

关于地下水封丙烷洞库气密试验设备配套及注意事项

邱光辉 (中铁隧道集团一处有限公司, 重庆 401120)

摘要: 地下水封洞库以天然岩体为主要结构体, 利用地下水的天然埋藏条件, 并辅以人工水封系统, 将石油、液化气封存于人工开挖的地下超大洞室内。与地面储备项目不同, 地下水封洞库采用水封原理储备油气资源, 而洞库的稳定性和气密性是决定地下洞库工程建设成败的关键。如何检验丙烷洞库的密封性, 通常采用洞库气密试验。本文就地下水封洞库气密试验设备系统配置、气密试验方案优化选择以及就试验过程中注意事项进行阐述说明。

关键词: 地下水封洞库; 丙烷洞库; 气密试验方案; 设备配置

1 丙烷洞库气密试验技术要求

本文以烟台某地下 120 万方丙烷洞库为例, 该洞库分为两个独立主洞罐 (1# 丙烷库、2# 丙烷库), 每个主洞罐设计库容 60 万立方, 分别由两个操作竖井进行丙烷原料输送和相关库内监测。该洞库埋深为海拔 -120m, 地表标高 +63m~+67m。

1.1 试验压力技术要求

丙烷洞库一实测容积为 63 万 m^3 , 试验压力 0.825MPa, 每天升压不超过 0.1MPa; 丙烷洞库二实测容积为 61 万 m^3 , 试验压力 0.825MPa, 每天升压不超过 0.1MPa。

1.2 试验压缩气体温度要求

据监测洞库常温为 16.8℃, 气密性试验压缩空气温度调节至和洞库内常温差不超过 2℃, 即 14.8℃~18.8℃。

1.3 试验压缩气体来源

该化工园自有压缩空气供气站, 通过 PA 管网可提供温度小于 35℃, 最大压力 0.75MPa 的压缩空气。供气量: 流量不大于 30000 m^3/h , 不足部分采用空压机增补。

2 气密试验设备选型及配置

2.1 试验气体总方量计算

理想气体状态方程: $P_1V_1/T_1=P_2V_2/T_2$, 又根据玻意耳定律: 一定质量的某种气体, 在温度不变的情况下, 压强 P 与体积 V 成反比。其公式为:

$$PV = \text{恒量} \quad P_1V_1 = P_2V_2 \quad (\text{公式 1})$$

根据上述公式及试验要求数据, 假定进库气体温度通过冷干处理, 可控制与洞内环境温度一样, 即达到恒温条件, 按照公式一可得出两个主洞库在试验目标压力时的总方量为:

①洞库一: 原气压为标准大气压 $P_0=1.013 \times 10^5 \text{Pa}$, 原体积 $V_1=630000 \text{m}^3$, 试验压力 $P_2=0.825 \text{MPa}$ 。即: $V_2=P_0/P_2 \times V_1=0.825/0.1013 \times 630000=51307800 \text{m}^3$;

②洞库二: 原气压为标准大气压 $P_0=1.013 \times 10^5 \text{Pa}$, 原体积 $V_1=610000 \text{m}^3$, 试验压力 $P_2=0.825 \text{MPa}$ 。即: $V_2=P_0/P_2 \times V_1=0.825/0.1013 \times 610000=4967917 \text{m}^3$ 。

2.2 气密试验供气流量计算

根据上述洞库增压总方量, 以及试验要求每天升压不超过 0.1MPa。按照最理想状态从标准大气压增压到试验目标压力, 需要天数为:

①试验天数 $t = (0.825 - 0.1013) / 0.1 = 7.24$ 天;

②总增气量为 $\Delta V = V_2 - V_1$, 洞库一: $\Delta V_1 = 5130800 - 630000 = 4500800 \text{m}^3$; 洞库二: $\Delta V_2 = 4967917 - 610000 = 4357917 \text{m}^3$;

