

$16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐罐顶气顶升工艺的计算分析

张小鹏 李 达 邢怀念

大连理工大学工程力学系

张小鹏等. $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐罐顶气顶升工艺的计算分析. 天然气工业, 2011, 31(6): 89-91.

摘 要 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐是国际上 LNG 接收站存储系统的常用储罐, 其制作一般采用气顶升工艺。该工艺施工速度快, 成本相对较低, 但影响因素多、施工难度高、安全风险大, 国内项目以前均是由国外工程公司总承包, 气顶升方案也均由外方制订, 没有给出详细的计算分析过程与步骤, 目前, 国内施工单位对该工艺的施工一般也是参照国外通俗做法, 鲜有详细的计算分析。为此, 对大连 LNG 项目 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐罐顶气顶升工艺方案的供气装置和密封装置进行了计算分析, 确定了 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐的施工方案, 并以计算分析结果为依据指导实际施工, 收效良好, 对类似大型 LNG 储罐罐顶气顶升工艺的设计具有一定参考价值。

关键词 LNG 接收站 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐 气顶升 工艺 施工方案 供气装置 密封装置 计算分析

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2011.06.019

天然气低温常压储存方式因其具有储存效率高、占地少、储存规模易于大型化等优点在液化天然气 (LNG) 接收终端站、天然气液化厂和城市燃气调峰系统中得到了越来越广泛的应用^[1-4]。LNG 储罐罐顶的气顶升工艺却是 LNG 储罐设计与施工中的难点, 需要解决顶升件重量大、顶升件与罐壁密封要求高以及平衡控制装置复杂等一系列技术难点。LNG 储罐罐顶的气顶升是大型 LNG 储罐施工的重要控制环节, 施工前要根据罐顶重量合理选择鼓风机, 设计平衡装置和密封结构, 建立完善的指挥、联络及操作体系, 确保罐顶气顶升作业一次性安全顺利完成^[5]。

大连 LNG 项目是国家“十一五”LNG 项目发展规划的重点项目, 也是中国石油天然气集团公司第一批引进海外 LNG 资源的大型项目。LNG 储罐罐顶气顶升工艺的基本原理是: 利用拱顶与外罐罐壁之间可形成相对密闭空间的特点, 使用鼓风机向储罐拱顶以下的密闭空间源源不断地输入一定量的低压空气, 使钢结构的罐顶在克服自重及与外罐罐壁之间摩擦力的情况下, 按照预定路径平稳上升至设计高度, 并实现与罐顶承压环连接的过程^[6]。目前, 国内施工单位对该工艺的施工一般都参照国外通俗做法, 鲜有详细的计算分析。为此, 对大连 LNG 项目 T-1201 和 T-1202 储

罐 ($16 \times 10^4 \text{ m}^3$) 钢制拱顶气顶升工艺进行了计算分析。

1 工程概况

大连 LNG 项目的 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐罐顶总重量为 7 000 kN, 外罐直径为 82 m, 罐壁为预应力混凝土结构, 储罐罐顶提升高度为 36.504 m, 储罐截面内径为 82 m, 罐顶拱高约为 10 m, 储罐顶横截面半径为 40.875 m, 储罐的横截面积为 $5\,246.2 \text{ m}^2$ 。如此大体积、大重量的钢结构要平稳上升 36 m 左右的高度具有相当大的技术难度, 需要对每个系统进行严密的计算和调试, 使各系统协调配合才能成功实现顶升。

为了确保在气顶升过程中罐顶拱不会发生倾覆, 设置了平衡装置。平衡装置主要由顶部锚固件、底部锚固件、中间转向滑轮组及钢丝绳拉索等组成^[6], 沿着罐顶拱环向分布, 其结构如图 1 所示。供气装置相关参数的确定和密封装置的设计是气顶升工艺的重点和难点, 传统设计工艺采用单一聚乙烯板密封, 即在罐顶拱环向固定聚乙烯板, 通过聚乙烯板与罐壁在气压下的紧密贴合来实现密封。这种密封方法在罐顶拱与罐壁间的间隙较窄的情况下非常有效, 但当罐顶拱与罐壁间的间隙大到一定程度时, 密封聚乙烯板会因内压

