

节能降耗技术在循环流化床锅炉运行中的应用 及经济性分析

郭玉婷（山西潞安煤基合成油有限公司，山西 长治 046000）

摘要：随着全球对能源效率和环境保护的日益重视，循环流化床锅炉能耗管理的重要性也在不断提升。为降低循环流化床的能耗，本文首先阐述了循环流化床锅炉节能降耗的重要性，其次分析了能耗影响因素，最后依托实际锅炉，探讨了降耗技术的应用措施和经济性，实现了降低能耗和运营成本的目的，提高了锅炉的经济性和环保性能，以此为相关人员提供实践参考。

关键词：节能降耗；循环流化床锅炉；经济性

0 引言

因其良好的燃烧特性和灵活的燃料适应性，循环流化床锅炉（Circulating Fluidized Bed, CFB）广泛应用于电力、化工等行业。随着能源危机和环境保护意识的增强，提高锅炉能效、降低能耗已成为行业内的重要课题。节能降耗技术不仅能够提升锅炉的热效率，还能减少有害排放，实现可持续发展目标。因此，对节能降耗技术在 CFB 系统中的应用进行研究具有较强的理论价值和现实意义。

1 循环流化床锅炉节能降耗的意义

CFB 锅炉近年来在各类工业中得到了广泛应用。其节能降耗的意义不仅体现在经济效益上，更涉及环境保护和可持续发展等多个方面^[1]。

随着全球能源危机和环境污染问题日益严重，传统燃煤锅炉面临着巨大的压力，而 CFB 锅炉以其优越的燃烧特性和较低的排放水平，成为替代方案，为企业带来了显著的经济收益。其独特的流化床结构使得烟气中的颗粒物、二氧化硫（SO₂）及氮氧化物（NO_x）等有害气体排放量显著低于传统锅炉^[2]。

环保法规日趋严格的情况下，节能降耗对企业合规经营具有重要意义。虽然 CFB 锅炉因其低排放特性被广泛应用于各种工业领域，但仅靠优越的燃烧技术并不足以满足未来更高的环保要求。所以应在实际生产中优化操作参数，实现精细化管理，进一步降低排放物质，减少大气污染，积极响应国家“碳达峰”和“碳中和”目标，为实现绿色可持续发展贡献力量。而且从资源利用角度来看，CFB 锅炉在多种燃料适应性上的优势，是减少对传统高品质煤炭依赖的重要工具。推广使用低品质燃料和可再生资源不仅可以缓解资源

短缺问题，还能降低生产过程中的碳足迹。

2 循环流化床锅炉能耗的影响因素

2.1 燃料特性对能耗的影响

不同类型的燃料具有不同的热值、挥发分含量、水分和灰分等物理化学性质，这些特性直接影响到锅炉的燃烧效率及整体能耗。热值较高的燃料在燃烧过程中能够释放更多的热量，降低单位产品所需的能源消耗。而相对低热值或高水分含量的燃料则会不完全燃烧，不能充分利用所有能源。而且高挥发分含量的燃料在点火和初始阶段容易形成可燃气体，启动效率比较高，但如果控制不当，则会造成气体与固体颗粒混合不均，局部过热，增加烟气排放。而低挥发分燃料则往往需要更长时间才能达到稳定运行状态，这便会直接增加启动过程中的能耗。

2.2 锅炉操作参数不合理

锅炉操作参数的不合理设置是影响循环流化床锅炉（CFB 锅炉）能耗的重要因素。CFB 锅炉的运行需要调节风速、床层高度、回流比以及温度等多项操作参数，而不同参数之间存在复杂的相互关系，其优化程度直接决定锅炉运行效率与经济性。

风速主要影响流化床内颗粒运动和混合程度。如果风速过低，固体颗粒极易沉淀，无法维持良好的流态化状态，传热效果下降；反之，如果风速过高，则极易引起大量细小颗粒随烟气逸出，造成资源浪费，增加粉尘排放。而床层高度直接关系到反应物质在床内停留时间及反应完毕率。如果床层高度过低，物质停留时间不足，那么反应就较短；若设置过高，则极有可能引起液体滞留或部分区域冷却，整体温度下降，降低系统效率，使能源消耗上升。

2.3 锅炉内积灰和结渣现象

积灰和结渣现象是 CFB 锅炉运行的常见问题。随着时间推移,由于煤炭中矿物质成分的不均匀性,以及不同温度区段产生的不完全燃烧等原因,会逐渐在锅炉内部形成一层灰渣,即沉积物。沉积物包括未完全燃烧掉的固体颗粒、高黏附性的残余物以及其他杂质。

积灰会直接干扰传热过程。灰烬覆盖在换热表面时则直接形成绝缘层,阻碍传递给水或蒸汽所需的热量,所以需要投入更多能源才能达到预定温度或压力水平。而且当换热器表面被大量积聚物遮挡时,也会引起局部热点出现,加剧设备老化甚至故障风险,加大维护成本与停机时间。同时高温条件下积聚的材料还极有可能发生熔融,形成结渣现象。结块状况一旦发生,将极大地妨碍气体通过,对于空气供给的影响较大,引起整个系统运作的不稳定。

