

中文引用格式:杨洁,郑志忠,李林峰,等. 高倍泡沫抑制 LNG 蒸发与加热蒸气的量化研究[J]. 中国安全科学学报,2026,36(3): 98-103.

英文引用格式:YANG Jie,ZHENG Zhizhong,LI Linfeng,et al. Quantitative Study on suppression of LNG evaporation and heating vapor by high expansion foam[J]. China Safety Science Journal,2026,36(3):98-103.

高倍泡沫抑制 LNG 蒸发与加热蒸气的量化研究^{*}

杨洁¹高级工程师,郑志忠²工程师,李林峰¹工程师,李玉星³教授,
刘艳彬⁴,杨光辉⁵高级工程师

(1 东营市新型工业化发展促进中心,山东 东营 257000;2 山东鸿泽消防工程有限公司,
山东 东营 257000;3 中国石油大学(华东)油气储运学院,山东 青岛 266580;
4 东营联合石化有限责任公司,山东 东营 257000;5 胜利油田石油
开发中心,山东 东营 257000)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.0142

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0805800)。

【摘要】 为有效抑制液化天然气(LNG)蒸气危害,提出3个参数,引入权重因子,通过田口试验量化研究高倍泡沫发泡倍数和稳定性、LNG液体泄漏量及泡沫覆盖高度对抑制LNG蒸发及加速蒸气的影响。研究表明:发泡倍数高、稳定性好的泡沫更利于降低初期蒸气体积分数,而稳定性差的更利于加热蒸气扩散;泄漏量对初期蒸气体积分数影响较大,泡沫覆盖后对后期蒸气积聚体积分数影响较小;泡沫高度对初期蒸气体积分数影响小,但对加热蒸气扩散难易影响较大,泡沫高度与效果无必然的正向关系;不同空间点泡沫性能及覆盖高度对蒸气体积分数下降的快慢影响不同,泄漏量及泡沫覆盖高度对停加泡沫10 min后蒸气体积分数下降的快慢影响不同。

【关键词】 高倍泡沫; 液化天然气(LNG)蒸发; 加热蒸气; 泄漏量; 泡沫性能

Quantitative study on suppression of LNG evaporation and heating vapor by high expansion foam

YANG Jie¹,ZHENG Zhizhong²,LI Linfeng¹,LI Yuxing³,LIU Yanbin⁴,YANG Guanghui⁵

(1Dongying New Industrialization Development Promotion Center, Dongying Shandong 257000, China;
2 Shandong Hongze Fire Engineering Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China;
3 College of Oil and Gas Storage and Transportation, China University of Petroleum (Huadong),
Qingdao Shandong 266580, China; 4 Dongying United Petrochemical Co., Ltd., Dongying
Shandong 257000, China; 5 Shengli Oilfield Petroleum Development Center,
Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: In order to effectively reduce the vaporization rate of LNG, three parameters were proposed and weight factors were introduced. Through Taguchi experiments, the quantitative research was conducted on the foaming ratio and stability of high-pressure foams, the amount of LNG leakage, and the height of foam coverage, to investigate their effects on suppressing LNG evaporation and vapor diffusion. The results

show that foams with high foaming ratio and good stability are more conducive to reducing the initial volume fraction of vapor, while foams with poor stability are more conducive to vapor diffusion; the leakage volume has a significant impact on the initial volume fraction of vapor, while the foam coverage has a relatively smaller impact on the later volume fraction of vapor accumulation; the foam height has a minor impact on the initial volume fraction of vapor, but has a significant impact on the ease of vapor diffusion; the foam performance and coverage height at different spatial points have different effects on the speed of the decrease in vapor volume fraction; the leakage volume and foam coverage height have different effects on the speed of the decrease in vapor volume fraction 10 minutes after the cessation of adding foam.

