

微型燃气轮机——余热溴化锂吸收式制冷联供系统变工况特性研究

马华庚

郑州丰元电力工程设备有限公司，河南省郑州市，450199；

摘要：随着能源需求的不断增长和环境保护意识的日益增强，对高效、环保的能源利用方式提出了更高要求。微型燃气轮机与余热溴化锂吸收式制冷联供系统作为一种集成化的能源利用方案，其变工况特性研究对于提升系统整体能效、增强系统适应性和稳定性具有重要意义。本文旨在深入探讨该系统在不同工况下的运行特性，分析变工况对微型燃气轮机性能、溴化锂吸收式制冷系统性能以及联供系统整体性能的影响，并提出相应的优化策略，以期为该系统在实际应用中的高效运行提供理论依据和技术支持。

关键词：微型燃气轮机；余热溴化锂吸收式；制冷联供系统；变工况特性

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.010

引言

随着全球能源消耗的急剧增加和环境污染问题的日益严重，寻找高效、清洁的能源利用方式已成为国际社会共同关注的焦点。微型燃气轮机作为一种小型、高效的发电设备，因其结构紧凑、运行灵活、排放低等优点，在分布式能源系统中得到了广泛应用。同时，溴化锂吸收式制冷系统作为一种利用低品位热能的制冷技术，也因其环保、节能的特性而备受青睐。将微型燃气轮机与余热溴化锂吸收式制冷系统相结合，形成联供系统，不仅可以实现能源的梯级利用，还能有效提高能源利用效率，减少环境污染。

1 溴化锂吸收式制冷系统的工作原理及特点

溴化锂吸收式制冷系统利用溴化锂溶液的吸热特性实现制冷，无需压缩机，以热能为驱动能源。其工作循环由四个核心部件完成：发生器中，高温热源加热溴化锂稀溶液，使溶液中的水蒸发为制冷剂蒸汽；蒸汽进入冷凝器，被冷却介质冷凝为液态水；液态水经节流阀降压后进入蒸发器，在低压环境下蒸发吸热，实现对冷负荷侧的制冷；蒸发器中产生的水蒸汽被吸收器中的溴化锂浓溶液吸收，形成稀溶液，再由溶液泵送回发生器，完成循环。该系统的显著特点是环保性好，以水为制冷剂、溴化锂溶液为吸收剂，无氟利昂泄漏风险；运行平稳、噪音低，维护成本低；但制冷效率受驱动热源温度影响显著，通常要求热源温度不低于 70℃，且系统对密封性要求高，若混入空气会严重影响吸收效果，同时溴化锂溶液具有腐蚀性，需对设备进行防腐处理。

2 变工况对微型燃气轮机性能的影响

2.1 变工况对燃气轮机性能参数的影响

变工况下，微型燃气轮机的核心性能参数呈现规律性变化。电负荷降低时，燃料流量减少，导致涡轮进口温度下降，通常每降低 10% 负荷，涡轮进口温度下降 20~30℃，直接降低涡轮的做功能力；发电功率随负荷线性下降，但发电效率下降幅度更大，例如负荷从 100% 降至 50% 时，效率可能从 30% 降至 20% 以下，这是由于低负荷下燃烧室燃烧效率降低、回热器换热温差减小所致。压气机性能参数也随之变化：进气流量随负荷降低而减少，压比略有下降，而压气机效率在中等负荷时最高，低负荷或高负荷时均会下降；若负荷骤降过快，可能导致压气机进口流量低于喘振边界，引发喘振。乏气参数的变化直接影响余热利用：乏气温度随负荷降低而下降，通常负荷 50% 时乏气温度比满负荷低 50~80℃，乏气流量也相应减少，导致余热回收量降低，进而影响制冷系统性能。

2.2 环境参数变化对微型燃气轮机性能的影响

环境参数（温度、压力、湿度）的变化通过改变进气条件影响微型燃气轮机性能，其中环境温度的影响最为显著。环境温度升高时，空气密度降低，压气机吸入的空气质量流量减少，导致涡轮做功能力下降，发电功率降低，通常温度每升高 1℃，功率下降 0.5%~1%；同时，高温进气会使压气机出口温度升高，为避免涡轮进口温度超温，需减少燃料供应，进一步降低发电效率。环境压力降低（如高海拔地区）会同样导致进气密度下降，功率与效率均下降，且压气机喘振边界左移，运行

稳定性降低。环境湿度升高时，空气中水分含量增加，一方面可降低燃烧室温度，减少 NO_x 排放，另一方面水分蒸发吸热会消耗部分燃料能量，轻微降低发电效率，但对整体性能影响小于温度与压力。

