

生物质直燃发电系统中热效率优化策略的研究

陈丽梅 陈雅丽 苏华莺

山西电力职业技术学院，山西太原，030021；

摘要：在全球能源转型的大背景下，生物质直燃发电作为一种可持续的能源利用方式，正逐渐崭露头角。生物质能凭借其储量丰富、可再生以及环境友好等特性，成为缓解能源危机与应对气候变化的重要选择之一。深入探究生物质直燃发电系统中的热效率优化策略，对于提高发电系统性能、降低能源消耗以及推动生物质能产业的健康发展具有极为重要的现实意义。本文将全面剖析相关优化策略，旨在为该领域的技术改进与应用拓展提供有力支撑。

关键词：生物质直燃发电；热效率；锅炉燃烧；优化策略

DOI：10.69979/3041-0673.25.06.027

引言

随着全球能源需求的持续增长和环境问题的日益严峻，开发和利用可再生能源已成为全球共识。生物质能作为一种清洁、可再生的能源，具有资源丰富、碳中性等优点，在能源结构中扮演着越来越重要的角色。生物质直燃发电是将生物质能转化为电能的主要方式之一，其技术成熟、成本相对较低，具有广阔的应用前景。本文将系统分析影响生物质直燃发电系统热效率的关键因素，并探讨相应的优化策略，为提高生物质直燃发电系统的热效率提供理论依据和技术参考。

1 生物质直燃发电系统概述

生物质直燃发电系统是将生物质能转化为电能的关键设施，核心构成涵盖多个关键部分，生物质预处理设备用于对各类生物质原料，如农作物秸秆、林业废弃物等进行破碎、干燥、成型等前期处理，提升原料的燃烧性能与输送便利性。燃烧设备以锅炉为主，通过特定的燃烧方式使预处理后的生物质充分燃烧，释放大热量。能量转换设备中的汽轮机利用锅炉产生的高温高压蒸汽推动运转，进而带动发电机将机械能转化为电能。辅助设备包括通风系统保障燃烧所需的充足空气，除尘系统则负责处理燃烧产生的废气，降低环境污染。系统工作时，生物质在燃烧设备内经历复杂的燃烧过程，其含有的化学能逐步释放并转化为热能，加热锅炉中的水产生高温高压蒸汽。蒸汽驱动汽轮机高速旋转，实现热能向机械能的转换，最后发电机在汽轮机带动下完成机械能到电能的转变。

2 生物质直燃发电系统热效率影响因素分析

2.1 生物质特性

生物质的特性对直燃发电系统热效率起着基础性

的关键作用，成分复杂多样，碳、氢、氧是主要元素，碳元素含量直接关系到燃烧过程中化学能的储备，较高的碳含量通常能释放更多热量，但也需恰当的燃烧条件以实现充分转化。氢元素燃烧时会生成水，其燃烧热值相对较高，能为燃烧过程提供额外能量。而氧元素虽有助于燃烧反应的进行，但其存在也稀释了生物质中可燃成分的比例。过多的水分不仅会消耗部分燃烧产生的热量用于蒸发，降低燃料的有效热值，还可能影响燃料的着火性能与燃烧稳定性。在燃烧初期，水分蒸发吸收大量热量，减缓了燃料的升温速率，使得燃烧反应启动困难。当水分含量过高时，还可能导致燃烧过程中断，造成热效率大幅下降。高灰分的生物质在燃烧过程中容易形成结渣和积灰现象，结渣会附着在燃烧设备的受热面上，阻碍热量传递，降低锅炉的热传递效率；积灰则会堵塞烟道，影响通风效果，导致空气供给不足，进而使燃烧不充分，增加不完全燃烧热损失，严重影响系统热效率。生物质的热值作为衡量其能量含量的关键指标，与热效率紧密相关。高热值的生物质能在相同质量下释放更多能量，为发电系统提供更充足的动力，直接促进热效率的提升。

