

# 泡沫发生器技术在液化天然气仓储物流储罐气体泄漏控制中的应用

李伟

扬州恒基达鑫国际化工仓储有限公司

DOI:10.32629/pe.v3i6.18053

**[摘要]** 为了有效控制LNG仓储物流储罐气体泄漏并减少其带来的环境和安全风险,本文详细分析了泡沫发生器技术在LNG仓储物流储罐气体泄漏控制中的具体应用,包括其在快速覆盖与气体隔离、降低环境温度、抑制气化、控制气体扩散及降低火灾与爆炸风险等方面的作用,并探讨了未来泡沫材料与智能泡沫发生器的发展方向。通过对其应用效果的系统性分析,提出了优化LNG仓储物流储罐气体泄漏控制策略的技术路径。

**[关键词]** 液化天然气(LNG); 泡沫发生器; 环境温度; 仓储物流

**中图分类号:** U473.2+4 **文献标识码:** A

## Application of foam generator technology in gas leakage control of LNG storage and logistics storage tank

Wei Li

Yangzhou Winbase International Chemical Warehousing Logistics Co., Ltd.

**[Abstract]** In order to effectively control the gas leakage of LNG storage and logistics tanks and reduce the environmental and safety risks it brings, this paper analyzes in detail the specific application of foam generator technology in the gas leakage control of LNG storage and logistics tanks, including its role in rapid coverage and gas isolation, reducing ambient temperature, inhibiting gasification, controlling gas diffusion and reducing fire and explosion risks, and discusses the development direction of foam materials and intelligent foam generators in the future. Through a systematic analysis of its application effect, a technical path for optimizing the gas leakage control strategy of LNG storage and logistics tanks has been proposed.

**[Key words]** liquefied natural gas (LNG); Foam generator; Environmental temperature; Warehousing and Logistics

### 引言

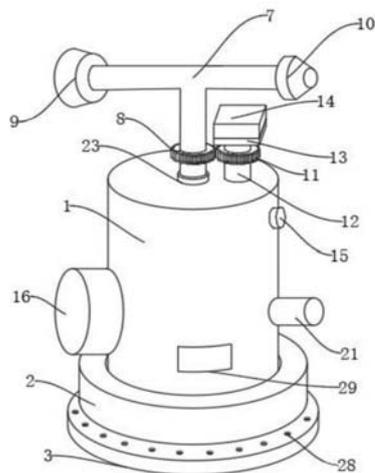
LNG的储运伴随着巨大的安全挑战,特别是其极低温(约-162℃)液态特性,使其在泄漏时会迅速气化,形成可燃气体云,极易引发火灾或爆炸事故。因此,如何有效控制LNG仓储物流储罐气体泄漏始终是安全管理中的重要课题。近年来,泡沫发生器技术逐渐被引入LNG仓储物流储罐气体泄漏应急领域。其通过快速生成高膨胀泡沫覆盖泄漏区域,能够在短时间内阻隔气体扩散、抑制气化过程,并减少火源传播的可能性。这种技术凭借其快速响应和多重防护效果,成为LNG仓储物流储罐气体泄漏控制的有效新型解决方案。

#### 1 泡沫发生器技术在LNG泄漏控制中的具体应用

##### 1.1 快速覆盖和气体隔离

在LNG仓储物流储罐气体泄漏事故发生时,泡沫发生器,如图一,能够迅速产生大量高膨胀率泡沫,快速覆盖泄漏区域。此种快速覆盖能力是泡沫发生器技术的一大优势,特别是在面对大面积泄漏时尤为重要。高膨胀率泡沫通常可以在几分钟内覆盖数百平方米的区域,远超传统的水幕或喷淋系统的覆盖速度。泡沫覆盖后形成的物理屏障能有效隔绝LNG气化后的可燃气体与空气的接触。泡沫层的厚度通常在30-50cm之间,才能够阻止氧气与LNG直接接触,以及有效降低LNG的蒸发速率。研究表明,适当的泡沫覆盖可将LNG的蒸发速率降低80%以上。这种显著的蒸发抑制效果不仅减少了可燃气体的产生量,也为后续的应急处置争取了宝贵时间。泡沫覆盖的另一个重要作用是减少LNG与空气的热交换。LNG的沸点极低(约-162℃),与常温空气接触

会迅速气化。泡沫层作为一个有效的隔热层,能够显著降低热传递速率。实验数据显示,50cm厚的高膨胀率泡沫层将热传递系数降低至 $0.05\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 以下,这意味着泡沫覆盖能够将LNG的气化速率降低90%以上<sup>[1]</sup>。



