DOI: 10.19666/j.rlfd.202504050

芦竹混煤掺烧对火电机组运行的影响分析及参数优化

史哲浩[1]，徐 辉[1]，王 凯[1]，柳 明[2]，唐 权[3]，冷尔唯[3]
（1. 上海上电漕泾发电有限公司，上海 201507；
2. 上海发电设备成套设计研究院有限责任公司，上海 200240；
3. 湖南大学机械与运载工程学院，湖南 长沙 410082）

［摘 要］【目的】传统生物质因季节性强、区域性分散等问题不被火电厂所采用。目前，一种新型芦竹不仅产量大而且极易生存，可种植于滩涂与沿海湿地等边际土地，能有效解决上述问题。【方法】基于 2×1 000 MW 超超临界机组直流锅炉，开展新型芦竹掺烧试验，分析其对火电机组热力系统、制粉系统、燃烧特性等方面的影响。【结果】结果表明：添加质量分数 15%芦竹颗粒后，火电厂机组运行基本稳定；但石子煤排出增加，磨煤机电流提升约 5%~10%，磨煤机进出口差压最高提升 10%~15%，炉膛内燃烧强度有所下降；芦竹可磨指数低是制约机组运行的关键因素，提升芦竹可磨指数最佳烘焙区间为 250~300 ℃。

［关 键 词］芦竹；直接掺烧；制粉系统；哈式可磨指数；烘焙

［引用本文格式］史哲浩，徐辉，王凯，等. 芦竹混煤掺烧对火电机组运行的影响分析及参数优化[J]. 热力发电，2026，55(3)：82-91. SHI Zhehao, XU Hui, WANG Kai, et al. Impact analysis and optimization of novel Arundo donax L.-coal co-firing on the operation of coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(3): 82-91.

Impact analysis and optimization of novel Arundo donax L.-coal co-firing on the operation of coal-fired power units

SHI Zhehao[1], XU Hui[1], WANG Kai[1], LIU Ming[2], TANG Quan[3], LENG Erwei[3]
(1. Shanghai Shangdian Caojing Power Generation Co., Ltd, Shanghai 201507, China;
2. Shanghai Power Generation Equipment Complete Design and Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200240, China;
3. College of Mechanical and Transportation Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Traditional biomass resources are rarely adopted by coal-fired power plants due to their seasonal availability and regional dispersion. A novel Arundo donax L. variety, characterized by high yield and robust adaptability to marginal lands such as tidal flats and coastal wetlands, offers a viable solution to these challenges. In this study, based on a 2×1 000 MW ultra-supercritical pressure once-through boiler, co-firing experiments of this novel Arundo donax L. were carried out, and its effects on thermal system, powder making system, and combustion characteristics of thermal power units were analyzed. The results show that the thermal power plant unit operation is stable after adding 15% Arundo donax L. particles. However, the stone coal discharge increases, the coal mill current is elevated by about 5%~10%, the maximum elevation of the coal mill inlet and outlet differential pressure is elevated by 10%~15%, the combustion intensity in the furnace decreases slightly. The low grindability index of Arundo donax L. is the key factor affecting the operation of the unit, and the study concludes that the torrefaction interval of about 250~300 ℃ is the best interval to improve the grindability index of Arundo donax L.
Key words: Arundo donax L.; direct co-firing; milling systems; Hardgrove grindability index; torrefaction

收 稿 日 期：2025-04-14 修 回 日 期：2025-04-23 接 受 日 期：2025-04-25
基 金 项 目：国家自然科学基金项目（52476194）
Supported by: National Natural Science Foundation of China(52476194)
第一作者简介：史哲浩（1988），男，工程师，主要研究方向为火电厂运行，Shizh@sdcjpg.com。
通信作者简介：冷尔唯（1992），男，博士，副教授，主要研究方向为生物质能利用技术，lengerwei@hnu.edu.cn。

在“双碳”战略目标驱动下，我国煤电行业作为能源系统的关键减排领域，正面临深度减排与能源结构转型的双重挑战[1-3]。为此，《煤电低碳化改造建设行动方案（2024—2027 年）》明确将生物质能发电纳入战略路径，提出“统筹推进存量煤电机组低碳化改造，加快构建清洁低碳安全高效的新型能源体系”的转型方针。该能源形式凭借其碳中和特性与高能量密度优势，已成为现阶段替代化石燃料最具潜力的可再生能源[4-6]。目前，生物质发电的方式主要有直接燃烧发电[7-9]、掺混燃烧发电[10-13]和气化燃烧发电[14-16]。与生物质直接燃烧发电和生物质气化燃烧发电相比，大型燃煤机组耦合生物质直燃发电技术在发电规模、燃烧效率和运行稳定性等方面均具有明显优势[17-19]。因此，利用燃煤电厂清洁高效的燃煤技术以及成熟稳定的掺烧技术，依托现役高效发电系统和先进的污染物集中治理设施，对燃煤机组耦合生物质燃烧发电技术研究的开展具有重要意义。

我国生物质资源丰富，年可利用生物质总量为 9.56×10^8 t 标准煤，考虑边际土地种植能源作物，年可利用生物质总量将超过 2.0×10^9 t 标准煤，接近我国电力行业 2020 年煤炭消耗总量[18,20-21]。然而，传统生物质因季节性强、区域性分散、收集成本高且易与粮食安全冲突等问题，难以在燃煤电厂规模化应用[22-24]。本文提出以新型芦竹作为混煤掺烧原料，其根系发达、耐盐碱贫瘠，可在年降水量 500 mm 以上的边际土地种植，鲜重亩产高达 2.0 t（含水率 60%，干基热值 17~19 MJ），能有效克服传统生物质受季节限制、资源分散、采集难度大及与农争地的问题，可兼具供应连续性与成本可控性。

本研究通过分析芦竹混煤掺烧对火电机组运行安全的影响，同步优化芦竹研磨工艺参数，增强生物质燃料与燃煤机组的适配性，实现边际土地规模化种植与低碳燃料加工技术的协同创新。不仅突破了生物质燃料规模化应用的资源瓶颈，更构建了“低碳种植-高效转化-系统减排”的清洁能源闭环路径，为煤电行业碳减排提供了兼具生态效益与工程可行性的解决方案。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

试验所用原料为芦竹与大混煤，其中芦竹来自于天津某种植基地，大混煤来自于上海上电漕泾发电有限公司。原料的工业分析和元素分析结果如表 1 所示，芦竹组分分析结果如表 2 所示。其中大混煤和芦竹的工业分析分别按照《GB/T 212—2008 煤的工业分析方法》和《GB/T 28731—2012 固体生物质燃料工业分析方法》进行，二者的元素分析皆采用元素分析仪（germany elementar unicube）测试获得，芦竹组分分析通过美国国家可再生能源实验室 NREL 法测得[25]。

