

浅谈低温罐气顶升施工工艺

施星光

宁波市特种设备检验研究院，浙江 宁波 315048

摘要：大型低温储罐多采用全包容结构，外罐穹顶采用气吹顶升施工工艺，气吹顶升工艺涉及因素多，具有施工难度高，技术含量高，安全风险小，施工进度快，成本低等特点，是大型低温储罐施工中最为重要的控制环节，本文通过在宁波海越 120000m³低温丙烷储罐上气顶升的成功经验，详细阐述气顶升施工工艺的几大关键技术：平衡及配重系统、动力系统、密封系统、测量系统等。

关键词：气顶升；低温罐；动力系统；密封系统；平衡及配重系统

中图分类号：TE972

1 概况

1.1 工艺原理

利用拱顶与外罐混凝土之间可形成相对密闭的空间的特点，使用风机向储罐拱顶以下的密闭空间内源源不断的输送一定量的低压空气，使罐顶钢结构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相连接

1.2 工程简介

宁波海越项目的 12×10⁴m³ 低温丙烷储罐罐顶总重量约为 635 吨，外罐直径为 72m，罐壁为预应力混凝土结构，储罐罐顶提升高度为 36.977m，储罐截面内径为 70m，罐顶拱高约为 10m，储罐顶横截面半径为 35 m 储罐的横截面积为 3848.5m² 如此大体积大重量的钢结构要平稳上升 37m 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。下面重要阐述气顶升工艺的各项统计计算及关键系统。

2 施工工艺流程

见图 1。

3 罐顶气顶升时的重量计算

罐顶气升时的重量包括所有随罐顶气升的结构件及临时构件的重量之和，以 G 来表示，见下表 1（重量统计来源于宁波海越 12 万立低温罐）：

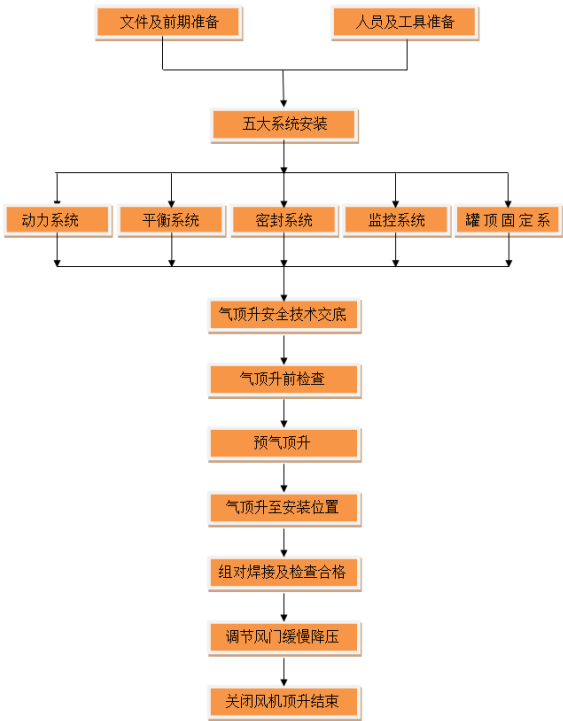


图 1 施工工艺流程

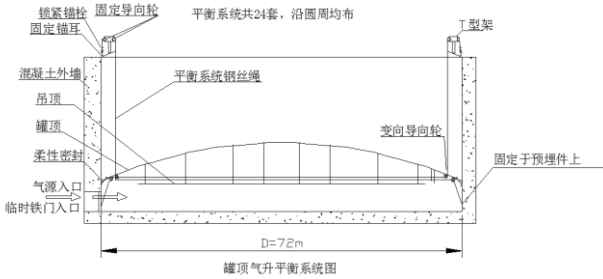
表 1 海越低温罐气顶升重量汇总表

序号	分部分项名称	重量 Kg	备注
1	外罐罐顶	354145	
2	内吊顶	196328	
3	套管及接管	11300	
4	顶升用临时工装	11500	
5	平衡装置及平衡块	2749+ 1170（吊 顶平台配 重）	根据平衡配重 块的计算所得
6	摩擦阻力损耗	57717	取 1~5 累加重 量 0.1 系数
7	总重	634890	单位：Kg
8	换算单位 1Kg=0.0098KN	6222	单位：KN

4 平衡导向及配重系统

4.1 平衡导向系统的安装

平衡导向装置由底部吊耳、中间导向滑轮、平衡钢丝绳以及 T 型架以及环梁预埋件组成。从外罐混凝土环梁上均匀设置 24 个平衡装置临时支撑，并用钢丝绳由 T 型支撑经外罐顶边缘设置的滑轮转至穹顶下方，再设置滑轮引至外第一层外罐壁处的 24 块埋件固定端上锁紧。如下图所示：



