

生物质颗粒燃料在往复炉排锅炉中的燃烧特性模拟与污染物排放控制研究

宋明恒

郑州丰元电力工程设备有限公司，河南省郑州市，450199；

摘要：随着全球对可再生能源的需求日益增长，生物质能源作为一种清洁、可再生的能源形式，受到了广泛关注。生物质颗粒燃料作为生物质能源的一种重要形态，其在往复炉排锅炉中的燃烧特性及污染物排放控制成为研究的热点。本研究旨在通过模拟分析，深入了解生物质颗粒燃料在往复炉排锅炉中的燃烧行为，探讨其对锅炉运行效率及环境影响，并提出有效的污染物排放控制策略。

关键词：生物质颗粒燃料；在往复炉排锅炉；燃烧特性模拟；污染物排放控制

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.013

引言

在全球能源结构转型的大背景下，传统化石能源的消耗带来的环境问题日益凸显，促使人们寻求更为环保、可持续的能源替代方案。生物质能源，作为一种源自自然界的可再生资源，其开发利用不仅能够减少对化石能源的依赖，还能有效降低温室气体排放，对缓解全球气候变化具有重要意义。本研究聚焦于生物质颗粒燃料在往复炉排锅炉中的应用，这一领域的研究对于推动生物质能源的高效利用和减少污染物排放具有关键作用。

1 往复炉排锅炉燃烧原理与特性

1.1 往复炉排锅炉的工作原理

往复炉排锅炉通过炉排的往复运动实现燃料的输送、搅拌与燃尽，是适应固体燃料燃烧的常用设备。其核心工作流程分为四个阶段：燃料供给阶段，生物质颗粒通过给料机均匀输送至倾斜布置的炉排前端；燃烧准备阶段，炉排通过下方的风室送入一次风，同时炉排在机械传动下做往复运动（前进时推动燃料前移，后退时炉排片相对滑动），使燃料在炉排上均匀铺展并逐渐干燥、热解；燃烧阶段，热解产生的挥发分首先在燃料层上方着火燃烧，释放的热量加热燃料层，使固定碳开始燃烧，炉排下方不同风室根据燃烧区域（干燥区、燃烧区、燃尽区）的需求调节一次风风量与风速，确保燃烧充分；燃尽阶段，往复运动将未燃尽的灰渣推向炉排末端，落入灰渣斗，燃烧产生的高温烟气则进入对流受热面换热，完成热量利用。这种炉排运动方式无需复杂的拨火装置，能有效避免燃料堆积，适应不同粒度的生物质颗粒燃料。

1.2 往复炉排锅炉的燃烧特性

往复炉排锅炉的燃烧特性由炉排运动与燃烧过程的协同作用决定，呈现出分层燃烧、可控性强、适应性广的特点。从燃烧空间分布看，燃料在炉排上形成明显的分层结构：上层为未干燥的新鲜燃料层，中层为热解与挥发分燃烧层，下层为固定碳燃烧与灰渣层，各层之间通过热传导与对流实现热量传递，分层燃烧使燃烧过程有序进行，减少了不同阶段的相互干扰。从燃烧控制特性看，通过调节炉排往复频率与行程，可控制燃料在炉排上的停留时间（通常 30-60 分钟），结合一次风的分区调节，能精准控制燃烧温度与燃烧速度，避免局部过热或燃烧不充分。从燃料适应性看，往复炉排的往复搅拌作用可破碎燃料层中的结渣，减少搭桥现象，适用于木屑、秸秆、稻壳等多种生物质颗粒燃料，且对燃料含水率（15%-30%）与颗粒度（3-30mm）的适应范围较宽。但受炉排结构限制，其燃烧强度相对较低，炉排面积热负荷通常为 1.0-2.0 MW/m²，且烟气中飞灰含量较高，需加强除尘处理。

