

# 耦合太阳能的循环流化床系统能量梯级利用研究

姬慧强

国能亿利能源有限责任公司电厂 内蒙古 鄂尔多斯 014300

**摘要:** 本文聚焦耦合太阳能的循环流化床(CFB)系统能量梯级利用研究,核心围绕太阳能替代CFB系统厂用电展开。阐述了系统架构与能量梯级利用原理,构建“源-网-储-荷”一体化架构,设计以厂用电替代为核心的三级递进式利用路径。分析太阳能与厂用电负荷的耦合机制及能量匹配规律,构建针对性能量流动模型。提出涵盖技术、经济政策、人才管理层面的优化设计策略,聚焦太阳能厂用电替代的高效落地。旨在实现太阳能与CFB系统深度融合,通过替代厂用电降低化石能源消耗与碳排放,提升能量利用效率,推动系统规模化应用,助力清洁低碳能源发展。

**关键词:** 循环流化床; 太阳能; 能量梯级利用; 厂用电替代

**引言:** 传统循环流化床(CFB)系统运行厂用电率高,驱动辅助设备消耗大量能源,增加化石能源消耗与碳排放压力。太阳能虽清洁无污染、储量丰富,但有间歇性与波动性。将太阳能耦合进CFB系统,构建以厂用电替代为核心的能量梯级利用体系,可实现多能互补、破解能耗难题。本研究探索该系统能量梯级利用路径,重点优化太阳能替代厂用电的耦合机制,提出优化设计策略,为降耗增效、推动清洁能源工业应用提供支持。

## 1 耦合太阳能的CFB系统架构与能量梯级利用原理

### 1.1 系统总体架构

耦合太阳能的CFB系统以循环流化床(CFB)锅炉为能量转换核心,整合太阳能集热、储能、余热回收及厂用电供给单元,构建“太阳能补能-CFB主导做功-厂用电替代-多能协同调控”的一体化架构,打破传统CFB系统厂用电完全依赖化石能源发电的局限。系统整体分为太阳能利用模块、CFB主体模块、能量存储模块、多能调控模块及厂用电供给与终端输出模块五大单元,各模块通过管道、换热设备及控制系统有机衔接,实现能量的高效传输与协同利用<sup>[1]</sup>。太阳能利用模块采用槽式集热或光伏技术,捕捉太阳能并转化为热能或电能,优先供给厂用电负荷;CFB主体模块负责燃料燃烧与能量核心转换,完成热能向电能的转化,为厂用电提供备用供给;储能模块用于平衡太阳能的间歇性与波动性,保障厂用电稳定供给;调控模块通过智能算法实时调节各单元运行参数,确保太阳能与厂用电负荷精准匹配,整体架构兼顾稳定性、高效性与环保性,为太阳能替代厂用电及能量梯级利用奠定坚实基础。

### 1.2 能量梯级利用路径设计

耦合太阳能的CFB系统能量梯级利用路径遵循“高品位优先供电、中低品位梯次补能、余能回收增效”的核

心原则,结合太阳能特性与CFB系统厂用电需求,设计以厂用电替代为核心的三级递进式利用路径,最大化提升能量利用效率。首先,太阳能捕捉转化的高品位电能/热能优先用于供给CFB系统高能耗厂用电设备,直接替代部分化石能源发电产生的厂用电,减少碳排放;其次,CFB系统燃烧产生的中品位热能通过锅炉换热转化为高温高压蒸汽,推动汽轮机发电,一部分电能用于补充厂用电缺口,另一部分作为上网电能输出;最后,发电过程中产生的低品位余热及太阳能未被充分利用的中低品位热能,通过余热回收装置回收,用于预热厂用电设备所需介质,降低设备能耗,实现余能资源化利用。路径设计中兼顾太阳能供给与厂用电负荷的动态匹配,通过换热设备、储能装置的合理布局,减少能量损耗,确保系统能量利用效率始终处于较高水平。

## 2 耦合太阳能的循环流化床系统耦合机制与能量匹配分析

### 2.1 耦合系统总体架构设计

耦合太阳能的循环流化床系统在传统CFB系统基础上,构建“源-网-储-荷”一体化架构,重点强化太阳能与厂用电负荷的耦合衔接,实现深度融合与协同运行。架构采用分层设计,上层为太阳能利用层,含集热器阵列、光伏组件及能量转换设备,负责太阳能的捕捉、转化与临时存储,优先供给厂用电;中层是CFB主体层,由锅炉、汽轮机、发电机等核心设备组成,承担能量转换任务,为厂用电提供备用供给;下层为辅助调控层,包括智能控制系统、厂用电负荷监测单元,实时监测厂用电负荷变化,保障协同调控与安全运行。各层级通过管道、设备及线路紧密衔接,形成闭环。设计重点考虑与CFB系统厂用电设备的兼容性,优化布局与连接方式,减少能量损耗,兼顾扩展性,能根据厂用电负荷需求新增

