

吸收式溴化锂制冷机组的维护研究

高卫星

首钢京唐钢铁联合有限责任公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17208

[摘要] 吸收式溴化锂制冷机组凭借绿色环保、能耗低等特性广泛应用,但其维护至关重要。维护工作涵盖多方面,要严格监控运行参数,如温度、压力等,防止结晶、腐蚀泄漏等故障。定期开展化学清洗、真空检漏及溶液再生等周期性维护。借助物联网、大数据等技术实现智能化监测与故障预测,可提前发现隐患,保障机组稳定运行,提升制冷效率,降低运维成本与能耗。

[关键词] 吸收式; 溴化锂制冷机组; 维护

中图分类号: TB657 **文献标识码:** A

Maintenance Research of Absorption Lithium Bromide Chiller Units

Weixing Gao

Shougang Jingtang Iron & Steel United Co., Ltd.

[Abstract] Absorption lithium bromide chiller units are widely used due to their environmentally friendly characteristics and low energy consumption, yet their maintenance is crucial. Maintenance work encompasses multiple aspects, requiring strict monitoring of operating parameters such as temperature and pressure to prevent failures including crystallization and corrosion leakage. Periodic maintenance tasks such as chemical cleaning, vacuum leak detection, and solution regeneration should be regularly conducted. Leveraging technologies like the Internet of Things and big data enables intelligent monitoring and fault prediction, allowing potential issues to be identified in advance. This ensures stable operation of the units, improves cooling efficiency, and reduces operational costs and energy consumption.

[Key words] Absorption; Lithium Bromide Chiller Unit; Maintenance

引言

在节能减排与绿色制冷需求日益迫切的当下,吸收式溴化锂制冷机组凭借以热能为驱动、无臭氧层破坏物质排放等优势,广泛应用于化工、商业供冷等领域。然而,其内部复杂的吸收-蒸发循环体系及对运行环境的严苛要求,使机组易出现结晶、腐蚀、能效衰减等问题。深入研究维护技术,形成系统性维护策略,对保障机组可靠运行、延长使用寿命及推动行业绿色发展意义重大。

1 吸收式溴化锂制冷机组工作原理与结构分析

1.1 热力学原理

(1) 在吸收-蒸发循环过程中,溴化锂-水工质对是核心。溴化锂溶液具有强烈吸水性,在常温下能吸收水蒸气形成稀溶液,而在高温下稀溶液会释放水蒸气变为浓溶液,利用这一特性完成循环。当稀溶液进入发生器被加热后,水分蒸发,溴化锂溶液浓度升高;水蒸气进入冷凝器冷凝成水,再进入蒸发器蒸发吸热,实现制冷,随后水蒸气被吸收器中的浓溶液吸收,完成循环。(2) 蒸汽驱动下的能量转换机制以蒸汽为动力源。高温蒸汽进入发

生器加热溴化锂稀溶液,将蒸汽的热能传递给溶液,促使溶液中的水分蒸发,实现热能向溶液热能的转换;水蒸气在冷凝器中释放热量冷凝,热量被冷却介质带走;在蒸发器中,冷凝水蒸发吸收冷量用户的热量,实现热能与冷能的转换,最终完成能量的传递与转换。

1.2 关键部件结构与功能

(1) 发生器作为蒸汽加热模块,主要由加热管、壳体、溶液进出口等组成。其功能是利用蒸汽加热溴化锂稀溶液,使溶液中的水分蒸发,提升溶液浓度,为后续循环提供高浓度溴化锂溶液,是机组热能输入的关键部件。(2) 冷凝器由换热管、壳体、冷却水进出口和制冷剂进出口构成,作用是将发生器产生的水蒸汽冷凝成液态水,为蒸发器提供制冷剂;蒸发器由换热管、壳体、制冷剂进出口和冷水进出口组成,液态水在其中蒸发吸热,降低冷水温度,实现制冷;吸收器由换热管、壳体、浓溶液进出口和水蒸气进出口构成,用于吸收蒸发器产生的蒸气,将稀溶液变为浓溶液,完成循环。(3) 溶液泵主要由泵体、电机、叶轮等组成,功能是将吸收器中的稀溶液输送到发生器,保证溶液循环;真空

