

氢能耦合燃煤电厂的燃料系统适应性改造研究

刘洋 赵嘉宇 赵禹博 靳强

北方联合电力有限责任公司达拉特发电厂 内蒙古 鄂尔多斯 014300

摘要: 本文聚焦氢能耦合燃煤电厂燃料系统适应性改造。先分析氢能特性及其对燃料系统的影响,包括物理化学特性与潜在影响。接着阐述改造总体方案,涵盖原则目标、架构设计和技术路线。随后研究燃料系统关键环节改造,涉及输送、储存、燃烧和预处理系统。最后分析改造方案的经济性与环境效益,投资成本受多因素影响,运行成本结构调整,环境效益显著,助力电厂低碳转型。

关键词: 氢能耦合; 燃煤电厂; 燃料系统; 适应性改造

引言: 在全球能源转型与“双碳”目标的大背景下,传统燃煤电厂面临严峻挑战,寻求清洁、高效、低碳的能源利用方式迫在眉睫。氢能作为一种极具潜力的清洁二次能源,其引入为燃煤电厂的发展带来新契机。然而,氢能与煤炭在物理化学性质上差异巨大,这使得氢能在燃煤电厂燃料系统中的应用面临诸多难题。因此,开展氢能耦合燃煤电厂燃料系统适应性改造研究具有重要的现实意义。

1 氢能特性及其对燃煤电厂燃料系统的影响分析

1.1 氢能的物理化学特性

氢能作为一种清洁二次能源,具有独特的物理化学特性。其分子量仅为2.016,是自然界最轻的气体,密度远低于空气,在标准大气压下密度仅0.0899g/L,易扩散且扩散速度快,这使得其储存和输送过程中需做好密封防护。化学性质上,氢能燃烧热值极高,达142kJ/g,是煤炭热值的3倍多,且燃烧产物仅为水,无SO₂、NO_x及颗粒物等污染物排放。氢能点火能量低、燃烧速度快,火焰传播速度可达2.8m/s,远高于煤炭燃烧速度^[1]。同时,氢能具有易燃易爆性,在空气中体积分数处于4.0%-75.6%范围时遇火源易发生爆炸,其爆炸极限宽、点火温度低(约585℃),对储存和使用环境的安全性要求极高。这些特性决定了氢能在燃煤电厂燃料系统中应用时,需针对性解决安全、输送及燃烧匹配等问题。

1.2 氢能引入对燃煤电厂燃料系统的潜在影响

氢能引入对燃煤电厂燃料系统存在多维度潜在影响,既有积极效应也有适配挑战。积极层面,氢能燃烧清洁高效,可替代部分煤炭降低污染物排放,助力电厂实现减碳目标,同时其高热值特性可提升炉膛燃烧效率,优化机组出力调节灵活性。挑战方面,首先是安全风险提升,氢能的易燃易爆性与宽爆炸极限,对燃料系统的密封性能、防爆设计及监测预警能力提出更高要

求,原有煤炭输送储存系统的密封标准无法满足氢能需求。其次是系统适配性不足,氢能气态特性与煤炭固体形态差异大,原有输送、储存及燃烧设备难以直接兼容,需针对性改造。此外,氢能燃烧速度快、火焰温度高,可能导致炉膛局部过热、热力型NO_x生成量变化,还会影响锅炉热力循环平衡,需优化燃烧组织方式以规避机组运行风险。

2 氢能耦合燃煤电厂燃料系统适应性改造总体方案

2.1 改造原则与目标设定

氢能耦合燃煤电厂燃料系统改造需遵循四大核心原则,确保改造科学可行。一是安全优先原则,将氢能储存、输送、燃烧全环节的安全防护作为核心,严格符合防爆、防火相关标准,杜绝安全隐患。二是兼容适配原则,改造方案需兼顾原有煤炭燃料系统功能,实现氢能与煤炭灵活切换、协同燃烧,不破坏机组原有运行架构。三是经济合理原则,在满足环保与安全要求的前提下,优化改造工艺,控制投资与运行成本,提升项目性价比。四是前瞻适配原则,预留未来氢能供应规模扩大、技术升级的改造空间,适配低碳能源发展趋势。改造目标明确为:短期内实现氢能掺烧比例5%-15%的稳定运行,机组污染物排放较改造前降低30%以上;中期达成氢能与煤炭灵活耦合运行,提升机组调峰能力;长期实现多能源协同互补,为电厂低碳转型奠定基础。

2.2 整体改造架构设计

氢能耦合燃煤电厂燃料系统改造整体架构采用“双系统并行、单炉膛协同”设计,构建氢能与煤炭独立输送、联合燃烧的一体化系统。架构分为三大核心模块:氢能供应子系统、原有煤炭燃料子系统及耦合控制子系统。氢能供应子系统涵盖氢能接收、储存、加压输送及安全监测单元,通过专用管道将氢能输送至炉膛燃烧区域,配套设置泄漏检测、防爆泄放等安全设备^[2]。原有煤