作用而被吹翻,密封失效。针对上述情况,出现了钢板与聚乙烯板组合的密封装置^[7],其结构如图2所示。

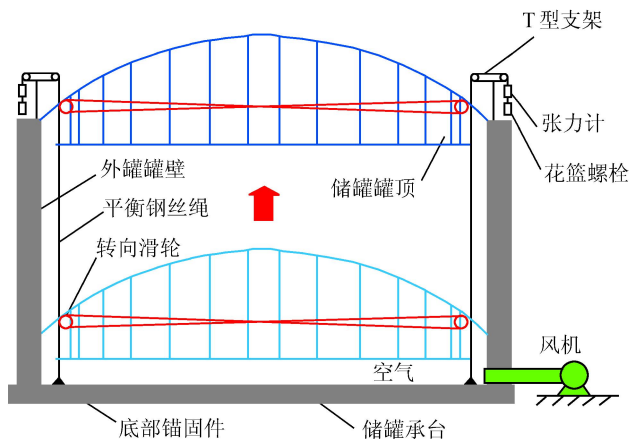


图1 平衡装置结构图

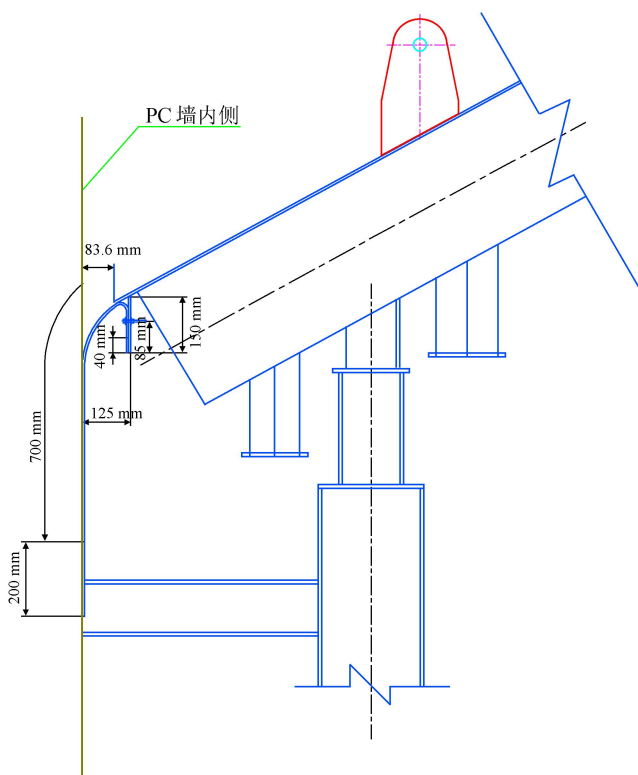


图2 密封装置结构图

密封板材料要求具有一定的强度及弹性,可紧贴预应力混凝土墙内壁滑动且不会被吹翻^[8],一般采用镀锌钢板作为密封板。大连LNG项目 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG储罐罐顶气顶升工艺密封用镀锌钢板的规格为 $0.97 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$ (长度精度为PL.A),密封用聚乙烯板的规格为 $0.15 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm} \times 1\,100 \text{ mm}$ (长度精度为PL.A),密封镀锌板与钢制拱顶边缘采用 $6 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的镀锌螺栓连接。镀锌钢

板表面粘贴聚乙烯板,聚乙烯板一端与钢板平齐,另一端留 200 mm 不粘结,连接示意图如图3所示。

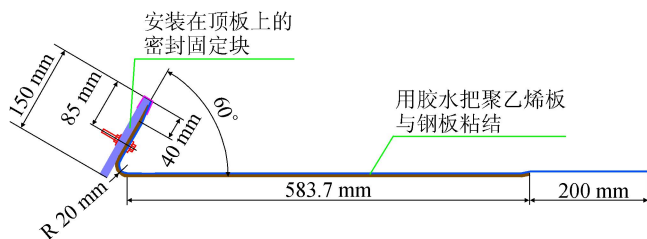


图3 密封钢板与聚乙烯板的连接示意图

2 供气装置的计算分析

2.1 风压的确定

从理论上讲,只要罐顶受到的空气浮力与它的自重形成一对平衡力,罐顶便可平稳上升,所以理想状态下气顶升的风压与大气压的差值为罐顶自重与罐内空间水平横截面积之比^[6]。但实际中由于存在风量损失、罐顶与预应力混凝土墙之间的摩擦力等因素的影响,顶升压力的计算必须考虑附加系数,其计算公式为:

$$p = p_{\text{升}} - p_0 = p_{\text{平}} + p_{\text{附}}$$

式中 $p_{\text{升}}$ 为顶升风压,Pa; p_0 为标准大气压,Pa; $p_{\text{平}}$ 为静平风压,Pa; $p_{\text{附}}$ 为附加风压(根据现场经验确定),Pa。

$p_{\text{平}}$ 和 $p_{\text{附}}$ 又可以分别表示为:

$$p_{\text{平}} = G/S$$

$$p_{\text{附}} = (0.10 \sim 0.20)p_{\text{平}} = (0.10 \sim 0.20)G/S$$

式中 G 为顶升最大重量,N; S 为罐体横截面积, m^2 。那么, $p_{\text{升}}$ 也就可以表示为:

$$p_{\text{升}} = p_{\text{平}} + p_{\text{附}} + p_0 = (1.10 \sim 1.20)G/S + p_0$$

2.2 风量的确定

风机风量的确定是指在顶升最后一圈时间内,罐体内腔充满使罐体顶升、具有一定压力气体的风量;考虑到漏风损失,需对风机风量进行修正。根据气体方程,温度一定的情况下压力与体积的乘积等于恒量,则有:

$$p_0(V_0 + Q) = p_{\text{升}}V$$

$$Q = (p_{\text{升}}V - p_0V_0)/p_0$$

式中 Q 为进风量, m^3 ; V 为顶升后储罐内总容积, m^3 ; V_0 为顶升前罐顶内的初始容积, m^3 。

考虑到顶升过程中的风量损失,计算进风量 Q 时需要加上一个调整系数 K ,即风量的计算式为:

$$Q = K(p_{\text{升}}V - p_0V_0)/p_0$$

2.3 风机的选型

风机选型依据上述风压和风量计算公式进行。施

工要求顶升速率为 $150 \sim 250 \text{ mm/min}$,这就规定了进风速率和完成顶升行程需要的总时间。由这些参数即可确定风机的参数,从而对风机进行选型。罐顶气顶升的总重量为 $7\,000 \text{ kN}$,储罐的横截面积为 $5\,246.2 \text{ m}^2$,则有:

$$\begin{aligned} p_{\text{平}} &= G/S = \\ & (7\,000 \times 1\,000)/5\,246.2 = 1\,334.3 \text{ (Pa)} \\ p_{\text{升}} &= (1.10 \sim 1.20)G/S + p_0 = \\ & (1.10 \sim 1.20)(7\,000 \times 1\,000)/5\,246.2 + \\ & 101\,325 = 102\,793 \sim 102\,926 \text{ (Pa)} \end{aligned}$$

风机风量计算如下:

$$\begin{aligned} V &= \pi D^2 h_1 / 4 + V_{\text{拱}} = \\ & \pi \times 82^2 \times 38.415 / 4 + 14\,052 = 216\,819 \text{ (m}^3\text{)} \\ V_0 &= \pi D^2 (h_1 - h_2) / 4 + V_{\text{拱}} = \\ & \pi \times 82^2 \times 1.911 / 4 + 14\,052 = 24\,139 \text{ (m}^3\text{)} \\ Q &= K(p_{\text{升}} V - p_0 V_0) / p_0 = \\ & 1.5(216\,819 \times p_{\text{升}} - 101\,325 \times 24\,139) / 101\,325 = \\ & 293\,583 \sim 294\,159 \text{ (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

式中 D 为罐顶直径,取值 82 m ; h_1 为罐体壁板高度,取值 38.415 m ; h_2 为顶升位移,取值 36.504 m 。此处考虑 35% 的空气泄漏量,因此 K 取值为 1.5。

依据计算结果,以静压为 $3\,430 \text{ Pa}$ 、风量为 $108\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 作为选择风机的参数。取 2 台风机同时工作,顶升时间大约为 160 min 。

