

LNG 大型储罐预冷过程的问题分析

崔文亮（桐乡港华天然气有限公司，浙江 桐乡 314500）

摘要：在 LNG 接收站的运营中，LNG 大型储罐扮演着至关重要的角色，因此在正式投产之前，工作人员需要对其进行预冷，以确保其从常温状态缓慢而均匀地降至低温状态，从而避免内部温度骤降所带来的不利影响，以确保 LNG 接收站的稳定运行。预冷可以有效地防止因管道压力过大或者外界环境变化等原因引起的天然气泄漏现象。为确保预冷工作的顺利进行，必须对预冷过程中涉及的各种影响因素进行全面深入的分析，因为预冷是一项高风险且技术水平较高的工作。另外，对于不同类型的储罐来说，其预冷工艺也会有所不同，这就需根据实际情况选择相应的预冷方案。在本文中，我们对 LNG 接收站在大型储罐设计中的要求、预冷流程以及预冷过程的影响因素进行了深入分析，旨在为其他 LNG 储罐项目的预冷工作提供宝贵经验。

关键词：LNG；大型储罐；预冷过程；影响因素分析

0 引言

液化天然气（LNG，Liquefied Natural Gas）具有更高的安全性和运输便利性，再加上天然气是更有效的清洁型能源，为了便于存储需要存储设备，而大型 LNG 储罐作为 LNG 生产企业以及 LNG 接收站最重要的存储设施之一，总体投入比较大。随着 LNG 温度的骤降，大量涌入常温储罐的 LNG 会引起内部温度的不均匀变化，从而导致储罐内部压力的快速上升和罐体应力的明显集中，这对储罐的安全性构成了极大的威胁。

为了确保整个储罐能够顺利投入正常运行，必须要做好相应的预冷工作。因此，在进行投产建设之前，必须进行充分的预冷处理，以确保其能够顺利地投入使用。

1 LNG 大型储罐设计要求和预冷流程

1.1 LNG 大型储罐设计要求

1.1.1 耐低温性能

为了确保 LNG 储罐在常压储存液化天然气时能够保持其沸点以下的温度，必须对罐壁的厚度进行调整，以降低其厚度，从而提高储罐的安全性。为了提高整个装置的稳定性，保证储罐能够正常运行，就要加强对低温条件下储罐内介质流动特性及传热机理的研究工作。为了在常压状态下进行 LNG 的储存，储罐必须具备高度的适应性，以确保其在低温环境下表现出卓越的耐受能力。

1.1.2 安全性高

在进行 LNG 储罐预冷作业时，LNG 作为通常采用的预冷介质，那么在整个工艺过程中，难免存在一些潜在的风险因素。当储罐和其所附属的管道受到冷

却时，可能出现不同程度的收缩，导致液体在接头处发生渗漏现象。另外，如果储罐内部压力过大，还可能出现“爆燃”现象。当液化天然气泄漏时，由于其体积较小，因此在一定程度上吸收了大量的热能并将其汽化，如果碰到明火，就会发生爆炸，造成难以承受的后果。所以，在实际生产中应尽量使用液氮作为预冷介质。

1.1.3 稳定性强

大型储罐作为储液构筑物，一旦遭遇强烈地震，其结构可能会遭受破坏，从而导致天然气泄漏，对生态环境和人员安全构成严重威胁。其中之一就是罐区与外界环境之间存在温差。在 LNG 储罐的设计过程中，应改善其抗震性能或选择施工地址时地址选择非地震带以及施工过程中抗震试验以增强其抗震性能。

1.1.4 绝热性强

制造大型储罐时，常采用超低温钢材料，而在外罐壁的制作过程中，预应力钢筋混凝土材料的应用则显著提高了其抗拉强度。因此必须要对其抗震能力进行加强，以确保整个工程能够正常运行。同时储罐具有良好的保温隔热性能，内外部温差高达 200K（-73℃）左右，罐内温度低于 LNG 沸点，因而蒸发率较低。此外，由于内部有保温层，所以对液体起到了良好的隔绝作用。在设计过程中，工作人员考虑到冲液和排液所带来的热胀冷缩变化，精心设计了一套绝热系统，以确保其适应性。

1.2 LNG 接收站大型储罐预冷流程

在进行 LNG 大型储罐的预冷操作之前，工作人员需要进行全面的机械完工状态检查和安全设施检查，以确保所有工作都已经完成，从而保证预冷方案的编

制、预冷前的准备、气冷、法兰冷紧、LNG 喷淋和液位的建立。

在进行储罐预冷时，工作人员必须确保预冷介质的压力与实际系统操作的压力保持一致，不得超过系统正常的压力范围。如果要达到这个标准，则必须将整个管路中的空气排出，以防止由于管内气体流动导致预冷介质产生过大的波动。在进行上述尺寸的管道预冷操作时，工作人员必须确保管道在某一位置的上下两面之间的温度差异不超过 50℃。如果由于管道自身存在问题而导致的温度梯度过大的话，则会引起管道内壁上产生大量的水膜，从而使得管道中的水无法顺利流通出去。

