

多联产系统能量梯级利用与炯损失分析

信 蕾 焦尚荣 李 鑫 方文武 郑秀明
华能（天津）煤气化发电有限公司 天津 300452

摘 要：本文聚焦多联产系统，阐述能量梯级利用原理及其拓扑结构，构建炯分析模型，解析炯损失来源。以煤基多联产系统为例，开展能量流与炯流分析、关键设备炯损失敏感性分析。基于此，提出能量梯级利用优化、炯损失抑制及系统集成与多目标优化策略，旨在提升系统能效，降低炯损失，为多联产系统的高效、低碳、经济运行提供理论支撑与实践指导。

关键词：多联产系统；能量梯级利用；炯分析；热力学优化；系统集成

引言：在能源需求增长与环保要求提升的背景下，传统能源利用方式能效低、污染大。多联产系统因能实现能源的多元、高效利用，成为研究热点。能量梯级利用是多联产系统高效节能的核心，炯分析可评估能量利用品质、识别损失。本文深入探讨多联产系统能量梯级利用理论与炯分析模型，结合案例分析提出优化策略，对推动能源高效利用和可持续发展具有重要意义。

1 多联产系统能量梯级利用理论

1.1 能量梯级利用原理

能量梯级利用是多联产系统实现高效节能的核心原理，其核心遵循“温度对口、梯级利用”原则，强调根据能量品位的高低，在合适的温度区间内实现能量的分级转化与高效利用，避免高品位能量低质化浪费。该原理基于热力学第一定律和第二定律，明确能量不会凭空产生或消失，且转化具有方向性，高品位能量（如高温燃料化学能、高温蒸汽）应优先用于高品位需求（如发电、驱动机械），其产生的中低品位余热则用于满足低品位需求（如供暖、工业工艺热）。在多联产系统中，能量梯级利用通过串联不同能级的能量转换过程，实现能源的分层利用，例如燃气-蒸汽联合循环中，燃料化学能先通过燃气轮机在高温区转化为机械能发电，排出的高温炯气再通过余热锅炉产生蒸汽，驱动蒸汽轮机进一步发电，大幅提升能源利用效率^[1]。实践表明，该原理可有效解决传统能源利用中“炯囱式”运行导致的能效低下问题，为多联产系统的高效设计提供核心理论支撑。

1.2 多联产系统拓扑结构

多联产系统拓扑结构是实现能量梯级利用的物理载体，核心是将化工生产、能源转换、余热回收等多个子系统通过合理耦合，形成有机统一的整体，分为基础架构、耦合节点和输出终端三个核心部分。基础架构包含能源输入单元（如化石燃料气化装置、可再生能源收集

设备）和核心转换单元（如燃气轮机、蒸汽轮机、反应器）；耦合节点是实现子系统协同的关键，负责能量、物质的传递与分配，如余热回收装置、换热网络等，可实现不同子系统间的能量互补；输出终端则根据需求提供多元化产品，如电力、热力、化工产品（合成气、甲醇等）。根据能量耦合方式的不同，拓扑结构主要分为串联式、并联式和混联式三类：串联式通过能量逐级传递实现梯级利用，结构简单且能效稳定；并联式多个子系统并行运行，灵活性强；混联式结合两者优势，兼顾能效与灵活性。合理的拓扑结构设计需结合系统用途、能源类型和产品需求，确保能量流、物质流的顺畅传递，为能量集成和后续优化奠定基础。

2 多联产系统炯分析模型构建

2.1 炯分析基本理论

炯分析基本理论是评估多联产系统能量利用品质、识别能量损失的核心工具，其区别于传统能量分析仅关注能量数量的局限，从能量“质”和“量”相结合的角度，量化能量的可用程度。炯又称有效能，是指在一定环境条件下，能量能够转化为有用功的最大值，其大小取决于能量的品位和环境基准态。炯分析基于热力学第二定律，核心是通过计算系统各环节的炯值，评估能量转换过程的不可逆性，精准识别炯损失的关键环节^[2]。根据能量形式的不同，炯主要分为热能炯、机械能炯、化学能炯和电能炯，其中化学能炯是多联产系统（如煤基、天然气基多联产）的核心研究对象，其大小与物质的化学结构、化学键强度密切相关。炯分析的基本步骤包括确定环境基准态、计算系统各物流和能流的炯值、分析炯平衡关系、量化炯损失，为后续系统炯平衡方程构建和炯损失解析提供理论支撑，是多联产系统高效优化的重要理论基础。

