



液化天然气码头及低温液化烃码头中的集液池设计

管春萍，马 辉

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司，上海 200032)

摘要：集液池设置是液化天然气码头和低温液化烃码头设计中需考虑的一个重要因素。目前规范对集液池容积无统一规定，设计标准各不相同，从而造成在同类型同等级码头中集液池容积差别较大。针对此问题，结合工程实例，根据现行规范要求对泄漏场景及泄漏时间进行论述。通过对比分析提出，泄漏场景选择应综合考虑装卸臂全破裂场景和管道孔泄漏场景，泄漏时间应选取基于探测和隔离系统后的操作时间，从而确定符合工程实际且经济可行的集液池规模。研究成果可为同类码头集液池的设计提供参考。

关键词：液化天然气码头；低温液化烃码头；集液池；容积

中图分类号：U656.1⁺32

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)12-0060-04

Design of liquid collecting tank in LNG terminal and cryogenic liquefied hydrocarbon terminal

GUAN Chumping, MA Hui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The setting of liquid collecting tanks is an important factor to be considered in the design of liquefied natural gas (LNG) terminals and cryogenic liquefied hydrocarbon terminals. At present, there is no uniform regulation on the volume of liquid collecting tanks in the code, and the design standards are different, resulting in a large difference in the volume of liquid collecting tanks in terminals of the same type and grade. In view of this problem, combined with engineering examples, this paper discusses the leakage scene and leakage time according to the requirements of the current standard. By comparative analysis, the paper suggests that the complete rupture of the loading arm and the leakage of the pipe hole should be considered comprehensively in the selection of leakage scenarios. At the same time, the leakage time should be selected based on the operation time after system detection and isolation, so as to determine the scale of the liquid collecting tank that conforms to the engineering practice and is economically feasible. The research results can provide a reference for the design of similar liquid collecting tanks in terminals.

Keywords: LNG terminal; cryogenic liquefied hydrocarbon terminal; liquid collecting tank; volume

我国“十四五”规划和2035年远景目标纲要中均提出大力推动清洁能源的安全高效利用，由此带来了新一轮液化天然气码头及低温液化烃码头的建设热潮。《油气化工码头设计防火规范》

(JTS 158—2019)^[1]和《液化天然气码头设计规范》(JTS 165.5—2021)^[2]均要求设置紧急泄漏收集池，而现行规范对集液池容积的确定无统一规定，各设计院采用的设计标准也各不相同，从而

收稿日期：2023-03-01

作者简介：管春萍（1972—），女，高级工程师，从事液体工艺储运和消防设计。

造成在同类型同等级码头设计中集液池容积差别较大。

设置集液池是为了收集泄漏后的低温液化烃或液化天然气(以下简称“LNG”), 因此集液池的容积大小应根据事故时物料泄漏量确定, 而泄漏量又与泄漏场景和泄漏时间紧密相关。本文依托山东某 26.6 万 m³ 液化天然气码头和江苏某 5 万 GT 低温液化烃码头工程实例, 参考 AQ/T 3046—2013《化工企业定量风险评价导则》^[3]、GB/T 20368—2021《液化天然气(LNG)生产、储存和装运》^[4]等现行规范要求对泄漏场景及泄漏时间进行论述。选取装卸臂全破裂场景以及 50、100 mm 2 种泄漏孔径作为泄漏场景, 同时选取基于探测和隔离系统后的操作时间, 经综合比较确定符合工程实际且经济可行的集液池规模。

1 集液池容积计算

1.1 泄漏场景的选择

根据 AQ/T 3046—2013《化工企业定量风险评价导则》和 JTS/T 108-1—2019《危险货物港口建设项目安全预评价规范》^[5]的相关规定, 泄漏场景的选择应同时满足 2 个条件: 1) 年发生频率不小于 10⁻⁸; 2) 致死伤害概率不小于 1%。

目前国内对 LNG 和低温液化烃事故造成的致死伤害概率无可参考的数据, 但考虑到 LNG 或低温液化烃均属于甲 A 类危化品, 一旦泄漏会对周边人员造成极大伤害甚至死亡, 因此通常认为其致死伤害概率不小于 1%。因此在选择泄漏场景时仅考虑年发生频率不小于 10⁻⁸ 的情况即可。

