

# LNG接收站BOG产生与处理过程 风险评价及应用

汪侃 岳修维

上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海 201306

**摘要:**液化天然气(Liquefied Natural Gas,LNG)的闪蒸气(Boiled Off Gas,BOG)产生与处理过程关乎LNG接收站能否长期运行的安全性和稳定性,一旦该过程发生事故将造成不可想象的灾难性事故。研究旨在针对LNG接收站BOG产生与处理过程中存在的危险因素开展危险源辨识,通过实地调研与事故经验相结合的方法,对LNG接收站BOG产生与处理过程危险源进行评价单元划分,运用道化学火灾爆炸危险指数评价法进行安全风险评价。研究结果表明,LNG接收站BOG产生与处理过程中火灾爆炸危险等级多为高和非常高等级,若通过安全和管理措施的补偿,各单元的火灾爆炸危险等级均能有效降低至中等及以下。LNG接收站BOG产生与处理过程中各单元的危险度可以通过增加针对性的安全措施和新型管理方法予以控制,同时合理分配安全措施和科学安排管理亦能对LNG接收站BOG产生与处理过程进行有效风险管控,降低LNG接收站BOG事故发生概率,保障LNG接收站安全运行。

**关键词:**LNG接收站;BOG;道化学;风险管控;火灾爆炸危险指数

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.06.019

## Accidental Risk Assessment and Application of LNG Terminal BOG Process

Wang Kan, Yue Xiuwei

College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai, 201306, China

**Abstract:** The formation and handling process of LNG BOG is crucial to the safety and stability of LNG terminal in the long-term operation. If an accident happened during the above-mentioned process, the consequence can be catastrophic. This paper aims to carry out hazard identification for the risk factors in the BOG formation and processing in LNG terminal. Through the combination of on-site investigation and lessons learnt on previous incidents, the risk sources of LNG BOG formation and processing are divided into assessment groups, and the safety risk assessment is undertaken using the Dow's Fire and Explosion Index risk assessment method. The results show that the fire and explosion risk level of LNG BOG formation and handling is mostly high and very high. If the design safety and procedure management mitigation measures are adopted, the fire and explosion risk level of each risk group can be effectively reduced to medium and lower level. The results show that the risk of each risk group in the BOG formation and processing of LNG terminal can be lowered by more specific and targeted safety measures and applicable procedure

收稿日期:2020-06-11

基金项目:上海市“科技创新行动计划”软科学重点项目(20692193100)

作者简介:汪侃(1986-),男,浙江嘉兴人,硕士生导师,博士,主要从事港口天然气储运安全研究。E-mail:wangk@shmtu.

edu.cn

management methods, and optimum application of safety measures and scientific management can also reduce the risk of BOG formation and processing in LNG terminal so as to reduce the occurrence of BOG incidents in LNG terminal and ensure the safety for LNG terminal.

**Keywords:** LNG terminal; BOG; Dow Chemical; Risk management and control; F & EI

## 0 前言

LNG 液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 接收站运行过程中, LNG 与外界产生热交换受热而形成闪蒸气 (Boil Off Gas, BOG) [1-2]。LNG 接收站 BOG 处理工艺包括直接压缩和再冷凝两种方式 [3]。直接压缩工艺适用于输气范围较近的调峰型站点和气源型站点, 再冷凝工艺则是通过压缩机把 BOG 加压运输到再冷凝器, 采用低温 LNG 使 BOG 冷凝, 再经高压泵加压进入气化器气化后送入外输管网。在 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程中极易引起全流程系统出现超压, 以及设备和管网泄漏, 现场作业人员处于高浓度 BOG 区域会引发窒息事故, 同时可能诱发火灾爆炸事故 [4-6]。基于此, 在 LNG 接收站设计和运行前期考虑 BOG 产生与处理过程事故风险因素与应急处置方案极有必要。2002 年, Gerald E W I 等人 [7] 基于再冷凝工艺将 BOG 加压至一定压力与 LNG 冷凝, 再经过气化器气化, 最终达到节能目的。Nanda R [8] 将冷凝器隔板改造成相互垂直的平行结构, 用以处理不同负荷的 BOG, 在 LNG 节能方面做出贡献。2007 年, 何茂全 [9] 提出 LNG 储运过程风险评价模型, 并对余姚 LNG 小型气化站接收和 BOG 产生与处理过程进行风险评价。陈雪等人 [10] 构建了 LNG 储罐内流体计算模型, 并对储罐 BOG 处理过程开展动态模拟研究。黎志昌 [11] 基于通用流程模拟方法对 LNG 船舶 BOG 流程开展模拟研究, 分析了 BOG 压缩机出口压力等工艺参数对全流程影响。付子航 [12-13] 提出的半经验 BOR 动态模型有效地预测 BOG 产生量。2012 年, 彭明等人 [14] 提出全容式 LNG 储罐总漏热量和日蒸发率的计算方法, 并对某 LNG 储罐保冷设计的 BOG 率予以估算。近年来, 针对 LNG 接收站 BOG 风险预测和措施, 各学者采用不同的科学方法和实验论证, 从不同角度对 LNG 接收站 BOG 风险和事故开展研究 [15-20], 其结论对本研究具有推动作用和参考价值。

