

液化天然气码头集液池容积计算^{*}

高 原, 曾春雷

(交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

摘要: 针对液化天然气(LNG)码头集液池容积设计思路不统一、设计方案多样的问题, 对LNG码头孔口泄漏及蒸发扩散进行研究。利用数值计算方法建立泄漏量和蒸发量计算模型, 并结合工程实际数据进行计算, 对计算结果进行对比分析。结果表明, 若泄漏时间小于5 min, 则泄漏量与泄漏孔径关系不明显; 若泄漏孔径小于25 mm, 则泄漏量与泄漏时间关系不明显; 泄漏点压力和管内流速的差异对泄漏量影响不显著。蒸发时间对LNG蒸发量影响显著, 而环境温度对其影响不显著。码头泄漏量远大于码头面蒸发量, 在集液池容积设计中可不考虑蒸发量的影响。码头泄漏量按泄漏时间10 min、泄漏孔径50 mm计算, 可得到合理可信的LNG收集量。

关键词: LNG 码头; 集液池容积; 泄漏扩散; 蒸发

中图分类号: U656.1+39; TE88

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0074-05

Volume calculation of sumps in liquefied natural gas terminals

GAO Yuan, ZENG Chunlei

(China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China)

Abstract: In view of inconsistent volume design ideas and various volume design schemes of sumps in liquefied natural gas (LNG) terminals, this paper studies the leakage through holes and evaporation diffusion of LNG terminals and adopts numerical calculation method to establish the calculation model of leakage and evaporation amounts. The paper also carries out calculations according to the actual engineering data and compares the calculation results. The results show that if the leakage duration is less than 5 min, the relationship between the leakage amount and the leakage aperture is not obvious; if the leakage aperture is less than 25 mm, the relationship between the leakage amount and the leakage duration is not obvious. In addition, the difference between the leakage point pressure and the flow velocity in the pipe has no significant influence on the leakage amount. Evaporation duration greatly affects LNG evaporation amount, but the ambient temperature has no significant effect on LNG evaporation amount. The leakage amount at the terminal is much larger than the evaporation amount, so the influence of the evaporation amount can be ignored in the volume design of the sump. This paper obtains reasonable and reliable LNG collection amount by calculating the leakage amount of the terminal according to the leakage duration of 10 min and the leakage aperture of 50 mm.

Keywords: LNG terminal; sump volume; leakage and diffusion; evaporation

液化天然气(LNG)码头集液池主要用于收集码头面泄漏的液化天然气。液化天然气在装卸船过程中, 装卸臂与船舶接口处、管道阀门法兰处、

管道腐蚀穿孔处可能发生泄漏。泄漏的低温液化天然气以液态形式泄漏到地面、甲板面并流淌到低洼处, 经泄漏导液沟和收集管导入码头集液池

收稿日期: 2022-08-30

*基金项目: 交通运输部水运科学研究院青年科技创新项目 (WTI-41906)

作者简介: 高原 (1982—), 男, 硕士, 副研究员, 从事港口危险货物安全技术咨询。

通讯作者: 曾春雷 (1987—), 男, 博士, 助理研究员, 从事港口危险货物安全技术咨询。E-mail: zengchunlei@wti.ac.cn

内。收集后的液化天然气在集液池内, 被高倍数泡沫覆盖以降低其挥发速率, 直至完全挥发。因此, 码头集液池的容积应满足码头单次作业可能流入的可信收集量。此泄漏收集量不仅需要考虑码头在作业时的总泄漏量, 还需要考虑泄漏点的蒸发量、经集液盘、导液沟和收集管(通常收集管上半部设有开口)导流时的挥发量。

目前, 液化烃码头集液池容量研究的公开文献较少, 仅郭新杰等^[1]对液化烃泄漏事故情景进行过分析, 尚缺乏详细理论研究和计算结果的分析与讨论, 设计人员在 LNG 码头设计中缺少具有参考价值的计算方法和研究结论。为了给出详细的计算过程和方法, 本文从码头液化天然气泄漏扩散机理出发, 分析 LNG 码头孔口泄漏与蒸发扩散物理过程; 结合工程流体力学和传热学知识, 推导出完善的计算公式, 给出详细的计算流程, 开展了 LNG 码头的孔口泄漏量和蒸发量的定性分析和定量计算; 并结合国内工程案例验证理论研究的成果, 为工程设计人员提供有价值的参考。

