

空分装置冷箱泄露的原因和处置措施

张斌¹ 龙荣波²

1. 杭氧集团股份有限公司 浙江 杭州 310000

2. 杭州杭氧化医工程有限公司 浙江 杭州 310000

摘要:空分装置冷箱内泄漏原因多样,涵盖设计、安装、材料选型及操作维护等方面,如管道布局不合理、施工焊接质量差、低温材料选用不当、频繁启停导致冷热交替产生应力等都是引起泄漏的原因。处置时需迅速启动现场应急预案,紧急停机联锁,第一时间关闭隔离泄漏源,联系空分设计单位一起分析冷箱内泄漏的原因,然后制定科学合理的处理方案并实施抢修,现场需要排液、复温,具备施工条件后,利用分段隔离、扒砂检漏、找到冷箱内最终的泄漏点,并彻底更换破损部件、补偿相关管道、优化密封设计等以实现长期修复。

关键词:空分装置;冷箱泄露;原因;处置措施

引言:空分装置作为化工、冶金等行业的关键设备,其冷箱部分承担着低温分离与冷热交换的重要功能。然而,在实际运行中,冷箱泄露问题时有发生,不仅可能导致设备损坏、生产中断,还可能引发严重的安全事故,如低温泄漏冻伤、冷箱鼓胀喷砂、设备火灾爆炸等。因此,深入剖析空分装置冷箱泄露的原因,并制定科学有效的处置措施,对于保障设备安全稳定运行、避免经济损失及人生伤亡具有至关重要的意义。

1 空分装置冷箱泄漏的典型现象与危害

1.1 泄漏的直观表现

(1)冷箱壁异常:低温介质泄漏后,冷箱壁局部温度骤降,空气中的水汽在壁面凝结,出现明显冒烟、挂冰或结霜现象,且异常区域会随泄漏量增大逐渐扩散,可作为泄漏的初步判断依据。(2)冷箱内密封气参数异常:密封气系统为冷箱提供正压防护,泄漏发生时泄漏气体膨胀升压后会向密封气补充,导致系统压力骤升;若泄漏介质为氧气,还会造成局部区域氧气含量超标,参数波动幅度与泄漏程度正相关。(3)珠光砂状态变化:冷箱内填充的珠光砂遇泄漏的低温介质会吸潮结块、结冰,不仅导致保温性能下降,还会因体积受热膨胀影响膨胀产生内压升高,当压力累积到一定程度,存在珠光砂喷射的砂爆风险。(4)基础温度变化:冷箱内管道泄漏,低温液体往下渗流,基础温度逐步下降,低温液体侵蚀会影响基础底板、地脚螺栓的使用寿命。

1.2 泄漏的潜在危害

(1)设备损坏:低温介质持续泄漏会使冷箱壁、非低温部件长期处于超低温状态,引发材料冷脆,导致冷箱壁冻裂、管道变形甚至断裂,同时会损坏冷箱内阀门、仪表等精密部件,加剧设备故障。(2)安全风险:

泄漏的低温液体(如液氧、液氮)若接触人体,会造成严重低温冻伤;液氧泄漏后与油脂、有机物接触易引发火灾爆炸,且泄漏导致的压力冲击可能造成冷箱板破裂坍塌,威胁人员生命安全。(3)经济损失:泄漏发生后需紧急停机处理,造成空分停产;同时检修过程中需大量人员扒砂、更换受损管道、阀门及吸湿失效的珠光砂,产生高额维修成本,同时设备停机后会导致后续联动系统产业线供应中断,引发连锁经济损失^[1]。