当前, 中国 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程的安全管理标准随 LNG 产业安全标准从无到有的发展过程中逐步形成, BOG 产生与处理过程的安全管理更亟待成型和完善。本研究以某港区 LNG 接收站为例, 确定了 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程各项设备与系统的危险因素, 以及诱发灾害的事故致因。通过对该港区 LNG 接收站作业流程实地调研, 针对 BOG 产生与处理工艺流程中危险有害物质, 最终确定火灾、爆炸、窒息等主要危

险因素。结合危险有害因素的辨识与分析, 运用道化学火灾爆炸危险指数法进行量化风险评价, 提出 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程安全对策和预防措施。本研究为 LNG 接收站安全运行提供更科学的参考依据, 对 BOG 产生与处理过程安全管控具有现实意义。

## 1 LNG 接收站 BOG 产生和处理过程风险分析

### 1.1 某港区 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程概况

该港区接收站是某市天然气供应、调峰和应急的主要来源, 高峰期间供气量占全市用气量的 65%。该 LNG 接收站包括接收站陆域、码头和海底输气干线, 运营规模  $3.0 \times 10^6$  t/a。生产系统包括卸船系统、储存系统、BOG 产生与处理系统、输送系统、外输系统和计量系统 [21]。BOG 产生与处理过程是 LNG 接收站作业的重要部分, LNG 接收站对 BOG 处理直接影响 LNG 接收站的安全性。LNG 运输和储存过程中, 由于环境和设备的能量输入、LNG 压力和外界压力变化, 导致 LNG 在生产运输各工况中受热产生 BOG。在 LNG 船卸料作业时, 储罐内的 LNG 由于新 LNG 的注入产生体积变化, 进一步导致 BOG 形成速度增快。该港区 LNG 接收站在运行过程中对储罐内 BOG 的基本处理包括通过 BOG 压缩机再冷凝回收、排入火炬系统燃烧排放、直接输出, 利用 LNG 卸船过程中产生的 BOG 反输至 LNG 船上平衡船上储罐压力 [22] 等方式。其中, 利用 BOG 压缩机再冷凝器回收方式是对整个 LNG 接收站产生 BOG 进行回收和直接加压输出最常用的方法 [23]。然而, 日常运行中利用 BOG 对卸船时压力差进行平衡的方式在非卸船状态下无法处理, 同时受到气候和海况的影响。排空或燃烧法是一种终极安全措施, 为保证系统的运行安全, 任何工况下一旦系统受到快速产生 BOG 压力的威胁, 就会将超压 BOG 全部排空或燃烧处理, 以保证整个系统安全。该方式的不足之处在于会造成较大经济损失和环境污染, 同时处理过程存在一定安全隐患。

### 1.2 BOG 产生与处理过程危险因素辨识

根据 GB 18218 - 2018《危险化学品重大危险源辨识》和《危险化学品名录 (2019 版)》对 LNG 接收站 BOG 产生和处理过程以及回收处理系统进行危险和有害因素识别 [24]。LNG 接收站涉及的危险物质涵盖天然气 (液相和少量气相)、蒸发气体及在吹扫作业中使用的氮气, 见表 1。LNG 船停靠该港区码头后, 将运输的 LNG

输送至罐区储存,输出时结合该市供气要求,将罐区内一定量的 LNG 抽出后气化,向周边供气。上述全流程各环节中,LNG 均可能由于任何外界的热量交换而产生 BOG。LNG 需要在  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境中储存,一旦保温或制冷设备出现故障可能导致 LNG 受热沸腾,将因极大温差而快速吸热产生大量 BOG。此外,当 LNG 从产地运送到目标港区 LNG 码头储罐时,由于 LNG 不同产地和运输过程中的环境影响,会使 LNG 密度产生差异。在装罐前对罐内和 LNG 船上的 LNG 进行密度对比,根据密度差进行不同高度的注入。由于这种 LNG 混合时密度差异,导致两种不同密度的 LNG 混合时在短时间内产生大量 BOG,引起 LNG 储罐压力快速上升至安全阀泄压压力。LNG 储罐罐体和整套管网系统及各种设备等使用的金属、密封材料、管线的焊缝和法兰,在极低工作温度下,若材质选择、安装、焊接等技术细节出现误差,可能导致 LNG 储罐罐体和整套管网系统等设备构件损坏和泄漏。另外,事故风险也存在于 BOG 回收系统中。该港区 LNG 接收站 BOG 系统包括 BOG 往复式压缩机、再冷凝器和管网。其中,BOG 往复式压缩机加压后压力增大和其强

