溴化锂制冷机组典型故障分析与处置实践

苏　醒　周生鹏　杜战京
新疆广汇煤炭清洁炼化有限责任公司　新疆　哈密　839000

摘　要：溴化锂制冷机组凭借热源适配性强、运行安全稳定、无氟环保的特点，广泛应用于工业集中制冷与公共建筑空调系统。本文以溴化锂制冷机组为研究对象，结合机组工作机理与现场运行特征，系统梳理各类典型故障的实际表现，深入剖析真空泄漏、温度调控失准、水质不达标等问题的形成机理。针对不同类型故障，分步制定真空检漏补漏、结晶融晶处置、换热系统清洗整改、溶液提纯酸碱调节等可落地的应急处置方案。同时建立适配现场工况的常态化介质养护、参数管控与设备巡检机制。

关键词：溴化锂制冷机组；典型故障；分析；处置

引言

溴化锂机组的制冷原理区别于传统压缩式制冷，依靠真空低压环境下的溶液吸湿、解析与换热循环实现热量转移，整套系统工况耦合性强，对运行环境、介质品质与操作规范程度敏感度较高。在实际运维过程中，多数机组长期处于不间断运行状态，设备密封结构持续受温度交变与振动影响，循环水系统反复运行易出现水质劣化，加之人工参数调控存在偏差、定期养护落实不到位等问题，各类典型故障频繁发生。

1 典型故障成因深度分析

1.1 真空系统泄漏导致机组运行效率下降的机理

（1）真空环境是溴化锂制冷机组能够正常完成制冷循环的核心基础条件，机组内部需要维持高真空低压状态，才能保证冷水介质在低温环境下顺利蒸发吸热，实现制冷效果。机组整体属于密闭负压运行体系，一旦真空系统出现泄漏问题，外界空气会持续渗入设备内部，直接打破机组内部的压力平衡与循环反应条件，逐步引发制冷效率持续衰减等一系列运行问题。（2）真空泄漏发生后，空气作为不凝性气体会不断积聚在冷凝器与蒸发器内部。这类气体无法参与制冷循环，也不能被机组常规排气装置完全清除，会长期滞留于设备腔体内部。不凝气体的堆积会直接提升机组内部压力，抬高冷水的饱和蒸发温度，让原本可以正常低温蒸发的介质无法充分汽化吸热[1]。制冷循环的换热温差持续缩小，整体换热动力不断减弱，最终表现为机组制冷能力明显下滑。（3）真空泄漏带来的负面影响会随着运行时长不断累积，渗入的空气不仅会破坏压力工况，空气中的氧气还会与机组内部的溴化锂溶液发生缓慢化学反应。该过程会改变溶液原有理化性质，降低溶液的吸湿与吸收蒸汽能力，削弱机组核心的制冷循环动力。同时氧化反应还会加速机组内部金属构件的腐蚀速度，造成局部密封结构进一步老化损坏，形成泄漏加重的恶性循环。

1.2 温度参数调控不当引发溶液结晶的原因

溴化锂溶液具备特殊的溶解度温度特性，溶液浓度与运行温度的匹配程度，是决定机组能否规避结晶故障的核心条件。溴化锂制冷机组在正常循环过程中，溶液浓度会随制冷负荷变化产生小幅波动，稳定的温度环境可以保证盐类物质均匀溶解，维持循环体系的流畅状态。如果现场温度参数调控不够规范，会直接打破溶液固有的溶解平衡，成为诱发溶液结晶故障的主要内在诱因。（1）机组运行负荷出现变化时，溶液的浓缩程度会随之改变。低温工况环境下的溴化锂溶液溶解度会大幅下降，可容纳的盐类组分明显减少。操作人员未根据负荷波动及时调整温度参数，会导致高浓度溶液长期处于低温运行状态。超出溶解极限的溴化锂盐类物质无法继续溶解在液相体系中，会逐步析出固态晶体，附着在管路内壁与换热设备表面，初步形成结晶雏形。（2）机组运行过程中常见的低温调控失误，主要集中在冷却水温度控制与溶液换热温度调节两个方面。冷却水温度过低会直接降低吸收器与发生器的溶液换热温度，让流经换热区域的溶液快速降温。机组降负荷运行时，溶液循环量随之降低，溶液在设备内部停留时间变长，降温幅度进一步加大，极大提升了结晶发生的概率。（3）长期不合理的温度调控会让细微晶体持续聚集堆积，逐步堵塞溶液流通管路。温度参数调控滞后、调控幅度不合理等人工操作问题，会反复扰动溶液溶解平衡，让结晶问题反复出现且持续加重。这类故障并非瞬时形成，而是温度与浓度长期不匹配累积引发的结果，最终会破坏机组溶液循环稳定性，造成机组换热失效、负荷异常等一系列次生运行问题。

