

进口 LNG 储罐卸料过程的延迟混合现象研究

Research on Delayed Mixing Phenomenon of LNG Storage Tank Discharge Process

李 浩 (广东珠海金湾液化天然气有限公司, 广东 珠海 519001)

Li Hao (Guangdong Zhuhai Jinwan LNG Co., Ltd., Guangdong Zhuhai 519001)

摘 要: LNG 产地的不同导致 LNG 组分、温度、密度均不同。不同密度、温度的 LNG 在混合储存过程中容易发生分层现象, 如果处理不当将会导致翻滚, 进而威胁 LNG 储罐的安全运行。这就要求 LNG 接收站在储存过程中需要充分考虑卸货方式。在不同产地 LNG 混合的过程中, 对比船方与储罐内 LNG 密度, 当船方 LNG 密度大于储罐内 LNG 密度时采用上进液, 反之则采用下进液, 以防止储罐内 LNG 产生分层。通过上下进液的方式无法完全避免分层的产生, 针对某 LNG 接收站接卸船后储罐内 LNG 的液位、密度、温度变化进行分析, 解释储罐内 LNG 在高液位下延迟混合的过程并提出相关注意事项。

关键词: LNG; 卸料; 分层

Abstract: Different The composition, temperature and density of LNG are different due to the different origins of LNG. LNG with different densities and temperatures is prone to layer in the process of mixed storage. If it is not handled properly, it will cause rollers, which will threaten the safe operation of LNG storage tanks. The unloading method need to be fully considered during the storage process of the LNG receiving station. In the process of mixing LNG from different origins, it is necessary to compare the density of LNG in the ship and the storage tank. When the density of LNG on the ship is greater than the density of LNG in the storage tank, the upper unloading is used, otherwise, the lower unloading is used to prevent the layered of LNG in the storage tank. It cannot completely avoid the formation of stratification which method of unloading from.. The changes of liquid level, density and temperature in the storage tank after unloading of the LNG terminal are analyzed, and the process of delayed mixing of LNG in the storage tank is explained.

Key words: LNG; unloading; layering

随着我国天然气消费量的增加, 进口 LNG 在我国天然气消费量也逐年增加, 越来越多的 LNG 接收站投入运行, LNG 接收站成为液化天然气产业链中的重要一环, 在城市储气调峰中发挥重要作用。LNG 需要通过 LNG 船进行长距离的运输后储存在 LNG 储罐内, 大型 LNG 储罐具有储存效率高, 对资源的综合利用率高, 是用来储备天然气的优先选择。正常工况下, LNG 的气化温度约为 -162°C , 储罐的设计温度一般为 -170°C , 操作压力在 $4\sim 20\text{kPaG}$ 。在实际生产过程中, 需要对储罐内 LNG 不同液位的密度和温度进行监控, 从而判断是否产生分层, 当密度差或温度差大于临界值

时, 就要采取相应的措施^[1]。因此研究储存过程中的 LNG 状态对防止储罐内发生分层及翻滚具有非常重要的意义。

1 LNG 储存及分层过程

LNG 储罐为全包容式混凝土顶储罐, 内罐采用含镍 9% 的合金钢, 外罐为预应力混凝土材料建成, 其环隙空间、吊顶板以及罐底都设有保冷层, 保冷材料主要为膨胀珍珠岩、弹性玻璃纤维毡及泡沫玻璃砖等, 保证储罐的日最大蒸发量不超过储罐容量的 0.05%。由于 LNG 是一种多组分的混合物, 在储存时会由于储罐罐壁及罐底漏热产生不均匀温度场进而产生不均匀密度场, 由此产生浮升力推

动 LNG 在储罐内进行循环流动, 如图 1 所示, 因此储罐内的 LNG 流动可以看成自然对流^[2]。

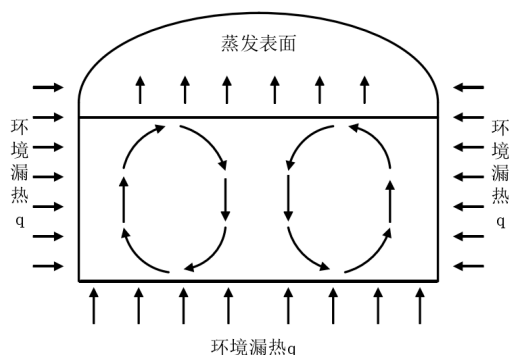


图 1 1 LNG 在储罐内的自然对流

当储罐内的 LNG 无法实现整体对流时, 就会在储罐内产生局部对流, 从而形成分层。通常储罐分层的原因包括两种^[3]:

1.1 因卸货引起的分层

当来船 LNG 密度低于储罐内 LNG 密度, 并通过上进液进入储罐。当来船 LNG 密度高于储罐内 LNG 密度, 并通过下进液进入储罐。密度低的 LNG 储存在上层, 密度高的 LNG 储存在下层, 由于充装的 LNG 无法充分与储罐内 LNG 进行混合, 从而引起分层。