迫交变力运行,在长时间运转中容易因应力作用而产生故障,如连杆螺栓长期承受应力产生金属疲劳导致其运行过程中断裂。尽管该港区 LNG 接收站内有多台 BOG 往复式压缩机并联的冗余设计,但难以完全保障 BOG 往复式压缩机发生故障时,在短时间内应对 BOG 泄漏应急处理。特别是当 BOG 往复式压缩机在 LNG 船的卸料期间发生故障,将导致卸料系统产生超压,大量 BOG 只能排入火炬系统燃烧排放,这将破坏管线造成 LNG 泄漏和更大事故的发生。再冷凝器中 BOG 和过冷 LNG 存在气相和液相两种不同状态,通过在再冷凝器中混合过冷 LNG 吸收 BOG 热量实现再液化。再冷凝器中 LNG 液位会随 LNG 外输量的变化而时刻波动,同时在 LNG 接收站不同工况下 BOG 产生量也存在较大差别,使再冷凝器压力极不稳定,存在事故隐患。蒸发气需通过再冷凝器中过冷 LNG 进行压缩和液化,在 LNG 船卸料过程中,BOG 产生速度急剧变化,大量突然产生的 BOG 无法回收,只能通过排入火炬燃烧而保护卸船管线。与此同时,再冷凝器的液位常不稳定,也将导致泵气蚀和设备振动,给再冷凝器的运行带来事故风险。

表 1 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程危险因素辨识表

Tab.1 Hazards identification of BOG formation and processing in LNG terminal

名称	危险、危害特性	火灾危险类别	闪点 / $^{\circ}\text{C}$	爆炸极限 / (%)	职业危害程度分级	备注
LNG	易燃、易爆、低温	甲 A	-218	6~13	IV	原料
BOG	易燃、易爆、低温、窒息	甲	-218	5~14	IV	衍生物
天然气	易燃、易爆、窒息	甲	-218	5~14	IV	产品
氮气	窒息	—	—	—	IV	吹扫剂

## 2 BOG 产生与处理过程安全评价

### 2.1 F & EI 事故危险等级分析

道化学火灾爆炸危险指数 (Fire and Explosion Index, F & EI) 评价法基于事故统计资料、物质潜在能量和当前安全措施<sup>[25]</sup>,量化潜在火灾、爆炸和反应危险性事故的预期损失,以确定可能发生事故的设施和设备。该评价法的基本参数表达式如下:

$$F \& EI = MF \times F_3 \quad (1)$$

$$F_3 = F_1 \times F_2 \quad (2)$$

表 2 火灾爆炸危险指数单元划分表

Tab.2 F & EI group partition

单元名称	物质系数 $MF$	物质健康危害系数 $N_H$	易燃性 $N_F$	不稳定性 $N_R$	备注
LNG 接收单元	21	1.0	4.0	0	卸料臂、输送管网
LNG 储存单元	21	1.0	4.0	0	LNG 储罐、BOG 收集管网、罐内泵
BOG 处理单元	21	1.0	4.0	0	BOG 压缩机、再冷凝器、高压输出泵、火炬

式中: $MF$  为单元中重要物质的物质系数; $F_1$  为一般工艺危险性系数; $F_2$  为特殊工艺危险性系数; $F_3$  为单元工艺危险系数。

单元重要物质的物质系数  $MF$  由物质易燃性  $N_F$  和物质不稳定性  $N_R$  共同决定,表示相关物质发生化学反应所造成的火灾爆炸中所产生的能量。LNG 接收站 BOG 产生与处理过程单元的主要危险物质为 LNG,物质系数  $MF$  为 21,物质健康危害系数  $N_H$  为 1.0,易燃性  $N_F$  为 4.0,不稳定性  $N_R$  为 0,见表 2。

