

大型低温 LNG 储罐设计与建造技术的新进展

崔言进 (山东泰东实业有限公司, 山东 济南 271104)

吕晨曦 (华电国际电力股份有限公司莱城发电厂, 山东 济南 271100)

摘要: 近年来, 由于油价的持续上涨, 天然气这一低耗能、低污染的新能源已被世界各国普遍采用。为实现经济、社会、环境的和谐发展, 我国在全国范围内大力推广液化天然气。通过对大型低温 LNG 储罐设计与建造技术进展的探讨, 以期对未来国内液化天然气储罐的建设具有一定的参考价值, 这对于我国能源结构的优化和国家的可持续发展都有着十分重大的现实意义。

关键词: 大型低温 LNG 储罐; 设计; 建造技术; 进展

随着我国经济的发展与社会的进步, 天然气得到了越来越多的应用。液化天然气 (LNG) 是一种高品质的燃油和化工原料, 其组成为甲烷, 因其组成在燃烧过程中对环境无害, 因此被称为“地球上最清洁的化石能源”。大型低温 LNG 储罐容量大、小占地和高效利用是 LNG 储运的一种最佳方法。随着液化天然气工程的发展, 大型低温 LNG 储罐得到了越来越多的使用。

1 大型 LNG 低温储罐的结构

大型液化天然气储罐按其所含液态及蒸汽的特点, 可以划分为单容罐、双容罐和全容罐。单容罐是一种双壁单顶储罐, 用于储存液化天然气。该罐的内部容器为圆筒形钢壳。在常规情况下, 单容罐的蒸汽仅储存在容器的内壁和外壁之间。为确保油罐的安全运行, 应在油罐周围筑堤墙。单罐油罐虽投资小, 但安全性差, 不宜作为接收站储罐的设计。

双容罐由两部分组成, 一是双壁单顶主容器, 二是外围次容器。其主容器类似于单容罐结构, 储液罐内储有 LNG 液体, 正常使用时, 应将蒸汽排出。辅助容器为耐低温钢结构, 顶部可收集漏液。此外, 为防止雨水、灰尘进入水箱内, 还需在主水箱与次水箱间加一层防水盖板。

全容罐包括两个主要部件, 一个主容器, 一个次容器。相对于双容器, 主容器和次容器是一个整体, 而非孤立。主要储罐为钢质储罐, 储罐为液态 LNG 储罐。液化天然气的蒸汽储存在拱顶内。辅助容器为钢结构, 可实现漏液的集流。这种类型的油罐安全性高, 但成本高, 建议以型钢为框架, 在型钢框架上焊接薄钢板。

2 大型低温 LNG 储罐设计要点

2.1 耐低温

液态天然气的贮存温度是 -161.5°C , 在低温和常

压条件下, 液化天然气的效率更高, 储藏效率也更高。因此, 大型 LNG 储罐必须要有良好的抗低温能力。目前, 在大型 LNG 储罐中, 普遍使用的是一种超低温的 9Ni 钢。

2.2 高安全性

天然气虽然不会对环境造成威胁, 但如果将其储存在低温下, 当它暴露在空气中时, 就会因为液态气化引起的气体分子的运动, 产生爆炸性的气体, 从而引起爆炸, 从而对人类的身体健康和生产安全造成威胁。所以, 对大型 LNG 储罐的安全性提出了更高的要求。为确保安全, 目前大型 LNG 储罐均为双层壁结构。

2.3 保证具有隔热性能

当外部环境为常温时, 大型低温液化天然气储存罐的内部温度为 -161.5°C , 内外温差约为 200°C 。为保证液化天然气贮存的有效性, 必须在内外罐内填充高性能保冷材料, 以获得优异的绝热性能。

2.4 抗风和抗震能力

大型低温液化天然气储罐的主要失效模式为稳定失效。为了保证油罐的稳定性, 必须提高油罐的抗风承载力、合理地设置防风圈、选用适当的抗震参数。

2.5 严格遵守建筑安全标准

大型低温液化天然气储罐的建造, 其结构复杂, 焊接困难, 安装精度要求高, 特别是施工检测技术要求高。所以为了确保它的施工安全, 需要对罐体架设、罐体安装、罐顶气吹顶升作业、内外壁焊接、罐底施工、检验检测和收尾工作等进行严格的控制。

3 国内外对大型低温 LNG 储罐设计与建造技术的研究进展

3.1 国外大型低温 LNG 储罐的设计和建造研究进展

美国是世界上最早研制出液化天然气技术的国

家,美国近年来在大型、低温液化天然气贮箱的设计方面一直走在世界的前列。目前,国际上对于大型低温液化天然气储罐的研究已经相当深入,其中以美国,英国,日本为代表,其技术已经相当成熟。为此,各国相继颁布了一系列的法规和规章,对大型低温 LNG 储罐的设计进行了规范。例如美国《API STD 650 钢质焊接石油储罐》;英国《BS 7777 低温用平底、立式、圆柱形储罐》等相关技术规程的出台,对我国大型低温液化天然气储罐的设计、施工具有一定的指导意义。同时,也将为其他国家开发液体天然气奠定理论基础。

