

低热值燃气燃料对联合循环机组热力性能影响分析

侯 辉

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘 要】：联合循环机组广泛应用于燃气发电领域，燃料品质对机组热力性能具有关键影响。低热值燃气因热值偏低、成分波动大，易引发燃烧不稳定、输出功率下降及系统效率降低等问题。针对上述情况，从燃气成分特性、燃烧参数及热力循环过程入手，对机组运行参数进行匹配优化，并调整压比、燃烧温度及余热利用方式。结果表明，优化后机组热效率明显提升，燃料适应性增强，运行稳定性得到改善，实现低热值燃气条件下的高效利用。

【关键词】：低热值燃气；联合循环机组；热力性能；燃烧特性；效率优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.075

引言

燃气发电结构不断调整，工业副产气、生物质气等低热值燃气逐渐进入能源利用体系。与常规天然气相比，此类燃料存在热值低、波动性强及燃烧特性复杂等特征，使联合循环机组在运行过程中出现效率下降与工况偏离等现象。机组设计通常基于稳定燃料条件，当燃料性质发生变化时，原有热力匹配关系被打破，关键参数之间的协调性受到影响。围绕燃料特性变化对热力过程的影响展开分析，有助于明确性能变化规律，并为运行参数调整及系统优化提供依据，从而提升机组对多源燃气的适应能力。

1 低热值燃气特性及其对循环过程的影响

1.1 燃气成分与热值差异分析

低热值燃气通常由氮气、二氧化碳及少量可燃组分构成，其中一氧化碳、氢气及甲烷含量显著低于常规天然气，导致单位体积燃料释放的化学能减少。惰性气体比例增加不仅降低燃料比热值，还削弱燃烧反应速率，使火焰温度下降并扩大燃烧区体积。燃气成分波动直接改变理论空燃比与实际配风需求，进而影响燃烧器设计工况。高比例惰性组分还会增加烟气比热容，使排气带走的热量增大，对后续余热回收环节产生不利影响。该类燃气的低密度与高体积流量特征进一步改变压气机与燃烧系统的流量匹配关系，对联合循环整体能量分配产生持续性干扰。

1.2 燃烧特性变化规律

低热值燃气燃烧过程中呈现火焰传播速度降低与稳定性减弱的特征，点火延迟时间延长，燃烧区内反应不完全程度增加。较低的绝热火焰温度使燃烧室出口温度分布趋于不均，局部温度梯度增大，对透平入口工况形成扰动。燃料中氢气比例变化对燃烧反应路径具有显著调节作用，影响自由基生成速率及链式反应强度，进而改变燃烧效率^[1]。较高的惰性气体含量抑制高温反应区形成，使燃烧反应更依赖湍流混合程度，对燃烧器结构与喷射方式提出更高要求。

1.3 热力循环参数响应特征

燃料热值降低直接引起燃气轮机燃烧室出口温度下降，透平膨胀功减少，导致机组出力下降并改变压气机功耗占比。较大的燃气体积流量使压气机入口流量提升，压比实际运行点发生偏移，影响压气机效率与稳定裕度。排气温度因燃烧不完全及烟气的比热增大呈现上升趋势，改变余热锅炉换热驱动力及蒸汽参数分布。蒸汽轮机侧蒸汽温度与压力波动加剧，循环热效率受到叠加影响。系统内能量传递路径发生重新分配，部分热量以显热形式排出，削弱回收利用水平，使整体循环呈现效率下降与参数耦合增强的特征。

2 联合循环机组运行状态变化分析

2.1 燃气轮机出力变化情况

低热值燃气进入燃烧系统后，单位质量燃料释放的有效热量降低，导致燃烧室出口温度受限，透平进口温度难以维持设计水平，直接削弱透平做功能力。为维持既定负荷水平，燃料流量需显著增加，使燃烧室流量分布发生改变，进而影响压气机工作点与透平膨胀匹配关系。较大的体积流量引起流道内阻力损失增加，压缩过程与膨胀过程的能量转化效率下降。燃烧不完全现象加剧还会引起局部温度不均，使透平叶片热负荷分布不稳定，进一步制约出力释放能力。负荷调节过程中动态响应变慢，机组在中低负荷区间的输出稳定性明显减弱。

2.2 余热锅炉换热特征变化

低热值燃气燃烧后排气温度及烟气组成发生变化，使余热锅炉内的换热驱动力呈现非线性波动特征。烟气中惰性组分比例上升，导致比热容增大，在相同温差条件下携带更多显热，但有效传热系数下降，影响换热器表面传热效率。烟气流量增加改变流动状态，强化对流换热的同时也加剧烟气侧压降，导致系统能耗上升^[2]。受排气温度波动影响，各受热面蒸发段与过热段的热负荷分配发生偏移，蒸汽品质稳定性受到干扰。换热过程中的温度梯度分布趋于不均，使局部区域存在换热不足或过热现象，降低余热回收系统整体协同效率。