Keywords: high expansion foam; liquefied natural gas (LNG) vaporization rate; heat vapor; release amount; foam properties

0 引言

天然气单位能量下释放的污染性气体量比煤炭、石油少,更具应用前景^[1],但液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)极易引发燃烧甚至爆炸,其安全问题必须足够重视^[2]。高倍泡沫在控制 LNG 蒸气危害方面具有独有优势^[3-4]。

前人对高倍泡沫的控害机制进行了大量研究。ZHANG Bin 等^[5]通过蒸气体积分数随时间变化曲线证实了初始与稳定阶段泡沫加速 LNG 蒸发现象,并通过试验计算,证明泡沫可阻挡强制对流与热辐射传递给 LNG 的热量,降低蒸发率^[6]。通过 2 种方法可加速降低 LNG 蒸气体积分数,一是降低 LNG 蒸发率,从根本上降低蒸气体积^[7-8];二是提高蒸气温度,利于蒸气快速扩散^[9-10]。水是加热 LNG 及蒸气的主要来源,发泡倍数高的泡沫含水量小;稳定性差的泡沫易于破裂,水外排,目前还鲜有报道泡沫性能、LNG 液体泄漏量和泡沫高度对 LNG 蒸气体积分数的影响程度;前人多用氮气代替 LNG 试验,但两者物理性能有差别。此外,鲜有研究泡沫及收集罐高度不同时,传感器位置对试验结果的影响。

鉴于此,笔者拟采用田口试验,引入 3 个衡量指标,量化分析不同空间点泡沫发泡倍数和稳定性、LNG 液体泄漏量及泡沫覆盖高度对 LNG 蒸发率、加热蒸气的影响,以期高倍泡沫发泡倍数、稳定性和泡沫覆盖高度的选择提供依据。

1 田口试验方法

1.1 田口试验装置

LNG 泄漏池(740 mm×740 mm×100 mm)置于水箱(860 mm×860 mm×300 mm)上方,泡沫收集罐(840 mm×840 mm×1 830 mm)置于水箱与 LNG 泄漏池外侧,保证水封。收集罐平均分为 2 节,据泡沫

设定高度使用相应节数。利用自制泡沫发生器产泡^[11],通过引泡筒引入泡沫收集罐内,试验装置布置如图 1 所示。

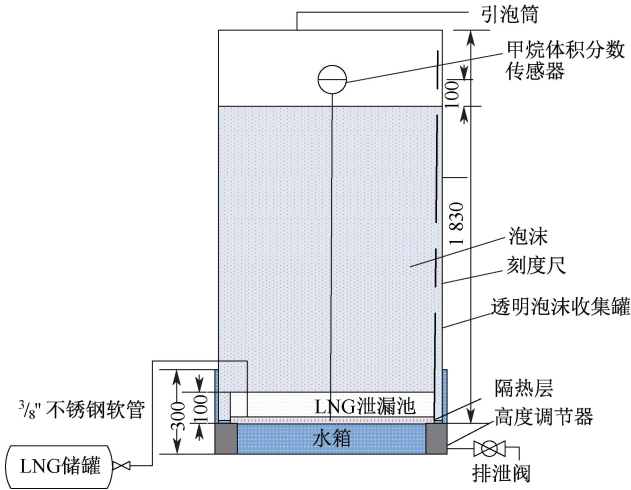


图 1 试验装置布置

Fig. 1 Sketch of the test apparatus

1.2 田口试验方案

试验选取泡沫性能 A、LNG 液体泄漏量 B、泡沫覆盖高度 C 等 3 个因素,2 种泡沫稳定性接近,但发泡倍数相差 0.6 倍,第 3 种泡沫发泡倍数介于两者之间,稳定性提高 2 倍多。试验前水箱水温一致,打开通风风扇及发泡风机。待泡沫高度下降速度为 3~5 cm/h 或池底温度为-20 ℃左右时,结束试验。试验方案及因素水平取值分别见表 1、表 2^[12-13]。

表 1 试验方案

Table 1 Experiment design and conditions				
编号	A	B	C	试验顺序
1	1	1	1	8
2	1	2	2	5
3	1	3	3	1
4	2	1	2	3
5	2	2	3	4

