

大型低温储罐的设计建造

刘 超 倪平平 (中石化中原石油工程设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘 要: 本文梳理了国内外大型低温储罐设计建造的标准体系, 归纳了储罐设计的总体流程和主要结构的设计计算, 并提出了几个设计的注意点, 为设计过程中的标准体系选用和设计思路提供借鉴与参考。

关键词: 低温储罐; 全容罐; 设计流程; LNG 液化工厂

随着全球能源结构转型进程加速, LNG、液氮等低温介质在工业生产和能源储备中的战略地位日益凸显。作为低温介质储存的核心装备, 大型低温储罐因其大容量、高安全性等技术特征, 已成为液化工厂、接收站等关键设施中不可或缺的基础设施。

目前国内外相关技术标准体系呈现多元化发展态势。然而工程实践中普遍存在标准体系适用性判断不足、设计流程系统性梳理匮乏等问题, 现有研究多聚焦于特定结构如吊顶系统、桩基设计的优化分析, 对标准体系的横向对比研究及设计方法论的总结尚存不足。

本文系统梳理国内外主流标准的技术特征与适用范围, 构建设计过程的框架体系、提出设计过程的一些重点, 以期为提升低温储罐设计的规范性提供借鉴。

1 总体要求

大型低温储罐的设计需综合考虑介质特性、极端环境条件及突发自然灾害等多重因素, 其关键技术指标主要体现在以下方面:

①具有极端温度耐受范围, 以应对工艺启停时的热应力变化;

②有效的压力调控机制, 维持内部压力始终在可控范围, 并配置多重压力保护装置;

③满足抗震需求, 同时校核风载、雪载等极端自然天气下的复合承载能力;

④良好热力学性能, 满足蒸发率这一关键性能指标。

2 设计建造规范与标准

2.1 国际标准体系

欧标体系主要以 EN 1473、EN 14620、EEMUA 207 等为主。其中 EN 1473 偏重于站场式的整体性要求, EEMUA 147 对储罐运行和维护提出了更严格的要求。EN 14620 对储罐总则、储罐理念、设计载荷、设计的具体要求、保冷设计及开车等做出更详细的规定。

美标体系以 NFPA 59A、API STD 625、API 620、

ACI 376 等为主。其中 NFPA 59A 侧重站场整体性要求, API STD 625 对储罐总则、储罐理念、设计载荷、设计的具体要求、保冷设计及开车做了更详细的规定。API 620 主要描述储罐钢制部分的设计, ACI 376 是土建部分的设计。

日本虽也有一套完善的标准体系, 但由于其自身特殊的地理位置, 储罐设计更偏保守, 使得造价较高, 因此国内储罐的设计基本没有参照目标。

2.2 国内标准体系

国内大罐行业发展较晚, 现有标准前期主要由国外标准采标, 现在也逐步启动了修订, 具体如表 1 所示。

表 1 储罐设计的相关国内主要标准

类型	标准号	标准名称	对应标准
场站标准	GB/T 20368	液化天然气 (LNG) 生产、储存和装运	NFPA 59A
	GB/T 22724	液化天然气设备与安装 陆上装置设计	EN 1473
储罐设计标准	GB/T 50938	石油化工钢制低温储罐技术规范	
	GB/T 26978	现场组装立式圆筒平底钢质液化天然气储罐的设计与建造	EN 14620
	SY/T 0608	大型焊接低压储罐的设计与建造	API620
	SY/T 7304	低温液化天然气储罐混凝土结构设计和施工规范	ACI 376M

3 全容罐结构和主体材料

3.1 结构

全容罐的结构如图 1 所示, 内罐均为金属材质, 外罐分为预应力混凝土或金属外罐两种, 金属罐目前最大做到 $10 \times 10^4 \text{m}^3$, 但根据行业内经验, 罐容大于 $5 \times 10^4 \text{m}^3$ 的储罐一般采用预应力混凝土外罐, 其内表面有起密封作用的内衬钢板。

罐顶有悬挂式绝热支撑平台, 内、外罐之间用膨胀珍珠岩、弹性玻璃纤维或泡沫玻璃砖等材料绝热保温。全容罐占地面积小, 当内罐发生泄露事故时外罐可以容纳 LNG 和 BOG, 避免火灾的发生。