2.3 蒸汽轮机效率波动情况

蒸汽系统受前端余热回收波动影响,进入蒸汽轮机的蒸汽参数呈现不稳定特征,主要表现为蒸汽温度与压力的同步波动。蒸汽初参数降低削弱膨胀过程中的有效焓降,使单位蒸汽做功能力下降,直接影响蒸汽轮机内效率。蒸汽流量的不均衡分布还会改变各级动叶与静叶的流动匹配关系,引发局部流动损失增加。部分工况下蒸汽湿度上升,造成叶片冲蚀风险增加,同时降低流动通道内的能量转换效率。频繁的参数波动使调节系统负荷增加,节流损失扩大,进一步削弱蒸汽轮机整体运行效率与稳定性。

3 热力性能下降的关键影响因素解析

3.1 燃烧温度降低影响机制

燃料低热值特性使单位质量燃料释放的化学能显著减少,燃烧反应过程中有效放热速率下降,导致燃烧室内绝热火焰温度整体降低。温度降低削弱高温区内反应强度,使活性自由基生成速率下降,燃烧反应趋于缓慢并延伸至更大空间范围。燃烧温度不足还限制透平进口温度提升空间,减少高温高压工质在透平内的膨胀功输出能力,直接削弱热力循环中的能量转换效率。较低温度条件下烟气中未完全反应成分增加,造成化学能未充分释放,进一步降低系统可利用能量水平,同时改变燃烧室出口温度分布均匀性,对后续膨胀过程产生持续影响。

3.2 压比匹配失衡问题

低热值燃气燃烧需求增加导致燃料体积流量显著上升,使压气机与燃烧系统之间的流量平衡关系发生偏移。压气机在非设计工况下运行时,其实际压比与效率均发生变化,压缩过程能耗增加而输出空气状态偏离最优区间。透平侧因入口温度降低及流量变化,膨胀比与设计参数之间出现不匹配,导致膨胀过程中的能量释放不充分^[3]。压气机与透平之间原有的功率平衡关系被打破,使系统整体热力循环偏离最佳运行轨迹。流量与压比的耦合变化还可能引起气动稳定裕度下降,对机组安全运行构成制约,并进一步放大系统效率损失。

3.3 余热利用效率变化原因

低热值燃气燃烧后烟气成分中惰性气体比例提高,使烟气比热容增加,在传热过程中表现为单位温降所释放的有效热量比例下降。烟气温度分布不均导致余热锅炉各受热面吸热不平衡,部分区域换热驱动力不足,使蒸汽生成过程效率降低。烟气流量增加虽然提升对流换热强度,但同时加大流动阻力损失,使系统综合能耗上升。换热过程中的温差利用率下降,使部分中低温热能未被有效回收,转化为排烟损失。热量传递路径中多级换热协同关系被削弱,导致余热回收系统整体效率下降,并对蒸汽侧热力参数稳定性产生连锁影响。

4 针对性优化调控方法设计

4.1 燃烧参数优化调整策略

低热值燃气条件下燃烧过程需通过精细化参数调控以维持高效稳定状态,核心在于实现燃料与空气配比、燃烧温度及流场结构的协同优化。针对燃料热值降低导致的放热能力不足问题,应适当提高燃料供给流量,并通过分级配风方式改善混合均匀性,使可燃组分在反应区内充分参与燃烧反应。一次风与二次风比例需根据燃气组分实时调节,以强化湍流混合强度并缩短反应路径,提高燃烧效率。燃烧室内温度分布需通过多点监测与反馈调节实现动态均衡,避免局部过冷或过热现象对透平入口工况产生扰动。引入低氮燃烧控制理念,在保证燃烧温度的同时限制局部高温区形成,使热力性能与环保指标保持协调。点火能量及火焰稳定区结构需根据燃气燃烧特性优化设计,以提升燃烧初始阶段的稳定性并缩短点火延迟时间。结合数字化控制手段建立燃烧参数动态优化模型,对燃气成分波动进行实时响应,实现燃烧过程由经验调节向精确控制转变,从而在低热值燃气工况下维持较高的燃烧效率与稳定运行状态。

4.2 压气机与透平匹配优化方法

压气机与透平之间的匹配关系直接决定联合循环机组的能量转换效率,低热值燃气条件下需通过多维度参数调整实现流量、压比及功率分配的动态平衡。针对燃料体积流量增加引起的气流组织变化,应通过调整压气机导叶开度改变进气角度,使压气机工作点向高效率区间回归,降低压缩过程中的不可逆损失。透平侧需通过优化膨胀级间压力分布,使工质在各级透平中实现均匀能量释放,避免局部膨胀不足或过度膨胀现象。通过建立压气机—透平联合特性曲线模型,对不同工况下的流量与压比关系进行耦合分析,实现运行参数的精细化匹配。引入变工况调节机制,通过转速、负荷及导叶角度的协调控制,使系统在非设计工况下仍能维持较高运行效率^[4]。气动稳定性需通过裕度控制进行保障,在优化压比的同时避免接近喘振边界。结合智能控制理念,构建基于实时数据的匹配优化算法,对燃气性质变化进行快速响应,实现压气机与透平之间的动态协调运行,从而有效提升整体热力循环效率。