表 1 原料工业元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analysis of raw materials

样品	w_{ad}(M)/%	w_{ad}(V)/%	w_{ad}(F)/%	w_{ad}(A)/%
大混煤	2.18	26.43	40.25	31.14
芦竹	6.49	72.85	17.46	3.20

样品	w_{ad}(C)/%	w_{ad}(H)/%	w_{ad}(O)[①]/%	w_{ad}(N)/%	w_{ad}(S)/%	高位热值 Q_{HHV}/(MJ·kg^{-1})
大混煤	56.23	2.90	39.58	1.18	0.11	20.81
芦竹	44.99	5.19	38.68	1.42	0.03	18.23

注：[①]数据为差减法计算所得。

表 2 芦竹组分分析　　单位：w_{ad}/%

Tab.2 Component analysis of Arundo donax L

项目	纤维素	半纤维素	木质素	其他
芦竹	47.27	24.98	13.27	14.48

1.2 试验方法

1.2.1 现场掺烧试验

掺烧试验在上海上电漕泾电厂 2×1 000 MW 超超临界机组直流锅炉上开展。大混煤与芦竹的掺混通过污泥上料皮带实现精准配比控制，具体试验工况如表 3 所示。试验期间设定磨煤机出力为 65 t/h，给煤机控制方式切手动控制，磨煤机进口混合风温度应控制小于 200 ℃，磨煤机的入口风量控制在 120 t/h 以上，磨煤机出口温度尽可能控制在 60 ℃左右，最大不超过 65 ℃，燃料风挡板偏置设为 10%。

1.2.2 参数优化试验

芦竹可磨性优化试验在回转式热解炉中进行样品制备（图 1），以 10 ℃/min 升温至目标温度

（200、250、300、350、400 ℃），维持 30 min 烘焙过程。全程采用 99.99%高纯氮气作为保护气体，流量控制为 1 L/min，每次处理样品 2 kg。烘焙产物经液氮急冷后，置于标准恒温恒湿箱（23±2 ℃，RH50±5%）平衡 48 h。参照 GB/T 2565—2014 测定哈式可磨指数，每组样品进行 3 次平行试验。

表 3 掺烧试验计划工况
Tab.3 Co-firing experiments are planned for the specified conditions

项目	芦竹掺烧比例/%	燃料消耗速率/(t·h^{-1})	机组负荷/MW	芦竹消耗量/t	试验时长/h
工况 1	0	65	700	0	2
工况 2	10			19.50	3
工况 3	15			29.25	3



a) 回转式热解炉



b) 芦竹原样　　c) 200 ℃烘焙样品



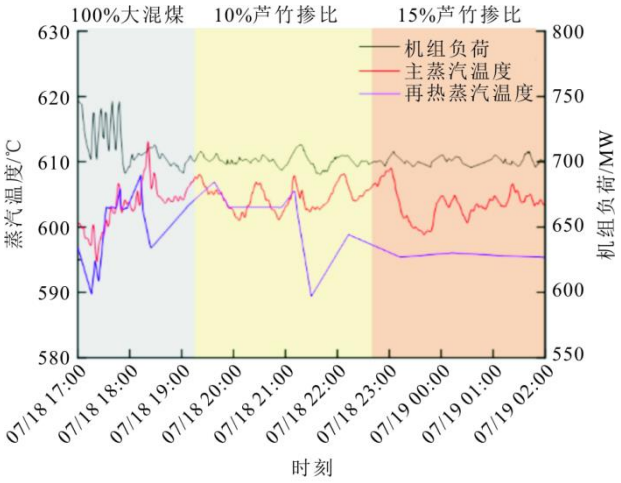
d) 300 ℃烘焙样品　　e) 400 ℃烘焙样品

图 1 烘焙试验设备及样品
Fig.1 Torrefaction experimental equipment and samples

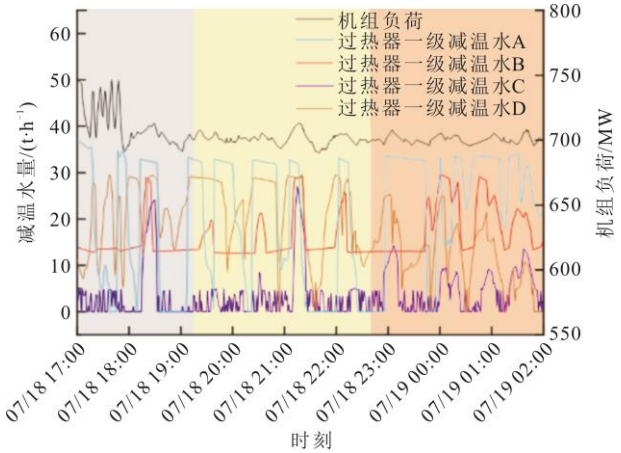
2 试验结果与讨论

2.1 芦竹混煤掺烧对锅炉热力系统的影响

芦竹生物质掺烧前后锅炉热力系统运行特性对比如图 2 所示。掺烧前后，主、再热汽温及减温水量正常。掺烧工况下主蒸汽温度稳定于 605 ℃左右，再热蒸汽温度维持在 595 ℃左右，与基准工况温度波动范围（主蒸汽 604~606 ℃，再热蒸汽 593~597 ℃）高度一致，温度控制系统最大偏差低于 0.5%。过热器减温水量掺烧前后基本无变化，一级过热器减温水量最高为 30 t/h 左右，在正常范围内。综合主蒸汽温度、再热蒸汽温度的全工况监测结果，芦竹生物质混煤掺烧期间，热力系统关键参数始终处于正常运行区间，掺烧工况下各热力参数的调控特性与 100%大混煤工况调控效果等效，未对热力系统运行特性产生实质性影响，验证了芦竹生物质燃料掺烧在热力系统适应性层面的可行性。



a) 主蒸汽温度、再热蒸汽温度与机组负荷变化



b) 过热器一级减温水量与机组负荷变化不同过热器减温水进口（A、B、C、D）管路流量

图 2 掺烧芦竹热力系统运行特性变化
Fig.2 Changes in operating characteristics of thermal system with Arundo donax L. co-firing