1.2 因储存时间过长导致的分层

对于长期储存的 LNG, 当其含氮量较高时, 也会发生一种自动分层的现象。如果含氮量较高, 氮气优先于甲烷蒸发, 氮气的蒸发使得 LNG 密度降低, 当 LNG 密度降低后表层的 LNG 不再通过循环进入储罐底部, 从而形成密度较小的液层^[4]。

LNG 的分层演化分为四个阶段: ①固定分界面阶段; ②上层卷携阶段; ③上层中间射流穿透阶段; ④翻滚阶段。

2 LNG 翻滚及预防措施

翻滚的形成机理比较复杂, 一般认为当储罐内 LNG 产生分层后, 随着外部热量的导入, 底层 LNG 温度升高, 密度变小; 顶层 LNG 由于 BOG 挥发而变重。经过传质, 下部 LNG 上升到上部, 压力减小, 成为过饱和液体, 积蓄的能量迅速释放, 瞬间产生大量 BOG 的现象, 此时罐内 LNG 的气化量为平时自然蒸发量的 10~50 倍, 将导致储罐内的气压迅速上升并超过设定的安全压力, 使储罐出现超压现象, 如果不及时通过安全阀排放, 就可能造成储罐的机械损伤, 带来经济上的损失及环境污染。在翻滚过程中的 BOG 量是由下层 LNG 的质量以及温度所决定。

由储罐的翻滚理论可知, LNG 翻滚的直接原因

时不均匀密度场的存在。在通常情况下, LNG 接收站在操作过程中预防翻滚以以下几种措施: ①条件允许的情况下, 对不同密度的 LNG 实施分罐储存, 避免因密度差而引起分层; ②不同密度的 LNG 需要混合储存时, 当来船 LNG 密度大于储罐内 LNG 密度, 一般采用上进料的方式, 反之, 则采用下来进料方式; ③储罐内安装多点温度计及密度计, 对储罐内各个液位下的 LNG 进行监控, 一旦发现分层现象, 及时对储罐内 LNG 循环泵进行循环, 将储罐底部 LNG 输送至顶部, 帮助储罐内 LNG 充分混和。

3 LNG 延迟混合现象实例

某 LNG 接收站在一次卸料过程中产生了一种延迟混合的现象。储罐内 LNG 液位 25440mm, 密度 443.7kg/m³, 温度为 -158.86℃, 温度均匀。在第 2 天接卸一艘 LNG 船, 船内 LNG 密度 421.75kg/m³, 温度为 -160.3℃。卸货方式为下进液, 卸货后, 储罐内液位由 25440mm 上升至 27700mm。通过对比图 2 和图 3 中 1d 与 2d 曲线可以看出, 在第 2 天轻组分 LNG 通过下进液进入后, 储罐内 LNG 虽然进行了混合, 但混合并不完全, 而是形成了高度约为 3000mm 的分界面, 分界面下方 LNG 温度 -158.65℃, 密度 443kg/m³, 分界面上方温度 -158.92℃, 密度 441kg/m³。在第 2 至第 5 天, 下层液体逐渐增多, 温度逐渐增加, 密度逐渐增加, 上层液体温度变化不显著, 密度逐渐增加。在第 6 天, 储罐整体混合均匀, 与第 1 天相比, 整体温度降低, 密度降低。从卸料至储罐内 LNG 混合均匀共用时 6 天。

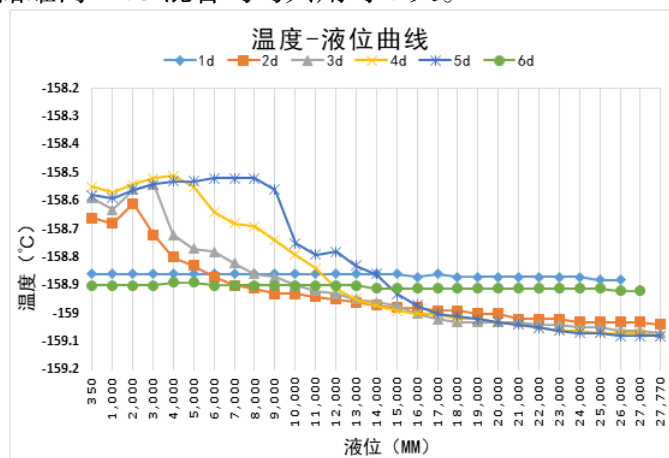


图 2 储罐温度液位曲线

通过图 2, 从第 2 天开始底部 2m 左右的 LNG 开始与上层 LNG 进行热交换, 并且随着储罐底部对 LNG 的加热过程, 底层 LNG 温度逐渐上升, 高度逐渐加大。当底层 LNG 不断加热至第 5 天临界点后, 储罐内 LNG 出现整体热交换, 罐内 LNG 再