4.3 余热回收系统改进措施

余热回收系统优化需从传热强化、结构调整及能量梯级利用等方面进行系统性改进,以提升低热值燃气工况下的热量回收效率。针对烟气比热容增加及温度分布不均问题,应通过优化受热面布置方式,使蒸发段、过热段及再热段的换热负荷分配更加合理,强化不同温度区间内的热量利用效果。换热器结构需结合烟气流动特性进行改进,通过增加换热面积与优化流道设计提升传热系数,同时控制烟气侧压降以降低系统阻力损失。采用多级换热与分段回收策略,使高温、中温及低温烟气中的热量得到梯级利用,减少排烟损失。蒸汽参数控制需与换

热过程紧密耦合,通过调节给水流量与蒸汽压力,实现蒸汽品质的稳定输出。引入先进监测技术对烟气温度场与流动状态进行实时跟踪,结合智能调控系统实现余热回收过程的动态优化。强化系统协同运行机制,使燃气轮机排气与余热锅炉运行状态保持一致,从而提高整体热能利用水平并降低系统能量损耗。

5 优化措施实施后的性能提升效果

5.1 机组整体效率提升情况

优化措施实施后,燃烧过程中的放热效率显著提高,燃料化学能向热能转化更加充分,燃烧室出口温度分布趋于均匀,透平入口参数得到有效恢复。压气机与透平匹配关系改善后,压缩功消耗与膨胀功输出之间的能量比例更加合理,降低了系统内部不可逆损失。余热回收系统经结构优化后,烟气显热利用率提升,中低温段热能回收能力增强,使蒸汽侧能量贡献增加。各子系统之间的热量传递路径更加顺畅,能量梯级利用水平明显提高,减少排烟热损失与节流损失。综合作用下,联合循环整体热效率呈现稳定上升趋势,系统运行更加接近设计工况下的高效区间。

5.2 输出功率恢复与稳定性改善

燃烧参数与流量分配优化后,燃气轮机燃烧稳定性增强,火焰结构趋于集中且反应强度均衡,透平进口温度波动范围缩小,膨胀过程更加连续稳定。压气机运行点经调整后远离低效区与不稳定区域,使进气与压缩过程更加平稳,减少气动扰动

对系统输出的影响^[5]。透平级间压力分布优化后,各级能量释放更加均衡,避免局部负荷集中导致的功率波动。蒸汽侧参数稳定性提升,使蒸汽轮机出力波动减弱,整体输出功率恢复至较高水平。负荷调节响应速度加快,运行过程中频繁波动得到抑制,机组在不同工况下均能保持较高的运行稳定性与连续输出能力。

5.3 燃料适应能力增强分析

优化控制体系建立后,燃气成分变化对机组运行的影响得到有效缓冲,燃烧系统能够根据热值波动自动调整配风与燃料流量,实现稳定燃烧状态维持。压气机与透平匹配关系具备更高调节灵活性,可适应不同密度与流量条件下的运行需求,使系统对燃料性质变化的敏感性降低。余热回收系统通过分级利用与动态调控,使不同温度区间的热能均能被有效吸收,提高对多种燃气类型的兼容能力。多参数联动调控机制强化系统整体协调性,使燃料热值、成分波动不再直接转化为性能波动,机组运行范围得到拓展,在多源低热值燃气条件下仍能维持稳定高效的运行状态。

6 结语

低热值燃气条件下联合循环机组热力过程呈现明显偏离,通过燃烧调控、气动匹配及余热回收系统优化,实现能量转化路径重构与参数协调运行。各子系统协同水平提升,热效率与输出稳定性得到恢复,系统对燃料波动的适应能力显著增强,为多源低品质燃气高效利用提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 李坚胜.单轴燃气-蒸汽联合循环机组热力性能诊断方法[J].电工技术,2025,(8):200-202.
- [2] 徐望人,朱志劼,刘网扣.不同掺氢比例下联合循环机组热力性能分析[J].热力透平,2025,54(1):49-52+71.
- [3] 颜蓓蓓,刘晓芸,周生权,等.多源低热值燃气无焰燃烧的数值模拟研究[J].煤炭学报,2024,49(S1):362-374.
- [4] 孟晓敏,李平,武建国,等.双层 SCR 脱硝催化剂在低热值燃气轮机组的应用[J].包钢科技,2023,49(2):69-72.
- [5] 何冬辉.基于国际标准 ISO2314 的联合循环机组热力性能试验研究[J].东北电力技术,2021,42(5):14-17.