

中文引用格式:刘长春,杜雪,李宇珊,等.孔径对压缩空气泡沫射流性能影响试验与分析[J].中国安全科学学报,2025,35(9):129-136.

英文引用格式:LIU Changchun, DU Xue, LI Yushan, et al. Experiment and analysis of influence of aperture on performance of compressed air foam jet[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9):129-136.

孔径对压缩空气泡沫射流性能影响试验与分析*

刘长春^{1,2,3}副教授,杜雪^{1,2,3},李宇珊^{1,2,3},席浩越^{1,2,3},
徐诚^{1,2,3},辛世杰^{1,2,3}

(1 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054;

2 西安市城市公共安全与消防救援重点实验室,陕西 西安 710054;

3 陕西省工业过程安全与应急救援工程技术研究中心,陕西 西安 710054)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.0106

资助项目:国家消防救援局科技计划项目(2024XFCX38);陕西省自然科学基金计划项目(2025JC-YBMS-392, 2024JC-YBMS-251);陕西省重点研发计划项目(2024SF-YBXM-657);陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设(2024QCY-KXJ-170)。

【摘要】 为优化消防装备设计,通过不同射流孔径和气液比的试验,研究孔径对压缩空气泡沫射流性能的影响,测试数据包括发泡倍数、析液时间、射程射宽。结果表明:随着孔径减小,实际发泡倍数与理想值的偏差增大,并且气液比越大,偏差也越大,确定满足压缩空气泡沫系统稳定性要求的最小射流孔径阈值。稳定泡沫射流的临界气液比随着孔径的减小而减小,并构建孔径与临界气液比间的关系式;射流孔径对泡沫 D_{32} 直径和25%析液时间的影响不明显;在气液比小于20时,泡沫的射程射宽与射流孔径呈反比关系;在相同射流孔径下,超过一定气液比后,泡沫的射程变化并不明显。同时,分析获得临界气液比、25%析液时间、射程、射宽变化特征的成因。

【关键词】 射流孔径; 压缩空气泡沫; 泡沫射流; 泡沫性能; 发泡倍数; 析液时间

Experiment and analysis of influence of aperture on performance of compressed air foam jet

LIU Changchun^{1,2,3}, DU Xue^{1,2,3}, LI Yushan^{1,2,3}, XI Haoyue^{1,2,3},
XU Cheng^{1,2,3}, XIN Shijie^{1,2,3}

(1 School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China; 2 Shaanxi Engineering Research Center for Industrial Process Safety and Emergency Rescue, Xi'an Shaanxi 710054, China; 3 Shaanxi Industrial Process Safety and Emergency Rescue Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: In order to optimize the design of fire-fighting equipment, the influence of apertures on the performance of compressed air foam jets was investigated through experiments involving various jet apertures and gas-liquid ratios. The data, including the expansion ratio, liquid drainage time, foam jet range, and width, were collected. It was found that as the jet aperture decreased, the deviation of the

actual expansion ratio from the ideal value increases, and the deviation increases as the gas-liquid ratio increases. The minimum jet aperture threshold meeting the stability requirements of the compressed air foam system is determined. The critical gas-liquid ratio for a stable foam jet decreases as the aperture diminishes, and a relationship between the jet aperture and the critical gas-liquid ratio is established. The effect of jet aperture on the diameter of foam D_{32} and 25% drainage time is not obvious. For gas-liquid ratios below 20, in the same gas-liquid ratio, the jet aperture is inversely proportional to the range and width of the foam. Under the same jet aperture, beyond a certain gas-liquid ratio, the variation in foam range becomes negligible. Additionally, the underlying causes of the observed critical gas-liquid ratio, 25% drainage time, and variations in range and width are analyzed.

Keywords: jet aperture; compressed air foam; foam jet; foam performance; expansion ratio; foam drainage time

0 引言

不论是固定式压缩空气泡沫灭火系统,还是移动式压缩空气泡沫灭火系统,均存在从多个小孔喷射压缩空气泡沫的场景。目前,针对孔径对压缩空气泡沫射流性能影响规律的研究相对较少。因此,探索不同孔径对压缩空气泡沫射流的性能影响规律具有重要的现实意义。

关于射流孔径对泡沫性能的影响, FARIDA 等^[1]发现,压缩空气泡沫射流孔径与泡沫大小之间存在线性关系。ZHANG Jiaqing 等^[2]分析了特高压变电站使用压缩空气泡沫系统的关键参数对泡沫灭火性能的影响,指出射流孔径存在一个最佳范围。胡成等^[3]开展了压缩空气泡沫炮可行性研究,发现炮口尺寸与泡沫溶液流量有最佳配比。王文杰等^[4]研究了射流孔径、气液比等对液滴的影响,发现射流孔径越小,液滴的索特平均直径越小。

