

城市主战消防车CAFS系统应用管路设计及优化

邓永鑫 张清卓 赵利爽

湖北三六一一应急装备有限公司 湖北 武汉 430090

摘要: 本文聚焦城市主战消防车压缩空气泡沫系统(CAFS), 阐述其工作原理与系统组成, 分析高灭火效率、低用水量等应用优势。深入探讨CAFS系统管路设计的基本要求、布局、材料选择及直径流量计算方法, 并提出优化管路连接、走向布局, 增强智能化自动化, 考虑环境因素等优化策略, 旨在提升城市主战消防车CAFS系统性能与可靠性。

关键词: 城市主战消防车; 压缩空气泡沫系统(CAFS); 管路设计; 优化策略

1 城市主战消防车 CAFS 系统概述

1.1 CAFS系统的工作原理

压缩空气泡沫系统(CAFS)是城市主战消防车应对各类火灾场景的核心技术装备, 其工作原理基于气液两相流的协同作用机制。系统启动后, 消防水泵将水加压至一定压力, 泡沫液泵根据水泵输出的流量和压力泵送AFFF泡沫原液, 同时空气压缩机产生高压空气, 两者在泡沫比例混合系统精确计量和控制下, 通过液体在管路及消防水带的输送过程中产生的扰动实现均匀混合。在混合过程中, 空气以微小气泡的形式分散在水中, 通过泡沫原液提高水的表面活性, 形成具有抗溶、高附着性特性的压缩空气泡沫。这种泡沫的形成并非简单的气液混合, 而是借助泡沫泵进行正压式泡沫比例混合控制原理, 使空气与水在高速流动状态下以较为精准的混合比例充分交融。相较于传统水基灭火介质, 压缩空气泡沫的表面张力大幅降低, 能够更迅速地铺展在燃烧物表面, 形成连续且致密的泡沫覆盖层^[1]。该覆盖层不仅可以有效隔绝氧气, 切断燃烧反应链, 还能通过泡沫中水分的蒸发吸收大量热量, 实现快速降温, 从而达到高效灭火的目的。压缩空气泡沫在喷射过程中, 压缩空气的膨胀作用赋予泡沫更强的动能, 使其具备更好的经济性, 发泡倍率更高, 能够以更少的泡沫原液和水的损耗, 覆盖更大的面积, 有效隔绝灭火区域的空气, 防止复燃。同时通过泡沫原液降低水的表面张力使得泡沫混合液更快地渗入到燃烧物内部, 扑灭隐藏火源防止二次复燃。相较于使用文丘里效应、射流技术等原理的负压环泵式泡沫比例混合系统, CAFS系统采用的正压式泡沫比例混合系统, 能够根据输出流量更为精准且迅速地进行调节以保证混合比例。

1.2 CAFS系统的组成

CAFS系统是一个高度集成化的复杂系统, 主要由

供水模块、供气模块、混合与控制模块以及喷射模块四大部分构成。供水模块是系统的“水源枢纽”, 通常包括消防水泵、水罐、吸水装置和相关管路。消防水泵作为核心部件, 负责将水提升至所需压力及流量, 以满足系统运行要求; 水罐则储存一定量的灭火用水, 为初期灭火提供水源保障; 吸水装置可实现消防车在火场就近吸水, 扩大水源获取范围。供气模块以空气压缩机为核心, 搭配储气罐、空气滤清器和压力调节装置。空气压缩机负责将环境空气压缩至高压状态, 储气罐用于储存压缩空气和分离空压机油, 确保供气的稳定性; 空气滤清器过滤空气中的杂质, 防止其进入系统影响运行; 压力调节装置则精确控制供气压力, 使其与供水压力相匹配。混合与控制模块是CAFS系统的“大脑”, 包含水流量传感器、泡沫混合器、定量式泡沫泵和控制系统。水流量传感器作为混合与控制模块的“眼睛”, 消防泵将输出的水流量供给控制系统; 泡沫混合器是实现气液混合的关键部件, 其结构设计保证空气和水能够均匀混合; 定量式泡沫泵根据水流量和泡沫混合比例, 精确调节泡沫原液与水的混合比例, 以生成最适宜的泡沫; 控制系统通过传感器实时监测系统运行参数, 如压力、流量、混合比例等, 并根据预设程序或人工指令自动调节各部件工作状态。喷射模块由消防炮、压缩空气泡沫枪和相应管路组成, 其作用是将生成的压缩空气泡沫精准喷射至火源处。不同类型的压缩空气泡沫适用于不同的灭火场景, 湿泡沫的液体含量高比重大可满足远距离喷射灭火、干泡沫的空气含量高附着性强以满足近距离防火覆盖隔离等多样化需求。

