

固废生物质能源转化与火电热电协同利用技术探究

刘强强

中国电建集团江西省电力建设有限公司, 江西 南昌 330001

DOI:10.61369/EPTSM.2026070019

摘 要：“双碳”目标下，传统火电机组低碳转型是电力行业发展的核心议题，而生物质掺烧技术以低成本、易实施、可快速规模化推广的特点，成为燃煤电厂实现碳减排的一条现实路径。本文从火电生产实际出发，系统梳理了直接耦合、间接耦合和并联耦合三类生物质掺烧技术路线的原理、特点及适用条件，重点分析了掺烧过程对锅炉燃烧工况、蒸汽参数、设备运维及污染物排放的影响，结合国内外典型工程案例讨论了燃料管控、技术适配与高比例掺烧等关键难题，并从生产管理角度提出了燃料标准化、技术方案定制化和运维体系完善等优化策略，以期为火电行业绿色转型提供技术参考。

关 键 词：火力发电；生物质掺烧；低碳改造；耦合燃烧；碳减排

Exploration of Solid Waste Biomass Energy Conversion and Thermal Power Cogeneration Utilization Technology

Liu Qiangqiang

China Power Construction Group Jiangxi Electric Power Construction Co., Ltd. Nanchang, Jiangxi 330001

Abstract： Under the "dual carbon" goal, the low-carbon transformation of traditional thermal power units is a core issue in the development of the power industry, while biomass co firing technology, with its low cost, easy implementation, and rapid scalability, has become a realistic path for coal-fired power plants to achieve carbon reduction. Starting from the actual production of thermal power, this article systematically sorts out the principles, characteristics, and applicable conditions of three types of biomass co firing technology routes: direct coupling, indirect coupling, and parallel coupling. It focuses on analyzing the impact of co firing process on boiler combustion conditions, steam parameters, equipment operation and maintenance, and pollutant emissions. Combined with typical engineering cases at home and abroad, key problems such as fuel control, technical adaptation, and high proportion co firing are discussed. Optimization strategies such as fuel standardization, technical scheme customization, and operation and maintenance system improvement are proposed from the perspective of production management, in order to provide technical reference for the green transformation of the thermal power industry.

Keywords： thermal power generation; biomass co firing; low carbon transformation; coupled combustion; carbon emission reduction

引言

传统火力发电以煤炭为主要能源，在我国电力结构中长期占据主导地位。据中国电力企业联合会数据，截至2020年我国燃煤机组总装机约10.81亿kW，资产总量超过10万亿元。燃煤发电虽然运行稳定、供电可靠，但其碳排放量约占全国CO₂总排放量的40%，是电力行业最大的单一碳排放源。在国家“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的战略框架下，仅依靠提升机组效率和降低煤耗已不足以满足减排需求，火电行业亟需引入低碳化改造的实质性手段。深入研生物质掺烧技术的工艺特性、运行影响及优化路径，对于推动火电行业绿色升级具有现实意义。本文基于火电生产实际，系统分析主流掺烧技术的工艺特点与适用条件，研究掺烧对机组运行的多维度影响，总结当前应用中的关键问题，并从生产管理角度提出改进优化策略。^{[1][2]}

作者简介：刘强强（1985.05-），男，汉族，江苏赣榆人，本科，中级工程师，研究方向：垃圾生物质等固废能源化，火力发电，热电联产，余热余压利用，地热能，压缩空气储能等。

一、主流生物质掺烧技术类型及特点

直接耦合是将预处理后的生物质与煤粉一同送入锅炉炉膛进行混合燃烧的方式，该技术与煤粉燃烧最为接近，改造成本最低，是国内外电厂的首选方案。根据生物质与煤的混合位置和方式，可细分为四种方案。制粉耦合（共磨）将生物质与煤在堆场预混后送入磨煤机碾磨，经原煤粉管道和燃烧器进入炉膛，几乎不需要设备改造，但由于生物质纤维质地坚韧，在磨煤机内容易漂浮堆积，降低研磨出力甚至造成堵塞，掺烧比例一般控制在10%以下。给料耦合（共管）将生物质单独破碎后送入煤粉输送管道与煤粉混合，安全性较好，掺烧比例可提高至20%。燃烧器内耦合新增独立生物质输送管道，将破碎后的生物质直接喷入煤粉燃烧器内混合燃烧，掺烧比例可达50%。炉内耦合（独立喷燃）配置整套独立的生物质破碎、输送和专用燃烧器系统，掺烧比例理论上可达100%。^{[3][4]}