泵由泵体、电机、转子等组成,用于维持机组内部的真空环境,确保溴化锂溶液在较低温度下蒸发;管道系统由各种管道、阀门等组成,用于连接各部件,输送溶液和制冷剂,保证机组正常运行^[1]。

1.3 常见故障类型与成因

(1) 结晶故障多因温度或浓度控制失效引发。当溴化锂溶液温度过低,或溶液浓度过高时,溶液中的溴化锂易析出晶体,堵塞管道和部件,导致机组无法正常运行。比如冬季环境温度低,若机组保温措施不佳,溶液温度骤降,就可能出现结晶。(2) 腐蚀泄漏主要发生在不锈钢部件,常见有点蚀和应力腐蚀。点蚀多因溶液中含有杂质,如氯离子等,破坏不锈钢表面的钝化膜;应力腐蚀则是部件在承受应力的同时,受到腐蚀介质作用,如溴化锂溶液的侵蚀,导致部件出现裂纹,进而发生泄漏。(3) 蒸汽系统能效衰减通常由换热面结垢和真空度下降导致。长期运行后,蒸汽中的杂质会在换热面形成水垢,降低换热效率;若真空泵故障或机组密封不严,会导致真空度下降,使溴化锂溶液的蒸发温度升高,蒸汽消耗增加,最终造成能效衰减。

2 吸收式溴化锂制冷机组维护关键技术研究

2.1 日常维护管理

(1) 运行参数监控需实时跟踪核心指标。温度方面,重点监测发生器出口溶液温度(控制在90-110℃)、蒸发器冷水进出口温差(通常5-7℃),避免温度异常引发结晶;压力监测聚焦蒸汽入口压力(稳定在0.3-0.8MPa)及冷凝器冷却水压力,防止压力波动影响换热效率;浓度需通过密度计定期检测溴化锂溶液浓度(维持在50%-60%),浓度过高易结晶、过低则制冷量不足;真空度需每日用真空计测量,机组内部真空度应保持在133Pa以下,真空度下降会直接导致制冷能效衰减。(2) 溶液管理是延长机组寿命的关键。每周检测溴化锂溶液pH值,正常范围为9.0-10.5, pH值过低会加剧设备腐蚀,过高则可能产生沉淀,可通过添加氢氧化锂调节;缓蚀剂(常用铬酸锂)需每3个月检测浓度,当浓度低于0.1%时及时补充,确保缓蚀剂在金属表面形成稳定钝化膜,减少腐蚀风险,补充时需停机并搅拌均匀,避免局部浓度过高^[2]。(3) 蒸汽阀门与管道保温维护需定期检查。每日查看蒸汽阀门密封情况,若发现阀门渗漏,及时更换填料密封件,防止蒸汽泄漏造成能量浪费;每月检查管道保温层,若保温层破损或脱落,及时更换岩棉或聚氨酯保温材料,尤其在低温环境下,需确保管道外壁温度不低于环境温度,避免管道结露引发腐蚀。

2.2 周期性维护策略

(1) 化学清洗每年进行1次。先采用5%-8%的柠檬酸溶液循环清洗换热面,高效去除碳酸钙、硅酸钙水垢,清洗时间控制在4-6小时,期间每隔1小时检测浓度,过低时补充药剂;水垢清除后,用清水冲洗至pH值中性,再用2%-3%亚硝酸钠溶液钝化处理约2小时,形成氧化膜,最后排液烘干,防止残留腐蚀。(2) 真空系统检漏与修复每半年开展1次,优先采用氦质谱检漏法。将氦气充入机组内部,通过氦质谱检漏仪检测泄漏点,重点检查法兰接口、焊缝及阀门密封处,若发现泄漏,对于微小缝隙,可采用环氧