3 密封系统的计算分析

密封系统的计算主要是对密封材料在施工工况下能否达到密封效果进行校核计算。密封材料受到的顶升气压为 $102\,793 \sim 102\,926 \text{ Pa}$,为了安全起见,取值为 $102\,926 \text{ Pa}$,同时由于罐顶受到大气压的作用,所以密封材料受到的合外力气压为 $1\,601 \text{ Pa}$ 。采用 ANSYS 分析软件对气顶升工艺密封系统的理想状态进行了模拟分析。密封系统由镀锌钢板和聚乙烯板构成,镀锌钢板厚度为 0.97 mm ,材料为 Q235A,弹性模量取值为 206 GPa ,泊松比取值为 0.3 。考虑到密封装置曲率很小,故按照平面建立模型,模型环向长度取 $1\,000 \text{ mm}$ 。考虑到实际情况的复杂性,保守处理密封板与墙体的边界条件,该计算模型未考虑密封钢板与预应力混凝土墙体的摩擦。采用 SHELL93 单元对镀锌钢板进行网格划分。

3.1 理想状态下的计算分析

密封系统的理想状态为罐顶与周边墙体间隙均匀,均为 83.6 mm 。施加内压 $1\,601 \text{ Pa}$ 时应力分布计算结果显示最大应力为 46.5 MPa ,小于 Q235A 钢的

屈服强度(235 MPa),表明在 $1\,601 \text{ Pa}$ 内压时密封钢板处于弹性工作状态,未进入塑性破坏阶段。竖向位移计算结果显示最大竖向位移为 0.57 mm ,整个密封钢板未被吹翻,表明在 $1\,601 \text{ Pa}$ 内压时密封钢板能够达到密封效果。

3.2 偏斜状态下的计算分析

密封系统的偏斜状态为罐顶与周边墙体间隙不均匀,罐顶边缘与预应力混凝土墙体一侧接触,相对一侧最大间距为 200 mm 。密封系统的偏斜状态考虑了实际施工过程的复杂性、不确定性、罐顶变形及混凝土墙体不规范等因素。施加内压 $1\,601 \text{ Pa}$ 时应力分布计算结果显示最大应力为 194.8 MPa ,小于 Q235A 钢的屈服强度(235 MPa),表明在 $1\,601 \text{ Pa}$ 内压时密封钢板处于弹性工作状态,未进入塑性破坏阶段。竖向位移计算结果显示最大竖向位移为 10.2 mm ,整个密封钢板未被吹翻,表明在 $1\,601 \text{ Pa}$ 内压时密封钢板能够达到密封效果。

4 结束语

以大连 LNG 项目为例,对 $16 \times 10^4 \text{ m}^3$ LNG 储罐罐顶气顶升工艺的供气装置和密封装置进行了计算分析,实践证明相关计算分析与实际情况比较吻合,效果良好,对大型 LNG 储罐气顶升工艺设计具有一定参考价值。

参 考 文 献

- [1] 王冰,陈学东,王国平.大型低温 LNG 储罐设计与建造技术的新进展[J].天然气工业,2010,30(5):108-112.
- [2] 王武昌,李玉星,孙法峰,等.大型 LNG 储罐内压力及蒸发率的影响因素分析[J].天然气工业,2010,30(7):87-92.
- [3] 王良军,刘杨,罗仔源,等.大型 LNG 地上全容储罐的冷却技术研究[J].天然气工业,2010,30(1):93-95.
- [4] 李佩铭,焦文玲.天然气液化流程模拟中立方型状态方程的计算[J].石油与天然气化工,2007,36(6):444-447.
- [5] 彭京旗.大型 LNG 低温储罐施工技术[J].石油化工建设,2005,27(4):12-14.
- [6] 张成伟,洪宁,吕国锋.16 万 m^3 LNG 储罐罐顶气顶升工艺研究[J].石油工程建设,2010,36(2):32-36.
- [7] 杨新和.气吹法安装 LNG 储罐罐顶[J].石油化工建设,2009,31(3):58-60.
- [8] 叶海明.50000 m^3 LNG 储罐钢罐顶气升技术[J].施工技术,2009,29(11):34-36.