③两个洞库每分钟需气量为: $V_m = \Delta V / (t \times 24 \times 60)$,

洞库一: $V_{m1} = 4500800 / (7.24 \times 24 \times 60) = 431.7 \text{m}^3/\text{min}$; 洞库二:

$V_{m2} = 4357917 / (7.24 \times 24 \times 60) = 418.0 \text{m}^3/\text{min}$ 。

2.3 空压机选型及数量计算

2.3.1 空压机压力选择确定

根据上述气密试验压力要求, 该试验采用的空压机输出最大气压大于 0.825MPa。通常市场上常见空气压缩机分为低、中、高压三类, 低风压 $< 0.7 \text{MPa}$, 中风压 0.7~1.4MPa, 高压 $> 1.4 \text{MPa}$ 。根据该丙烷洞库试验压力为 0.825MPa, 选择空压机时, 综合考虑管路管径、路径和距离, 将空压机输出压力上调 0.2MPa, 以保障足够的压力富余量并能抵消管路损失。因此空压机最高输出压力大于 1.025MPa 即可, 为中风压空压机。

常见的中风压空压机可选型号有额定输出压力 1.1MPa, 1.2MPa, 1.4MPa。由于输出压力越高, 配备电机功率越大, 电量消耗越高, 经济性越差。综合考虑输出压力和电机大小以及经济性, 因此选择额定压力 1.1MPa 空压机足以满足该丙烷洞库气密试验压力要求。

2.3.2 空压机流量确定

根据上述计算, 得出该丙烷洞库气密试验需要空压机总气量需满足大于 431.7 m^3/min 。在 1.1MPa 额定气压空压机通用型号里面, 常见的每分钟输出气量有 20 m^3 , 28 m^3 , 41 m^3 等, 对应功率分别为 110kW, 185kW, 252kW。

三种型号空压机台数及总功率对比计算:

20 m^3/min 空压机台数: $431.7/20=22$ 台, 总功率: $22 \times 110=2420 \text{kW}$ 。

28 m^3/min 空压机台数: $431.7/28=16$ 台, 总功率: $16 \times 185=2960 \text{kW}$ 。

41 m^3/min 空压机台数: $431.7/41=11$ 台, 总功率: $11 \times 252=2772 \text{kW}$ 。

结合该化工园区气密试验场地条件限制, 台数越多占地面积越大, 且配电、配管安装工作量越大。上述三种型号空压机, 41 m^3/min 空压机总功率虽然居中, 但设备投入少, 设备费用最低, 占地面积最小, 现场操作方便, 方案最优。

结论: 通过上述分析, 若该丙烷洞库全部采用临时空压机供气增压, 需选择额定压力 1.1MPa、排气量 41 m^3/min 空压机 11 台。

3 冷干机型号及数量确定

园区管网压缩空压温度约 35℃, 空压机输出气体温度为 45~80℃, 均高于试验要求的 14.8~18.8℃, 因此需要采用冷干机进行降温除水, 达到试验规定温度。

3.1 冷干机分类

冷干机是利用冷媒与压缩空气进行热交换,可把压缩空气温度降到 2~10℃,同时除去压缩空气中的水分的一种降温干燥设备。常见分类有:

按冷凝器的冷却方式分有气冷型,水冷型两种;

按进气温度高低分有高温进气型(80℃以下)和常温进气型(45℃左右);

按工作压力分有普通型(0.3~1.0MPa)和中、高压型(1.2MPa以上)。

3.2 冷干机型号选择

①根据选择的空压机压力参数可以确定,该气密试验冷干机工作压力应大于 1.1MPa,属于中高压型。为了确保冷干机工作安全性,同时满足气密试验管道试压的要求,按照不小于空压机额定压力的 1.2 倍选取冷干机压力参数,即 $1.1\text{MPa} \times 1.2 = 1.32\text{MPa}$,取整为 1.4MPa;