对于 LNG 装卸设备及管线的失效频率, GB/T 20368—2021《液化天然气(LNG)生产、储存和装运》表 B.1 中已有详细数据; 低温液化烃码头和 LNG 码头相似, 其装卸设备和管线的失效概率可以参考 LNG 失效数据库。根据 AQ/T 3046—2013《化工企业定量风险评价导则》, 码头装卸时设备(设施)的典型泄漏场景应考虑管线和装卸臂的完

全泄漏和孔泄漏。低温液化烃码头及 LNG 码头的相关设备及管线发生泄漏的频率见表 1。

表 1 设备及管线失效频率

| 失效类型 | 年失效频率 |
|------------------------------|---------------------------|
| 装卸臂全破裂 | 2×10 ⁻⁵ /条装卸料臂 |
| 装卸料臂泄漏孔有效直径为 10% 直径且最大 50 mm | 2×10 ⁻⁴ /条装卸料臂 |
| 管道: 500 mm≤管径<1 000 mm | |
| 管道全破裂 | 2×10 ⁻⁸ /m |
| 泄漏孔有效直径为 1/3 直径 | 1×10 ⁻⁷ /m |
| 泄漏孔有效直径为 10% 直径且最大 50 mm | 2×10 ⁻⁷ /m |
| 泄漏孔有效直径为 25 mm | 4×10 ⁻⁷ /m |

根据表 1 可知, 所有完全泄漏和孔泄漏失效类型的运行频率均大于 10⁻⁸, 应予以考虑。而在实际运营中, LNG 码头及低温液化烃码头装卸区管线管径较大(一般大于 500 mm)且长度较短(几十米左右), 占管线总长度通常不超过 1/10, 大口径管道的失效频率为 10⁻⁸, 码头区主管线全破裂的频率低于 10⁻⁸, 因此主管全破裂场景可不予考虑。

在管道孔泄漏场景中, 泄漏孔直径的确定也各不相同。其中 GB/T 20368—2021《液化天然气(LNG)生产、储存和装运》列出了 1/3 管径、25、50 mm 3 种典型孔径; 而 AQ/T 3046—2013《化工企业定量风险评价导则》则列出 5、25、100 mm 3 种典型孔径。为使集液池容积更符合工程实际且经济合理, 选取孔泄漏典型孔径为 50、100 mm 2 种情况。

综上, 选择泄漏场景时, 选择装卸臂全破裂、管道孔泄漏(泄漏孔径 50、100 mm)可基本反映实际运营过程中的泄漏情况。

1.2 泄漏时间的确定

根据 GB 50183—2004《石油天然气工程设计防火规范》^[6]和 GB/T 20368—2021《液化天然气(LNG)生产、储存和装运》规定, 持续泄漏时间一般要求为 10 min, 也可根据实际情况取较短的泄漏时间。如果在码头水域泄漏时间全部考虑为 10 min, 集液池的容积会比较大, 建设成本也会成倍增加, 经济性较差。此类码头通常会设置紧急停车系统、

低温探测系统、紧急切断阀等，这些探测和隔离系统的设置会大大缩短泄漏时间。因此在确定泄漏时间时，要充分考虑此类因素。

1) 全破裂泄漏。考虑设备全破裂时，泄漏时间应为最大可能泄漏量与泄漏速率的比值，在实际装卸过程中，此数值即停泵时间。液化天然气码头或低温液化烃码头通常要求设置紧急停车系统，其设计反应时间一般为 30~60 s，因此将此时段确定为全破裂时的泄漏时间。

2) 孔泄漏。在确定孔泄漏时间时一般以阀门关断时间考虑，每英寸（25 mm）阀门的关断时间一般为 2~4 s，取中间值则为 3 s，而 LNG 码头和低温液化烃码头主管阀门口径范围通常为 500~1 000 mm，因此一般取值 60~120 s。但该时间忽略了阀门关闭后管内液体依然存在泄漏的可能，因此实际泄漏时间还需考虑增加采取补救措施的时间。根据 AQ/T 3046—2013《化工企业定量风险评价导则》规定，基于探测及隔离系统等级的泄漏时间随着泄漏孔径增大而减小，25 mm 孔径泄漏时间为 10 min，100 mm 孔径泄漏时间为 5 min。因此，50 mm 孔泄漏时间取 7.5 min，100 mm 孔泄漏时间取 5 min。

