

纯烧蘑菇菌液循环流化床锅炉低负荷运行特性研究

温彬^{1,2}, 冀成婧², 韩佩兴², 汤薛玉^{1,2}, 王晓炜³, 庄柯⁴, 柯希玮², 郑伟雄^{1*}

(1.清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084; 2.怀柔实验室山西研究院, 山西省 太原市 030032; 3.太原锅炉集团, 山西省 太原市 030021; 4.中国能源科技研究院有限公司低碳智能燃煤发电与超净排放全国重点实验室, 江苏省 南京市 210023)

摘要: 中国生物质资源以各类农林废弃物、工业固废等为主, 兼具能源和污染源两重属性, 如何对其清洁高效利用面临众多挑战。循环流化床(CFB)锅炉具有燃料适应性强、负荷灵活性好、污染物控制成本低等优势, 但在蘑菇菌液等非常规生物质的燃烧处理上鲜见报道, 对其宽负荷运行及污染物排放特性缺乏认识。本文以某供热用户的纯烧蘑菇菌液 CFB 锅炉为研究对象, 通过现场实测分析了 13%-40%负荷下的运行参数及污染物排放特性。结果表明: 锅炉在低负荷下可维持稳定的蒸汽参数(压力 1.00-1.05 MPa, 温度 179.6-181.3 °C)和床料平均温度(714-727 °C), 验证了其宽负荷运行能力; 但烟气中 N₂O 浓度随负荷降低显著升高(13%-17%负荷时达 41.0-52.1 ppm), 主要源于低温燃烧(<730 °C)及尿素 SNCR 工艺的副反应。进一步研究发现, 分离器出口至下级空预器上方, NO 向 N₂O 的转化加剧, 导致末端 N₂O 排放超标, 据此提出了多项设计或运行优化建议。本研究为生物质 CFB 锅炉的低负荷环保运行提供了理论依据与工程解决方案, 对实现“双碳”目标下的能源调峰与减排具有重要参考价值。

关键词: 蘑菇菌液, 循环流化床, 低负荷, 污染物排放, 现场试验

中图分类号: TQ534

文献标志码:

文章编号:

0 前言

随着全球能源需求的持续增长和环境问题的日益严峻, 可再生能源的开发利用成为解决能源危机和减少碳排放的重要途径^[1-2]。生物质作为一种清洁、可再生的能源, 因其来源广泛、碳中性、具有与传统化石能源相同的可调度性等优势, 在以新能源为主体的新型能源系统中占有独特重要的地位^[3-6]。中国生物质资源以农林废弃物和工业固废为主, 兼具资源与污染源的双重属性。其分布广泛、产量巨大, 但长期面临利用率低、处理方式粗放等问题, 易导致环境污染与资源浪费^[7-8]。如何实现生物质废弃物的规模化、无害化与资源化利用, 已成为当前环境与能源领域的重要挑战。

蘑菇菌液作为一种典型的生物质衍生废弃物, 其高效处理与资源化利用对推动循环经济发展具有重要意义。作为食用菌生产过程中的主要副产物,

蘑菇菌液富含有机质及营养元素, 但若处置不当易引发二次污染。目前, 蘑菇菌液的主流处理方式包括直接堆肥、填埋或排放, 但这些方法存在效率低、资源浪费及潜在环境风险等缺陷。探索蘑菇菌液的高值化利用途径, 是突破现有技术瓶颈、实现固废可持续管理的有效方向。

循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)燃烧发电技术因其燃料适应性强、污染控制成本低、燃烧过程温度低等优势, 成为生物质燃烧利用的主流技术之一^[9-12]。同时, 燃烧过程中大量高温床料的存在, 能够及时提供着火热并维持床温均匀, 稳燃能力强, 低负荷运行性能突出, 通过燃烧优化或采用烟气再循环等措施, 能够实现 20%~30%低负荷稳定运行^[13-14]。其独有的压火操作让 CFB 锅炉拥有全负荷调峰能力, 这也使得生物质 CFB 燃烧发电在未来能源结构中能够承担一定的调峰作用, 是对构建以新能源为主体的新型电力系统的巨大支撑^[15-17]。

收稿日期:

基金项目: 低碳智能燃煤发电与超净排放全国重点实验室开放课题项目(D2024FK161)