此外,在航空航天、动力工程、煤矿等方面研究射流喷嘴较多。WU Jie 等^[5]提出一种基于简单圆角的无激波收敛-发散圆形射流喷嘴的设计方法,并分析喷嘴出口倾角在各种膨胀条件下对超音速射流结构的影响,发现斜口喷嘴能降低超音速射流激波单元结构的强度。LIU Changchun 等^[6]探究了喷嘴类型在横风条件下对射流扩散火焰的爆轰极限、火焰形状等影响,得出随着燃油喷射速度的增大,喷管几何形状对火焰熄灭极限有显著影响。徐翔等^[7]分析了射流孔径、气液比等对射流火焰温度等的影响。张天等^[8]研制出一种新型超音速气动雾化技术,并对比分析了其降尘性能,发现这种新喷嘴具有喷雾粒径更小、雾滴运动速度更快、降尘效果好等优点。彭欣等^[9]研究了喷头性能对降尘的影响,发现在喷雾压力不变的情况下,雾化粒径与喷头

直径成正比。

关于泡沫性能的影响,邓天刁等^[10]总结分析了正压式泡沫灭火技术,发现采用液氮为气源时发泡性能最好,而采用吸气式供气时发泡性能最差。LI Huan 等^[11]分析了 Kenics 静态混合器与其他混合器对泡沫影响的差异,并检验了不同气液比对泡沫性能的影响,发现 Kenics 混合器的长径比越大,泡沫尺寸越小。DING Faxing 等^[12]研究了不同气液比的压缩气体蛋白泡沫对柴油池火的灭火效果,发现气液比在 5~24 时,气液比越大 25%析液时间和发泡倍数越大。向硕凌^[13]借助主动供气泡沫枪展开试验研究,分析了气液混合比对发泡倍数的影响,发现发泡倍数会随着气液混合比的增大呈现出先上升后趋于稳定的趋势。李华敏^[14]深入分析了环境温度等因素对氟蛋白泡沫灭火剂发泡倍数测定结果的影响。发现在一定的温度范围内,氟蛋白泡沫的发泡倍数随温度的增加而增大。陈现涛等^[15]分析了水成膜泡沫灭火剂的发泡倍数和析液时间与气液比之间的关系。发现当气液比增加时,其泡沫倍数会迅速增加,逐渐接近一个稳定值;而它的 25%析液时间先增加,后降低,最后达到一个稳定值。此外,他还分析了泡沫枪气液混合管直径及泡沫接收距离对泡沫性能的影响,明确泡沫枪管径对泡沫性能影响较大,接收距离对其影响较小^[16]。伍毅等^[17]分析了低压环境对水成膜泡沫的发泡倍数、析液时间的影响。李乾炜^[18]对比了不同发泡气体对泡沫性能的影响,发现在泡沫稳定性、发泡能力方面,氮气优于空气泡沫。贾旭宏^[19]、王淮斌^[20]等分析了海拔高度对泡沫灭火剂的性能影响,发现泡沫发泡倍数随着海拔高度的增加而减小。

综上所述,现有关于射流孔径的研究主要集中于射流孔径对雾化效果的影响,而对泡沫性能的影响

响研究相对较少。此外,泡沫性能研究多聚焦于气液比对泡沫性能(如发泡倍数、泡沫尺寸)的影响,孔径对泡沫射流性能的影响尚未得到充分探究。因此,笔者拟通过试验系统分析不同射流孔径和气液比对泡沫射流性能(发泡倍数、析液时间、射程射宽)的影响特征,以期为消防装备的优化设计提供一定的参考。

1 压缩空气泡沫试验装置及方法

1.1 压缩空气泡沫试验装置

压缩空气泡沫试验装置如图 1 所示,由供液系统、供气系统以及泡沫发生装置组成。其中,储液罐和水泵以及液体流量计组成供液系统;空气压缩机、气体流量计、减压阀以及压力表组成供气系统,试验装置的具体组成见表 1。射流孔径范围为 3.5~5.0 mm。

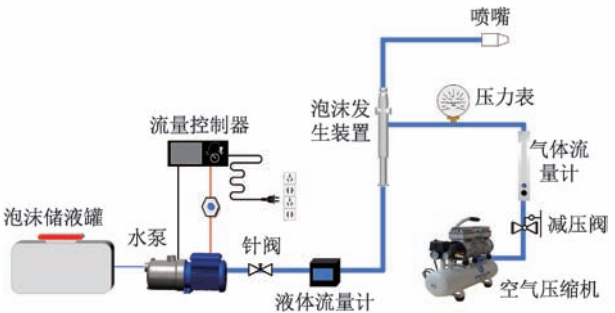


图 1 压缩空气泡沫试验装置
Fig. 1 Compressed air foam test device

表 1 压缩空气泡沫试验装置组成

Table 1 Composition of compressed air foam experimental device	
装置名称	相关参数
储液罐	尺寸:42 cm×26 cm×26 cm
水泵	压力范围:0.5~1.2 MPa;流量范围:1~5 L/min
空气压缩机	功率:1 200 W;转速:2 800 r/min; 气罐储量:10 L;压力:≤0.9 MPa
减压阀	压力:≤0.6 MPa
液体流量计	范围:0.2~10 L/min;精度:±1%
气体流量计	范围:10~100 L/h;精度:±1%
压力表	量程:0~0.6 MPa;精度:±1%