根据某港区 LNG 接收站安全管理部提供的年度检测数据确定一般工艺危险性系数,见表 3。涉及事故损害程度的基础系数为 1.0。由于卸料臂、储罐、BOG 压缩机、再冷凝器和高压输出泵等工艺环节均无化学反应,故放热化学反应系数为 0,火炬系统能够紧急处理多余的 LNG 接收站 BOG,由于作为紧急处理方式应对突发情况,年度使用率较少,故该环节的放热化学反应系数为

0.3。由于卸料臂、储罐、压缩机、火炬和高压输出泵等环节均无吸热反应,因此吸热反应系数为 0。BOG 通过压缩机加压后进入再冷凝器,再冷凝器是连接气相流程与液相流程的核心设备,该港区 LNG 接收站内的年使用率较高,故该环节的吸热反应系数为 0.5。由于所有 II 类压缩易燃气体和液化易燃气体的物料在连接或未连接的管线上装卸,故物质处理和运输系数为 0.5。

表 3 某港区 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程一般工艺危险系数表

Tab.3 General process hazard coefficient of BOG formation and processing in LNG terminal

一般工艺危险	各工艺环节的一般工艺危险系数 $F_1$					
	卸料臂	储罐	BOG 压缩机	再冷凝器	火炬	高压输出泵
基础系数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
放热化学反应	0	0	0	0	0.3	0
吸热反应	0	0	0	0.5	0	0
物质处理和运输	0.5	0	0.5	0.5	0.3	0.5
排放泄漏控制与积聚	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
通道	0	0	0	0	0	0
封闭或室内单元	0	0	0	0	0	0
合计	2.0	1.5	2.0	2.5	2.1	2.0

该港区 LNG 接收站内特殊工艺危险系数的基础系数为 1.0,其余内容涉及毒性物质等,见表 4。毒性物质项系数为  $0.2N_H$ ,故对于火炬环节产生的混合毒性物质系数为 0.2。压力释放系数用于操作压力高于大气压时,由于高压可能会引起高速率的泄漏场合,卸料臂、储罐和高压输出泵存在较高操作压力,故各环节的压力释放系数最大值为 0.8。低温系数取值主要考虑碳钢或其他金属在其展延或脆化转变温度以下时可能存在的脆

性问题,除火炬环节外均存在该问题,其中储罐工艺环节的低温系数最高为 0.5。本研究所涉及的储罐、BOG 压缩机和再冷凝器均考虑外部腐蚀速率和内部腐蚀速率,腐蚀与磨蚀系数为 0.1。LNG 接收站中明火设备(火炬)的存在额外增加了引燃的可能性,涉及物质泄漏温度高于闪点,故泄漏系数为 0.1。根据该港区 LNG 接收站 BOG 压缩机、再冷凝器型号和功率,转动设备系数为 0.5。

表 4 某港区 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程的特殊工艺危险系数表

Tab.4 Special process hazard coefficient of BOG formation and processing in LNG terminal

特殊工艺危险	各工艺环节的特殊工艺危险系数 $F_2$					
	卸料臂	储罐	BOG 压缩机	再冷凝器	火炬	高压输出泵
基础系数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
毒性物质	0	0	0	0	0.2	0
负压操作	0	0	0	0	0	0
罐装易燃液体	0	0.5	0	0.5	0	0
过程失常或吹扫故障	0.3	0	0.3	0	0	0
粉尘爆炸	0	0	0	0	0	0
压力释放	0.8	0.8	0.5	0	0	0.8
低温	0.2	0.5	0.2	0.2	0	0.2
易燃及不稳定物质的能量	1.0	0.8	1.0	0.8	1.0	1.0
腐蚀与磨蚀	0	0.1	0.1	0.1	0	0.1
泄漏(接头和填料)	0.1	0.3	0.1	0.1	0	0.1
使用明火设备	0	0	0	0	1.0	0
热油交换系统	0	0	0	0	0	0
转动设备	0	0	0.5	0.5	0	0.5
合计	3.4	4.0	3.7	3.35	3.2	3.7



根据式(1)~(2)可知,对该 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程内三种物质的单元工艺危险系数及火灾爆炸危险指数进行计算,计算结果见表 5。对应 F & EI 危险等级分类可知,LNG 接收站 BOG 产生与处理过程各环节所涉及的系统、装置和设备现存的危险等级基本都处于“高”风险及以上,为此需要对其施加具有针对性的安全措施,进行安全补偿以降低各流程的事故风险。安全补偿首先确定安全措施补偿系数  $C$ ,即对所采取的管控措施在减少事故方面的评定,包括工艺控制、物质隔离、防火措施等取值项。

$$C = C_1 \times C_2 \times C_3 \quad (3)$$

$$C_1 = \prod_{i=1}^n C_{1i} \quad (4)$$

$$C_2 = \prod_{j=1}^n C_{2j} \quad (5)$$

$$C_3 = \prod_{k=1}^n C_{3k} \quad (6)$$

式中: $C_1$ 为工艺控制安全补偿系数; $C_2$ 为物质隔离安全补偿系数; $C_3$ 为防火设施安全补偿系数; $C_{1i}$ 为第  $i$  种工艺控制安全补偿系数; $C_{2j}$ 为第  $j$  种物质隔离安全补偿系数; $C_{3k}$ 为第  $k$  种防火设施安全修正系数。

