LU Wei, LI Jinliang, et al. Influence analysis of liquid CO₂ fire extinguishing pipeline transportation characteristics[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9):157-161.
- [14] 张剑, 王在忠. 浅析船舶固定式高压二氧化碳灭火系统的安全运维[J]. 航海技术, 2021, 43(3):26-29.
ZHANG Jian, WANG Zaizhong. An introduction to maintenance of fixed marine high-pressure CO₂ fire extinguishing system[J]. Marine Technology, 2021, 43(3):26-29.
- [15] 杨南武. 低压二氧化碳灭火系统在火力发电厂的应用[J]. 给水排水, 2008, 34(11): 86-87.
YANG Nanwu. Application of low-pressure CO₂ fire suppression system in thermal power plants[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(11): 86-87.
- [16] 吕国杰, 王春翔, 李斐然, 等. 临界态 CO₂ 原油储罐火灾灭火性能影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(7):135-140.
LYU Guojie, WANG Chunxiang, LI Feiran, et al. Research on fire extinguishing performance of critical CO₂ for crude oil storage tank fire[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(7):135-140.
- [17] XU Jiajia, GUO Pengyu, DUAN Qiangliang, et al. Experimental study of the effectiveness of three kinds of extinguishing agents on suppressing lithium-ion battery fires [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171: DOI:10.1016/j.applthermaleng.2020.115076.

作者简介: 张玉涛 (1982—),男,山东烟台人,博士,教授,主要从事煤自燃防治理论与技术、建筑消防等方面的研究。E-mail:ytzhang@xust.edu.cn。

