

船舶高压细水雾灭火技术现状与展望

徐永超, 彭云峰

南通吉海消防科技有限公司, 江苏 南通 226100

DOI: 10.61369/SSSD.2025160040

摘 要 : 船舶火灾因空间封闭、火源复杂且难以获取陆上救援支持, 对灭火系统的高效性、环保性及安全性提出严苛要求。高压细水雾灭火技术凭借冷却与窒息双重灭火机制、节能环保、电气绝缘性优良等优势, 成为替代传统技术的核心方向。本文系统梳理国内外船舶高压细水雾灭火技术的研究与应用现状, 剖析当前行业在设计、制造及标准体系层面存在的痛点, 结合市场需求与技术发展趋势, 展望该技术在船舶领域的应用前景, 为推动船用高压细水雾灭火技术的国产化与产业化发展提供参考。

关 键 词 : 船舶消防; 高压细水雾; 国产化

Current Situation and Prospects of High-Pressure Water Mist Fire Protection Technology for Ships

Xu Yongchao¹, Peng Yunfeng²

Nantong Gisea firefighting technology Co.,Ltd., Nantong, Jiangsu 226100

Abstract : Ship fires have strict requirements for the efficiency, environmental friendliness, and safety of firefighting systems due to the enclosed space, complex fire sources, and difficulty in obtaining onshore rescue support. The high-pressure water mist fire protection technology has become the core direction to replace traditional technology due to its advantages of dual cooling and suffocation fire extinguishing mechanism, water conservation and environmental protection, and excellent electrical insulation. This paper systematically reviewed the research and application status of high-pressure water mist fire extinguishing technology for ships at home and abroad, analyzed the pain points in the current industry at the design, manufacturing, and standard system levels, combined market demand and technological development trends, and look forward to the application prospects of the technology in the field of ships, providing reference for promoting the localization and industrialization of high-pressure water mist fire protection technology for ships.

Keywords : ship firefighting; high pressure fine water mist; localization

引言

随着海洋资源开发力度的加大与全球航运业的快速发展, 船舶与海工装备向大型化、复杂化方向升级, 火灾安全风险随之加剧。据统计, 船舶火灾事故占船舶事故总数的11%, 造成的损失在所有海难事故中位居首位, 且事故发生率以每年1%的速度递增。船舶机舱、货舱等区域设备密集、燃料集中, 是火灾高发区, 传统灭火系统已难以满足现代船舶的安全需求。哈龙气体灭火系统曾是机舱B类液体火灾的主流解决方案, 但其会严重破坏臭氧层, 已被《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔协定书》列为禁用物质, 我国于2010年彻底停止其生产。水喷淋系统用水量大, 易对船舶设备造成二次损坏; 泡沫灭火系统存在环保隐患, 且不适用于电气设备火灾。在此背景下, 高压细水雾灭火技术应运而生。高压细水雾灭火技术以纯水为介质, 通过特殊喷嘴在高压作用下产生直径50-100 μm 的雾滴, 兼具冷却降温与窒息灭火双重功效, 用水量仅为传统水喷淋的1%, 灭火效率却提升 10^4 - 10^5 倍。该技术不仅能有效扑救电气、燃油等多种类型火灾, 还能吸附有毒烟雾、减少人员伤害, 已被国际海事组织(IMO)^[1]、美国消防协会(NFPA)^[2]列为重点推广的消防技术。本文从技术原理、技术现状、行业痛点及未来发展趋势, 全面剖析船舶高压细水雾灭火技术, 旨在为技术国产化与产业应用提供指引。

一、技术原理

(一) 定义

根据NFPA 750《细水雾灭火系统》标准^[3], 高压细水雾是指在最小设计工作压力下, 距喷嘴1米处平面上累积分布 $Dv0.99$

<1000 μm 的水雾, 其中I类细水雾 $Dv0.99 \leq 200 \mu\text{m}$, II类细水雾 $Dv0.99$ 在200-400 μm 之间。船舶高压细水雾系统的工作压力通常为60-120bar, 雾滴直径以50-80 μm 为最佳灭火区间^[3]。