2 空分装置冷箱泄漏的根源性原因分析

2.1 设计缺陷

(1)管道布局不合理:设计未充分考虑低温工况热胀冷缩特性,管道间距预留不足(如液氮回流管与液氧排放管间距 $< 30\text{mm}$)。运行中管道因温度下降冷缩幅度不同,相互碰撞挤压,导致对接焊缝受应力产生裂纹,引发泄漏。(2)支撑结构强度不足:未按规定制作管道支撑,采用单臂托架等简易形式,未结合管道重量与振动载荷优化,长期运行易出现支架变形、焊接脱焊,导致管道受力失衡产生裂纹。(3)密封气系统设计缺陷:管路布置偏离规范,未沿冷箱壁均匀铺设,密封气供应不均、压力不足,无法阻隔外界湿空气侵入导致珠光砂板结;且常温密封气管道与低温管线过近,气体吹出时造成低温管线内介质局部汽化。

2.2 安装质量问题

(1)焊接缺陷:安装过程中存在违规操作,以管架点焊代替满焊,焊接强度不足;关键焊缝未按要求进行拍片检测,未焊透、夹渣、气孔等缺陷未被发现,低温工况下缺陷扩展引发泄漏。(2)管道应力集中:管道对接时未遵循自然对位原则,通过机械外力强行对准,导致焊缝及管道产生残余应力,在低温收缩作用下应力集

中区域率先出现冷态开裂,形成泄漏通道。(3)异物损伤:施工阶段管理疏漏,脚手架钢管直接压覆在管道上造成管壁压裂;焊渣、螺栓等施工遗留物未清理干净,运行中随管道振动刮擦管壁,或卡阻于阀门、管件处引发局部损伤^[2]。

2.3 材料与工艺问题

(1)低温材料选用不当:为控制成本违规使用普通碳钢管替代耐低温合金钢,普通碳钢在低温环境下韧性急剧下降,易发生冷脆断裂,无法承受空分装置的低温工况要求。(2)珠光砂含水率超标:珠光砂填充前未严格检测含水率,或冷箱密封失效导致湿空气侵入,使珠光砂吸潮结块,不仅丧失保温性能,还会加剧管道腐蚀,同时增加砂爆风险。(3)保温层失效:冷箱壁存在裂缝、孔洞等破损时未及时修补,保温层完整性被破坏,局部区域温度失衡引发管道热应力变化,长期作用下管壁或焊缝出现损伤,诱发泄漏。

2.4 操作与维护不当

(1)频繁启停:未严格遵循操作规程,频繁启停装置且未控制升降温速率(未达到 $\leq 30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的标准),导致管道反复承受热胀冷缩冲击,焊缝及管道接头疲劳损伤,逐渐形成泄漏。(2)碳氢化合物积聚:现场操作时主冷凝蒸发器、贫氩氙蒸发器中甲烷、氧化亚氮、乙炔等有害物质超标,其在液氧中积聚结晶,会磨损管道内壁,同时增加燃爆风险,间接诱发泄漏隐患。(3)监测仪表失效:氧含量分析仪等关键监测仪表未定期校准,存在测量偏差、仪表管堵塞死气等情况,无法及时发现密封气氧含量超标等泄漏早期信号,导致隐患持续发展,最终引发明显泄漏。

3 空分装置冷箱泄漏的应急处置措施

3.1 紧急停机与隔离

(1)一旦发现冷箱泄漏迹象,需立即启动紧急停机联锁,各机组卸载或停车、优先关闭进塔空气总阀门,切断原料气供应,同时停止产品氧、氮、氩的外送,避免泄漏介质与外界持续交换加剧风险。操作过程中需严格遵循“先断原料、后停产品”的顺序,防止系统压力骤变引发二次泄漏。关闭阀门时需缓慢操作,避免因压力冲击导致管道进一步破损。(2)迅速切断泄漏区域及周边的电源供应,划定警戒区并设置警示标识,严禁任何动火作业及静电产生行为。低温泄漏介质(尤其是液氧)易与油脂、有机物发生燃烧爆炸反应,切断电源可避免电气火花引发危险,同时禁止非应急人员进入警戒区,防止低温喷溅冻伤等人身伤害事故。