续表 1

编号	A	B	C	试验顺序
6	2	3	1	7
7	3	1	3	2
8	3	2	1	9
9	3	3	2	6

表 2 因素水平数值对照

Table 2 Levels corresponding to each factor

水平数	A		B/kg	C/cm
	发泡倍数	半高时间/min		
1	333	300	5	50
2	265	85	10	90
3	426	74	15	170

2 抑制 LNG 蒸发与加热蒸气的量化研究

2.1 蒸气体积分数随时间变化曲线分析

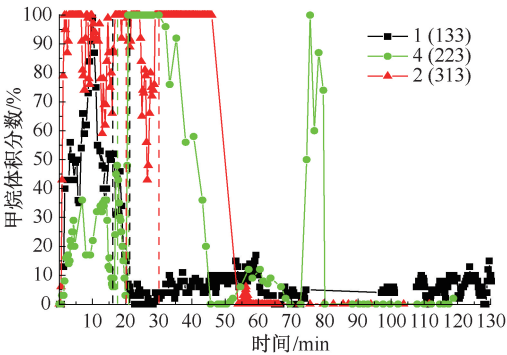
甲烷体积分数随时间变化对应的泡沫覆盖高度如图 2 所示,依次对应泡沫设定高度为 170、110、70 cm。3 个标注数字依次对应试验编号及 A、B、C 水平编号;LNG 液体泄漏量从大到小对应方块、圆点、三角标记曲线。

由图 2a 可知:方案 1 试验开始后,甲烷体积分数迅速升至 50%,出现波动后又升至 99%,加泡后又迅速下降。随着泡沫高度降低,甲烷体积分数波动式增至 15%后在 0~10%间波动,后期波动大。方案 4,甲烷体积分数迅速升至并保持在 30%左右,加泡后先降后升,泡沫高度升至 170 cm 时,甲烷体积分数已达 100%,维持 15 min 降至 0 后又升高,75 min 时高至 100%,但很快为 0。

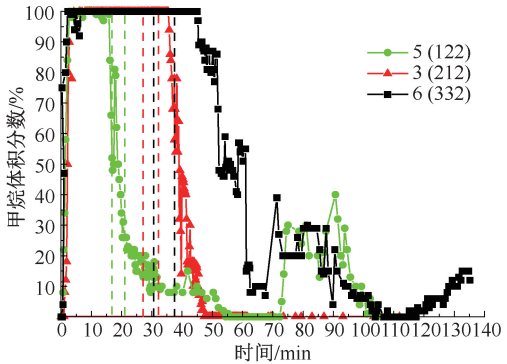
由图 2b 可知:方案 6 甲烷体积分数很快升至 100%,直至泡沫高度降至一半时,体积分数波动下降为 0 并维持 5 min 后上升。方案 5 加泡时,甲烷体积分数迅速下降,出现大波动后降为 0,15 min 后又迅速升至 30%,波动维持 20 min 又降为 0。方案 3 在加泡 5 min 后甲烷体积分数从 100%开始波动下降,并一直维持在 0。

分析图 2c 可知:方案 7 在泡沫高度 70 cm 时,甲烷体积分数开始从 100%下降至 15%,明显回升后又下降,有小的回升但未降至 0。方案 9 与方案 7 类似,中间也出现明显回升,每次回升幅度减少,但最终降至 0。方案 8 在停加泡沫 5 min 后甲烷体积分数迅速降至 0,25 min 后出现小的回升。