2 CAFS 系统在消防车中的应用优势

2.1 高灭火效率

CAFS系统的高灭火效率源于其独特的灭火机理和物理特性。压缩空气泡沫兼具水和泡沫的双重灭火优势,

泡沫覆盖层能够迅速隔绝氧气,阻止燃烧所需的助燃剂进入燃烧区域,从源头上切断燃烧反应。泡沫中的水分在蒸发过程中吸收大量热量,有效降低燃烧物温度,抑制火势蔓延。相较于传统的水灭火方式,压缩空气泡沫的覆盖面积更大、附着力更强,能够在燃烧物表面形成更持久的防护层。实验数据表明,在相同灭火条件下,CAFS系统的灭火时间比传统水灭火缩短了40%-60%,尤其在扑灭油类火灾、固体物质火灾等方面表现更为突出。此外,压缩空气泡沫的良好流动性和穿透性,使其能够快速渗透到燃烧物缝隙和内部,扑灭隐藏火源,防止复燃,进一步提升灭火效率。

2.2 低用水量,减少环境损害

在城市消防作业中,传统水灭火方式往往需要消耗大量水资源,不仅对城市供水系统造成巨大压力,还可能引发次生灾害,如大量消防废水对城市排水系统的冲击、淹没周边区域等。CAFS系统凭借其高效的灭火性能,显著降低了灭火用水量^[2]。由于压缩空气泡沫的高覆盖性和强灭火能力,在扑灭相同规模火灾时,CAFS系统的用水量仅为传统水灭火方式的6%-25%。这不仅减轻城市供水系统的负担,也减少消防废水的产生量,降低对环境的污染风险。减少用水量还能避免因大量积水导致的道路湿滑、建筑物地基受损等问题,最大限度降低火灾扑救对城市基础设施和周边环境的损害。

2.3 良好的稳定性和冲量

CAFS系统生成的压缩空气泡沫具有良好的稳定性和冲量,这使其在复杂的火灾场景中能够发挥独特优势。泡沫的稳定性源于其特殊的气液混合结构和表面活性剂的作用,微小的空气泡均匀分散在水中,形成相对稳定的泡沫体系,能够在较长时间内保持形态完整,持续发挥灭火作用。在喷射过程中,压缩空气的膨胀赋予泡沫强大的冲量,使其具有较高的喷射速度和较远的喷射距离。这种高冲量特性使泡沫能够突破火焰的高温和气浪,精准到达火源核心区域,有效扑灭高强度火灾。稳定且具有高冲量的泡沫在遇到障碍物时不易破碎,能够保持较好的形态,继续向前推进,覆盖更大的灭火区域,提高灭火效果。

3 城市主战消防车 CAFS 系统管路设计

3.1 管路设计的基本要求

城市主战消防车CAFS系统的管路设计需满足安全性、可靠性、高效性和适应性等多方面基本要求。安全性是管路设计的首要原则,管路系统必须能够承受1.5倍系统运行过程中的最高工作压力,避免出现泄漏、爆裂等安全隐患。同时要防止气液混合过程中产生的气蚀现

象对管路造成损害,确保系统长期稳定运行。可靠性要求管路系统在各种复杂环境条件下,如高温、低温、振动等,均能正常工作,不影响系统性能。高效性体现在管路设计应尽量减少流动阻力,确保气液两相流能够顺畅输送,提高系统的工作效率。适应性则要求管路设计能够满足不同灭火场景和工况的需求,如不同流量、压力条件下的稳定运行,以及与各种消防设备的良好适配。

3.2 管路布局设计

管路布局设计是CAFS系统管路设计的关键环节,合理的布局能够优化气液流动路径,减少能量损耗。在布局时,应遵循简洁、紧凑的原则,尽量缩短管路长度,减少不必要的弯头和接头数量,降低流动阻力。同时,要充分考虑消防车的空间结构和各部件的安装位置,避免管路与其他设备发生干涉。对于气路和水路的布局,应根据气液混合的要求进行合理规划。一般来说,水路应优先保证水流的顺畅性,避免出现气阻现象;气路则要确保空气能够均匀、稳定地进入混合装置。管路布局还需考虑维护和检修的便利性,预留足够的操作空间,便于工作人员对管路系统进行检查、维修和更换部件。

3.3 管路材料选择

管路材料的选择直接影响CAFS系统的性能和使用寿命。在选择管路材料时,需综合考虑压力承受能力、耐腐蚀性、柔韧性和成本等因素。对于承受高压的主供水管路和供气管路,通常选用高强度不锈钢或铜合金材料。不锈钢具有良好的耐腐蚀性和强度,能够适应各种复杂的工作环境;铜合金则具有耐腐蚀性强、强度高的特点,可防止泡沫原液的腐蚀,提高泡沫比例混合系统的可靠性。对于一些低压管路和柔性连接管路,可选用耐高压橡胶管或尼龙管。这些材料具有良好的柔韧性,便于安装和弯曲,能够适应管路布局的复杂要求。材料的耐腐蚀性尤为重要,因为灭火过程中可能接触到各种化学物质和腐蚀性介质,耐腐蚀材料能够有效延长管路的使用寿命,确保系统长期稳定运行^[3]。

