

内地 LNG 储运企业储罐 BOG 控制优化措施探讨

魏 鹏 杨 林 吕海鹏 庞胜彬 张 彬 (周口市天然气储运有限公司, 河南 周口 466000)

摘要: 液化天然气 (LNG) 在储存过程中, 应用储存设施进行液化天然气的储存, 储存周期不同会产生相应的蒸发气 (BOG), 本文着重分析了液化天然气在储存过程中 BOG 产生原理, 提出相应的控制优化措施, 以控制优化液化天然气在储存过程中 BOG 的产生量。

关键词: LNG 储运; 液化天然气; 蒸发气; 控制优化措施

液化天然气 LNG (Liquefied Natural Gas), 是天然气在标准大气压且温度在 -162°C 条件下的产物。BOG 是由于 LNG 这种沸腾液体大量的储存于绝热储罐中, 任何传导至储罐中的热量都会导致一些液体蒸发为气体, 蒸发气 BOG 温度较低, 组分以甲烷为主, 还有部分氮气、乙烷等。LNG 储运中 BOG 的主要来源是储罐的日蒸发。

1 内地 LNG 储运现状

2018 年 9 月, 国务院印发了《关于促进天然气协调稳定发展的若干意见》, 将天然气产、供、储、销体系建设纳入国家重点发展规划, 预示着 LNG 储备上升至国家能源战略储备高度。2021 年以来, 河南省天然气储运有限公司周口、驻马店、南阳、郑州、焦作、洛阳六个应急储备中心项目及河北、山西、甘肃等地 LNG 储备中心项目陆续投产, 内地 LNG 储运企业如雨后春笋般蓬勃发展。

2 储运企业 BOG 储罐建设分类及使用情况

2.1 单容式储罐

单容式储罐由一个储存液体介质的容器组成 (液体主容器), 该液体主容器是钢制圆筒形自支撑储罐。单容式储罐由耐低温钢内壁、碳钢罐顶、铝合金吊顶、碳钢外壁及内外壁之间的保温层等组成。碳钢外层壁不接触低温液体介质, 只有 9%Ni 钢内壁接触低温液体介质。单容式储罐外围设有防外溢堤, 以限制储罐破损时低温介质外溢。单容式储罐由于安全性较差, 近年来几近不用。

2.2 双容式

双容式储罐与单容式储罐非常相似, 相当于一个单容式储罐, 在一个具有液体密封性的次容器内建造。与单容式储罐相比, 只不过用预应力钢筋混凝土外壁或钢制外壁代替防外溢堤, 并且预应力钢筋混凝土外壁或钢制外壁可以承受低温介质的压力, 以限制储罐破损时低温介质的外溢。预应力钢筋混凝土外壁或钢

制外壁虽然增加了储罐的造价, 但减少了占地面积, 因为防外溢堤范围被大大减小。如果内罐破损, 预应力钢筋混凝土外壁或钢制外壁可以限制低温介质的外溢, 只有内外壁之间的间隙存在介质蒸气。

2.3 全容式

全容式储罐由一个主容器和一个次容器组成, 主容器为钢制自支撑单壁储罐, 盛装液体介质; 次容器为带有拱顶的自支撑钢制或预应力钢筋混凝土储罐, 在正常操作状态下, 作为储罐气体的主要储存容器, 并支撑主容器的保冷材料, 在主容器泄漏时, 盛装全部低温液体介质, 并从结构上保持气密性。内罐和外罐之间的气相空间是密闭的。通常情况下, 这种储罐的罐顶和外壁一样, 采用预应力钢筋混凝土结构。外壁和外层顶都能够包容液态低温介质及其所产生的蒸气。由于混凝土顶比较重, 储罐允许的设计内压取值可以较大, 达到 29kPa。储罐性能及经济性上, 双金属全容储罐的保冷性能大于单容罐及双容罐, 且 BOG 产生量较低; 在安全性上, 全容式储罐的安全性较好。