1.2 压缩空气泡沫试验方法

试验中泡沫混合液流量为 0.61 L/min,气液比范围为 10~45,在试验中,通过改变气体流量来改变气液比,泡沫液采用 6% 氟蛋白泡沫液,具体试验工况见表 2。泡沫发泡倍数和 25% 析液时间的测试方法参考《泡沫灭火剂》^[21],泡沫尺寸由测量显微镜

测得。射程及射宽的测试方法参考 *Standard for Evaluating Aircraft Rescue and Fire-Fighting Foam Equipment*^[22],具体的网格划分方法如图 2 所示。

表 2 试验参数范围

Table 2 Range of experimental parameters				
射流孔径 d/mm	液体流量 L/min	气液比	压力/ MPa	组数
3.5	0.61	10~30	0.1~0.2	24
4.0	0.61	10~30	0.1~0.2	33
4.5	0.61	10~35	0.1~0.2	39
5.0	0.61	10~45	0.1~0.2	48

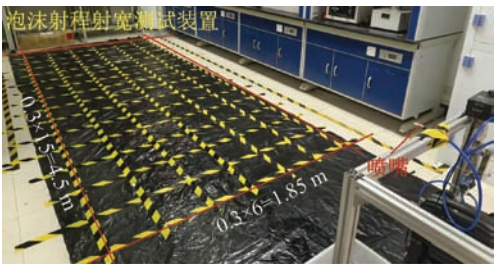


图 2 射程射宽测试网格划分实物
Fig. 2 Physical diagram of grid division method for range width test

2 孔径对泡沫射流性能的影响分析

2.1 孔径对泡沫射流发泡性能及均匀性影响

图 3 为不同射流孔径下的泡沫发泡倍数曲线。从图 3 中可以看出,随着射流孔径的减小,实际发泡倍数与理想值的偏差逐渐增大,且该偏差随气液比的增加而更加显著。在气液比为 10 的条件下,3.5 mm 喷嘴与 3.0 mm 喷嘴的实际发泡倍数分别为 8.89 和 6.87,其与理论值的偏差最大超过 30.0%。可初步认为压缩空气泡沫系统的射流孔径应大于 3.5 mm,当孔径低于 3.5 mm 时,发泡倍数显著降低,系统稳定性不足,难以满足压缩空气泡沫系统的要求。

针对射流孔径减小导致实际发泡倍数与理想值偏差增大的现象,可能与泡沫在通过喷嘴时发生破裂致使稳定性发生变化相关。当射流孔径减小时流速增大,射流孔径处壁面附近的边界层湍流强度增大。根据流体力学边界层湍流剪切应力计算式,湍流强度越大剪切应力越高。

随着孔径的减小流速增加,壁面附近的剪切应力增高,在高剪切力的挤压下,泡沫液膜极易破裂,使得泡沫所包裹的气体逸出,从而降低整体发泡效果,如图 4 所示。图 5 为喷嘴内中心泡沫与壁面泡

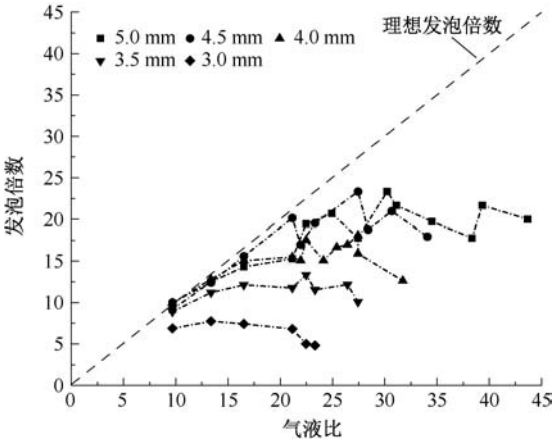


图3 不同射流孔径下的泡沫发泡倍数曲线

Fig. 3 Expansion ratio curves under different jet apertures

沫,从图5可以看出,中心泡沫与壁面泡沫的数量之比与射流孔径呈正比。随着射流孔径减小,小孔径喷嘴内靠近壁面的泡沫比例相对于大孔径喷嘴增大,更多泡沫集中于壁面附近,因此,更易被破坏而降低发泡倍数。

