

煤电机组耦合生物质预处理技术的工程适应性及挑战

万俊松^{1*}, 何 钧¹, 鄢 波¹, 徐教锋¹, 杨胜杰²

(1. 国网江西电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330069;

2. 华北电力大学新能源学院, 北京 102206)

摘要:系统梳理了近年来国内外的相关研究进展, 首先对比了我国典型生物质与煤炭的物化特性, 明确了预处理的必要性; 进而重点阐述了水洗与干燥(烘焙)2类预处理技术的作用机理及其对生物质燃料特性、燃烧/混燃特性及污染物排放行为的优化效果; 最后, 探讨了自然水洗、间歇/连续式水洗以及移动床、回转式、流化床干燥炉等规模化预处理技术的特点与瓶颈。旨在为发展高效、经济的生物质预处理技术, 推动生物质耦合燃煤机组的规模化应用提供理论参考。

关键词:生物质; 燃煤机组; 直接耦合; 预处理

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0028-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.006

Engineering adaptability and challenges of biomass pretreatment technologies for coupling with coal-fired power units

WAN Jun-song^{1*}, HE Jun¹, YAN Bo¹, XU Jiao-feng¹, YANG Sheng-jie²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330069, China;

2. School of New Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This review systematically examines recent research progress in China and abroad. It begins by comparing the physicochemical characteristics of typical biomass and coal samples in China. The mechanisms underlying water washing and drying (torrefaction) are elaborated, with a focus on their effects on biomass fuel properties, co-combustion behavior, and pollutant emission patterns. Furthermore, the features and limitations of various pretreatment technologies are discussed, including natural water washing, batch/continuous washing, and large-scale drying equipment moving bed, rotary, and fluidized bed. This review aims to provide theoretical insights and technical support for the development of efficient and economically viable biomass pretreatment strategies, thereby providing a theoretical reference for promoting the large-scale application of biomass-coupled coal-fired power units.

Key words: biomass; coal-fired power units; direct coupling; pretreatment

在“双碳”目标与新型电力系统建设背景下, 煤电存量机组的低碳化改造已成为电力行业实现深度脱碳的战略选择^[1-2]。生物质直燃耦合发电凭借技术成熟度高、经济性优等显著优势, 是现阶段推动煤电低碳化改造的核心技术之一^[3-4]。针对生物质直接耦合对发电系统的影响, 学术界已开展了大量研究。赵兴顺等^[1]近期对直接耦合生物质对燃煤发电系统的影响进行了系统综述, 详细归纳了掺烧过程中燃烧特性、结渣行为、锅炉效率以及气态/颗粒污染物排放的变化规律。该研究指出, 虽然生物质的引入能显著优化燃煤系统的碳足迹, 但生物质燃料与煤炭较大的组分差异, 诱发的受热面结渣腐蚀、燃烧效率的下降仍是限制工程应用的核心瓶颈。

预处理是协同提升生物质燃料品质与煤电机组

兼容性的关键技术。目前, 水洗和干燥(烘焙)作为2种主要的预处理方案, 分别在碱金属与碱土金属(AAEMs)的脱除与能量提质方面展现出显著优势。然而, 现有研究多聚焦于实验室尺度的反应机理分析, 缺乏针对大规模工程应用场景下预处理工艺对机组全流程适应性的综合评价。本综述总结并对比分析了我国典型的生物质和煤炭的物化特性差异, 重点梳理了水洗和干燥(烘焙)2类主要预处理技术在实验室规模及工程应用中对生物质燃料特性及耦合潜力的优化效果, 以期为我国煤电耦合生物质发电的规模化工程落地提供理论参考。

1 我国典型的生物质和煤的物化特性对比

生物质与煤炭在组分上的差异, 会直接影响混

收稿日期: 2026-04-07; 修回日期: 2026-06-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3909200)

作者简介: 万俊松(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为火电机组热工自动化控制, 通讯联系人, 41118100@qq.com。

