

探讨 LNG 接收站首船接卸储罐预冷速率下降解决措施

温庆城（中海油江苏天然气有限责任公司，江苏 盐城 224000）

摘要：随着能源市场的变化，未来 LNG 行业将稳序向上发展。随着地理位置及能源供给的优化配置，接收站目前以储罐群及储备基地的模式进行建设，其相应的部分系统管道管径加大。以上原因造成 LNG 接收站在进行首船接卸时，由于卸料管道管径的加大，LNG 储罐预冷速率下降，文章针对以上问题对以往接收站的处理方法进行分析，提出解决的建议。

关键词：LNG 储罐；预冷；管道填充；排放

1 LNG 接收站工艺和首船 LNG 储罐预冷介绍

1.1 LNG 接收站工艺

LNG 接收站工艺分为 5 个部分，分别为码头区域（包括海水取水口）、储罐（包括火炬）区域、工艺（包括低压压缩机系统、再冷凝器系统、高压泵、气化外输设备、燃料气加热器）区域、公用工程区域、槽车区域。工艺分为了三大系统：LNG 船舶接卸系统、BOG 处理系统、外输（包括气态及液态）系统。LNG 船舶接卸系统为：LNG 船舶靠泊接收站码头，通过船内卸货泵将 LNG 加压经卸料臂、卸料管道输送至 LNG 储罐内。BOG 处理系统：由于外部热量的输入、设备启用、大气压变化等，造成接收站产生一定量的 BOG，为保证 BOG 系统运行稳定、安全，在有气化外输量的情况下，启动低压压缩机进行 BOG 回收，在气化外输量小的情况下，利用高压压缩机进行加压外输。接收站工艺流程详见图 1。

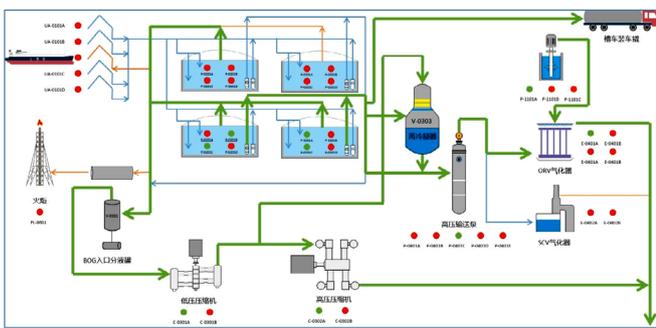


图 1 LNG 接收站工艺流程图

1.2 首船 LNG 储罐预冷介绍

LNG 接收站在完成机械完工，生产准备工作已到位，各项政府许可办理完成后，将进行接收站试生产工作，首先先进性首船接卸及储罐预冷。目前接收站为保证首船接卸及储罐预冷工作安全、高效完成，在首船抵港前，接收站一般会完成卸料管道的低温氮气

预冷工作并进行保冷，此项工作为检验卸料管线焊接质量、低温阀门的密封性、管道位移量以及检查低温设备、材料等的产品质量（如低温容器、管道、管件、法兰、阀门、管托和仪表等），在投入使用前，提前发现问题，解决存在的隐患。在完成卸料管道预冷后，进行卸料管道的低温氮气保冷，LNG 船舶抵港后，在完成停泊系缆，一关两检检查后，进行卸料臂的连接。在完成卸料臂预冷及码头卸料 ESD 测试，船方开始配合接收站进行卸料管道的 LNG 填充及储罐预冷。

LNG 船方通过启动扫舱泵对卸料管道进行小流量的 LNG 填充，同时接收站停止低温氮气保冷工作。在进行卸料管道 LNG 填充过程中，应注意法兰、阀门等螺栓连接处的泄漏情况，管道位移情况，卸料管道顶底部温差情况等。在进行卸料管道填充的过程中产生的 BOG 进入储罐后，通过就地放空管线进行放空，当甲烷含量达到一定的占比后，通过 BOG 管线将储罐预冷产生的 BOG 放空至火炬。当 LNG 填充到储罐卸料管线立管三分之一处，关闭储罐上卸料阀门，通过打开储罐预冷管线上安全阀旁路，进行放气引液，当预冷管线上罐后的第一个温度点温度降至 -130°C 左右，关小预冷管线上预冷阀门（有些接收站预冷管线在储罐上部，需注意填充液体的速率），通过控制储罐预冷用阀门，对储罐进行预冷。储罐预冷温降速率应为 $3^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，最大冷却速度不超过 $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，罐底或罐壁任意两个相邻温度监控点之间的温差不超过 $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，罐底或罐壁任意两个不相邻温度监控点之间的温差不超过 $50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

2 LNG 储罐预冷常见问题及预冷速率下降原因分析

接收站 LNG 储罐预冷常见问题主要有以下几类：

2.1 人员准备不到位

由于人员问题造成的储罐预冷工作不畅，新投产

的 LNG 接收站操作人员有 LNG 接收站生产经验的人员较少，人员到岗率低，人员培训不到位等，造成在进行 LNG 储罐预冷时，有时会产生误操作，有时由于人员技能问题，遇到异常工况时处理不及时或发现问题的能力偏低，造成 LNG 储罐预冷工作不太顺利，但以上问题可以通过采取一定的人员招聘措施，加强人员培训，通过以干代练，到已投产的 LNG 接收站进行培训，可解决以上问题。