1 液化天然气码头泄漏收集的物理过程

液化天然气码头在装卸船过程中, 卸船总管的流速在 1.0 万~1.4 万 m³/h, 卸船压力在 0.28~0.33 MPa。装卸臂与船舶接口连接处、装卸臂后方阀门法兰处, 由于接口对接不当、预冷速度过快导致管道上下面收缩不均匀、气密试验不严格、锈蚀等原因, 可能存在密封不严的泄漏点。高压高速流动的液化天然气流经薄弱点时可能发生孔口泄漏。

液化天然气持续泄漏后下落至集液盘形成液池, 泄漏孔径越大, 泄漏时间越长, 总泄漏量越大, 池液面积也越大^[2-3]。低温液化天然气暴露于空气后, 将迅速吸收周围环境温度, 完成相变过程并汽化^[4], 液化天然气扩散过程包括重气扩散与被动扩散两个阶段^[5]。未完全汽化的液化天然气经导液沟和收集管流入码头集液池。

由上分析, 进入码头集液池的液化天然气量

与泄漏孔径、泄漏持续时间、管内压力和流速、环境温度、泄漏点至集液池间的流动时间有关。这一关系需要借助液化天然气管道泄漏扩散理论进行深入研究。

2 液化天然气管道泄漏扩散理论与定性分析

2.1 孔口泄漏过程

液化天然气码头的卸船总管的直径通常为 42 in (1 066.8 mm), 壁厚 12.7 mm。根据流体力学定义和欧洲石油公司环境健康安全组织 CONCAWE 收集的相关数据^[6], LNG 管道孔口泄漏 $l/d < 0.5$ (l 为孔的通流长度, d 为孔直径), 符合薄壁小孔的定义。根据流体力学伯努利方程, 可得出 LNG 流出孔口速度满足以下关系:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \epsilon \cdot \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

式中: p_1 为管道内压力, kPa; p_2 为管道外部环境压力, 取大气压 101.325 kPa; ρ 为 LNG 密度, 取 480 kg/m³; v_1 为管道内流体的流速, m/s; v_2 为孔口泄漏流速, m/s; ϵ 为孔口流体流动的局部阻力系数。

令:

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{1+\epsilon}} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$v_2 = C_1 \sqrt{\frac{2(p_1-p_2)}{\rho} + v_1^2} \quad (3)$$

式中: C_1 为液体泄漏系数, 是雷诺数 Re 和孔直径 d 的函数。对于 LNG 码头泄漏, 属于管道上的孔口泄漏, 其液体泄漏系数 C_1 根据《流体力学》^[7]中的半经验数据可得: 1) 紊流状态, 对于锋利的泄漏孔口和 $Re \geq 3$ 万时, 液体泄漏系数近似取 0.61; 2) 层流状态, 对于圆滑的泄漏孔口或 $Re < 3$ 万时, 液体泄漏系数可近似取 1。

进一步对式(3)在时间尺度上进行积分, 得到码头 LNG 管线孔口泄漏量计算公式:

$$Q = \rho \int_0^{T_1} \frac{10^{-6} \pi d^2}{4} v_2 dt = \rho \int_0^{T_1} \frac{10^{-6} \pi d^2}{4} C_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} + v_1^2} dt \quad (4)$$

式中: Q 为孔口泄漏量, kg; t 为孔口泄漏时间, s; d 为泄漏口径, mm。

通常在 LNG 码头装卸船过程中, 不频繁调整开泵数量和调节阀开度, 即管内流速 v_1 、管内压力 p_1 恒定不变。式(4)可变换如下:

$$Q = \frac{10^{-6} \pi d^2}{4} T_1 C_1 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2) + \rho^2 v_1^2} \quad (5)$$

由式(5)可知, LNG 码头孔口泄漏的泄漏量与泄漏孔径的 2 次方成正比、与泄漏时间成正比、与管内压力的 0.5 次方成正比、与管内流速成正比。

2.2 蒸发扩散过程

根据传热学原理, 液体蒸发机理分为闪蒸、热量蒸发及质量蒸发^[8]。闪蒸是液体利用自身热量产生的蒸发。热量蒸发是液体流到地面后, 吸收地面、空气中的热量而进行的蒸发。质量蒸发是因池液表面之上气流运动而引起的蒸发。对于 LNG 码头, 由于泄漏的液化天然气温度低、暴露时间短, 闪蒸及质量蒸发量小, 其蒸发的主要原因是吸收地面和周围环境热量, 引起热量蒸发。

对于热量蒸发, 根据傅里叶定律:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dy} \quad (6)$$

式中: q 为 y 方向的导热速率, J/s; A 为垂直于 y 方向的导热面积, m^2 ; k 为物质的导热系数, $J/(m \cdot s \cdot K)$; $\frac{dT}{dy}$ 为 y 方向的温度梯度, K/m 。