炭燃料子系统保留原煤输送、破碎、磨制等核心环节，仅对末端燃烧接口及输送路径进行优化。耦合控制子系统作为架构核心，通过智能控制系统实现氢能与煤炭输送量、掺烧比例的精准调控，联动炉膛温度、氧量等参数监测，确保双燃料协同燃烧的稳定性。同时架构设计融入余热回收单元，利用氢能燃烧余热提升锅炉效率，形成“供应-燃烧-调控-回收”的闭环架构，兼顾安全性、稳定性与高效性。

2.3 改造技术路线选择

结合电厂现有设备条件与氢能应用特性，改造技术路线采用“掺烧耦合+分步升级”模式，分为近期掺烧改造与远期深度耦合两条支线。近期技术路线聚焦氢能低比例掺烧（5%-15%），采用“气态氢能直接掺烧”技术，无需对原有炉膛结构大幅改造，仅优化燃烧器喷嘴、增设氢能输送支管及安全监测设备，控制改造难度与成本。配套采用干法密封技术提升管道密封性，加装氢浓度在线监测与自动切断装置，保障运行安全。远期技术路线针对高比例氢能掺烧及纯氢燃烧需求，采用“炉膛结构优化+氢储一体化”技术，改造炉膛燃烧区域形态以适配氢能燃烧特性，采用高压储氢罐与管道输送结合的方式提升氢能供应能力。同步引入智能燃烧控制技术，通过AI算法实时调节双燃料比例与燃烧参数，搭配烟气脱硝、余热利用技术，实现环保与能效的双重提升，逐步推进电厂能源结构转型。

3 燃料系统关键环节适应性改造研究

3.1 燃料输送系统改造

燃料输送系统改造需分别针对氢能与煤炭输送环节优化，实现双燃料协同输送。氢能输送环节，采用专用高压不锈钢管道替代常规管道，管道压力等级设定为10-15MPa，适配气态氢能输送需求，管道接口采用焊接密封+法兰加固双重防护，杜绝泄漏。在管道沿途每隔50米设置氢浓度监测仪与防爆泄放阀，连接智能控制系统，一旦浓度超标立即切断输送并启动泄放。煤炭输送系统保留原有皮带输送、破碎设备，仅对输送末端与炉膛连接段改造，增设分流装置，实现煤炭与氢能输送路径的合理分区。优化输送速度调控系统，使煤炭输送量与氢能掺烧比例精准匹配，避免因输送失衡导致燃烧不稳定。另外，在双燃料输送交汇区域设置防火防爆墙，配备泡沫灭火与惰性气体保护系统，进一步提升输送环节安全性。

3.2 燃料储存系统改造

燃料储存系统改造需兼顾煤炭常规储存与氢能安全储存，构建分区储存、协同调度的格局。氢能储存采用

“高压气态储氢+应急储氢”双模式，主储氢区域设置10-20MPa高压储氢罐，配备罐体温压监测、绝热防护设备，储氢罐周边设置防火间距与防爆围栏，采用惰性气体覆盖保护。应急储氢区域设置低压储氢柜，应对氢能供应波动，确保机组稳定运行。煤炭储存区域保留原有储煤场、煤仓，优化防雨、防尘设施，同时在煤仓底部增设湿度监测与干燥装置，避免煤炭受潮影响燃烧效率^[1]。针对双燃料储存协同需求，改造储存调度系统，通过智能终端实时监控氢能储气量与煤炭库存量，根据机组负荷与掺烧比例自动调配燃料输出。储存区域增设视频监控、火灾报警系统，实现全区域安全监测覆盖，防范储存环节风险。

3.3 燃烧系统改造

燃烧系统改造核心是适配氢能与煤炭协同燃烧特性，优化燃烧组织与炉膛热力平衡。燃烧器改造采用“双燃料喷嘴一体化设计”，在原有煤粉喷嘴基础上增设氢能专用喷嘴，氢能喷嘴采用分散式布置，控制氢气喷射速度与角度，避免局部火焰温度过高。优化燃烧器调节机构，实现氢能与煤粉喷射量的独立调控，适配不同掺烧比例需求。炉膛改造方面，调整炉膛内水冷壁布置位置，增加局部隔热防护，防止氢能燃烧高温对炉膛壁面造成损伤，优化炉膛出口烟气导流结构，提升换热效率。配套改造燃烧控制系统，引入烟气成分在线监测设备，实时监测O₂、NO_x浓度，通过闭环控制调节双燃料比例、炉膛氧量与燃烧温度，抑制热力型NO_x生成。增设炉膛压力调节装置，应对氢能燃烧速度快带来的炉膛压力波动，确保燃烧系统稳定运行。