2.2 燃烧过程

不同的燃烧方式对热效率有着显著差异，层燃方式下，生物质燃料平铺在炉排上进行燃烧，其燃烧速度相对较慢，若燃料颗粒分布不均或炉排通风不畅，易出现燃烧不充分的情况，降低热效率。悬浮燃烧则将生物质粉碎后喷入炉膛，使其在悬浮状态下燃烧，虽燃烧速度快，但对燃料的粒度和燃烧空间的气流组织要求较高，否则会导致部分燃料未充分反应就排出炉膛，造成能量损失。空气供给量和配风方式是影响燃烧效果的关键因素，适量的空气是生物质充分燃烧的必要条件。若空气供给不足，燃烧反应无法彻底进行，会产生大量不完全

燃烧产物，如一氧化碳等，导致化学不完全燃烧热损失增加。而过量的空气则会带走过多热量，降低炉膛温度，同样不利于热效率的提升。合理的配风方式能够确保燃料与空气充分混合，在炉膛内形成良好的燃烧工况。例如，采用分级配风，可使燃料在不同阶段获得合适的氧气量，先进行缺氧燃烧降低氮氧化物生成，再补充空气完成充分燃烧，有效提高燃烧效率。

2.3 发电设备性能

作为系统的关键设备，锅炉的热传递效率直接决定了生物质燃烧产生的热能能否高效地传递给工质，进而影响后续的发电过程。若锅炉受热面结垢、积灰严重，热阻增大，热量传递受阻，大量热能无法有效转化为蒸汽的内能，造成能源浪费，显著降低系统热效率。锅炉的结构设计和制造工艺也影响着热传递效果，合理的结构可增强工质与受热面的对流换热，提升热传递效率。汽轮机作为将蒸汽热能转化为机械能的关键设备，汽轮机的叶片设计、制造精度以及运行时的蒸汽参数匹配程度，都关乎能量转换的效果。当叶片磨损、汽封泄漏时，蒸汽在汽轮机内做功能力下降，大量蒸汽热能未充分转化为机械能就被排出，导致汽轮机输出功率降低，系统整体热效率下滑。汽轮机的运行工况对转换效率也有显著影响，偏离设计工况运行时，如蒸汽流量、压力、温度等参数异常，会引发汽轮机内部流动损失增加，降低能量转换效率。

3 生物质直燃发电系统中热效率优化策略

3.1 燃料预处理优化

生物质燃料中水分含量过高会降低燃料的热值，增加烟气体积，导致排烟热损失增大。同时，水分蒸发需要吸收大量热量，降低炉膛温度，影响燃烧稳定性。所以通过自然晾晒、滚筒干燥、气流干燥等方式将生物质燃料的水分含量降低至合理范围（通常为 10%~20%），可以有效提高燃料热值，改善燃烧条件，从而提高锅炉热效率。生物质原料通常尺寸较大，形状不规则，直接燃烧时容易出现燃烧不充分、结渣严重等问题。通过粉碎处理，可以将生物质燃料破碎成粒度均匀的细小颗粒，增加燃料比表面积，促进燃料与空气的充分接触，提高燃烧速率和燃烧效率，粉碎后的燃料更易于输送和储存，有利于实现自动化控制，提高系统运行稳定性。

燃料成型也是提高生物质燃料品质的有效手段，松散生物质燃料堆积密度低，能量密度低，运输和储存成本高。通过压缩成型技术，可以将粉碎后的生物质原料压制成颗粒状、棒状或块状燃料，显著提高燃料的堆积密度和能量密度，方便运输和储存。成型燃料具有形状规则、粒度均匀、燃烧特性稳定等优点，有利于实现高

效清洁燃烧，提高锅炉热效率。除了上述常规预处理方法外，还可以根据具体生物质燃料的特性，采用一些特殊的预处理技术来进一步提高燃料品质。例如，对于含氯量较高的生物质燃料，可以采用水洗或酸洗的方法去除部分氯元素，降低燃烧过程中氯化物的排放，减轻锅炉受热面的腐蚀。对于灰熔点较低的生物质燃料，可以添加适量的添加剂来提高灰熔点，防止结渣现象的发生。