2.2 芦竹混煤掺烧对制粉系统的影响

2.2.1 芦竹掺混对石子煤排放的影响

试验期间，煤粉锅炉的石子煤排放系统运行状

况虽受芦竹掺烧影响但基本正常。图 3 为对比掺烧芦竹生物质颗粒前后石子煤的排放特征。未掺烧芦竹时，石子煤呈现典型煤矸石形态（图 3a)）；掺烧芦竹后，排放物有未完全燃烧的芦竹生物质颗粒残留（图 3b)）。进一步观察表明，掺烧工况下生物质颗粒在石子煤中的混杂比例较低，估算芦竹生物质的质量分数小于 5%，且生物质残留物主要呈现半焦化，这反映出生物质颗粒在炉内燃烧较为充分。



a) 100%大混煤

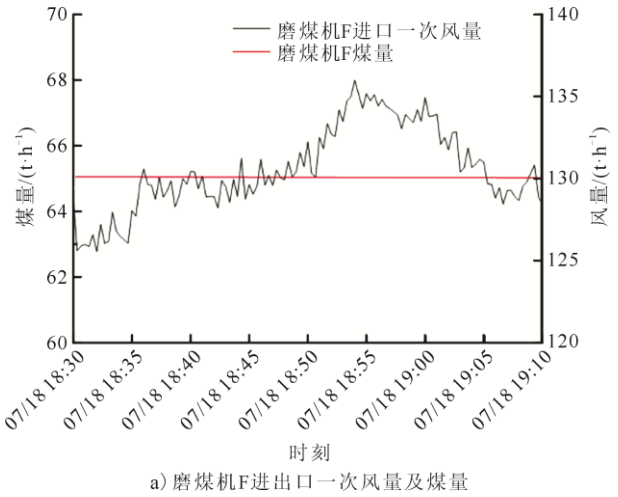


b) 掺混15%芦竹

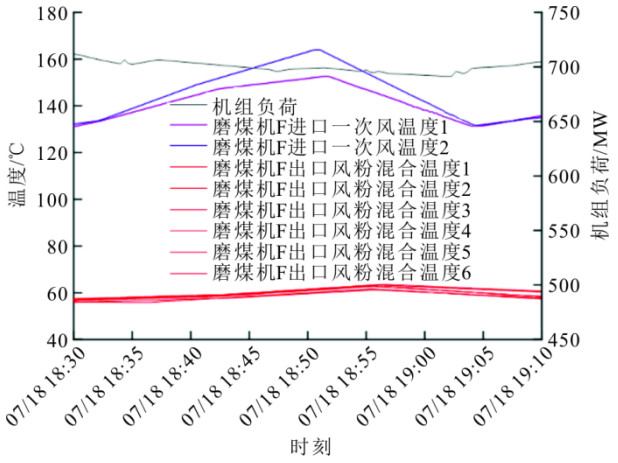
图 3 掺烧芦竹前后燃煤机组石子煤排放特性
Fig.3 Stone coal emission characteristics of coal-fired units before and after Arundo donax L. co-firing

2.2.2 芦竹掺混对磨煤机出力的影响

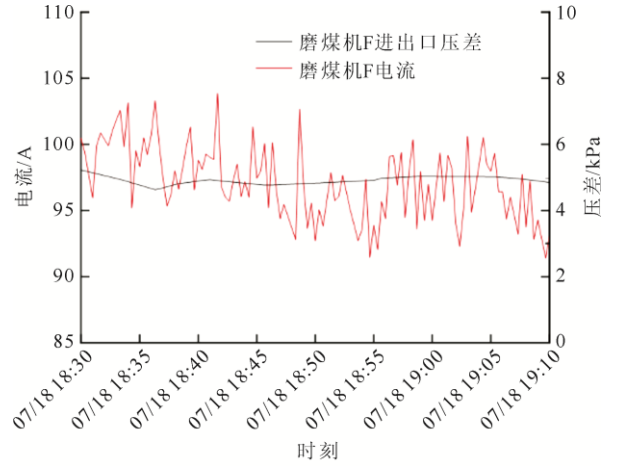
石子煤排放物的变化直观反映了磨煤机内部物料循环平衡。为量化这种变化对磨煤机的影响，选取 6 段稳定煤量时间段进行分析，结果如图 4—图 9 所示。由图 4 可见：该工况为 100%大混煤，磨煤机 F 煤量稳定在 65 t/h，磨煤机 F 进口一次风量保持在 130~135 t/h，风煤比在 2.0~2.1；入口一次风温维持在 140 ℃左右，出口风粉混合温度为 58~60 ℃，磨煤机 F 电流在 90~100 A 左右，磨煤机 F 进出口压差维持在 4.8~5.0 kPa。为保证掺烧芦竹颗粒后磨煤机 F 的安全性，进口一次风温度由日常运行控制的 300 ℃降至 140 ℃，工况 1 运行总体平稳，作为后续工况的对照组。



a) 磨煤机F进出口一次风量及煤量

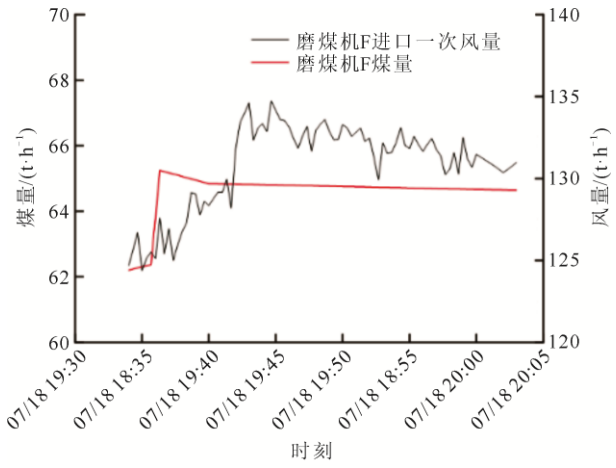


b) 磨煤机F进口一次风温及出口风粉温度

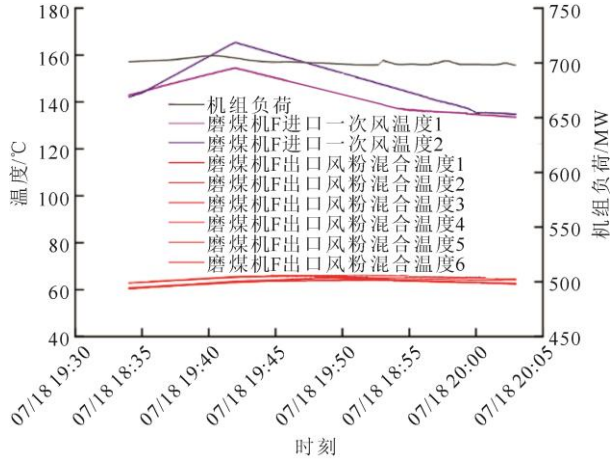


c) 磨煤机F进出口压差及电机电流

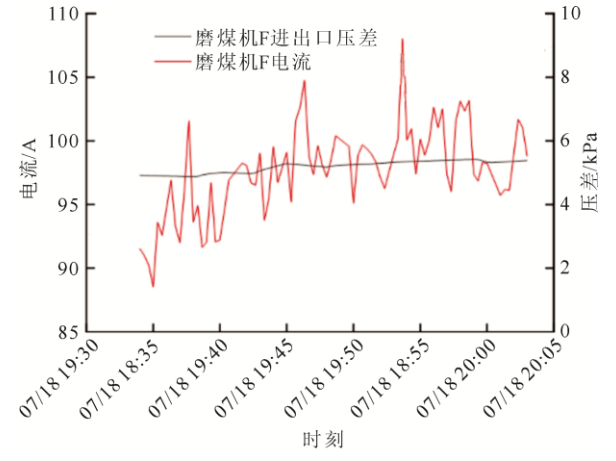
图 4 100%大混煤，磨煤量 65 t/h 工况下磨煤机 F 运行参数曲线
Fig.4 Operation parameter curves of coal grinder F under the condition of 100% large mixed coal and coal flow 65 t/h