2 往复炉排锅炉燃烧过程中的问题

2.1 燃料层分布不均与局部燃烧不充分问题

往复炉排锅炉运行中易出现燃料层分布不均，进而导致局部燃烧不充分的问题，主要源于给料与炉排运动的协同性不足。给料机若出现卡料、断料或给料量波动，会使炉排前端燃料堆积过厚或过薄；炉排往复频率与行程调节不当，如频率过高导致燃料推进速度过快，或行程不足无法将燃料均匀铺展，均会造成燃料层厚度不均。燃料层过厚的区域，一次风难以穿透，氧气供应不足，固定碳无法充分燃烧，产生大量一氧化碳与未燃尽碳颗粒，降低燃烧效率；燃料层过薄的区域，热量易被一次风带走，温度偏低，挥发分燃烧不彻底，同样导致燃烧

效率下降。此外,生物质颗粒的堆积密度差异较大,轻质颗粒易被一次风吹起形成局部空穴,加重燃料层分布不均,进一步加剧局部燃烧不充分的问题。

2.2 结渣与积灰问题

生物质颗粒燃料中的碱金属(钾、钠)、氯元素及硅元素含量较高,在燃烧过程中易引发结渣与积灰问题,影响锅炉稳定运行。结渣主要发生在炉排燃烧区与炉膛受热面:燃烧区温度超过 1000℃时,生物质中的碱金属化合物(如 K_2CO_3 、 Na_2SO_4)会熔融形成液态渣,黏附在炉排片与炉墙表面,若未及时清除,会堵塞炉排通风孔,阻碍一次风进入,加剧燃烧不充分;炉膛受热面的结渣则源于烟气中的熔融态灰颗粒撞击管壁并黏附,形成坚硬的渣层,降低受热面换热效率。积灰主要发生在对流受热面(如省煤器、空气预热器),烟气中的细小灰颗粒(富含碱金属盐类)随烟气流动过程中,因温度降低而沉积在管壁表面,形成疏松的积灰层,不仅增加烟气流动阻力,还会因积灰的低导热性降低换热效率。长期结渣与积灰会导致锅炉出力下降,甚至被迫停机清理。

2.3 燃烧温度波动与热负荷不稳定问题

往复炉排锅炉的燃烧温度与热负荷易受燃料特性与运行参数波动影响,呈现不稳定状态。生物质颗粒的含水率、热值波动是主要诱因:含水率突然升高会增加燃料干燥所需热量,导致燃烧区温度骤降;热值降低则需增加给料量才能维持热负荷,若给料调节滞后,会造成热负荷短暂下降。运行参数调节不当也会引发波动:一次风风量突然增加会带走大量热量,使燃烧温度下降;炉排往复频率调整过快,会导致燃料停留时间突变,燃烧过程无法及时适应,造成温度波动。燃烧温度过低(低于 800℃)会使挥发分燃烧不充分,增加污染物排放;温度过高(超过 1100℃)则会加剧结渣与热力型 NO_x 生成。热负荷的频繁波动还会影响受热面的热应力分布,加速设备疲劳损坏,缩短使用寿命。

2.4 污染物排放浓度偏高问题

受生物质燃料特性与燃烧过程控制不足影响,往复炉排锅炉的污染物排放浓度易偏高,主要涉及 NO_x 、 SO_2 与颗粒物(PM)。 NO_x 排放中,燃料型 NO_x 占主导(约 70%-80%),源于生物质中的氮元素在燃烧过程中转化,若燃烧区氧气充足、温度过高,会促进燃料型 NO_x 向热力型 NO_x 转化,进一步提高排放浓度; SO_2 排放虽低于燃煤锅炉,但生物质中的硫元素(主要以有机硫形式存在)仍会在燃烧中转化为 SO_2 ,若燃料中硫含量较高(如某些秸秆),排放浓度仍需控制;PM 排放主要包括炉排

燃烧产生的飞灰与未燃尽碳颗粒,往复炉排的搅拌作用易使细小灰颗粒被烟气携带,若除尘设备效率不足,会导致 PM 排放超标。此外,生物质燃烧还可能产生少量挥发性有机物(VOCs)与二噁英,但通常浓度较低,不是主要控制对象。