作者简介: 温彬(2001—), 男, 博士生, 研究方向: 生物质流化床燃烧, 电话(Tel.): 18280834146; E-mail: wenb24@mails.tsinghua.edu.cn;

通讯作者: 郑伟雄(1994—), 男, 工学博士, 助理研究员, 研究方向: 非牛顿流体多相流及燃烧, 电话(Tel.): 13522113337; E-mail: zwx3337@163.com

生物质 CFB 锅炉在燃烧污泥、牛粪等非常规生物质时，常面临燃烧效率低、污染物排放高及灰分结渣等问题。此外，在实际运行中低负荷工况下仍然可能会面临空气分布不均匀、烟灰沉积和高 NO_x 排放等问题^[18]。目前，针对蘑菇菌液等特定生物质废弃物的燃烧特性研究仍较为缺乏，其水分含量高、热值波动大及灰分组成特殊的性质可能对 CFB 锅炉的稳定运行和污染物控制提出新的挑战。深入探究蘑菇菌液的燃烧行为及优化其锅炉适配性，对拓展生物质能源化利用途径、提升固废处理效率具有重要意义。

本文以某供热用户的纯烧蘑菇菌液 CFB 锅炉为对象开展研究，现场测试了其在低负荷下的运行

参数及污染物排放情况，并针对宽负荷条件下的污染物排放控制提出相应措施。

1 锅炉概况

1.1 锅炉总体简介

本研究对象为一台额定蒸发量为 60 t/h 的纯烧蘑菇菌液 CFB 锅炉，主要用于区域供热。该锅炉按燃生物质循环流化床锅炉设计，循环物料分离采用高温绝热旋风分离器。锅炉采用平衡通风。

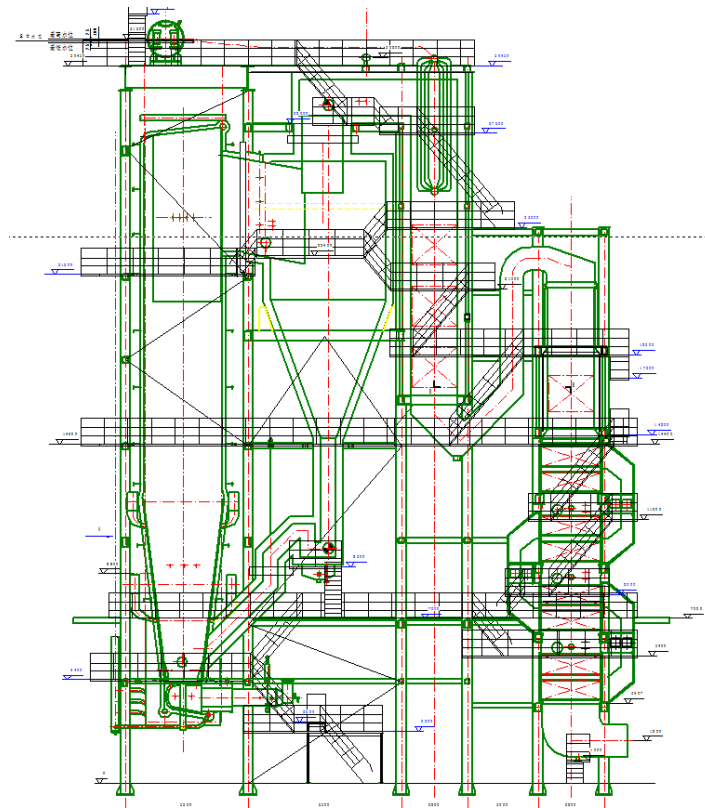


图 1 锅炉结构设计图

锅炉主要由锅筒、悬吊式全膜式水冷壁炉膛、绝热式旋风分离器、返料回路以及竖井对流受热面组成，其基本尺寸如表 1 所示。炉膛采用悬吊结构；锅筒、旋风分离器搁置在钢架横梁上；省煤器管系通过管夹支撑在承重梁上，承重梁搁置尾部护架上；

