

IGCC电站全流程能效分析与瓶颈识别

孙路 方文武 郑秀明 李鑫 信蕾
 华能(天津)煤气化发电有限公司 天津 300452

摘要: 整体煤气化联合循环(IGCC)是高效清洁的能源转化技术。本文以热力学第一、二定律为核心,详述其全流程建模方法,分析能量效率分布,识别各单元能效瓶颈,如气化单元反应不完全、空分单元能耗高、燃气轮机排烟热损失大等。针对瓶颈提出气化参数优化、空分设备升级、燃气轮机维护及全流程集成优化等提效措施,助力IGCC电站能效提升与可持续发展。

关键词: IGCC; 全流程能效分析; 焓分析; 瓶颈识别; 联合循环

引言: 在能源需求增长与环保要求提高的背景下,煤炭清洁高效利用成为关键。整体煤气化联合循环(IGCC)技术兼具高效与环保优势,是煤炭清洁利用的核心路径之一。然而,IGCC电站全流程复杂,涉及多个核心单元,各单元能效差异影响整体性能。深入开展全流程能效分析、识别瓶颈并提出改进措施,对提升IGCC电站能效、推动其广泛应用具有重要意义。

1 IGCC 全流程热力学基础与建模方法

1.1 IGCC工艺流程详解

整体煤气化联合循环(IGCC)是一种高效清洁的能源转化技术,其全流程由多个核心单元协同构成,形成完整的能源转化链条。流程开篇为燃料预处理环节,将煤炭粉碎、干燥并根据气化炉类型制备成水煤浆或干煤粉,去除杂质以保障后续反应稳定性。随后进入核心的气化单元,在高温高压环境下,煤炭与空分单元提供的氧气发生气化反应,生成以CO和H₂为主的粗合成气。粗合成气经净化单元脱除硫、氮、粉尘等杂质后,送入燃气轮机燃烧室燃烧,驱动燃气轮机发电。燃气轮机排出的高温尾气进入余热锅炉,产生高压蒸汽驱动蒸汽轮机发电,实现能量梯级利用。最后,各单元产生的废水、废渣经处理后达标排放,形成“燃料预处理—气化—净化—联合循环发电—三废处理”的闭环流程,兼具高效性与环保性,是煤炭清洁利用的核心技术路径之一。

1.2 热力学分析理论基础

IGCC全流程热力学分析以热力学第一定律和第二定律为核心理论基础,贯穿整个系统的能量转化与传递过程。热力学第一定律(能量守恒定律)用于分析系统内能量的输入、输出与损耗,明确燃料化学能向热能、机械能、电能的转化效率,通过计算各单元的能量平衡,量化能量损失环节^[1]。热力学第二定律则聚焦能量的品质,通过熵增原理和焓分析,评估能量转化过程中的不可逆损失,识别系统中能量品质下降的关键节点。另外还需结合传热传质理论、反应热力学等,分析气化反应、燃烧反应、换热过程中的热力学特性,确定各单元的最佳热力学操作参数。

可逆损失,识别系统中能量品质下降的关键节点。另外还需结合传热传质理论、反应热力学等,分析气化反应、燃烧反应、换热过程中的热力学特性,确定各单元的最佳热力学操作参数。

1.3 IGCC全流程建模方法

IGCC全流程建模是实现系统性能分析、优化设计与运行调控的关键手段,核心是将复杂的物理化学过程转化为可量化、可仿真的数学模型。建模方法主要分为机理建模与数据驱动建模两大类,实际应用中多采用两者结合的方式。机理建模基于热力学、反应动力学等理论,通过推导各单元的物料平衡、能量平衡和动量平衡方程,构建气化炉、空分装置、燃气轮机等核心单元的数学模型,精准反映单元内部的物理化学变化。数据驱动建模则利用系统运行数据,通过机器学习、神经网络等算法,建立输入输出参数之间的关联模型,弥补机理建模中难以量化的复杂因素影响。建模过程中需明确各单元的边界条件,实现单元模型的耦合集成,确保全流程模型的准确性和可靠性,最终用于系统性能预测、运行参数优化和故障诊断。

2 IGCC 全流程能量效率分布分析

2.1 整体能量平衡

IGCC全流程整体能量平衡是评估系统能量利用效率的核心,本质是基于热力学第一定律,量化系统总能量输入与输出的平衡关系。系统能量输入主要为燃料(煤炭)的化学能,辅以电能、热能等辅助输入能量;能量输出包括电能(燃气轮机与蒸汽轮机发电输出)、余热损失、化学能损失(未完全反应的燃料)以及散热、排烟等其他损失。整体能量平衡计算需明确各能量流的数值与流向,通过总输入能量等于总输出能量的关系,量化系统总能量损失占比。通常,IGCC系统总能量损失主要集中在排烟散热、气化反应不完全、换热过程不可