②根据选定的螺杆空压机在工作时输出气体温度将超过 45℃,最高时将达到 80℃左右,因此冷干机选择高温进气型;

③根据该化工园区场地布置情况以及为冬季施工,因此不可选取水冷型,需选取气冷型冷干机。

3.3 冷干机数量

该丙烷洞库气密试验提供的供气条件为 30000m³/h 气量,即 500m³/min。若采用临时空压机配合增压供气量为 41m³*11=451m³/min。因此,冷干机处理总量必须高于 500m³/min,按照 1.2 倍安全系数考虑,总处理量为 600m³/min。

结合目前市场上常见单台冷干机处理能力有:60m³/min、80m³/min、100m³/min、120m³/min、140m³/min 和 160m³/min 等多种类型。根据其功率和需用台数,结合市场调查可以得到如下经济分析对比表。

表 1 冷干机经济分析对比表

序号	型号 m ³ / min	功率 /kW	台数 /台	总功率 /kW	原值 /万元	设备总投入 /万元	总用电 /kW/h	综合投入 /万元
1	60	9.5	10	95	9.5	95	16416	96.64
2	80	15	8	112.5	11	82.5	19440	84.44
3	100	18.7	6	112.2	13	78	19388	79.94
4	120	20	5	100	16	80	17280	81.73
5	140	22	4	94.3	25	107.1	16293	108.77
6	160	37	4	138.75	30	112.5	23976	114.90

根据上表所示,选择额定处理能力 100m³/min 冷干机最为经济划算。

结论:通过上述分析得出:冷干机选择风冷型;处理能力 100m³/min、额定压力 1.4MPa,配备数量为 6 台。

4 气密试验方案优化选择

4.1 现场条件

该化工园区 PA 管网可提供 30000m³/h 气量,但只能最高达到 0.75MPa 压力。根据该园区生产安排,1# 丙烷库先投入使用,2# 丙烷库后投入使用。因此先对 1# 丙烷库进行气密试验,再对 2# 丙烷库进行气密试验。同时 1# 丙烷库和 2# 丙烷库操作竖井处有管道进行连通,可相互进行转换。

4.2 气密试验方案

根据现场条件,该丙烷洞库有如下三种方案进行气密试验:

方案一:试验设备全部采用临时空压机和冷干机,先将所有设备安装在 1# 丙烷库附近,1# 丙烷库完成后,设备再倒运至 2# 丙烷库进行安装试验。如上述计算得出需配置空压机 11 台,冷干机 6 台。

方案二:使用园区 PA 管网供气,增加冷干机控制温度和湿度,气压不足时再采用临时空压机进行增压。试验设备安装在 PA 管网接口附近,先给 1# 丙烷库增压,再给 2# 丙烷库增压,试验设备不用倒运,通过管网连通,一次安装到位。按照上述计算公式,可以得出该方案需要配置空压机 3 台,冷干机 6 台。

方案三:使用园区 PA 管网供气至 0.75MPa,临时空压机及冷干机安装在 PA 管网附近,先给 1# 丙烷库增压。待压力稳定结束后,通过两个主洞库的联络管道,由 1# 丙烷库给 2# 丙烷库进行增压,待两个主洞库压力平衡后,再使用 PA 管网供气,临时试验设备进行增压冷干。气密试验配套设备与方案二一样,且不用倒运,一次安装到位。

通过对比,方案三具有显著优势:一是,前期由 PA 管网提供压缩空气至 0.75MPa,按照上述 2.3 计算公式得出可以减少 8 台临时空压机投入,只需 3 台空压机即可。二是,1# 丙烷库的压缩空气通过联络管道输送给 2# 丙烷库,可以减少总供气量,减少空压机开启时间,减少用电量。三是,不存在二次安装,效率较高,安装成本较低。四是,1# 丙烷库进行注水置换排气阶段,可减少排气量,降低噪音污染持续时间,为后续工作节约时间。因此方案三为该丙烷洞库气密试验最优方案。