燃系统的安全稳定运行。表 1 列出了我国典型煤炭样品(3 种)和生物质样品(11 种)的元素及工业分析数据。如表 1 所示,两者最显著的差异在于挥发分与固定碳的含量不同。根据煤炭分类标准,我国煤炭可分为褐煤、烟煤和无烟煤。工业分析表明,所有类型煤炭的固定碳含量均在 30%以上,而无烟煤的固定碳甚至可达 70%以上。相比之下,生物质的固定碳含量普遍低于 20%,挥发分高达 60%~80%,且多由性质活泼的含氧化合物组成^[5]。同时,生物质的 O/C 与 H/C 原子比远高于煤炭,导致热值显著低于煤炭。在混燃系统中,生物质较高的挥发分含量以及 O、H 元素,虽然能改善混合燃料的点火特性,但由于能量释放过程相对较快,会导致炉膛局部热负荷过高,对燃烧系统的稳定性构成威胁^[6]。此外,生物质与煤炭的灰成分存在显著差异,如表 2 所示。煤炭的灰分多由高熔点的硅铝酸盐(主要成分为 SiO₂ 和 Al₂O₃)组成,性质相对稳定。而生物质的灰分虽然总量较低,但富含 AAEMs。具体而言,松木、杨木等木本生物质灰分中 CaO 和 K₂O 含量较高,而秸秆等草本生物质灰分中 SiO₂ 和 K₂O 相对更加丰富,只有稻壳灰分中 SiO₂ 占比较高,可达 90%。AAEMs 在高温环境下极易转化为气相盐类或低熔点共晶体,是导致锅炉受热面结渣、腐蚀的根本原因^[7]。

表 1 我国典型煤炭和生物质元素分析及工业分析对比

原料	工业分析				元素分析				
	水分	挥发分	灰分	固定碳	C	H	O	N	S
褐煤	1.82	32.89	26.30	38.99	60.75	4.56	2.96	1.23	2.38
	5.30	38.80	24.10	31.80	51.20	4.63	12.32	1.63	0.82
烟煤	13.05	26.39	6.30	54.26	65.77	2.77	10.96	0.49	0.66
	6.20	29.26	19.15	45.39	59.70	3.62	9.90	0.39	1.04
无烟煤	2.29	8.11	17.85	71.75	71.27	3.03	3.78	0.92	0.86
	2.23	8.46	20.10	69.21	65.81	3.25	6.72	0.94	0.95
松木	7.89	77.67	0.71	13.73	49.55	6.11	35.16	0.25	0.33
杨木	6.73	78.27	3.37	11.63	36.57	4.41	46.88	1.98	0.06
杉木	8.12	75.23	0.40	16.25	44.46	5.67	41.08	0.24	0.03
竹屑	6.64	75.97	1.56	15.83	43.57	6.08	41.91	0.22	0.03
小麦秸秆	9.89	68.39	5.22	16.50	38.67	4.84	40.14	1.12	0.13
玉米秸秆	12.84	58.03	11.70	17.43	37.66	5.33	31.25	1.12	0.11
水稻秸秆	2.89	64.83	14.61	17.67	49.13	5.54	26.13	1.27	0.43
棉花秸秆	2.59	75.02	3.97	18.42	44.12	5.57	41.95	1.58	0.22
稻壳	8.90	60.20	16.25	14.65	37.39	5.64	29.12	2.60	0.10
核桃壳	1.72	80.30	1.51	16.47	51.26	5.92	38.71	0.88	0.00
花生壳	7.36	66.20	10.41	16.03	36.61	5.48	39.21	0.77	0.16

表 2 我国典型煤炭和生物质灰成分对比

原料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
褐煤	55.82	10.28	5.97	5.50	4.60	1.12	5.71	2.42
	56.82	20.07	6.62	4.76	1.48	2.16	0.56	—
烟煤	66.74	16.88	4.07	1.50	0.72	4.30	0.56	—
	50.40	34.60	1.56	6.31	0.23	0.44	0.10	2.40
无烟煤	52.94	29.31	4.03	4.94	1.67	1.55	1.19	2.32
	52.50	29.00	4.44	5.18	1.12	1.25	1.87	1.97
松木	12.83	3.53	2.79	36.86	6.05	11.12	3.04	12.08
杨木	5.69	2.14	1.58	43.90	3.68	33.74	2.67	6.47
杉木	1.19	0.28	0.91	53.56	3.78	26.73	0.01	2.13
竹屑	46.64	2.24	1.20	6.23	6.41	17.41	0.97	11.25
小麦秸秆	30.09	1.67	1.01	4.80	5.09	32.60	13.24	3.45
玉米秸秆	43.35	5.18	12.35	18.88	1.37	19.13	0.17	3.16
水稻秸秆	58.81	0.34	0.52	3.89	2.74	20.45	0.74	3.09
棉花秸秆	11.09	8.24	0.85	22.15	7.02	29.17	3.59	3.96
稻壳	93.50	0.70	0.40	1.20	0.40	2.70	0.10	0.30
核桃壳	2.76	3.57	—	42.76	6.28	43.12	—	1.51
花生壳	58.42	9.23	3.26	8.93	2.71	12.03	1.80	2.96