LNG 接收站 BOG 产生与处理过程各环节配备了应急电源,工艺控制安全补偿系数为 0.98。同时,港区设置紧急停车装置,用以出现异常时能紧急停车并转换到备用系统,工艺控制安全补偿系数为 0.97。消防控制采

表 5 某港区各单元工艺危险系数与火灾爆炸危险指数表

Tab.5 Process hazard coefficient and F &amp; EI in each group of LNG terminal

物质名称	各单元工艺危险系数 $F_3$	火灾爆炸危险指数 F & EI	危险等级
卸料臂	6.800	142.80	高
储罐	6.000	126.00	中等
BOG 压缩机	7.400	155.40	高
再冷凝器	8.375	175.88	非常大
火炬	6.720	141.12	高
高压输出泵	7.400	155.40	高

用 PLC 系统,设置在线计算机以辅助操作者,不直接控制关键设备,工艺控制安全系数为 0.93。卸料臂环节设置了氮气保护装置,工艺控制安全补偿系数为 0.95。接收站制定有安全管理制度,包括防火防爆安全规定、生产区安全管理制度、气化站安全管理制度、气化站巡回检查制度、交接班管理制度和安全保卫制度,同时制定了 LNG 接收站设备操作安全规程、接收站应急预案等操作指南和规程,满足相关安全要求,工艺控制安全补偿系数为 0.95。卸料臂和储罐等单元定期有化学活性物质专项检查,工艺控制安全补偿系数为 0.92。综上,利用式(4)可确定 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程工艺控制安全补偿系数,见表 6。

表 6 某港区 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程工艺控制安全补偿系数表

Tab.6 Process compensation coefficient of BOG formation and processing in LNG terminal

工艺控制项目	系数范围	各工艺环节的工艺控制安全补偿系数 $C_1$					
		卸料臂	储罐	BOG 压缩机	再冷凝器	火炬	高压输出泵
应急电源	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
冷却	未涉及此项	0	0	0	0	0	0
抑爆	未涉及此项	0	0	0	0	0	0
紧急切断装置	0.96~0.99	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
计算机控制	0.93~0.99	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
惰性气体保护	0.94~0.96	0.95	0	0	0	0	0
操作指南和规程	0.91~0.99	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
化学活泼性物质检查	0.91~0.98	0.92	0.92	0.92	0.92	0	0.92
其他工艺过程危险分析	0.91~0.98	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
合计	—	0.704	0.741	0.742	0.742	0.806	0.741

该港区 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程中采用了远程控制系统,对整个流程和各装置进行操控,以保证安全,物质隔离安全补偿系数取值范围为 0.96~0.98,见表 7。LNG 接收站内的备用卸料装置通过储罐等装置的 LNG 在紧急情况下可排放至备用罐体中,物质隔离安

全补偿系数为 0.98。火炬装置设置了排空系统,可有效提高物质隔离安全补偿系数至 0.97。安装联锁装置以避免出现错误的 LNG 流向及由此引发的不必要反应,物质隔离安全系数为 0.98。

表 7 某港区 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程物质隔离安全补偿系数表

Tab. 7 Material isolation compensation coefficient of BOG formation and processing in LNG terminal

物质隔离项目	系数范围	各工艺环节的物质隔离安全补偿系数 $C_2$					
		卸料臂	储罐	BOG 压缩机	再冷凝器	火炬	高压输出泵
遥控阀	0.96 ~ 0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0	0.98
卸料 / 排空装置	0.96 ~ 0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
排放系统	0.91 ~ 0.97	0	0	0	0	0.97	-
联锁装置	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
合计	—	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.94

防火设施主要包括危险物质泄漏检测装置、钢结构、消防供水系统、洒水灭火系统、手提式灭火器材和电缆防护,见表 8。其中,该接收站内安装了可燃气体泄漏检测系统,同时现场安全管理人员配备手持式气体检测仪,确保报警和确定危险范围,故其防火措施安全补偿系数为 0.98。装置和设备的外表面材料采用防火涂层,承重钢结