3.2 我国在大型低温 LNG 储罐设计和建造技术方面的研究状况

相比于国外对大型低温 LNG 储罐的设计及建造技术的深入研究,我国才刚刚起步,许多方面都是遵循国际规范来指导我国大型低温 LNG 储罐的设计与建设。因为每个国家的情况都不一样,所以在许多情况下必须采取不同的措施。在焊接工艺的选用上,目前仍停留在简单的手工电弧焊和埋弧自动焊两种比较成熟的方法。关于钨极氩弧焊接及二氧化碳气体保护焊接的研究还没有取得突破性进展。国家对此也非常重视,现在已经加强了有关内容的设计技术和建造技术方面的攻关力量,增加了对基础技术研究的力度和资金的投入,并且已经有许多科研单位开始制定和编写国内大型低温 LNG 储罐的标准规范,力争在这方面取得突破。

4 低温 LNG 储罐的主要危险点

4.1 泄漏

LNG 在与氟、氯等物质接触时会产生强烈的化学反应,导致材料的脆性和冷收缩,从而引起设备的损伤和渗漏。储罐的金属外壳和管道与之接触时会出现电解现象,从而引起大范围的点腐蚀,从而导致 LNG 的泄漏。液化天然气一出油罐或管线就会迅速蒸发为蒸汽,而剩余的部分则会泄漏至地表,与环境中的空气混合,形成低温气雾,遇到火源就会引起爆炸。液态液化天然气在静止或流动状态下,引起池火。燃气增压泄漏时会产生液化天然气的喷射火灾,油罐顶部供料平台的供料管断裂,会引起喷射火灾。

4.2 翻滚

液化天然气(LNG)贮存时,由于两层密度相差较大的液化天然气在罐内快速上下翻腾掺混,瞬时生成大量气化气体(BOG),形成翻滚,是一种非常危险的事。翻滚状态下,液化天然气的蒸发速度可达正常蒸发 10~50 倍,会引起储罐内压力急剧升高,从

而产生超压。若不能及时将其排出,轻则引起储罐的机械破坏,重则引起液化石油气的泄漏。

5 大型低温 LNG 储罐建造技术

5.1 结构

大型液化天然气低温储罐是由内外两层组成的。外罐采用预应力砼结构,顶部为金属拱顶,上部采用分层浇筑的方法。在容器的外部壁的内部设置一层防潮板,内罐底部由三层钢板和一层保护冷却层构成。其中,最下面的一层是碳钢隔热层,中上层是 9%Ni 钢材料,在两层之间再加一层保温隔热层。该大型 LNG 低温储罐由 9%Ni 钢制成,上部为铝合金顶棚,通过吊杆与外部箱体的框架连接,上方设置保温层,并在此基础上在内外壁间填充一层珍珠岩保冷材料。在罐壁内不设管口,通过罐壁顶部的开孔与罐体相通。

5.2 施工

大型 LNG 低温储罐的建造结构复杂,焊接困难,安装精度高,特殊的施工检测技术要求高。所以,在实际的施工中,对于大型 LNG 低温储罐的施工,应注意如下问题:

5.2.1 罐体架设

架设是大型低温 LNG 储罐建设的第一个关键步骤,其施工应先于储罐或与储罐同时进行。采用内挂三脚架、辅助跳板和组合护栏的施工方法,对大型低温 LNG 储罐的贮箱壁进行施工。两层罐壁板之间的安装使用钢斜梯通道,并且在内外壁板之间设置了两条通道。外罐顶施工通道为楼梯间型的搭设通道,通过水平支承件从下往上按等间距将通道和外罐壁临时固定。

5.2.2 罐体的安装

大型液化天然气低温储罐的外壁都是预应力砼。由于横截面预应力筋的弯曲程度较大,给其安装带来了很大困难。在工程实践中,需搭建 120° 对称的三个作业平台,并配备全套的加工设备。大型 LNG 低温储罐内壁内直径的控制是保证其在下一道工序中安全、平稳的关键。另外,罐体外部没有装饰物,因此对罐体的外观、品质的控制也是十分重要的。大型液化天然气低温储罐的设计和安装主要包括如下步骤:①将外罐防潮衬板的预埋件和螺栓连接起来,然后在外罐的土建施工过程中对其进行安装;②将预埋件和固定螺栓焊接完毕后,采用倒装法将外罐顶部现场拼装、焊接,再将气吹法提升到罐二层边缘,为罐底部施工留下足够的操作空间;③外部罐顶预制分两个部分。首先,根据罐体的承载力,将罐体的顶部框架分为大片预制;其次是根据现场条件对罐体顶部的蒙皮

进行大片预制；④在罐体内侧按设计预埋件高度组焊临时支架后，将罐体顶部边沿的临时支架固定在罐体底部边缘，并将罐体中部的临时立柱固定在罐体中部；⑤把预制好的大骨架吊装到槽内进行装配和焊接。然后将大块预制蒙皮板吊装到罐身骨架上进行拼装焊接；⑥拆去罐顶边沿及罐底中央塔座的临时支护；⑦完成铝镁合金吊顶的安装。再将吊杆和斜拉筋固定，并在罐顶内侧设置一台电动葫芦单轨。