3 储罐 BOG 控制优化措施

3.1 储罐施工质量及保冷材料填充 (以双金属全容储罐为例)

为控制储罐静态 BOG 蒸发量, 在储罐建设过程应严格把控储罐施工质量及保冷材料材质选材及填充效果, 本项目 20000m^3 储罐采用立式圆柱形平底自支撑拱顶全容双壁金属罐, LNG 储存于双层 LNG 储罐内罐中, 外罐用于盛装蒸发气体及保冷材料。内外罐均为平底、圆筒形金属储罐, 内罐顶为吊顶型式, 通过吊杆悬挂于外罐拱顶支撑结构, 外罐顶为球型拱顶, 顶部支撑结构为肋环形网架。内罐与外罐材料均采用 S30408 不锈钢制造, 内罐包括: 内罐底板、筒体壁板、吊顶、吊杆、加强圈及内罐梯子; 外罐包括: 外罐底板、筒体壁板、加强圈和外罐拱顶。塔楼及梯子平台是由碳钢型材制成。为减少热量影响罐内温度, 需要降低

储罐日蒸发率，因此，内罐底部采用泡沫玻璃砖、内外罐间夹层采用膨胀珍珠岩及弹性毡、内罐顶板采用玻璃棉作为隔热保冷材料。

储罐底部中心保冷材料选用玻璃砖，将玻璃砖平铺在放置外罐地面的地坪上，并用沥青粘接，内罐底弓形环板下方设置内罐基础混凝土承压圈，顶部玻璃棉表面装有铝箔。储罐壁的保冷结构由弹性毡和膨胀珍珠岩组成。因为低温 LNG 极易蒸发，就在工艺路线和设备制造中采取了特殊的安全卫生措施。内外罐的夹层填充了珠光砂，这是一种厚度为 1m 的高效保温材料。管道输送系统采用高效保温材料，并考虑管道支架和其他附件的保温，最大限度地减少 LNG 蒸发。

3.2 储罐预冷过程把控

LNG 储罐在投入使用之前，必须先进行置换和预冷操作。储罐的冷却速率控制在 $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 左右，任意二测温点之间的温差 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 。储罐置换是指在 LNG 储罐机械竣工后，用干燥空气或氮气将储罐内潮湿空气（氧气、水分）置换出去，是储罐预冷工作的前提条件。储罐预冷是指储罐在置换完成后，将储罐冷却，满足储罐进液投产的过程。待储罐内罐、内外罐夹层及拱顶、底部玻璃砖、热保护角氮气置换合格后，即可开始储罐液氮 +LNG 预冷工作。

表 1 置换合格标准

序号	名称	O ₂ 含量 (VOL%)	露点 (大气压)
1	内罐	<9%	<-20 $^{\circ}\text{C}$
2	内、外罐夹层	<9%	<-8 $^{\circ}\text{C}$

储罐采用置换与冷却同时进行的综合型方案，即用液氮预冷至 -80°C 后改用 LNG 预冷，把储罐内的氮气置换并冷却。储罐冷却速度控制在 $3^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 左右，最大不超过 $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ；罐壁或罐底上任意两个相邻测温点之间的温差 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 。现场操作人员根据实际降温速率控阀门开度；当内罐温度达到 -80°C 时，停止进液氮。冷却过程中，罐内压力控制在 10kPa 左右。

然后改用 LNG 预冷储罐至工作温度并积液，同时启动 BOG 压缩机系统控制储罐压力。注意储罐的冷却速度控制在 $3^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 左右，最大不超过 $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ；罐壁或罐底上任意两个相邻测温点之间的温差 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ ；持续进液，当内罐底板温度达到 -160°C ，内罐壁板温度达到 -130°C 并积累液位时，整个置换冷却过程完成，满足进液条件。在置换和冷却过程中，罐内压力控制在 10kPa 左右，防止发生压力波动。