综上所述,生物质与煤炭在固定碳及挥发分含量、O/C 比、灰成分上的巨大差异,难以直接适配现役煤电机组。因此,通过预处理技术缩小 2 种原料间的组分差异,是保障混燃系统安全稳定运行的必然选择。

2 水洗预处理

2.1 实验室尺度的水洗预处理特性研究

水洗预处理是通过物理洗涤的方式,将生物质中水溶性组分溶解并脱除的过程。研究表明,水洗能显著降低生物质中的灰分含量,并改善其灰熔融特性。Zhao 等^[8]通过水洗脱除了稻草中 15% 的 AAEMs,使灰熔融温度从 818℃ 显著提高至于 1 200℃ 以上,极大程度缓解了锅炉受热面的结渣倾向。此外,水洗对 AAEMs 中不同元素的脱除具有明显的选择性。Wu 等^[9]发现,水洗几乎可完全脱除桉树中的 Na、K 等碱金属元素,而对 Mg、Ca 等碱土金属的脱除率则相对较低(30%~50%)。这种差异主要源于 AAEMs 在生物质中存在形式的不同:Na 和 K 多以高水溶性的无机盐形式存在,而部分 Mg、Ca 等碱土金属则通过离子交换作用与生物质中的有机官能团形成稳定的结合态,脱除难度相对较大^[10]。

燃料特性的改变会直接影响燃烧行为。Wang 等^[11]观察到,水洗后 AAEMs 的脱除,会导致生物质表现出着火延迟现象,水洗秸秆着火温度提高了约 30℃,着火时间也有一定程度的推迟(1~4 ms)。然而,着火时间的延迟并未削弱燃烧质量,反而使生物质燃烧过程更加稳定。Deng 等^[12]对 6 种水洗生物质的燃烧特性进行了表征,结果表明,水洗后生物质的燃烧速率和峰值温度均有所提高,燃烧性能以及燃尽特性整体改善。此外,在混燃适应性方面,水洗预处理表现出双重调控作用。一方面,AAEMs 的减少弱化了生物质与煤之间的协同催化作用,导致两者混燃活化能略有上升。但另一方面,AAEMs 的脱除能放大生物质中纤维素及半纤维素分解所带来的非催化协同作用(如氢转移),增强煤炭的反应热,提高燃放系统放热量^[13]。

在优化燃烧行为的同时,水洗预处理还能实现污染物的源头控制。对于酸性气体,水洗能有效脱除 Cl 元素,减少 HCl 生成。同时,正如前文所述,保留的部分 Ca、Mg 等碱土金属,在混燃系统中可作为固硫吸附剂,从而抑制燃煤中 SO₂ 的排放^[14]。在颗粒物控制方面, Lee 等^[15]发现,水洗预处理阻断 PM_{1~10} 形成的无机盐蒸气路径,促进灰颗粒向更易被捕捉的大尺颗粒物转化。以海水稻为例,水洗后 PM_{1~10} 的排放量减少了约 30%。

2.2 工业规模的水洗工艺

工业规模的水洗预处理,核心是将实验室机理转化为经济可行的工艺流程。本节从被动式自然水洗、受控式人工水洗工艺以及洗出液的回收利用 3 个角度,评价该技术的工程适应性。

