

液化天然气接收站低温安全阀操作故障处理探讨

高一峰 (广东大鹏液化天然气有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 伴随我国液化天然气 (Liquefied Natural Gas, LNG) 的迅速发展, 其接收端的安全性问题也越来越引起人们的重视。液化天然气接收站工艺中, 介质处于 -160°C 以下的超低温状态。低温安全阀是液化天然气接收终端设备超压防护的最终环节, 其运行将影响 LNG 接收设备的运行安全。通过对 LNG 接收站低温减压阀运行故障的类型及应对措施进行较为全面的研究。

关键词: 液化天然气接收站; 低温减压阀; 故障机制; 防范对策

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 035-0141-03

Discussion on Operation Fault Handling of Cryogenic Safety Valves in Liquefied Natural Gas Terminals

Gao Yifeng (Guangdong Dapeng LNG Company Limited, Shenzhen Guangdong 518000, China)

Abstract: With the rapid development of Liquefied Natural Gas (LNG) in China, the safety issues of its receiving terminals have attracted increasing attention. In the process of LNG terminals, the medium is in an ultra-low temperature state below -160°C . The cryogenic safety valve is the final link for overpressure protection of LNG receiving terminal equipment, and its operation affects the operational safety of LNG receiving equipment. This paper conducts a comprehensive study on the types of operational faults of cryogenic safety valves in LNG terminals and corresponding countermeasures.

Keywords: Liquefied Natural Gas (LNG) terminal; cryogenic safety valve; fault mechanism; preventive countermeasures

近几年, 随着全球能源结构的转型和液化天然气 (LNG) 贸易的迅猛增长, LNG 进口量的不断增加, 沿岸 LNG 接收站的建设也迎来了高潮。LNG 接收终端贮存在 -160°C 等苛刻条件下, 对设备的安全性有着极其苛刻的需求。低温安全阀作为防止储罐和管路系统超压的重要防护设备, 其性能要求在极低温度下 100% 可靠运行。

1 液化天然气接收站低温安全阀常见故障

1.1 超压不起跳

当系统内的气压不断升高, 超过设定值时, 阀门依然处于密封状态, 这是其最为严重的故障形式。在 LNG 接收终端的实际使用过程中, 常会出现这种现象, 即阀体内出现的异常霜层现象及手动提升扳手扳不开的现象。其危害性是对终端关键装备的安全构成严重的威胁, 特别是在储罐气相空间压力大于 0.5MPa (压力存在疑问, 一般大型 LNG 储罐设计压力 25kPa) 时, 储罐穹顶和罐壁连接处向应力可能达到其屈服极限的 87%, 从而诱发大范围的塑性变形, 严重影响了终端设备的安全运行。当高压泵出口管受到 1.8 倍的工作压力时, 外周膜片的应力就会超出 API 579 规定的容许值, 从而引起管道的破裂。此外, 超压还会引发多米诺效应, 引起上游再冷凝设备和 BOG 压缩机的级联过压, 引起接收终端的应急停机^[1]。

1.2 不到设定压力起跳

不到设定压力起跳故障是指在系统的正常工作压力下, 在没有达到设定的压力时, 安全阀就会过早打开。其特征是阀门无故起跳, 瞬间大流量泄出后快速回位, 或者连续小开启导致介质泄漏。这类错误操作会造成 LNG 接收终端高附加值气体的非正常排放, 每次泄漏造成 15-30t LNG, 成本高达 8 万元-15 万元。

在运行过程中, 由于常出现的故障, 造成了机组负载的急剧变化, 导致机组的能源消耗上升 12%-18%, 甚至造成外部输送系统的瘫痪, 从而影响机组的正常运行。从能量效率上讲, 一次错误释放既造成能量的损失, 又会打破贮槽 (储存设施) 中的饱和状态, 加快液态蒸发, 从而造成一种恶性循环。

1.3 起跳后不能回位或无法及时回位

起跳后不能回位或无法及时回位故障是在超压泄放后, 阀瓣不能下降到阀座达到有效密封, 或者复位时间超出规格规定的 3s。根据 LNG 接收设备的具体运行情况, 发现压力释放后阀体内持续结霜, 下游介质持续流动, 压力不能恢复到原来的水平。在此过程中, 液化天然气连续泄漏并发生瞬时气化, 导致天然气在其 5m 范围内的甲烷含量可快速突破爆炸下限 (5% VOL), 遇到静电或火花就会发生爆燃。在某次故障中,

液化天然气接收站由于气门杆和引导套管的温度过低而导致气门打开后出现 47s 的滞后,在此过程中泄漏 2.3t 的天然气,并产生一团可爆炸的蒸气云,应急撤离的范围达到了 500m。连续的渗漏造成了邻近的碳素钢支座的低温脆裂,造成了该地区的局部气温低于 -100°C [2]。