表 2 置换冷却后应符合以下要求

序号	名称	温度 ($^{\circ}\text{C}$)
1	内罐底板	-160
2	内罐壁板	-130

3.3 储罐内部 LNG 分层及翻滚原理、预防及控制

储罐分层现象产生的原因主要有：储罐内液化天然气由于各组分密度不同，导致密度大的组分在下，密度小的组分在上，形成分层。分析表明，很小的密度差就可导致分层的发生；液化天然气进储罐温度的细微变化会引起液体密度的细微变化。温度高的液体的密度较小，温度低的液体的密度较大，因此密度小的液体上浮，密度大的液体下沉，产生分层现象；由于不同阶段注入储罐的 LNG 组分不同，导致新旧液化天然气两层液体的密度不同，因此罐内液体就会存在密度差，产生分层现象。

储罐翻滚现象产生的原因是：在液化天然气 (LNG) 的储存和运输过程中，由于成分和温度的不同，LNG 的密度也不同。如果密度较小的 LNG 位于上层，密度较大的 LNG 位于下层，则上层和下层将形成独立的对流运动。在底部漏热的影响下，底部吸收热量并通过与上部之间的液-液界面传递给上部。液体上半部分温度上升缓慢，而下半部分温度上升较快，导致上下两部分密度差减小。由于上层液体的重力抑制作用，罐底的热泄漏不能使下层的 LNG 蒸发而过饱和。在一定条件下，下层强烈的热对流环流使分层界面被打破，上下两层混合，密度趋于相等。原本处于饱和状态的较低液位的 LNG 会及时蒸发，储罐内会出现滚动现象，造成超压事故。

翻滚现象的预防及控制：液化天然气翻滚是由分层引起的，采取防止分层措施可有效防止翻滚现象。采取防止分层措施：①应该分开储存不同产地、不同气源的液化天然气，从而避免由于密度差导致分层；②取决于待储存的液化天然气与储罐中原始液化天然气的密度差。选择正确注入方法可有效防止分层。

充注方法应遵循原则：当密度相近时，一般采用底部充注；把轻质的 LNG 注入到重质 LNG 储罐时，适合选择底部充注。把重质液化天然气充注到轻液化天然气储罐时，适合选择顶部充注。利用混合喷嘴和多孔管充注，充注后的 LNG 可与原 LNG 充分混合，避免分层。然后充分搅拌所有注入罐内的 LNG，消除密度差异，防止 LNG 分层。

通常采用罐体循环泵进行循环(即 LNG 泵从罐体下部回流到罐体上部),使罐体内各组分充分混合。控制注入储罐的 LNG 组分的密度变化范围,尽量减少各组分的密度差。对于大型 LNG 储罐,很难充分搅拌。一旦发生 LNG 翻滚,汽化后的大量天然气难以及时通过安全泄放阀排出。为防止事故发生,设置了 LNG 储罐 LTD 监测仪表、超压系统保护及释放火炬、安全阀、BOG 压缩输送系统等,防止 LNG 蒸发翻滚造成储罐超压。注意尽量使用同一个储罐来储存来自同一液源的 LNG,并控制其组分的变化范围,防止 LNG 翻滚现象。注入储罐的 LNG 密度差应控制在 15kg/m 以内。

3.4 储罐顶部喷淋降温措施使用

储罐静态工况下的环境温度是影响储罐 BOG 产生量的主要因素,因此降低储罐内外热交换可以作为降低 BOG 的一种手段,储罐喷淋降温即是通过向储罐顶部喷淋水雾,降低储罐顶部温度,从而降低储罐气相空间与外界的热交换效率,从而降低 BOG 产生量的目的。根据各项目实际情况,可采用地下水喷淋后收集过滤再次利用的方式,也可采用市政水喷淋收集过滤再利用的方式对储罐顶部进行不间断喷淋,从而降低储罐 BOG 产生量。本项目具体施工方案如下:

储罐喷淋装置使用喷射泵从项目二期水并取浅层地下水作为水源,地下水通过沉淀水箱沉淀后进入供水水箱,螺杆增压泵从供水水箱取水,经过管道输送至储罐顶部,为罐顶喷淋管道供水。储罐顶部依托储罐喷淋装置现有管道,布置两圈喷淋喷淋管道,向储罐顶部喷射水雾,为储罐穹顶降温。(详见储罐喷淋系统简图)

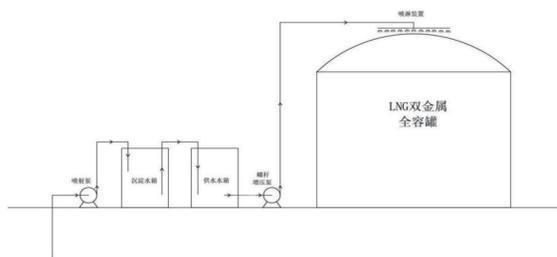


图 1 喷淋系统简图

实施后效果评估:储罐喷淋降温盘管自投用以来,单日用水约 40m³,每时用水约 6.6m³(本项目储罐容积 20000m³,喷淋盘管 DN32,长度 180m,高度差 36m),在环境温度、液位及工况基本一致的情况下,每日可降低 BOG 约 300Nm³。

实施后经验分享:①由于本方案采用两级水泵,为确保系统工作连续性,需要确保第一级水泵流量大

于等于第二级水泵,通过液位开关控制第一级水泵启停或者增加水箱溢流,保证供水水箱的工作液位;②本方案水来源为浅层地下水,水中杂质较多,需要经过过滤沉淀将地下水中泥沙进行沉淀过滤;③由于储罐顶部至增压水泵有约 36m 液位差,压头对水泵负荷有很大影响,增压水泵需选用扬程和流量较大的型号,建议选用螺杆泵或者多级增压泵;④储罐顶部喷头布设数量和喷水量需与增压水泵流量进行匹配,避免水泵流量小,无法形成喷雾,影响喷淋效果;⑤储罐顶部环形喷淋管道布设时选用快插接头形式,可以避免在储罐顶部的热熔作业,工作更加安全高效,而且损坏后方便更换;⑥快插接头有一定缺点,如果安装不好容易漏水,需要注意避免受力,或者选用流量更大的增压水泵,抵消漏水影响;⑦喷淋装置工作后,不可避免的造成储罐表面洁净度下降,影响储罐外观质量。

3.5 储罐 BOG 压缩机运行模式优化及企业内部管理模式优化

根据实验经验得知,在储罐容积、液位、高度等外部条件相同且设计容许安全范围内,储罐内部压力越大,储罐内部 LNG 表面压力相对更大,储罐 BOG 溢出蒸发量会相对降低;反之储罐压力降低,储罐内部 LNG 表面压力相对较低,储罐 BOG 溢出蒸发量会相对增加。因此调整储罐 BOG 压缩机的运行负荷及运行模式能适当降低储罐 BOG 的蒸发量。根据本项目运行测试经验得出相应数据,本项目 20000m³LNG 双金属全容储罐设计压力 -1 至 29kPa,工作压力 5 至 25kPa,在储罐内部压力控制在 19-23kPa 之间时,储罐 BOG 溢出量最优。

在项目下游 BOG 外输接收量容许的情况下,调整 BOG 压缩机负荷待储罐压力将至 19kPa 时停止 BOG 压缩机,待储罐压力升至 23kPa 时,启动 BOG 压缩机大负荷抽取 BOG 快速降低储罐压力将储罐压力控制在 19-23kPa 之间。具体操作实施过程可根据企业内部管理数据进行适当调整相关参数。

LNG 储存企业现有储罐 BOG 控制措施较为单一,企业管理方面应尽量从源头把控,以预防为主,以事后补救处理措施为辅。

参考文献:

- [1] 孙世一. 大型 LNG 储罐系统及安全技术研究. 中国信息科技, 2022(09).
- [2] 伍颖. 液化天然气储运中的翻滚现象及预防措施. 管道技术与设备, 2008(06):9-12.