卧管式空气预热器支撑在钢架横梁上。锅炉炉膛整体向下膨胀，锅炉在炉膛水冷壁出口烟道与旋风分离器入口之间以及返料料腿中布置有柔性的非金属膨胀节。

表 1 锅炉基本尺寸

项目	单位	数值
锅筒中心标高	mm	31600
炉膛截面尺寸	mm	3330×6030
锅炉燃烧操作层标高	mm	7000
锅炉前、后柱中心深度	mm	20300
锅炉左、右柱中心深度	mm	7300

炉膛与对流竖井之间，布置有一台绝热旋风分离器，外壳由钢板制造，分离器上部为圆筒形，下部为锥形，采用碳钢钢板制成。在烟气侧敷设耐磨耐火层，钢板和耐磨耐火层中间敷设保温材料，耐磨耐火材料及保温材料采用抓钉、托板固定。在旋风分离器的圆柱体和锥体结合处设置支撑装置，搁置在钢架横梁上。

旋风分离器下部布置一个返料装置，返料装置

外壳由钢板制成，内衬绝热保温材料和耐磨耐火材料。耐磨耐火材料和保温材料采用抓钉固定。返料为自平衡式，返料装置底部布置返料风装置，使物料流化返回炉膛，返料风由罗茨风机供给。在尾部竖井内按烟气流向依次布置高温省煤器、低温省煤器和空气预热器。

锅炉设计主要参数如表 2 所示，蘑菇菌液参数如表 3 所示。

表 2 锅炉设计主要参数

项目	单位	数值
额定蒸汽流量	t·h ⁻¹	60
额定蒸汽出口压力（表压）	MPa	1.6
额定蒸汽出口温度	°C	204
锅炉给水温度	°C	104
低位发热量	MJ/kg	7.7
燃料消耗量	kg/h	21445
排烟处过量空气系数	-	1.325
锅炉排烟温度	°C	≤150
锅炉设计热效率	%	90

表 3 蘑菇菌液参数

项目	单位	蘑菇菌液
收到基碳 C _{ar}	%	20.69
收到基氢 H _{ar}	%	2.54
收到基氧 O _{ar}	%	-
收到基氮 N _{ar}	%	0.83
收到基全硫 S _{ar}	%	0.12
收到基灰分 A _{ar}	%	5.07
收到基水分 M _{ar}	%	54.2
挥发分 V _d	%	72.21
收到基低位发热值 Q _{net,ar}	kJ/kg	6500

1.2 试验流程

本次现场试验针对锅炉在不同负荷工况下的烟气成分特性展开研究，重点考察了低负荷运行时的燃烧特性。试验采用德国 MRU 公司生产的 MGA6 plus 红外烟气分析仪，该仪器配备高温采样探头和冷却系统，可精确测量 O₂、CO、NO、SO₂、N₂O 等组分，O₂ 测量精度达 0.1%，其余组分测量精度达 ±1%FS。测试选取了两个关键位置：锅炉分离器出口（约 750°C）和下级空预器与中级空预器之间（约 150°C），分别代表高温燃烧区和换热

后的烟气特性。测试过程中，依次对两个测点进行移动式测量，每个测点连续测试 10 分钟并取平均值，受仪器移动和工况调整影响，完成全部测试约需 60 分钟，期间锅炉负荷存在一定范围内的正常波动，测试覆盖了 13%-40%低负荷工况。

该锅炉服务于食用菌生产企业，其负荷调节需求主要源于生产工艺的特殊性。蘑菇生长过程的不同阶段对蒸汽参数有着差异化需求，导致日内蒸汽用量在 13-40%范围内频繁变化，且对蒸汽稳定性要求严格。这种由生产工艺驱动的负荷调节需求，要求锅炉必须具备良好的宽负荷性能。试验共获取 4 组有效数据，完整记录了锅炉多种低负荷运行时

的烟气特性变化。

2 结果与讨论

2.1 锅炉总体运行情况

利用锅炉在线检测系统测定了不同负荷下锅炉的运行参数，包括蒸汽参数、床料平均温度、污染物排放情况等，其结果如表 4 所示

表 4 不同负荷下锅炉运行参数

项目	负荷			
	35%-40%	26%-35%	18%-23%	13%-17%
蒸汽流量 (t·h ⁻¹)	22.5(37.5)	16.1(26.83)	13.5(22.5)	9.2(15.33)
过热蒸汽压力(MPa)	1.03	1.00	1.01	1.05
过热蒸汽温度(°C)	180.5	179.6	180.0	181.3
锅炉床料平均温度(°C)	727.42	721.70	714.07	719.57
SO ₂ 折算值(mg/Nm ³)	0.1754	0.4636	0.2514	0.4206
NO 折算值(mg/Nm ³)	30.6875	65.7261	53.1744	22.5699

