DOI 编码：10.13646/j.cnki.42-1395/u.2022.07.029

基于火灾热辐射分析的 LNG 加注趸船布置设计

周成[1]，金全洲[2]，田宇忠[2]，甘少炜[3]

（1. 湖南省水上交通安全指挥监控中心，湖南 长沙 410000；2. 中国船级社武汉规范研究所，湖北 武汉 430000；
3. 中国船级社，北京 100007）

摘　要：液化天然气（LNG）加注趸船是为 LNG 燃料动力船舶提供燃料的水上加注站，其营运过程中的主要风险是 LNG 泄漏后可能造成的低温损伤和火灾伤害。通过分析 LNG 泄漏后的主要灾害，重点使用实体火焰模型对加注作业典型泄漏场景的热辐射灾害距离进行定量计算，并以 200m^3 油气加注趸船为例进行加注趸船布置设计。

关键词：液化天然气；加注趸船；池火；实体火焰模型；热辐射

中图分类号：U662　**文献标识码：**A　**文章编号：**1006—7973（2022）07-0085-04

类似于油趸船，LNG 加注趸船为无动力装置的矩形平底非自航船，设有 LNG 储罐并固定在岸边为 LNG 燃料动力船舶实施燃料加注。LNG 加注趸船平面布置涉及 LNG 储罐和设备的安全保护、LNG 泄漏的防护、防止 LNG 或其他可燃液体的燃烧爆炸、人员的安全脱险等方面。其面临的风险主要来自 LNG 泄漏产生的低温伤害和可燃气体混合气被明火引燃而产生的火灾或爆炸风险。LNG 加注趸船的甲板布置应确保甲板上具有良好的通风条件，便于可燃气体扩散。同时，应将潜在泄漏限制在一定范围内且远离甲板室，以减少火灾热辐射危害。本文结合湖南首艘油气合一 200m^{3}LNG 加注趸船“湘能源一号”设计方案，研究基于 LNG 火灾热辐射分析的布置设计。

1 LNG 加注趸船的潜在危害

LNG 是一种无色液体，属于天然气经过脱水、脱硫、脱杂质等净化处理后的液态形式，主要组份是甲烷（CH4），具有易燃易爆的危险性，泄漏后果受泄漏特征、泄漏量、环境条件等影响。相比 LNG 散装运输，LNG 加注趸船是一种新生事物，能够直接借鉴的应用经验较少，只能借助 LNG 运输船和岸上加注站经验及国外研究成果来分析。

对于加注趸船，LNG 泄漏后可能出现的危害及火灾情形包括低温影响、闪火、池火、蒸气云爆炸、喷射火。低温影响主要源自泄漏时深冷的 LNG（-162℃）在未被引燃时可能对人员产生低温冻伤以及对金属的冷脆伤害。泄漏后延迟点燃的情况下，蒸气云不会一次性全部

现浇式靠船墩整体刚度未见明显差异。

4.4 检测结果

综合分析比较装配式靠船墩与现浇式靠船墩动刚度与靠船激励下的响应，可以看出装配式靠船墩接缝位置连接良好，装配式靠船墩整体刚度与现浇式靠船墩无明显差异。

5 结束语

（1）本文提供两种装配式靠船墩的设计方案及施工工艺，并通过检测证明装配式靠船墩各预制构件连接较好，为以后类似的项目提供宝贵的经验。

（2）目前装配式结构在水运工程中应用较少，对装配式结构和预制块的连接方式还处于探索尝试阶段，现阶段针对已经施工完成的装配式靠船墩结构缺少在长期荷载作用下的耐久性分析。

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部，装配式混凝土结构技术规程，2014.10.

[2] 李元礼，陈晶晶 . 装配式靠船墩的关键技术研究 [J]. 中国水运，2021.03.

[3] 严薇，曹永红，李国荣 . 装配式结构体系的发展与建筑工业化 [J]. 重庆建筑大学学报，2004.10.

[4] 李芬红 . 论钢结构建筑是新型建筑工业化最重要的代表 [J]. 中国建筑金属结构 ,2010(16): 24-26.

[5] 朱红亮，沈旭鸿 . 工业化装配式技术在内河航道重力式护岸中的应用 [J]. 中国水运，2016.04.

