

# 生物质锅炉低负荷运行下烟气排放参数波动研究

张莹

国能（滨州）生物热电有限公司 陕西 宝鸡 721000

**摘要：**在全球能源转型与环境保护需求日益迫切的背景下，生物质锅炉作为生物质能利用的关键设备，其低负荷运行下的烟气排放问题备受关注。本文深入探究生物质锅炉低负荷运行时烟气排放参数的波动情况，全面分析影响参数波动的各类因素，涵盖燃料特性、锅炉设计与运行参数、环境因素等多方面，旨在为生物质锅炉实现安全、高效、环保的低负荷运行提供坚实的理论支撑与实践指导。

**关键词：**生物质锅炉；低负荷运行；烟气排放参数；波动研究

## 1 引言

在全球能源危机与环境问题加剧的背景下，生物质能作为可再生能源备受关注。生物质锅炉因具备减少化石能源依赖、降低碳排放等优势，广泛应用于供暖与发电领域。然而，受电力需求和热负荷变化影响，锅炉常需在低负荷工况下运行。此时燃烧状态不稳定，易导致颗粒物、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>等烟气排放参数波动，影响燃烧效率、设备寿命并可能加剧环境污染。因此，深入研究低负荷运行下烟气排放波动规律，对优化运行、提升能效、减排污染具有重要意义。

## 2 生物质锅炉低负荷运行特性分析

### 2.1 低负荷运行对燃烧过程的影响

生物质锅炉在低负荷运行时，燃烧过程会发生显著变化。首先，燃料供应量减少，导致炉膛内的燃料分布和燃烧强度发生变化。在正常负荷下，燃料能够均匀分布在炉膛内，形成稳定的燃烧区域；而在低负荷时，燃料分布可能不均匀，局部区域燃料浓度过高或过低，影响燃烧的充分性和稳定性。其次，低负荷运行时，进入炉膛的空气量相对减少，空气与燃料的混合效果变差，可能导致燃烧不完全，产生更多的未燃尽碳和一氧化碳（CO）等污染物。此外，低负荷下炉膛温度降低，燃烧反应速率减慢，进一步影响燃烧的稳定性与效率。

### 2.2 低负荷运行对传热过程的影响

传热过程是生物质锅炉正常运行的重要环节。低负荷运行时，锅炉的蒸汽产量或热水输出量减少，导致炉膛内的烟气温度和流速降低。烟气与受热面之间的换热系数减小，传热效率降低<sup>[1]</sup>。这不仅会使锅炉的排烟温度升高，造成热能损失，还可能影响受热面的安全运行，如导致受热面积灰、结渣等问题加剧，进一步降低传热效率，形成恶性循环。

## 3 生物质锅炉低负荷运行下烟气排放参数波动的影响因素

### 3.1 燃料特性

生物质燃料的种类繁多，包括木材、农作物秸秆、林业废弃物等，不同燃料的化学成分、物理性质差异较大，这会对低负荷运行下的烟气排放参数波动产生重要影响。例如，燃料的含水量是影响燃烧和排放的关键因素之一。高含水量的燃料在燃烧过程中需要消耗更多的热量用于水分蒸发，导致炉膛温度降低，燃烧稳定性变差，烟气中污染物浓度波动增大。此外，燃料的灰分含量、挥发分含量等也会影响燃烧过程和污染物生成。灰分含量高的燃料在燃烧过程中容易形成灰渣，影响受热面的传热，同时灰分中的某些成分可能在高温下发生反应，生成新的污染物；挥发分含量高的燃料在燃烧初期会迅速释放大量的可燃气体，如果空气供应不足，会导致不完全燃烧，增加一氧化碳和颗粒物的排放。