构均涂覆且厚度达到 5 m,其防火措施安全补偿系数为 0.98。现场消防供水表压略低于 0.7 MPa,其防火措施安全补偿系数为 0.97。LNG 接收站现场区域均配备与火灾相适应的手提式灭火器,其防火措施安全补偿系数为 0.98。仪表和电缆支架设置了防火金属保护罩,预埋在地下电缆沟内,其防火措施安全补偿系数为 0.96。

表 8 某港区 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程防火措施安全补偿系数表

Tab. 8 Fire prevention compensation coefficient of BOG formation and processing in LNG terminal

防火措施	系数范围	各工艺环节的防火措施安全补偿系数 $C_3$					
		卸料臂	储罐	BOG 压缩机	再冷凝器	火炬	高压输出泵
泄漏检测装置	0.94 ~ 0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
钢结构	0.95 ~ 0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
消防供水系统	0.94 ~ 0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
洒水灭火系统	0.74 ~ 0.97	0	0.97	0	0	0	0
手提式灭火器材	0.93 ~ 0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0	0.98
电缆防护	0.94 ~ 0.98	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
合计	—	0.87	0.85	0.87	0.87	0.89	0.87

## 2.2 F & EI 事故风险评价结果

单元损害系数方程式主要是针对 9 种不同的物质系数(1、4、10、14、16、21、24、29 和 40)所涉及不同的方程式。本研究中的 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程所涉及危害物质为 LNG,物质系数为 21,故与不同的单元危害系数(1~8)对应的损害系数关系式见式(7)。

$$Y = 0.340314 + 0.076531(F_3) + 0.003912(F_3)^2 - 0.000073(F_3)^3 \quad (7)$$

式中:Y 为损害系数; $F_3$  为单元工艺危险系数。

LNG 接收站 BOG 产生与处理过程危险度评价和补偿后危险度评价对比见表 9。在进行安全措施补偿前卸料臂单元处在“高”危险等级,卸料臂存在发生断裂的可能性,易造成 LNG 泄漏形成局部可燃气体聚集。在增加新的安全措施和预防管理方法后危险等级变为“较轻”,较好降低了该单元事故风险。BOG 压缩机处于超压工况下,若热辐射增大或装卸作业过程中 BOG 产生量显著增多,此时该工艺环节处于超压的“高”危险等级,而通

过施加合理的安全措施和制定安全管理制度可有效地将工艺环节危险等级控制在“较轻”。LNG 接收站储罐在补偿前存在罐体老化破损引发的泄漏等事故,属于“中等”危险等级,采取针对性安全防护、监控和日常维护管理后,危险等级转为“较轻”。再冷凝器由于调节性能的原因产生瞬时运行不稳定,其波动将造成压缩机带液进气,LNG 液滴通过 BOG 总管进入压缩机后将导致恶性事故。在采取安全补偿措施前属于危险性“非常大”的工艺环节,通过本研究提出的安全措施加以防控后,危害等级下降至“中等”。火炬放空管道在 BOG 主线上抽出来至火炬,LNG 罐压力继续上升,火炬控制阀打开,直接对 BOG 压缩机入口,易产生回火,故该工艺环节属于“高”危险等级,而在采取相应安全措施后危险等级转为“较轻”,对人员和设备威胁降到“安全”。高压输出泵出口压力表存在损坏隐患,无法实时监控时将造成高压泄漏,属于“高”危险等级,而在施加改进安全措施后,其危害等级转为“较轻”。

表9 LNG接收站BOG产生与处理过程的风险评价结果表

Tab. 9 Risk assessment results of BOG formation and processing in LNG terminal

工艺环节	单元工 艺危险 系数 $F_3$	火灾爆炸 危险指数 $F & EI$	损害 系数 $Y$	暴露 半径 $R/m$	暴露 面积 $S/m^2$	安全措施 总补偿 系数 $C$	补偿后的 火灾爆炸 危险指数	补偿后暴 露半径 $R/m$	补偿后暴 露面积 $S/m^2$	补偿前火 灾爆炸危 险等级	补偿后火 灾爆炸危 险等级
卸料臂	6.80	142.80	1.018 662	36.56	4 199.15	0.58	82.80	21.19	1 410.63	高	较轻
储罐	6.00	126.00	0.924 564	32.26	3 269.47	0.59	74.30	19.02	1 136.50	中等	较轻
BOG压缩机	7.40	155.40	1.091 283	39.78	4 971.40	0.59	91.60	23.45	1 727.57	高	较轻
再冷凝器	8.38	175.88	1.213 403	45.03	6 366.93	0.60	105.59	27.03	2 294.52	非常大	中等
火炬	6.72	141.12	1.009 109	36.13	4 099.02	0.67	94.14	24.10	1 800.72	高	较轻
高压输出泵	7.40	155.40	1.091 283	39.78	4 971.40	0.61	94.80	24.27	1 850.50	高	较轻