2.2 技术准备不到位

由于人员缺乏经验，且每个接收站从设计到施工遇到的问题不同，因此基于现场的实际情况，加之人员的技术能力，编制的首船接卸时储罐预冷方案，可能存在不到位情况，会出现准备工作不足，操作步骤考虑不全面，分析出的风险及隐患与实际不符，对出现的风险采取的措施不当，因此对 LNG 储罐预冷带来一定影响，以上问题通过调研其他 LNG 接收站，同时通过邀请行业内专家进行方案的评审，通过对方案的模拟演练，可解决以上问题。

2.3 物资准备不到位

对应急情况下或出现问题后准备的工器具不齐全，或者准备的备品备件有缺失，造成储罐预冷工作开展不顺利，如：垫片可能准备的材质不对，个数不到位，工器具准备错误等，都会出现遇到问题后，不能及时解决，使后续工作进度受到影响，进而影响储罐预冷工作。因此当完成物资清单的梳理后，应请专家对物资清单进行审核，派专人对物资进行准备及管理。

2.4 其他准备工作不到位

操作人员未在中控室提前组态出卸料管道预冷用监控画面；控人员对储罐预冷前工艺、火气等连锁信号的屏蔽及投用不太清楚或未提前筹划此工作；中控人员对储罐预冷用监控报表及位移监控表准备不到位；中控人员分工不明确及与其他部门配合不到位；现场储罐监控仪表存在问题，如储罐预冷用流量计量程设置不对；储罐有些法兰处盲板或其他隔离设备未及时拆除；阀门内漏未提前采取措施；预冷管线冻堵等。以上问题通过培训，对方案的反复演练，专业人员指导，操作人员的反复确认，各专业人员多次的联合检查等措施可解决以上问题。

但调研 LNG 接收站行业内，目前出现以上的问题还会有，但通过管理措施及技术措施，大多数问题能解决。但在接收站 LNG 储罐在首船接卸时进行预冷，

由于储罐群及储备基地模式的建设，卸料管道管径较大，很多接收站会出现 LNG 储罐预冷温度的波动及温度下降缓慢，此问题的解决相对来说较为困难，分析主要原因有以下几点：

罐开始预冷时所需 LNG 量较少，卸料总管一般都比较长，小流量的 LNG 无法对卸料管线进行保冷，卸料管线内 LNG 回温较快，在卸料总管内部会出现气相空间，当卸料总管压力较低时，储罐预冷管线容易形成气液两相流，从而造成预冷初期储罐温度容易发生波动，随着储罐温度的下降，预冷所需的 LNG 量逐步增加，但一般接收站预冷用最大 LNG 量，也小于码头保冷循环量（因为现在的 LNG 接收站建设模式趋向于储备基地，卸料管道管径一般设计较大，其要求保冷量也随之增大），因此利用卸料管道提供储罐预冷介质，在储罐预冷后期会出现预冷速率下降问题。下方公式为保冷循环量计算：

保冷循环量计算：

$$Q=Cm\Delta T$$

式中：

Q：管道吸收的热量；C：LNG 的比热；m：循环流量； ΔT ：LNG 经需要保冷的管道后温差。

例如：管道长度 1000m，管径 40 英寸， ΔT 一般取 5℃，LNG 比热取 3.5，根据以上数据可以计算出控制 LNG 循环回来为 5℃温差需要 LNG 量为 185m³/h。一般接收站 LNG 常规大小的储罐预冷管线用调节阀最大 LNG 通过量小于此值。

经对行业内 LNG 接收站调研：根据计算选型使用的储罐预冷用调节阀，最大 LNG 通过量，一般也是小于卸料管道循环保冷量，预冷用 LNG 不足以保证卸料管道介质处于一个较低温的状态。

按设计要求储罐预冷阀门阀前需要一定背压，经过阀门后喷淋喷头也需要一定的背压，才能让 LNG 经过阀门后为液体到储罐内经喷头形成雾状物后受热气化，同时让储罐降温。如果喷头前未形成一定的背压（LNG 流量小），经过阀门后 LNG 全部气化或大部分气化，在喷淋系统中形成气堵，然后气堵消失，造成流量的不稳定，因此预冷速率会下降。

在储罐预冷初期初期，喷淋管及喷头没有完全冷却下来，造成在预冷喷头处无法形成稳定的流量和压力，从而造成预冷温度的波动。由于 LNG 储罐罐底不平，在储罐形成液位过程中有 LNG 气化，而且存在位置较低处先形成液位，因此造成储罐预冷温度的波动。