二、生物质掺烧对火电机组运行的影响

生物质与煤在物理化学性质上存在显著差异：生物质挥发分高达70%~80%，远高于煤的10%~40%；生物质单位质量热值仅为煤的50%~60%，氧含量高达35%~45%；灰分虽低但富含K、Na、Cl等碱金属元素。这些差异使得掺烧后对机组燃烧工况、设备安全及环保排放产生多方面影响。

（一）对燃烧工况及蒸汽参数的影响

生物质高挥发分、低着火点的特性使其入炉后能提前着火，有助于降低混合燃料的燃点，强化炉膛燃烧。研究表明，随杉木掺混比例增加，平均燃烧速率和燃烧特性参数均增加，着火温度、燃尽温度与活化能减小。在低比例掺烧（热值比低于10%）时，对锅炉的烟气量、烟温及效率影响不大，甚至可以改善低负荷下锅炉的燃烧稳定性。

然而，当掺烧比例超过20%时，负面影响逐步显现。一方面，生物质热值低，大量掺入后炉膛火焰温度降低，尾部受热面换热效果下降，导致主蒸汽温度和压力偏离设计值，影响机组发电效率。另一方面，生物质火焰发散、覆盖面大，容易引起炉膛结焦，严重时影响各级受热面的换热能力。此外，生物质原料含水率波动较大时，炉膛燃烧温度紊乱，进而导致各级蒸汽管网参数不稳定，破坏全厂多级用汽平衡。^{[5][6]}

值得注意的是，生物质与煤耦合燃烧时存在一定的协同效应。生物质中富含的碱金属和碱土金属在热解过程中释放，能促进碳氢化合物金属络合物形成，加速煤炭热解，称为催化协同效应。同时生物质纤维素和半纤维素热解产生的富氢活性自由基与煤热解自由基结合，进一步促进煤炭热解，称为非催化协同效应。掺混比例、生物质类型和升温速率是影响协同效应的关键因素，合理利用协同效应有利于改善整体燃烧性能。

（二）对发电设备及运维的影响

掺烧对制粉系统的影响尤为突出。生物质纤维质地坚韧，混合研磨运行会加重磨煤机负担，加剧磨辊和衬板磨损，缩短检修周期。在共磨方案中，生物质在磨煤机内容易缠绕、粘结和积聚，导致堵磨和送粉管道积粉，降低制粉效率与产汽量。林翔在广西某电厂的工程实践中发现，桉树皮在下料器内存在架桥、堆

积和下料不畅等问题，最严重时掺烧量仅为设计值的10%，通过加装脉冲压缩空气系统才得以有效缓解。

对锅炉受热面的影响主要来自生物质灰分中的碱金属和氯化物。燃烧过程中，K、Na等碱金属以氯化物和硫酸盐形式凝结在飞灰颗粒上，降低灰熔融温度，使飞灰黏性增加，黏结于水冷壁和过热器表面形成结渣和积灰。研究表明，耦合燃烧比燃煤单独燃烧更容易造成飞灰沉积，温度超过500℃后腐蚀急剧加剧。这些沉积不仅降低换热效率，还会引起炉管高温腐蚀变薄，增加排烟阻力，使受热面换热不均导致各级蒸汽参数偏差增大。冷等技术手段加以控制。^{[7][8]}

三、国内外典型工程应用分析

生物质掺烧技术在欧洲国家经过20余年的发展已较为成熟，实践证明在有力的监管和激励政策下，燃煤机组可由部分掺烧过渡到全燃生物质。英国 Drax 电厂是全球生物质耦合改造的标杆案例，其4×660 MW机组从2004年单机5%BMCR热量掺烧起步，到2018年完成全部4台机组100%生物质燃烧改造，并计划联合碳捕集储存技术（BECCS）实现深度碳减排。荷兰 Maasvlakte 电厂（1100 MW 超超临界）采用独立锤磨机粉碎木屑颗粒送入煤粉管道，热量混燃比达15%~30%，并同步设置了CO₂捕集装置实现深度减排。芬兰 Vaskiluoto 电厂（560 MW）采用 Valmet CFB 气化器进行间接耦合，木质生物质热量混燃比达25%。^{[9][10]}

