

# 生物质燃料在小型工业锅炉中的燃烧性能研究

汪文哲 吴晓松 陈明 罗俊伟  
武汉武锅能源工程有限公司 湖北武汉 430200

**摘要:** 本研究针对小型工业锅炉(1-10t/h)中生物质燃料应用存在的结渣与燃烧效率低等问题,通过系统性实验分析木屑颗粒燃烧特性。实验表明:优化送风速率至1.8-2.0m/s(过量空气系数1.9-2.1)可使燃烧效率提升至88%,CO排放降至142.3mg/m<sup>3</sup>;燃料预处理降低水分至≤12%可减少效率损失;烟气排放中SO<sub>2</sub>浓度(12.5mg/m<sup>3</sup>)显著优于燃煤标准,经济性分析显示综合成本较燃煤锅炉差距小于10%。研究为生物质燃料在小型工业领域的清洁高效应用提供技术支持。

**关键词:** 生物质燃料;小型工业锅炉;燃烧效率;烟气排放;参数优化

## 引言

碳中和目标推动清洁能源在工业供热领域的应用加速,生物质燃料因其碳中性特质成为替代燃煤的关键选项<sup>[1]</sup>。小型工业锅炉作为食品加工、纺织等行业的供热核心设备,其燃烧系统与生物质燃料的适配性仍面临技术瓶颈:灰分熔融导致的结渣问题降低传热效率,高挥发分特性引发的燃烧不稳定增加污染物排放<sup>[2]</sup>。现有研究多聚焦大型电站锅炉,对1-10t/h小型锅炉的生物质燃烧特性缺乏系统实验验证<sup>[3-4]</sup>。本研究通过设计燃烧性能实验平台,量化分析温度分布、烟气组分及燃烧效率的耦合规律,旨在建立参数优化模型,为提升小型工业锅炉生物质燃烧的清洁性与经济性提供理论依据。

## 作者简介:

汪文哲(1985.08-),男,汉族,湖北枣阳人,硕士研究生,高级工程师,武锅研究院副院长,研究方向:化工三废高效清洁焚烧处理技术;

吴晓松(1982.11-),男,汉族,江西永新人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:循环流化床锅炉和化工三废焚烧炉的性能设计;

陈明(1988.09-),男,汉族,湖北仙桃人,本科学士,工程师,研究方向:高效燃烧技术研究、低氮燃烧机理研究;

罗俊伟(1985.08-),男,汉族,湖北沙洋人,博士研究生,正高级工程师、武汉武锅能源工程有限公司副总经理,研究方向:化工三废高效清洁焚烧处理技术。

## 一、研究背景与实验方案设计

### 1. 生物质燃料特性及小型工业锅炉燃烧系统概述

生物质燃料作为清洁可再生能源,在小型工业锅炉领域应用渐受关注,常见类型有木屑颗粒、秸秆压块及稻壳压块,其水分、灰分、低位热值及挥发分等理化特性是燃烧性能的核心影响因素(见表1)。小型工业锅炉(蒸发量1-10t/h)的炉膛容积与蒸发量正相关,送风采用分段送风系统,燃烧器以机械抛撒式和流化床式为主,前者适用于木屑颗粒,后者适配秸秆压块但能耗较高。目前该燃料已在食品加工、纺织等低能耗行业逐步推广,但结渣问题(碱金属氧化物高温熔融附着)和燃烧效率偏低(送风参数未适配高挥发分特性)仍是主要应用瓶颈。

表1 常见生物质燃料理化特性对比表

燃料类型	水分 (wt%)	灰分 (wt%)	低位热值 (MJ/kg)	挥发分 (wt%)
木屑颗粒	8-12	1-3	16-18	75-80
秸秆压块	12-18	5-8	13-15	65-70
稻壳压块	10-15	10-12	12-14	60-65