### 3.2 锅炉设计与运行参数

锅炉的设计结构，如炉膛形状、尺寸、燃烧器布置等，对低负荷运行下的烟气排放参数波动有重要影响。合理的炉膛设计能够保证燃料在低负荷时仍有良好的燃烧空间和空气混合效果，减少燃烧不充分现象。燃烧器的类型和布置方式直接影响燃料的着火和燃烧稳定性<sup>[2]</sup>。例如，一些先进的燃烧器采用分级燃烧、低氮燃烧等技术，在正常负荷下能够有效降低污染物排放，但在低负荷运行时，由于燃烧工况变化，这些技术的效果可能受到影响，导致烟气排放参数波动。此外，锅炉的运行参数，如一次风、二次风的风量比例和风速，以及给料速度等，在低负荷运行时需要重新调整优化。如果调整不当，会导致空气与燃料混合不均匀，燃烧不稳定，从而使烟气排放参数出现较大波动。

### 3.3 环境因素

环境因素，如气温、气压、湿度等，也会对生物质锅炉低负荷运行下的烟气排放参数波动产生一定影响。气温较低时，锅炉需要消耗更多的热量来维持正常运行，这可能导致燃烧工况发生变化，烟气排放参数波动<sup>[3]</sup>。气压的变化会影响空气的密度和流动特性，进而影响空气与燃料的混合和燃烧过程。湿度较大的环境会使燃料含水量增加，同样会影响燃烧的稳定性 and 烟气排放。

4 生物质锅炉低负荷运行下烟气排放参数波动实验研究

4.1 实验设备与方法

为了深入研究生物质锅炉低负荷运行下烟气排放参数的波动情况，搭建了一套完整的实验系统。该系统主要包括生物质锅炉本体、燃料供应系统、空气供应系统、烟气排放监测系统以及数据采集与控制系统。

生物质锅炉本体为一台额定蒸发量为6t/h的链条锅炉，采用往复炉排作为燃烧设备，具有较好的燃料适应性和燃烧稳定性。燃料供应系统由料仓、给料机和输送管道组成，能够实现燃料的精确计量和稳定输送。给料机采用变频调速技术，可根据实验要求调整给料速度，调节范围为100-500kg/h。空气供应系统包括鼓风机、风道和风门调节装置，鼓风机为锅炉提供燃烧所需的空

气，风道和风门调节装置可精确控制一次风和二次风的风量和风速。一次风风量调节范围为500-2000m³/h，二次风风量调节范围为300-1500m³/h。

烟气排放监测系统采用先进的在线监测设备，能够实时、准确地测量烟气中颗粒物、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>等污染物的浓度。颗粒物浓度测量采用激光散射法，测量范围为0-1000mg/m³，精度为±5%；NO<sub>x</sub>浓度测量采用化学发光法，测量范围为0-1000mg/m³，精度为±3%；SO<sub>2</sub>浓度测量采用紫外荧光法，测量范围为0-500mg/m³，精度为±4%<sup>[4]</sup>。同时，该系统还配备了温度传感器、压力传感器等，用于测量炉膛温度、排烟温度、烟气压力等参数。

数据采集与控制系统采用可编程逻辑控制器（PLC）和上位机软件，能够实时采集和记录烟气排放监测系统和锅炉运行参数监测系统的数据，并对锅炉的运行参数进行自动控制。通过上位机软件，可以设置不同的负荷工况，自动调整给料速度、一次风风量、二次风风量等参数，实现锅炉在不同负荷下的稳定运行。

实验过程中，选用三种不同类型的生物质燃料，分别为木材、玉米秸秆和稻壳，其工业分析和元素分析数据如下表所示：

表1 生物质燃料种类及元素分析表

| 燃料种类 | 水分（%） | 灰分（%） | 挥发分（%） | 固定碳（%） | 碳（%） | 氢（%） | 氧（%） | 氮（%） | 硫（%） |
|------|-------|-------|--------|--------|------|------|------|------|------|
| 木材   | 12    | 1.5   | 78     | 8.5    | 48   | 6    | 42   | 0.5  | 0.1  |
| 玉米秸秆 | 15    | 8     | 70     | 7      | 42   | 5    | 45   | 0.8  | 0.2  |
| 稻壳   | 10    | 18    | 65     | 7      | 38   | 5    | 47   | 0.7  | 0.3  |