储能容量, 适配不同规模CFB电厂, 实现清洁低碳与厂用电稳定供给目标。

## 2.2 能量耦合机制分析

耦合太阳能的CFB系统能量耦合机制是实现太阳能高效替代厂用电的核心, 通过能量传递、转换与调控, 实现太阳能与CFB系统厂用电负荷精准匹配、互补利用, 降低厂用电率与能量损耗。该机制分直接与间接耦合: 直接耦合将太阳能转化的电能直接接入CFB系统厂用电网络, 供给风机、水泵等设备, 直接替代化石能源发电产生的厂用电, 减少燃料消耗; 间接耦合通过储能模块存储太阳能多余电能/热能, 当太阳能供给不足、厂用电负荷突增时, 释放能量补充厂用电缺口, 调节系统运行参数, 平衡厂用电负荷<sup>[2]</sup>。耦合中, 电能转换设备、换热设备实现能量高效交换, 智能调控系统实时监测厂用电负荷与太阳能供给量, 动态调整能量分配参数。另外, 余热耦合环节协同回收余热与太阳能中低品位热能, 用于降低厂用电设备能耗, 实现梯级利用, 兼顾效率与稳定性, 解决太阳能间歇性与CFB系统厂用电连续性需求的矛盾。

## 2.3 耦合系统能量流动模型构建

为精准分析耦合太阳能CFB系统能量规律, 重点优化太阳能替代厂用电的匹配效率, 构建基于能量平衡原理的能量流动模型, 涵盖全流程能量转换与厂用电供给过程。模型以能量流为核心, 明确各模块能量参数, 重点量化太阳能供给量、厂用电负荷量及二者匹配度, 采用热力学定律结合系统动力学方法, 量化能量传递效率与损耗程度。模型含五大核心子模块: 太阳能输入子模块量化集热器捕捉量、转化效率及可供厂用电的能量; CFB系统转换子模块模拟燃料燃烧与工质换热, 量化电能转化效率及厂用电备用供给能力; 储能子模块描述太阳能多余能量的存储与释放过程, 量化储能效率与损耗; 余热回收子模块计算回收量与利用效率, 量化其降低厂用电设备能耗的效益; 终端输出子模块统计厂用电供给量、缺口补充量及上网电能输出量。通过模型可模拟不同工况下太阳能与厂用电负荷的匹配情况, 识别能量损耗环节, 为优化设计与调控策略提供支撑。

## 3 耦合系统能量梯级利用路径设计

### 3.1 第一梯级: 太阳能高品位能量直接替代厂用电

耦合系统能量梯级利用的第一梯级聚焦太阳能高品位能量的高效利用, 核心是将太阳能捕捉转化的高品位电能(通过光伏组件)或高温热能(通过集热器+热电转换设备)优先用于CFB系统的高能耗厂用电设备, 最大化发挥太阳能价值, 直接替代化石能源发电产生的厂用电。该梯级主要依托槽式高效太阳能集热技术或光伏技术, 捕

捉太阳辐射能并转化为电能, 通过专用配电装置接入CFB系统厂用电网络, 优先供给引风机、送风机、给水泵等高能耗厂用电设备, 替代部分化石燃料燃烧发电产生的厂用电, 减少碳排放。同时对于多余的太阳能高品位电能, 通过储能装置(如蓄电池、熔盐储能)进行存储, 避免能量浪费, 为厂用电负荷突增时提供补能支撑。该梯级设计重点关注太阳能供给与厂用电负荷的精准匹配, 优化电能转换与传输效率, 减少能量损耗; 同时通过智能调控, 动态调整太阳能厂用电替代比例, 确保厂用电设备运行参数稳定。

### 3.2 第二梯级: 循环流化床系统能量转换补充厂用电

第二梯级作为耦合系统能量梯级利用的核心环节, 聚焦CFB系统的能量核心转换, 核心是将燃料燃烧产生的热能转化为电能, 一方面用于补充太阳能供给不足时的厂用电缺口, 另一方面作为上网电能输出。该梯级以CFB锅炉为核心设备, 通过燃料(煤、生物质等)燃烧释放热能, 加热锅炉内的工质, 产生高温高压蒸汽; 蒸汽进入汽轮机膨胀做功, 驱动发电机发电, 一部分电能接入厂用电网络, 补充太阳能供给不足时的厂用电缺口, 确保厂用电设备连续稳定运行; 另一部分电能作为上网电能输出, 提升系统经济效益<sup>[3]</sup>。该梯级设计中, 重点优化CFB锅炉的燃烧效率与汽轮机发电效率, 合理匹配燃料供给量与厂用电负荷需求, 确保厂用电缺口补充的及时性; 同时优化分离器、返料器等设备的设计, 强化CFB系统的循环流化效果, 进一步提升能量利用效率, 与第一梯级太阳能替代形成协同互补。

