

大型低温储罐珍珠岩在线填充技术分析

冯志明（深圳华安液化石油气有限公司，广东 深圳 518120）

摘要：保温层珍珠岩下沉是大型低温储罐常遇到的难题，常规的处理方式是排空罐体内可燃介质并氮气置换合格，再打开罐体进行填充珍珠岩的作业。本文通过分析采用密封箱的技术，在线拆除珍珠岩填充口法兰并安装截止阀，检测珍珠岩沉降情况，制定填充计划，截止阀连接珍珠岩填充软管，控制氮气输送压力与珍珠岩密度，安全高效完成珍珠岩在线填充作业。

关键词：燃气低温储罐；膨胀珍珠岩；二次填充；在线

Abstract: sinking of perlite in insulation layer is a commonly encountered difficulty in large cryogenic tanks, and the conventional treatment way is to evacuate the combustible medium inside the tank and replace nitrogen gas for qualified, and reopen the tank for the work of filling perlite. This paper develops a filling plan by analyzing the technique of using sealed boxes, removing the perlite filling mouth flange online and installing a stop valve, detecting the sedimentation of perlite, connecting the stop valve to a perlite filling hose, controlling the nitrogen delivery pressure and the density of perlite, and completing the perlite online filling job safely and efficiently.

Keywords: gas cryogenic storage tanks; Expanded perlite; Secondary filling; on-line

0 引言

在 LPG 或者 LNG 的产业链中，储存和运输是两个重要的环节，在燃气仓储的企业，大型低温储罐是关键核心设备。目前公司的大型低温常压储罐有：一座丙烷储罐，罐容量为 80000m³，设计最低储存温度为 -45℃，设计压力 15kPa 的单容罐，内罐材质为 A516Gr60，外罐材质为 A283GrC；一座丁烷储罐，罐容量为 80000m³，设计最低储存温度为 -45℃，设计压力 15kPa 的单容罐，内罐材质为 A516Gr60，外罐材质为 A283GrC；一座液化天然气储罐，罐容量为 80000m³，设计最低储存温度为 -165℃，设计压力 29kPa 的全容罐，内罐材质为 9%Ni 低温钢，外罐为水泥混凝土结构。为了防止热量漏入导致能量损失，按照行业建造经验和设计规范，大型低温储罐日蒸发率须控制在 0.08% 以内。单容罐或全容罐所采用的保温方式一致，通过在内罐壁外侧粘贴一层具有弹性的保温毡，为保温夹层提供压缩空间，其余保温层空间使用膨胀珍珠岩填充。本文结合公司大型 LPG 单容罐珍珠岩在线填充实践案例，研究大型低温储罐保温层修复技术，分析修复过程中可能出现的问题，提出有效的预防措施，可降低珍珠岩二次填充的作业风险。

1 低温储罐保温层沉降及填充方式

低温罐在安装条件与操作条件下温度差异较大，大型储罐投产后内罐冷却收缩，而外罐正常状态时接近环境温度，冷却后保温层空间增加，珍珠岩高度下降。由于膨胀珍珠岩结构蓬松、密度低、受挤压后易碎，当储罐液位降低时，罐内上部气相空间复温，内罐气相部分升温并对外膨胀，保温夹层空间被挤压，随着储罐日常生产过程中的液位波动，珍珠岩被反复挤压碎裂，又由于保温材料自身重力的原因，长期静置的珍珠岩会缓慢