平衡导向系统的工作原理：（1）对水平方向上的偏移或周向转动的校正。如图 2 所示，钢丝绳安装后处于拉伸状态，当出现水平方向上的偏移或周向转动时，垂直段（罐顶上部和下部）的钢丝绳必将被再次拉伸，拉伸钢丝绳的反作用力对水平方向的偏移和周向转动进行校正。（2）罐顶向某一方向倾斜，该方向上的钢丝绳将被拉长，产生的反作用力将对倾斜进行一定量的校正。

4.2 平衡配重系统的设置

由于低温储罐的罐顶管并不是均匀分布的，这将导致整个罐顶的重心发生偏移，为了保证在顶升过程中罐顶的重心始终位于罐顶的中轴线上，罐顶在相同的风压作用下得到均等的压强从而使储罐罐顶水平上升要对储罐罐顶进行配重。

系统的重心计算公式如下：

$$X_c = \frac{\sum P_i X_i}{\sum P_i}, \quad Y_c = \frac{\sum P_i Y_i}{\sum P_i}, \quad Z_c = \frac{\sum P_i Z_i}{\sum P_i}$$

式中 P_i -----第 i 个物体的质量，kg

X_i, Y_i, Z_i -----第 i 个物体的坐标

X_c, Y_c, Z_c -----系统的中心坐标

在顶升过程中，只要保证罐顶的重心在中轴线上即可，故此处不考虑 Z 向（竖向）重心坐标的位置变化。建立坐标系，取设计图纸中 900 为 x 轴正方向，3600 为 Y 轴正方向，罐顶中心为坐标原点。

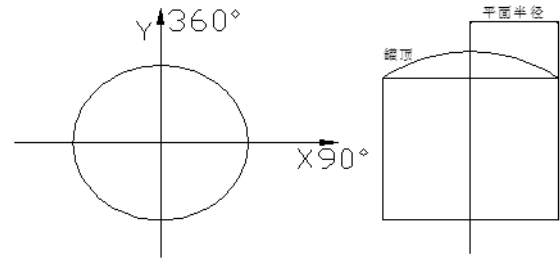


图 4.2 平衡配重坐标示意图

为保证在顶升过程中系统平衡，则需保证在配重后系统重心位于中轴线上，即满足以下公式：

$$\sum p_i x_i + \sum p_m x_m = 0, \quad \sum p_i y_i + \sum p_m y_m = 0$$

根据上述的计算结果，再根据平衡配重原理图，在其重心的中心对称位置放置平衡配重块即可。

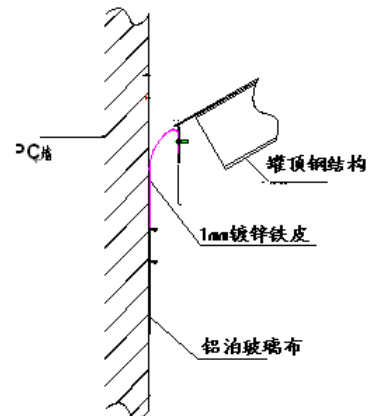
5 密封系统

5.1 气顶升前的主要密封工作

（1）罐顶开孔，要求用钢板在开孔接管的顶部采用焊接的方法进行密封。

（2）混凝土外罐，包括预留的大门、有预埋的钢管以及在混凝土承台和罐壁上预留的排水孔。预留大门用钢架和钢板进行封闭，预埋钢管在混凝土外墙顶部用盲板封闭，排水孔用混凝土浇注封闭。

（3）罐顶板四周与混凝土外罐壁间的间隙，最为关键，此部分采用柔性密封结构：首先根据密封装置布置图在罐顶边缘下方距罐壁约 120mm 的位置设置一圈密封环，环上每隔一段距离开一个 $\phi 8$ 的圆孔，用于螺栓固定密封板，用 1mm 的镀锌铁皮制作密封板，将密封板用螺栓固定在密封固定环上。密封材料选用规格为 $0.4 \times 500 \times 1900$ 的铝铂玻璃布，铝铂玻璃布上端用螺栓固定在镀锌铁皮上，中部用压条螺栓固定在密封板上，铝铂玻璃布之间使用胶带粘贴牢固。铝铂玻璃布的下端自由滑动（详见下图所示）。