2 液化天然气接收站低温安全阀操作故障原因

2.1 设计选型问题

排量计算误差是主要的风险因素。在超压时,减压阀的主要作用是排放足够的液体,从而使体系的压力保持平稳。但是,现有的研究大多是以理想状态为基础,忽视了系统的动力学复杂度。如在进行火灾条件下泄漏量的估算时,没有正确地考虑到设备的湿表面和灭火喷雾强度等因素,将会造成火灾热的计算值偏小,进而造成所选择的减压阀的容积较小等问题。另外,对于缓冲罐和分馏塔等,如没有足够的重视来流来源,同样会造成容积估计的错误。在实际的超压事件中,如果减压阀的容积过小,则会因为超压而使其故障,从而使其故障。选择错误的安全阀也会触发功能失败。传统的弹性和对称的波纹管安全阀在低温环境中应用较多。

2.2 安装问题

气压感知的精度受到了影响。如阀门与被防护设备之间有多处弯曲或偶然阻塞,则会使阀门内的压力传输发生畸变,从而增加流体的阻力。这将导致设备实际压力已经超标,但是在减压阀进口的感觉到的压强低于正常值,导致其动作迟缓;或在排放过程中,由于进口管线的压力损失太大,导致阀门不能实现所要求的容积。

排气管道布局十分关键,如管道直径突变或排气口对气流有阻挡作用,均会引起反压,从而导致排气效果下降,同时也会给平衡波纹管带来附加负荷,从而影响其使用寿命。如不正确地设置,就会导致机器故障。安全阀应是完全竖直,而且其阀杆应该是竖直的。一旦发生倾侧,阀杆和导向套等活动零件就会承受附加的横向作用力,使其与密封面的对中程度发生变化,造成阀板动作卡涩,打开不顺畅 [3]。

2.3 运行维护问题

低温环境下材料性质的变化是重要的问题。当温度低于 -160°C 时,非低温特种金属将由塑性向脆性转化,其冲击韧度大幅降低,极易出现细小的缺陷而导致开裂。而作为其关键构件的弹簧,虽然采用了较低温度的材质,但是经过长时间的冷、热周期作用后,仍然会出现应力的松弛,从而引起刚度的改变和设定的压力的偏移。传统的橡胶在使用 PTFE 后会彻底变

硬,从而丧失其自身的弹性,即使使用 PTFE 等,其在较低温度时仍会降低其比压力,如初期预紧力不够,很容易引起密封故障甚至发生内漏。LNG 中的痕量水或者是乙醇,在较低的温度下会凝结成冰或者生成粘性的固体粒子,这些粒子与管路中的灰尘等固体粒子,会发生滞留,造成阀盘和阀座的不完全封闭。

3 液化天然气接收站低温安全阀故障处理方法

3.1 应急处理方法

对于在使用过程中发生的各种意外故障,必须规范地进行紧急处理,才能有效地将故障发生的可能性降到最低。如出现超压,安全阀不动,则必须马上开始人工减压流程,打开设备预先设置的旁路或泄压阀,使系统压力下降到安全值。当压力平稳后,应对此阀门进行单独的处理,并及时进行脱机检查。校准工作应由有资格的专门组织开展,主要是对其设定压力和弹性刚性等性能进行测试,若出现性能不符合要求,应予以拆卸修理或更换,切勿进行全面检修。如出现安全阀未达到设置压力而提早跳脱,则要先将进口管路上的贯穿阀封闭,并保证排气通道通畅。经过隔离的阀门需要进行维修校准,在校准时要注意其真实打开压力与名义设定压力的偏离值和密封的紧密性,这些参数都要按照 ASME 或者 GB/T 的有关规定进行。针对气门跳转后不能回座或者回座缓慢的现象,在已经明显减少了的情况下,可以采用木制或者铜制的工具,在阀盖上进行适当的敲打,利用轻微的振动来帮助阀盘重置。

某 LNG 接收站因上游 BOG 机组突然关闭,储槽压力持续升高,罐顶主安全阀 PSV-2101 在 125kPaG 时故障。中控人员按预案遥控开启 BDV-2103 阀门导超压至燃烧罐,检查排气管道通畅,不到 15min 压力降至 110kPaG。随后按上锁步骤隔离该阀,封闭进出口闸门并贴警示标志。经检验,其实测调压与给定值偏离 12.3%,拆卸发现导套与气门杆缝隙有冰结晶,轴承刚性下降 8.5% [4-5]。

3.2 长期解决方案

为了从根源上提高其可靠性,需要对其进行系统的设计和安装。结合 API 521、ISO 23251 等国际规范中的建议,对所选用的阀进行准确的计量,保证所选择的阀的排量与所需要的容积相等。在选型时,需要根据背压等级和反应速率等因素来确定,如有可变背压的情况下,应优先考虑采用均衡的波纹管型减压阀,而在如泵出流等对反应速率有很高需求的场合,需要采用高动态特性的全启阀门。在安装过程中,要制定规范的操作规范,使阀门尽量接近被防护设备,进口管路的压降不得超过设定的 3%,以保证检测的准确