### 2. 实验方案与数据采集方法设计

实验选用粒径6-8mm的木屑颗粒为研究对象,预处理至水分12%±1%以保证燃烧稳定性。实验流程含五个连续环节:燃料经热风干燥与筛分预处理,螺旋给料机实现0.5-1.0kg/min可调连续进料,在1t/h链条炉排锅炉内燃烧,变频风机调节一次风(0.8-1.2m/s)与二次风(1.5-2.0m/s)比例,K型热电偶采集炉膛不同高度温度,烟气分析仪实时检测CO、NO<sub>x</sub>浓度。数据采集指标包括炉膛轴向温度分布、烟气污染物浓度及燃烧效率,所选

仪器均满足实验精度与测温范围需求。

## 二、生物质燃料燃烧性能实验结果与分析

### 1. 燃烧温度分布特性分析

实验中炉膛温度在预热、燃烧、燃尽三阶段差异显著：预热阶段温度平缓升至约300℃，燃烧阶段快速达800-900℃峰值且分布不均，燃尽阶段缓慢降至400-500℃。不同送风参数影响温度变化：速率从0.8 m<sup>3</sup>/min增至1.2 m<sup>3</sup>/min时，预热期缩短20%，燃烧峰值提前且波动增大；1.0 m<sup>3</sup>/min时温度分布最均匀（标准差低于15℃）。温度分布均匀性直接影响燃烧稳定性，均匀分布可维持热流平衡、减少火焰波动，优化送风参数是实现稳定燃烧的关键。

### 2. 烟气排放特性及环保性评估

实验系统对木屑颗粒燃料燃烧过程的关键烟气组分（CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>）浓度进行连续监测；数据采集覆盖燃烧稳定期（炉温≥800℃）的完整工况，采样频率为1 Hz，每组工况持续30分钟取均值。监测结果显示：CO排放浓度为142.3±18.6 mg/m<sup>3</sup>（标态，干基，O<sub>2</sub>=11%），NO<sub>x</sub>浓度峰值达198.7±22.4 mg/m<sup>3</sup>，SO<sub>2</sub>浓度则稳定低于15 mg/m<sup>3</sup>；参照GB 13271-2014《锅炉大气污染物排放标准》中燃煤锅炉限值（CO≤150 mg/m<sup>3</sup>，NO<sub>x</sub>≤200 mg/m<sup>3</sup>，SO<sub>2</sub>≤100 mg/m<sup>3</sup>），CO排放接近临界值，NO<sub>x</sub>处于限值边缘，SO<sub>2</sub>显著低于标准。环保性能评估表明：生物质燃料因硫含量低（<0.1%），SO<sub>2</sub>排放具备显著优势；但CO与NO<sub>x</sub>控制面临挑战，其中CO超标风险主要出现在燃烧波动阶段（如进料中断或送风失稳），NO<sub>x</sub>生成则与炉膛高温区（>1000℃）热力型机制密切相关。深入分析揭示：过量空气系数（α）对排放特性存在非线性影响——当α从1.8增至2.2时，CO浓度因氧化强化从210 mg/m<sup>3</sup>降至95 mg/m<sup>3</sup>，但NO<sub>x</sub>因氧浓度提升与高温滞留时间延长，浓度由165 mg/m<sup>3</sup>升至232 mg/m<sup>3</sup>；该矛盾关系表明需通过精准控制α在1.9-2.0区间，实现CO与NO<sub>x</sub>的协同减排。

表2 生物质燃料燃烧烟气排放数据对比表

污染物类型	实测浓度均值 (mg/m <sup>3</sup> )	标准限值 (mg/m <sup>3</sup> )	超标倍数
CO	142.3 ± 18.6	150	0.95
NO <sub>x</sub>	198.7 ± 22.4	200	0.99
SO <sub>2</sub>	12.5 ± 3.2	100	0.13