5.2.3 罐顶气吹顶升

在储罐顶部进行气吹法会遇到较大的顶升物，装置不仅需要高强度的密封，而且还存在着一系列的工艺难点，如均衡控制系统的复杂性。在建设大型液化天然气储罐时，要对选型进行适当的选择，并且要对其均衡设备和密封进行设计，并且要建立一个完善的指挥、联络和操作系统，确保作业可以一次成功地完成。采用罐顶气体顶起法施工的主要程序是：①在进行气吹顶升施工之前必须先对鼓风机、密封装置、罐顶平衡铰等装置进行安装和调试；②安装调试完毕后进行罐顶充气顶升工作，在顶升时要严密监视顶盖的空间位置及顶升压力的变化，并利用安装在外壁上的滑轮驱动铰链实现顶盖的空间位置调整，保证顶盖空间位置的控制；③在罐顶气吹至设计标高时，罐顶成对焊接的压力圈；④将罐体顶部的压力圈焊接好后，再将罐体底部的防潮板进行铺设和焊接；中、上部储罐底板、砼层、保冷层、角部防护板与保冷层的交叉施工；⑤对储罐进行充压和压力处理，在储罐顶部浇筑一次混凝土，保证混凝土的强度，然后在储罐顶部浇筑二次混凝土。

5.3 内罐壁焊接

采用 9%Ni 钢作为大型低温 LNG 储罐的内罐壁材料。9%Ni 钢极易产生热裂和氢诱导延迟开裂，且在施焊过程中极易出现磁偏斜现象，已成为石油化工领域公认的难题之一。在实际的施工中要选用适当的焊接设备、焊材及焊接工艺，而且还要加强对焊接人员的培训，特别是在焊接时要严格遵守焊接规程。在此基础上对焊接工艺进行强化，以保证焊接质量，并对焊缝中的合金成分进行有效的控制，从而使焊接接头具有较好的低温冲击韧性。

①储罐底部内层储罐的内壁由两圈 9%Ni 钢板焊接而成，而大角缝、竖缝和环缝的焊缝为加垫板，焊接方式为交流手工焊接；②内箱壁为 9%Ni 钢板，垂直方向的焊缝为手动交流焊接，为了避免热裂的发生，不预热或者预热温度低于 50℃，环缝采用双侧低电流

自动焊接，焊接期间，焊工要随时保持通信联络，保证焊接的同步性；③为了确保罐壁的垂直度、椭圆度，必须先将壁板焊接六圈，然后才能进行大转角焊缝的焊接。

5.4 罐底施工

大型低温 LNG 储罐底部采用三层钢板和两层保冷层，其结构简单，使用寿命长。LNG 储罐的建造不同于普通储罐的建造，应从储罐底部环壁板的预留洞口 180° 起，逐层交叉倒退进行。在罐顶气吹至设计标高，焊接好罐顶压力圈后进行罐底防潮板铺设、焊接、中、上罐底缘板与砼层、保冷层的施工。LNG 储罐的底部分为三层，底层是碳板防水，中上层是 9%Ni 钢板（5 毫米），三层储罐板都是搭接结构，并通过交流手工焊接。罐底焊缝防变形和成品防护是罐底施工中的关键环节。在工程实践中，通过合理安排焊接次序，采用低电流焊接方法，实现了对焊缝变形的控制，并采取加垫等方法，保证罐底的最终质量。

5.5 结束工作

罐体水压力测试结束后排放部分试压水，然后对储罐进行气液混合测试，测试合格后排放水箱内的试压水，关闭外部罐壁的临时闸门。当内罐彻底干燥后再进行顶棚与内壁的密封，以及内壁外侧的玻纤毡的安装，并在内壁、外壁及天花板上填充珍珠岩，使填充值满足设计要求。最后，对储罐进行氮气保护，完成大型 LNG 低温储罐主体的安装。

6 总结

随着国家对 LNG 资源的日益关注，大型低温 LNG 储罐的建设投入较大，因此，LNG 的设计与建设必须实现国产化。如果能做到自主研发，不仅可以节省大笔的外汇开支，而且也可以成为我国的优势技术，开拓国外市场。为此，本文通过对国内外大型 LNG 储罐的研究，对其进行系统的研究，提炼出适合我国国情的“大型低温 LNG 储罐设计和施工规范”，从而推动该项目的顺利实施。

参考文献：

- [1] 杨小兵. 浅谈大型 LNG 低温储罐的建造技术 [J]. 工程建设 (维泽科技), 2020,3(2):151-153.
- [2] 吴明澄. 大型立式低温 LNG 储罐的结构设计和强度研究 [J]. 化工设计通讯, 2020,46(1):25-26.
- [3] 贺彬, 郭正东. 浅谈 LNG 低温储罐预冷技术 [J]. 广东化工, 2019,46(18):126-127.
- [4] 王冉, 胡斌, 周世健. 浅析 LNG 低温储罐的失效实验研究 [J]. 石化技术, 2020,27(11):31-33.