3 生物质颗粒燃料在往复炉排锅炉中的燃烧特性模拟

3.1 模拟方法与模型建立

生物质颗粒在往复炉排锅炉中的燃烧特性模拟需采用多物理场耦合的数值模拟方法,通过构建数学模型重现燃烧全过程。核心模拟方法包括炉排层燃烧模型与炉膛气相燃烧模型的耦合:炉排层燃烧模型采用“区域法”将燃料层划分为干燥区、热解区、燃烧区与燃尽区,基于质量守恒与能量守恒方程,计算各区域的燃料转化率、温度分布与气体组分(如 CO 、 H_2 、 CH_4);炉膛气相燃烧模型基于计算流体力学(CFD),采用有限体积法离散 Navier-Stokes 方程,结合 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟烟气流动,采用 EDC(涡耗散概念)模型模拟挥发分与气相燃烧反应。同时,需引入热解模型(如双竞争反应模型)描述生物质热解过程,结渣模型(基于灰熔点与黏度模型)预测结渣趋势,辐射换热模型(如 P-1 模型、离散坐标法)计算炉膛内辐射换热。通过将炉排层模型的输出(如气相组分、温度)作为炉膛模型的边界条件,实现两者的耦合求解,完整模拟燃烧特性。

3.2 模拟参数的确定

模拟参数的合理确定是保证燃烧特性模拟准确性的关键,需涵盖燃料特性、运行参数与边界条件三类参数。燃料特性参数包括:生物质颗粒的工业分析数据(水分、灰分、挥发分、固定碳含量)、元素分析数据(C、H、O、N、S 含量)、热值、颗粒度分布与堆积密度,这些参数需通过实验测量获取,作为热解与燃烧模型的基础输入。运行参数包括:给料量、炉排往复频率与行程、一次风与二次风的风量、风速、风温及各风室的风量分配比例,这些参数需结合锅炉设计值与实际运行工况设定,可通过敏感性分析优化参数取值。边界条件参数包括:炉膛出口压力、受热面壁温、炉排与炉墙的散热系数、灰渣的排放速率,其中受热面壁温需根据锅炉热力计算结果设定,散热系数可参考相关标准选取。此外,模型中的经验系数(如热解反应速率常数、燃烧反应活化能)需通过实验数据验证与修正,确保模拟结果可靠。

3.3 模拟结果与分析

燃烧特性模拟结果的分析需围绕燃烧过程关键指标展开,为锅炉优化设计与运行调控提供依据。温度场

分析可呈现炉膛内的温度分布规律,判断是否存在局部高温区(易结渣、生成 NO_x)或低温区(燃烧不充分),例如模拟结果显示炉排中部燃烧区温度超过 1050°C ,需通过降低一次风温度或调整燃料推进速度控制温度。组分场分析可获取 CO 、 CO_2 、 O_2 、 NO_x 等气体组分的空间分布,若炉排末端燃尽区 CO 浓度偏高(超过0.5%),说明燃料停留时间不足,需增加炉排行程或降低推进速度;若炉膛上部 O_2 浓度过高,说明二次风配风不合理,易促进 NO_x 生成。燃料转化率分析可计算不同位置的燃料转化效率,评估燃烧充分性,若热解区转化率低于预期,需优化一次风温度以提升热解速率。结渣模拟结果可预测炉排与受热面的结渣位置与程度,为防结渣措施提供指导。通过对比不同工况(如不同给料量、配风量)的模拟结果,可量化分析各参数对燃烧特性的影响,筛选最优运行方案。