2.4 余热损失过大

余热损失指由于各种原因未被有效利用而散失到环境中的可用能源。CFB 锅炉,由于其独特结构与工作原理,相对于传统火力发电方式,更容易出现较大的余热损失。

CFB 锅炉的高温烟气排放通常伴随着一定比例的新鲜空气进入,再加上由于换热器设计缺陷或位置不当,都会使得大量未被利用或者已转变为废弃形式的余热逃逸出去。当烟气排放到达一定温度后,如果没有采取适当措施进行回收,其中蕴藏的大量潜在可用能源将白白散失。而且当排烟口设定的位置距离主要换热区域较远时,也会造成额外损失。

3 循环流化床锅炉节能降耗技术的应用措施

3.1 锅炉概况

以某企业 300MW 循环流化床锅炉为例,主要用于煤制油工艺中的热能供应。随着国家对清洁能源和可再生能源的日益重视,煤制油作为一种重要的替代燃料技术,其发展潜力逐渐被认可。该 CFB 锅炉设计热效率为 90%,能够适应多种低品质煤炭和其他固体燃料,为煤制油过程提供稳定、可靠的热源。根据项目数据,该机组年均热能输出可达 250 万 GJ,为整个煤制油生产线提供了充足的热量。自投运以来,该锅炉在保证生产效率的同时,有效降低了单位产品成本,提高了企业竞争力。

3.2 优化燃料选择,提高热值利用率

煤制油工艺的 CFB 锅炉作为热源,燃料选择直接影响热值利用率和整体经济性。而不同类型的煤及其混合物具有不同的热值、挥发分含量及灰分特性,这

些因素会影响锅炉的燃烧效率和排放水平。

本 300MWCFB 锅炉应首先分析原料煤的来源,尽可能选取高挥发分、高热值的优质煤作为主燃料。本企业将优质动力煤与低品质煤按 70:30 的比例混合,保证足够热量供应,降低低质量煤带来的环境污染风险。根据数据分析,该混合方案使得进入锅炉的平均热值从原先 5500 kcal/kg 提升至 6000 kcal/kg,显著提升了单位时间内所需燃料数量。

日常运营则实时监测与评估进厂煤样进行,确保所用燃料始终处于最佳状态。每周分析入库煤样水分、灰分、硫含量等指标,对每种煤炭样本进行跟踪记录,发现某种低品质煤时,即及时调整使用比例。例如,当发现某批次低品质煤水分过高时,使用比例降低至 20%,并相应增加优质动力煤的比例,使得整体热效率保持在 92% 以上。同时引入生物质颗粒作为辅助燃料,将生物质颗粒与传统煤按照 10% 的比例掺烧,提高可再生资源的利用率,降低二氧化碳排放。掺烧生物质颗粒后,二氧化碳排放减少约 5%,同时由于生物质本身较高的挥发分,该掺烧方式还提升了火焰温度,促进了更完全的燃烧反应,提高了系统总热效率。

3.3 精确调节运行参数,减少无效能耗

CFB 锅炉的燃烧过程受燃料特性、空气供给量、流化速度等多种因素影响,而不同参数的微小变化会导致热效率下降或无效能耗增加。

本 300MWCFB 锅炉的烟气温度设定为 120℃,并结合相关监测技术实时监测烟气温度,当温度超过 130℃时,自动调整空气供给量以降低过量空气引起的热损失。例如,在某次操作中,通过调节风机转速,将进风量从原先的 220,000m³/h 降低至 200,000m³/h,使得排烟温度稳定在 118℃,此时锅炉热效率提高了约 2%,年节省燃料成本约为 50 万元。

流化速度则根据不同燃料特性的变化实时调整。针对某批低品质煤的测试,将流化速度由原来的 4.5m/s 提升至 5.0m/s,确保颗粒充分悬浮并促进更完全的燃烧反应,使得未燃尽碳含量从之前的 6% 降低到 3.5%,提高了热值利用率,并减少了不必要的灰分排放。

对于固体颗粒分布和混合均匀性的控制,安装在线颗粒监测仪器,获取床层内固体颗粒直径及其分布情况,实施动态监测与反馈机制。当检测到大于 1.2mm 的大颗粒比例超过 15% 时,系统自动启动振动筛功能,将大颗粒重新引入到预处理系统,保证混合物的一致性和良好的燃烧性能。

水蒸气和空气比率方面,为达到最佳燃烧效果,

设定理想水蒸气与空气比为 0.8:1, 并使用智能传感器监控水蒸气生成情况, 根据实时数据动态调整喷入量。例如, 某次高负荷情况下, 当水蒸气输出达到 400t/h, 而实际需求仅为 350t/h, 即可将额外水蒸气供给量削减 12.5%, 不仅有效避免了冷却作用导致的不必要能耗, 还提升了整个系统热效率。