次呈现均匀状态,即第6天曲线。对比第1天与第6天的温度曲线,可以发现此时整体温度下降,而从LNG向上不断热交换的过程,也是BOG不断储存的过程。第5天至6天,储罐压力并未发生剧烈变化。可以得知,下层液体温度逐渐升高,且下层液体逐渐增多,这是由于储罐底部及罐壁对LNG产生热交换的结果。我们通过对图3可知,下层液体逐渐增加的同时,其的密度也在逐渐降低,其原因为两方面,一方面是罐底及罐壁对下层LNG的加热,导致下层LNG密度的降低,另一方面,是由于上层液体不断进入下层液体,导致下层液体密度降低。由此得出,在上下层混合前,分界面是不断向上移动的。这样的移动加速了下层液体密度的降低。

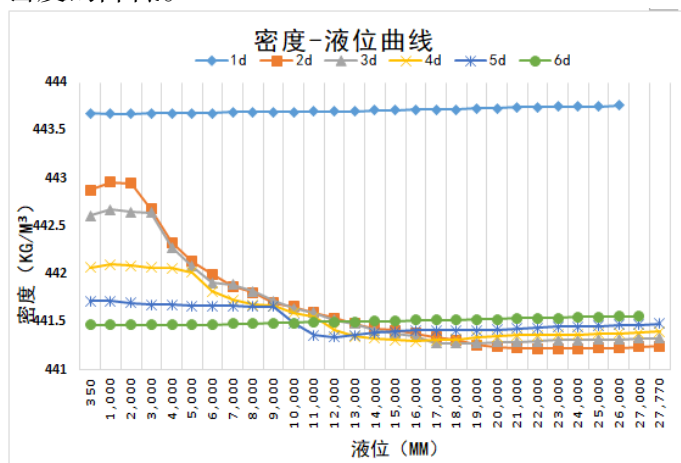


图3 储罐密度液位曲线

通过对比图2、图3上层液体的问题和密度可以看到,相对于第6天混合均匀的LNG,2至5天时上层的LNG温度及密度均比较小。其原因在于上层的LNG可以通过液体表面自由蒸发而充分冷却,并产生了“顶层效应”。

延迟混合现象是由于储罐内LNG液体产生了分层,上层LNG密度低,下层LNG密度高,在发生混合的过程与传统翻滚理论相同,是由于上层液体密度等于下层密度后,突然发生的翻滚。不同的是,传统翻滚理论认为LNG在分层演化的过程中上层的热边界层流动通过自由表面蒸发而充分冷却,然后顺着中心线下降,形成中心射流,而下层的热边界层流动由于分界面的阻隔无法充分冷却,使得下层无法形成中心射流,继而形成新的层,新的层又进一步阻碍了下层运动导致两层流体的分界面相对固定不动^[5]。而延迟混合过程分界面逐渐上移,通过边界层的流动不断将上层液体“带入”下层液体。

当卸货完成后,LNG接收站储罐内LNG处于

高液位状态,且卸船的LNG与储罐内LNG还未经过充分混合,在接下来的时间,储罐内LNG将进行罐内的热对流,在充分混合后,达到新的饱和温度,在此过程中下层LNG温度上升,上层LNG温度下降,而上下层与最终状态的焓差大小决定了此次混合后BOG蒸发量的大小。

4 结论

对本次LNG储罐内产生延迟混合现象进行研究,得出如下主要结论:①进料LNG与储罐内LNG密度差较大导致储罐内LNG出现延迟混合现象;②进料混合后,上下层LNG未充分混合,形成了上下分层,下层LNG无法通过热对流形式与上层LNG进行混合;③下层随着热输入的增加,下层LNG热对流过程中,将一部分LNG从上层逐渐转移至下层,下层LNG密度不断减小,上层因温度输入较少,加之顶层效应作用,处于过冷状态;④当上下层液体密度接近时,打破上下分层,储罐内LNG形成整体循环。

本文所示过程,为低密度LNG下进液进入储罐后发生的情况,卸船LNG与储罐内LNG密度相差较大,虽然轻组分下进液至储罐内,但在短时间内仍发生分层现象,高密度高温度的LNG位于储罐下层,低密度低温度的位于储罐上层。当储罐内LNG上下层温度相同时,发生了自混合过程,储罐内BOG蒸发量会增加,在此时间应加强对储罐压力、温度和LNG密度的监控,确保安全生产。当发现储罐内底层温度上升并形成温度差时,可通过启动低压泵,将下层过热液进行外输或循环至上层,降低在储罐整体混合过程中产生的BOG量。

参考文献:

- [1] 范琳.液化天然气储罐仪表设计探讨[J].石油化工自动化,2013,03:14-17.
- [2] 蔡小刚.LNG储罐无损储运特性的研究[D].江苏:江苏科技大学,2018.
- [3] 张成伟,吕国锋,庄芳.LNG储罐中液化气翻滚原因及预防[J].石油工程建设,2012,37(6):66-68.
- [4] 乔国发.影响LNG储存蒸发率因素的研究[D].北京:中国石油大学,2007.
- [5] 顾安忠等著.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2006.

作者简介:

李浩(1988-),男,山西临汾人,大学学历(工学学士),大连理工大学,天然气工程专业工程师现就职于广东珠海金湾液化天然气有限公司,研究方向:从事液化天然气运营及管理工作。