逆等环节,不考虑碳捕获时系统能量转化效率可达45%~55%,考虑碳捕获后效率会有所下降。通过整体能量平衡分析,可明确系统能量利用的整体水平,为后续单元效率分析和瓶颈识别提供基础。

2.2 各单元能量效率

IGCC全流程各单元能量效率存在显著差异,直接影响系统整体能效,需逐一分析各核心单元的能量利用水平。气化单元效率通常在85%~90%,主要损失来自未完全气化的燃料、气化反应热损失及灰渣带走的热量,煤质波动会显著影响其效率。空分单元效率约70%~80%,能量损失主要集中在空气压缩、制冷分离过程中的不可逆损耗,氧气纯度和压力会直接影响效率高低^[2]。燃气轮机效率为35%~40%,损失主要是排烟带走的高温热能和机械损耗。余热锅炉效率约88%~92%,损失主要是排烟散热和换热过程中的热损失。净化单元能量效率可达90%以上,损失相对较小,主要为辅助系统的能耗。各单元效率相互关联、相互影响,某一单元效率下降会引发全流程能效连锁降低。

2.3 全流程能量效率汇总

IGCC全流程能量效率汇总需基于各单元能量效率,结合单元间的能量传递关系,综合计算系统整体能效水平,明确能效分布规律与关键影响因素。汇总过程中,需考虑各单元的能量输入输出关联,扣除单元间的能量损耗,最终得到系统净发电效率,即净输出电能与燃料输入化学能的比值。目前,商业化IGCC电站不考虑碳捕获时,全流程能量效率普遍在45%~55%,相较于传统燃煤发电技术提升显著;考虑碳捕获功能后,效率会降低10个百分点左右,降至35%~45%。汇总分析还需明确各单元能量损失对整体能效的贡献度,其中气化单元、空分单元和燃气轮机是影响全流程能效的核心单元,三者能量损失占总损失的70%以上。

3 IGCC 电站全流程能效瓶颈识别与分析

3.1 瓶颈识别方法

IGCC电站全流程能效瓶颈识别是提升系统能效的前提,需采用多种方法结合的方式,精准定位能效损失的关键环节和原因。常用的瓶颈识别方法包括焓分析方法、灵敏度分析方法、数据挖掘方法和对比分析方法。焓分析基于热力学第二定律,量化各单元的焓损失,识别能量品质下降最显著的单元,明确瓶颈环节;灵敏度分析通过改变各单元运行参数,分析参数变化对全流程能效的影响程度,确定关键影响参数;数据挖掘方法利用系统长期运行数据,挖掘各参数与能效的关联关系,发现潜在的能效瓶颈;对比分析则将系统实际运行能效

与设计值、行业先进水平对比,找出差距所在。

3.2 气化单元瓶颈分析

气化单元作为IGCC系统的核心能量转化环节,其能效瓶颈主要集中在反应不完全、热损失过大和煤质适应性差三个方面。首先,气化反应不完全会导致燃料化学能不能充分转化,主要因气化温度、压力、氧煤比等参数匹配不合理,或煤质波动导致反应活性下降,碳转化率降低,造成能量损失。其次,热损失过大主要来自气化炉炉体散热、灰渣带走的高温热量以及未回收的气化反应余热,其中灰渣带走的热量占比可达气化单元总热损失的30%以上^[3]。另外,煤质适应性差也是重要瓶颈,高灰分、高水分煤种会增加气化难度,导致氧耗上升、气化效率下降,当灰分超过28%时,氧耗增幅呈指数型跃升,进一步加剧能效损失。

3.3 空分单元瓶颈分析

空分单元作为IGCC系统的重要辅助单元,其能效瓶颈主要源于能量消耗过高和分离效率不足,是全流程能效提升的关键制约因素之一。空分单元需消耗大量电能用于空气压缩和制冷分离,其中空气压缩环节能耗占空分单元总能耗的60%~70%,由于压缩过程中存在不可逆损耗,导致能量利用效率偏低。同时,制冷分离过程中,冷量损失和分离精度不足也会影响能效,氧气纯度波动会导致气化单元反应效率下降,进一步加剧全流程能量损失。此外,空分单元与气化单元、燃气轮机的协同性不足,运行参数匹配不合理,会导致空分单元负荷波动过大,额外增加能耗。

3.4 燃气轮机与余热锅炉瓶颈分析

燃气轮机与余热锅炉作为IGCC联合循环发电的核心单元,其能效瓶颈直接影响电能输出效率,主要集中在能量损失过大和协同性不足两个方面。燃气轮机的能效瓶颈主要是排烟热损失和压气机、透平的机械损耗,高温排烟带走的热量占燃气轮机总能量损失的50%以上,且透平叶片磨损、压气机效率下降会进一步降低机组运行效率。余热锅炉的能效瓶颈主要是换热效率不足和排烟散热损失,受热面结垢、积灰会导致换热系数下降,排烟温度过高会造成大量热能浪费,通常余热锅炉排烟温度每升高10℃,效率下降约1%。燃气轮机与余热锅炉的运行参数不匹配,如燃气轮机排烟温度与余热锅炉换热需求不协调,会导致能量梯级利用不充分,进一步加剧能效损失,成为制约联合循环发电效率的关键瓶颈。