3.4 定期清理与维护, 确保传热性能良好

CFB 锅炉的传热性能直接影响到锅炉的热效率和燃料利用率。但积灰现象会直接影响热效率, 所以定期清理与维护是确保传热性能的重要措施。

每月进行一次例行检查和清理。每次停机检修前, 全面检查锅炉内外部的过热器、再热器和省煤器等关键部件。这些部件在运行过程中容易因烟气中的粉尘及未燃烧颗粒物形成积灰。

针对不同部件, 每个季度还安排更深入的专项清理工作。例如, 对于省煤器, 由于其长时间暴露在烟气环境中, 易出现结垢现象, 所以每三个月进行一次彻底清洁。清洁采用酸洗的方法, 将稀释后的盐酸以一定流速注入省煤器内部, 保持 30 分钟, 以去除附着在管壁上的水垢。日常运营中则配备自动监测系统, 实时跟踪各个换热面的温度变化。当发现某一换热面温度异常波动, 例如过热器出口温度突然下降超过 10℃时, 系统立即发出警报, 并启动相应的手动或自动清洗程序。每次清理后工作人员应及时重新测量并记录进出烟道压力差、换热面温度以及排烟温度等各个关键参数。

3.5 加强余热回收, 提升能源利用效率

余热回收是提升 CFB 锅炉能源利用效率的重要措施。由于锅炉在燃烧过程中会产生大量的废气, 而废气中含有较高的热量, 如果不加以回收, 将造成资源的浪费。

烟气出口处应安装高效换热器, 设计参数为每小时处理烟气流量约为 25000kg/h, 换热器能够将烟气温度从约 120℃降至 80℃。此过程中, 换热器的传热面积达到 400m², 以确保充分吸收烟气中的剩余热量。本 CFB 锅炉每小时可以回收约 500kW 的热能, 这相当于每年节省近 4400GJ 的能源消耗。

为了进一步提升余热利用率, 配备蒸汽再生系统, 将回收的低温烟气用于预热给水, 使温度提高到 90℃, 减少锅炉对燃料供给所需的能量。对给水进行加热能够显著降低燃料消耗, 每年可节省 1000t 标准煤, 相当于减少二氧化碳排放约 2800t。同时将锅炉排放出的冷凝水进行集中收集并重新引入锅炉, 使其

再次参与到蒸汽生成过程, 减少新鲜水源的需求, 提高整体效率。

4 经济性分析

该企业 300MWCFB 锅炉主要用于煤制油工艺中的热能供应, 其设计热效率为 90%, 为煤制油过程提供稳定、可靠的热源。根据项目数据, 该机组年均热能输出可达 250 万 GJ。

未采用有效余热回收系统时, 每吨煤制油的能源成本约为 1200 元, 而实施余热回收、蒸汽再生等技术后, 单位产品的能源成本降低至 1000 元。虑到该锅炉每年处理约 200 万 t 原料, 企业每年在能源费用上的节省达到 500 万元。引入高效换热器和冷凝水回收系统将烟气温度从 120℃降低至 80℃后, 实现了每小时 500 kW 的余热回收能力。年均可以回收约 4400 GJ 的废热, 相当于减少标准煤消耗约 1000 吨, 按当前市场价格计算, 这部分节省下来的燃料费用大约为 170 万元。而且由于优化了给水预热流程, 使得整体燃料利用率提高 3%, 进一步降低了每吨产品对燃料的需求, 带来了更大的经济收益。

企业初期投入约 300 万元用于改造现有换热设备和安装冷凝水回收系统。从经济回报周期来看, 根据上述节省的数据, 每年可实现总共 900 万元的费用削减, 因此, 仅需不到四个月便可收回全部投资。

综合以上因素, 可以发现节能降耗措施所带来的经济效益是显著且持续性的。不仅降低了单位产品成本, 提高了企业利润, 也增强了企业在市场中的竞争力。而且由于国家对清洁能源和环保政策日益重视, 此类技术改进还可能获得政府补贴或税收优惠, 进一步提升项目整体收益。

5 结束语

综上所述, 本文系统性分析了循环流化床锅炉运行中的节能降耗技术及其经济性。实践表明优化燃料选择、精确调节参数等措施具有一定节能效果。这些技术措施不仅提升了锅炉的热效率, 还降低了运营成本和环境影响, 对今后同类条件下的能源管理与优化具有一定参考价值。相关人员应不断推陈出新, 探索更为高效、环保的新技术, 进一步推动循环流化床锅炉在节能减排方面的发展。

参考文献:

- [1] 芦志祥, 向阳, 梁红伟, 任燕丽. 300MW 循环流化床锅炉节能降耗研究 [J]. 技术与市场, 2024, 31(05): 26-30.
- [2] 胡启宁. 循环流化床锅炉运行问题和节能降耗优化 [J]. 自动化应用, 2023, 64(16): 114-116.