下沉，导致储罐外层顶部出现一圈漏冷带。

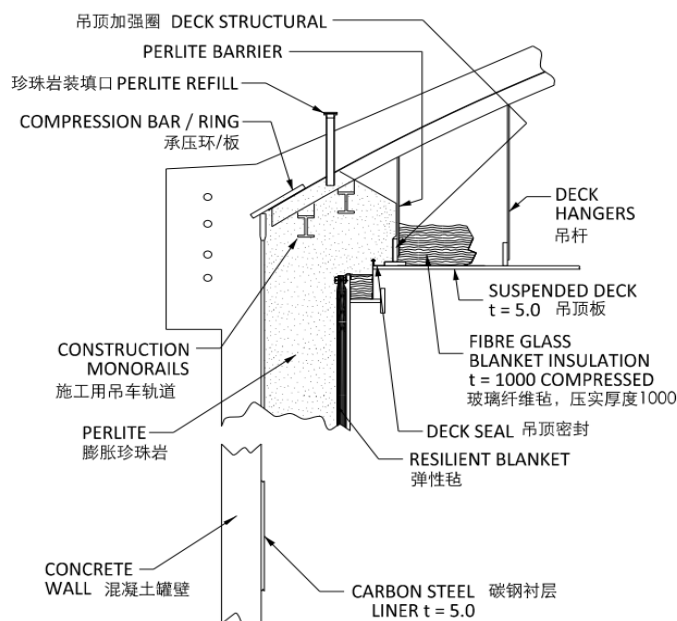


图1 全容罐保温层结构图

公司 LPG 单容罐运行二十年后，期间未能找到合适的方式补充珍珠岩，珍珠岩沉降明显，漏冷严重、保冷效果差。由于漏冷带外壁温度较低，在广东区域冬季时，表面已出现局部结冰并形成明显的青苔环带（图2），外壁凝结了大量的冷凝水，潮湿环境导致金属外罐壁出现严重的坑状锈蚀。除此之外，储罐大量漏热导致 BOG 蒸发量增加，接收站能耗增大。由于储罐内部无可窥视系统，根据其他 LNG 接收站的保温层沉降探测经验，可借助红外热成像技术，通过分析红外热图像，确定漏冷的具体方位、漏冷面积、漏冷分布状态等。大型低温单容罐外罐使用常温金属材料，主要为保温层提供支撑，如果漏冷过大、外壁温度过低会影响外罐金属强度，为

企业带来很大的安全隐患。储罐出现严重漏冷情况后，为了保障企业安全生产、降低企业生产能耗，应及时进行珍珠岩二次填充修复。



图2 LPG 低温储罐漏冷带

参考日本丸红株式会社千叶LPG基地丙烷储罐常规的珍珠岩二次填充方法：填充前需清空储罐介质，使用氮气置换合格，再打开珍珠岩填充口法兰，测量珍珠岩沉降深度，计算填充量及制定填充计划，最后实施填充珍珠岩作业。常规的填充方法可以安排人员进入保温夹层检测沉降情况，填充过程使用振实器调整珍珠岩装填高度，但常规的填充方法施工周期长，要求低温储罐需彻底清空置换，填充作业成本过大。经研究分析与实践验证后，可采用珍珠岩在线填充方式，在储罐不停车的状态下，使用专用密封工具与采用合理的填充工艺，可进行珍珠岩二次填充。在线填充技术能让企业施工过程中维持正常工艺生产，可安全高效完成珍珠岩的二次填充，有效降低储罐保温层检修成本。

2 填充口结构

2.1 填充口分布

低温储罐顶部都保留了珍珠岩的填充口，布置在保温夹层上方，呈现环状分布。如公司LPG单容罐内罐直径56m，外罐直径58m，保温夹层宽度1m并与内罐气相空间连通，夹层顶部均匀分布了20个4"珍珠岩填充口，各个填充口距离8m左右。由于大部分的大型低温储罐珍珠岩填充口不设置阀门，导致投产后无法再次填充，储罐建造，填充珍珠岩时会过量填充3%至5%，为储罐冷却收缩后，保冷空间增大，珍珠岩高度下降考虑。储罐建造完毕，填充口直接使用盲板封堵，保冷层设计使用寿命与罐体设计使用寿命一致，期间无需进行修补。但各燃气接收站在实际运行过程中，储罐投产一段时间后，珍珠岩都会出现不同程度的沉降。

2.2 填充口的形式

LPG单容罐填充管口底部设置挡板形成斜式导流口，珍珠岩经填充口进入大罐夹层后，通过导流口进入保温层且喷射方向调整朝储罐外壁，可以减少填充过程中珍珠岩进入内罐的量，但测量保温层下沉深度时没有采用直通式导流口方便，也降低了珍珠岩的填充速度和

填充效果；LNG全容罐为直通式填充口，填充口正对储罐保温层，便于监测珍珠岩填充高度，同时可以增加填充速度，在线填充效果更好，但珍珠岩更容易随氮气穿过挡布或间隙进入内罐介质中。