2.3 燃料品质变化对微型燃气轮机性能的影响

燃料品质的变化（主要指热值、组分、压力）会直接改变微型燃气轮机的燃烧过程与性能输出。燃料热值降低（如天然气中混入氮气）时，为维持相同的发电负荷，需增加燃料流量，导致燃烧室容积热负荷升高，可能引起燃烧不稳定、火焰温度分布不均，甚至出现熄火风险；同时，过量燃料会使排烟量增加，乏气温度升高，但余热品质因烟气中惰性成分增加而略有下降。燃料组分变化（如天然气中乙烷、丙烷含量变化）会影响燃烧速度与火焰温度，组分中重烃含量过高易导致燃烧不完全，产生碳黑，污染回热器与涡轮叶片，降低换热效率与涡轮寿命。燃料供应压力降低时，燃料喷射速度下降，与空气混合效果变差，燃烧效率降低，同样会导致发电效率下降，需通过燃料增压装置稳定压力，保障燃烧质量。

3 变工况对溴化锂吸收式制冷系统性能的影响

3.1 变工况对制冷系统性能的影响

溴化锂吸收式制冷系统的变工况主要由驱动热源参数（温度、流量）、冷却介质参数（温度、流量）及冷负荷变化引发，核心性能参数（制冷量、COP）呈现显著变化。驱动热源温度降低时，发生器中溴化锂溶液的沸腾温度下降，制冷剂蒸汽产生量减少，制冷量随之降低；当热源温度低于 70°C 时，系统可能无法正常产生制冷剂蒸汽，制冷量急剧下降甚至为零；而热源温度过高会导致溶液浓度过高，易出现结晶现象，影响系统运行安全。冷却介质（如冷却水）温度升高时，冷凝器中制冷剂蒸汽冷凝温度升高，蒸发器中制冷剂蒸发压力升高，蒸发温度上升，制冷量与 COP 均下降。冷负荷降低时，蒸发器中制冷剂蒸发量减少，若驱动热源与冷却介质参数不变，溶液浓度会升高，需减少热源供应或增加冷却水量，以维持系统稳定运行。

3.2 变工况对制冷剂和吸收剂性质的影响

变工况下，制冷剂（水）与吸收剂（溴化锂溶液）的物理化学性质会随系统温度、压力变化而改变，进而影响系统性能。驱动热源温度升高时，发生器内溶液温度升高，溴化锂溶液的溶解度增大，溶液浓度升高，吸收能力增强，但浓度过高（超过 65%）时，溶液在低温

部位（如吸收器、溶液热交换器）易因温度降低而结晶，堵塞流道。冷却介质温度升高时，吸收器内溶液温度升高，溴化锂溶液对水蒸汽的吸收能力下降，溶液浓度降低，同时冷凝器中制冷剂水的饱和温度升高，密度减小，节流后的蒸发效果变差。冷负荷降低时，蒸发器内压力降低，制冷剂水的蒸发温度下降，与冷负荷侧的换热温差减小，制冷能力下降；同时，吸收器内溶液因吸收的水蒸汽减少而浓度升高，需通过调节热源或冷却参数维持浓度稳定。

3.3 溶液循环量变化对制冷系统性能的影响

溶液循环量（溶液泵流量）的变化是溴化锂制冷系统适应变工况的重要调节手段，但其变化会直接影响系统性能。溶液循环量增加时，发生器中参与换热的溶液量增多，若热源参数不变，单位质量溶液的加热量减少，溶液浓度升高幅度减小，制冷剂蒸汽产生量增加有限，制冷量提升不明显，但溶液泵功耗增加，导致系统 COP 略有下降。溶液循环量减少时，单位质量溶液的加热量增加，浓度升高幅度增大，制冷剂产生量可能先增加后减少，存在最优循环量使制冷量最大；若循环量过低，会导致发生器内溶液量不足，加热管表面易出现干烧，影响换热效率，同时吸收器内溶液浓度过高，易引发结晶。因此，变工况下需根据热源、负荷参数动态调整溶液循环量，实现制冷量与 COP 的平衡。

4 变工况下联供系统的运行特性研究

4.1 联供系统整体性能的变化

变工况下，微型燃气轮机与溴化锂制冷系统的性能耦合作用使联供系统整体性能呈现复杂变化规律。当电负荷降低时，微型燃气轮机乏气温度与流量下降，导致溴化锂制冷系统的驱动热源品质与数量降低，制冷量随之下降，呈现“电-冷”性能同步衰减的特性；若此时冷负荷需求不变，需启动辅助燃烧器补充热源，系统综合能耗增加。当环境温度升高时，微型燃气轮机发电功率与效率下降，乏气温度升高但流量减少，溴化锂制冷系统因冷却水温升高（环境温度升高导致）与热源流量减少的双重影响，制冷量与 COP 均显著下降，系统“电-冷”综合输出能力下降。当冷负荷降低时，溴化锂制冷系统对热源需求减少，可通过降低微型燃气轮机负荷或减少余热回收量来匹配，但需避免燃气轮机因负荷过低导致效率大幅下降，形成系统性能的权衡关系。