(二) 雾化机理

高压细水雾的雾化过程主要依赖以下机制^[4]: 压力差作用: 水

流在高压下流经喷嘴，因喷嘴内外压差剧烈变化，水流被撕裂为微小雾滴；碰撞与摩擦作用：高速水流与喷嘴内部结构或空气碰撞、摩擦，进一步细化雾滴；离心力作用：部分特殊结构喷嘴通过旋转流道使水流产生离心力，脱离流道后形成均匀水雾；二次雾化作用：雾滴喷射过程中，受火焰高温影响发生汽化，或与燃烧产物碰撞，实现二次分裂。

（三）灭火原理

高压细水雾的灭火效果源于冷却效应与惰化效应的协同作用^[5]。冷却效应：雾滴直径小、比表面积大（50 μm 雾滴的比表面积是普通水滴的6400倍，能快速吸收火焰热量并汽化。1升水从20℃升温至100℃需吸收335kJ热量，汽化过程再吸收2300kJ热量，可迅速降低燃烧物表面温度至燃点以下；惰化效应：雾滴汽化后体积膨胀1700倍，在燃烧区域形成水蒸气屏障，稀释氧气浓度至15%以下（可燃物燃烧需氧浓度通常 $\geq 16\%$ ），阻断燃烧链式反应；附加效应：水雾还能吸附烟雾颗粒与有毒气体，净化火场环境，为人员疏散与救援创造条件。

（四）核心参数

影响船舶高压细水雾灭火效果的关键参数包括^[6]：雾滴直径：直径越小，比表面积越大，冷却与汽化效率越高，通常以50–80 μm 为最佳区间；工作压力：直接决定雾滴速度与雾化效果，船舶系统压力多控制在60–80bar，兼顾灭火效率与设备安全性；雾化锥角：影响水雾覆盖范围，船舶狭小空间通常采用60°以上锥角，确保火源完全被水雾包裹；体积流量：单位面积单位时间内的水雾体积，需根据火源功率匹配，避免水量不足或过度浪费。

二、国内外研究与应用比较

（一）国外情况

国外高压细水雾灭火技术起步早，已形成成熟的研发、制造与标准体系，核心企业占据全球高端船舶市场主导地位^[7,8]。美国是最早开展高压细水雾技术研究的国家，1989年美国联邦航空局（FAA）与英国民航局合作完成飞机客舱细水雾灭火试验，验证了该技术在封闭空间的有效性。美国海军试验室通过对比低压水雾、高压两相细水雾与高压单相细水雾，证实高压单相系统的灭火效率最优。欧洲在喷嘴设计与系统集成方面处于领先水平。芬兰 Marioff 公司于1991年研发的 HI-FOG 系统，工作压力 $\leq 14\text{MPa}$ ，雾滴直径50–120 μm ，累计完成5000余次灭火试验，已通过美、英、俄等多国船级社认证，广泛应用于巡洋舰、潜艇等军用船舶。澳大利亚 Phirex 公司的 FOGEX® 系统，采用多孔开式喷嘴，10MPa 压力下雾滴直径约50 μm 。

国外核心企业依托技术积累与品牌优势，垄断全球豪华邮轮、高端客滚船及海工装备市场。主要企业包括：Marioff（芬兰）：全球船用高压细水雾市场份额约9%，技术聚焦高压单相系统，客户涵盖多国海军；—Danfoss Semco（丹麦）：市场份额15%，擅长模块化系统设计，适用于大型集装箱船与FPSO；—Ultrafog（瑞典）：市场份额12%，以高效喷嘴技术为核心，在

豪华邮轮领域应用广泛。此外，欧美已建立完善的标准体系，如IMO《国际海事人命安全公约》、NFPA 750、欧盟EN 14972等，规范了系统设计、测试与认证流程，为技术推广提供保障。

（二）国内情况

国内高压细水雾技术研究始于2000年后，在高校、科研院所与企业的推动下，已实现部分技术突破，但在高端船舶应用与核心部件国产化方面仍存在差距。国内研究机构以理论探索与试验验证为核心，逐步形成技术体系^[9]。