码头面、导液沟、收集管中液池吸收地面和空气中的热量为:

$$q_r = \frac{kA(T - T_0)}{\sqrt{\pi\alpha t_1}} \quad (7)$$

热传导所引起的码头面泄漏 LNG 的蒸发量为:

$$Q_m = Q_v t_1 \quad (8)$$

$$Q_v = \frac{kA(T - T_0)}{H \sqrt{\pi\alpha t_1}} \quad (9)$$

式中: q_r 为 LNG 液池吸收环境的热量, J; Q_m 为 LNG 液池蒸发量, kg; Q_v 为蒸发速率, kg/s; A 为液池面积, m^2 ; T 为环境温度, K; T_0 为液体沸点, K; H 为液体蒸发热, J/kg; α 为热扩散系数, m^2/s ; t_1 为蒸发时间, s。

由式(8)(9)可看出, 码头上泄漏的液化天然气, 其蒸发量与环境温度成正比, 与蒸发时间(泄漏点至集液池间的流动时间)的 0.5 次方成正比^[9]。

3 液化天然气码头泄漏收集量的求解过程

根据如上推导出的公式, 给出集液池泄漏收集量的计算流程, 见图 1。

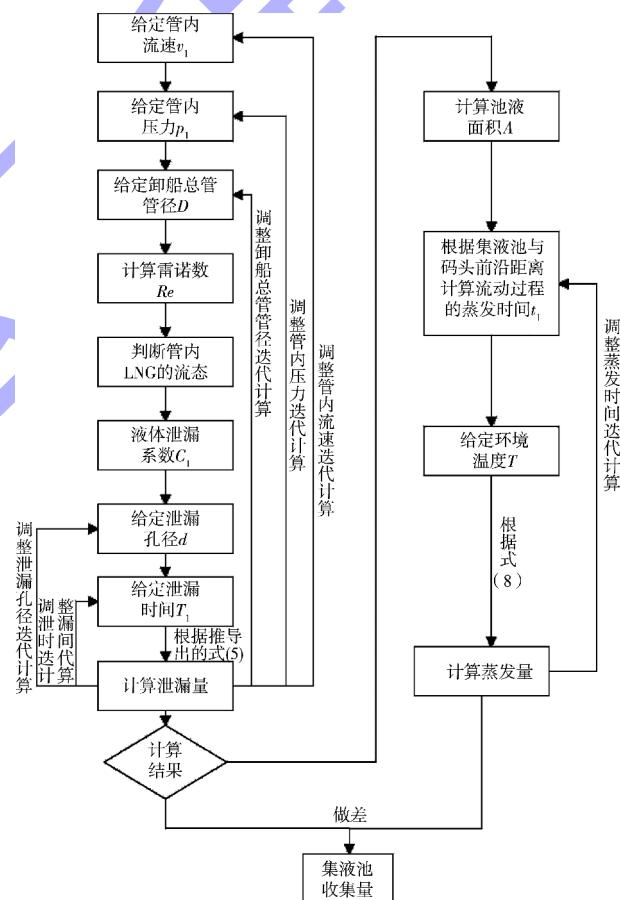


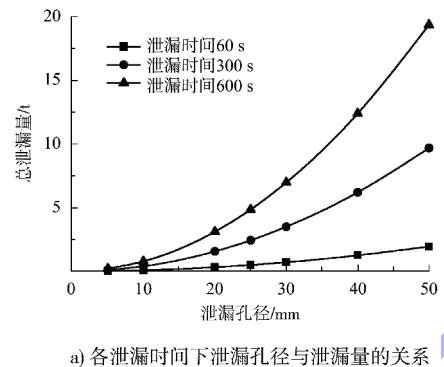
图 1 集液池泄漏收集量计算流程

4 LNG 码头泄漏数值计算结果与定量分析

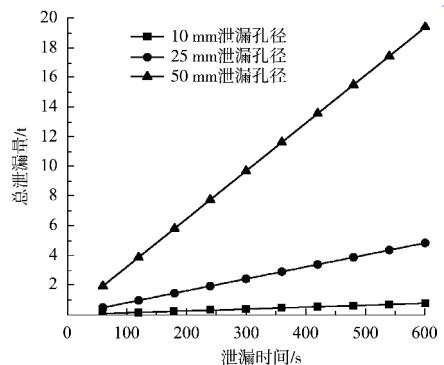
根据目前液化天然气码头设计方案及运行数据可知, LNG 码头卸船总管径通常有 3 种: 38、40、42 in, 即 965.2、1 016.0、1 066.8 mm, 卸船总管的卸船压力在 0.28~0.33 MPa(与开泵方案和调节