燃烧，试验表明该情况下产生的闪火以 10–20m/s 的较低速度传播，传至泄漏源形成池火或喷射火。喷射火的泄露源主要为带压管路或容器的破孔；池火对应的泄漏源为大量泄漏后自然形成的液池或泄漏至围堰、集液盘等设施内形成的液池。蒸气云在围蔽或受限空间被引燃，则会产生有害超压，造成蒸气云爆炸危害[1]。

上述各种危害中，通过配备防护服、安全培训以及布置构造设计，可有效控制低温影响。闪火到达附近物体的总辐射量通常低于来自相同距离持续时间较长的池火或喷射火。由于设置紧急切断阀的原因，在较短时间内遇到明火产生喷射火概率低。加注趸船的 LNG 补给、供应管路及储罐都设置在开敞甲板，可燃气体蒸气压扩散受限并遇明火发生蒸气云爆炸的概率低。比较而言，池火是最可能发生、危害后果最严重的一种危害形势[2]。

2 LNG 池火热辐射模型

用来模拟LNG池火热辐射的常用模型有点源模型、Shokri–Beyler 模型及 Mudan 模型。点源模型是一种不考虑火焰几何参数的简化模型，此模型假定火的辐射能由一点向外辐射，而不是由代表火焰的理想形状（如锥形或圆柱形）向外辐射，其所考虑的外界影响因素较少，适用于理论化的趋势比较，对具体场景的计算结果可参考性不高。Shokri–Beyler 模型相对点源模型做了一定的优化，其基于辐射体和目标之间的角系数来处理辐射热流问题。模型假设池火焰为具有均匀辐射能力的圆柱形实体辐射源，圆柱形辐射源的直径等于液池的直径，高度为池火焰长度，但相关假设对实际场景仍然简化较大。

Mudan模型把池火焰看作是一个垂直（无风条件下）或者倾斜（有风条件下）的圆柱形辐射源。在 Mudan 模型中，除了考虑池火焰表面的有效热辐射通量和被辐射目标物与池火焰间的视角关系，还考虑了大气透射系数的影响。对于含有大量黑烟的碳氢化合物池火焰，其表面的热辐射通量计算还考虑了黑体辐射强度、消光系数及烟尘辐射强度。相对来说 Mudan 模型更为准确，并作为中国船级社发布的《油气定量风险评估指南》[3] 中的推荐模型。该指南中，采用 Mudan 模型计算热辐射强度，采用 Thomas 模型计算池火火焰高度，采用 Bagster 模型计算大气热传递系数，采用 Babrauskas 计算质量燃烧效率。相关计算模型如下：

$$Q_m = SEP \times F \times \tau \quad (1)$$

$$SEP_{max} = \frac{f_s m H_C}{1+4H/D} \quad (2)$$

$$SEP = (1-\xi)SEP_{max} + \xi SEP_{soot} \quad (3)$$

$$H = 42D\left(\frac{m}{\rho_a\sqrt{gD}}\right)^{0.61} \quad (4)$$

$$m = m_\infty[1-\exp(-k\beta D)] \quad (5)$$

$$\tau = 2.02[p_W(x-D/2)]^{-0.09} \quad (6)$$

$$p_W = p_W^0 \times R_H \quad (7)$$

$$\theta = \arcsin\left\{\frac{(4c^2+1)^{1/2}-1}{2c}\right\} \quad (8)$$

$$c = 0.666F_r^{0.333}Re^{0.117} \quad (9)$$

$$F_r = \frac{u_w^2}{gD} \qquad Re = \frac{u_w D}{\varepsilon} \quad (10)$$

式中：Qm——Mudan 模型模型目标所在位置的热辐射强度，W/m^2；

F——视角系数，具体计算可参见 TNO 黄皮书[4] 相关章节，保守值可取 1；

SEP——火焰表面热辐射能，W/m^2；

SEP_{max}——火焰最大表面热辐射能，W/m^2；

SEP_{soot}——烟粒表面辐射能，W/m^2，对于烃类如天然气和苯等经验值为 20×10^3；

ξ——火焰表面被烟粒覆盖比率，对于烃类如天然气的经验值为 80%；

f_s——热辐射系数，经验值为 0.1~0.4；

H——火焰高度，m；

H_c——燃烧热，J/kg；

D——液池直径，m；

ρ_a——空气密度，kg/m^3；

m——质量燃烧速率，$kg/(m^2\cdot s)$；

m_∞——最大质量燃烧速率，$kg/(m^2\cdot s)$。对于 LNG，m_∞=0.078；

k——火焰的吸收衰减系数，m–1；

β——平均光线长度校正系数。对于 LNG，kβ=1.1；

τ——大气热传递系数；

x——目标至火焰中心水平距离，m；

p_w——环境温度下空气中的水蒸气压力，N/m^2；

p^0_w——环境温度下的饱和水蒸汽压力，N/m^2；

R_H——相对湿度；

ε——空气的运动粘度，m^2/s；

θ——火焰倾角，°。

3 LNG 池火热辐射衡准

目前国际上有两种指标来评价LNG火灾的热辐射。一种是热辐射通量 kW/m^2，另一种是包括了热辐射通量和暴露时间的 mtdu。$mtdu=I^{4/3}t$，I 的单位为 kW/m^2，t 的单位为 s。