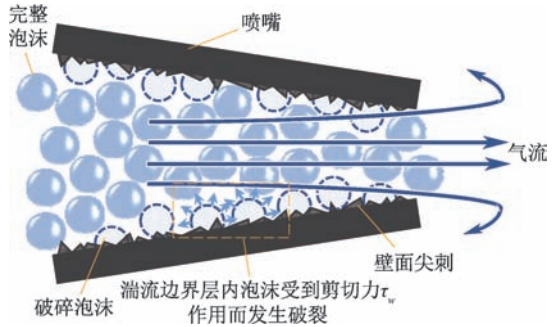


图4 泡沫通过射流孔径

Fig. 4 Foam passing through the jet aperture

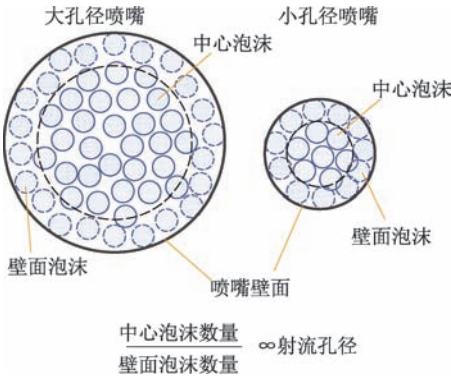


图5 喷嘴内中心泡沫与壁面泡沫

Fig. 5 Central foam and wall foam in nozzle

图6为临界气液比 $\phi^{[23]}$ 与孔径 s 关系;从图6可以看出,获得稳定泡沫射流的 ϕ 随着 s 的减小而降低。5.0 mm喷嘴的 ϕ 为22,而3.5 mm喷嘴的 ϕ

为12,3.0 mm喷嘴的 ϕ 为10。可能的原因:当泡沫液流速保持一定时,随着气液比增大,气体流速也会随之增加。当气体流速增加到一定值后,高速气流会使气液两相混合不均匀,进而形成柱塞流,导致系统稳定性变差,最终无法获得稳定的泡沫射流。

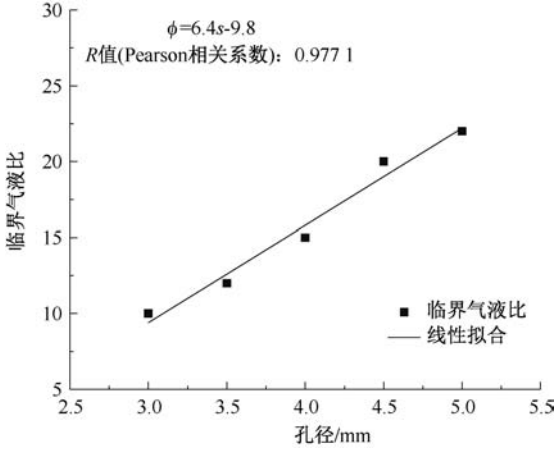


图6 临界气液比与孔径关系

Fig. 6 Relationship between critical gas-liquid ratio and jet aperture

图7为显微镜下的泡沫尺寸图片,在每个气液比条件进行3组独立试验,以确保数据的可靠性。在不同气液比条件下,采集每个射流孔径的泡沫尺寸数据,采用索特尔平均直径 D_{32} 进行处理,计算3组试验数据的 D_{32} 值平均值,结果如图8所示,从图8可以看出,射流孔径对泡沫的 D_{32} 直径影响不大。3.5~5.0 mm喷嘴所生成泡沫的 D_{32} 直径集中在200~300 μm ,整体波动较小。其中,5.0 mm喷嘴生成的泡沫 D_{32} 直径最大为283 μm ,而3.5 mm喷嘴生成的泡沫 D_{32} 直径最大为265 μm 。此外,与其他孔径喷嘴相比,3.5 mm喷嘴生成的泡沫更加细腻, D_{32} 直径分布更加均匀。

2.2 孔径对泡沫析液性能的影响

图9为不同射流孔径下泡沫25%析液时间的变化曲线,从图9可以看出,射流孔径对泡沫25%析液时间的影响无明显规律,但在射流孔径一定时,泡沫25%析液时间随着气液比的增加而增加。3.5~5.0 mm喷嘴在气液比超过15后,泡沫的25%析液时间都达到300 s,但在气液比为10时,泡沫的25%析液时间均未达到240 s。这可能是由于射流孔径的改变会引发气液比的变动。当气液比较低时,泡沫发生装置中气液两相混合程度显著下降,未能进行充分发泡,泡沫中的液体比例增大,在重力作用下泡沫析液速率增加,从而缩短了析液时间。此外,奥斯特