图一 泡沫发生器工艺图

### 1.2降低环境温度,抑制气化

泡沫发生器技术能够降低环境温度来抑制LNG的气化过程。这一功能主要通过两个机制实现:泡沫的低温稳定性和热量吸收能力。一方面,高质量的消防泡沫具有良好的低温稳定性,在LNG仓储物流储罐气体泄漏现场,环境温度可能急剧下降至 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 甚至更低。普通的水基灭火剂在这种极端低温下会迅速冻结,失去效果。而专门设计用于LNG储罐泄漏控制的泡沫配方能够在极低温度下保持稳定,不会破裂或凝固,使得泡沫能够持续覆盖在LNG液面上,长时间发挥隔热和抑制气化的作用。另一方面,泡沫本身具有显著的热量吸收能力,当泡沫与LNG接触时会发生相变过程吸收大量热量,在过程中能够降低LNG的温度,实验数据显示,100升的高膨胀率泡沫在与LNG接触的过程中可吸收高达 $500\text{kJ}$ 的热量,这相当于将 $1\text{kg}$ 的LNG从 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热到 $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所需的热量。高密度泡沫在覆盖过程中还能通过蒸发作用进一步降低环境温度。泡沫中的水分在蒸发过程中会吸收大量潜热,这能够冷却泄漏区域的空气,还能降低地面和周围设备的温度。

在过去几年中,LNG的运输和储存得到了广泛应用,因此也带来了可能的泄漏风险。为防止泄漏事件的恶化,国内多个港口和储存设施引入了泡沫发生器技术,用于应急处理。以下是一些典型的案例与实际数据:

表1 泡沫发生器技术应用案例分析表

案例	地点	泄漏规模 (吨)	泡沫覆盖面积 ( $\text{m}^2$ )	泡沫消耗量 ( $\text{m}^3$ )	环境温度降低 ( $^{\circ}\text{C}$ )	抑制时间 (分钟)	来源
案例1	上海LNG码头	2.5	150	30	18	45	《中国石油报》2022
案例2	大连LNG储存区	5	300	65	20	60	《应急管理日报》2021
案例3	广州LNG储备站	3.8	250	45	17	50	《LNG安全管理》2020

通过对上述数据的分析,泡沫发生器技术在不同规模的LNG仓储物流储罐气体泄漏事故中均表现出了良好的抑制效果,有

效减少了气化和进一步的扩散风险。根据实验结果,在极端环境温度下使用专用的低温稳定型泡沫能够显著减少泄漏事故带来的危害。

### 1.3气体扩散控制

#### 1.3.1快速包围控制

泡沫发生器技术的最大优势之一是其快速覆盖能力。当LNG仓储物流储罐气体泄漏后,气化的天然气会迅速扩散,增加火灾或爆炸的风险。泡沫发生器可在短时间内生成大量泡沫并迅速扩展,覆盖整个泄漏区域,阻止可燃气体的扩散。例如,一台大型泡沫发生器仅需5分钟便能生成足够的泡沫,覆盖500平方米的区域。这种覆盖速度大大快于LNG气体的横向扩散速度,能够及时形成有效的物理屏障,阻隔气体与外界的联系,减少气体扩散的风险。此外,泡沫的物理特性还能进一步减缓LNG的气化过程,降低事故的严重性并为后续应急处理争取宝贵的时间<sup>[2]</sup>。

#### 1.3.2持续阻隔作用

泡沫层一旦形成就能持续发挥阻隔气体扩散的作用,泡沫的多孔结构能够有效捕获和吸附气态LNG分子,阻止它们向周围扩散。而且泡沫层的动态特性(不断破裂和再生)能够持续吸收和中和扩散的气体。实际应用中,泡沫发生器技术在控制LNG气体扩散方面的效果十分显著。以一次模拟LNG仓储物流储罐气体泄漏实验为例,在无控制措施的情况下,LNG气体云在10分钟内可扩散至距离泄漏点100米的范围;而使用泡沫发生器后,同等时间内气体云的最大扩散距离被控制在30米以内,扩散面积减少了约90%。而且泡沫层还能有效防止“冷池”效应的形成。LNG泄漏后会在地面形成低温液池,这种冷池会持续气化并形成重气云,增加气体扩散的风险。泡沫覆盖能够隔绝冷池与外界的热交换,防止LNG在低洼处积聚。

### 1.4经济效益与成本优势分析

泡沫发生器能够快速生成高膨胀率泡沫,覆盖大面积泄漏区域,极大减少了传统控制手段所需的资源和时间成本。与传统喷淋或通风系统相比,泡沫发生器一次性消耗的水资源和能量大幅减少。以一台标准泡沫发生器为例,其消耗的水量仅为传统喷淋系统的1/10左右,且泡沫液的使用量较低,维护和运营成本相对较小。相关研究显示,使用泡沫发生器技术后,LNG仓储物流储罐气体泄漏事故的后续损失可降低50%以上,尤其在控制气体扩散和抑制火灾蔓延方面表现优异。例如,某港口发生的一次大规模LNG仓储物流储罐气体泄漏事件,通过泡沫发生器的及时干预,防止了气体云扩散,避免了高达2000万美元的潜在损失。在设备维护与投入方面,泡沫发生器具有较长的使用寿命,并且设备本身的自动化程度高,减少了操作人员的数量需求。这种减少人力成本的效果在大型LNG储运设施中尤其明显。据估算,泡沫发生器系统的安装与运营成本比传统的应急系统节省约30%,长期使用下,维护成本也较低。因此,从总拥有成本(TCO)来看,泡沫发生器技术在大规模泄漏事故防控中的经济性和长期效益更为显著。