2.2 系统炯平衡方程

系统熵平衡方程是熵分析模型的核心,其本质是基于熵守恒原理,描述多联产系统输入熵、输出熵与熵损失之间的定量关系,为量化系统能效和熵损失提供数学依据。根据多联产系统的复杂性,熵平衡方程分为整体系统和局部子系统两个层面:整体系统熵平衡方程为“输入熵=输出有用熵+总熵损失”,其中输入熵包括燃料化学能熵、外界输入的电能熵等;输出有用熵包括产品(电力、化工产品、热力)的熵值总和;总熵损失是系统各环节不可逆过程产生的熵损失之和。局部子系统(如气化炉、燃气轮机、余热锅炉)的熵平衡方程则根据子系统的能量转换特性构建,明确子系统内部的熵输入、熵输出和局部熵损失。方程构建过程中,需考虑传热、传质、化学反应等不可逆过程对熵损失的影响,采用精准的熵计算方法(如化学熵计算的吉布斯自由能法),确保方程的准确性和实用性。通过熵平衡方程,可量化系统整体及各子系统的熵效率,为后续熵损失来源解析和抑制措施制定提供量化依据。

2.3 熵损失来源解析

熵损失来源解析是多联产系统熵分析的核心目标,其核心是通过熵平衡方程计算结果,识别系统中熵损失的主要环节、类型和影响因素,为后续熵损失抑制提供针对性方向。多联产系统的熵损失主要源于不可逆过程,根据产生原因可分为四类:一是化学反应不可逆熵损失,主要发生在燃料气化、燃烧等环节,由于反应不完全、反应条件偏离理想状态导致,是煤基多联产系统的主要熵损失来源之一;二是传热不可逆熵损失,源于系统内不同温度梯度的传热过程,如换热设备中冷热流体的温差传热,温差越大,熵损失越大;三是传质不可逆熵损失,发生在物质分离、混合等过程,如合成气净化环节的组分分离,传质效率越低,熵损失越大;四是机械不可逆熵损失,主要存在于动力设备(如燃气轮机、蒸汽轮机)中,源于摩擦、泄漏等机械损耗。通过解析各环节熵损失的占比和影响因素,可明确熵损失的关键控制点,例如燃气轮机和蒸汽轮机的熵损失占比较高,需重点优化设备运行参数,为后续抑制措施制定提供明确依据。

3 案例分析与数值模拟

3.1 案例系统描述

为验证多联产系统能量梯级利用理论和熵分析模型的有效性,选取煤基多联产系统作为案例进行分析,该系统以煤炭为主要原料,实现电力、合成气和热力的协同生产,适配工业园区的综合用能需求。案例系统采用混联式拓扑结构,主要由煤炭气化子系统、燃气-蒸汽联

合循环子系统、合成气净化子系统和余热回收子系统组成,设计额定功率500MW,年运行时间8000小时,煤炭处理能力为1200t/d。其中,煤炭气化子系统采用加压气化技术,将煤炭转化为以CO和H₂为主的合成气,合成气一部分用于驱动燃气轮机发电,另一部分经净化后作为化工原料输出;燃气轮机排出的高温烟气进入余热锅炉,产生高温高压蒸汽,驱动蒸汽轮机进一步发电,同时余热锅炉产生的中低温蒸汽用于园区供暖和工艺用热。系统采用先进的能量集成技术,优化换热网络设计,实现能量的梯级利用,案例系统的设计熵效率目标为65%以上,为后续能量流、熵流分析和敏感性分析提供真实的系统载体^[3]。

3.2 能量流与熵流分析

基于案例系统的结构和运行参数,采用数值模拟方法开展能量流与熵流分析,明确系统能量和熵的传递、转换规律,量化系统能效和熵损失分布。能量流分析结果显示,煤炭输入能量中,42%用于燃气-蒸汽联合循环发电,28%转化为合成气化学能,18%用于园区热力供应,12%为系统能量损失,其中余热损失占比最高,达7%,表明余热回收仍有优化空间。熵流分析基于构建的熵分析模型,计算各子系统的熵输入、输出和熵损失,结果显示,系统总熵效率为62.3%,未达到设计目标,主要熵损失集中在煤炭气化子系统(占总熵损失的38%)和燃气轮机子系统(占总熵损失的27%),其中气化子系统的化学反应不可逆熵损失和燃气轮机的传热、机械不可逆熵损失最为显著。通过能量流与熵流的耦合分析,明确了能量损失与熵损失的对应关系,验证了能量梯级利用理论的合理性,同时为后续关键设备熵损失敏感性分析和系统优化提供了数据支撑。

3.3 关键设备熵损失敏感性分析

针对案例系统中熵损失占比较高的关键设备(气化炉、燃气轮机、余热锅炉),采用控制变量法开展熵损失敏感性分析,探究各设备运行参数对熵损失的影响程度,明确优化优先级。分析结果表明,气化炉的熵损失对气化温度和压力最为敏感,当气化温度从1300℃提升至1400℃时,熵损失降低8.2%,而压力从3.0MPa提升至3.5MPa时,熵损失降低5.7%,表明提升气化温度是降低气化炉熵损失的关键;燃气轮机的熵损失主要受进口温度和压比影响,进口温度每提升100℃,熵损失降低6.9%,压比从18提升至22时,熵损失降低4.3%;余热锅炉的熵损失对换热温差最为敏感,当冷热流体最小换热温差从25℃降至15℃时,熵损失降低7.5%。通过敏感性分析,量化了各参数对关键设备熵损失的影响系数,明