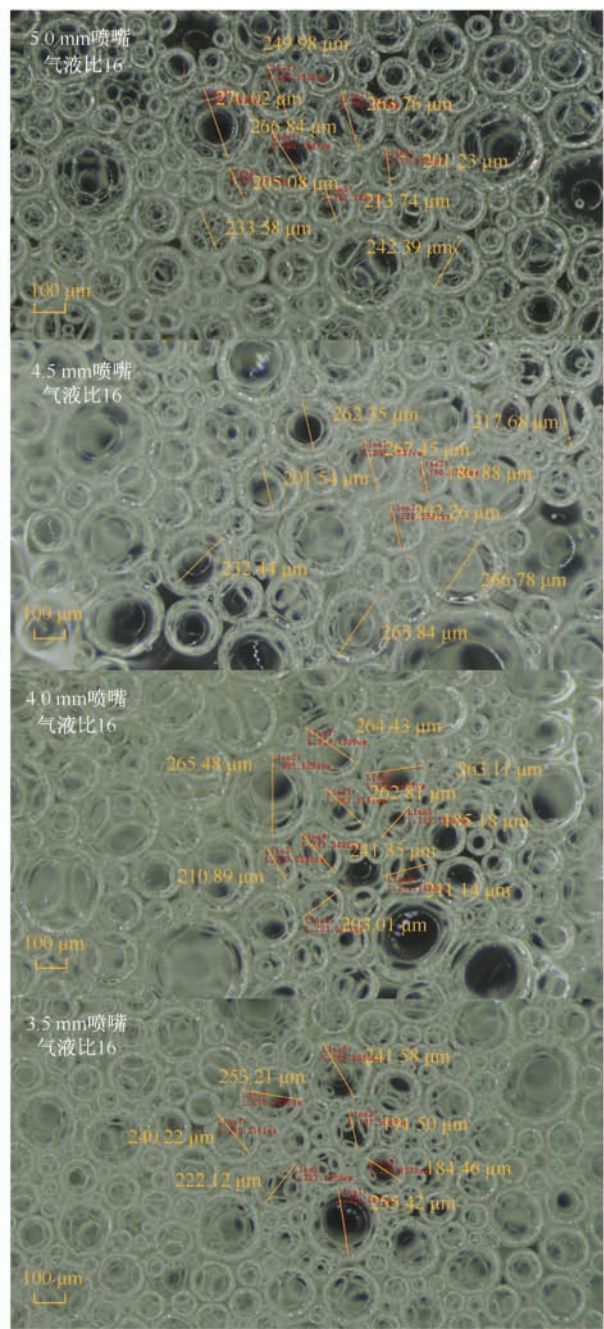


图 7 显微镜下泡沫尺寸照片

Fig. 7 Foam size photo under microscope

瓦尔德熟化与拉普拉斯压力也是影响泡沫析液的重要因素,奥斯特瓦尔德熟化是导致泡沫不稳定的核心机制。当气液比较低时,生成的泡沫尺寸较大且不均匀,这种不均匀性导致泡沫间的压力差较大。根据拉普拉斯方程,这种压力差会使气体从高压的小泡沫向低压的大泡沫扩散,加剧了奥斯特瓦尔德熟化速率,从而加速了泡沫合并和液膜排液过程^[24-25],最终缩短了析液时间。而随着气液比的增大,泡沫液膜变薄,形成了更符合 Plateau 规则的多

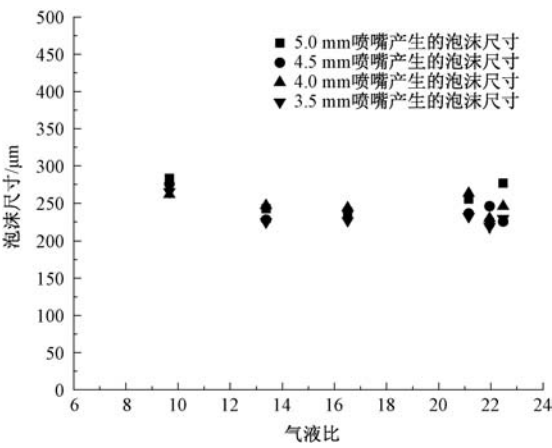


图 8 不同射流孔径下的泡沫尺寸

Fig. 8 Foam size under different jet apertures

面体泡沫且尺寸分布更均匀,减小了泡沫间的压力差,使得奥斯特瓦尔德熟化速率减缓,这减弱了驱动液体迁移的力^[15]。

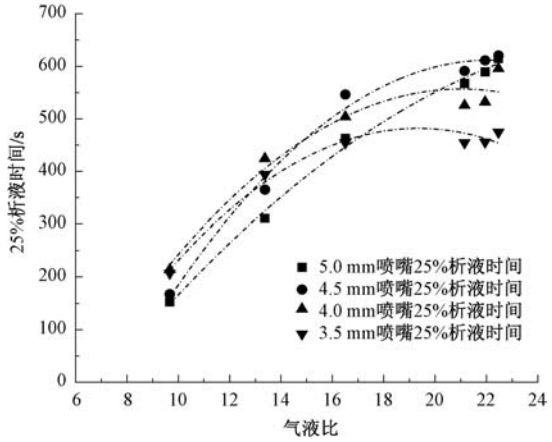


图 9 不同射流孔径下泡沫 25%析液时间的变化曲线

Fig. 9 Change curve of foam 25% drainage time under different jet apertures

2.3 孔径对泡沫射程及射宽的影响

图 10 为不同射流孔径下的泡沫射程及射宽现场对比。由图 10 可知:当气液比为 10 时,小孔径喷嘴生成的泡沫主要集中在射程较远区域,并且在距离喷嘴 1.6 m 的范围内几乎没有泡沫分布;在气液比较大时,小孔径喷嘴生成的泡沫较小,覆盖区域较远但分布范围较窄。而大孔径喷嘴在气液比为 10 时生成的泡沫更集中在射程较近区域,在气液比较大时,泡沫覆盖区域虽然没有显著延伸,但分布范围更广。这可能是由于小孔径喷嘴使泡沫整体流速增加,泡沫在空气中的动能随之增加,从而使其喷射距离显著增加。