4.2 联供系统效率分析

变工况下联供系统的效率分析需从能源梯级利用

角度出发, 综合评估能源综合利用效率(总输出能量与燃料输入能量的比值)与烟效率(总输出烟与燃料输入烟的比值)。满负荷工况下, 系统通过余热回收实现电、冷联供, 综合能源利用效率可达70%-85%; 当负荷降低至50%时, 由于微型燃气轮机发电效率下降与溴化锂制冷系统COP降低的叠加影响, 综合能源利用效率可能降至50%-60%。烟效率分析更能反映能量品质的利用情况: 燃料的高品位烟一部分转化为电能(高品位), 一部分通过余热转化为冷能(中低品位), 变工况下, 若热源温度降低导致制冷系统烟损失增加, 会使整体烟效率下降更明显 than 能源综合利用效率。此外, 辅助能源的投入会增加燃料消耗, 进一步降低系统效率, 因此变工况下需通过优化调控减少辅助能源使用。

4.3 联供系统运行稳定性的评估

变工况下联供系统的运行稳定性评估需关注子系统间的耦合协调与关键参数的波动程度, 主要从三个维度展开。参数稳定性评估: 监测微型燃气轮机的涡轮进口温度、压气机喘振裕度, 溴化锂制冷系统的溶液浓度、结晶风险等参数, 若参数波动幅度超过允许范围(如涡轮进口温度波动 $\pm 20^{\circ}\text{C}$, 溶液浓度波动 $\pm 2\%$), 则判定系统稳定性不足。负荷响应稳定性评估: 分析系统对电、冷负荷阶跃变化的响应速度与超调量, 优质系统应在30-60秒内响应负荷变化, 且参数超调量小于10%。故障容错稳定性评估: 模拟单一子系统故障(如微型燃气轮机负荷骤降、制冷系统溶液泵故障), 观察系统是否能通过自动调节维持部分负荷输出, 或安全停机, 避免故障扩散。此外, 长期变工况运行下的设备磨损、腐蚀情况也需纳入稳定性评估, 确保系统长期可靠运行。

5 变工况下联供系统的优化策略

5.1 微型燃气轮机运行参数的优化

微型燃气轮机运行参数的优化核心是在变工况下维持较高的发电效率与稳定的余热品质。涡轮进口温度优化: 通过精准控制燃料流量, 在不同负荷下将涡轮进口温度维持在设计值附近(不超过最高限值), 例如低负荷时适当提高燃料空气比, 提升燃烧室温度, 缓解发电效率下降。压气机运行点优化: 采用可变几何压气机或进口导叶调节技术, 通过调整导叶角度改变压气机进气流量与压比, 扩大稳定工作范围, 避免低负荷喘振; 同时优化回热器旁通阀开度, 在低负荷时减少回热器换

热, 避免压气机出口温度过高。燃料供应优化: 根据燃料热值变化实时调整燃料流量, 采用燃料预处理装置(如脱硫、脱氮)稳定燃料品质; 通过燃料压力闭环控制, 确保燃烧器入口燃料压力稳定, 提升燃烧稳定性。

5.2 溴化锂吸收式制冷系统运行参数的优化

溴化锂制冷系统的参数优化需围绕驱动热源、冷却介质与溶液循环展开, 实现制冷量与COP的最大化。驱动热源参数优化: 根据微型燃气轮机乏气参数变化, 通过余热锅炉的旁通阀调节进入发生器的热媒流量与温度, 当乏气温度降低时, 减少热媒流量, 维持热媒温度在80-100 $^{\circ}\text{C}$ 的最优区间, 避免溶液结晶或制冷量骤降。冷却介质参数优化: 采用变频冷却水泵, 根据冷却水温与制冷负荷变化调整冷却水流量, 当冷却水温升高时, 增加流量以降低冷凝温度, 维持COP稳定; 同时优化冷却塔运行, 提升冷却效率。溶液循环优化: 采用变频溶液泵, 根据发生器出口溶液浓度与制冷负荷动态调整循环量, 使溶液浓度维持在55%-60%的安全高效区间, 兼顾制冷量与泵功耗。

6 结语

总之, 微型燃气轮机与溴化锂吸收式制冷联供系统在变工况下的性能变化复杂且相互影响, 需通过综合优化策略提升系统整体性能与稳定性。未来, 随着智能化控制技术的发展, 联供系统有望实现更高效、灵活的能源管理, 为分布式能源利用提供新的解决方案。同时, 深入研究变工况下的系统特性与优化方法, 对于推动联供技术的广泛应用具有重要意义。

参考文献

- [1] 李世君. 循环流化床锅炉掺烧生物质颗粒燃料可行性分析[J]. 石油石化绿色低碳, 2025, 10(02): 56-62.
- [2] 田皓元. 微型燃气轮机叶片冷却结构设计与性能评估[J]. 中国机械, 2025, (10): 103-106.
- [3] 李雪龙, 崔彦如, 刘海燕, 王彦靖, 王秀飞. 生物质颗粒燃料燃烧烟气释放研究[J]. 现代盐化工, 2024, 51(06): 45-48.
- [4] 刘越茂. 氢燃料微型燃气轮机增程系统建模及控制策略研究[D]. 太原科技大学, 2024.
- [5] 郑俊辉. 微型燃气轮机通流方案与氢燃料燃烧室性能研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2024.