现场试验结果表明，低负荷运行的前提下，逐步降低负荷过程中，该锅炉能够保证过热蒸汽参数（压力、温度）较为恒定，可以在低负荷下保证较高的锅炉效率。逐步降低负荷过程中，锅炉床料的平均温度没有出现大幅度降低，有利于炉膛中燃料燃尽。

此外，逐步降低负荷过程中，烟气排放的污染物（SO₂、NO）有一定程度的增加，存在超过污染物排放标准的风险。这说明在变负荷过程中，需要根据排放情况调整对应的污染物控制措施，以满足

污染物排放要求。

2.2 烟气成分分析

现场利用红外烟气分析仪（MGA6 plus）测定了不同负荷下分离器出口和下级空预器上方的烟气组成成分。

针对烟气中的 O₂、CO，不同负荷下分离器出口和下级空预器上方的含量变化情况如图 2 所示。

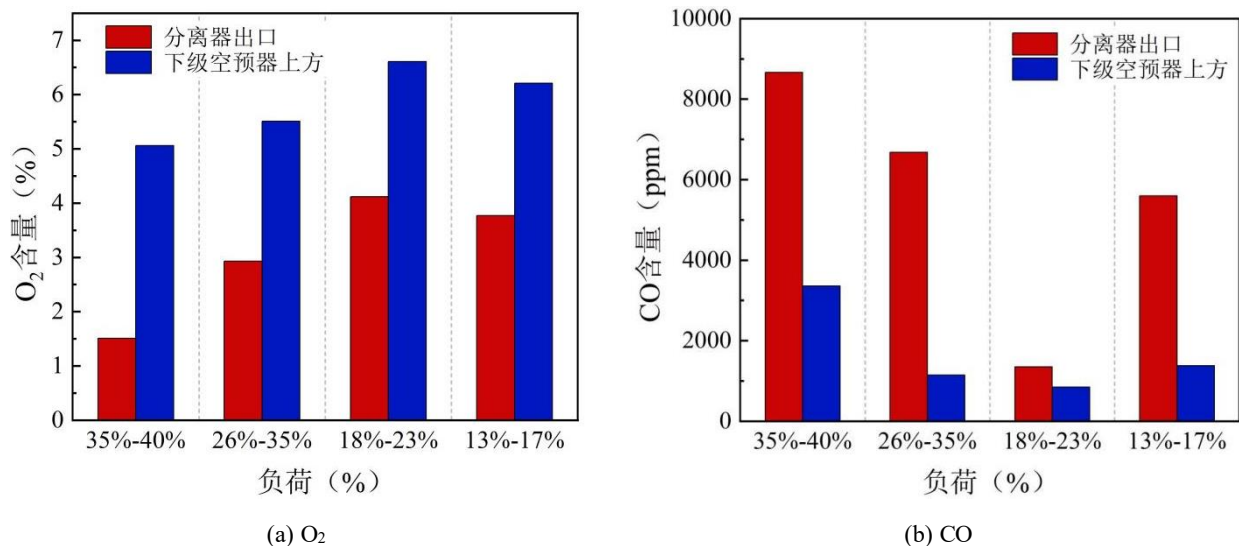


图 2 不同负荷下分离器出口和下级空预器上方 O₂、CO 的含量变化

由图 2 可知，降低负荷时，分离器出口和下级空预器上方的 O₂ 含量先增加后略微下降，说明在降低负荷过程中，投入锅炉中的燃料量减少，使得通入炉内空气中的 O₂ 消耗程度减少。O₂ 与 CO 含量存在明显的负相关性，这是因为 CO 在 O₂ 含量

