

LNG 高压外输泵的运行操作与维护优化

唐维利（江苏液化天然气有限公司，江苏 南通 226400）

摘要：LNG 高压外输泵是 LNG 接收站的主要设备之一，用于输送 LNG 至气化器和冷能利用，具有超低温、高压等特性。介绍了液化天然气（LNG）高压外输泵的结构特性，工作原理及运行操作等内容，分析高压泵运行故障原因及处理方式，从而更好的确保生产运行的安全平稳。

关键词：LNG 高压外输泵；运行操作

1 高压外输泵的概念

高压外输泵用于输送 LNG 至气化器和冷能利用，是液化天然气（LNG）接收站中 LNG 的动力源泉。与传统泵相比，液化天然气高压外输泵具有低温、高压的特殊性，江苏 LNG 接收站配备 8 台电动立式安装的潜液离心泵，高压泵与电机完全浸没在泵罐中，LNG 从泵罐的顶部出口管线排出。泵和电机轴承由 LNG 润滑。电力和仪表电缆被各自封装在一个氮气压力保护的套管中。设备复杂，仪表较多，所以故障率较高，日常操作维护也比较麻烦，所以对高压外输泵进行分析优化，来提高生产运行的稳定性，保障生产安全顺利。

2 高压外输泵工作原理及特点

2.1 高压泵的工作原理

①高压泵是用于将来自于低压输出总管的 LNG 加压并输送至高压输出总管，再通过 ORV 或 SCV 气化外输的增压设备；②高压泵启动后叶轮在驱动电机的带动下高速旋转，在叶片之间的液体受到叶片的推力，产生旋转运动，动能和压能增加，液体旋转产生离心力，在离心力的作用下，液体不断从叶轮中心流向四周，通过扩压管收集排出高压液体；③因为需要的出口压力比较高，通常采用多级泵。目前应用的 Ebara 高压泵为 15 级泵，泵整体安装在泵大罐中，正常工作过程始终处于冷态。

2.2 高压泵特点

由于 LNG 超低温、易燃、易爆的特点，因此与常规离心泵相比，具有很多独特的特点：要求具有较低的汽蚀余量，泵入口设计了诱导轮；泵为立式屏蔽结构，泵和电机整体浸没在 LNG 液体中运行，电机与泵共轴；无需防爆电机，但需采用防爆接线盒；泵除需要采用浸没式结构外，还需采取措施保冷。泵停运后如保冷不善，泵内的 LNG 会不断蒸发，当达到一定程度时就可能“气堵”，使泵不能正常运行。

3 高压外输泵的结构

高压泵的结构：①诱导轮。为应对泵吸入压力低或储罐液位低的工况，高压泵采用轴流螺旋式诱导轮。这使得该装置能够在极低的液位下运行，从而在大流量范围内保持稳定运行，改善 NPSHR 和泵吸性能；②叶轮。叶轮为径向流动式结构，旋转产生流量和压力。叶轮前面均有耐磨环，TEM 叶轮背面也有耐磨环；③扩压器。高压泵采用的是径向扩压器，从径向叶轮流出的 LNG 旋转并对外流动，扩压器将 LNG 液流导向或下一个叶轮吸入口或末端排放口，并将速度能转换为压能；④轴向推力平衡机构。为了使轴向推力达到平衡，设计 TEM 自动平衡机构，使作用在轴承的轴向载荷很小几乎为零，延长了轴承的使用寿命。

4 高压外输泵的运行操作

4.1 初次开车或维修后的准备

初步检查。在高压泵吹扫冷却之前，需要检查以下项目：①机械安装工作已经正确完成；②检查所有的电源连接正确；③已进行叶轮的转向测试；④保证泵罐的清洁，且高压泵已正确安装；⑤高压泵的入口阀和出口阀已安装，并检查管道的清洁；⑥高压泵的电源电缆和仪表电缆穿线管已正确安装；⑦高压泵的振动监测系统 VMS 已正确安装；⑧如果泵的初次安装和吹扫冷却操作间隔的时间超过 24h，则所有的开口都必须密封。

4.2 吹扫步骤

①从氮气公用工程站由阀 MV-1400231 和 MV-1400230 连接氮气，吹扫电源电缆和仪表电缆穿线管处的弯头焊件，并将穿线管氮气压力升至 0.6MPa·g；②确认 MV-1400201、MV-1400203 和 MV-1400232 关闭；③确认出口阀 XHCV-1400201、XV-1400202 和 FCV-1400201A 关闭；④打开 DIAG-1400205 处的 1' 放空阀；⑤从 MV-1400242 接入氮气；⑥注入氮气吹扫泵罐，持续加压吹扫，直到露点降到 -50℃，氧气含量不超

过 1%，由放空阀处采样分析。

4.3 冷却步骤

①打开放空阀 MV-1400205，使少量的冷气体从泵的内部通道内循环；②检查确保入口阀 MV-1400201 和排净阀 MV-1400204 关闭；③打开阀 MV-1400203 和 MV-1400232；④通过入口冷却管线注入 LNG 冷却泵罐，注入泵罐的速率不超过 1 英寸/min (25.4mm/min)，在达到表 1 中标明的 1 液位时停止注入，在此液位等待 60min；⑤ TI-1400205A~D 用于冷却过程中监测泵罐的温度，液位由 LI-1400201B 监测；⑥按照表 1 注入 LNG，直到泵罐内注满 LNG，冷却过程完成。