开度有关), 卸船总管中的管内流速在 3.0~5.3 m/s (与卸船管径、卸船流量有关)。

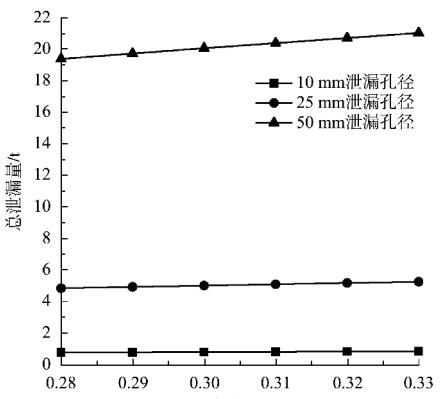
本文泄漏孔径按 0~50 mm、泄漏时间按 0~10 min 进行研究分析。结合国内各码头集液池与码头前沿的距离、导液沟和收集管的长度, 泄漏 LNG 从泄漏点自流至集液池的时间(蒸发时间)按 0~2 min 进行计算; 按我国沿海可能的环境温度考虑为 5~35 °C。运用上述公式和计算流程, LNG 码头总泄漏量计算结果见图 2。LNG 码头泄漏蒸发现量计算结果见图 3。



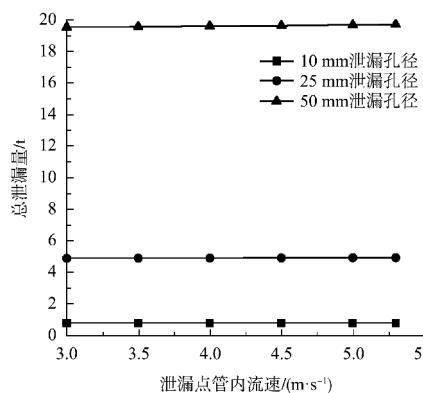
a) 各泄漏时间下泄漏孔径与泄漏量的关系



b) 各泄漏孔径下泄漏时间与泄漏量的关系

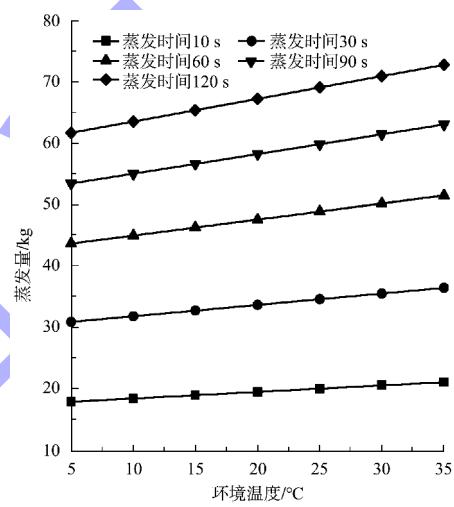


c) 各泄漏孔径下泄漏点管内压力与泄漏量的关系

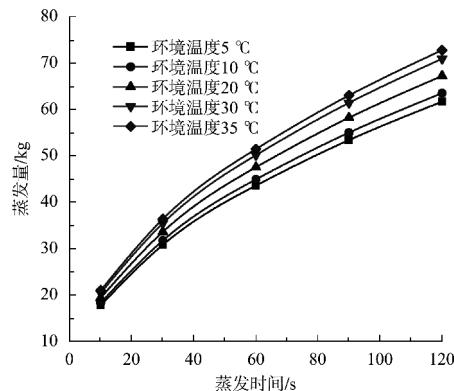


d) 各泄漏孔径下泄漏点管内流速与泄漏量的关系

图 2 LNG 码头总泄漏量计算结果



a) 各蒸发时间下蒸发量与环境温度的关系



b) 各环境温度下蒸发时间与蒸发量的关系

图 3 LNG 码头泄漏蒸发现量计算结果

由图 2 的模拟结果分析得出: 1) 泄漏时间较短时, 泄漏量与泄漏孔径关系不大; 但当泄漏时间较长时, 随着泄漏孔径的增大, 总泄漏量显著增加。若泄漏时间大于 5 min, 泄漏量与泄漏孔径关系密切, 此时计算泄漏量时, 应着重考虑泄漏