## 2 未来发展方向

## 2.1 泡沫材料技术的改进

当前的研究重点之一是提高泡沫在极低温环境下的稳定性。LNG的储存温度约为 $-162^{\circ}\text{C}$ 对泡沫材料提出了严峻挑战,科研人员正在探索新型的泡沫配方来增强其在极低温下的性能:

### 2.1.1 纳米材料强化

纳米材料的引入成为泡沫材料改进的重要途径之一,在泡沫溶液中添加如二氧化硅或碳纳米管等纳米颗粒,能显著增强泡沫的机械强度,还能提高其热稳定性。例如,添加1%的纳米二氧化硅可将泡沫在 $-150^{\circ}\text{C}$ 条件下的半衰期延长50%以上。利用这种改进意味着泡沫在极端环境下能够更长时间地保持其覆盖性能,有效延缓LNG气化气体的挥发。

### 2.1.2 生物基泡沫剂

利用天然多糖类物质(如海藻酸盐或壳聚糖)开发的生物基泡沫剂在低温环境下表现出优异的稳定性,相比传统的合成泡沫剂,生物基泡沫剂在 $-160^{\circ}\text{C}$ 的低温环境下仍能保持90%以上的原始体积,对环境友好在更长时间内提供有效的气体隔离防护。

### 2.1.3 相变材料(PCM)复合泡沫

另一项前沿技术是将微胶囊化的相变材料(PCM)引入泡沫中,PCM具有在特定温度范围内吸收或释放大潜热的能力。当遇到LNG仓储物流储罐气体泄漏时,PCM通过吸收环境热量维持泡沫的低温状态延长泡沫的有效覆盖时间,直接提高泡沫在低温条件下的稳定性增强了其整体性能<sup>[3]</sup>。

## 2.2 智能化泡沫发生器系统的应用前景

### 2.2.1 集成传感网络

在LNG储罐周围布置温度、压力、气体浓度等多种传感器,形成全方位的监测网络,能实时收集泄漏区域的环境数据,为智能系统提供决策依据,能在泄漏发生的瞬间做出迅速的反应。

### 2.2.2 人工智能算法

利用机器学习算法智能泡沫发生系统可以根据历史数据与实时监测信息预测泄漏的发展趋势,并自动调整泡沫生成参数。例如,系统可根据气体扩散模式精确调控泡沫的产生速率,覆盖范围以及喷射角度,来达到最佳的控制效果。

### 2.2.3 自动化控制系统

基于传感器网络和人工智能的结合自动化控制系统能够在事故发生时自主决策。例如,系统可根据风向、泄漏规模等外部因素,自动调整泡沫喷射的角度用最大化泡沫的覆盖效果。还有该系统与其他应急设备联动,提供更为全面的事故处理方案。

### 2.2.4 远程操控和监测

5G和卫星通信技术的应用使得泡沫发生系统的远程操控成为可能,在远程控制下操作人员在安全区域内对泡沫发生器进行监控,极大地提高了应急处理的灵活性特别适用于偏远或危险区域的LNG仓储物流储罐气体泄漏事故,为相关人员提供了安全的操作环境。

## 3 结语

泡沫发生器技术在液化天然气(LNG)仓储物流储罐气体泄漏控制中的应用,已展现出其卓越的效果和广阔的发展前景。通过快速覆盖、隔离气体、抑制气化、降低温度等多重功能,该技术为防止LNG泄漏引发的潜在火灾和爆炸风险提供了有效的解决方案。实践案例表明,泡沫发生器技术在LNG仓储物流储罐气体泄漏事故中的应用,不仅显著降低了可燃气体的生成和扩散速率,也为应急处理争取了宝贵的时间,提升了整体事故控制的效率。总的来说,泡沫发生器技术在LNG仓储物流储罐气体泄漏控制中的应用已进入一个成熟期,并将在未来随着技术进步进一步发挥其核心作用。

### [参考文献]

- [1]朱法厅,杨向东.苯酚储罐泡沫发生器的优化应用[J].化工设计,2021,31(03):48-50+2.
- [2]崔晨昕,崔豫.外浮顶储罐边缘式泡沫灭火系统设计探讨[J].给水排水,2018,54(05):77-79.
- [3]韩伟伟.大型原油储罐消防设置及施工技术探讨[J].施工技术,2014,43(S2):671-672.

### 作者简介:

李伟(1961—),女,汉族,江苏扬州人,MBA,高级,研究方向:仓储物流管理。