a) 磨煤机F进出口一次风量及煤量



b) 磨煤机F进口一次风温及出口风粉温度

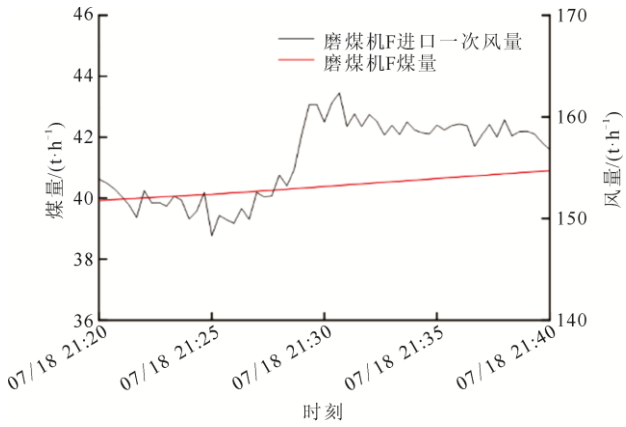


c) 磨煤机F进出口压差及电机电流

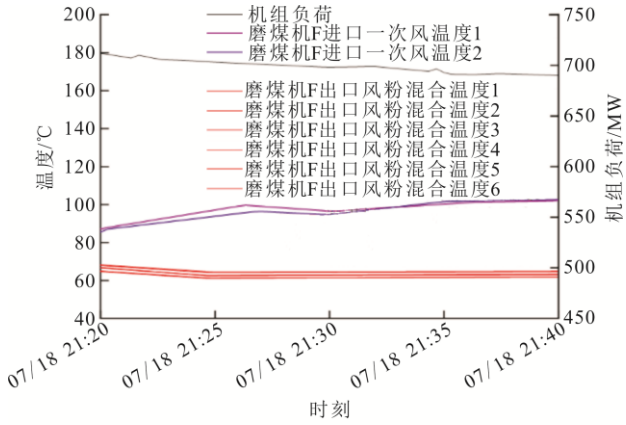
图 5 芦竹掺比 10%，煤量 65 t/h 工况磨煤机运行参数曲线
Fig.5 Operation parameter curves of coal grinder under the condition of 10% Arundo donax L. blending ratio and coal flow 65 t/h

由图 5 可见：该工况下磨煤机 F 磨煤量稳定在 65 t/h，磨煤机 F 入口一次风量保持在 130~135 t/h，磨煤机 F 风煤比在 2.0~2.1 左右，基本与图 5 工况时间段保持一致；入口一次风温维持在 140 ℃左右，出口风粉混合温度为 60 ℃，磨煤机 F 电流有所升高，由 95 A 升高至 100~105 A，磨煤机进出口压差升高至 5.5~5.8 kPa，最高可以达到 6.0 kPa。就地观察磨煤机 F 出现了石子煤增加较多的现象（中班总计 107 斗），分析认为磨煤机对生物质颗粒的碾磨效果较差，其破碎制粉能力较差，随着磨制时间的增加，在当前运行参数下，制粉后仍存在的木质条状纤维无法有效带走，导致磨煤机电流增大以及进出口压差升高的情况。

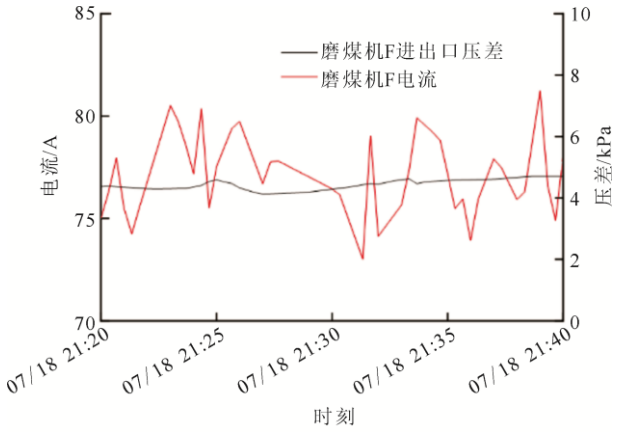
为解决图 5 时间段磨煤机 F 出现的石子煤异常排放问题，将煤量由 65 t/h 降至 40 t/h 并同步优化入口一次风量至 150~160 t/h，调整后磨煤机 F 运行参数曲线如图 6 所示。使风煤比由原设计值显著提升至 3.75~4.00，同时通过维持入口一次风温 100 ℃，确保出口风粉混合温度稳定在 60 ℃。调整后磨煤机电流稳定在 75~80 A，且进出口压差由 5.5 kPa 降至 4.7 kPa，系统阻力特性得到优化。尽管该工况下石子煤排放问题得到消除，但风煤比偏高导致磨煤机研磨效率下降且低煤量运行降低了制粉经济性。为此，在图 5、图 6 工况下实施了磨煤机本体通风等就地维护措施，待系统稳定后根据石子煤排放情况逐步恢复煤量至经济运行区间。



a) 磨煤机F进出口一次风量及煤量



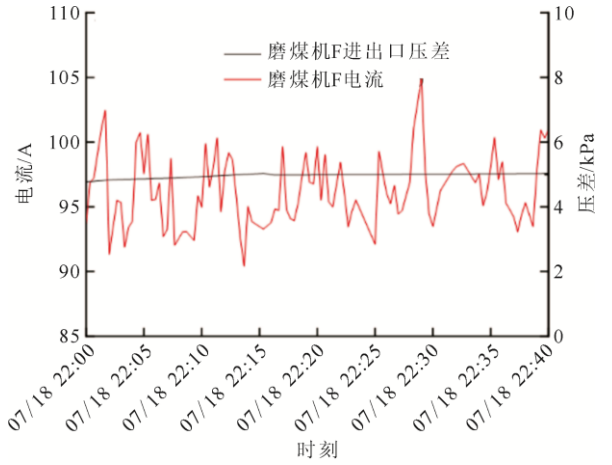
b) 磨煤机F进口一次风温及出口风粉温度



c) 磨煤机F进出口压差及电机电流

图 6 芦竹掺比 10%，煤量 40 t/h 工况磨煤机 F 运行参数曲线

Fig.6 Operation parameter curves of coal grinder F under the condition of 10% Arundo donax L. blending ratio and coal flow 40 t/h