国际上对 LNG 火灾下人员以及钢结构可接受热辐射通量值的规定不尽相同[5]。对于钢结构建筑物和设备，可由目标所在位置的热辐射通量值进行衡准。对于人员来说，评判准则的热辐射通量是指自火源到目标所在位置的值，而不是人皮肤实际感受的热辐射通量。热辐射会导致皮肤升温，当人的皮肤达到 41~60℃之间，持续一定时间便会发生低温灼伤。我国为完善定量风险评价体系，全国安全生产标准化技术委员会立项制定，并由国家安全生产监督管理总局发布了《石油化工企业定量风险评估导则》[6]。中国船级社综合考虑国内外相关标准的相关规定，结合自身项目经验编写了《油气定量风险评估指南》，表 1 列出了上述指南对可接受热辐射值的规定。

表 1 热辐射衡准

指南名称	热辐射强度 kW/m^2	对设备的损坏	对人的伤害
石油化工企业定量风险评估导则	37.5	操作设备损坏	1%死亡（10s） 100%死亡（1min）
	25.0	在无火焰，长时间辐射下木材燃烧的最小能量	重大烧伤（10s） 100%死亡（1min）
	12.5	有火焰时，木材燃烧及塑料熔化的最低能量	1 度烧伤（10s） 1%死亡（1min）
	6.3	—	在 8s 内裸露皮肤有痛感；无热辐射屏蔽设施时，操作人员穿上防护服可停留 1min
	4.7	—	暴露 16s，裸露皮肤有痛感；无热辐射屏蔽设施时，操作人员穿上防护服可停留几分钟
	1.58	—	长时间暴露无不适感
油气定量风险评估指南	5.0		不少于 10% 的皮肤暴露于火中 30 秒的情况下，则至少 10 人二等烧伤。
	5.0		不少于 10% 的皮肤暴露于火中 30 秒的情况下，建筑物中至少一人二等烧伤。
	32	持续燃烧期间，暴露于火中的钢结构强度损失（承载能力显著降低）。	

上述导则及指南在编制过程中考虑了国外其他国家或机构对定量风险评价技术的规定和国内化工企业及水上 LNG 应用过程中的现实性，综合适应性更强。相对于设备，人员对热辐射的耐受性低很多，从避免人员热辐射死亡的角度基于热辐射定量计算进行趸船人员起居和工作舱室布置，可以更加充分的保证 LNG 趸船应用过程中的人命安全。按《石油化工企业定量风险评估导则》，避免人员死亡的热辐射值为 4.7–6.3kW/m^2。按《油气定量风险评估指南》，避免人员死亡的热辐射限制为 5kW/m^2。中国船级社编制的指南不但适用于陆上油气站场，还适用于水上船舶、海上油气生产设施的后果定量计算。综上，本文采用 5kW/m^2 作为可接受热辐射强度进行火灾危害距离分析。

4 趸船火灾危险距离分析及甲板布置

200m^3LNG 加注趸船“湘能源一号”的结构布置为单底双舷、单甲板全钢质焊接结构，船底、甲板、舷侧结构形式为纵骨架式。船体材料用 CCSA 级钢。该船主甲板以下设 6 道水密横舱壁，3 道纵舱壁。主甲板临岸面设置钢引桥连接装置，临江面设置活动登船梯，临江面设置带缆桩，前后设置锚泊系固，用于趸船连接固定，并在甲板上设相应的标准排放接头。主甲板 FR.12–FR.54 为气罐区，其上设两个真空绝热 C 型独立储罐，每个储罐容积为 100m^3；FR.54–FR.92 为货油及隔离区；FR.92–FR.117 为甲板室，包括货控室、人员休息室、配电间、值班室及其他相关功能性起居处所。