较高的条件下会反应生成 CO₂。整体来看，降负荷过程中，燃料的燃尽程度较好。

考察烟气中的 SO₂ 的排放，如图 3 所示。可以发现，在较高负荷或较高温度区域才能检测到 SO₂ 存在。一方面是因为生物质固有特性，其硫元素含

量较低，碱金属元素含量较高，可以和含硫物质形成硫酸盐，减少了烟气中 SO_2 的含量^[19-20]。另一方面，该锅炉在较低负荷运行过程中床料平均温度较

低（均低于 $730\text{ }^\circ\text{C}$ ），降低了硫元素的释放效率，使得烟气中 SO_2 的含量较低。

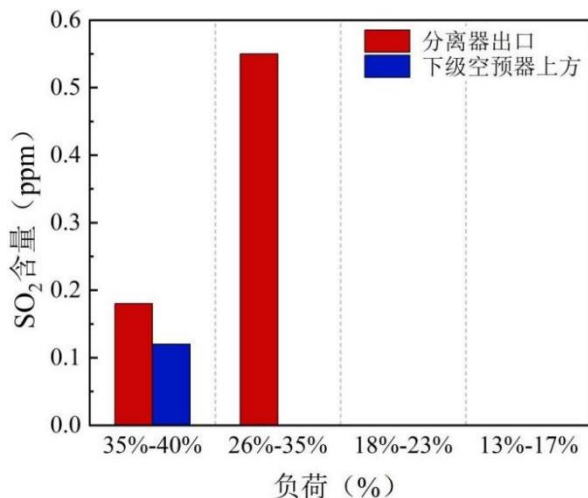


图3 不同负荷下分离器出口和下级空预器上方 SO_2 的含量变化

考察烟气中 NO_x 的排放，可以发现，烟气中氮元素均以较低价态 (+1、+2) 的形式存在，未检测到 NO_2 。这可能是因为低于 40% 负荷的条件下，锅炉系统中的氧含量较低，未形成氧化氛围，且炉膛

温度较低，不利于 NO_2 的生成。不同负荷下不同负荷下分离器出口和下级空预器上方的 NO 、 N_2O 含量变化情况如图 4 所示。

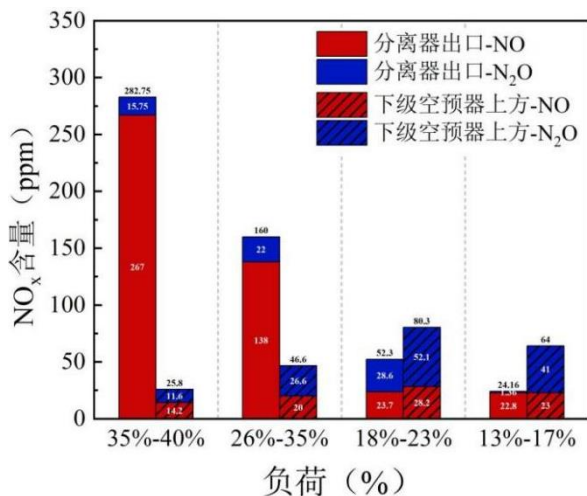


图4 不同负荷下分离器出口和下级空预器上方 NO 、 N_2O 的含量变化

由图 4 可知，降负荷过程中，对于分离器出口， NO 含量有明显的降低而 N_2O 含量有明显的增加，说明降低负荷过程中，在分离器及之前区域可能出现了 NO 向 N_2O 转化。进一步降低负荷时， NO_x 含量降低，可能是因为低负荷通入炉内的燃料和空气量减少，炉内温度降低，不利于 NO_x 生成。对于下

级空预器上方，相较于分离器出口， NO 的含量有了明显降低，但 N_2O 的含量反而增加。该锅炉采用的是喷尿素进行 NO_x 控制，这说明降负荷过程中，尿素可以有效地降低 NO 含量，但尿素可能会与 NO 生成 N_2O ，使得 N_2O 含量增加。整体来看， NO_x 的含量仍然超出了污染物排放标准。