1.3 循环水质不达标造成换热面结垢的诱因

（1）循环水体中普遍含有碳酸氢盐、钙镁离子等可溶性矿物质，这类物质是形成硬质水垢的主要来源。在换热过程中，循环水持续接触高温换热管壁，水体温度不断升高，会打破矿物质原本的溶解平衡。原本溶解在水中的钙镁盐类会发生热分解反应，转化为难溶于水的固态沉淀物。这些细微固体颗粒会缓慢附着在换热管内壁，逐步堆积成型，形成质地坚硬的水垢层。水质硬度越高，矿物质含量越充足，结垢生成的速度就越快，堆积厚度也会持续增加。（2）除了硬质水垢的生成，水体中的悬浮杂质、泥沙与胶体物质也会加剧结垢问题[2]。循环水在系统内反复流动，会不断裹挟管路内部脱落的锈蚀颗粒与外界混入的杂质。这类悬浮杂物会依附在管壁微观粗糙位置堆积，形成松软的污垢底层。底层污垢会改变管壁表面状态，为矿物质沉淀提供附着载体，加速硬质水垢的成型速度，形成污垢与水垢叠加堆积的复合垢层。（3）循环水体酸碱度失衡、缓蚀阻垢药剂投加不规范，也是诱发严重结垢的重要原因。水质偏碱性会大幅提升钙镁离子的沉淀速率，药剂缺失或投加量不足，会丧失对矿物质的分散稳定作用。长期水质管控缺失会让换热面垢层持续增厚，大幅增加管壁热阻，阻碍冷热介质的热量传递。同时不均匀的垢层会造成局部换热异常，引发设备内部温度分布紊乱，不仅降低机组制冷性能，还会缩短换热设备使用寿命，增加机组运维故障概率。

2 典型故障针对性处置方案与应急措施

2.1 制冷量不足的参数调整与系统整改措施

（1）在故障初步处置阶段，需要开展精准运行参数校正操作。优先核对机组高发温度、低发温度、溶液循环量等核心工艺参数，排查参数偏离标准区间造成的制冷效率偏低问题。根据实时环境温度与机组运行负荷，平缓微调热源输入强度，将发生器温度稳定在合理运行区间，避免温度过低造成溶液浓缩不充分，同时规避温度过高引发的溶液失效与能耗浪费。同步调整溶液屏蔽泵运行频率，保证溴化锂溶液循环量均匀稳定，让溶液可以充分完成吸湿与解析循环，夯实机组制冷基础工况。（2）完成参数调控后，需要针对真空系统开展专项排查整改。制冷量衰减大多伴随轻微真空泄漏问题，依靠机组自带抽气装置，定时抽取系统内部积聚的不凝性气体，缓解气压升高带来的换热失效问题[3]。全面检查机组各密封接口、管路法兰、阀门连接处的密封状态，对老化失效的密封配件进行更换处理，彻底消除微量漏气点位，稳定机组内部真空度，保障冷水正常低温蒸发换热。（3）针对换热系统缺陷开展配套整改工作，解决换热低效引发的冷量不足问题。定期检测冷却水与冷冻水进出口温差，判断换热管路与管壁结垢堵塞情况。对结垢严重的冷凝器和蒸发器换热面，采用专业清洗工艺清除管壁附着的垢层与杂质，恢复换热构件的导热性能。同时规范循环水水质日常管控，及时投加缓蚀阻垢药剂，从源头减缓结垢生成速度。（4）在所有整改工作完成后，需要对机组进行带负荷试运行监测，动态微调各项工艺参数，适配现场运行工况。通过参数优化、真空治理、换热提质的综合性整改方式，可以全方位解决各类诱因引发的制冷量不足问题，有效提升机组换热效率与冷量输出能力，保障溴化锂机组长期稳定达标运行。

2.2 真空泄漏排查、补漏与负压恢复处置方法

（1）真空泄漏排查需要按照由外到内、由浅入深的顺序全面开展。优先检查机组外部易泄漏点位，涵盖设备法兰接缝、管路阀门密封处、仪表检测接口以及端盖密封位置。这些部位长期受温度波动与设备振动影响，密封件容易出现老化松动，是漏气的高发区域。可采用专业检漏介质对各衔接点位逐一检测，精准捕捉细微泄漏点，避免微小漏点长期被忽视。完成外部排查后，再针对机组壳体焊缝、换热管板连接处等隐蔽位置进行复检，排除隐性渗漏缺陷，确保所有泄漏点位全部定位。（2）确定泄漏点位后，开展针对性密封补漏作业。对于法兰、阀门等位置老化损坏的密封垫片，需要停机泄压后完成整体更换，选用适配耐温耐腐蚀的密封配件，保障密封贴合的紧密性。针对焊缝细微砂眼、壳体微小裂隙等硬件缺陷，需对缺陷位置做打磨清洁处理，采用专用修补材料进行封堵加固，确保修补位置平整密闭。对于仪表接口松动造成的轻微漏气，可紧固接口配件并辅助密封处理，杜绝空气持续渗入机组内部。全部补漏作业完成后，静置检查确认无渗漏问题，为真空恢复作业做好准备。（3）密封整改完成后，启动机组负压恢复工序。开启机组专用抽气设备，分段抽取系统内部积存的不凝性气体，缓慢降低机组内部压力，逐步恢复设备标准真空区间。抽气过程需要匀速缓慢进行，避免压力骤变造成机组内部工况波动。真空度达标后关闭抽气系统，保持机组密闭静置观测，长时间监测真空参数是否稳定，确认无二次泄漏问题。