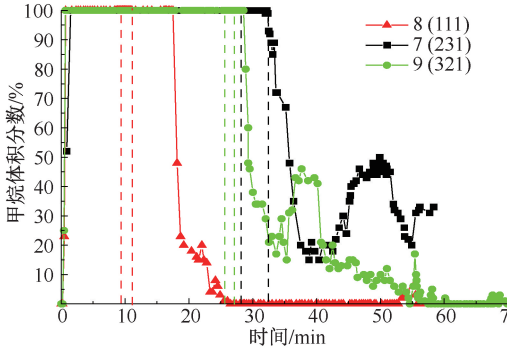
有的试验在加泡之前甲烷体积分数已下降,加



(a) 泡沫设定高度170 cm



(b) 泡沫设定高度110 cm



(c) 泡沫设定高度70 cm

图 2 不同泡沫设定高度下甲烷体积分数随时间的变化

Fig. 2 Profiles of methane concentration as the foam height

泡后反而上升,有 2 个原因:一是与浓度传感器位置有关,其距泡沫收集罐顶的距离分别为 3、63、10 cm (对应泡沫初始设定高度从高到低排列)。蒸气初始集聚于下部,随泡沫上升而上移;空气、泡沫与蒸气作用时间与形式使加热蒸气密度发生变化,加热蒸气密度越小越易扩散。二是与泡沫性能有关。发泡倍数小的泡沫含水量大,加速 LNG 蒸发。

第 1 种泡沫对应的蒸气体积分数下降最快;LNG 液体泄漏量为 5 kg 时,蒸气体积分数会迅速降至 0;而泄漏量为 10、15 kg 时,蒸气体积分数停留在 0 的时间缩短,并会出现回升。

综上可知:①发泡倍数大、稳定性好的泡沫利于降低初期蒸气体积分数,发泡倍数大的泡沫利于加热蒸气扩散;② LNG 液体泄漏量对初期体积分数影响显著,但对后期加热蒸气扩散/蒸发量影响较小。

2.2 蒸气体积分数影响因素田口分析

2.2.1 衡量指标的确定

蒸气体积分数与其蒸发量、加热蒸气扩散难易程度有关,衡量参数需反映这 2 个方面。基于此,开始

加泡时为计时起点 t_{u00} ,甲烷体积分数为基准体积分数 c_{u00} ,得到 3 个参数(h_1 、 h_2 、 h_3): h_1 为初始体积分数占比 x_0 ,指停加泡沫时甲烷体积分数(c_{u0} 、 c_{u10})相对 c_{u00} 的占比,类似地,停加泡沫 10 min 时该变量定义为 10 分体积分数占比 x_{10} ; h_2 为降半时间 t_b ,指甲烷体积分数从 c_{u00} 首次降为 c_{u00} 50% 所用时间; h_3 为 10 分降害率 R_{10} ,指 x_0 、 x_{10} 相对占比。考虑传感器位置对蒸气扩散难易影响,提出权重因子 ω :利于加热蒸气扩散时, ω 取值大于 1,反之小于 1,取值见表 3。

表 3 2 种假定下权重因子 ω 取值
Table 3 List of weight factor in two different assumptions

泡沫覆盖高度/cm	第 1 种假定			第 2 种假定		
	1	2	3	1	2	3
70	$\omega_1 = 1$	$\omega_1 = 1$	$\omega_1 = 1$	$\omega_1 = 0.6$	$\omega_1 = 1.6$	$\omega_1 = 0.6$
110	$\omega_2 = 1$	$\omega_2 = 1$	$\omega_2 = 1$	$\omega_2 = 2$	$\omega_2 = 0.5$	$\omega_2 = 2$
170	$\omega_3 = 1$	$\omega_3 = 1$	$\omega_3 = 1$	$\omega_3 = 1$	$\omega_3 = 1$	$\omega_3 = 1$

加权平均得到最终衡量指标(H_1 、 H_2 、 H_3),计算公式如下。 H_1 、 H_2 、 H_3 均为相对比值,值越小,控害效果越好; H_1 主要通过分析蒸气体积分数变化衡量泡沫控害效果; H_2 、 H_3 主要通过分析蒸气体积分数下降难易度衡量控害效果,前者分析下降一定数值所需时间,后者是规定时间内下降程度。计算公式如下:

$$h_1 = x_0 = \frac{c_{u0} - c_{u00}}{c_{u00}} \times 100\% \tag{1}$$

$$x_{10} = \frac{c_{u10} - c_{u00}}{c_{u00}} \times 100\% \tag{2}$$

$$h_3 = R_{10} = \frac{x_{10} - x_0}{x_0} \times 100\% \tag{3}$$

$$H_1 = \omega h_1 \tag{4}$$

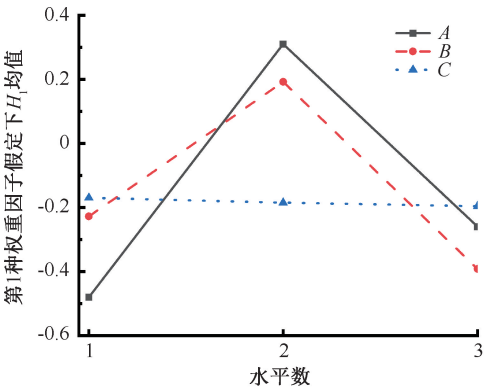
$$H_2 = \omega h_2 \tag{5}$$

$$H_3 = \omega h_3 \tag{6}$$

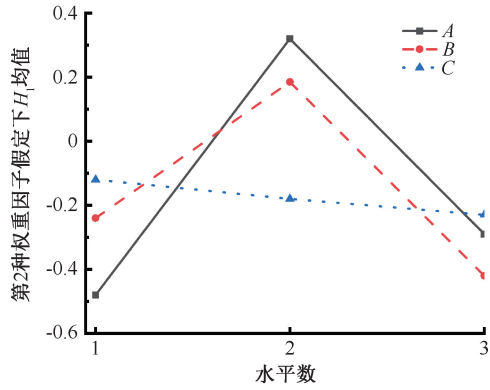
2.2.2 H_1 均值分析

分析 H_1 均值,2 种权重因子 H_1 均值主效应图如图 3 所示,可知:泡沫性能 A 影响最大,然后是 LNG 液体泄漏量 B,最后为泡沫覆盖高度 C。改变权重因子,各水平下 H_1 大小关系基本无变化。

泡沫 2 发泡倍数最小,稳定性与泡沫 3 相近,但泡沫 2 的 H_1 为正,另 2 个为负。泡沫 1 发泡倍数也小于泡沫 3,但其稳定性是泡沫 3 的 3 倍,泡沫 1 的 H_1 最小。可得:即使泡沫含水量大,但不易破裂,则泡沫加速 LNG 蒸发作用弱,加热蒸气作用强。随着泄漏量增大,泡沫控害效果先弱后强,10 kg 泄漏量时加泡后蒸气体积分数反而增大。



(a) 第1种权重因子 H_1 均值主效应



(b) 第2种权重因子 H_1 均值主效应

图 3 2 种权重因子 H_1 均值主效应

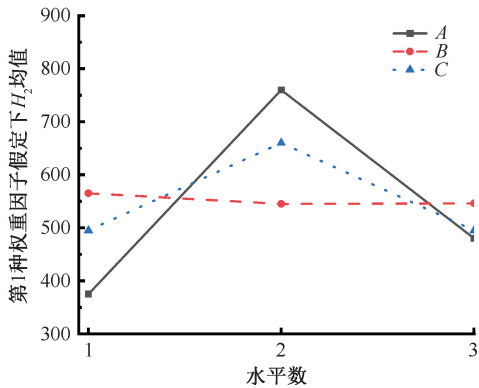
Fig. 3 Mean H_1 analysis under two weight factors

2.2.3 H_2 均值分析

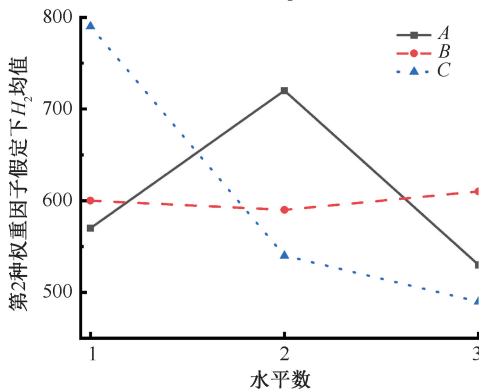
分析 H_2 均值,2 种权重因子 H_2 均值主效应图如图 4 所示,可知:泡沫性能 A 和高度 C 对 H_2 影响大,泄漏量 B 影响很小。发泡倍数大、稳定性好的