### 3 结论

本文以某港区 LNG 接收站为例,围绕其 BOG 系统进行过程安全分析和事故风险评价,研究得到以下结论。

1) 应对 BOG 产生量大幅波动的处置能力决定着 LNG 接收站运行的稳定性,影响 LNG 接收站 BOG 产生的原因包括热量交换、压力变化、LNG 组分及初始充满率,结合站内现场工况,针对性地改进能够有效减少 BOG 产生量,增强 LNG 接受站全系统的安全性。

2) 针对 LNG 接收站 BOG 产生与处理过程开展风险评价发现,卸料臂环节 BOG 压缩机环节的  $F & EI$  分别为 142.8 和 155.4,属于“高”危险等级,再冷凝器环节的  $F & EI$  为 175.98,属于“非常大”危险等级。风险评价结果表明,LNG 接收站 BOG 产生和回收过程中固有火灾、爆炸危险性大,通过安全措施补偿后各高危工艺环节的等级均有效控制在“中等”及以下,说明合理的安全措施选择和日常监察到位保障,LNG 接收站 BOG 产生与处理过程事故风险程度能被相应管控。

3) LNG 船卸货过程中,由于 BOG 产生量急剧波动,极易造成卸料管线震动,产生 LNG 管线的金属疲劳、损伤等隐患。同时 BOG 产生与处理过程中再冷凝器液位不稳定,易诱发泵气蚀和设备振动,致使 BOG 系统运行存在事故风险,当前针对此方面的安全监测方法尚存不足。

#### 参考文献:

- [1] 周姿潼. LNG 接收站 BOG 处理工艺流程模拟与优化研究 [D]. 成都:西南石油大学,2014.  
Zhou Zitong. Research on Simulation and Optimization of BOG Treatment Process in LNG Terminal [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [2] 何守慧. 液化天然气港口转储系统泄漏逸散机理与演变研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2014.

- He Shouhui. Research on the Leakage Diffusion Mechanism and Evolution of LNG Port Transport and Storage System [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [3] 王小尚,刘景俊,李玉星,等. LNG 接收站 BOG 处理工艺优化:以青岛 LNG 接收站为例 [J]. 天然气工业,2014,34 (4):125-130.  
Wang Xiaoshang, Liu Jingjun, Li Yuxing, et al. A Case Study of Processing and Optimization of BOG Gas Treatment in an LNG Terminal in Qingdao [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34 (4): 125-130.
- [4] Wang Kan, He Yuru, Liu Zhenyi, et al. Experimental Study on Optimization Models for Evaluation of Fireball Characteristics and Thermal Hazards Induced by LNG Vapor Cloud Explosions Based on Colorimetric Thermometry [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 366: 282-292.
- [5] Wang Kan, Liu Zhenyi, Qian Xinming, et al. Long-term Consequence and Vulnerability Assessment of Thermal Radiation Hazard from LNG Explosive Fireball in Open Space Based on Full-Scale Experiment and PHAST [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 46: 13-22.
- [6] 杨凯. 城市燃气管道泄漏多因素耦合致灾机理与灾害控制研究 [D]. 北京:首都经济贸易大学,2016.  
Yang Kai. Study on the Multi Factor Coupling Disaster Mechanism and Disaster Control of Urban Gas Pipeline Leakage [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2016.
- [7] Gerald E W I, Engdahl. System and Apparatus for Condensing Boil-Off Vapor from a Liquefied Natural Gas Container: US 6470706 B1 [P]. 2002-10-29.
- [8] Nanda R. Boil Off Gas Condenser: US2007/0214831 A1 [P]. 2007-02-03.
- [9] 何茂全. 液化天然气储运系统风险评价 [D]. 上海:同济大学,2007.  
He Maoquan. The Risk Evaluation of Transportation and Storage on Liquefied Natural Gas [D]. Shanghai: Tongji