### 3.3 第三梯级: 余热回收降低厂用电设备能耗

第三梯级作为耦合系统能量梯级利用的收尾环节, 聚焦余热回收与中低品位能量的资源化利用, 核心是将前两个梯级未被充分利用的中低品位热能进行全面回收, 用于降低CFB系统厂用电设备的能耗。该梯级主要回收两大来源的中低品位热能: CFB系统汽轮机排气、锅炉尾部烟气中的余热; 太阳能集热过程中未被转化为高品位电能的中低品位热能及储能装置释放的中低品位热能。通过余热锅炉、板式换热器等回收设备, 将这些余热回收后, 用于预热厂用电风机的进气、锅炉给水, 或加热厂用电设备所需的润滑油、冷却水, 提升设备运行效率, 降低能耗。该梯级设计重点优化余热回收设备的结构与效率, 减少余热排放损耗; 同时合理分配回收的中低品位热能, 优先用于高能耗厂用电设备的能耗降低, 进一步提升系统的能量利用效率与经济性。

### 3.4 梯级利用调控策略

耦合系统能量梯级利用调控策略的核心是通过智能

调控,实现各梯级能量分配、转换、利用的动态平衡,重点优化太阳能与厂用电负荷的匹配调度。调控策略基于智能控制系统与能量流动模型,实时采集各梯级的运行参数(太阳能辐照强度、厂用电负荷、工质温度压力、余热回收量等),通过算法模型进行动态分析与优化调度。针对第一梯级,根据太阳能辐照强度与厂用电负荷变化,动态调整太阳能厂用电替代比例,多余能量存入储能装置;针对第二梯级,根据厂用电缺口大小,优化CFB锅炉、汽轮机运行参数,调整电能分配比例;针对第三梯级,根据余热回收量与厂用电设备能耗需求,动态分配中低品位热能。同时,设置应急调控机制,当太阳能辐照骤降或厂用电负荷突增时,快速调用储能装置补能,或调整化石燃料供给量,保障厂用电稳定供给。

#### 4 耦合系统优化设计策略

##### 4.1 技术层面优化

耦合太阳能CFB系统技术优化聚焦核心设备、能量转换与调控系统,围绕太阳能高效替代厂用电展开。核心设备方面,CFB锅炉优化炉膛等系统,适配太阳能替代后的工况;太阳能集热与转换模块选用高效设备,提高太阳能捕捉与转化效率,匹配厂用电负荷;储能装置优化容量与结构,提升储能及充放电稳定性。能量转换系统采用高效材料与结构,减少传输转换损耗,优化布局缩短路径。调控系统构建智能化平台,整合太阳能供给与厂用电负荷数据,运用人工智能算法提升匹配调度精度,解决太阳能不稳定致厂用电供给波动问题。

##### 4.2 经济与政策层面保障

耦合太阳能CFB系统优化设计需经济与政策保障,解决投资成本高、经济性差问题。经济上,通过规模化采购、优化施工方案降低成本;优化运行模式,减少化石燃料与运维成本,利用补贴增加收益;探索多元投融资模式,引入社会资本等缓解压力。政策上,依托清洁低

碳发展政策,对接新能源补贴等争取资金;推动系统纳入区域能源规划,拓展应用场景;完善标准体系,制定设计、运行等标准,规范行业,降低技术与市场风险<sup>[4]</sup>。

##### 4.3 人才与管理优化

耦合太阳能CFB系统优化运行需推进人才与管理优化。人才上,构建“培养+引进+培育”体系,高校加强相关专业建设培养复合型人才;企业引进行业高端人才,重点引进耦合调度领域人才;建立常态化培训机制提升人员能力。管理上,构建智能化、精细化体系,依托物联网等建立监测平台,实时监控参数;完善管理制度,明确职责、规范流程;建立绩效评价体系,将太阳能厂用电替代率等指标纳入评价,激励员工提升工作质量。

##### 结束语

耦合太阳能的循环流化床系统能量梯级利用研究,以太阳能替代厂用电为关键切入点,为CFB系统节能降碳、增效提供新方向。通过构建适配系统架构、设计利用路径、分析耦合机制及构建流动模型,实现二者深度融合,降低厂用电率与碳排放。技术、经济政策、人才管理方面的优化策略,保障了太阳能厂用电替代技术落地与系统稳定运行。未来,随着技术进步,其替代效率将提升,有望在更多CFB电厂推广,助力清洁低碳能源发展与工业节能降耗。

##### 参考文献

- [1]张明,李萍.循环流化床锅炉燃烧调整与能效提升措施研究[J].能源与节能,2022,14(2):56-60.
- [2]乔磊磊,王孝全,聂浩,等.循环流化床锅炉全负荷调峰特性研究[J].中国电机工程学报,2025,45(1):184-193,中插15.
- [3]燕伟,李驰,邢渊浩,等.循环流化床多元固废粉煤灰基水泥胶砂固碳试验研究[J].材料导报,2025,39(9):99-105.
- [4]吕俊复,王君峰,姜孝国,等.超超临界循环流化床锅炉技术研发进展[J].中国电机工程学报,2024,44(17):6883-6899.