2.2.1 被动式自然水洗工艺

早期工业规模的水洗预处理技术倾向于尝试低成本、被动式方案,例如利用雨水或河流等天然水源对露天存放的生物质进行水洗。Jenkins 等^[16]将秸秆在长达 7 个月,累计 717 mm 的自然降雨水洗处理后,发现其对混燃系统的负面影响明显改善,锅炉受热面沉积速率显著降低。然而,自然降水受当地气候与季节波动影响剧烈,预处理产物品质波动大,难以满足大型机组对燃料一致性的严苛要求。

2.2.2 受控式人工水洗工艺

人工受控环境下的水洗工艺克服了自然水洗的随机性,目前形成了间歇式与连续式 2 种主流方案。间歇式水洗方案包括淋洗(向生物质床层表面喷洒介质)和浸洗(将生物质浸泡在介质中)2 种形式。在固液接触模式上,浸洗法提供了更充分的扩散时

间与空间,杂质脱除效果更强。Jenkins 等^[17]对比发现,浸洗法 K 元素的脱除率达 84%,远高于淋洗法的 34%。在此基础上, Carrillo 等^[18]进一步对比了单次/多次淋洗和单次浸洗的效果。结果表明,随着淋洗次数的增加,AAEMs 脱除效果显著提高,单次淋洗的脱除效率为 46%,而经 3 次淋洗后提高至 63%,甚至高于浸洗 1 h 达到的 55%。不同于间歇式水洗,连续水洗预处理通过持续更新的洗涤介质以缩短预处理时间。然而, Wu 等^[9]对比发现,虽然连续式工艺可以避免洗涤介质的饱和,但间歇式工艺在运行中由于生物质中有机酸的溶出,会形成弱酸性环境,反而更有利于酸溶性金属的脱除。总体而言,相比于连续式水洗反应器,间歇反应器工艺简单、成本低廉、脱除效率高,在当前生物质规模化预处理中展现出更强的工程适应性。

2.2.3 洗出液的利用

洗出液的处理是水洗技术能否实现绿色推广的关键。洗出液具有弱酸性,富含 AAEMs、Cl 及腐殖质等,具有极高的资源化潜力。安娜等^[19]结合我国西北干旱地区特征,在传统滴灌系统的基础上开发出“水洗-滴灌自循环系统”,以滴灌池作为间歇式秸秆水洗单元,将富含营养元素的洗出液通过灌溉系统返回农田,经测算,每年可节省约 9.7% 的农业成本。但该路径的探索仍面临环境风险。研究表明,洗出液在富含营养元素的同时,也可能含有少量苯乙烯等源自生物质降解的有机污染物,若未经净化直接回补土壤,存在潜在的生态毒性与隐患。因此,开发兼顾养分回收与有机物降解的定向净化技术,是混燃系统中水洗预处理规模化推广的关键(图 1)。

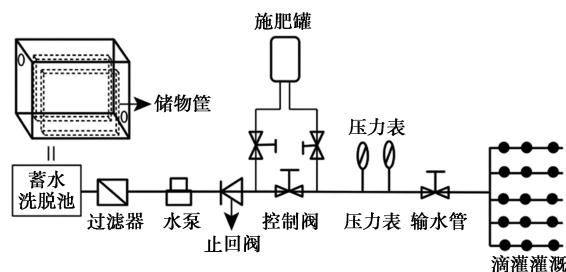


图 1 土壤营养元素自循环的新型滴灌系统

3 干燥(烘焙)预处理

3.1 实验室尺度的干燥(烘焙)预处理特性研究

干燥,本质上是一个非稳态的热质传递过程,热量通过对流和传导由干燥介质迁移至物料内部,驱

动水分沿反方向蒸发脱离。研究表明,干燥效率主要取决于物料自身特性与外部工况。在物料特性方面,初始含水率与颗粒尺寸共同影响干燥效率,并存在明显协同效应。Li 等^[20]通过城市污泥干燥实验发现,较小的粒径能有效缩短内部水分的扩散路径,尤其在低含水率阶段,小粒径对维持高干燥速率的作用更为明显。在外部工况方面,干燥介质的相对湿度和流速是核心影响因素。Chanpet 等^[21]研究表明,降低干燥介质的相对湿度可提高物料表面的水分迁移的驱动力;而增大介质流速则能强化对流换热过程,加快表面湿空气的更新,缩短整体干燥周期。此外,相较于在低温区(室温~150℃)进行的干燥预处理,在更高温度条件下(通常 $\geq 200^{\circ}\text{C}$)实施的烘焙预处理更能显著地改善生物质的燃料品质。Howell 等^[22]研究指出,烘焙后生物质 H/C 和 O/C 大幅降低且热值明显提高,不仅脱除了大部分水分和挥发分,同时破坏了生物质的纤维结构,从而显著改善了研磨特性与粉体流动性,有利于降低运输与破碎成本。