国内企业主要聚焦工业与商用建筑领域^[10]，在船舶尤其是高端海工装备市场渗透率较低。核心企业包括上海同泰、南京消防、科大立安等，产品以中低压系统为主，关键部件如喷嘴、高压泵仍依赖进口。在船舶应用方面，国内系统多用于普通散货船与内河船舶，豪华邮轮、高端客滚船及FPSO等高端领域仍被国外品牌垄断。

（三）国产化突破方向

技术突破：1. 全船数字化设计：建立基于数字船舶的高压细水雾系统设计平台，整合一维管道水动力学与三维CFD喷雾仿真技术，实现管网优化与水雾覆盖精准预测，解决狭小空间布局难题；2. 高效喷嘴研发：通过CFD仿真与激光测量技术，优化喷嘴流道结构，实现雾滴直径50–80 μm 、工作压力60–80bar的参数目标，同时提升喷嘴寿命至 ≥ 5 年；3. 智能化控制系统：开发基于边缘计算芯片的模块化控制系统，实现压力自动调节、故障预警与远程运维，满足不同船舶的多场景灭火需求（如机舱、货舱、客舱）。

标准突破：构建本土化认证体系 联合国内船级社（CCS）、科研院所与企业，制定《船舶高压细水雾灭火系统技术要求》，明确系统设计、测试与认证流程。同时，推动国内标准与国际标准（IMO、NFPA）对接，开展国际互认试验，提升产品全球竞争力。

市场突破：聚焦高端船舶与海工装备 以PCTC汽车滚装船、豪华邮轮、FPSO为突破口，依托国内船企的订单优势（2023年全球PCTC新订单100%来自中国，开展国产化系统示范应用。

三、总结与展望

船舶高压细水雾灭火技术是替代传统灭火系统的核心方向，具有高效、环保、安全等优势，市场需求旺盛。目前国外技术已形成垄断，国内虽实现部分突破，但在设计、制造与标准体系方面仍存在差距，高端船舶应用为零。为推动技术国产化与产业化，提出以下建议：

1. 技术研发：加大对数字化设计、高效喷嘴、智能化控制等核心技术的投入，建立产学研用协同创新平台，联合高校、科研院所与企业开展攻关；

2. 标准建设：加快制定船舶高压细水雾系统专项标准，推动与国际标准对接，支持企业通过国际认证；

3. 市场培育：依托国内船舶工业优势，开展国产化示范项目，建立客户信任；同时，拓展跨领域应用，扩大市场规模；

4. 政策支持：建议将船舶高压细水雾技术纳入“十五五”海洋强国建设重点项目，给予研发补贴与市场推广支持，助力企业突破国外技术垄断。

未来，随着国产化技术的成熟与标准体系的完善，我国船舶高压细水雾灭火技术有望打破国际垄断，占据全球高端市场，为海洋强国建设与全球航运安全提供技术支撑。

参考文献

[1]International Maritime Organization. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)[S]. London: IMO, 2020.

[2]National Fire Protection Association. NFPA 750 Standard on Water Mist Fire Protection Systems[S]. Quincy: NFPA, 2021.

[3]Liu Z G, Kim A K. A Review of Water Mist Fire Suppression Technology: Part II – Application Studies[J]. Fire Technology, 2001.

[4] 邹哲维. 固定式局部高压单相细水雾灭火系统的研制及试验研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2004.

[5] 姚斌等. 细水雾抑制扩散火焰的研究 [J]. 燃烧科学与技术, 1997.

[6] 杨琦. 高压细水雾灭火系统技术 [J]. 消防科学与技术, 2002.

[7] 陆强等. 舰船细水雾灭火系统研究回顾 [J]. 安全与环境学报, 2004.

[8] 邓东等. 舰船用高压单相流细水雾灭火系统 [J]. 船舶工程, 2005.

[9] 中华人民共和国国家标准. 细水雾灭火系统技术规程 (GB 50898-2013) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

[10]Song H T et al. Experimental Study on Fire Suppression of Outdoor Oil-Immersed Transformer by High-Pressure Water Mist System[J]. Fire Safety Journal, 2023.