4 提效改进措施与优化方向

4.1 气化单元提效措施

针对气化单元的能效瓶颈,可从参数优化、煤质预

处理、余热回收和技术升级四个方面采取提效措施。参数优化方面,通过精准调控气化温度、压力、氧煤比和蒸汽煤比,使气化反应处于最佳工况,提升碳转化率,一般将气化温度控制在1450~1500℃、压力4MPa左右,可显著提升反应效率。煤质预处理方面,对高灰分、高水分煤种进行洗选、干燥处理,或采用煤质调和和技术将混合煤灰分控制在18%以内,降低气化难度和氧耗。余热回收方面,增设气化炉余热回收装置,回收灰渣和粗合成气的余热,用于预热燃料或产生蒸汽,减少热损失。技术升级方面,采用高效气化炉技术,优化炉体结构,减少炉体散热,同时引入智能监测系统,实时调控反应参数,提升气化单元运行稳定性和效率,可使气化单元效率提升至90%以上。

4.2 空分单元提效措施

空分单元提效的核心是降低能耗、提升分离效率,可采取设备升级、参数优化和协同调控三种措施。设备升级方面,采用高效空气压缩机和先进制冷分离技术,如等温压缩、变频驱动技术,降低压缩环节能耗,可使空分单元电耗降低10%~15%;优化精馏塔结构,提升氧气分离精度,确保氧气纯度稳定在99.5%以上,满足气化单元需求。参数优化方面,合理调控空分单元的运行负荷,避免负荷波动过大,同时优化制冷系统参数,减少冷量损失,提升制冷效率。协同调控方面,建立空分单元与气化单元、燃气轮机的协同控制体系,根据气化单元氧气需求实时调整空分单元运行参数,实现能量供需匹配,减少额外能耗,通过综合措施可使空分单元效率提升至85%以上。

4.3 燃气轮机与联合循环提效措施

针对燃气轮机与联合循环的能效瓶颈,需从设备维护、参数优化和余热利用三个方面采取提效措施。燃气轮机方面,定期对透平叶片、压气机进行清洁和维护,减少磨损,提升机组机械效率;优化燃烧室结构,改善燃料燃烧效果,降低排烟温度,减少排烟热损失。联合循环参数优化方面,协调燃气轮机与蒸汽轮机的运行参数,使燃气轮机排烟温度与余热锅炉换热需求匹配,提升能量梯级利用效率;优化蒸汽循环系统,采用超临界或超超临界蒸汽参数,提升蒸汽轮机发电效率。余热利

用方面,升级余热锅炉换热系统,采用高效换热材料,减少受热面结垢积灰,降低排烟温度,同时回收余热用于预热燃料或供暖,进一步提升能量利用效率,可使联合循环发电效率提升3%~5%。

4.4 全流程集成优化

IGCC全流程集成优化是实现系统整体能效提升的关键,核心是打破各单元独立运行的局限,实现全系统能量、物料的协同优化。首先,构建全流程协同控制体系,整合各单元运行数据,实现参数实时联动调控,确保各单元运行工况匹配,减少能量损耗^[4]。其次,优化能量梯级利用,将各单元的余热、余压进行统筹回收,如将空分单元的余热用于燃料预处理,将燃气轮机排烟余热充分利用于余热锅炉,实现能量的多级利用。另外,结合CCUS技术,优化合成气净化与碳捕获流程,降低碳捕获对系统能效的影响,同时推动IGCC与煤化工、新能源等产业耦合,实现多能互补。通过全流程集成优化,可整合各单元提效成果,解决单元间协同不足的问题,使IGCC全流程能量效率提升至50%以上,显著提升系统的经济性和环保性。

结束语

IGCC电站全流程能效分析与瓶颈识别是提升其能源利用效率、增强经济性与环保性的关键环节。通过运用多种分析方法,精准定位各单元能效瓶颈,并针对性地提出气化、空分、燃气轮机等单元及全流程集成优化提效措施,能够有效提高IGCC电站的整体能效。未来,随着技术不断进步,IGCC电站有望在能源领域发挥更大作用,为能源可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]陆雨泽,单栋梁,江宇萌,等.电化学储能电站的能效分析及能效提升[J].电工技术,2026(2):36-39.
- [2]王甜,池渝言.双碳目标下变电站数字化运维能效优化关键技术与实施路径研究[J].今日自动化,2025(9):189-190,193.
- [3]王卓.变电站交直流一体化电源系统的能效优化策略研究[J].模型世界, 2025(27): 60-62.
- [4]牛建伟,王高峰,康建邦,等.IGCC电站煤气化废水脱氮工艺的优化改造[J].煤化工,2023,51(3):76-78.