在燃烧特性方面,干燥及烘焙预处理使生物质表现出明显的类煤化的特征。随着水分及含氧挥发分的脱除,热分解行为开始向煤炭靠拢。Liu 等^[23]通过热重对比发现,未进行预处理的竹屑分别在 200、300、450℃ 左右存在多个明显的失重特征峰,而烘焙后的竹屑失重曲线趋于单一,仅在 350~380℃ 出现了一个明显的失重峰,这一区间与烟煤高度相似。这种热分解行为的变化可以有效减少混燃系统中的热力波动,改善系统稳定性。更重要的是,干燥(烘焙)预处理提升了混燃系统对生物质的兼容性。Daba 等^[24]以烘焙后的玉米芯等作为原料与煤炭进行混燃实验,结果表明,烘焙后生物质的掺烧比可从 20% 增加至超 30%,且燃烧效率从 84.32% 提高至 94.97%。

3.2 工业规模的干燥(烘焙)工艺

在工业规模下,干燥(烘焙)预处理的核心目标是在保证提质效果的前提下,实现大规模、连续化且低能耗的生产。本节将从主体设备构型特征以及能量集成策略 2 个维度,评价干燥(烘焙)技术的工程适应性。

3.2.1 干燥(烘焙)预处理设备特征对比

目前,工业规模的干燥(烘焙)系统形成了移动床、回转式及流化床 3 种主流设备构型,如图 2 所示。

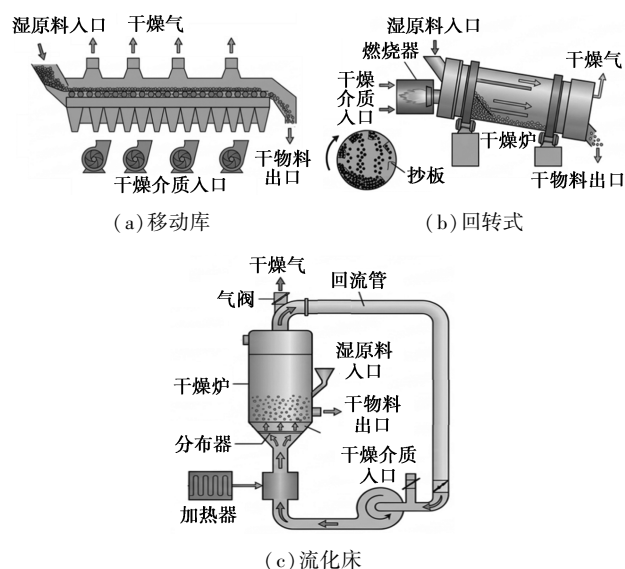


图 2 不同类型干燥(烘焙)设备示意图

移动床干燥机[图 2(a)]结构简易,工作原理为:物料在穿孔床层上随重力或机械驱动移动,与侧向通入的干燥介质进行热交换。移动床干燥机的主要优势在于物料在床层内相对静止,避免了颗粒间的剧烈碰撞,从而降低了粉尘量。同时,移动床干燥机能够高效集成厂区内的低品位废热,在较低的干燥温度下维持稳定运行,展现出良好的系统适应性。虽然较低的干燥温度会导致干燥效率下降,进而增加所需的设备占地面积以及运行时间,但对廉价废热的高效集成能显著降低长期运行成本^[25]。

回转式干燥机的主体通常为一个带有一定倾角的旋转滚筒[图 2(b)],通过旋转带动内部抄板,将物料反复抛落形成均匀料幕,从而促进水分蒸发。回转式干燥机内物料运动主要包括颗粒上扬的被动相过程以及颗粒下落的主动相阶段,而主要的热质交换发生在后者^[26]。在此阶段,料幕与热气流充分接触,极大地提升了气固有效接触面积。与移动床相比,回转式干燥机通过滚筒的机械翻滚消除了床层的水分梯度,具有较强的原料适应性。无论是形态不规则的农林废弃物,还是具有一定黏性的污泥,均能通过调节转速与抄板角度实现稳定且高效的干燥(烘焙)。