泡沫作用下蒸气体积分数降半更快。初始 170 cm 泡沫作用下蒸气初始体积分数平均降速大于 110 cm 下的。

改变权重因子,各因素的影响程度及规律发生变化。泡沫高度的影响变为:泡沫越高,体积分数降半越快。也就是说,不同空间点,泡沫性能及高度对蒸气体积分数下降快慢影响不同。



(a) 第1种权重因子 H_2 均值主效应



(b) 第2种权重因子 H_2 均值主效应

图4 2种权重因子 H_2 均值主效应

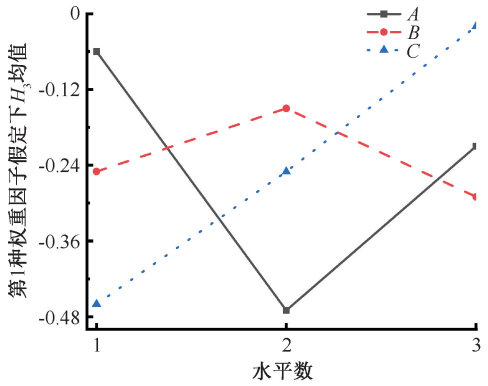
Fig. 4 Mean H_2 analysis under two weight factors

2.2.4 H_3 均值分析

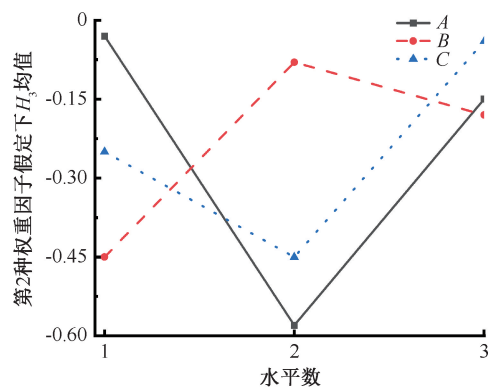
分析 H_3 均值,2 种权重因子 H_3 均值主效应图如图 5 所示,可知:停加泡沫 10 min 后,蒸气体积分数均降低。泡沫性能及高度的影响更大。发泡倍数小、稳定性差的泡沫作用下蒸气体积分数下降幅度更大。LNG 液体泄漏量 10 kg、初始 170 cm 的泡沫作用下蒸气体积分数降幅最小。

权重因子改变,泄漏量、泡沫高度的影响会改变。泄漏量最小的降幅最大,泡沫高度的影响会出现中间折点。即不同空间点,泄漏量及泡沫高度对停加泡沫 10 min 后蒸气体积分数下降快慢影响不同。

综上所述,可知:①泡沫高度与 LNG 液体泄漏量影响相反,对加热蒸气扩散难易程度调节效果明



(a) 第1种权重因子 H_3 均值主效应



(b) 第2种权重因子 H_3 均值主效应

图5 2种权重因子 H_3 均值主效应

Fig. 5 Mean H_3 analysis under two weight factors

显,但非简单正比关系;②泡沫高度与性能间存在交互影响和时空差异,其中存在明显的空间差异性。

2.3 多因素耦合量化分析

发泡倍数大(426 倍)且稳定性好(半高时间 74 min)的泡沫能显著降低初期蒸气体积分数。但当 LNG 液体泄漏量 10 kg 时,此优势会被部分抵消,出现体积分数回升。泄漏量 5 kg 时,泡沫性能对蒸气扩散的促进作用最明显。泡沫初始高度 170 cm 时,发泡倍数大的泡沫使蒸气体积分数降半时间缩短;泡沫高度 110 cm 时,泡沫稳定性对体积分数维持效果更显著。然而,泡沫覆盖高度与效果非简单正比关系,存在最优高度区间。初期泡沫性能和 LNG 液体泄漏量主导影响(贡献率约 70%),后期泡沫覆盖高度和性能影响增强(贡献率升至 60%)。空间上各因素影响权重存在明显差异,需进一步进行模型建立和理论研究。