性。在进行阀门安装时,要采用高精度水准仪进行校准,确保阀门与地板完全垂直,排气管路要有合适的支撑,防止产生口袋弯曲,从而减小排气背压力和管路压力。

比如,某大规模 LNG 接收站泵出口低温安全阀改造,曾出现过三次泵出水减压阀的过压力报警现象,发现原来的设计方案并没有充分地考虑到泵空化条件下的瞬间流量冲击,并且在设备中还出现了进口管路压力损失过大的现象。在项目开展过程中,根据 API 521 规范进行排放估算,并考虑到在火灾条件下的热流量和泵密封故障后的流量控制,精确计算出所需排量为 1500kg/h,最终选用额定排量 1800kg/h 的全启式低温减压阀(A42Y-40P)。在安装过程中严格按照规范要求,把安全阀的安装地点由原来离水泵出口 8m 到 1.5m,改为 DN100 进口管线,经过计算,进口压降为设定压力的 2.2%。在安装过程中,通过每米 0.02mm/m 的精密水平仪进行修正,保证阀门的轴向垂直度误差不超过 0.5mm/m,出水管选用一根 $\phi 159 \times 8$ 的无缝管,并设有 3 个可防止袋子型弯曲的活动支座,经过测试,排气反压力稳定在 0.1MPa 以内^[6-7]。

3.3 加强运维管理

为了保证其长周期运行的稳定性,必须建立系统化和预防性的运行和维修管理制度。制定和完善周期性的巡视系统,主要对阀体和连接管线的结霜状况进行检测。同时,还可以利用红外测温仪等现代仪器,对内部渗漏等隐患进行及时检测。要制订详细的维修方案,明确清洁、校准的时间和规范。清洁的目的是去除冰晶、水合物和杂质,以防止其在室内堆积;为保证导轨运动的柔性,必须采用特殊的低温油进行润滑;不拘泥于某一特定的时间,而是要结合实际运行情况、在线监测数据和风险评价数据,对其进行动态的调整。同时,通过设置实时监控设备,实时采集压力和声发射等信息,建立阀门的使用寿命衰减模型,并制定准确的故障预报和优化的维护方案。

比如,江苏液化天然气接收设备采用在线声发射检测技术对关键安全阀的内漏故障进行早期报警。该设备采用 WD 型 SAW 换能器,对高压外输水泵排出安全阀 PV-3201 进行持续监控,对 30kHz-120kHz 内的应力波进行持续监控。在连续监控中发现,该阀门的声发射信号一直保持在 30dB 以上,平均平方根在 90mV 附近,并且与气压成正比。上述特性指标清晰地表明内漏的连续性。根据资料的统计结果,该设备的预测漏失量约为每小时 0.12kg/h 的天然气,虽然还没有达到紧急关闭的风险,但已经超过常规操作的极限。维修人员在随后的预定停机过程中对其进行拆卸

检查,结果在气门座密封面上有一条长约 8mm、深约 0.1mm 的冲蚀痕。在检修后,检修人员使用专门的磨削刀具对其进行修补,经过调试,调试压力已恢复到原设计的 15.2MPa,密封性试验符合 API 527 规定的“零渗漏”^[8-10]。

4 结论

总之,液化天然气接收站低温安全阀操作故障问题,是涉及多领域的系统工程。通过对其故障类型进行分析,采取应急处理措施,并制定长期解决方案,加强运行维护管理,可以提升液化天然气接收站低温安全阀操作故障处理的准确性与效率。随着物联网、人工智能等领域的不断发展,对其进行故障管理将向智能化和预测性维护发展。

参考文献:

- [1] 罗振敏,苏越,苏彬,等.液化天然气接收站泄漏扩散行为的数值模拟[J].科学技术与工程,2025,25(29):12749-12760.
- [2] 宋明智.天然气产业与液化天然气(LNG)布局分析——以广西壮族自治区为例[J].天然气技术与经济,2025,19(04):64-71.
- [3] 本刊编辑部.深耕天然气利用产业链开创绿色发展新篇章——专访曹妃甸新天液化天然气有限公司总经理栾涛[J].中国港口,2025(08):3-5.
- [4] 吴焘,骆俊典.液化天然气接收站转运情况下卸船减少放空损耗技术研究[J].石油和化工设备,2025,28(08):46-51.
- [5] 岳军阳,韩雨,陈金梅,等.LNG接收站BOG处理工艺的优化对策分析[J].石化技术,2025,32(08):28-30.
- [6] 齐炳男.浅谈液化天然气接收站中仪表低温控制阀选型设计[J].山东化工,2025,54(14):166-168.
- [7] 张宏伟,李静,王磊.LNG接收站低温安全阀常见故障分析及处理措施[J].阀门,2023(04):45-48.
- [8] 王磊,陈东,刘建华.液化天然气接收站关键阀门失效模式及可靠性研究进展[J].油气储运,2024,43(1):1-10.
- [9] 张军,李广志,王永强.超低温安全阀密封性能影响因素及试验研究[J].流体机械,2023,51(8):32-38.
- [10] 黄伟,林海,董翔.液化天然气接收站安全阀全生命周期管理策略与实践[J].油气田地面工程,2023,42(11):45-51.

作者简介:

高一峰(1988-),男,汉族,河南汝州人,本科,中级工程师,主要从事液化天然气接收站调试和生产运营方面的研究。