有些 LNG 储罐在预冷过程中,当底部温度点达到约 -120°C 左右时,温度开始回升,最高回升温度达到 10°C 左右,并且温度回升顺序为,离储罐罐底中心点最远的温度探头首先回温,离中心点较近的温度点基本无太大波动,原因为不同组分的 LNG 在一定温度及压力下,开始出现相变即有液滴开始生成,而从气态变为液态的相变过程,是一个放热过程,这部分热量导致局部气体温度回升,当相变慢慢变少时,放出的热量减少,储罐温度被连续喷淋出 LNG 所吸收,此时底部温度会继续降温。在此过程中会出现储罐预冷温度的波动及速率的变化。

3 储罐预冷速率下降的解决措施

接收站 LNG 储罐预冷主要突出的问题为温度的波动及预冷速率的下降,通过上述原因分析,其中温度波动问题较好解决,通过优化操作及控制预冷介质的流量。而预冷速率的下降问题较难解决,尤其储罐预冷到 -145°C 左右(储罐预冷目标温度在 -155°C 左右),根本问题是 LNG 储罐预冷流量满足不了卸料管道的保冷量,储罐预冷时间延长有可能造成 LNG 船舶滞港。目前的解决措施如下:

3.1 卸料管道上多点排气同时加大储罐预冷量

利用卸料管线上设有的安全阀旁路或其他可以通往 BOG 管网的管道,进行卸料管道中气体的排放,减少 BOG 在卸料管道中占有的空间,让 LNG 尽可能填满整个管道,在排气的同时加大 LNG 船舶提供的 LNG 量,让低温的 LNG 进入到卸料管道中,防止因为卸料管道管径大,管道长,造成的管道内介质升温,从而降低储罐预冷用 LNG 的温度。

3.2 停止船方扫舱泵,进行排气,用船方的 LNG 进行管道的再填充

在进行储罐预冷过程中,停止船方扫舱泵,进行卸料管道的排气,当卸料管道温度有下降趋势时,再启动船方扫舱泵,让更多的船上低温 LNG 输入到卸料管道中,直至充满整个管道,以降低储罐预冷用 LNG 温度,提升储罐预冷速率。

3.3 利用码头循环预冷

有些 LNG 接收站由于卸料管道管径大,长度长,根据计算选型使用的储罐预冷用调节阀,最大 LNG 通过量,也小于卸料管道循环保冷量,预冷用 LNG 不足以保证卸料管道介质处于一个较低温的状态,因此在储罐预冷过程中,储罐温度降至一定温度后,卸料管道的介质温度会达到一定的温度且高于船内 LNG 温

度,因此造成储罐预冷速率下降。目前国内 LNG 接收站码头保冷循环管道设计为 6 英寸或 8 英寸(从储罐区低压外输管道接出,有一条支路直接进入在储罐区直接接入卸料管道,有一条支路在码头操作平台接入到卸料管道),在 LNG 船舶扫舱泵启动的条件下,LNG 流量能保证储罐预冷用 LNG 流量,由于码头保冷循环管线管径小,因此在储罐预冷过程中使用此条管道提供储罐预冷用 LNG 可解决上述问题,从而为储罐预冷提供足量温度降低的 LNG,进而保证储罐预冷速率。

对比以上三种方法,第一种方法,如卸料管道中 LNG 处于过热状态,即使找再多的排放点进行 BOG 的排放,随着泄压,管道内的 LNG 还会蒸发,使其处于一个气液转化的平衡状态。第二种方法需停止储罐预冷一定时间,可能增加 BOG 的放空量,且延长 LNG 船舶离港时间。如使用第三种方法能避免以上问题,且保证储罐的预冷速率。储罐在预冷到 -140°C 左右时温度下降缓慢,通过改变工艺流程采用码头循环保冷进行储罐预冷,将预冷时间缩短约 2.1h。

4 结语

综上所述,在目前接收站以储罐群及储备基地的模式进行建设,其相应的部分系统管道管径加大的情况下,如进行首船接卸,在开展 LNG 储罐预冷工作时,可采用卸料管道与码头保冷循环管道(在卸料管道进行低温氮气预冷时完成码头循环管道的预冷)同时填液,填液完成后切断卸料管道(时不时,根据卸料管道的温升情况,向管道里注入低温 LNG),利用码头循环管道进行储罐预冷用 LNG 的供应,以保证储罐的预冷速率。在进行接收站设计时,要充分考虑后期生产的各种情况,多利用各种工艺流程,完成试生产工作。

参考文献:

- [1] 顾安忠. 迎向“十二五”中国 LNG 的新发展 [J]. 天然气工业, 2011, 31(6): 6-7.
- [2] 初燕群, 陈文煜, 牛军锋. 液化天然气接收站应用技术 [J]. 天然气工业, 2007, 27(1): 120-123.
- [3] 徐敬, 张朝阳, 刘发安, 等. 浅谈 LNG 储罐的预冷 [J]. 上东化工, 2019, 48(23): 150.
- [4] 林素辉. LNG 接收站大管径管道冷却方式探索 [J]. 天然气技术与经济, 2011(1): 25-27.
- [5] 周明芳. 试析 LNG 接收站首船接卸中的重点及注意事项 [J]. 化工设计通讯, 2016, 42(3): 2.