就 LNG 系统而言，趸船 LNG 储罐可由岸上 LNG 槽车补给，也可由水上移动 LNG 加注船进行补给。LNG 加注系统的输送泵、阀件、传感器、仪表等均布置在液货舱接头处所内，液货舱接头处所布置在前述气罐区域内，由不锈钢材料制造。在临江面设置一台软管吊，用于吊装 LNG 加注软管和接头。FR.23 以及 FR.47 临江侧分别设置补给管路接口和加注管路接口，用以为该船货罐补给 LNG 以及由该船为燃料动力船舶加注 LNG。

该船按中国船级社《液化天然气燃料加注趸船入级与建造规范》的要求设计建造。如前所述，LNG 系统相关仪表、阀件均设置在液货舱接头处所内。按规范要求，液货舱接头处所为气密性结构，由耐低温材料制造，能安全容纳相关仪表、阀件泄漏的 LNG。液货舱接头处所设有满足规范要求的通风、监测、报警系统，可不考虑该处所内的火灾场景。由上，加注及补给接口为该船的主要泄漏源，故在补给管路接口和加注管路接口下分别设置尺寸为 950 × 1250mm 和 800 × 700mm 的集液盘，

以承接补给、加注过程中可能泄露的 LNG。

如前所述，加注过程中泄露的 LNG 承接在集液盘中，一旦被引燃，则形成液池大小为集液盘尺寸的池火。本文偏保守的采用集液盘对角线长度作为液池等效直径进行计算，即补给接口处液池直径取 1570mm，加注接口处液池直径取 1060mm。该船布置在长沙地区，根据文献 [7] 中的气象数据，下文计算过程中实体火焰模型采用的风速为 2.5m/s。

按本文所述实体火焰模型进行计算，计算结果见表 2。

表 2 火灾热辐射计算结果

计算对象	火焰表面平均热辐射值（W/m^2）	危险距离（m）
补给口处池火	1.08×10^5	8.75
加注口处池火	9.92×10^4	6.15

实体火焰模型考虑的风速为 2.5m/s，大气温度取 15℃，大气湿度 0.7，环境空气密度 1.224kg/m^3。由此，对于补给口处池火，计算得到的火焰长度为 5.29m，火焰水平方向投影长度为 4.26m；对于加注口处池火，计算得到的火焰长度为 3.92m，火焰水平方向投影长度为 3.21m。本文偏保守的假定甲板室位于液池下风向。

由前所述，该船为油气合一 LNG 加注趸船，为减少火灾热辐射伤害对人员的潜在伤害，在 LNG 储罐区域与甲板室间设置隔离舱及货油舱，使得补给口集液盘与甲板室端壁间的距离为 34.5m，加注口集液盘与甲板室端壁间的距离为 22.5m，确保甲板室区域远离火灾热辐射伤害范围。

5 结论

（1）水上 LNG 加注趸船甲板布置过程中，甲板室应远离潜在泄露源。使用 5kW/m^2 作为热辐射可接受衡准可有效保证人命安全。

（2）Mudan 实体火焰模型除了考虑池火焰表面的有效热辐射通量和被辐射目标物与池火焰间的视角关系，还考虑了大气透射系数的影响。对于含有大量黑烟的碳氢化合物池火焰，其表面的热辐射通量计算还考虑了黑体辐射强度、消光系数及烟尘辐射强度。建议使用该模型进行火灾热辐射分析计算。

（3）火灾模型计算过程中应尽可能考虑评估对象所在位置的环境条件，通过偏保守的计算分析火灾热辐射伤害范围。

（4）实体火灾模型无法考虑障碍物如水幕、隔热挡板等对热辐射的影响。如要精确分析不同隔热措施对火灾热辐射的影响，建议使用基于计算流体力学的火灾后果分析方法进行计算。

参考文献：

[1] Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, David A. Wood.《Handbook of liquefied natural gas》[M]. Gulf Professional Publishing, 2014.

[2] Mcconnell C D. Liquefied natural gas safety research[R]. Washington: United States Department of Energy, 2012.

[3] 中国船级社 .《油气定量风险评估指南》[M]. 北京 : 人民交通出版社 , 2020.

[4] TNO Institute of Environmental Sciences.《Methods for the Calculation of Physical Effects》[M]. Hague: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2005.

[5] 范洪军 , 张晖 , 徐建勇 . LNG 加注趸船的池火危险距离分析 [J]. 中国造船 , 2013, 207(4): 186-195.

[6] AQ/T 3046: 2013. 化工企业定量风险评估导则 [S]. 北京 : 国家安全生产监督管理总局 , 2013.

[7] 江艳 , 王金华 . 2014-2018 年长沙市风的分布特征及有效防御 [J]. 农村实用技术 , 2020,5: 152.