3.2 锅炉燃烧优化

生物质燃料中水分含量过高会降低燃料的热值，增加烟气体积，导致排烟热损失增大，水分蒸发需要吸收大量热量，降低炉膛温度，影响燃烧稳定性。因此，通过自然晾晒、滚筒干燥、气流干燥等方式将生物质燃料的水分含量降低至合理范围，可以有效提高燃料热值，改善燃烧条件，从而提高锅炉热效率。燃料粉碎可以显著改善生物质燃料的燃烧性能，生物质原料通常尺寸较大，形状不规则，直接燃烧时容易出现燃烧不充分、结渣严重等问题。通过粉碎处理，可以将生物质燃料破碎成粒度均匀的细小颗粒，增加燃料比表面积，促进燃料与空气的充分接触，提高燃烧速率和燃烧效率，粉碎后的燃料更易于输送和储存，有利于实现自动化控制，提高系统运行稳定性。

燃料成型也是提高生物质燃料品质的有效手段，松散生物质燃料堆积密度低，能量密度低，运输和储存成本高。通过压缩成型技术，可以将粉碎后的生物质原料压制成颗粒状、棒状或块状燃料，显著提高燃料的堆积密度和能量密度，方便运输和储存。成型燃料具有形状规则、粒度均匀、燃烧特性稳定等优点，有利于实现高效清洁燃烧，提高锅炉热效率。对于含氯量较高的生物质燃料，可以采用水洗或酸洗的方法去除部分氯元素，降低燃烧过程中氯化物的排放，减轻锅炉受热面的腐蚀。对于灰熔点较低的生物质燃料，可以添加适量的添加剂来提高灰熔点，防止结渣现象的发生。

3.3 蒸汽参数提升

蒸汽参数主要包括蒸汽压力和蒸汽温度，其高低直接决定了蒸汽在汽轮机中做功的能力。提高蒸汽参数可以增加蒸汽的焓降，提高汽轮机的做功效率，从而提高整个系统的热效率。然而，蒸汽参数的提升也受到材料性能、设备成本以及生物质燃料特性等因素的限制，因此需要综合考虑各方面因素，选择合适的蒸汽参数，以实现系统热效率的最大化。根据热力学原理，提高蒸汽温度可以增加蒸汽的焓值，从而提高蒸汽在汽轮机中的做功能力。对于生物质直燃发电系统而言，提高主蒸汽温度可以有效提高系统热效率。然而，主蒸汽温度的提升受到锅炉受热面材料耐高温性能的限制。目前，超临

界和超超临界机组的主蒸汽温度已经达到 600℃ 以上, 但需要采用耐高温、耐腐蚀的高合金钢材料, 这会导致设备成本大幅增加。因此, 对于生物质直燃发电系统, 需要根据实际情况, 在保证设备安全可靠运行的前提下, 尽可能提高主蒸汽温度。

提高蒸汽压力可以增加蒸汽的密度, 从而提高蒸汽在汽轮机中的做功效率。与提高主蒸汽温度相比, 提高主蒸汽压力对材料性能的要求相对较低, 但也会增加锅炉和汽轮机的制造成本。对于生物质直燃发电系统, 通常采用中高压参数, 主蒸汽压力在 8-13MPa 之间。随着材料技术和制造工艺的不断进步, 未来生物质直燃发电系统有望采用更高压力的蒸汽参数, 以进一步提高系统热效率。此外, 采用再热循环也是提升蒸汽参数、提高系统热效率的有效措施。再热循环是指将汽轮机高压缸排出的蒸汽重新引入锅炉再热器加热, 然后再送入汽轮机中低压缸继续做功。采用再热循环可以提高蒸汽的平均吸热温度, 从而提高循环热效率。对于大型生物质直燃发电机组, 采用再热循环可以有效提高系统热效率, 降低发电成本。然而, 再热循环也会增加系统复杂性和设备投资成本, 因此需要根据机组容量和燃料特性等因素进行综合考虑。