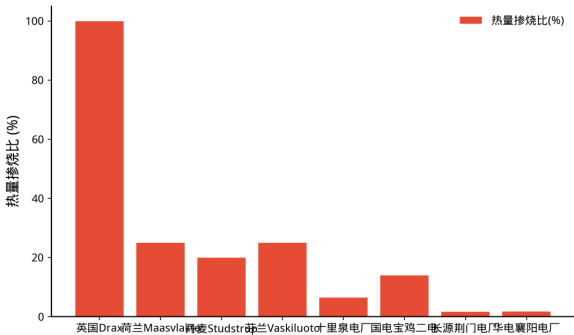


图1 国内外典型燃煤电厂生物质掺烧比例对比

相比之下，我国生物质耦合发电技术发展较为缓慢。截至2020年，我国各类生物质发电总装机2952万kW，农林生物质发电累计装机仅1330万kW。已实施的典型项目掺烧比例普遍偏低：山东十里泉电厂（140 MW，直燃耦合，5%~8%）、国电宝鸡二电（300 MW，直燃耦合，6%~21%）、长源荆门电厂（640 MW，间接耦合，1.7%）、华电襄阳电厂（600 MW，间接耦合，1.8%）、大唐唐山热电厂（600 MW，间接耦合，3%）。广西地区华润电力（贺州）有限公司、国能广投柳州发电有限公司和国能永福发电有限公司等先后开展了掺烧比小于5%的尝试。与国外以木质颗粒为主不同，我国以秸秆等草本生物质为主，灰分和碱金属含量更高，对掺烧技术和设备提出了更高要求。^{[11][12]}

四、现存问题与挑战

（一）燃料标准化管理不足

火电掺烧生物质以农林废弃物为主，原料分散、品种繁杂，

涵盖秸秆、木屑、稻壳、树枝等多种类型，各原料热值 (14~21 MJ/kg)、水分含量和灰分成分差异较大。目前尚无统一的燃料采购标准和预处理规范，缺乏系统的入厂燃料验收机制，燃料质量高度依赖供应商管理。农林生物质原料成本约占运行总成本的 60%~65%，价格受季节、运输距离和市场炒作影响波动剧烈。国内多个示范项目的运营经验表明，一旦原料价格上涨或供应链中断，掺烧项目的经济可行性迅速丧失。十里泉电厂和宝鸡二电均因秸秆价格飙升和补贴政策取消而停止运行。^{[13] [14]}

（二）技术适配与运维体系不完善

大部分火电机组在实施掺烧改造时采用通用方案，未充分评估机组容量、锅炉形式和原有设备状况等因素，存在明显的技术不适应性。小型机组盲目追求高掺比、老旧机组照搬大机组的掺烧方式等现象较为普遍，导致结焦、腐蚀和制粉故障频发。同时，现有运维体系基于纯燃煤工况建立，缺乏掺烧工况下的专项运行标准和检修规程。运行人员缺乏专门的掺烧运行调整经验，在燃烧波动或设备出现小异常时，难以及时准确调整运行参数，小问题积累为大故障，增加了运行成本和安全风险。^{[15] [16]}

五、优化策略与建议

（一）建立全流程燃料标准管理体系

从源头把控生物质燃料品质是稳定掺烧的基础。在采购环节应明确各类原料的发热量、含水率和杂质含量等关键指标，优先采购热值稳定、杂质少的成型生物质颗粒，禁止潮湿、霉变和夹杂异物的原料进厂。在预处理环节制定统一的粉碎、烘干、筛分和成型工艺流程，确保入炉燃料粒径和含水率的均匀性。建立入厂燃料抽检制度，对每批次原料的低位发热量、水分、灰分和碱金属含量进行检测，不合格批次予以退回，从根源上消除燃料波动带来的运行风险。

（二）因地制宜优化技术适配方案

不同容量和类型的机组应采用差异化的掺烧方案，避免“一

刀切”式改造。中小型老旧机组设备承受能力相对薄弱，建议优先选用低投入的分层给料或独立喷燃方案，以较低的掺烧比例 (3%~5%) 实现初步减排。大型主力机组具备良好的设备基础，可考虑采用配备独立燃烧器和给料系统的直接耦合方案，或引入气化耦合技术以规避腐蚀风险，并逐步提高掺烧比例。循环流化床锅炉因其燃料粒径适应范围广、中低温燃烧 (850~900℃) 特性，被认为是实现高比例掺烧最具可行性的炉型之一，我国 100 MW 以上 CFB 锅炉已超过 400 台。在改造过程中应针对制粉系统、送粉管道和燃烧器结构进行针对性改进。^{[17] [18]}