- University, 2007.
- [10] 陈雪, 马国光. 流程参数对 LNG 接收终端蒸发气再冷凝工艺流程性能的影响[J]. 石油与天然气化工, 2008, 37(2): 100-104.  
Chen Xue, Ma Guoguang. Influence of Parameters on Recondensation Process Performance of LNG Receiving Terminal [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2008, 37(2): 100-104.
- [11] 黎志昌. LNG 船 BOG 再液化工艺流程模拟与优化的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
Li Zhichang. Research into Process Flows Simulation and Optimization of LNG Reliquefaction [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [12] 付子航. LNG 接收站蒸发气处理系统静态设计计算模型[J]. 天然气工业, 2011, 31(1): 83-85.  
Fu Zihang. A Static-Design Calculation Model of Boil-Off Gas (BOG) Handling System of an LNG Receiving Terminal [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(1): 83-85.
- [13] 付子航. LNG 接收站蒸发气处理系统的动态设计计算模型[J]. 天然气工业, 2011, 31(6): 85-88.  
Fu Zihang. Dynamic Boil-Off Rate (BOR) Modeling of LNG Receiving and Re-Gasification Terminals [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(6): 85-88.
- [14] 彭明, 丁乙. 全容式 LNG 储罐绝热性能及保冷系统研究[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 94-97.  
Peng Ming, Ding Yi. Thermal Insulation Performance and Cold Insulation System of Full Containment LNG Storage Tanks [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3): 94-97.
- [15] 李彦波. LNG 接收站 BOG 直接外输可行性分析[J]. 石油与天然气化工, 2019, 48(6): 39-43.  
Li Yanbo. Feasibility Analysis of Direct External Transportation of BOG from LNG Receiving Station [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48(6): 39-43.
- [16] 王文凯, 李兆慈, 盖晓峰, 等. LNG 接收站 BOG 再冷凝系统操作参数优化[J]. 天然气与石油, 2015, 33(2): 46-52.  
Wang Wenkai, Li Zhaoqi, Gai Xiaofeng, et al. Optimization of BOG Recondensation Process at LNG Receiving Terminals [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(2): 46-52.
- [17] 王海, 王志会, 赵思琦. 风险管理在大型 LNG 接收站项目中的应用[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2020, 45(1): 61-65.  
Wang Hai, Wang Zhihui, Zhao Siqi. Project Risk Management in Large Scale LNG Terminal [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2020, 45(1): 61-65.
- [18] 张弛, 潘振, 商丽艳, 等. LNG 接收站 BOG 处理工艺优化及能耗分析[J]. 油气储运, 2017, 36(4): 421-425.  
Zhang Chi, Pan Zhen, Shang Liyan, et al. Optimization and Energy Consumption Analysis on the BOG Treatment Technology in LNG Receiving Station [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(4): 421-425.
- [19] 王金孝, 王修康. LNG 接收站 BOG 产生因素及预防措施[J]. 云南化工, 2019, 46(1): 119-120.  
Wang Jinxiao, Wang Xiukang. Discussion on the Factors and Preventive Measures of BOG in LNG Receiving Station [J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(1): 119-120.
- [20] 刘景俊, 李学涛, 尹悦, 等. 青岛 LNG 接收站 BOG 处理优化模拟研究[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2019, 44(6): 86-92.  
Liu Jingjun, Li Xuetao, Yin Yue, et al. Optimization Simulation of BOG Processing in Qingdao LNG Terminal [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2019, 44(6): 86-92.
- [21] 王立国. LNG 接收站工艺技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.  
Wang Liguang. Research on the Technology of LNG Receiving Terminal [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [22] 刘浩, 金国强. LNG 接收站 BOG 气体处理工艺[J]. 化工设计, 2006, 16(1): 13-16.  
Liu Hao, Jin Guoqiang. Process Comparison and Energy Saving Analysis of BOG Gas Treatment of LNG Receiving Terminal [J]. Chemical Engineering Design, 2006, 16(1): 13-16.
- [23] 李宁. 液化天然气接收站 BOG 的处理方法及分析[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2020, 45(1): 57-60.  
Li Ning. Processing Method and Analysis Of BOG in LNG Terminal [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2020, 45(1): 57-60.
- [24] 王慧, 王保民. 危险化学品重大危险源辨识标准的探讨[J]. 安全、健康和环境, 2013, 13(2): 40-46.  
Wang Hui, Wang Baoming. Discussion on the Standard of Major Hazard Identification for Dangerous Chemicals [J]. Safety Health & Environment, 2013, 13(2): 40-46.
- [25] 刘隆, 孟波, 王雷, 等. 道化学安全评价法在 LNG 储罐安全评价中的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(9): 192-196.  
Liu Long, Meng Bo, Wang Lei, et al. Study on Application of Dow Chemical Fire and Explosion Index Method in Safety Evaluation of LNG Tank [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(9): 192-196.