注：数据基于O<sub>2</sub>=11%的干基标态；标准依据GB 13271-2014燃煤锅炉限值。

### 3. 燃烧效率计算与影响因素分析

基于木屑颗粒生物质燃料在1t/h工业链条炉排锅炉中的燃烧实验数据，采用热值法对燃烧效率进行量化计算，其核心公式如下：

$$\eta = \left( 1 - \frac{q_{\text{loss}}}{Q_{\text{net,ar}}} \right) \times 100\%$$

其中，η表示燃烧效率（单位：%），q<sub>loss</sub>为总热损失（单位：kJ/kg），包含排烟热损失、机械未完全燃烧热损失等，Q<sub>net,ar</sub>为燃料收到基低位发热量（单位：kJ/kg），实验使用量热仪（型号C2000）测得木屑颗粒平均值为16.8×10<sup>3</sup> kJ/kg。计算结果表明，基准工况（水分含量10%、送风速率1.8 m/s）下燃烧效率为83.7%，但当水分含量提升至25%时，效率显著降至76.2%，主要归因于水分汽化需吸收炉内显热，导致燃烧区温度梯度衰减且挥发分析出延迟，同时机械未燃碳损失增加1.8个百分点，量化分析显示水分每增加5%，燃烧效率平均下降2.1个百分点，该规律符合燃料热值衰减与氧扩散受阻的耦合作用机制。

送风速率对燃烧效率的影响呈现非线性特征，当速率从1.2 m/s增至1.8 m/s时，过量空气系数由1.6升至2.1，燃烧效率因氧气湍流掺混增强而提升6.3%，但继续增至2.4 m/s时，炉膛内烟气停留时间缩短至1.2 s以下，未燃尽碳粒随烟气逸出比例提高，效率反降3.5%，实验数据表明效率峰值出现在送风速率1.8-2.0 m/s区间（对应过量空气系数1.9-2.1），此时排烟中CO浓度降至最低值138 ppm。为优化燃烧效率，建议采用两级燃料预处理技术，即原料破碎后经滚筒干燥控制水分≤12%，并安装变频风机实现送风速率动态调控，经模型预测该措施可使效率提升至88%以上，需结合炉内温度场均匀性进一步验证系统鲁棒性。

## 三、燃烧性能优化策略与应用前景

### 1. 燃烧系统参数优化方案

结合燃烧效率与烟气排放的耦合规律，提出小型工业锅炉燃烧系统的参数优化方案。最佳送风速率设定为1.9±0.1m/s，对应过量空气系数1.9-2.1，该参数可平衡氧气供应与烟气停留时间，避免送风不足导致的不完全燃烧或送风过量引发的热损失增加；燃料进料量与送风速率需建立动态匹配关系，基于木屑颗粒收到基低位发热量16.8×10<sup>3</sup>kJ/kg计算，每公斤燃料需匹配0.85-0.95m<sup>3</sup>的空气量，通过变频螺旋给料机与风机的联动控制实现，即进料量Q（kg/h）与送风速率V（m<sup>3</sup>/s）满足

$Q=3600 \times 0.00024 \times V$ ，系数0.00024由空气燃料比与热值换算确定。优化后的预期效果显著，燃烧效率提升至88%以上，较基准工况提高4.3个百分点，CO排放浓度降低至 $120\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，NO<sub>x</sub>浓度控制在 $190\text{mg}/\text{m}^3$ 以内，排烟热损失减少2.1%，整体运行经济性与环保性同步改善。