4.3 优化后的方案气密试验步骤

根据上述方案三,该丙烷洞库气密试验步骤为:

①通过业主供气站通过 PA 管网打气给 1# 丙烷库增压至 0.75MPa,再用临时空压机组进行增压,期间由冷干机组进行温度控制;

②增压到 0.825MPa,开始温度稳定约 100h,至洞库内温度变化 < 0.1℃/d 后,开始压力稳定约 100h,至库内压力变化 < 50Pa/d;

③压力稳定后,1# 丙烷库开始注水置换空气,同时将 1# 丙烷库的空气通过联络管道注入 2# 丙烷库;

④待两个主洞库压力平衡时,关闭联络管道,有 PA 管网给 2# 丙烷库进行增压,冷干机组进行温度控制;

⑤ 2# 丙烷库压力达到 0.75MPa 时,切换成临时空压机组进行增压,直至达到试验压力,期间冷干机组控制入库气流温度;

⑥ 2# 丙烷库温度稳定约 100h,待温度变化 < 0.1℃/d,进行压力稳定约 100h,直至达到压力变化 < 50Pa/d 为合格,气密试验结束,开始进行后续洞库注水置换工序;

⑦洞库内绝对压力 = 井口表压 + 竖井气柱压力 + 井口大气压。

5 气密试验配套设备安装布置及管道试压

5.1 气密试验配套设备安装布置

根据上述优化气密试验方案,该试验设备配置为 3 台空压机组(1.1MPa、41m³/min),6 台冷干机组(1.4MPa,100m³/min)。根据现场条件及试验要求,气密试验配套设备步骤如下图 1 所示。

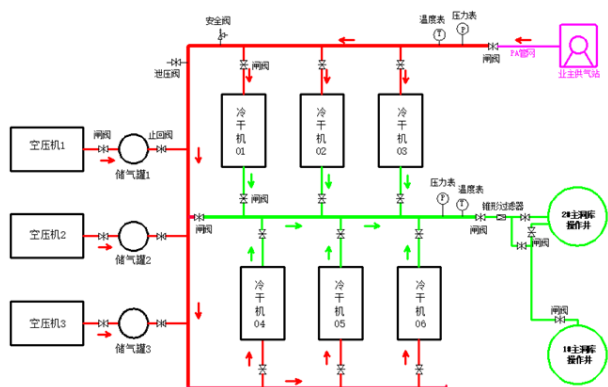


图1 气密试验配套设备布置简图

5.2 气密试验管道试压

气密试验配套设备及管道安装完成后，需对设备进行试机调试和管道试压，管道的密封性和抗压强度是保障试验成功的最关键因素。根据相关管道试压的要求，该气密管道具体试压操作如下：

①管道试压介质：压缩空气，由临时空压机组提供；

②管道试压压力： $0.825\text{MPa} \times 1.15 = 0.95\text{MPa}$ ；

③试验过程：

管道吹扫，开启1台空压机，将过滤器处拆开，吹扫干净后，停空压机，恢复过滤器；

关闭PA管网出口闸阀，关闭1#/2#主洞库进口闸阀，打开冷干机组两端进出口闸阀（冷干机停机状态）；

启动1台空压机增压至 0.95MPa ，稳压 30min ；再下降到 0.825MPa ，稳压 10min ；采用发泡剂检查渗漏，无渗漏，降压 $\leq 0.05\text{MPa}$ 合格。

6 地下水封丙烷洞库气密试验设备配套注意事项

地下水封丙烷洞库气密试验成功的前提在于好的地下水文地质条件以及地下洞库施工质量。气密试验阶段的成功在于试验方案的优化以及设备配套组织的质量。结合烟台某地下丙烷洞库气密试验实例，在气密试验阶段试验设备配套方面有如下注意事项：