树脂密封;对于较大泄漏点,需更换密封垫片或焊接修复,修复后重新抽真空,确保真空度恢复至标准范围。(3) 溴化锂溶液再生与更换需依据检测结果。当溶液浓度超过65%或出现明显变色(呈深褐色)时,需进行再生处理,通过蒸馏法去除溶液中的杂质和过量水分,恢复浓度至正常范围;若溶液中杂质含量(如氯离子浓度超过50mg/L)或腐蚀产物过多,无法通过再生改善,则需整体更换溶液,更换时需彻底排空旧溶液,并用新溶液冲洗系统2-3次,避免新旧溶液混合影响性能。

2.3 故障诊断与应急处理

(1) 基于振动/温度传感器的故障预警需24小时在线监测。在溶液泵、真空泵电机轴承处安装振动传感器,设定振动阈值(通常为0.15mm/s),当振动值超过阈值时,系统自动报警,提示轴承磨损;在发生器、冷凝器换热管外壁安装温度传感器,若局部温度异常升高(温差超过10℃),则预警换热管结垢或堵塞,便于及时处理。(2) 结晶故障快速溶解方法需立即停机操作。首先开启发生器蒸汽加热阀,将溶液温度升高至120-130℃,同时通过溶液泵缓慢循环溶液,促进晶体溶解;若结晶严重,需从溶液箱加入蒸馏水稀释,稀释过程中每10分钟检测浓度,直至浓度降至55%以下,结晶完全溶解后,恢复正常运行参数,避免再次结晶^[3]。(3) 泄漏事故的应急封堵与系统恢复需快速响应。若发现不锈钢部件泄漏,先关闭相关阀门,切断泄漏区域与系统的连接,对于小泄漏,可采用专用堵漏胶临时封堵;对于大泄漏,需排空泄漏区域的溶液,更换损坏部件,修复后重新充注溶液并抽真空,开机试运行2小时,监测泄漏情况及运行参数,确认无异常后恢复正常运行。

2.4 智能化维护技术探索

(1) 物联网(IoT)在线监测系统设计需覆盖全机组。在关键部件(发生器、蒸发器、溶液泵等)安装温度、压力、流量、浓度等传感器,通过LoRa或4G网络将数据传输至云端平台,平台实时显示运行参数,当参数超出阈值时,自动向管理人员发送短信或APP报警,同时记录历史数据,便于趋势分析,系统还需具备远程控制功能,可远程启停设备或调节阀门开度。(2) 大数据分析在故障预测中的应用需构建预测模型。收集机组近3-5年的运行数据(参数变化、故障记录、维护记录),通过机器学习算法(如随机森林、神经网络)训练模型,分析参数变化与故障的关联关系,例如当溶液pH值持续下降且缓蚀剂浓度偏低时,模型可预测1个月内可能发生腐蚀故障,提前发出维护提醒,提高故障预测准确率^[4]。(3) 数字孪生技术模拟维护场景需构建三维模型。基于机组实际结构,建立数字孪生模型,模拟不同维护场景,如模拟化学清洗过程中溶液浓度变化对清洗效果的影响,优化清洗参数;模拟结晶故障溶解过程,分析加热温度与稀释速度的最佳配比,为实际维护提供操作指导,同时可通过数字孪生模型开展维护人员培训,降低实际操作风险。

3 吸收式溴化锂制冷机组维护案例分析与优化建议

3.1 典型案例分析

3.1.1 案例1: 某化工厂蒸汽机组结晶故障处理

该工厂机组冬季运行时,因车间温度骤降(低至5℃),且溶液浓度未及时调整(升至68%),导致发生器出口管道结晶堵塞,制冷量骤降50%。维护人员立即停机,开启发生器蒸汽加热(升温至125℃),同时通过溶液泵循环稀释(每10分钟补加50L蒸馏水),2小时后检测浓度降至54%,结晶完全溶解。后续加装管道保温层,并将溶液浓度控制阈值下调至58%,故障未再复发。