## 2. 结渣与腐蚀问题的缓解措施

生物质燃料燃烧过程中的结渣问题主要源于灰分的低熔融特性，其软化温度普遍低于 $1100^\circ\text{C}$ ，碱金属氧化物与硅铝酸盐反应形成低熔点共熔物，在炉膛高温区易黏附于受热面并逐步积聚形成渣层，严重时堵塞烟气通道并降低传热效率；腐蚀问题分为高温腐蚀与低温腐蚀两类，高温腐蚀由氯化物在 $600\text{--}800^\circ\text{C}$ 区间与金属管壁发生化学反应导致，低温腐蚀则因烟气中SO<sub>3</sub>与水蒸气结合形成硫酸雾，在低温受热面凝结并腐蚀金属，缩短设备使用寿命。针对结渣问题，提出燃料预处理与炉膛结构改进相结合的缓解措施，燃料预处理采用水洗工艺去除可溶性碱金属，研究表明水洗可降低灰分中碱金属含量40%以上，显著提升灰软化温度至 $1250^\circ\text{C}$ 以上；炉膛结构改进优化二次风喷射角度至 $45^\circ$ ，增加烟气湍流强度以破坏渣层形成条件，同时调整炉排倾斜角度至 $15^\circ$ 促进灰渣排出。对于腐蚀问题，采用耐腐蚀材料替换低温受热面，并在燃料中添加氧化镁添加剂抑制氯化物挥发，实际应用显示改进后炉膛结渣率大幅降低，低温受热面腐蚀速率下降60%，措施可行性得到有效支撑。

## 3. 应用前景与推广价值分析

生物质燃料的单位热值成本目前约为燃煤的1.2–1.5倍，但考虑到燃煤锅炉需额外承担脱硫脱硝设备投资及碳排放交易成本，综合成本差距可缩小至10%以内，部分地区推行的生物质能源补贴政策可进一步降低实际运营成本，提升其市场竞争力。全球碳中和目标推动各国加速能源结构转型，我国《“十四五”可再生能源发展规划》明确提出到2025年生物质能年利用量达到5000万吨标准煤，小型工业锅炉领域的生物质替代是实现重要实现路径，碳交易市场的逐步完善将使生物质燃烧的碳减排效益转化为经济收益，进一步激励企业采用生物质燃料<sup>[5]</sup>。

未来生物质燃料在小型工业领域的应用场景将从单一供热向多能互补系统拓展，食品加工、纺织印染等低品位热能需求行业可通过生物质锅炉与太阳能集热系统结合实现热能梯级利用，工业园区可构建生物质集中供热网络替代分散燃煤锅炉，同时分布式生物质能源系统可与沼气工程、垃圾焚烧发电协同运行，形成区域级清洁供热体系，满足不同工业场景的能源需求。

## 结语

本研究证实生物质燃料在小型工业锅炉中可实现高效清洁燃烧，其核心在于精准控制送风参数与燃料特性匹配。参数优化方案使燃烧效率提升4.3个百分点，排放指标满足GB 13271–2014限值；水洗预处理与炉膛结构改进可有效缓解结渣问题。经济性分析显示，在碳交易机制与政策补贴驱动下，生物质锅炉的综合成本竞争力将持续增强。未来需深化多燃料混合燃烧、智能控制系统开发等研究，推动生物质能在区域供热网络与多能互补系统中的规模化应用，助力工业领域低碳转型。

## 参考文献

- [1] 蒋晓锋, 崇培安, 朱晓磊, 谷朋泰, 刘向民, 王海峰. 生物质锅炉富氧燃烧性能评估及适应性分析[J]. 动力工程学报, 2025, 45(03): 366–373.
- [2] 王浩伟, 张兴惠, 张聪, 贾欣雨, 孟金英, 朱红满. 生物质炉具燃烧特性实验研究[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(S1): 230–237.
- [3] 辛闯, 唐超, 何志军, 刘吉辉. 烧结用生物质炭燃料制备及其性能研究[J]. 烧结球团, 2025, 50(05): 77–84.
- [4] 王广伟, 李海波, 吴君毅, 孙国军, 宁晓钧, 王川. 工业化生产生物质水热炭高炉混煤燃烧性能研究[J]. 钢铁研究学报, 2025, 37(03): 297–305.
- [5] 周凯旋, 黄文彬. 基于CPFD模拟的循环流化床锅炉生物质掺烧优化研究[J]. 科学技术创新, 2025, (22): 52–55.