3 珍珠岩在线填充技术

3.1 密封箱体的设计与安装

珍珠岩填充的关键是如何带压安装填充口截止阀及相关的连接设备。带压安装截止阀，阀门另一端可连接填充软管或测量浮球，通过截止阀隔离，可实现珍珠岩下降程度的测量与填充速度控制。截止阀安装前需把储罐压力降至5kPa左右，在填充口法兰四个对角位置安装易于拆卸的G型夹具，夹紧后即可拆除法法兰所有螺栓。使用在线拆除法法兰盲板的专用工具—法兰密封箱密封包容法兰，密封箱由底板、箱体、操作手套（两双）等部件组成（如图3）。为确保作业安全，使用密封箱带压包容法兰时，由于箱体需承受罐体气相压力，需要对箱体壁厚及连接部件进行强度的校验。密封箱主体材料使用16MnDR，箱体可与底板分离，使用8.8级螺栓连接，底板为方便拆装，应采用两瓣式结构，底板夹紧在填充口的法兰管上，需保证底板与法兰管之间的密封。

密封箱设计时需考虑有足够操作空间，作业前需要把施工工具及阀门、连接件等预先放置或吊在密封箱内，再进行法兰密闭包容。密封箱体容积过大会增大箱体底板直径，底板边缘容易与大罐拱顶相抵，导致现场无法安装，所以箱体设计必须考虑珍珠岩填充口的高度、直径、周边障碍物等实际情况。密封箱需预留两个DN15的接口，用于连接软管，作为氮气接口及可燃气体放散口，顶部中心位置设置一个DN15的吊索阀门，用于吊索从箱体内部穿出时密封，吊索用于吊起重量较大的设备与工具。



图3 密封箱体与底板

密封箱板材厚度可以根据以下公式进行设计校验，并确定所需的螺栓数量与强度，箱体制作完成后使用2倍最大操作压力检验密封强度和密封性能：

$$\delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \Phi - p_c}$$

式中：

δ —箱体的计算厚度，它为安全承受要为P的圆筒所需的最小理论计算厚度，mm；

p_c —箱体的计算压力，MPa；

D_i —箱体的内径；

$[\sigma]^t$ —钢板在设计温度t下的许用应力，MPa；

Φ —焊接接头系数, ≤ 1 , 取值 0.8

$$F_{\text{单}} = \frac{F_{\text{总}}}{N} = \frac{P_c \pi D_i^2}{4N}$$

式中:

$F_{\text{总}}$ —底板受的压力

$F_{\text{单}}$ —单个螺栓受到的拉力

N —螺栓的数量

3.2 截止阀在线安装

密封箱完成安装后, 连接氮气软管置换, 要求箱体内气体氧气浓度 $< 1\%$ 、露点温度低于 -40°C 。调节充入氮气压力, 保持密封箱压力比大罐压力高 0.2kPa 左右, 避免大罐气体进入密封箱, 过程中需要操作人员监控好储罐压力。需两位作业人员同时使用密封箱体上高强度纤维手套拆除法法兰的 G 型夹具, 带压拆除法法兰, 取出的法兰先放置在密封箱内间隙。由于 4" 截止阀较重, 施工前使用顶部吊索吊起, 吊索可穿过箱体顶板, 由有其他人员控制阀门起吊高度, 当设备就绪时, 缓慢落下悬吊在密封箱内的截止阀, 安装阀门法兰垫片及四个对角螺栓。安装完毕后放散密封箱内压力, 检查阀门法兰密封情况, 合格后即可拆除密封箱, 安装阀门剩余法兰螺栓, 完成截止阀在线安装作业。重复上述方法把大罐所有填充口都安装截止阀。

3.3 珍珠岩在线填充

填充前先计算珍珠岩所需量, 制定各个填充口的计划填充量, 防止珍珠岩过量填充进入内罐。在截止阀另一端可安装带浮子的盲板, 浮子可浮在珍珠岩上, 通过浮子线下放长度测量珍珠岩的沉降高度, 检测各个填充口珍珠岩的下降情况。根据保温夹层厚度, 珍珠岩实验沉积坡度, 结合两个填充口之间的距离, 计算各个填充口所需的珍珠岩填充量, 由于储罐铝吊顶珍珠岩挡布可提供部分空间, 应适当增加珍珠岩的填充量作为冗余。