在不同负荷工况下（重点为低负荷工况，负荷范围设定为30%、40%、50%额定负荷）进行燃烧实验。每个负荷工况下，保持锅炉稳定运行2小时，期间每隔5分钟采集一次烟气排放数据和锅炉运行参数数据。实验过程中，详细记录燃料供应量、空气量、炉膛温度、排烟温度等参数的变化情况，为后续数据分析提供依据。

4.2 实验结果与分析

4.2.1 颗粒物排放波动

实验显示，生物质锅炉在低负荷运行时，颗粒物浓度波动显著。随着负荷降低，颗粒物浓度先上升后略微下降。从50%降至40%额定负荷时，以木材为例，颗粒

物平均浓度由80mg/m³升至120mg/m³，波动范围扩大；这是由于燃烧不充分和气流扰动加剧导致。当负荷降至30%，尽管燃烧不稳定，但因燃料减少，颗粒物浓度略降至100mg/m³，波动范围约为±20mg/m³。不同燃料的颗粒物排放波动各异，灰分高的燃料波动更明显。例如，稻壳（灰分含量18%）在40%额定负荷下，颗粒物平均浓度达150mg/m³，波动范围±30mg/m³。高灰分燃料燃烧过程中易形成细小颗粒，并增加积灰，影响燃烧效率与传热，加剧排放不稳定。这些发现表明，在低负荷条件下优化燃料选择和燃烧控制对于减少颗粒物排放至关重要。

表2 颗粒物排放波动数据表

| 燃料种类 | 负荷工况（额定负荷%） | 颗粒物平均浓度（mg/m³） | 颗粒物浓度波动范围（mg/m³） |
|------|-------------|----------------|------------------|
| 木材   | 50          | 80             | ±10              |
| 木材   | 40          | 120            | ±25              |
| 木材   | 30          | 100            | ±20              |
| 稻壳   | 40          | 150            | ±30              |

#### 4.2.2 NO<sub>x</sub>排放波动

在生物质锅炉低负荷运行时, NO<sub>x</sub>排放浓度出现显著波动。随着负荷降低, NO<sub>x</sub>浓度先升高后下降。从50%降至40%额定负荷时, 由于局部氧气浓度过高促进热力型NO<sub>x</sub>生成, 以玉米秸秆为例, NO<sub>x</sub>平均浓度从150mg/m<sup>3</sup>升至180mg/m<sup>3</sup>, 波动范围扩大。尽管炉膛温度下降, 但局部高氧区使热力型NO<sub>x</sub>增加。当负荷进一步降至30%, 炉膛温度继续下降, 抑制了热力型NO<sub>x</sub>的生成, 同时燃烧不完全产生的一氧化碳等还原性气体增多, 对已生成

的NO<sub>x</sub>进行还原, 使得NO<sub>x</sub>浓度降至160mg/m<sup>3</sup>, 波动范围约为±18mg/m<sup>3</sup>。燃烧器运行参数如一次风和二次风的比例与风速显著影响NO<sub>x</sub>排放。通过优化这些参数可控制NO<sub>x</sub>波动。例如, 在40%额定负荷下, 调整一次风与二次风比例从1:1.3到1:1.1, NO<sub>x</sub>浓度从180mg/m<sup>3</sup>降至165mg/m<sup>3</sup>, 波动范围减小至±15mg/m<sup>3</sup>。合理调整风量比例可以改善空气与燃料混合效果, 减少高氧区, 从而降低热力型NO<sub>x</sub>生成。这表明优化燃烧器设置对于控制低负荷下的NO<sub>x</sub>排放至关重要。