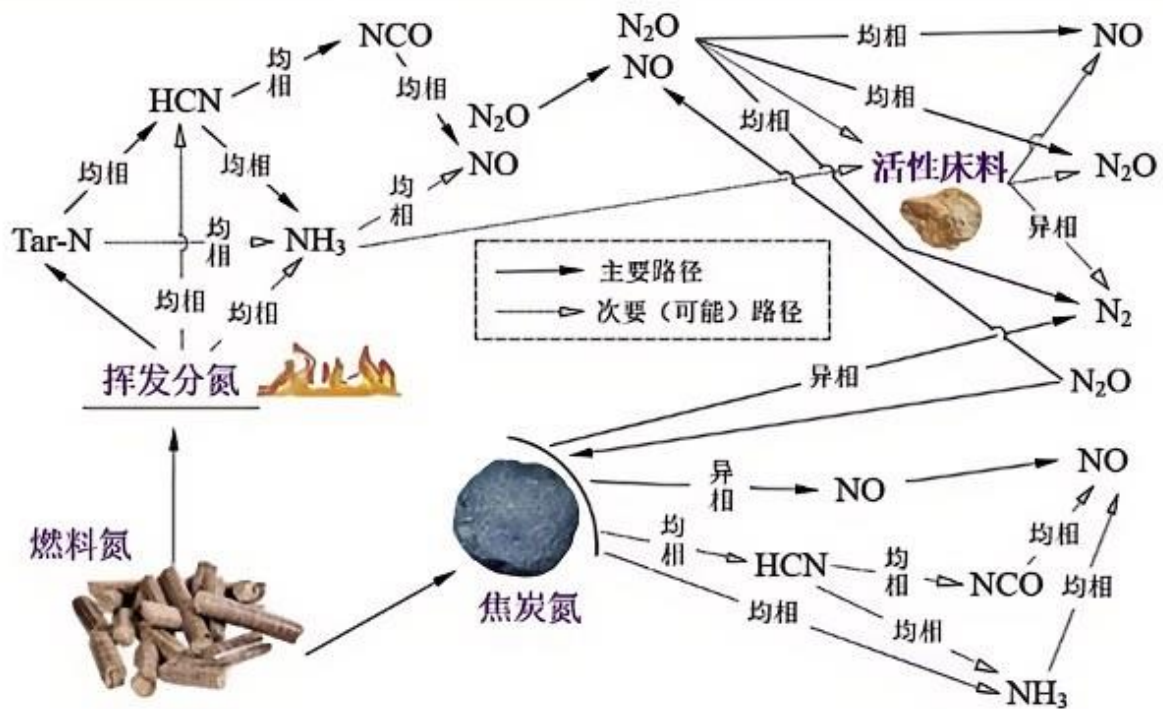


图5 生物质燃烧 NO_x 生成的主要路径^[21]

针对 NO_x 排放物中 N₂O 含量偏高的问题，基于生物质燃烧 NO_x 生成的主要路径，可采取多层次控制策略：燃烧优化作为最具成本效益的污染控制手段，配合脱硝工艺改进与末端治理技术升级，可形成协同减排效应。基于文献^[22-24]的研究成果，建议在锅炉设计及降负荷工况下实施以下控制措施：

1. 燃烧优化控制：通过调整一、二次风比例，增加密相区燃烧份额等方法，提高燃烧温度，选择合适的床层温度，减少 N₂O 生成同时避免结渣、沾污、腐蚀问题出现。添加活性添加剂，通过气固反应影响气体燃烧和氮氧化物转化行为，减少 NO_x 的排放，从而优化过量空气系数在 1.1-1.2 区间内，避免过氧燃烧。采用空气分级燃烧等技术，优化锅炉结构、优化再循环烟气喷入位置，均可达到降低 NO_x 排放的目的。

2. 燃料预处理：对高氮生物质燃料（如小麦秸秆，含氮量约为 0.61%）进行预干燥或混合低氮燃料（如松木屑，含氮量约为 0.21%）、塑料废物等，降低入炉燃料的氮含量，可有效降低 N₂O 排放。

3. 改进脱硝工艺：改用氨水替代尿素，氨水的分解温度较低，在低负荷工况下仍能保持较高脱硝效率。同时需要严格控制脱硝反应温度窗口（950-1050℃），避免较低温或较高温喷氨，以最大程度减少 N₂O 的生成。