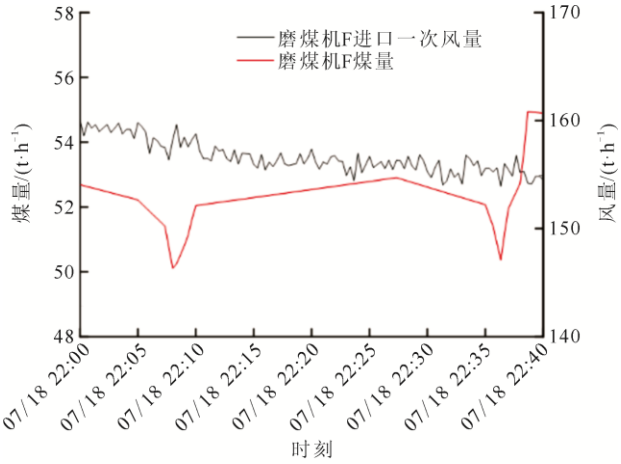


c) 磨煤机F进出口压差及电机电流

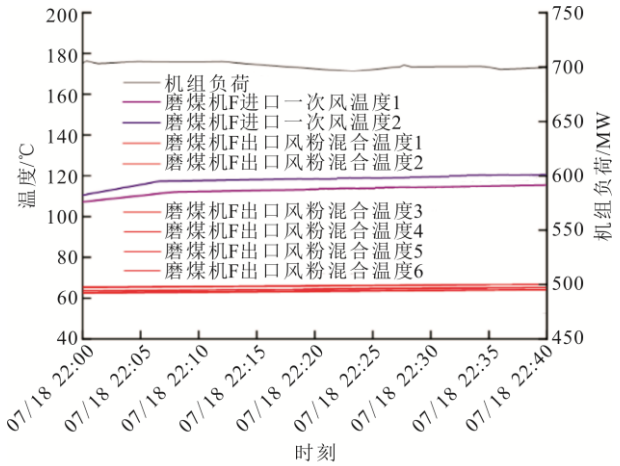
图 7 芦竹掺比 10%，煤量 52 t/h 工况磨煤机 F 运行参数曲线

Fig.7 Operation parameter curves of coal grinder F under the condition of 10% Arundo donax L. blending ratio and coal flow 52 t/h

在图 6 工况的基础上，图 7 工况为磨煤机 F 煤量提升至 52 t/h 左右，一次风量控制在 155~160 t/h，风煤比为 3.0~3.1，磨煤机进口一次风温控制 120 ℃，磨煤机出口风粉温度提升至 65 ℃，磨煤机电流维持在 90~105 A，磨进出口压差稳定在 5 kPa。



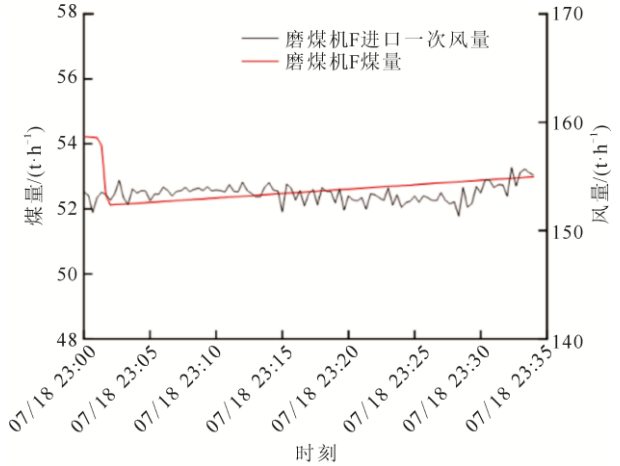
a) 磨煤机F进出口一次风量及煤量



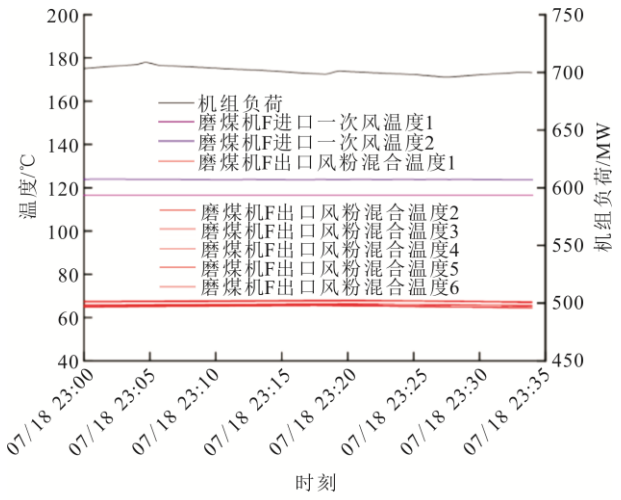
b) 磨煤机F进口一次风温及出口风粉温度

该工况相对于图 6 工况，磨煤机出力提高，且进出口压差、磨煤机电流均维持在较合理的范围，就地石子煤排出恢复正常。可见，提高风煤比是有效解决磨煤机掺烧芦竹颗粒研磨特性较差导致出力不足的关键措施。

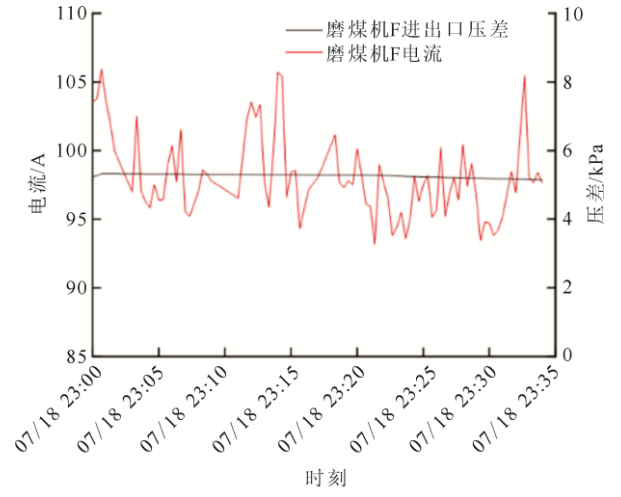
图 8 为芦竹掺烧比例提升至 15%的运行工况下磨煤机 F 运行参数曲线。磨煤机 F 维持煤量 52 t/h、进口一次风量 155 t/h、风煤比为 3.0、进口风温 120 ℃，磨煤机出口风粉混合温度 67 ℃左右，电流稳定在 95~105 A，进出口压差维持 5.1 kPa，与图 7 工况相比未作显著调整。由图 8 可见，该工况下磨煤机运行参数保持稳定，未因生物质燃料比例提升出现异常波动，磨煤机出口温度升高了 2~3 ℃，这主要归因于芦竹掺烧比例增加带来的燃料特性变化。