3.4 燃料预处理系统改造

燃料预处理系统改造针对氢能与煤炭特性差异，分别优化预处理工艺，保障燃料品质适配燃烧需求。氢能预处理环节，增设氢气净化装置，去除氢气中的水分、杂质及微量有害气体，确保氢气纯度达到99.9%以上，避免杂质影响燃烧效率与设备寿命。同时设置氢气加压预处理单元，根据燃烧系统需求将氢气压力调节至适配范围，搭配稳压装置维持压力稳定。煤炭预处理系统在原有破碎、磨制设备基础上优化，调整破碎机参数提升破碎精度，将原煤粒径控制在更合理范围，优化磨煤机运行参数，提升煤粉细度与均匀度，增强与氢能的混合燃烧效果。增设煤粉干燥装置，控制煤粉含水率在1%-2%，避免水分影响燃烧稳定性。另外，改造预处理系统联动控制单元，实现氢能净化加压与煤炭破碎磨制的协同调度，根据掺烧比例动态调整预处理参数，保障双燃料品质达标。

4 改造方案的经济性与环境效益分析

4.1 投资成本分析

改造方案投资成本主要涵盖设备购置、工程施工、技术研发及安全配套四大板块,总投资规模受电厂机组容量、氢能掺烧比例影响显著。设备购置成本占比最高,约达60%,主要包括高压储氢罐、氢能输送管道、双燃料燃烧器、智能控制系统及氢气净化设备等,单台300MW机组低比例掺烧改造的设备投资约8000-12000万元。工程施工成本占比20%-25%,涉及原有设备拆除、新设备安装、管道铺设及炉膛改造等施工环节,施工周期约6-8个月,人工与材料费用合计约3000-5000万元。技术研发与设计成本占比5%-8%,用于适配性技术研发、改造方案设计及性能测试。安全配套成本占比7%-10%,包括防爆设施、监测设备及应急系统建设。此外,需预留10%左右的备用资金,应对施工过程中的突发情况,确保改造项目顺利推进。

4.2 运行成本分析

改造后机组运行成本较原有纯燃煤机组呈现“结构调整、总体可控”态势,主要包括燃料成本、设备运维成本及能耗成本。燃料成本方面,氢能价格目前高于煤炭,低比例掺烧会使燃料成本略有上升,但随着氢能产能提升与制备技术成熟,氢能成本有望逐步下降,同时煤炭消耗量减少可部分抵消成本增幅。设备运维成本较改造前增加15%-20%,因氢能相关设备对运维技术要求更高,需增加专业运维人员培训、设备定期检测与维护费用,尤其是储氢罐、输送管道等设备的密封与防爆维护成本。能耗成本略有下降,氢能燃烧效率高可提升机组整体能效,同时余热回收系统可降低辅助能耗,单台机组年均能耗成本可降低5%-8%。综合来看,改造后初期运行成本小幅上升,长期随着技术优化与氢能降价,运行成本将逐步趋于合理。

4.3 环境效益分析

改造方案可显著提升电厂环保性能,实现污染物减排与碳足迹降低的双重效益。污染物减排方面,氢能燃烧产物仅为水,低比例氢能掺烧(5%-15%)可使机组煤炭消耗量减少5%-15%,对应SO₂排放量降低10%-30%,颗粒物排放量降低8%-25%。同时,通过优化燃烧控制抑制热力型NO_x生成,NO_x排放量可降低15%-20%,大幅减轻对大气环境的污染,减少电厂环保治理投入^[4]。碳减排效益显著,煤炭燃烧是CO₂主要排放来源,每掺烧10%的氢能,可使机组CO₂排放量降低8%-12%,单台300MW机组年均可减少CO₂排放10-15万吨,助力实现“双碳”目标。另外,改造后无新增污染物排放,无需额外建设污染物处理设施,减少土地占用与环保运维成本,同时氢能燃烧无灰分产生,可降低灰渣处理与堆放带来的固废污染,提升电厂生态环境适配性。

结束语

氢能耦合燃煤电厂燃料系统适应性改造是顺应能源发展趋势的关键举措。通过全面分析氢能特性,制定科学合理改造方案,对燃料系统关键环节进行针对性改造,可有效解决氢能应用中的安全、适配等问题。尽管改造面临投资与运行成本挑战,但环境效益显著,能助力电厂减碳转型。未来,随着技术进步与成本降低,该改造模式有望广泛应用,推动能源行业可持续发展。

参考文献

- [1]陈鹏.基于LIBS迭代的工业燃煤锅炉精细化配煤掺烧优化决策技术[J].工业加热,2024,53(06):52-55.
- [2]王蓝蓝,王皓,王亚鑫,等.基于LabVIEW的生物质锅炉进料口监控系统设计[J].农技服务,2024,41(01):60-64.
- [3]赵伟,刘海波.电厂锅炉燃料适应性的研究与进展[J].电力科学与技术,2023,42(18):187-191.
- [4]孙志坚,李俊.燃烧调整技术在电厂锅炉中的应用探讨[J].输配电,2023(09):56-59.