管道内温度下降的速度应维持在 8~10℃之间，不应大于 20℃，否则会給储罐带来不良影响。对于储罐中储存有液态天然气的管道，如果没有采取保温措施的话，那么可能会因为环境温度过高而导致管道发生泄漏或者破裂。当液化天然气填充到储罐中时，需确保其所处位置达 320mm 后，进液阀门应打开并从这里进入。如果储罐底部和顶部之间存在空隙的话，则需要关闭进液阀。

2 大型 LNG 储罐预冷过程问题分析

2.1 入口喷头流量的影响

进行预冷时，设定上料口流量（单位：kg/h），并根据不同流量观察储罐内温度、温降速率和时间的变化趋势。发现随着出口流量增大，储罐和内罐之间的换热增强，但由于进口处存在回流现象导致其降温效率较低。随着预冷过程的进行，LNG 在储罐和喷淋进罐之间的温度差异逐渐缩小，导致蒸发量减少，同时内罐与外部环境的温度差异也会导致泄漏热量不断增加。

随着质量流量的增加，温度的降低速率也随之加快。如果要达到这个标准，则必须将整个管路中的空气排出，以防止由于管内气体流动导致预冷介质产生过大的波动。喷淋流量 2000kg/h 时冷却温度降低速度低于 3K/h，冷却时间大大延长。因此，在生产现场应根据不同的工况选择适当的喷淋密度和喷距。喷淋流量大于 4500kg/h 后，预冷前 10h 内温度下降速度大于 5K/h 会导致罐内及其他附属设备产生过高温应力而给罐体带来不可弥补的破坏，影响储罐正常运行。通过分析可知，在相同条件下，随着预冷时间的增加，罐体内最高温度降低幅度逐渐减小，必须逐步增加预冷喷射的数量，以确保预冷效果的一定程度。

2.2 温度下降速度的影响

对于预冷工艺受温度下降速度影响的机理，我们采用了多种不同的温度降速策略。探究喷淋质量流速和预冷时间在不同温降速率下的关联，以期获得更深入的认识。随着预冷进行储罐温度的逐渐降低，在一定的温降速度下，所需的 LNG 喷射流量也随之逐步增加。在相同的降温过程中，通过改变温度降速可以得到不同的预冷效果。随着温度的逐渐降低，喷淋的速度也随之增加，因此需要进行更快的冷却。在相同的条件下，随着温度降低，需要预冷的时间逐渐减小。随着温度下降速度的增加，LNG 的消耗量将呈现上升趋势，同时预冷所需的整个时间也将随之缩短。

2.3 预冷起始温度的影响

随着预冷起始温度的升高，所需的 LNG 总量和总的预冷时间均会呈现出增加趋势。在实际操作中，由于储罐内部的初始温度与外部环境存在一定的差异，随着温差的增大，储罐从外部环境中吸入的热量也随之增加，从而对储罐的实际预冷效果产生影响。因此，在环境温度较低的情况下，为减少使用的 LNG 喷淋总量，应考虑对储罐进行预冷操作。

2.4 阀门低温的影响

由于 LNG 接收站压力管道在安装后需进行压力测试，考虑到安全性，我国有更多 LNG 接收站在工期许可时使用水压测试，水压测试后需将管道吹扫置换并达标才能进行后续作业。所以在填充之前管道中仍有可能含有水分而造成阀门冻堵。为检验阀门的灵活性和有无冻堵。

2.4.1 底部进料管阀门低温开关测试

为确保储罐的正常运行，必须对底部进料管阀门进行低温开关测试，以降低冻堵的潜在风险。在底部进料管阀门低温开关试验中，难免有低温氮气经底部进料管排入储罐，因底部进料管管口离内罐底板较近，会有低温氮气直接撞击储罐底板，造成底板局部缩放过大而变形甚至破损。此外，罐体内部空间宽敞，一旦低温氮气进入，其扩散速度将会迅速加快。再加上低温氮气预冷卸料管时底部进料管的阀门没有连续打开，只在低温开关试验时打开，对底板没有不利影响。

为确保底部进料管阀门低温开关测试的最低温度，需预先确定某一特定温度以确保底板的安全性。超过此温度后，可以检测底部进料管阀门是否处于低温开关状态，监控底部进料管阀门周围的底板温度。在达到此温度时停止对底部进料管阀门进行低温开关