a) 磨煤机F进出口一次风量及煤量



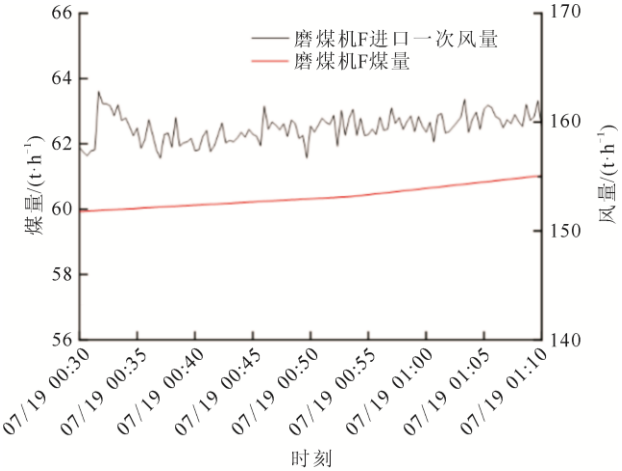
b) 磨煤机F进口一次风温及出口风粉温度



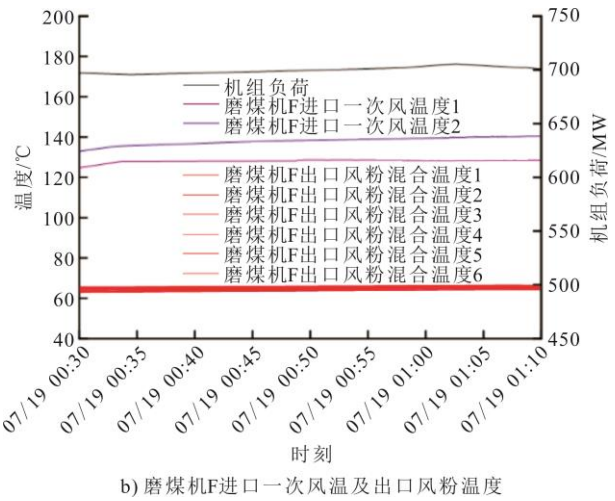
c) 磨煤机F进出口压差及电机电流

图 8 芦竹掺比 15%，煤量 52 t/h 磨煤机 F 运行参数曲线
Fig.8 Operation parameter curves of coal grinder F under the condition of 15% Arundo donax L. blending ratio and coal flow 52 t/h

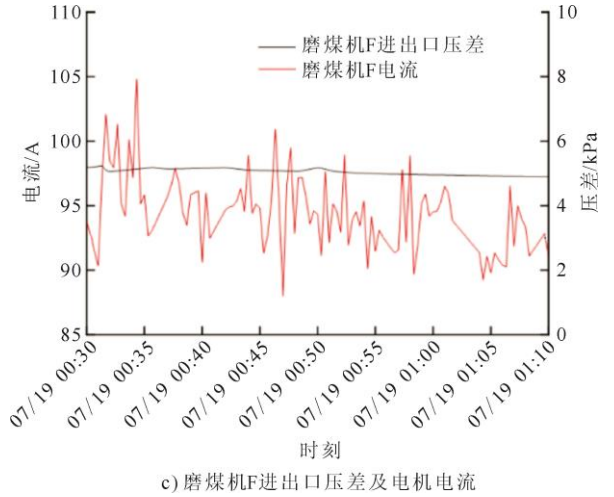
图 9 为芦竹掺比 15 %，煤量 60 t/h 磨煤机 F 运行参数曲线。



a) 磨煤机F进出口一次风量及煤量



b) 磨煤机F进口一次风温及出口风粉温度



c) 磨煤机F进出口压差及电机电流

图 9 芦竹掺比 15%，煤量 60 t/h 磨煤机 F 运行参数曲线
Fig.9 Operation parameter curves of coal grinder F under the condition of 15% Arundo donax L. blending ratio and coal flow 60 t/h

由图 9 可见，该工况下磨煤机 F 维持煤量 60 t/h、进口一次风量 160 t/h，风煤比 2.7。通过提升磨煤机出力至 60 t/h，系统采取降低风煤比的调控策略，将进口风温维持在 130 ℃，出口风粉混合温度稳定在 65 ℃左右，磨煤机 F 电流波动区间收窄至 90~100 A，进出口压差保持 5 kPa。相较于掺烧比例提升前的基准工况（图 8），该调控策略在提升磨煤机出力 15.4%的同时，成功将风煤比优化至更接近理论设计值（2.5~2.8），验证了生物质掺烧比例提升后系统的适应性与调控有效性。

综上所述，在芦竹颗粒掺烧过程中，因生物质燃料碾磨特性较差，当运行参数未作调整时，磨煤机压差升高 10%~15%、电流增大 5%~10%，并伴随石子煤排放量显著增加。通过风煤比调控优化发现，在维持磨煤机出口温度 65 ℃的边界条件下，

风煤比 2.0 为临界运行阈值，当煤量超过 60 t/h 且风煤比低于 2.0 时，石子煤排放量激增并触发磨煤机振动报警；而煤量 50~60 t/h 对应风煤比 2.7~3.0 区间可实现稳定运行，此时压差、电流波动控制在±5%范围内。试验数据表明，芦竹颗粒掺配比例提升 5%，磨煤机出口风粉温度升高 2~3 ℃，该温升现象与生物质燃料的高挥发分特性密切相关。建议将风煤比安全运行区间设定为 2.5~2.8，该区间既能保障 60 t/h 的磨煤机出力需求，又可避免因风量不足导致的碾磨效果恶化问题。

2.3 芦竹混煤掺烧对燃烧过程的影响

对比掺烧工艺数据发现，炉膛烟气温度在燃料掺烧前后及掺烧比例调整过程中均保持相对稳定。为分析掺烧对燃烧的影响，机组 700 MW 负荷掺烧芦竹颗粒不同比例（10%、15%）工况下，E、F 燃烧器层炉膛烟气温度及空气预热器出口烟气温度数据如图 10 和图 11 所示。炉膛温度波动幅度基本维持在 50 ℃以内，最大瞬时温差为 111 ℃，整体温度和燃烧核心温度区间保持稳定。所有测点排烟温度均出现 2~3 ℃温和下降，平均温度由 140 ℃降至 137 ℃左右。掺入芦竹颗粒后，炉膛内燃烧强度出现轻微减弱，这可能是烟气温度微降和排烟温度系统性降低的主要原因。值得注意的是，虽然炉膛温度最大瞬时温差为 111 ℃，但该数值属于偶发极值，并未形成持续性的温度变化趋势，整体燃烧工况仍处于可控范围。