5.2 密封装置的安装注意事项

(1) 密封装置应在 PC 墙内壁修补完成后安装, 以避免杂物损伤密封面。PC 的修补包括表面平整处理、各类毛刺、异物的清理及空洞的修补。

(2) 密封装置的安装要确保每个接缝有足够的搭接宽度并且粘接牢固, 密封面没有破损缺陷及漏气点。

(3) 密封装置的所有材料必须防火, 否则在罐顶与承压环的焊接过程中一旦点燃密封装置, 可能引发安全事故。

6 动力系统

供气系统是储罐顶升的动力系统, 也是气顶升工作的关键, 供气系统的设计要完成升顶风压、风量的确定; 风机选型; 供电系统、风道、风压调节及测量装置的设计等。

6.1 风压的确定

用风机向已组装好的部分罐体内腔输送具有一定压力的空气, 在不考虑任何损失的情况下, 罐体的内腔上部受到向上的推力和底板受到向下的力是一对作用力与反作用力, 它们大小相等, 方向相反。但由于存在漏风损失和两圈壁板间的摩擦阻力而消耗的风压等, 因此风机所提供的压力除了克服罐体的重力、使罐体在任何位置处于平衡状态外, 还要克服附加因素造成的压力损失使罐体被顶升。即:

$$P_{\text{升}} = P_{\text{平}} + P_{\text{附}} + P_0 = K_1 \frac{G}{S} + P_0 = (1.10 \sim 1.20) \frac{G}{S} + P_0$$

式中, $P_{\text{升}}$ ——顶升风压, Pa;

$P_{\text{平}}$ ——平衡风压, Pa;

$P_{\text{附}}$ ——附加风压, Pa, 根据现场经验确定;

G ——顶升最大重量, N;

S ——罐体横截面积, m^2 。

6.2 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。根据气体方程计算, 温度一定情况下 $PV = \text{恒量}$, 即:

$$Q = \frac{(V \times P_{\text{升}} - P_0 \times V_0) \times K}{P_0}$$

式中, Q ——鼓风量, m^3 ;

V ——顶完时罐体的总容积, m^3 ;

V_0 ——顶升前罐内的初始容积, m^3 ;

K ——风机风量修正系数, 考虑 20% 的漏风量系数, 取 1.2;

$P_{\text{升}}$ ——顶升风压, Pa;

P_0 ——标准大风压, 取 101325Pa。

6.3 风机的选型

风机的选型依据上述风压和风量计算公式进行。

例如: 罐顶气顶升总重量为 634890kg, 即: $G=6222\text{KN}$, 储罐顶横截面半径为 36m, 则储罐的横截面积为 4071m^2 。(升顶总重包括所有随罐顶一起提升的设备材料。)

即: $S = 4071\text{m}^2$

$$\text{则, } P_{\text{平}} = \frac{G}{S} = \frac{6231 \times 1000}{4071} = 1530.6(\text{Pa})$$

$$P_{\text{升}} = P_{\text{平}} + P_{\text{附}} + P_0 = K_1 \frac{G}{S} = (1.10 \sim 1.20) \frac{G}{S} + P_0 \\ = (1.10 \sim 1.20) \frac{6231 \times 1000}{4071} + P_0 = 103008 \sim 103161(\text{Pa})$$

所以顶升压力约为 173~189mmH₂O 高度。

依据设计图纸, 储罐罐顶提升后罐壁高度为 36.977m, 储罐截面内径为 72m。

风机风量计算如下:

$$V_{\text{拱}} = \pi(R - h/3)h^2 = \pi \times (72 - 9.461/3) \times 9.461^2 = 19360(\text{m}^3)$$

$$V = \frac{\pi D^2 h_1}{4} + V_{\text{拱}} = \frac{\pi \times 72^2 \times 36.977}{4} + 19360 = 169912(\text{m}^3)$$

$$V_1 = \frac{\pi D^2 h_2}{4} + V_{\text{拱}} = \frac{\pi \times 72^2 \times 2}{4} + 19360 = 27503(\text{m}^3)$$

$$Q = \frac{[V \times P_{\text{升}} - P_0 \times V_0] \times K}{P_0} = \frac{169912 \times P_{\text{升}} - 101325 \times 27503}{101325} \times 1.2 \\ = 174273 \sim 174581(\text{m}^3)$$

式中, D ——罐顶冠直径, 取值 72m;

h_1 ——罐体壁板高度, 取值 36.977m;

h_2 ——起始高度, 取值 2m;

h ——罐顶拱高, 取值 9.461m;

R ——储罐罐顶半径, 取值 72m;

K ——此处考虑 20%空气泄漏量,取值 1.2。

所有选择风机参数为:

静压 4430Pa, 风量 $56000\text{m}^3/\text{h}=933\text{m}^3/\text{min}$, 满足施工需求, 两台风机同时工作时, 顶升时间:

$$T = \frac{Q}{2 \times 933 \times (0.7 \sim 0.8)} = 117 \sim 134(\text{min})$$

7 监测系统

本系统包括压力测量系统和罐顶水平状态测量系统。

7.1 压力测量系统

在临时大门上安装取压口引到混凝土罐壁外, 用透明塑料管制作 U 形压差液位计, 用来测量罐内与罐外的气体压力差, 测量范围不小于 300mm 水柱。在风道上设置同样的压差液位计。

7.2 罐顶水平状态测量系统

在气吹顶升前, 在罐顶沿四周均布四个固定锚点, 将四把长 50m 的盘尺的一端固定在锚点上, 另一端引到罐顶的平台上, 记下原始的刻度, 在气吹顶升时用对讲机随时通报盘尺的读数, 供气吹顶升总指挥参考。

8 罐顶固定装置

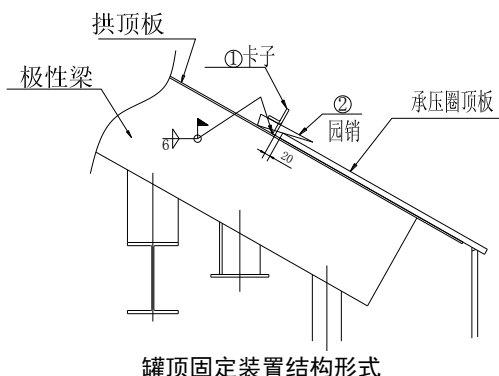
全容式储罐罐顶气顶升工艺的罐顶固定装置与常规的立式圆筒储罐基本相同(具体结构形式如下所示), 需要重点说明的要点有:

(1) 在罐顶与承压环焊接牢固后, 鼓风机才能停止工作;

(2) 固定点首先由平衡机构附着的罐顶径向梁开始, 然后是其他径向梁, 最后是罐顶板的固定;

(3) 顶升前, 罐顶上表面应预先安装固定挂件, 方便顶升就位时实现快速连接。

(4) 合理安排焊工人数并均匀布置, 预备足够的工装器具(倒链、楔子、千斤顶、工卡具)及焊接材料等。



9 顶升步骤

9.1 预气顶升

在顶升所有工序准备检查完毕后, 在正式气顶升前一般先进行预气顶升, 罐顶预顶升的高度一般为 200~300mm, 其操作步骤与正式顶升完全一致, 相当于罐顶气顶升的实际预演。对整个系统的有效性 及安全性实施检验; 预顶升的另一个关键目的是对气顶升工艺设计中相关参数的计算结果进行复核, 尤其是确定实际操作时顶升风压 P 、罐顶的配重情况等。

9.2 调整与检查

根据预气顶升的结果调整系统的不足和缺陷, 对对照检查表反复检查所有系统。

9.3 正式气顶升

(1) 所有工作人员进入工作状态, 检查通讯系统的完好性, 检查备品备件、工器具的准备就位情况, 启动风机空载运转确认其运转正常, 在所有状态的到完好确认后开始升顶。

(2) 依次启动 2 台风机向罐内进行缓慢罐风, 在平均速度为 100mm/min 的条件下, 罐顶需缓慢上升到 300mm

(3) 调整风压以 225~258mm/min 的速度, 连续吹升罐顶, 直至到达最后 1000mm。

(4) 当顶升至离承压环 1m 的距离时, 调整风压以不超过 100mm/min 的速度顶升, 直至罐顶到达预定位置与承压环平稳接合。

(5) 罐顶就位后, 快速将安装在罐顶径向梁的固定装置挂件与承压环连接锁定, 调整罐顶与承压环的焊缝间隙, 首先从罐顶径向梁开始向两侧延展定位并焊接, 直至完成整个罐顶的固定过程。

(6) 逐个并缓慢地调整鼓风机的风压, 罐内泄压, 关闭鼓风机。

10 结束语

气顶升法是整个全包容低温罐建设中的重点和难点, 是全包容低温罐建造的关键。本文对大型全包容低温储罐气顶升的工艺原理和方法进行了一定的阐述, 采用了气吹顶升方法安装大型全包容罐罐顶, 此方法有很多优点, 设备投入资金少, 储罐受力均匀, 减少了安装附加工作量, 只要保证上述动力系统、平

衡系统以及密封系统等几大系统的完好即可确保顶升

参考文献

[1]sh/t 3537-2002《立式圆筒型低温储罐施工技术规范》

[2]彭京旗. 大型 lng 低温储罐施工技术. 石油化工建

工作的顺利完成。因此此工艺值得推广和应用。

设. 2005. 27(4):12-14.

[3]杨新和. 气吹法安装 lng 储罐罐顶. 石油化工建设. 2009. 31(3):58-60