流化床干燥机是利用高速气流使物料呈现流态化悬浮状态,具有极高的传热传质效率[图 2(c)]。在流化状态下,气固两相间的相对速度远高于前 2 种设备,能够瞬间破坏物料表面的饱和蒸气边界层,实现水分的快速且均匀的脱除^[27]。然而,其在工程落地时还面临 2 个主要问题:一是能量消耗,为了维持流化状态,系统需要克服巨大的压力损失;二是物

料粒径限制,流化床对物料的一致性要求较高,通常仅适用于木屑、细碎秸秆等较小的均匀颗粒。因此,流化床更多应用于破碎生物质且品质要求极高的利用场景。

为直观对比上述3种构型,表3汇总了其关键工程性能参数。

表3 干燥(烘焙)预处理设备性能对比

性能指标	移动床干燥机	回转式干燥机	流化床干燥机
热交换模式	穿流式对流	动态料幕对流	流态强烈对流
传热传质效率	一般	较高	极高
物料适应性	适应性适中,块状颗粒物料	适应性强,复杂形态物料	适应性差,小颗粒、细粉
单机规模	中小规模	大规模	大规模
运行成本	较低	中等	较高

3.2.2 工业规模干燥(烘焙)系统能量集成策略

构建多能互补的能量集成体系,实现热能的梯级利用,是提升预处理技术工程适应性的核心。目前,主流的集成策略首先聚焦于尾部烟气余热的回收,特别是利用脱硫前后的低温烟气作为干燥介质。Liu等^[28]采用 Aspen Plus 建立了耦合余热利用的生物质燃煤联合发电系统,利用余热烟气对生物质进行干燥。对比发现,与未集成余热回收的系统相比,能效提高了2.2%,碳排放减少了3.3%。此外,对于条件更加剧烈的烘焙预处理,能量集成的关键还包括烘焙尾气能量的回收。Akinyemi等^[29]研究发现,随着温度的升高,生物质挥发分的能量密度显著增加,通过燃烧系统回收这部分化学能,可有效覆盖预处理过程所需的大部分显热需求。然而,上述能量集成策略在工业运行中仍面临严峻挑战。混燃系统尾气中残余的酸性气体以及高含量飞灰存在原料污染风险,且烘焙尾气中焦油、有机酸与水分的比例随原料及工况剧烈波动,极易在管道或燃烧系统结焦。因此,未来还需开发适用于余热烟气的间接换热反应器以及原料适应性更强的燃烧系统,以实现工业规模干燥(烘焙)系统高效能量集成。

4 结论

提升生物质与燃煤机组耦合的兼容性,是实现煤电低碳化转型的关键。本文中通过对水洗、干燥(烘焙)预处理技术的系统梳理,得出以下结论。

(1) 技术特性与适配性

水洗及干燥(烘焙)预处理不仅改变生物质的物理形态,更是从组成层面改变其燃料特性。水洗可从源头缓解AAEMs引发的混燃机组受热面的结渣问题并降低酸性气体与细颗粒物排放。干燥与烘焙则侧重于水分和部分挥发分的脱除,提升生物质的能量密度与研磨性能,使其物化性质更接近于煤炭,弥补其与煤炭在制粉系统、燃烧系统上的适配差距。

(2) 工程落地的经济权衡

规模化应用中,设备选型与能量集成是决定经济性的关键。间歇式水洗工艺因脱除效率高、成本低而更具应用潜力。而干燥(烘焙)预处理需根据原料特性(形态、粒径、含水率)与可用热源条件选择合适的反应器,以实现预处理效果与全流程经济性的平衡。同时,洗出液的资源化利用及干燥(烘焙)系统的能量集成,是提升预处理系统全生命周期净能产出的关键。