确定了各设备的优化方向和参数调整范围,为后续多联产系统优化策略的制定提供了精准的技术依据。

4 多联产系统优化策略

4.1 能量梯级利用优化

能量梯级利用优化是提升多联产系统能效的核心策略,基于“温度对口、梯级利用”原则,结合案例分析结果,从能量分配、转换过程和余热回收三个方面制定优化措施。在能量分配优化方面,根据不同产品的能量品位需求,重新规划能量分配比例,将高品位能量优先分配给发电和高品位化工生产,中低品位余热重点用于供暖和低品位工艺用热,避免高品位能量低质化浪费,优化后可使系统能量利用率提升5%以上。在能量转换过程优化方面,优化燃气-蒸汽联合循环的运行参数,提升燃气轮机进口温度和蒸汽轮机参数,强化能量分级转换效率;改进煤炭气化工工艺,提升气化效率,减少能量损失。在余热回收优化方面,采用高效换热设备,拓展余热回收范围,将各子系统的中低品位余热(如合成气冷却余热、设备散热)回收利用,用于驱动有机朗肯循环(ORC)发电或园区制冷,进一步挖掘余热利用潜力,预计可降低系统余热损失30%以上,全面提升系统能量梯级利用水平。

4.2 烟损失抑制措施

结合烟损失来源解析和关键设备敏感性分析结果,针对不同类型的烟损失,制定针对性的抑制措施,降低系统总烟损失,提升烟效率。针对化学反应不可逆烟损失,优化煤炭气化和燃烧工艺,采用高效催化剂提升反应完全度,控制反应温度和压力在最优范围,减少反应不可逆性,可使气化子系统烟损失降低10%-15%;针对传热不可逆烟损失,优化换热网络设计,采用高效换热材料,减小冷热流体换热温差,同时加强设备保温,减少散热损失,降低余热锅炉和换热器的烟损失;针对传质不可逆烟损失,改进合成气净化工艺,采用高效分离设备,提升传质效率,减少组分分离过程中的烟损失;针对机械不可逆烟损失,优化动力设备(燃气轮机、蒸汽轮机)的结构设计,减少摩擦和泄漏,提升设备运行效率。通过多维度的烟损失抑制措施,可使系统总烟效率提升至68%以上,达到设计目标。

4.3 系统集成与多目标优化

系统集成与多目标优化是实现多联产系统高效、低碳、经济运行的综合策略,核心是通过优化系统拓扑结构和运行参数,实现能量、物质的协同利用,兼顾能效、环保和经济性三大目标。在系统集成优化方面,结合案例系统的混联式拓扑结构,进一步强化各子系统的耦合程度,引入可再生能源(如太阳能、风能)与传统化石能源耦合,构建多能源互补的集成系统,减少化石能源消耗;优化换热网络和物质流网络,实现能量与物质的协同梯级利用,提升系统整体协同性^[4]。在多目标优化方面,建立以系统烟效率最大化、CO₂排放量最小化和运行成本最低化为目标的优化模型,采用遗传算法求解最优运行参数组合,平衡三大目标的冲突。优化过程中,结合关键设备敏感性分析结果,重点调整气化温度、燃气轮机进口温度等关键参数,最终实现系统烟效率提升、碳排放降低和成本节约的多重效益,为多联产系统的工程应用提供可行的优化方案。

结束语

本文围绕多联产系统展开研究,通过理论分析、案例研究与数值模拟,明确了能量梯级利用及烟损失的关键要点。提出的能量梯级利用优化、烟损失抑制和系统集成与多目标优化策略,为提升系统能效、降低烟损失提供了有效途径。未来,随着技术发展,多联产系统有望在更多领域应用,实现能源的高效、低碳、经济利用,助力能源可持续发展目标达成。

参考文献

- [1]曲新鹤,赵钢,王捷,等.基于核能制氢的氢电联产系统能量梯级利用研究[J].原子能科学技术,2021,55(z1):37-44.
- [2]陈林根,冯辉君,谢志辉,等.能量利用系统的构形热力学优化理论——研究进展与太阳能驱动热电冷氢联产系统优化应用初探[J].武汉工程大学学报,2024,46(5):543-563.
- [3]侯起旺,文兆伦,张忠林,等.一种煤基多联产碳循环系统的设计及评价[J].化工学报,2022,73(5):2073-2082.
- [4]李金平,李紫荆,李天澍,等.多种可再生能源互补的多联产系统性能研究[J].甘肃科学学报,2023,35(5):119-128.