3.2 泄漏点定位与评估

(1)采用分段隔离法精准缩小泄漏范围:通过依次关闭冷箱内不同区域的分支管道阀门,分段阻断介质流动,同时实时监测各段密封气的成分(如氧气含量、露点)及压力变化。当某一段隔离后,密封气参数恢复正常,即可判定泄漏点位于该区域,为后续处置提供精准靶向。(2)对疑似泄漏区域实施扒砂检漏:在做好安全防护的前提下,分层、缓慢卸载该区域的珠光砂,避免珠光砂坍塌掩埋泄漏点或引发砂爆。卸载过程中,对暴露的管道、焊缝等部位喷洒肥皂水,观察是否产生气泡,以此确定具体泄漏位置。扒砂时需做好防尘、防低温防护,作业人员佩戴防寒服、防护面罩等装备^[3]。(3)利用红外热成像技术辅助定位:低温液体泄漏后会形成局部低温区域,通过红外热成像仪可快速捕捉到低温聚集区,直观呈现泄漏点的大致范围。该方法适用于初期泄漏点隐蔽、扒砂作业前的初步定位,可与分段隔离法、扒砂检漏法配合使用,提高定位效率与准确性。

3.3 临时处置方案

(1)严格把控冷箱内压力:密切监测冷箱压力变化,若压力持续升高,需适度调整放空阀开度,缓慢释放内部压力,防止冷箱因超压发生事故。泄压过程中需控制泄压速率,避免压力骤降导致管道收缩变形,同时监测释放介质成分,确保排放口周边无火源、无人员停留。(2)对冻结管道实施局部加温:针对因泄漏介质冻结导致的管道堵塞或结构损伤,采用常温加温气进行局部加温吹扫。吹扫时应严格控制加温速率,避免管道因温差过大产生热应力;(3)采取临时堵漏措施:对于换热器通道类泄漏,可选用临时补焊措施,,快速补焊封堵泄漏点,同时做好临时固定,防止运行振动导致焊缝再次拉裂,为后续长期修复争取时间^[4]。

3.4 长期修复与预防

(1)彻底更换破损管道:对泄漏及受损伤的管道,全部采用符合低温工况要求的低温合金钢重新配管,严格遵循管道布局规范,预留足够的热胀冷缩空间,避免管道间距不足引发的摩擦磨损问题。配管完成后需进行压力试验、焊缝拍片检测,确保修复质量符合安全标准。(2)强化支撑结构强度:对冷箱内原有单臂托架、固定支架进行改造,增设斜撑及双肩支架,优化托架间距,提升支撑结构的承载能力与稳定性,避免因支架变形、脱焊导致管道应力集中。改造后的支架需进行载荷测试,确保能够承受低温工况下管道的重量与振动载荷。(3)优化密封系统设计:采用双层皮套密封替代原有单一密封结构,增强密封气阻隔效果;对冷箱壁存在的裂缝、孔洞,采用耐低温玻璃胶进行彻底封堵,防止

湿空气侵入。同时重新梳理密封气管路，精确核算密封气气量，确保管路沿冷箱壁均匀铺设，实现密封气的均匀分布，从根源上降低泄漏风险。

4 空分装置冷箱泄漏的预防性管理策略

4.1 设计阶段优化

(1) 科学预留热补偿空间：设计时严格把控管道间距，确保相邻管道间距 $\geq 60\text{mm}$ ，避免热胀冷缩时发生碰撞磨损；对易产生形变的管道段采用U型弯补偿器，增强管道伸缩适应性，从源头降低热应力导致的泄漏风险。同时，通过热力仿真计算，精确定补偿器安装位置与规格，保障补偿效果。(2) 强化支撑结构设计：优化管道托架结构，明确托架与冷箱壁的焊接标准，要求焊接长度 ≥ 2 倍管径，提升支撑连接强度。选用双肩托架替代单臂托架，合理布设支架间距，确保支撑结构能稳定承受低温工况下管道的重量载荷与振动载荷，避免支架变形、脱焊问题。(3) 推行密封气系统冗余设计：采用双路密封气管路并行布置，互为备用，确保单路管路故障时，备用管路能快速切换投入使用，保障密封气持续稳定供应。同时，优化管路走向，确保管路沿冷箱壁均匀铺设，提升密封气分布均匀性，增强密封防护效果。

