

不同类型抗溶性泡沫在化工储运火灾扑救中的性能对比

聂冉冉

内蒙古大唐国际克什克腾煤制天然气有限责任公司 内蒙古 赤峰 025350

摘要: 随着现代化学工业的迅猛发展, 易燃、可燃液体, 尤其是水溶性有机溶剂(如醇、酮、酯、醚等)的生产、储存与运输规模不断扩大, 由此引发的火灾风险日益突出。传统蛋白泡沫或氟蛋白泡沫在扑救此类火灾时, 因无法抵抗水溶性溶剂对泡沫膜的破坏而迅速失效。抗溶性泡沫(Alcohol-Resistant Foam, AR-Foam)因其独特的成膜与保护机制, 成为扑救水溶性液体火灾的关键技术手段。本文系统梳理了抗溶性泡沫的发展历程, 重点对比分析了当前主流的三种类型——抗溶性水成膜泡沫(AR-AFFF)、抗溶性氟蛋白泡沫(AR-FP)和抗溶性成膜氟蛋白泡沫(AR-FFFP)——在灭火性能、抗烧性、抗复燃性、环保性及经济性等方面的差异。通过理论分析与实验数据相结合, 深入探讨了不同类型泡沫的适用场景, 并对未来抗溶性泡沫技术的发展趋势, 特别是环保型、高效型产品的研发方向进行了展望。研究表明, AR-AFFF在综合性能上表现最优, 是当前化工储运火灾扑救的首选; AR-FP则在特定高风险场景下仍具不可替代性; 而环保法规的趋严正推动整个行业向无氟、生物可降解方向转型。

关键词: 抗溶性泡沫; 水溶性液体火灾; 化工储运; AR-AFFF; AR-FP; AR-FFFP; 灭火性能; 环保性

引言

化工储运是现代工业命脉, 却也是火灾爆炸事故高发区。据统计, 全球因化工品储运引发的重大火灾中, 涉及水溶性有机溶剂(如甲醇、乙醇等)的比例逐年上升。这类物质闪点低、挥发性高, 且水溶性对传统灭火剂构成严峻挑战。传统泡沫(如蛋白泡沫)喷射到水溶性液体表面时, 水分会被迅速吸收, 导致泡沫膜结构破坏、析液加速, 短时间内完全失效, 无法隔绝氧气和抑制燃料蒸汽挥发。为应对此难题, 抗溶性泡沫应运而生。其核心在于泡沫液中添加了特殊水溶性高分子聚合物, 喷射到燃烧的水溶性液体表面时, 能迅速析出形成坚韧、致密且不溶于水的凝胶状保护膜, 阻隔溶剂对泡沫水膜的萃取和破坏, 维持泡沫层完整性和稳定性, 实现窒息、冷却和抑制蒸汽挥发的灭火效果^[1]。目前, 市场上主流抗溶性泡沫基于水成膜、氟蛋白和成膜氟蛋白泡沫改性, 衍生出AR-AFFF、AR-FP和AR-FFFP。三者虽都具备抗溶性, 但在化学组成等方面存在差异。在化工储运领域, 科学精准选择和使用抗溶性泡沫至关重要。因此, 本文旨在通过系统性对比研究, 为消防工程实践和应急预案制定提供理论依据和技术参考。

1 抗溶性泡沫的工作机理

抗溶性泡沫的卓越性能源于其独特的双重作用机制: 基础泡沫的物理覆盖与高分子聚合物的化学保护。

1.1 基础泡沫层的作用

无论是AR-AFFF、AR-FP还是AR-FFFP, 其基础部分都继承了母体泡沫的优良特性。例如, AR-AFFF的基础

是AFFF, 它能在烃类液体表面快速铺展形成一层水膜, 通过“成膜”效应迅速抑制燃料蒸汽的挥发, 实现快速灭火。AR-FP则继承了FP泡沫的强韧泡沫层和良好的抗油污能力。