完成测量后, 截止阀另外一端拆除浮子盲板, 连接珍珠岩填充软管, 在罐底周边区域安装珍珠岩的缓冲罐, 把计划填充的珍珠岩加入到缓冲罐。缓冲罐接入氮气并压力升到 0.5MPa 左右, 使用氮气把珍珠岩送到罐顶并注入保温层, 珍珠岩输送速度可通过缓冲罐的氮气压力与截止阀开度控制, 由于珍珠岩具有研磨性, 珍珠岩填充时需要控制输送速度, 避免对弹性毡和外罐壁造成损坏。当填充到预定量的珍珠岩后, 应停止填充并测量填充高度, 达到计划高度后单个填充口的作业完成。其余填充口按上述的方法, 完成低温储罐保温层珍珠岩的整体填充作业。

4 在线填充作业存在的问题

4.1 珍珠岩填充高度不一致

公司单容罐的珍珠岩填充口之间的距离 8m , 采用在线填充方式, 珍珠岩高度在填充口附近位置最高, 但两个填充口中间的位置, 由于远离填充口, 输送流道存在较大阻力, 只有部分珍珠岩能到达该区域, 使该位置

成为保温层的最低点, 珍珠岩高度差异影响了填充效果。对于珍珠岩高度不一致问题, 在线填充的方式无法像常规填充方法那样, 开罐后保冷夹层内放入振实器, 使用振实器来调整珍珠岩的装填高度和装填密度。

4.2 珍珠岩进入内罐

珍珠岩过小的输送压力导致输送速度降低, 密度较大的珍珠岩难以输送到罐顶, 珍珠岩容易在填充口周边位置处沉积, 影响填充效果。氮气压力过大, 珍珠岩会快速碰撞到管壁及填充口的导流挡板, 容易碎裂成大量细小的颗粒, 随氮气穿过挡布或间隙进入储罐内部 (单容罐或全容罐保温夹层与内罐连通)。另外必须严格控制珍珠岩质量, 珍珠岩密度过小、过于蓬松, 更容易碎裂成小颗粒, 增加进入罐内介质的珍珠岩。

4.3 导致工艺下游设备损坏

大量珍珠岩随氮气进入大罐内部介质, 最终都会随着工艺系统输送到其他设备, 导致下游工艺设备损坏。其中 BOG 压缩机容易通过大罐气相管吸入部分密度较小的珍珠岩, 加快缸套表面、活塞环及支撑环磨损; 密度较重的珍珠岩会沉降至 LPG/LNG 液体中, 随出货泵输送出去, 导致 LPG 单容罐外输泵入口过滤网堵塞, 细微的颗粒进入泵体后通过机械密封冷却液, 进入机械密封面, 损坏机械密封; 对于 LNG 全容罐, 珍珠岩颗粒进入潜液泵平衡鼓后容易导致平衡管堵塞, 影响泵体转子平衡, 进入轴承后导致滚动面受损, 潜液泵振动增大, 损坏潜液泵。行业内有燃气接收站在线添加珍珠岩时大量珍珠岩进入内罐的情况发生, 最终导致潜液泵轴承损坏, 需吊出泵体进行检修。

5 结语

采用珍珠岩的在线填充技术, 能够降低企业维修成本。使用密封箱在线安装填充口截止阀, 测量珍珠岩的沉降高度, 确定大罐珍珠岩的填充量。氮气输送珍珠岩至大罐保温层顶部, 通过截止阀来控制填充速度。对于填充作业有可能遇到的问题, 可通过珍珠岩的质量控制、缓冲罐压力、输送流速控制来减少进入内罐介质的珍珠岩, 确保填充作业质量, 避免储罐介质被污染而影响下游的工艺设备。

参考文献:

- [1] GB51156-2015. 液化天然气接收站工程设计规范 [S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015.
- [2] 童文龙, 田连军, 傅诚铁, 等. 大型 LNG 全容储罐珍珠岩在线填充分析与实践 [J]. 天然气与石油, 2019, 37(1): 87-93.
- [3] 扬帆, 张超, 屈长龙, 等. 大型 LNG 储罐现场珍珠岩膨胀填充技术 [J]. 煤气与热力, 2015, 35(2): 13-18.
- [4] 李宏男, 高指林, 李建永. LNG 大型低温储罐膨胀珍珠岩填充技术 [J]. 深冷技术, 2013, 42(6): 20-22.
- [5] 秦凯凯, 俞祖明, 倪家利, 等. 50000m^3 LNG 储罐膨胀珍珠岩充填技术 [J]. 新技术研究与推广, 2009(12): 39-41.