3.1.2 案例2: 区域供冷系统真空泄漏维护实践

某区域供冷系统机组运行3年后,真空度从100Pa升至250Pa,COP值下降0.3。采用氦质谱检漏法检测,发现冷凝器与吸收器连接法兰密封垫片老化,存在微小泄漏。维护团队更换耐高温密封垫片,重新抽真空至95Pa,同时对所有焊缝进行环氧树脂密封加固。修复后机组COP回升至原水平,每月节省蒸汽消耗约8吨。

3.2 维护成本与能效对比分析

(1) 预防性维护与事故后维修的成本差异。以1000RT机组为例,预防性维护(含年度清洗、季度检漏、月度参数检测)年均成本约8万元;若发生结晶故障后维修,需更换管道、补充溶液,单次成本达15万元,且停机3天造成生产损失约20万元,总成本是预防性维护的4.3倍;真空泄漏事故后维修成本约12万元,是预防性维护的1.5倍。(2) 维护前后机组COP(性能系数)变化。某商场机组维护前,因换热管结垢、真空度下降,COP仅为0.65;经化学清洗(除垢率92%)、真空修复后,COP提升至0.82,提升26%;持续执行季度维护6个月后,COP稳定在0.80以上,冷水产量提升约22%,每月减少电费支出约1.2万元。

3.3 优化建议

(1) 制定分阶段维护计划。日常维护(每日):监控温度、压力、真空度,检查阀门密封;季度维护(每3个月):检测溶液pH值、缓蚀剂浓度,更换阀门填料;年度维护(每年):化学清洗换

热面、真空系统检漏、溶液再生或更换,形成“日监控-季调整-年深度”的维护体系。(2) 关键部件寿命预测模型。基于换热管腐蚀速率(实测不锈钢管年腐蚀率0.12mm)、结垢厚度(年均增加0.3mm),结合运行时长,建立剩余寿命评估模型。例如,当换热管壁厚从初始2mm降至1.5mm时,发出更换预警,避免突发泄漏;通过模型预测,可将换热管更换周期从5年优化至6-7年,降低更换成本。(3) 蒸汽系统能效提升措施。优化蒸汽压力:根据制冷负荷调整蒸汽压力(负荷70%时,压力从0.8MPa降至0.5MPa),减少蒸汽浪费;回收冷凝水:加装冷凝水回收装置,将发生器排出的冷凝水(温度80-90℃)回收至锅炉,降低锅炉补水加热能耗,可提升蒸汽系统整体能效约15%。

4 结束语

吸收式溴化锂制冷机组维护研究对保障其稳定高效运行意义深远。通过明确工作原理与故障成因,掌握日常、周期性维护要点,借助智能化技术实现故障预警与精准处理,能有效降低机组故障率、提升能效。未来,随着技术持续进步,需进一步优化维护方案,强化新技术应用,提高维护的自动化与智能化水平,为吸收式溴化锂制冷技术的广泛应用和行业可持续发展提供坚实支撑。

[参考文献]

- [1] 周建兵. 溴化锂吸收式制冷机冷剂水污染故障分析及排除[J]. 暖通空调, 2020, (05): 79-80.
- [2] 戴永乐, 耿惠彬, 蔡小荣. 溴化锂吸收式制冷技术的回顾与展望[J]. 制冷技术, 2021, (01): 22-24.
- [3] 谭辉平. 溴化锂吸收式制冷机的节能途径[J]. 节能技术, 2022, 18(06): 16-18.
- [4] 邹琨宁. 溴化锂制冷机组节能综合评价[J]. 北京节能, 2021, (04): 32-34.