2.4 芦竹颗粒可磨性能优化

因中速磨煤机对芦竹颗粒碾磨效果较差，制粉后仍存在的木质条状纤维无法带走，从而对整个火电机组运行造成负面影响。基于此，本研究开展了芦竹颗粒可磨性指数（HGI）优化试验，结果如表 4 所示。未经烘焙处理的芦竹 1 颗粒 HGI 仅为 23.59%，在生物质燃料的正常范围内[26-27]，但显著低于大混煤的 77.06%，这与前期试验结果高度吻合。值得注意的是，烘焙温度对芦竹 HGI 和焦产率的影响显著，随着烘焙温度从 200 ℃升至 400 ℃，芦竹 HGI 呈现先急剧上升后渐缓的趋势，焦产率则呈先急剧下降后渐缓的趋势。200 ℃烘焙后芦竹 HGI 骤增至 63.62%，相比芦竹 1 颗粒提升 170%，焦产率为 91.64%变化不大；250 ℃烘焙后 HGI 进一步增至 64.97%，生物质剧烈分解，焦产率降至 69.84%；300 ℃烘焙后 HGI 突破 75%，接近原煤水平，焦产率降至 46.38%，依然处于剧烈反应阶段；350 ℃烘焙后达到峰值 81.60%，超过原煤 5.9 百分点，焦产率降至 36.48%，有明显减缓趋势；400 ℃烘焙后微升至 82.46%，HGI 提升明显减缓，焦产率也只微降至 32.06%。研究结果表明，250~300 ℃烘焙温度是平衡烘焙能耗与产物性能的最佳选择，能够显著提升芦竹作为高效工业替代燃料的应用潜力，可有效降低火电机组运行成本。

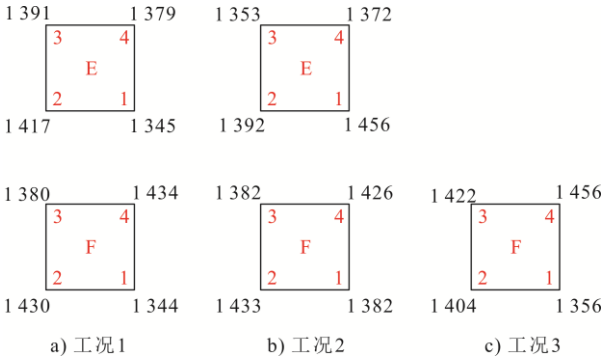


图 10 E/F 层炉膛烟温测量情况（℃）

Fig.10 Measurements of flue gas temperature in the E/F layer (℃)

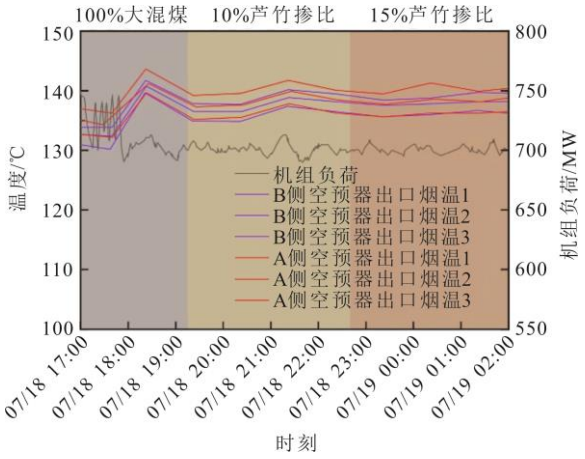


图 11 芦竹掺烧试验中空气预热器出口烟温变化

Fig.11 Variation of flue gas temperature at outlet of the air preheater in the Arundo donax L. blending test

表 4 烘焙温度对芦竹哈氏可磨性指数（HGI）的影响规律

Tab.4 Influence of torrefaction temperature on the Hardgrove Grindability Index (HGI) of Arundo donax L.

样品	烘焙温度/℃	HGI/%	焦产率/%
大混煤		77.06	
芦竹 1		23.59	
芦竹 2	200	63.62	91.64
芦竹 3	250	64.97	69.84
芦竹 4	300	75.42	46.38
芦竹 5	350	81.60	36.48
芦竹 6	400	82.46	32.06

3 结 论

本文基于 2×1 000 MW 超超临界机组直流锅炉，开展新型芦竹掺烧试验，分析其对火电机组热力系统、制粉系统、燃烧特性等方面的影响，并对掺烧参数进行优化，得出以下结论。

1）试验掺烧芦竹后，主蒸汽温度、再热蒸汽温度、压力变化较小，减温水量正常，掺烧芦竹颗粒对热力系统基本无影响。

2）芦竹颗粒掺烧比例的增加，会导致石子煤排出增多现象。当芦竹掺混比为 15%时，为保持磨煤机的正常运行，磨煤机电流需提升约 5%~10%，磨煤机进出口差压需提升 10%~15%。

3）芦竹掺烧 15%对燃烧过程影响较小，炉膛烟气温度测量值变化不大，出口烟气温度降低 2~3 ℃。

4）基于可磨性指数的优化研究，确定 250~300 ℃为芦竹颗粒的最佳烘焙温度区间，显著改善了生物质燃料的碾磨特性，为燃煤机组生物质耦合燃烧系统的安全经济运行提供了关键技术支撑。

[参 考 文 献]

[1] 陆强, 谢文銮, 胡斌, 等. 双碳时代下多源生物质热化学转化资源化利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(3): 1-20.
LU Qiang, XIE Wenluan, HU Bin, et al. Progress of resource utilization of multi-source biomass thermochemical conversion in the dual-carbon era[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(3): 1-20.

[2] 葛世荣, 樊静丽, 刘淑琴, 等. 低碳化现代煤基能源 技术体系及开发战略[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 203-223.
GE Shirong, FAN Jingli, LIU Shuqin, et al. Low-carbon modern coal-based energy technology system and development strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 203-223.

[3] 陈剑峰, 成伟, 张俊杰, 等. 不同烘焙预处理条件对竹屑颗粒可磨性的影响 [J]. 农业工程学报, 2025, 41(6): 237.
CHEN Jianfeng, CHENG Wei, ZHANG Junjie, et al. Effects of different baking pretreatment conditions on the grindability of bamboo chips[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2025, 41(6): 237.

[4] 毛健雄, 郭慧娜, 吴玉新. 中国煤电低碳转型之路——国外生物质发电政策/技术综述及启示[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 1-11.
MAO Jianxiong, GUO Huina, WU Yuxin. the road to low-carbon transformation of China's coal power: a review of foreign biomass power generation policies/ technologies and implications[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 1-11.