孔径的选取；反之则不需要考虑泄漏孔径差异带来的影响。2) 泄漏孔径较小时，泄漏量与泄漏时间关系不大；但当泄漏孔径较大时，随着泄漏时间的增加，总泄漏量显著增加。若泄漏孔径大于 25 mm，泄漏量与泄漏时间关系密切，此时计算泄漏量时，应着重考虑泄漏时间的选取，反之则不需要考虑泄漏时间差异带来的影响。3) 随着泄漏点管内压力的增大，码头 LNG 总泄漏量也随之增加，但这一增加并不明显，即泄漏点管内压力对 LNG 码头总泄漏量影响不显著。在计算 LNG 码头泄漏量时，可不考虑管内压力的差异。4) 随着泄漏点管内流速的增大，码头 LNG 总泄漏量也随之增加，但这一增加并不明显，即泄漏点管内流速对 LNG 码头总泄漏量影响不显著。在计算 LNG 码头泄漏量时，可不考虑管内流速的差异。

由图 3 的模拟结果分析得出：1) 随着环境温度的增高，码头 LNG 蒸发量也随之增大，但这一增大不明显，即环境温度对码头 LNG 蒸发量影响不显著。在计算码头 LNG 泄漏蒸发量时，可不考虑环境温度的差异。2) 随着蒸发时间(从泄漏点流入码头集液池的时间，与集液池所处位置有关)的增加，码头 LNG 蒸发量也随之增大，且这一增大非常显著。在计算码头面 LNG 蒸发量时，应着重考虑蒸发时间的影响，即码头集液池所处位置对 LNG 泄漏后的蒸发量影响显著。

根据以上的计算结果还可知，对于 LNG 码头，其泄漏量远大于码头面的蒸发量。在 LNG 码头集液池容积设计时，应主要考虑 LNG 码头的泄漏量，在对项目总投资不敏感的情况下，可不考虑码头面蒸发量对集液池容积的影响。

5 实例验证

以国内福建某 LNG 接收站一期码头为例，该码头集液池尺寸为 5 m×5 m×3.7 m(长×宽×高)^[10]，集液池容积为 92.5 m³。根据 Q/SY 06043—2021《液化天然气泄漏收集系统设计技术指南》^[11]要求，集液池容积除需要考虑所容纳的 LNG 量外，还需要考虑 1 h 最大降雨量和 1 m 深高倍数泡沫量。经统计，该码头所在地区历史 1 h 最大降雨量

为 38.1 mm。依据本文提出的计算方法，该码头泄漏时间取 10 min、泄漏孔径取 50 mm 时的计算总泄漏量为 40.4 m³。通过对该码头的实际设计容积可以发现，该码头集液池容积除满足流入的 LNG 量、降雨量及高倍数泡沫量外，尚有 1.05 m 的剩余高度。该剩余高度可满足集液池自吸泵吸入管、低温探测器下探管等小量附件所占空间，及口沿低温探测器、火焰探测器、高倍数泡沫发生器导炮筒所需空间。因此，当 LNG 码头集液池容积按不少于 90 m³ 考虑时，码头 LNG 泄漏量按泄漏时间 10 min、泄漏孔径 50 mm 计算，可以得到合理可信的 LNG 收集量计算结果。

6 结论

- 1) LNG 码头孔口泄漏量与泄漏孔径的 2 次方成正比，且在泄漏时间大于 5 min 时尤其明显；当选用的紧急切断阀关断时间较长时，应着重考虑此因素对 LNG 码头集液池容积设计的影响。
- 2) LNG 码头孔口泄漏量与泄漏时间成正比，且在泄漏孔径大于 25 mm 时尤其明显；当考虑大孔径泄漏时，应着重关注泄漏时间对码头集液池容积设计的影响。
- 3) LNG 码头孔口泄漏量与管内压力的 0.5 次方成正比、与管内流速成正比，但是不显著。在设计 LNG 码头集液池容积时，可不考虑管内压力、管内流速的差异性。
- 4) LNG 码头液池蒸发量与环境温度成正比，但是不显著。在 LNG 码头集液池容积设计中可不考虑环境温度的差异性。
- 5) LNG 码头液池蒸发量与蒸发时间(泄漏点至集液池间的流动时间)的 0.5 次方成正比，且较为显著。因此在设计码头集液池容积时，应综合考虑集液池与 LNG 码头前沿的距离，因为这一距离对 LNG 码头集液池容积设计较为敏感。
- 6) 对于 LNG 码头，其泄漏量远大于码头面的蒸发量。在 LNG 码头集液池容积设计时，应主要考虑 LNG 码头的泄漏量，在对项目总投资不敏感的情况下，可不考虑码头面蒸发量对集液池容积的影响。

(下转第 100 页)