2.3 溶液结晶融晶处理、防结晶应急操作流程

（1）在发现机组出现结晶征兆或轻微结晶故障时，首先开展应急稳工况操作，防止故障持续恶化。立即下调机组运行负荷，降低发生器热源供给强度，减缓溶液持续浓缩的速度[4]。同步适当提高冷却水出水温度，减小溶液换热降温幅度，避免低温环境让现有晶体持续聚集

增大。暂时稳定机组循环状态，为后续融晶处理创造温和的工况条件，杜绝大面积结晶堵塞问题发生。（2）完成工况稳压后，开展系统化融晶处理作业。利用机组自带融晶管路与换热系统，开启融晶辅助阀门，让高温稀溶液循环流经结晶堵塞的管路与设备区域。依靠高温溶液的热传导作用，逐步提升结晶体周边温度，利用溴化锂晶体高温易溶解的特性，缓慢融化附着在管壁、阀件及换热缝隙中的固态结晶。整个融晶过程需要保持溶液匀速循环，把控升温节奏，禁止快速升温造成设备热应力波动。全程观察管路压差与溶液流通状态，直至管路阻力恢复正常，结晶完全溶解，溶液循环通畅无阻滞。（3）结晶完全消解后，及时关闭融晶管路，恢复机组常规循环模式，并落实长效防结晶应急管控措施。日常运行中严格匹配负荷与温度参数，杜绝低温高浓度的极端工况。机组降负荷或夜间低负荷运行时，提前调高系统基础温度，保证溶液温度始终高于结晶临界温度。定期检测溴化锂溶液浓度，及时补充缓释溶剂，调整溶液配比至标准区间，避免浓度过高引发析晶隐患。

2.4 机组溶液提纯、酸碱度调节与介质养护方案

（1）溶液提纯是清除介质内部杂质、恢复溶液活性的核心手段，机组长期运行后，溶液中会积累金属腐蚀产物、悬浮胶体、油污杂质以及各类降解沉淀物。这些杂质会增加溶液黏度，阻碍介质循环换热，还会附着在换热表面影响热交换效率。通过专业过滤与净化处理工艺，可以逐级去除溶液中的固态悬浮杂质与大分子污染物。提纯过程循序渐进，全程保持溶液平稳循环，避免净化操作打乱机组运行工况，彻底恢复溴化锂溶液的通透度与流动性能，还原介质基础工作能力。

（2）酸碱度调节是规避设备腐蚀、稳定溶液理化特性的关键环节。长期运行的溴化锂溶液容易出现酸碱度偏移，偏酸状态会快速腐蚀机组钢材、管路及换热构件，造成设备内壁锈蚀、密封损坏，间接引发真空泄漏[5]。偏碱状态则会改变溶液溶解特性，提升结晶概率，影响机组负荷调节精度。需要定期取样检测溶液酸碱指标，根据检测数据精准投放专用调节剂，将酸碱度稳定在标准运行区间。微调过程遵循少量多次的原则，避免参数大幅波动，保证溶液性质均匀稳定，从介质层面减少设备腐蚀与工况异常问题。（3）常态化介质养护可以长效维持溶液最优工作状态，延缓介质老化失效。日常养护需要定期检测溶液浓度、色度、杂质含量等关键指标，及时补充损耗的有效组分，修正浓度偏差。根据运行时长定期添加缓蚀剂与稳定剂，抑制金属腐蚀反应，减缓溶液老化降解速度。同时结合机组启停、负荷切换工况，提前做好介质状态预判与调整，避免工况波动引发溶液性能失衡。

结束语

综上所述，从运维实践角度来看，溴化锂机组的稳定运行重在预防而非事后处置。后续运行管理中，需要摒弃被动检修模式，建立常态化巡检、参数精细化调控、水质定期处理、溶液周期性养护的一体化运维体系，从源头降低故障发生概率。本次研究总结的故障机理与处置实践经验，能够为同类型溴化锂制冷机组的故障排查、应急处理与日常运维优化提供参考依据，助力制冷系统实现安全、稳定、节能的长效运行。

参考文献

[1]谢洪雷.溴化锂吸收式制冷机组在空分生产中的应用[J].低温与特气,2026,44(3):37-40.

[2]张涛.醋酸装置溴化锂制冷机组典型故障处理[J].氮肥与合成气,2024,52(10):17-19+22.

[3]李强.溴化锂吸收式制冷机在钢铁企业中的应用[J].工业加热,2026,55(1):55-57.

[4]覃昌勇.溴化锂吸收式制冷机泄漏故障的分析与维修[J].中国设备工程,2022,(1):85-86.

[5]徐成义.影响溴化锂冰机制冷效果的因素与故障分析处理[J].中国设备工程,2021,(24):31-32.