1.2 聚合物保护膜的形

抗溶性泡沫的关键在于其配方中添加的水溶性高分子聚合物。当泡沫溶液与水混合并经泡沫产生装置发泡后, 喷射到燃烧的水溶性液体表面。此时, 水溶性溶剂开始试图溶解泡沫中的水分。然而, 聚合物分子对水溶性溶剂的亲合力远低于水, 因此在水-溶剂界面处, 聚合物会迅速脱水、凝聚并析出, 形成一层连续、粘稠、不透水的凝胶状薄膜。这层聚合物膜具有以下关键功能:

(1) 物理屏障: 直接隔绝了下方的水溶性溶剂与上方泡沫层中的水分接触, 防止了溶剂对泡沫水膜的萃取和破坏。(2) 稳定泡沫层: 为上方的基础泡沫层提供了一个稳定的“基底”, 使其能够像在非水溶性液体上一样, 发挥覆盖、隔氧和冷却的作用。(3) 抑制蒸汽: 有效阻止了燃料蒸汽的持续挥发, 从根本上切断了燃烧三要素中的“可燃物”。正是这种“泡沫层+聚合物膜”的协同作用, 赋予了抗溶性泡沫扑救水溶性液体火灾的独特能力。

2 主流抗溶性泡沫类型及其性能对比

2.1 抗溶性水成膜泡沫(AR-AFFF)

抗溶性水成膜泡沫(AR-AFFF)是在传统水成膜泡沫(AFFF)的基础上, 通过引入特定的抗醇聚合物而制得。其基础配方中的氟碳表面活性剂赋予了泡沫极低的表面张力, 使其具备在液体表面快速铺展并形成水膜的

能力。在实际灭火过程中，AR-AFFF表现出极为优异的综合性能。其最突出的优势在于灭火速度极快，得益于AFFF固有的快速成膜特性，即使面对水溶性溶剂，也能在聚合物保护膜形成后迅速建立有效的覆盖层，从而在短时间内压制火势。这种快速响应能力使其在处理流淌火或小型储罐火灾时尤为有效^[2]。此外，AR-AFFF的流动性极佳，能够迅速覆盖大面积的燃烧液面，有效封闭蒸汽逸散通道。然而，这种高效性也伴随着显著的环境挑战。传统AR-AFFF普遍含有全氟辛烷磺酸（PFOS）和全氟辛酸（PFOA）等长链全氟烷基物质（PFAS），这些化合物具有极强的环境持久性、生物累积性和潜在毒性，已被全球多个司法管辖区严格限制或禁止使用。尽管目前市场上已出现采用短链PFAS或完全无氟配方的新型AR-AFFF产品，但其长期稳定性、抗复燃能力以及在极端条件下的可靠性仍在持续验证中。从经济角度看，AR-AFFF的单位成本虽相对较高，但其高效的灭火性能往往能减少总体药剂消耗和灭火时间，从而在综合成本上可能更具优势。

2.2 抗溶性氟蛋白泡沫（AR-FP）

抗溶性氟蛋白泡沫（AR-FP）则是在氟蛋白泡沫（FP）体系中引入抗醇聚合物而形成的。氟蛋白泡沫本身是在动物蛋白水解物的基础上添加少量氟碳表面活性剂，以改善其流动性和灭火效率。AR-FP虽然在灭火速度上不及AR-AFFF，铺展性也相对较差，需要更长时间才能完全覆盖燃烧表面，但其在抗烧性和抗复燃性方面展现出卓越的性能。这主要归功于其泡沫结构的强韧性与高粘附性，泡沫层析液时间长，能够在高温和剧烈热辐射环境下维持较长时间的完整性，为大型储罐火灾的冷却和监护提供持久保障^[3]。尤其在扑救大型固定顶储罐或内浮顶储罐火灾时，火场热通量巨大，且存在沸溢、喷