表 1 高压泵预冷液位与时间对照

液位	图上液位指示标记	泵筒液位高度 (mm)	在此液位需要等待的时间 (min)
底部轴承以下	1	424	60
泵的中部	2	1670	60
下部轴承	3	2769	30
电机中部	4	3724	60
上部轴承	5	4439	30
泵出口法兰	6	5080	60

4.4 启机条件

在此论文描述中，以高压泵 P-1401A 为例，相同的描述也适用于其他高压泵 P1401B/C/D/E/F/G/H。

① MV-1400119/20 关到位；② MV-1400201 开到位；③泵罐非低液位；④ DCS 上无启泵次数的重启限制；⑤管道的接头处无泄漏；⑥泵罐的温度必须稳定在液体气化温度以下。前述条件全部满足，且前三个条件满足后延时 10s，P-1401A 允许启动。记录泵的启动次数，5min 后可启动第二次，15min 后可启动第三次，30min 后可启动第四次，30min 后可启动第五次，30min 后可启动第六次。在泵启动成功或未成功后 Xmin，如果启动次数小于等于 4 次，泵启动次数清零，如果启动次数大于 4 次，不清零，此时清零由工程师手动进行。5+5+15+X 大于 60，X 大于 35，默认 36min，可由工程师设定。

4.5 启机操作

4.5.1 启机前检查

①检查高压泵满足启动条件 (DCS 逻辑)；②检查仪表穿线管及电缆穿线管压力正常；③确认相关阀位正常；④确认相关气动阀仪表风压力正常；⑤确认现场操作柱处于“自动”状态；⑥进行出口 XHCV 阀及最小回流 FCV 阀的动作测试。

4.5.2 启机步骤

①确认放空阀 MV-1400205 和 MV-1300603 打开；

②确认出口手阀 MV-1400219 关闭；③ XHCV-1400201 的开度为 20%；④关闭高压排净管线上的 XV 阀；⑤将最小回流阀 FCV-1400201A 设为手动模式，打开 100% (根据试车调试情况确定)；⑥在就地操作柱或 DCS 上按下“启动”按钮；⑦运行/停止状态指示器 PMXI-1400205 切换到“运行”，指示高压泵已启动；⑧观察电流表，电流升高到开机电流值 1506A，然后在三秒钟内降低到正常电流范围内，电机正常启动；⑨当 FI-1400201 的流量接近最小回流 96t/h 并稳定时将 FCV-1400201A 切换为自动模式；⑩电机启动之后，观察出口压力指示，流量和电流指示。压力和电流应该接近最小流量工况；⑪根据 LNG 的需求流量调节出口阀 XHCV-1400201 和 MV-1400219；⑫确认最小回流 FCV 阀自动关闭；⑬观察压力 PI-1400202A/B、流量 FI-1400201B、温度 TI-1400201 和电流表，将压力、流量和电流值与出厂数据进行比较。注：高压泵的最小回流通过关闭 MV1400116，打开 MV-1400117、MV-1400118 和 MV1400135 回到储罐。

4.6 启机期间可能存在的异常工况

①持续启动电流异常；②如果开机电流增加到最大值 1506A 并且保持，同时高压泵不转动，说明泵的转子已锁定，必须要取出维修；③当开机电流增加到最大值 1506A，然后降到满载和开机电流 (242.5~1506A) 中间值同时高压泵正在转动，说明需要检查泵的开机电压，如果任一相电压低于正常值的 15%，则供电电源存在问题。如果供电充足，关闭出口阀缓慢打开旁路阀，切换为最小回流；④开机电流增加到最高值 1506A，且保持不变时，可能存在供电电源单相故障，检查每相电压和电流强度；⑤如果电流低于正常值且出口压力低于正常值的 75%，说明泵反向转动。需要断开主电源开关的供电，在泵的电路板接线盒或主面板上将的两个电动机导线反向连接；⑥在启动过程中电流降低到接近空载电流且输出压力为 0 时，可能是入口液位低引起的，保证泵罐中充满 LNG，高压泵完全浸没在 LNG 中；⑦如果在首次冷却开车时产生过大的噪音和振动，泵内可能积聚有蒸发气，停泵并等待 10min 之后重启；⑧在正常液位下，首次开车和第二次启动的间隔时间为 5min，第三次启动必须在 15min 之后，再次重启必须要等待 30min 之后。每小时最多启动次数不能超过 4 次；⑨不允许在短时间内连续启动泵，两次启动需要间隔规定的时间以使泵的电机温度稳定。