4. 末端治理技术：在烟道末端加装 Fe/ZSM-5、

铑（Rh）或铂（Pt）基催化剂，使 N₂O 在 500-600℃ 分解为 N₂ 和 O₂；针对小型锅炉，可以采用分子筛或活性炭吸附。

5. 烟气再循环：将部分低温烟气（约 150℃）引回一次风系统。这不仅可以降低 NO_x 生成，还能提高床温稳定性。

6. 智能检测与调控：结合大数据和机器学习（如智慧锅炉等），并配套对应的 N₂O 检测技术，动态调整燃烧和脱硝参数，减少 N₂O 生成。

3 结论

本文以某电厂用于暖气供热的纯烧蘑菇菌液 CFB 锅炉为对象开展研究，实地测验了该锅炉在低负荷条件下的运行情况 and 污染物排放特性，得到的主要结论如下：

1. 负荷低于 40% 条件下，该锅炉能够保证较为稳定的过热蒸汽参数和床料平均温度，说明在变负荷条件下，该锅炉能够保证较高的锅炉运行效率和燃料燃尽率，验证了生物质流化床锅炉在未来能源结构中用于调峰的可行性。

2. 负荷低于 40% 条件下，由于生物质的固有特性及特殊的运行工况，该锅炉的 SO₂ 排放量极低，不需要额外安装脱硫装置，降低了投入成本。

3. 负荷低于 40% 条件下，由于特殊的运行工况，烟气中的氮元素均以较低价态（+1、+2）的形式存

在, 未检测到 NO_2 。降低负荷的过程中, NO_x 存在超标的风险。因此, 在变负荷的过程中, 需要进行对应的操作调整, 降低排放烟气中 NO_x 的含量, 以满足污染物排放标准。

参考文献:

- [1] Niu Y, Tan H, Hui S. Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2016, 52:1-61.
- [2] 韩佩兴, 尚曼霞, 朱俊平, 等. 粉煤循环流化床锅炉燃煤的成灰和磨耗特性实验研究[J/OL]. *煤炭转化*, 1-13 [2025-05-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/114.1163.TQ.20250126.1616.002.html>.
- [3] 柯希玮, 吕俊复, 郭学茂, 等. 高参数生物质循环流化床锅炉技术研发与应用[J]. *热力发电*, 2022, 51(06):1-8.
- [4] 吕俊复, 周托, 张扬, 等. 碳中和目标下循环流化床锅炉技术的展望[J]. *动力工程学报*, 2022, 42(11):1005-1012.
- [5] 胡南, 谭雪梅, 刘世杰, 等. 循环流化床生物质直燃发电技术研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(03):32-40.
- [6] 徐嘉俊. 生物质循环流化床锅炉中温过热器的沉积和腐蚀分析[J]. *锅炉技术*, 2022, 53(05):31-38+63.
- [7] 刘宁, 魏博, 王珊, 等. 棉秆掺烧对燃煤锅炉燃烧特性影响的数值模拟研究[J]. *锅炉技术*, 2024, 55(02):1-6.
- [8] 茅建波, 张晓龙, 李剑, 等. 生物质直燃炉排炉运行问题分析与燃烧调整[J]. *锅炉技术*, 2022, 53(02):35-39+45.
- [9] 岳光溪, 张扬, 张建春, 等. 面向双碳目标的多元燃料循环流化床燃烧技术展望[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(17):6844-6855.
- [10] 肖红亮, 吕俊复, 张扬, 等. 基于循环流化床燃烧的多元废弃物处理技术研究进展[J]. *锅炉技术*, 2024, 55(06):1-11.
- [11] Yue G, Cai R, Lu J, et al. From a CFB reactor to a CFB boiler – The review of R&D progress of CFB coal combustion technology in China[J]. *Powder Technology*, 2016, 316:18-28.
- [12] 范浩东, 单雄飞, 张缦, 等. 生物质流化床结渣、沾污特性及抑制方法研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(S1):1-6.
- [13] 张思海, 张双铭, 张俊杰, 等. 330 MW 亚临界 CFB 锅炉烟气再循环深度调峰运行性能研究[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(01):291-298.
- [14] 聂鑫, 谢海燕, 杨冬, 等. 循环流化床机组锅炉深度调峰负荷水循环安全性分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(07):2766-2776.
- [15] 吕俊复, 杨海瑞, 郭庆杰, 等. 水冷方形分离循环流化床锅炉的启动与压火[J]. *电站系统工程*, 2000, (06):323-325+329.
- [16] 吕俊复, 蒋苓, 柯希玮, 等. 碳中和背景下循环流化床燃烧技术在中国的发展前景[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(01):514-522.
- [17] 乔磊磊, 王孝全, 聂浩, 等. 循环流化床锅炉全负荷调峰特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(01):184-194.
- [18] K. Ji, J. X. Guo, X. J. Bi, Z. C. Yu, C. G. Si, S. J. Hou, X. L. Zhou, X. Dong. Effects of low-load operation on biomass boiler performance: combustion stability, pollutant emission, and boiler efficiency [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022.
- [19] 宋欣, 杜宪涛, 关靖宇, 等. 1000MW 超超临界燃煤机组掺烧生物质技术研究[J]. *锅炉制造*, 2025, (02):8-10+13.
- [20] 王光磊, 孙立刚, 赵传进, 等. 燃煤机组直燃耦合与气化耦合发电研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2025, 31(01):17-41.
- [21] 马宇宸, 张一珍, 汤薛玉, 等. 活性添加剂对生物质循环流化床燃烧特性影响研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(19):7693-7706.
- [22] Jafarsalehi M, Mashayekh M, Miranzadeh B M, et al. Primary measures for cleaner biomass combustion to reduce NOx: A narrative review on solid biomass fuels, NOx sources, small-scale boilers, auxiliary equipment, fuel management and fuel quality improvement[J]. *Fuel*, 2025, 396:134891-134891.
- [23] Christelle R, Audrey V, Sary A, et al. Gaseous and particulate matter emissions from the combustion of biomass-based insulation materials at end-of-life in a small-scale biomass heating boiler[J]. *Fuel*, 2023, 338.
- [24] 郭勇, 刘善民, 朱丽华, 等. 生物质燃料锅炉低氮燃烧技术研究进展[J]. *节能*, 2023, 42(05): 90-92.