溅等次生灾害风险，此时AR-FP所形成的厚实、稳定的泡沫覆盖层显得尤为重要。此外，AR-FP对含有油污、杂质或混合燃料的表面具有更强的适应性，其抗油污能力继承自氟蛋白泡沫的优良特性。在环保方面，AR-FP通常不含PFAS类物质，主要成分为可生物降解的蛋白衍生物和碳氢表面活性剂，环境友好性显著优于传统AR-AFFF。尽管其原材料成本较低，但由于灭火时间较长、所需泡沫量较大，其间接使用成本可能并不占优，但在对安全冗余要求极高的场景中，这种“慢而稳”的特性恰恰构成了其核心价值。

2.3 抗溶性成膜氟蛋白泡沫（AR-FFFP）

抗溶性成膜氟蛋白泡沫（AR-FFFP）是一种旨在融合AFFF与FP两者优势的折中型产品。其配方设计通常在蛋白泡沫基料中同时引入氟碳表面活性剂、成膜助剂以及抗醇聚合物，试图在灭火速度、泡沫强度和流动性之间取得平衡。在实际应用中，AR-FFFP的灭火速度优于AR-FP，能够较快地控制火势发展；同时，其泡沫层的坚韧度和抗烧性又明显优于AR-AFFF，能够在一定程度上抵御高温环境的侵蚀。这种均衡的性能特征使得AR-FFFP特别适用于风险类型多样、但对单一性能指标无极端要求的综合性场所，如中小型化工园区、码头装卸区或多功能储运设施。它既能在多数水溶性液体火灾中提供可接受的灭火效率，又具备一定的抗复燃能力，从而简化了消防系统的配置与管理^[4]。在环保性和经济性方面，AR-FFFP的表现介于AR-AFFF与AR-FP之间，具体取决于其配方中氟碳表面活性剂的种类与含量。若采用长链PFAS，则同样面临环保合规风险；若采用环保型替代物，则成本可能上升。总体而言，AR-FFFP的价值在于其通用性和适应性，而非在某一方面的极致表现。

2.4 综合性能对比分析

表1 综合性能对比表

性能指标	AR-AFFF	AR-FP	AR-FFFP
灭火速度	极快	慢	中等
流动性/铺展性	极佳	差	良好
抗烧性	良好	极佳	良好
抗复燃性	良好	极佳	良好
环保性	差（传统含PFAS）/中（新型）	优	中
经济性	中-高	低	中
主要适用场景	快速响应、流淌火、小型储罐	大型储罐、高风险区域、需长期监护	通用型，性能要求均衡的场景

3 在化工储运火灾扑救中的应用选择

在化工储运的实际消防实践中，抗溶性泡沫的选择绝非一成不变，而必须紧密结合具体场景的风险特征。对于

公路或铁路槽车运输过程中发生的泄漏与火灾，火势往往发展迅猛，且易形成大面积流淌火，此时对灭火剂的响应速度和覆盖能力要求极高。AR-AFFF凭借其快速成

膜和优异流动性,能够迅速压制火头、封闭蒸汽,有效防止火势蔓延,无疑是此类场景的首选。同样,在小型储罐区或装卸作业区,面对突发性、小规模的水溶性溶剂火灾,AR-AFFF的高效性也能最大限度地减少损失。

然而,当火灾发生在大型固定顶或内浮顶储罐时,情况则截然不同。这类储罐容积巨大,一旦起火,热释放速率极高,辐射热强,且存在沸溢、喷溅等复杂危险。扑救的核心目标不仅是灭火,更是长时间的冷却与防止复燃。在此类高风险、高后果场景下,AR-FP所形成的强韧、持久的泡沫覆盖层显得至关重要。其优异的抗烧性能能够有效抵御高温侵蚀,为消防员实施冷却作业和后续处置争取宝贵时间,其价值远超过灭火速度上的些许劣势。