4.7 设备巡检

设备在稳定状态下的巡检: ①检查、记录各工艺参数如压力、温度、流量等 (PI-1400202A/B、FI-1400201A、TI-1400201); ②检查管道、法兰的泄漏情况; ③检查泵罐入口过滤器压差 PDI-1400201; ④检查 PI-1400202B, 与 DCS 显示的 PI-1400202A 比较; ⑤检查泵罐液位 LI-1400201B; ⑥检查就地电流显示; ⑦检查泵的振动值是否在正常范围内 (VI-1400201); ⑧泵状态指示 PMXI-1400201 指示运行正常、PMXI-1400201 指示远程、PMXL-1400201 指示就绪; ⑨ PMII-1400201 指示电流正常; ⑩ PMJI-1400201 指示功率正常; ⑪ PMXA-1400201 无电流过载报警指示; ⑫检查控制盘上无报警指示 PMUA-1400201; ⑬发现异常情况及时汇报, 并采取相应措施, 紧急情况可先停车再汇报; ⑭生产条件变化或有异常情况应做好记录, 在交接班时进行详细交接。

4.8 正常停车步骤

①缓慢关闭高压泵的出口 XHCV 阀; ②确认最小回流 FCV 阀自动全开; ③按下停止按钮停止高压泵; ④确认高压泵“停止”状态指示变红, 且电流、功率都变为 0; ⑤现场确认高压泵停止; ⑥将 FIC 阀置于手动, 手动关闭最小回流 FCV 阀; ⑦打开高压排净管线上的 XV 阀, LNG 从泵罐流出对出口管线进行保冷; ⑧关闭出口 XHCV 阀下游的手阀; ⑨确认高压泵出口管线保冷 CSP 阀开度合适, 否则进行调节。

4.9 高压泵的保冷流程

4.9.1 流程

高压泵入口管线内的 LNG 进入泵井后, 其中一部分 LNG 通过高压排净管线上的 CSP1 和 XV 阀进入高压排净管线, 另一部分 LNG 则通过最小回流阀的旁路 CSP2 阀回流至再冷凝器对高压泵进行保冷。

4.9.2 保冷量控制

通过高压泵出口管线上的温度变送器来调节高压泵的保冷量, 一般控制高压泵出口管线上温度不超过 -130°C 。如果出口管线温度较高, 则适当开大 CSP1 和 CSP2, 使出口管线始终保持在较低的温度。如果出口管线温度很低, 可以适当关小 CSP2 和 CSP2, 但建议高压泵的出口管线的保冷量要适当地调大一点, 因为如果保冷效果不好, 高压泵出口管线上方出现气态, 高压泵启动后, 泵出口安全阀容易起跳。

4.10 紧急停车

高压泵的安全系统联锁触发停车。紧急停车后的检

查: ①按照接收站操作程序检查相关设备的运行情况, 使紧急停车对系统运行的影响最小化; ②安全系统的紧急停车发生时, 必须在重启之前找出故障原因, 解除限制联锁; ③打开高压排净管线上的 XV-1400202, LNG 从泵罐流出对出口管线进行保冷。

5 故障处理

在下列情况下泵需要进行维修: ①噪音异常; ②振动异常; ③电流异常; ④水力性能异常。

表 2 高压泵故障原因与处理

故障	原因	故障处理
不能传输液体	泵旋转故障 (转子锁死或反转)	拆卸和维修
达不到额定的压力和流量	泄漏	保证密封垫和 O 型环未损坏, 密封完全
	环磨损	拆卸和更换
	叶轮或扩压器	拆卸和清洁堵塞的通道
	叶轮损坏	拆卸和更换
泵振动	轴承磨损	拆卸和更换
	旋转元件损坏	找到损坏元件后更换或者修理
	气蚀	泵罐液位低低、再冷凝器下游饱和蒸汽压差低低、再冷凝器液位低低等联锁保护, 运行时保护联锁不屏蔽。减小流量或者停泵
	叶轮堵塞	做必要的清洁
运行在最大电流	内部边缘间隙磨损	拆卸和维修
	轴承磨损	拆卸和更换
	电机故障或者操作信号失效	检查电压平衡, 如果不平衡进行维修
出口阀门泄漏	阀门的填料缺失或阀门损坏	阀门更换或者拧紧其压盖

6 结论

高压外输泵是对 LNG 进行增压, 为气化后的天然气外输管线提供足够大的能量与压力, 满足下游管网用户正常使用, 高压外输泵是多级增压泵, 在运行操作过程中, 一定要严格正确操作, 避免 LNG 外漏或泵体气蚀造成人为伤害和泵体损坏, 使生产过程安全平稳。高压外输泵做为接收站重大设备, 在日常巡检中要着重加强巡检力度, 观测泵体振动、仪表示数、管道法兰有无泄漏, 发现隐患及时上报, 分析故障原因及处理措施, 做好应急准备, 保证安全可靠。

参考文献:

- [1] 曹鑫鑫, 朱玥. LNG 高压外输泵平面布置及管道设计总结 [J]. 炼油技术与工程, 2021(10).
- [2] 刘可. LNG 接收站高压泵运行优化措施 [J]. 石化技术, 2016(12).
- [3] 王淼. LNG 接收站高压泵运行技术探讨 [J]. 中国石油石化, 2016(24).