2 集液池平面位置确定

JTS 158—2019《油气化工码头设计防火规范》未对紧急泄漏收集池位置提出具体要求，集液池的平面位置在初设和施工图阶段可根据安全预评价报告中的事故模拟试验结果确定。前期设计时（预可、工可阶段）可参考 GB 50183—2004《石油天然气工程设计防火规范》表 5.2.1 中事故存液池的要求以及 10.3.4 条规定，选择合适的地点。

表 4 全破裂泄漏量计算结果

| 泊位 | 场景 | 泄漏源 | 货种 | 泄漏时间/s | 最大泄漏流量/(m ³ ·h ⁻¹) | 管道存量/m ³ | 最大泄漏量/m ³ |
|---------------------------|----|-----------|-----|--------|---|---------------------|----------------------|
| 26.6 万 m ³ LNG | 1 | DN400 装卸臂 | LNG | 30~60 | 4 400 | 6 | 42.7~79.3 |
| 5 万 GT 低温液化烃 | 3 | DN350 装卸臂 | 丙烷 | 30~60 | 2 500 | 5 | 25.8~46.7 |

3.3.2 孔泄漏

根据 AQ/T 3046—2013《化工企业定量风险评价导则》，管道孔泄漏时泄漏量计算公式为：

3 典型集液池设计案例

3.1 工程概况

根据工程资料，26.6 万 m³ LNG 泊位多采用 4 台液相臂（3 用 1 备）和 1 台气相臂的装卸方式，5 万 GT 低温液化烃泊位多为 1 种低温物料采用 1 台装卸臂方式。本文采用丙烷作为低温液化烃码头的代表物料。码头典型装卸设备（设施）见表 2。

表 2 码头典型装卸设备（设施）

| 码头等级 | 装卸物料名称 | 最大设计流量/(m ³ ·h ⁻¹) | 装卸臂数量×规格 | 主管数量×规格 | 备注 |
|---------------------------|--------|---|----------|----------|------------|
| 26.6 万 m ³ LNG | | 13 200 | 4×DN400 | 1×DN1050 | 3 台装卸臂同时工作 |
| 5 万 GT | 丙烷 | 2 500 | 1×DN350 | 1×DN600 | - |

3.2 泄漏事故场景

根据前文分析，选择泄漏场景时应选择失效频率不小于 10⁻⁸ 的场景，而在码头装卸中，只要选择装卸臂全破裂、管道孔泄漏（泄漏孔径 50 和 100 mm）2 种场景即可涵盖实际运营过程中的泄漏情况。典型泄漏事故场景见表 3。

表 3 泄漏事故场景

| 泊位 | 场景 | 泄漏源 | 货种 | 泄漏情景 | 孔径/mm |
|---------------------------|----|-----------|-----|------|--------|
| 26.6 万 m ³ LNG | 1 | DN400 装卸臂 | LNG | 全破裂 | 400 |
| | 2 | 管线或装卸臂 | LNG | 孔泄漏 | 50/100 |
| 5 万 GT 低温液化烃 | 3 | DN350 装卸臂 | 丙烷 | 全破裂 | 350 |
| | 4 | 管线或装卸臂 | 丙烷 | 孔泄漏 | 50/100 |

3.3 泄漏量计算

3.3.1 全破裂泄漏

全破裂泄漏时，泄漏量即为自泄漏发生时至停泵前流量与管道内存量之和，其计算取值及结果见表 4。

$$Q_m = AC_0 \sqrt{2\rho(P - P_0)} \quad (1)$$

式中： Q_m 为质量流率，kg/s； A 为泄漏孔面积，m²； C_0 为液体泄漏系数； ρ 为泄漏液体密度，kg/m³；

P 为管道内液体压力, Pa; P_0 为环境压力, Pa。

26.6 万 m³ LNG 码头和 5 万 GT 低温液化烃码

头物料孔泄漏时计算取值及结果见表 5:

表 5 孔泄漏泄漏量计算结果

| 泊位名称 | 场景 | 货种 | 泄漏孔径/mm | $\rho/(kg \cdot m^{-3})$ | C_0 | A/cm^2 | P/kPa | P_0/kPa | 泄漏时间/s | $Q_m/(kg \cdot s^{-1})$ | 最大泄漏量/m ³ |
|---------------------------|----|-----|---------|--------------------------|-------|----------|---------|-----------|--------|-------------------------|----------------------|
| 26.6 万 m ³ LNG | 2 | LNG | 100 | 440 | 0.62 | 78.5 | 364.770 | 101.325 | 300 | 74.1 | 50.5 |
| | | | 50 | | | 19.6 | | | 450 | 18.5 | 18.9 |
| 5 万 GT 低温液化烃 | 4 | 丙烷 | 100 | 580 | 0.62 | 78.5 | 801.325 | 101.325 | 300 | 138.6 | 71.7 |
| | | | 50 | | | 19.6 | | | 450 | 34.6 | 26.8 |

3.3.3 综合泄漏量

根据表 4、5 的计算结果, 26.6 万 m³ LNG 码

头及 5 万 GT 低温液化烃码头在典型泄漏场景中的泄漏量见表 6。

表 6 综合泄漏量计算结果

| 泊位名称 | 场景 | 泄漏源 | 泄漏场景 | 最大泄漏量/m ³ | 综合泄漏量/m ³ | 泄漏量加权平均值/m ³ |
|---------------------------|----|-----------|------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| 26.6 万 m ³ LNG | 1 | DN400 装卸臂 | 全破裂 | 42.7~79.3 | 18.9~79.3 | 49.10 |
| | 2 | 管线或装卸臂 | 孔泄漏 | 18.9~50.5 | | |
| 5 万 GT 低温液化烃 | 3 | DN350 装卸臂 | 全破裂 | 25.8~46.7 | 25.8~71.7 | 48.75 |
| | 4 | 管线或装卸臂 | 孔泄漏 | 26.8~71.7 | | |

根据表 6 结果分析, 26.6 万 m³ LNG 泊位和 5 万 GT 低温液化烃泊位尽管装卸参数不同, 但典型场景液体泄漏量差别不大, 综合泄漏量中位数约为 50 m³。

3.4 集液池容积确定

在确定集液池容积时, 除考虑物料泄漏量, 还需综合考虑蒸发量、消防泡沫覆盖高度等因素。在实际工程设计中, 由于蒸发量计算比较复杂, 因此工程设计通常不考虑此部分内容, 仅考虑消

防泡沫覆盖高度。

GB 50151—2021《泡沫灭火系统技术标准》^[7]规定“覆盖 A 类火灾保护对象最高点的厚度不小于 0.6 m; 对于汽油、煤油、柴油或苯, 覆盖起火部位的厚度不应小于 2 m; 其他 B 类火灾的泡沫覆盖厚度应由实验确定。”由此可见, 目前对于液化烃及 LNG 火灾时的泡沫覆盖深度还没有明确的数据。工程实践中大多取值在 0.6 m 以上。

工程实践中集液池规格及有效容积见表 7。

表 7 集液池规格及有效容积

| 泊位名称 | 综合泄漏量/m ³ | 泄漏量加权平均值/m ³ | 长×宽×深/(m×m×m) | 有效深度/m | 泡沫淹没深度/m | 有效容积/m ³ |
|---------------------------|----------------------|-------------------------|---------------|--------|----------|---------------------|
| 26.6 万 m ³ LNG | 18.9~79.3 | 49.10 | 5.0×5.0×4.7 | 3.2 | 1.5 | 80 |
| 5 万 GT 低温液化烃 | 25.8~71.7 | 48.75 | 5.0×8.0×3.0 | 2.0 | 1.0 | 80 |

注: 集液池有效容积为去除掉泡沫覆盖高度后的容积。

由表 7 结果分析可知, 26.6 万 m³ LNG 泊位和 5 万 GT 低温液化烃泊位典型场景的物料泄漏量虽差别不大(中位数均为 50 m³ 左右), 集液池有效容积也相同, 但规格尺寸相差较大, 这是由于集液池深度受泡沫覆盖深度影响较大。集液池平面尺寸越小、深度越深, 反之则是平面尺寸大、深度相对较浅, 两种规格各有利弊。在工程设计中, 工艺专业应与结构及平面专业协调, 根据实际情

况, 选择经济合理的集液池规格尺寸。

4 结论

1) 根据 GB/T 20368—2021《液化天然气(LNG)生产、储存和装运》规定, 泄漏场景选择时不仅应考虑孔泄漏场景, 还应考虑装卸臂全破裂情况; 且由于装卸臂全破裂情况计算较为简单, 可以作为工程前期确定集液池规模的主要依据。

(下转第 74 页)