3 结 论

1) 泡沫性能对初期加热蒸气体积分数及后期加热蒸气扩散难易影响较大,发泡倍数大、稳定性好的泡沫利于降低初期加热蒸气体积分数,发泡倍数

大的泡沫利于蒸气扩散。

2) 泄漏量对后期加热蒸气扩散难易、蒸发量影响小,即泡沫覆盖后,短时间内 LNG 液体泄漏量对蒸气体积分数的变化贡献不大。

3) 泡沫高度对后期加热蒸气体积分数的影响大,可改变泡沫高度加速加热蒸气扩散,但并非泡沫

高度越高,改变幅度越大。

4) 不同空间点泡沫性能、高度及泄漏量对加热蒸气初期体积分数的变化影响不大,泡沫性能及高度对加热蒸气体积分数下降的快慢影响不同,LNG 液体泄漏量及泡沫高度对停加泡沫 10 min 后加热蒸气体积分数下降的快慢影响不同。

参 考 文 献

- [1] FAY J. Spread of large LNG pools on the sea [J]. Journal of Hazardous Material, 2007, 140 (3): 541-551.
- [2] SYDNEY K. Foaming volume and foam stability[J]. Journal of Physical Chemistry, 1946, 19(1): 145-149.
- [3] ZUBER K. LNG facilities-engineered fire protection systems[C]. The 79th Annual Fire Protection Association, 1975: 41-48.
- [4] TAKENO K, ICHINOSE T, TOKUDA K, et al. Effects of high expansion foam dispersed onto leaked LNG on the atmospheric diffusion of vaporized gas [J]. Journal of Loss Prevention Process Industries, 1998, 9(2): 125-133.
- [5] ZHANG Bin, LIU Yi, OLEWSKI T, et al. Blanketing effect of expansion foam on liquefied natural gas spilling pool [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 280: 380-388.
- [6] ZHANG Bin, LIU Yi, OLEWSKI T, et al. Effects of expansion foam on controlling LNG vaporization rate [C]. Aiche Spring National Meeting, 2014: 125-128.
- [7] GB 50151—2010, 泡沫灭火系统设计规范[S].
GB 50151-2010, Code of design for foam extinguishing systems[S].
- [8] NFPA 11-2016, Standard for low-, medium-, and high-expansion foam [S].
- [9] 刘奕, 钱静, 范维澄. 走向精准: 突发事件风险分析方法发展综述[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(9): 1-10.
LIU Yi, QIAN Jing, FAN Weicheng. Rise of precision: a review of emergency risk analysis methodology[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(9): 1-10.
- [10] YANG Xiaole. Common lessons learned from an analysis of multiple case histories [J]. Process Safety Progress, 2011, 30 (30): 143-147.
- [11] YANG Jie, LI Yuxing, ZHU Jianlu, et al. LNG vaporization suppression with high expansion foam based on longitudinal temperature quantitative analysis [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2019, 45(8): 15-22.
- [12] 杨洁, 李玉星, 韩辉. 高倍泡沫性能组合调节研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(10): 175-180.
YANG Jie, LI Yuxing, HAN Hui. Study on combination adjustment for performance of high expansion foam [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(10): 175-180.
- [13] 杨洁, 李玉星, 朱建鲁, 等. 量化研究高倍泡沫抑制整个 LNG 液面蒸气外逸率[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(9): 39-44.
YANG Jie, LI Yuxing, ZHU Jianlu, et al. Quantitative study on the overall LNG vapor-emit mitigation with expansion foam [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(9): 39-44.



作者简介: 杨洁 (1986—), 女, 山东东营人, 博士, 高级工程师, 主要从事 LNG 安全、信息技术等方面的工作。E-mail: Yj_1510546@163.com。