表3 NO<sub>x</sub>排放波动数据表

| 燃料种类           | 负荷工况 (额定负荷%) | NO <sub>x</sub> 平均浓度 (mg/m <sup>3</sup> ) | NO <sub>x</sub> 浓度波动范围 (mg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------|--------------|---|---|
| 玉米秸秆           | 50           | 150                                       | ±15   |
| 玉米秸秆           | 40           | 180                                       | ±20   |
| 玉米秸秆           | 30           | 160                                       | ±18   |
| 玉米秸秆 (调整风量比例后) | 40           | 165                                       | ±15   |

#### 4.2.3 SO<sub>2</sub>排放波动

SO<sub>2</sub>排放主要取决于燃料中的硫含量。在实验中, 对于含硫量较低的生物质燃料, 在低负荷运行时SO<sub>2</sub>排放浓度相对较低, 但也会出现一定波动。以木材燃料为例, 其硫含量仅为0.1%, 在低负荷 (40%额定负荷) 运行时, 烟气中SO<sub>2</sub>平均浓度为10mg/m<sup>3</sup>, 波动范围为±2mg/m<sup>3</sup>。波动的原因主要是燃烧工况的变化影响了硫的氧化反应。低负荷时, 炉膛温度降低, 硫的氧化反应

速率减慢, 同时燃烧不完全可能导致部分硫以其他形式存在, 未完全转化为SO<sub>2</sub>, 从而使SO<sub>2</sub>排放浓度出现波动。如果燃料中硫含量较高, SO<sub>2</sub>排放波动会更加明显, 且排放浓度可能超过环保标准。例如, 稻壳燃料的硫含量为0.3%, 在低负荷 (40%额定负荷) 运行时, 烟气中SO<sub>2</sub>平均浓度为30mg/m<sup>3</sup>, 波动范围达到了±5mg/m<sup>3</sup>。对于高硫燃料, 需要采取有效的脱硫措施来控制低负荷下的SO<sub>2</sub>排放。

表4 SO<sub>2</sub>排放波动数据表

| 燃料种类 | 负荷工况 (额定负荷%) | SO <sub>2</sub> 平均浓度 (mg/m <sup>3</sup> ) | SO <sub>2</sub> 浓度波动范围 (mg/m <sup>3</sup> ) |
|------|--------------|---|---|
| 木材   | 40           | 10  | ±2  |
| 稻壳   | 40           | 30  | ±5  |

#### 结语

本文深入研究了生物质锅炉低负荷运行下的烟气排放参数波动, 通过理论分析和实验验证, 揭示了燃料特性、锅炉设计与运行参数、环境因素对烟气排放的影响机制。实验表明, 在低负荷运行时, 颗粒物、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>等排放参数出现显著波动, 受燃料含水量、灰分含量、燃烧器参数等因素影响。为应对这些问题, 提出从燃料预处理、锅炉设计优化到加强运行管理的综合策略。未来研究可通过CFD模拟精确模拟燃烧过程, 研发新型生物质锅炉及高效净化技术, 如宽负荷调节范围锅炉、优化低氮燃烧器等, 并强化政策引导和技术支持, 推动生物质能利用向更环保高效的方向发展, 促进能源转型与环境保护。

#### 参考文献

- [1]高波,阴继翔,李涛,等.不同入口流速下生物质锅炉尾部烟气凝结的数值研究[J].上海电力大学学报,2022,38(01):1-8.
- [2]方平,生物质锅炉烟气污染物深度减排与管控技术研究.广东省,生态环境部华南环境科学研究所,2022-10-11.
- [3]袁也,陈焱,曹文凯,等.生物质锅炉烟气超低排放改造技术路线与经济性分析[J].中国资源综合利用,2022,40(06):173-176.
- [4]赵文霞,柴子茹,边永欢,等.农林生物质锅炉烟气排放特性及其SNCR脱硝效果的数值模拟[J].环境工程学报,2022,16(10):3355-3366.