图 11 为不同射流孔径下的泡沫射程及射宽,从

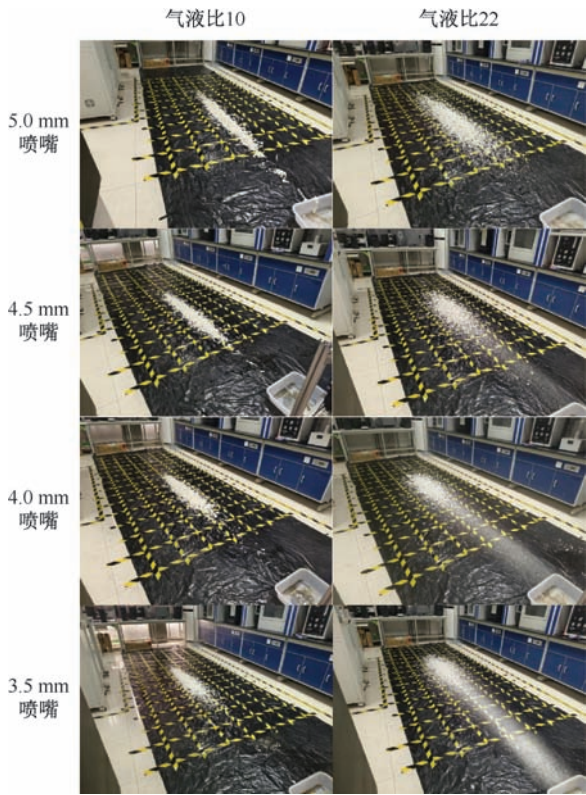


图 10 不同射流孔径下的泡沫射程及射宽现场
Fig. 10 Foam jet range and width physical diagram under different jet apertures

图 11 中可以看出,在气液比小于 20 时,在相同气液比条件下,随着射流孔径增大,泡沫射程和射宽均呈减小趋势;在相同射流孔径条件下,随着气液比的增加,泡沫射程和射宽均逐渐增大。当气液比为 10 时,泡沫射程由 3.5 mm 喷嘴时的 3.9 m 减小至 5.0 mm 喷嘴时的 2.7 m,减小了 30.8%;射宽由 3.5 mm 时的 1.7 m 减小至 5.0 mm 的 0.9 m,减幅为 50.0%。当气液比由 10 增加至 22 时,3.5 mm 喷嘴的泡沫射程由 3.9 m 增加到 4.2 m,增幅为 7.7%;射宽由 1.7 m 增加至 1.8 m,增加了 5.9%。5.0 mm 喷嘴的泡沫射程由 2.7 m 增加至 3.9 m,增加了 44.4%;射宽由 0.9 m 增加至 1.8 m,增幅达 50.0%。在气液比超过 20 后,各孔径喷嘴的泡沫射程与射宽变化不明显,射程与射宽分别趋于 4.2 和 1.8 m。这可能是因为,在相同气液比下,随着射流孔径增大,气液两相流动所受阻力减小,泡沫整体流速相对降低,进而使泡沫喷射到空气中的动能减小,影响泡沫射程与扩散范围。而在相同射流孔径下,当气液比超过一定阈值后,泡沫的发泡倍数难以进一步增大,大量气体并未参与泡沫形成而直接从喷嘴处喷出,气液两相流动相对速度的增加趋于饱和,导致泡沫射程和射