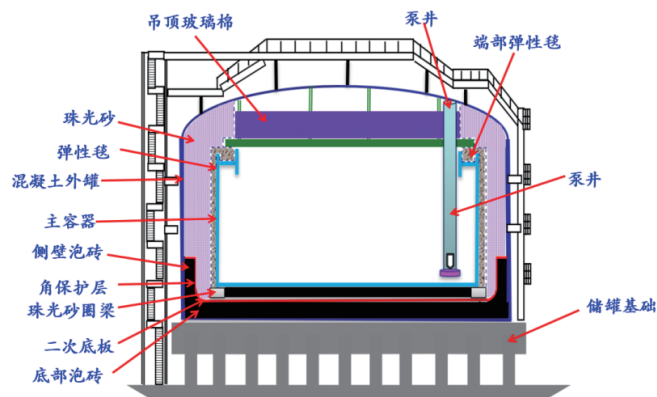


图 1 全容罐结构

3.2 主体材料

内罐材料主要有 S30408 和 9%Ni 钢。选择材料应根据罐容综合考虑经济性、材料强度及热膨胀系数。如国标 GB/T26978-2021 中 5.2 节就对储罐钢材做出要求。

罐容 30000m^3 以下可选用不锈钢 S30408 作为耐低温部件的材料；而罐容在 30000m^3 以上时由于直径较大，冷态时产生的低温收缩变形较大，需采用热膨胀系数较小的 9%Ni 钢材料^[1]。

内罐筒体加强圈及热角保护系统材料选择同内罐。采用钢制外罐时外罐材质一般与内罐一致；预应力混凝土全容罐外罐则用 C50 混凝土和低温钢筋，内部衬里一般为耐低温钢板。

4 设计过程

4.1 总体设计流程

设计流程可大致分为 4 个阶段：

第一阶段：确定客观界面条件，如设计温度、设计压力、设计风速、地震载荷等，包括了解项目所需罐容，还应考虑运行条件如最大输入流量、最大输出流量等。

第二阶段：由外部条件开始确定重要参数，如储罐直径、高度（径高比）等，同时对抗震相应加速度进行校核。此外还包括重要结构的尺寸、环形空间预留量、底部保冷高度等内容，同时确定外罐结构型式。

第三阶段：进行抗震设计，包括内外罐及吊顶的响应加速度等，将主要结构的模型，结合考虑 ULS 工况和 SLS 工况进行计算。同步开展罐体公式计算、吊顶及 TCP 的建模及由有限元计算和局部的疲劳计算。

第四阶段：进行施工图绘制，如焊接形式、保冷图、安装图、土建图等。

4.2 主要结构的设计计算

储罐的计算校核需按标准进行，包括主容器筒体、

底板、加强圈、拉带、次容器顶盖、筒体、承压环、加强圈、底板、拉带的设计计算及校核。

按 API620 附录 L 及 API650 附录 E 对主容器及次容器的筒体、拉带要求进行各种工况下的计算及校核。

按标准对主容器、次容器、及对主、次容器拉带作 OBE、SSE 地震动态分析计算、晃液高度计算、储罐蒸发率计算、储罐放空量计算、主容器有效容积（含冷态下）计算，同时还需进行补强圈的计算校核及管道的应力分析等。

4.3 设计注意点

4.3.1 高径比

储罐设计应先确定储罐的直径和高度，也就是高径比。低温储罐的高径比一般不大于 1.25；对于超大型储罐，一般不大于 1。

储罐的高径比与下面几个因素有关：

- ①罐容。罐容越大，高径比越大；
- ②土壤条件。土壤条件高，高径比越大；
- ③设防地震。设防地震小，高径比越大；
- ④场地。场地空间小，高径比越大；
- ⑤锚固带（有锚固带，高径比可增大）。

4.3.2 蒸发率

基于低温储罐目前使用的保冷材料性能及厚度设置，储罐的蒸发率一般在 0.1% 到 0.04% 之间，影响储罐蒸发率的因素主要有储存产品的物理性能如温度、密度、汽化热等、储罐的容积、同等容积下储罐高径比、外罐的材料和厚度（影响较小）。

定蒸发率时，有中压城市燃气管道或长输管道，追求普通接收站低温罐的蒸发率意义不大，但若用作战略储备库，则蒸发率应尽可能小。

4.3.3 吊顶材料及型式

吊顶一般采用不锈钢板或铝合金板 5083-0。采用不锈钢板通常组焊并通过设置多圈环向筋板加强；使用铝合金板加强筋板则采用环向和径向组合的方式。

使用铝合金板主要目的是降低成本，可缩短工期，且重量相较于不锈钢板大幅降低。因此瓦楞型铝吊顶由于其工厂化预制程度高、工期短，更加环保，且克服了平板型铝吊顶刚性差、热收缩率高，组装及焊接时易发生较大的变形等缺点，逐步成为吊顶的主流结构型式^[2]。