试验。

2.4.2 阀门冻堵

无论是在储罐预冷过程中还是在储罐投产后的日常运行中,阀门冻堵所带来的影响都是不可忽视的,因此我们必须从根本上采取措施来避免这种情况的发生。阀门冻堵产生的主要原因:水压试验结束后虽然采用氮气吹扫的方法,但是阀门底座上仍有可能因阀门自身结构等其他方面的原因而残留水分,发生阀门低温冻堵。

对于大型油罐而言,其底部会有一定厚度的保温层,当罐底存在积水时,将导致阀门产生冻结,进而引起阀门失效而造成事故发生。为解决阀门冻堵问题,建议在条件允许的情况下,利用气压试验进行压力测试。在进行压力试验时,为确保阀门吹扫合格,应在储罐进行预冷之前采取必要措施。

2.5 储罐低压输出总管充填

低压输出总管冷却和填充之前,采用低温氮气预冷将低压输出总管平均温度下降到 -120°C 以下。充填过程中,使用SDV阀旁通阀(紧急切断阀)半打开,但仍容易发生低压输出总管迅速充满而降温无法控制的现象。由于低压泵出口管预冷及填充与低压输出总管同步运行,根据低压输出总管填充不易控制这一事实,低压泵出口管降温速率不易控制。同时低压泵出口管的布置较为紧凑和复杂,如果降温速率过快,容易造成某些管段的位移过大,继而出现破坏。通过以上分析表明,低压输出总管填充之前,采用低温氮气预冷将温度降低到 -120°C 十分必要。并要把SDV阀旁通阀控制得很小,慢慢填充低压输出总管以避免温度下降过快的情况发生。

2.6 交叉作业的影响

通常在建设LNG接收站时,一般不会少于2个LNG储罐,预冷作业过程中交叉作业在所难免,这必然会对预冷作业造成一定的难度,只有提前制定好计划并严格按计划实施才能保证储罐预冷工作顺利实施。在进行两座储罐的交叉作业时,需要进行进料管的充填和储罐的预冷,这两个环节是至关重要的。由于两个储罐的预冷时间不同,导致它们的前序步骤中的进料管无法同时完成充填操作。如果前一步进料管无法顺利地完成充填操作,后一个储罐就必须先开始进行预冷。

第一座储罐的进料管充填和储罐预冷之间形成了紧密的衔接,确保了整个系统的稳定性和可靠性。针

对第二个储罐,其进料管的充填过程被划分为多个阶段,第二罐进料管首先填充至某一高度并在第一罐预冷达到稳定状态时启动第二罐进料管余量填充和后续罐内预冷。为了避免LNG提前进入储罐造成的潜在风险,我们需要对第二座储罐的进料管进行部分充填,因为目前第二座储罐并未进行预冷处理,因此不建议一次性将进料管充满。

2.7 LNG在卸料管内长时间停留影响

卸料管通常很长,管径很大,且储罐预冷所需LNG数量有限,再加上储罐预冷所需时间相对过长,使得LNG长期滞留卸料管中,从环境中吸热,最终造成储罐预冷后期卸料管顶部堆积了大量挥发气造成下游LNG供给不足,不能实现储罐的正常预冷,也就是储罐的温降效果达不到预期。

3 总结

综上所述,在大型LNG储罐预冷作业过程中,工作人员需保证预冷作业的持续性并需制定周密的预冷方案以保障相关作业的顺利开展。预冷操作启动前,工作人员需做好前期准备,并确保调度充足液氮车辆以确保低温氮气连续供给,以免发生温度重复。由于预冷工作时间较长,LNG接收站储罐预冷作业过程中,必须要保障人员供给,保障人员合作才能达到高效预冷作业。LNG的安全储藏和储罐的正常运行,在很大程度上取决于预冷工作的成败。

参考文献:

- [1] 金光.LNG接收站储罐预冷工艺的优化[J].化工技术与开发,2023,52(Z1):81-84+57.
- [2] 张杰.一种气化控温控压装置在LNG接收站的实践与应用[J].化工管理,2022(19):144-146.
- [3] 张京周.LNG接收站工艺管道预冷探讨[J].化工管理,2019(16):209-210.
- [4] 钟君儿.大型LNG接收站试车预冷关键要素分析[J].上海煤气,2022(04):1-6.
- [5] 王亚群,李方道,吕梦芸等.LNG接收站大型储罐预冷过程状态分析[J].清洗世界,2022,38(04):167-168.
- [6] 赖家俊,马志先.小型LNG气化站预冷方法对比分析[J].煤气与热力,2021,41(07):12-15+45.
- [7] 付红艳.大型LNG储罐预冷过程影响因素分析[J].当代化工研究,2022(24):70-72.
- [8] 韩旭.大型LNG储罐安全性分析与控制的措施[J].工程建设,2021(12):25-27.