对于综合性化工园区或港口码头等设施,其储存和处理的物料种类繁多,火灾风险类型复杂多样。在此类环境中,配备AR-FFFP作为通用型灭火剂是一种务实且高效的选择。它能够在大多数常见水溶性液体火灾中提供可靠的灭火性能,避免了因泡沫类型不匹配而导致的扑救失败风险,同时也简化了消防系统的维护与管理。此外,无论选择何种类型,都必须充分考虑所在地的环保法规要求。在欧盟、美国加州等PFAS管控严格的地区,传统含PFAS的AR-AFFF已基本退出市场,用户必须转向符合当地环保标准的替代产品,如无氟AR-AFFF或AR-FP。

4 发展趋势与挑战

当前,抗溶性泡沫技术的发展正受到两大核心驱动力的深刻影响:一是对更高灭火效能与多功能集成的持续追求,二是全球范围内日益严苛的环保法规对传统配方的倒逼。其中,PFAS问题已成为行业转型的催化剂。全氟化合物因其“永久化学品”的特性,对生态系统和人类健康的潜在威胁已引起全球高度关注。在此背景下,研发完全不含PFAS、同时又能保持甚至超越传统AR-AFFF综合性能的“绿色”抗溶性泡沫,已成为全球消防科技领域的前沿课题。研究者们正积极探索生物表面活性剂、新型合成高分子聚合物以及纳米复合技术等路径,以期在环保与性能之间找到新的平衡点。

与此同时,未来的抗溶性泡沫将不再局限于单一的灭火功能,而是朝着高效化与多功能化方向演进。理想

的下一代产品应能同时应对极性溶剂、非极性溶剂、高温环境以及复杂燃料混合物等多种挑战,并具备更强的抗复燃能力和更长的储存稳定性。此外,随着新产品层出不穷,建立一套更加科学、统一且能真实反映实际火场条件的性能测试标准与环保认证体系也显得尤为迫切。这不仅有助于保障消防产品的可靠性,也能促进市场的公平竞争与技术的良性发展。

5 结语

抗溶性泡沫作为化工储运安全体系中的关键一环,其技术选型直接关系到火灾扑救的成败。通过对AR-AFFF、AR-FP和AR-FFFP三种主流类型的系统分析可见,它们各自在灭火速度、抗烧性、环保性等方面形成了差异化的优势格局。AR-AFFF以其快速高效的特性,成为应对突发性、小规模火灾的利器;AR-FP则凭借其坚韧持久的泡沫层,在大型高风险储罐火灾中构筑起可靠的安全屏障;AR-FFFP作为通用型方案,为复杂多变的综合场景提供了务实的平衡选择。然而,环保法规的持续收紧,正在深刻重塑这一领域的技术路线与市场格局。未来的抗溶性泡沫必将走向环保、高效、多功能融合的发展道路。对于化工储运企业而言,必须摒弃“一刀切”的思维,转而采取基于风险评估的精细化选型策略。在充分理解不同泡沫性能机理的基础上,紧密结合自身设施的工艺特点、物料性质、规模等级以及所在地的法规要求,科学配置和储备抗溶性泡沫灭火剂。同时,应持续关注行业技术动态,积极评估和引入符合未来发展趋势的环保型新产品,方能在保障安全生产的同时,履行企业的环境责任,构筑起真正坚实、可持续的消防安全防线。

参考文献

- [1]刘平,姜滕林,窦增培,等.水成膜泡沫灭火剂性能的测定[J].电力安全技术,2023,25(08):33-36.
- [2]苏东洋.新型水成膜泡沫防治油液储运火灾实验研究[D].太原理工大学,2023.
- [3]刘宪成,逊克.氟蛋白泡沫灭火剂在扑救油罐火灾中的应用[J].科技信息(科学教研),2007,(26):323.
- [4]赵德君,刘征.成膜类氟蛋白泡沫灭火剂特性及其市场优势[J].消防技术与产品信息,2003,(01):65-67.