[5] 范泽伟, 桂其林, 李兵, 等. 桉木与煤掺混燃烧实验研究[J]. 华中科技大学学报, 2025, 53(1): 92-99.
FAN Zewei, GUI Qilin, LI Bing, et al. Experimental study on combustion of eucalyptus wood and coal [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2025, 53(1): 92-99.

[6] 程序, 颉二旺. 准确定位生物质应用方向——生物质调峰、消纳、储能，耦合发电和生物质化工[J]. 科技导报, 2025, 43(7): 48-53.
CHENG Xu, JIE Erwang. Accurate positioning of biomass application direction - biomass peaking, consumption, energy storage, coupled power generation and biomass chemical[J]. Science and Technology Guide, 2025, 43(7): 48-53.

[7] GLUSHKOV D O, NYASHINA G S, ANAND R, et al. Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 156: 43-56.

[8] LI J, GAN C, ZHOU J, et al. Performance analysis of biomass direct combustion heating and centralized biogas supply system for rural districts in China[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 278: 116730.

[9] SAGASTUME GUTIÉRREZ A, CABELLO ERAS J J, HENS L, et al. The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion: the case of Colombia[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 269: 122317.

[10] 高清林, 高嘉锜, 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.
GAO Qinglin, GAO Jiaqi, LI Yi, et al. Comprehensive analysis of coal-fired units coupled with biomass direct-fired power generation[J]. Renewable Energy, 2023, 41(12): 1571-1578.

[11] 郎范玲, 蒲建业, 邹天舒. 600 MW 燃煤机组锅炉低负荷掺烧生物质颗粒试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(增刊 2): 1166-1172.
LANG Fanling, PU Jianye, ZOU Tianshu. Experimental study on low load blending of biomass pellets in boilers of 600 MW coal-fired units[J]. Journal of Coal, 2024, 49(Suppl. 2): 1166-1172.

[12] 李加护, 王智, 马驰, 等. 1000 MW 燃煤锅炉掺烧生物质的数值模拟[J]. 江苏农业科学, 2023, 50(5): 97-104.
LI Jiahu, WANG Zhi, MA Chi, et al. Numerical simulation of biomass blending in a 1000 MW coal-fired boiler[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2023, 50(5): 97-104.

[13] 马辉, 汪潮洋, 王天龙, 等. 多种生物质与煤掺烧污染排放特性研究及灰熔融温度预测[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(增刊 2): 294-301.
MA Hui, WANG Zhaoyang, WANG Tianlong, et al. Characterization of pollutant emission and prediction of ash melting temperature of various biomasses blended with coal[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(Suppl. 2): 294-301.

[14] 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(1): 17-41.
WANG Guanglei, SUN Ligang, ZHAO Chuanjin, et al. Progress of direct-fired and gasification-coupled power generation in coal-fired units[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(1): 17-41.

[15] MOLINO A, CHIANESE S, MUSMARRA D. Biomass gasification technology: The state of the art overview[J]. Journal of Energy Chemistry, 2016, 25(1): 10-25.

[16] SANSANIWAL S K, ROSEN M A, TYAGI S K. Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 23-43.

［17］杨卧龙, 倪煜, 雷鸿. 燃煤电站生物质直接耦合燃烧发电技术研究综述[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 18-25.
YANG Wulong, NI Yu, LEI Hong. A review of biomass direct-coupled combustion technology for power generation in coal-fired power stations[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 18-25.

［18］谭厚章, 杨富鑫, 王新宁, 等. 全链条大型燃煤机组直接耦合生物质发电降碳技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 631-642.
TAN Houzhang, YANG Fuxin, WANG Xinning, et al. Carbon reduction by direct coupling biomass power generation with large coal-fired units in full chain[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 631-642.

［19］周凌宇, 陈罡, 杨高波, 等. 生物质直燃耦合燃煤发电技术路线对机组影响[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(增刊 2): 269-277.
ZHOU Lingyu, CHEN Gang, YANG Gaobo, et al. Impacts of direct biomass combustion coupled with coal-fired power generation technology[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(Suppl. 2): 269-277.

［20］卫洪建, 杨晴, 李佳硕, 等. 中国农作物秸秆资源时空分布及其产率变化分析[J]. 洁净煤技术, 2019, 37(9): 1265-1273.
WEI Hongjian, YANG Qing, LI Jiashuo, et al. Analysis of spatial and temporal distribution of crop straw resources and its yield change in China[J]. Clean Coal Technology, 2019, 37(9): 1265-1273.

［21］杨天华, 佟瑶, 翟英媚, 等. 碳中和愿景下有机固废热转化清洁利用技术研究现状与展望[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(3): 29-51.
YANG Tianhua, TONG Yao, ZHAI Yingmei, et al. Current status and outlook of organic solid waste thermal conversion and clean utilization technology under the vision of carbon neutrality[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(3): 29-51.

［22］杨富鑫, 赵旭, 谭厚章, 等. 660 MW 燃煤机组直接掺烧沙柳颗粒试验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 50(6): 3161.
YANG Fuxin, ZHAO Xu, TAN Houzhang, et al. Experimental study on direct blending of salix granules in 660 MW coal-fired units[J]. Journal of Coal Science, 2024, 50(6): 3161.

［23］马哲, 马中, 翟俊, 等. 中国农林生物质发电产业发展区域适宜性分析[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(4): 290-294.
MA Zhe, MA Zhong, ZHAI Jun, et al. Analysis of regional suitability for the development of agroforestry biomass power generation industry in China[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2014, 42(4): 290-294.

［24］张东旺, 范浩东, 赵冰, 等. 国内外生物质能源发电技术应用进展[J]. 华电技术, 2021, 43(3): 70-75.
ZHANG Dongwang, FAN Haodong, ZHAO Bing, et al. Progress in the application of biomass energy generation technology at home and abroad[J]. Huadian Power Technology, 2021, 43(3): 70-75.

［25］吴泊洋, 李俊, 刘天冀, 等. 煤与生物质掺烧灰渣碱/氯演化特性及灰渣资源化利用 [J/OL]. 煤炭学报, [2025-04-14]. DOI: 10.132251j.cnki.jccs.2024.14444.
WU Boyang, LI Jun, LIU Tianji, et al. Alkali/chlorine evolution of coal-biomass blended ash and utilization of ash resources [J/OL]. Journal of Coal, [2025-04-14]. DOI: 10.132251j.cnki.jccs.2024.14444..

［26］BRIDGEMAN T G, JONES J M, WILLIAMS A, et al. An investigation of the grindability of two torrefied energy crops[J]. Fuel, 2010, 89(12): 3911-3918.

［27］TYMOSZUK M, MROCZEK K, KALISZ S, et al. An investigation of biomass grindability[J]. Energy, 2019, 183: 116-126.

（责任编辑　杨嘉蕾）