生物质预处理技术的提升对高比例掺烧至关重要。烘焙处理是在 200~300℃ 缺氧环境下对生物质进行热处理，烘焙后生物质质量仅为原来的 70%，但单位质量热值可提高至接近烟煤水平 (19~22 MJ/kg)，同时改善可磨性并降低亲水性。烘焙生物质颗粒 (TBP) 技术近年来受到关注，经烘焙和造粒后的木质颗粒具有近似烟煤的燃烧特性，可有效降低运输和储存成本，为高比例掺烧提供优质的燃料保障。

六、结语

将生物质掺烧作为传统火力发电低碳转型的抓手，在保留火电稳定供电和灵活调峰优势的同时，能够有效减少碳排放和常规污染物排放，盘活存量资产，具有经济价值、环保价值和社会价值的多重意义。该技术在低比例掺烧方面已具备初步的规模化应用基础，国内外多个示范工程验证了其技术可行性。但在实际推广应用中仍面临燃料管控水平低、技术路线适配不足、运维体系不完善和高比例掺烧推进困难等现实挑战。未来，火电企业应从生产实际出发，以燃料标准化为基础、技术方案定制化手段、运维体系专业化为保障，不断优化完善掺烧技术措施，健全全流程管理体系，稳步提高掺烧的稳定性、经济性和减排效果，促进传统火电与生物质清洁能源的深度融合，服务电力行业的绿色低碳转型大局。^{[19] [20]}

参考文献

[1] 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.
[2] 田宜水, 付成果, 吴永龙, 等. 农作物秸秆皮带输送量的影响因素分析 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 219-226.
[3] 陈秀芳, 阎寒冰, 柳逢春. 燃煤耦合生物质发电在火电机组技术改造中的应用前景 [J]. 化学工程与装备, 2019(7): 255-257.
[4] 佟力. 生物质颗粒与燃煤耦合发电技术研究 [J]. 锅炉制造, 2019, 26(1): 34-36.
[5] 王一坤, 张广才, 王晓旭, 等. 生物质气化耦合发电提升燃煤机组灵活性分析 [J]. 热力发电, 2018, 47(5): 78-82.
[6] 刘家利, 王志超, 邓凤娇, 等. 大型煤粉电站锅炉直接掺烧生物质研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2019, 25(5): 17-22.
[7] 林翔. 燃煤电厂生物质掺烧系统应用研究 [J]. 中国环保产业, 2024(8): 64-67.
[8] 焦乙泉, 刘志华, 李紫龙, 等. 燃煤电厂含碳废弃物掺烧技术及其研究进展 [J]. 能源与环境, 2023(6): 115-117.
[9] 郭慧娜, 吴玉新, 王学斌, 等. 燃煤机组耦合农林生物质发电技术现状及展望 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 12-22.
[10] 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.
[11] 魏丽蓉, 谢李兵. 燃煤耦合生物质发电在广西大型火电厂的应用 [J]. 广西电力, 2024, 47(6): 62-68.
[12] 杨晋萍, 史飞, 张雁茹. 电站燃煤锅炉掺烧生物质技术 [J]. 电力技术, 2010(5): 22-28.
[13] 黄叶飞, 刘砚欣, 殷柳玲, 等. 燃煤电厂耦合生物质发电降碳技术的发展与展望 [J]. 电力科技与环保, 2025, 41(6): 909-921.
[14] 毛健雄, 郭慧娜, 吴玉新. 中国煤电低碳转型之路 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 1-11.
[15] 周义, 张守玉, 郎森, 等. 煤粉炉掺烧生物质发电技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 26-34.
[16] 姚忠良, 李艳艳, 岑梅卿, 等. 燃煤锅炉耦合生物质直燃技术概述 [J]. 工业炉, 2023, 45(2): 52-56.
[17] BASU P, BUTLER J, LEON M A. Biomass co-firing options on the emission reduction and electricity generation costs in coal-fired power plants[J]. Renewable Energy, 2011, 36(1): 282-288.
[18] LIVINGSTON W R. The status of large scale biomass firing[R]. Paris: IEA Bioenergy, 2016.
[19] 中国产业发展促进会生物质能产业分会. 3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书 [R]. 北京: 中国产业发展促进会, 2021.
[20] 李少华, 刘冰, 彭红文, 等. 燃煤机组耦合生物质直燃发电技术研究 [J]. 电力勘测设计, 2021(6): 26-31.