宽的变化趋于平缓。

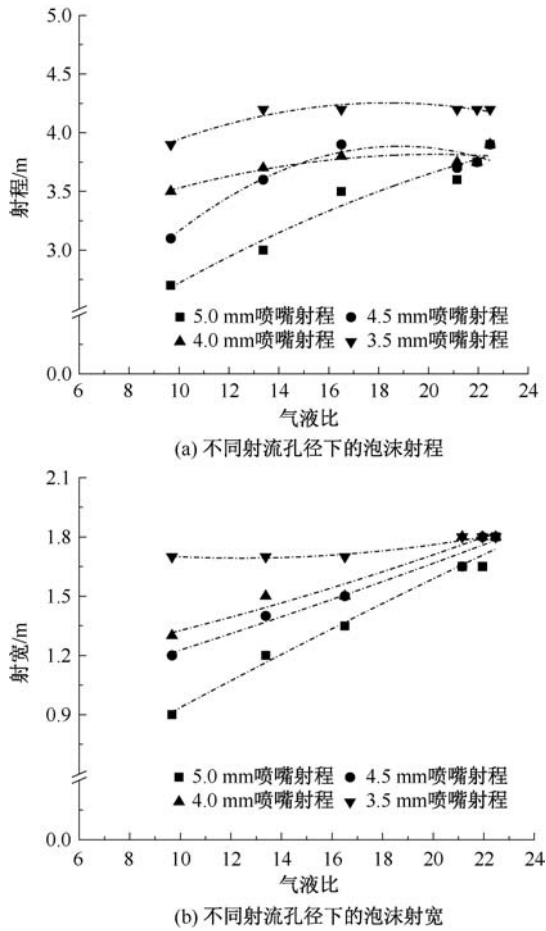


图 11 不同射流孔径下的泡沫射程及射宽
Fig. 11 Foam jet range diagram and width diagram under different jet apertures

3 结 论

- 1) 实际发泡倍数与理想值的偏差随着孔径减小而增大,且气液比越大,该趋势越明显。射流孔径小于 3.5 mm 时,所产生泡沫的发泡倍数及稳定性难以满足消防应用要求,建议在压缩空气泡沫系统的设计中,采用孔径大于 3.5 mm 的喷嘴。
- 2) 获得稳定泡沫射流的临界气液比随着孔径的减小而减小,原因是壁面处泡沫更容易被破坏。中心泡沫数量与壁面泡沫数量之比随着射流孔径的减小而降低。并构建了孔径与临界气液比间的经验公式。
- 3) 射流孔径对泡沫 D_{32} 直径和 25% 析液时间的影响不大。气液比一定时,各孔径喷嘴下泡沫的析液时间变化不大。但在射流孔径相同时,随着气液比的增大,泡沫 25% 析液时间也随之增加。
- 4) 在气液比小于 20 时,在相同气液比下,射流

孔径与泡沫射程射宽呈反比,在相同射流孔径下,随着气液比的增大,泡沫射程和射宽均在不断增加,射程最大增幅为44.4%,射宽最大增幅为50.0%。但在气液比超过20后,各孔径喷嘴的泡沫射程和射宽的变化都不明显,射程与射宽分别趋于4.2和1.8 m。

5) 文中试验重点考察了直线型喷头射流孔径的变化对压缩空气泡沫射流特性的影响特征,未能

深入研究泡沫射流在空间维度中的变化。此外,受试验平台限制,射流孔径仅选取3.5~5.0 mm范围内的喷嘴。因此,在后续工作中首先考虑借助相关仪器,系统探究泡沫射流中泡沫形态演变特征及其粒径分布的空间变化特性。其次,将进一步探索更大射流孔径条件下的泡沫射流特性,并探究小孔径泡沫射流的雾化性能及如何提升小孔径泡沫性能。

参 考 文 献

- [1] FARIDA F M, KUSUMOHADI C S, FIKRI M F. Nozzle diameter and expansion ratio of compressed air foam system[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2596(1): DOI:10.1088/1742-6596/2596/1/012004.
- [2] ZHANG Jiaqing, SHANG Fengju, ZHANG Shanwen, et al. Research on key parameters and fire extinguishing effectiveness of compressed air foam system used for UHV substation[J]. *Fire Technology*, 2025, 61(4): 1 969-1 990.
- [3] 胡成,陈涛,包志明,等. 大流量压缩空气泡沫炮可行性试验研究[J]. *消防科学与技术*, 2019, 38(6): 820-821, 831. HU Cheng, CHEN Tao, BAO Zhiming, et al. Experimental study on the feasibility of high-volume compressed air foam monitor [J]. *Fire Science and Technology*, 2019, 38(6): 820-821, 831.
- [4] 王文杰,郑学波,白博峰. 气泡雾化喷嘴雾化特性实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(4): 834-838. WANG Wenjie, ZHENG Xuebo, BAI Bofeng. Experimental study on the characteristics of effervescent atomization [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(4): 834-838.
- [5] WU Jie, NEW T H. An investigation on supersonic bevelled nozzle jets[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 63: 278-293.
- [6] LIU Changchun, HUANG Linyuan, DENG Tiandiao, et al. On the influence of nozzle geometry on jet diffusion flames under cross-wind[J]. *Fuel*, 2020, 263: DOI:10.1016/j.fuel.2019.116549.
- [7] 徐翔,陈龙,李松阳,等. 航空发动机燃烧室机匣烧穿火焰特性试验研究[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2024, 64(6): 984-991. XU Xiang, CHEN Long, LI Songyang, et al. Experimental study on flame characteristics of aeroengine combustor case burn-through [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2024, 64(6): 984-991.
- [8] 张天,穆新升,陶爽,等. 新型超音速气动雾化喷嘴雾化特性及降尘性能[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(11): 239-246. ZHANG Tian, MU Xinsheng, TAO Shuang, et al. Research on atomization characteristics and dust reduction performance of new supersonic pneumatic atomization nozzles[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(11): 239-246.
- [9] 彭欣,周英烈. 高压喷嘴雾化特性试验研究[J]. *采矿技术*, 2021, 21(5): 159-162.
- [10] 邓天刁,刘长春,黄林远,等. 正压式泡沫灭火技术的研究进展[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(10): 64-70. DENG Tiandiao, LIU Changchun, HUANG Linyuan, et al. Research progress of positive pressure foam extinguishing technology [J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(10): 64-70.
- [11] LI Huan, YU Xiaoyang, QIU Ke, et al. Enhanced fire-fighting performance of aqueous film-forming foam (AFFF) by tuning bubble size and expansion ratio with kenics static mixers[J]. *Fire Safety Journal*, 2024, 144: DOI:10.1016/j.firesaf.2024.104117.
- [12] DING Faxing, KANG Wendong, YAN Long, et al. Influence of gas-liquid ratio on the fire-extinguishing efficiency of compressed gas protein foam in diesel pool fire [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, 146: 1 465-1 472.
- [13] 向硕凌. 水成膜泡沫灭火剂性能的影响因素分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(23): 343-347. XIANG Shuoling. Analysis of influence factors for the performance of aqueous film forming foam extinguishing agent [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(23): 343-347.