3.4 余热回收利用

锅炉排烟温度通常在 120℃ 以上, 蕴含着大量的热量, 安装省煤器和空气预热器等换热设备, 利用锅炉排烟余热加热给水和空气, 从而降低排烟温度, 减少排烟热损失, 提高锅炉热效率。省煤器可以将锅炉给水加热至接近饱和温度, 减少锅炉蒸发受热面的吸热量, 提高锅炉效率。空气预热器可以将进入锅炉的空气加热至一定温度, 提高炉膛温度, 改善燃烧条件, 降低不完全燃烧损失, 还可以采用低温省煤器、冷凝式换热器等新型换热设备, 进一步降低排烟温度, 提高余热回收效率。汽轮机排汽通常为低温低压的饱和蒸汽或湿蒸汽, 其热量难以直接利用。通过采用热电联产或冷热电三联供等技术, 可以将汽轮机排汽余热用于供热、制冷或生活热水等领域, 实现能量的梯级利用, 提高系统综合热效率。

热电联产是指利用汽轮机排汽余热进行供热, 可以满足周边用户的采暖需求, 提高能源利用效率。冷热电三联供是在热电联产的基础上, 利用吸收式制冷机将部分排汽余热转化为冷量, 用于夏季制冷, 进一步提高系统能源利用率。生物质直燃发电系统在运行过程中会产生大量的冷却水, 这些冷却水通常温度较高, 蕴含着一定的热量。通过采用热泵技术或余热锅炉等技术, 可以将冷却水余热回收利用, 用于供热、生活热水或工业用热等领域。热泵技术可以将低温余热提升至较高温度,

用于供热或生活热水。余热锅炉可以利用冷却水余热产生低压蒸汽, 用于工业用热或驱动吸收式制冷机。采用省煤器、空气预热器、热电联产、冷热电三联供、热泵技术以及余热锅炉等技术, 可以有效回收利用锅炉排烟、汽轮机排汽以及冷却水等环节的余热, 提高系统能源利用效率, 降低能源消耗, 减少环境污染。

4 结语

综述, 生物质直燃发电作为一种重要的可再生能源利用方式, 其热效率的提升对于提高能源利用效率、降低发电成本、减少环境污染具有重要意义。本文从燃料预处理、锅炉燃烧优化、蒸汽参数提升、余热回收利用等方面, 系统分析了影响生物质直燃发电系统热效率的关键因素, 并提出了相应的优化策略。采用合理的优化措施, 可以有效提高生物质直燃发电系统的热效率, 实现生物质能的高效清洁利用。

参考文献

- [1] 刘光鹏, 曾洁, 冉桑铭, 等. 煤粉锅炉大比例直燃耦合生物质的影响研究及工程应用[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S2): 237-242.
- [2] 谷树朋, 刘永江, 魏鹏. 生物质直燃发电机组装机容量分析[J]. 电站系统工程, 2024, 40(02): 71-72.
- [3] 高清林, 高嘉琦, 李毅, 等. 燃煤机组耦合生物质直燃发电综合分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(12): 1571-1578.
- [4] 李翊宁, 黄梦婷, 王英, 等. 苹果树修剪枝条直燃发电系统生命周期评价[J]. 农业工程, 2023, 13(10): 49-55.
- [5] 朱广岩, 田亚峻, 李俊杰, 等. 硬木类生物质直燃发电厂环境足迹研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(08): 1060-1067. D

作者简介: 姓名: 陈丽梅, 出生年月: 1980.02, 性别: 女, 民族: 汉, 籍贯: 山西运城, 单位: 山西电力职业技术学院, 学历: 硕士, 职称: 高级工程师, 主要研究方向: 生物质能发电应用技术。

姓名: 陈雅丽, 出生年月: 1985.11, 性别: 女, 民族: 汉, 籍贯: 山西运城, 单位名称: 山西电力职业技术学院, 学历: 本科, 职称: 高级工程师, 主要研究方向: 新能源发电技术与储能。

姓名: 苏华莺, 出生年月: 1979 年 4 月, 性别: 女, 民族: 汉, 籍贯: 山西左权, 单位名称: 山西电力职业技术学院, 学历: 硕士, 职称: 副教授, 主要研究方向: 新能源发电技术。