4.2 安装阶段质量控制

(1) 严格执行三查四定制度：施工前全面审查设计图纸、施工方案，排查设计漏洞与施工风险；施工中重点检查焊缝质量，对关键焊缝100%进行拍片检测，杜绝未焊透、夹渣、气孔等焊接缺陷。施工后组织专项验收，确保各项指标符合设计与规范要求。(2) 做好管道应力释放：管道安装时遵循自然对接原则，采用精准定位工具辅助安装，避免机械强制校准，确保管道接口无装配应力。对安装完成的管道进行应力检测，对存在应力集中的部位及时调整整改，降低低温工况下焊缝开裂风险。(3) 强化清洁度管理：冷箱封闭前开展全面清理工作，彻底清除脚手架钢管、螺栓、焊渣等施工遗留异物，防止运行中异物挤压、磨损管道。清理完成后进行密封检测，确保冷箱密封性能良好，避免外界湿空气侵入影响珠光砂性能^[5]。

4.3 运行维护规范

(1) 推进操作规程标准化：制定启停机温度梯度控制表，明确升降温速率 $\leq 30\text{℃/h}$ 要求，规范流程，杜绝

频繁启停、快速升降温等违规操作；定期结合设备状况与行业经验修订规程，优化操作细节。(2) 落实定期检测制度：每月检测密封气氧含量、压力及珠光砂含水率，建台账分析数据趋势；对异常情况立即排查整改，防止隐患累积；定期校准仪表，保障数据准确。(3) 加强备件管理：建立关键备件储备清单，足额储备易损备件，明确存储条件并定期检查；制定更换计划，按周期更换老化备件，提升运行稳定性。

4.4 人员培训与应急演练

(1) 开展系统理论培训：定期组织操作人员、维护人员培训，内容涵盖低温材料特性、密封原理、泄漏识别及应急流程等，提升专业素养与风险辨识能力；培训后考核确保掌握相关知识。(2) 组织实操演练：每季度开展泄漏模拟应急演练，重点练习扒砂检漏、临时堵漏等关键操作；演练后总结不足，优化应急方案，完善响应机制。(3) 强化案例复盘：收集国内外空分装置冷箱泄漏事故案例，定期组织复盘，剖析原因与处置问题，总结经验教训并融入日常管理，实现源头防控。

结束语

空分装置冷箱泄露的防范与应对是一项系统性工程，需从源头设计、施工安装、运行维护到应急处置全流程把控。通过优化设计结构、强化安装质量监管、规范操作流程、完善监测体系，可显著降低泄漏风险；而科学制定应急预案、快速定位泄漏点并采取针对性修复措施，则能有效控制事故影响。唯有持续强化技术管理与人员培训，构建预防与应急并重的长效机制，方能保障空分装置安全高效运行。

参考文献

- [1]孙连杰.浅析空分冷箱泄漏的原因和对策[J].低温与特气,2020,(1):11-15.
- [2]朱致欣,江福,叶向忠.空分装置冷箱泄漏分析与处理[J].大氮肥,2020,43(04):63-65.
- [3]侯祥斌,王磊.关于空分冷箱泄漏分析与应急处理[J].化工设计通讯,2021,43(10):142+147.
- [4]张准,吉星.空分冷箱内泄漏危害及分析处理[J].化工管理,2020,(20):114-116.
- [5]龚伟胜,魏霜,管泽玉.空分装置冷箱改造技术应用[J].中氮肥,2020,(05):57-59.