[14] 李华敏. 氟蛋白泡沫灭火剂发泡倍数测定的影响因素分析[J]. 实验室科学, 2015, 18(3): 14-16.
LI Huamin. Analysis of influence factors for determination of fluorine protein foam extinguishing agent expansion ratio [J]. Laboratory Science, 2015, 18(3): 14-16.

[15] 陈现涛, 贾井运, 贺元骅, 等. 气液比对水成膜泡沫灭火剂性能影响的实验研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(3): 404-407.
CHEN Xiantao, JIA Jingyun, HE Yuanhua, et al. Experiment study of the influence of gas-liquid ratio on the performance of aqueous film-forming foam extinguishing agent [J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(3): 404-407.

[16] 陈现涛, 郭建生, 凤四海, 等. 泡沫枪管径对泡沫发泡性能影响的试验研究[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(7): 931-933.
CHEN Xiantao, GUO Jiansheng, FENG Sihai, et al. Experimental study on the influence of diameter of foam nozzle on foam foaming property [J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(7): 931-933.

[17] 伍毅, 孙强, 张汉飞, 等. 低压环境对 AFFF 发泡和析液性能影响研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(11): 1 567-1 571.
WU Yi, SUN Qiang, ZHANG Hanfei, et al. Effect of low pressure on the foaming and drainage property of AFFF [J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(11): 1 567-1 571.

[18] 李乾伟. 发泡气体对化学灭火泡沫性质影响的理论研究[J]. 广东化工, 2022, 49(13): 59-61.
LI Qianwei. Theoretical study on the effect of foaming gas on the property of chemical fire extinguishing foam [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(13): 59-61.

[19] 贾旭宏, 贾乐强, 陈现涛. 海拔高度对水成膜泡沫灭火剂性能的影响[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(4): 556-558.
JIA Xuhong, JIA Leqiang, CHEN Xiantao. Effect of the altitude on the property of AFFF [J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(4): 556-558.

[20] 王淮斌, 王钦正. 高原低压环境泡沫灭火剂灭火性能参数研究[J]. 消防界: 电子版, 2021, 7(21): 123-124, 128.

[21] GB 15308—2006, 泡沫灭火剂[S].
GB 15308-2006, Foam extinguishing agent[S].

[22] National Fire Protection Association. Standard for evaluating aircraft rescue and fire-fighting foam equipment [M]. Batterymarch Park: National Fire Protection Association, 2008: 13-15.

[23] DIRIX C, VAN DER W K. Mass transfer in jet loop reactors[J]. Chemical Engineering Science, 1990, 45(8): 2 333-2 340.

[24] 周志毅, 王进卿, 王广鑫, 等. 多孔介质内气泡熟化特性孔隙尺度研究[J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1 265-1 271.
ZHOU Zhiyi, WANG Jinjing, WANG Guangxin, et al. Study on pore size of bubble maturation characteristics in porous media [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3): 1 265-1 271.

[25] 张沐安, 王进卿, 吴睿, 等. 多孔介质内气泡 Ostwald 熟化特性三维孔网数值模拟[J]. 物理学报, 2023, 72(16): 143-152.
ZHANG Muan, WANG Jinjing, WU Rui, et al. Three-dimensional numerical simulation of Ostwald ripening characteristics of bubbles in porous medium [J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(16): 143-152.

作者简介：刘长春（1982—），男，河北邯郸人，博士，副教授，主要从事火灾动力学、建筑防排烟以及清洁灭火技术等方面的研究。E-mail:lcc@xust.edu.cn。