Investigation on Low-load Operation Characteristics of a Circulating Fluidized Bed Boiler Co-firing Mushroom Residue

WEN Bin^{1,2}, JI Chengjing², HAN Peixing², TANG Xueyu^{1,2}, WANG Xiaowei³, ZHUANG Ke⁴, KE Xiwei²,
ZHENG Weixiong^{1,*}

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Shanxi Research Institute of Huairou Laboratory, Taiyuan 030032, Shanxi Province, China; 3. Taiyuan Boiler Group Co., Ltd., Taiyuan 030000, Shanxi Province, China; 4. National Key Laboratory of Low Carbon Intelligent Coal fired Power Generation and Ultra clean Emissions, China Energy Technology Research Institute Co., Ltd, Nanjing 210023, Jiangsu Province, China)

Abstract : China's biomass resources, primarily comprising various agricultural and forestry residues as well as industrial solid waste, possess dual attributes as both energy sources and pollutants, posing significant challenges for their clean and efficient utilization. Circulating fluidized bed (CFB) boilers offer advantages such as strong fuel adaptability, flexible load regulation, and cost-effective pollutant control. However, there is limited research on their application in burning unconventional biomass like mushroom residue, and their wide-load operation and pollutant emission characteristics remain poorly understood. This study focuses on a CFB boiler co-firing mushroom residue at a heating plant, analyzing operational parameters and pollutant emissions under 13%-40% load through field tests. The results demonstrate that the boiler maintains stable steam parameters (pressure: 1.00-1.05 MPa, temperature: 179.6-181.3 °C) and average bed temperature (714-727 °C) even at low loads, confirming its wide-load operational capability. However, N₂O emissions increase significantly at reduced loads (reaching 41.0-52.1 ppm at 13%-17% load), primarily due to low-temperature combustion (<730 °C) and side reactions from urea-based SNCR. Further analysis reveals that NO-to-N₂O conversion intensifies in the temperature range from the cyclone outlet to above the lower air preheater, leading to excessive N₂O emissions. Accordingly, several design and operational optimization measures are proposed. This study provides theoretical and practical insights into the low-load, eco-friendly operation of biomass CFB boilers, offering valuable guidance for energy peak-shaving and emission reduction under the "dual-carbon" goals.

Key words: Mushroom residue; Circulating fluidized bed (CFB); Low-load operation; Pollutant emissions; Field tes