4 污染物排放控制策略

4.1 NO_x 排放控制

生物质颗粒燃烧的 NO_x 排放控制需针对燃料型 NO_x 为主的特点,结合燃烧过程优化与末端治理技术。燃烧过程优化是核心:采用“低氮燃烧”技术,通过合理配风(如一次风分段供给、二次风延迟投入),在燃烧区形成局部还原性气氛,促进 NO_x 的还原(如 CO 、 H_2 将 NO_x 还原为 N_2);控制燃烧区温度低于 1000°C ,抑制热力型 NO_x 生成,可通过降低一次风温度、增加燃料层厚度等方式实现;优化炉排往复频率,延长燃料在还原区的停留时间,提升 NO_x 还原效率。末端治理技术适用于严格排放要求场景:选择性非催化还原(SNCR)技术在炉膛上部(温度 $850\text{--}1100^\circ\text{C}$)喷入氨水或尿素,与 NO_x 反应生成 N_2 ;选择性催化还原(SCR)技术则在烟道中设置催化剂,在较低温度($200\text{--}400^\circ\text{C}$)下实现 NO_x 高效脱除,但需注意生物质烟气中的碱金属可能导致催化剂中毒,需提前进行预处理。

4.2 SO_2 排放控制

生物质颗粒燃烧的 SO_2 排放控制以燃料预处理与炉内脱硫为主,末端脱硫为辅。燃料预处理通过筛选低硫生物质原料(如木屑硫含量低于0.1%,优于秸秆),或采用水洗、干燥等方法降低燃料中的硫含量,从源头控制 SO_2 生成。炉内脱硫是常用手段,在给料过程中掺入脱硫剂(如石灰石、白云石,粒径 $1\text{--}3\text{mm}$),脱硫剂在燃烧区高温下分解为 CaO ,与 SO_2 反应生成 CaSO_4 ,

实现炉内脱硫;脱硫效率受脱硫剂种类、掺混比例(通常 Ca/S 比为 $2\text{--}3$)、燃烧温度影响,需通过实验优化参数,确保脱硫效率达到 $50\%\text{--}70\%$ 。末端脱硫适用于高硫燃料或严格排放要求,可采用半干法脱硫(如循环流化床脱硫塔)或湿法脱硫(如石灰石-石膏法),其中半干法脱硫因投资低、无废水排放,更适配中小型往复炉排锅炉,脱硫效率可达 $80\%\text{--}90\%$ 。

4.3 PM 排放控制

PM排放控制需从源头抑制与末端除尘两方面入手,减少颗粒物的生成与排放。源头抑制通过优化燃烧过程减少PM生成:合理调节一次风风速,避免风速过高将过多细小燃料颗粒吹起;优化炉排往复频率,减少燃料层的过度搅拌导致的灰颗粒脱落;控制燃烧温度,避免局部过热导致灰颗粒熔融黏结形成大颗粒(易沉积,减少飞灰)。末端除尘需根据PM排放要求选择合适的除尘设备:中小型锅炉可采用袋式除尘器或旋风除尘器,袋式除尘器通过滤袋过滤烟气中的颗粒物,效率可达 99.5% 以上,适用于严格排放要求;旋风除尘器结构简单、成本低,但效率较低($70\%\text{--}85\%$),适用于一般排放要求。大型锅炉可采用电袋复合除尘器,结合静电除尘与袋式除尘的优势,效率可达 99.9% 以上。此外,定期清理除尘设备的灰斗与滤袋,避免积灰堵塞,确保除尘效率稳定。

5 结语

综上所述,生物质颗粒燃料在往复炉排锅炉中的燃烧特性受多种因素影响,包括燃料特性、运行参数及锅炉设计。通过模拟研究,我们深入理解了燃烧过程中的关键机制,并提出了针对性的污染物排放控制策略。未来,随着生物质能源利用技术的不断发展,往复炉排锅炉的燃烧效率与环保性能将进一步提升,为实现绿色、低碳的能源转型贡献力量。同时,我们也应持续关注生物质燃料的市场供应稳定性与成本变化,以及政策导向对生物质能源利用的影响,为生物质发电行业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 李世君. 循环流化床锅炉掺烧生物质颗粒燃料可行性分析[J]. 石油石化绿色低碳, 2025, 10(02): 56-62.
- [2] 李雪龙, 崔彦如, 刘海燕, 王彦靖, 王秀飞. 生物质颗粒燃料燃烧烟气释放研究[J]. 现代盐化工, 2024, 51(06): 45-48.