4.3.4 液体翻滚

在液化天然气储存设施的日常运行中，分层是普遍存在的物理现象，其本质源于不同组分 LNG 的密度

差异特性。工程实践中通常观察到两种典型分层工况：其一是长期静置储存条件下的自然分层，其二是多源介质注入同一储罐，其中后者更为普遍。

若储罐内液体分层后，相邻两层之间的密度差、温度差达到一定值后就会发生翻滚现象^[3]。同时使得 LNG 迅速大量蒸发导致压力迅速升高，若内部压力无法及时排出，可能引发储罐爆裂的重大安全事故。

为了防止翻滚，需要做到以下几点：①储罐应设有两条进料管线，分别从顶部和底部填充 LNG；②将不同气源分开注入储存，避免因密度差引起 LNG 分层；③正压泄放安全阀设置时泄放量需考虑 LNG 的翻滚现象；④设置 2 个多点温度测量（测温元件间距一般不大于 2m）；⑤设置测量不同液位液体温度、密度的测量系统，即 LTD。

5 保冷设计

低温储罐内外存在较大温度差，因此储罐应具有足够的保冷性能。保冷设计主要遵循以下原则：

- ①储罐的外表面不结露、结霜（接管局部区域允许短时间的结露）；
- ②满足项目的储罐蒸发率要求；
- ③尽可能少维护，如果可能且可在役维护；
- ④液化厂的储罐，在不增加太多成本的情况下蒸发率尽可能低；
- ⑤要考虑降低事故的灾难后果及处理时间。

5.1 保冷材料

保冷材料性能的优劣直接决定了存储的安全性与经济性。若性能不达标就需要增加 BOG 处理能力，增加能耗。若 BOG 处理能力不够，需要排放火炬，造成能源浪费和大气污染，如果排放不及时，甚至造成超压报警，给运行带来安全风险。常见储罐保冷材料主要见表 2。

5.2 保冷计算

储罐保冷设计、漏热计算属于纯传热学计算。具体难点在于考虑外部辐射时外罐壁、外罐顶温度的确

定（外罐底温度不考虑辐射作用，只考虑自然对流作用，其罐底温度计算属于导热与对流传热综合计算较为简单），相对应导热、对流而言辐射传热本身计算较为复杂。

通过对 LNG 储罐顶部玻璃棉毡、侧部珠光砂、底部泡沫玻璃砖、管道及内罐锚带（若有）等不同部位漏热量的计算，能够获得储罐总的自然漏热量，进而计算出日蒸发率。

$$Q_{\text{总}} = Q_{\text{顶}} + Q_{\text{侧}} + Q_{\text{底}} + Q_{\text{管}} + Q_{\text{锚}} \quad (\text{若有})$$

式中： $Q_{\text{总}}$ 为日漏热量，kJ/d。

LNG 低温储罐日蒸发率：

$$\alpha = x \times 100\%$$

式中： α 为储罐日蒸发率，%； x 为 LNG 日蒸发量，kg/d； G 为储罐内 LNG 总容量，kg； L 为 LNG 的汽化潜热，kJ/kg； ρ 为 LNG 的密度，kg/m³； V 为储罐的有效容积，m³。

6 结语

本文系统梳理了国内外主流标准体系的技术特点与适用范围，结合全容罐结构设计、材料选型及设计流程，构建了涵盖储罐总体布局、结构计算与关键参数优化的设计框架。通过分析高径比、蒸发率控制、吊顶型式、液体翻滚防范等核心问题，明确了设计过程中需重点关注的工程矛盾与解决方案；同时，基于保冷材料特性与热力学计算，提出了保冷系统设计的核心原则，为提升储罐能效与长期运行可靠性提供了理论支撑。

参考文献：

- [1] 王荣华, 王芳云, 张丹清. LNG 双金属全容储罐关键技术 [J]. 石油工程建设, 2020, 46(03): 42-45.
- [2] 魏明. 瓦楞型铝吊顶在大型 LNG 储罐中的应用 [J]. 石油工程建设, 2019, 45(02): 58-60.
- [3] 王萍, 彭文山, 曹学文, 等. 大型 LNG 储罐储液翻滚特性的多阶段研究 [J]. 石油工程建设, 2016, 42(01): 14-20.

表 2 储罐保冷主要材料

使用部位	材料名称	描述
罐顶	弹性毡或离心玻璃棉	铺设在内罐吊顶板
罐壁	弹性毡	挂在内罐外壁
	珍珠岩	填充在内外罐壁间环形空间
	辅材	玻璃布、保温钉、低温粘结剂、铝箔胶带、夹持板、钢索、螺栓螺母等
罐底	泡沫玻璃砖	用于 TCP、罐底环梁部位、罐底中心部位的绝热，根据设计进行选型
	沥青毡	用于泡沫玻璃层间，以及泡沫玻璃与找平层间
	混凝土圈梁	珍珠岩混凝土预制块或现场浇筑混凝土
	辅材	沥青底漆、干砂、低温粘结剂、玻璃棉等