①气密试验设备的选型，要综合考虑试验方案、技术要求、现场条件及经济适用等因素；

②气密试验设备安装过程中，要重点把控管道焊接质量，管道安装质量，阀门进场验收及质量检查；

（上接第181页）电能力，确保交流电源所用的供电能力稳定。测量仪器的主机经过通电后，将用红外光和紫外线照射检测探测器周围的空气中可燃性物质的含量。探针周围的空气中无任何可燃性化学物质的含量时，探针的指纹显示数值必须是 $0\%lel$ 。若有不一致之处，将该探测器的指纹显示值调节到 $0\%lel$ 。然后，将一定浓度的标准气体送至导入探针，值趋于稳定后，使该探针的显示值与导入标准气体浓度相等，显示值稳定后，调零结束。

5.2 施工过程不规范

施工过程中非标准可燃气体报警的故障检测。在厨房内部泄漏的情况下可燃性气体的报警器检测到可燃性气体，并发出报警信号，在附近的气体状态情况下，如果是家庭中使用了天然气，可燃性的气体探测器须直接安装在厨房的炉灶上，气体探测器须直接安装在天花板 300mm 高的天

③临时管道的试压必须严格执行，确保气密试验过程中安全平稳运行；

④取源部件的安装要满足机电设备安装规范要求，气体压力表应当安装在温度表的上游侧，压力表应当安装在管道的上半部；温度表垂直安装在管道上，且探针插入管道内 $1/3 \sim 1/2$ 处；

⑤气密试验过程中，必须安排人员巡检设备和管道，采用发泡剂对法兰、阀门及焊缝处进行检漏，及时处理；

⑥气密试验过程中，严格控制增压速率在 4kPa/h 左右，每小时进行数据记录和分析，及时动态调整输出流量；

⑦气密试验过程中，关注洞库内温度变化情况，及时调整冷干机组控制入库气体温度满足技术要求；

⑧丙烷洞库气密试验，应同步关注地下水文变化，连续读取水幕巷道内传感器压力、温度数据。同步关注主洞库内水位、温度、压力数据变化。遇到异常情况立即进行分析解决。

7 小结

本文就地下水封丙烷洞库气密试验设备配套进行了全面的阐述，就设备选型及配置进行了全面的分析计算；对丙烷洞库气密试验方案优化及选择进行了对比分析，结合设备配套进行了阐述；就气密试验相关重要环节及注意事项进行了说明。通过本文希望对国内地下水封洞库气密试验方案选择及设备配置这个关键环节提供一定的参考和借鉴。

参考文献：

- [1] 袁广宇主编. 大学物理学上 [M]. 中国科学技术大学出版社, 2018.
- [2] 赵近芳, 王登龙主编. 大学物理学上 [M]. 北京邮电大学出版社, 2017.
- [3] 吴波, 谭森桂主编. 地下水封石洞油库气密性试验分析 [J]. 工程科技 II 辑, 2019.4.
- [4] 丁士昭主编. 机电工程管理与实务 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.3.
- [5] 丁士昭主编. 市政公用工程管理与实务 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.4.

花板上。可燃性气体报警器在没有可靠的接地时，需排除影响电压的电磁干扰，可燃性气体报警装置在建设时须可靠接地。可燃性气体报警器和接线柱容易碰撞或损坏，安装成开路或短路。焊剂必须是非腐蚀性的焊丝，为了确认可燃性气体报警装置处于正常的工作状态，在试运行后再进行施工。

参考文献：

- [1] 赵锡钦, 祁旺, 王金鑫. 可燃气体报警器的应用及常见故障处理 [J]. 海峡科技与产业, 2018(08):114-116.
- [2] 李敏. 可燃气体报警器的应用及常见故障处理 [J]. 品牌与标准化, 2011(16):48.
- [3] 梁金田, 杨泉, 边朝朝, 初丽莉, 殷嵩, 张振普, 方挺. 可燃气体报警器的应用及常见故障处理 [J]. 中国计量, 2008(12):101-103.