3.4 管路直径与流量的计算

管路直径与流量的精确计算是保证CAFS系统正常运行的关键。在计算管路直径时,需要根据系统的设计流量和允许的流速进行确定。一般来说,流速过高会增加流动阻力,导致能量损耗增大;流速过低则可能影响系统的响应速度和灭火效率。根据经验,水路的流速通常控制在2-3m/s,气路的流速控制在10-15m/s。流量计算则需结合灭火场景和设备需求,确定系统在不同工况下所需的水流量和空气流量。

4 城市主战消防车 CAFS 系统管路优化策略

4.1 优化管路连接方式

优化管路连接方式是降低流动阻力、提高系统可靠性的重要措施。传统的法兰连接和螺纹连接方式虽然应用广泛,但存在连接部位密封性差、流动阻力大等问题。可采用焊接连接或卡箍式连接等新型连接方式,焊接连接能够形成连续的管路通道,减少连接处的流动阻力和泄漏风险;卡箍式连接则具有安装便捷、密封性好的特点,便于管路的安装和维护。在管路连接部位应采用合理的过渡设计,避免出现尖锐的棱角和突变,使气液两相流能够平滑过渡,减少涡流和能量损耗。同时要加强连接部位采用高性能的密封材料,确保管路系统在高压运行状态下不发生泄漏。

4.2 优化管路走向和布局

优化管路走向和布局能够进一步提高CAFS系统的性能。在设计过程中,充分利用计算流体力学(CFD)仿真技术,对管路内的气液流动进行模拟分析,找出流动阻力较大的部位和不合理的布局。根据仿真结果,对管路走向进行调整,尽量减少不必要的弯曲和转折,使气液流动路径更加顺畅。对于一些复杂的管路布局,采用模块化设计理念,将管路系统划分为若干个功能模块,便于安装、调试和维护。同时考虑管路在消防车运行过程中的振动和冲击,合理设置管路支架和固定装置,避免因振动导致的管路损坏和连接松动。

4.3 增强系统的智能化和自动化

随着科技的不断发展,增强CAFS系统的智能化和自动化水平成为管路优化的重要方向。在管路系统中安装压力传感器、流量传感器和温度传感器等各类传感器,实时监测管路内的运行参数,并将数据传输至控制系统。控制系统根据预设程序和实时数据,自动调节管路中的阀门开度、水泵转速和空气压缩机的工作状态,实现系统的智能运行。利用物联网技术,可将CAFS系统与消防指挥中心进行联网,实现远程监控和故障诊断。当管路系统出现异常情况时,系统能够自动报警,并发送故障信息,便于及时进行维修和处理。智能化和自动化

技术的应用,不仅提高了系统的运行效率和可靠性,还降低了操作人员的工作强度和人为失误风险。

4.4 考虑环境因素对管路设计的影响

环境因素复杂多变,对CAFS系统管路的性能和使用寿命有着不可忽视的重要影响,因此在管路设计过程中必须充分考虑各种环境因素。在低温环境下,我国北方部分地区冬季气温低至 -30°C 以下,水和泡沫溶液冻结后体积膨胀率可达9%,会对管路造成毁灭性破坏。2022年东北某城市冬季火灾救援中,因未做好防冻措施,多辆消防车CAFS系统的PVC管路出现爆裂,导致灭火作业中断。采用自控温电伴热带缠绕管路,配合聚氨酯泡沫保温层,能将管路温度维持在 5°C 以上,从根本上杜绝冻结风险。另外,城市火灾现场常伴有氯气、硫化氢等腐蚀性气体,以及酸碱化学试剂泄漏。某化工厂火灾后检测发现,暴露在酸性烟雾中的普通钢管,2小时内腐蚀深度可达0.5mm。针对强腐蚀环境,需采用聚偏二氟乙烯(PVDF)内衬复合钢管,或喷涂特氟龙防腐涂层,其耐腐蚀性较普通材料提升5-8倍,可显著延长管路在恶劣环境下的使用寿命,确保CAFS系统稳定运行。

结束语

综上所述,合理设计与优化CAFS系统管路对提升城市主战消防车灭火效能意义重大。通过科学设计管路与实施优化策略,可有效提高系统稳定性与灭火效率,减少资源浪费与环境损害。随着消防技术不断发展,未来需持续探索更先进的管路设计理念与优化技术,以适应日益复杂的城市火灾救援需求,为城市消防安全提供更坚实保障。

参考文献

- [1]黎蓉,李伟,程志红.城市主战消防车参数化三维建模软件研究[J].消防科学与技术,2019,38(002):368-369.
- [2]刘付勤,李丽凤,刘长新.集成AHP-FAST的城市消防车概念设计[J].包装工程,2021,42(22):129-137.
- [3]郑凯恒,路鹏,王姝懿,等.基于模块化设计理念的城市消防车优化设计[J].设计,2020,33(7):129-131.