参考文献

- [1] 赵兴顺,涂爱民,陈二雄,等.直接耦合生物质对燃煤发电系统影响的研究现状与展望[J].生物质化学工程,2025,59(3):57-66.
- [2] 施其能,刘海玉,张良,等.燃煤电厂碳捕集工艺优化进展——化工侧和热工侧[J].洁净煤技术,2026,32(1):92-112.
- [3] 郑妍,姚宣,陈训强.生物质气化耦合发电体系的合成气组分与能量分析[J].发电技术,2023,44(6):859-864.
- [4] 韦晓丽,冯琰磊,方鹏,等.生活垃圾与燃煤电站烟气蒸汽耦合发电技术简析[J].锅炉技术,2024,55(5):14-20,71.
- [5] Wang L, Lin D, Liu D, et al. Oxidative pyrolysis of typical volatile model compounds under low oxygen equivalence ratios during oxidative pyrolysis of biomass[J]. Energies, 2025, 18(11):2996.
- [6] Yao X, Zhou H, Xu K, et al. Investigation on the fusion characterization and melting kinetics of ashes from co-firing of anthracite and pine sawdust[J]. Renewable Energy, 2020, 145:835-846.
- [7] Liu L, Memon M Z, Xie Y, et al. Recent advances of research in coal and biomass co-firing for electricity and heat generation[J]. Circular Economy, 2023, 2(4):100063.
- [8] Zhao X, Yao P, Yu R, et al. Insight into the influence of water leaching on ash fusion behavior and alkali metal migration for corn and rice straw[J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 110:101362.
- [9] Wu H, Yip K, Kong Z, et al. Removal and recycling of inherent inorganic nutrient species in mallee biomass and derived biochars by water leaching[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(21):12143-12151.
- [10] Maathuis F J M. Physiological functions of mineral macronutrients[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12(3):250-258.
- [11] Wang X, Adeosun A, Hu Z, et al. Effect of feedstock water leaching on ignition and PM1.0 emission during biomass combustion in a

- flat-flame burner reactor[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 2705–2713.
- [12] Deng L, Zhang T, Che D. Effect of water washing on fuel properties, pyrolysis and combustion characteristics, and ash fusibility of biomass[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 106: 712–720.
- [13] Oladejo J, Adegbite S, Gao X, *et al.* Catalytic and non-catalytic synergistic effects and their individual contributions to improved combustion performance of coal/biomass blends[J]. *Applied Energy*, 2018, 211: 334–345.
- [14] Zhou C, Liu G, Xu Z, *et al.* The retention mechanism, transformation behavior and environmental implication of trace element during co-combustion coal gangue with soybean stalk[J]. *Fuel*, 2017, 189: 32–38.
- [15] Lee B H, Sh L, Lee D G, *et al.* Effect of torrefaction and ashless process on combustion and NO_x emission behaviors of woody and herbaceous biomass[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2021, 151: 106133.
- [16] Jenkins B M, Williams R B, Bakker R R, *et al.* Combustion of leached rice straw for power generation[C]. *Proceedings of the Fourth Biomass Conference of the Americas*, 1996: 1357–1363.
- [17] Jenkins B M, Bakker R R, Wei J B. On the properties of washed straw[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1996, 10(4): 177–200.
- [18] Carrillo M A, Staggenborg S A, Pineda J A. Washing sorghum biomass with water to improve its quality for combustion[J]. *Fuel*, 2014, 116: 427–431.
- [19] 安娜, 马金荣, 李显, 等. 生物质水洗脱灰及其废液的资源化利用研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(12): 3083–3090.
- [20] Li Q, Yang Z, Kong H, *et al.* Synergistic effects of initial moisture content and particle size on drying rate and heat production during bio-drying of sludge after electro-dewatering[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 11(1): 278–289.
- [21] Chanpet M, Rakmak N, Matan N, *et al.* Effect of air velocity, temperature, and relative humidity on drying kinetics of rubberwood[J]. *Heliyon*, 2020, 6(10): e05151.
- [22] Howell A, Beagle E, Belmont E. Torrefaction of healthy and beetle kill pine and co-combustion with sub-bituminous coal[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2018, 140(4): 042002.
- [23] Liu Z, Hu W, Jiang Z, *et al.* Investigating combustion behaviors of bamboo, torrefied bamboo, coal and their respective blends by thermogravimetric analysis[J]. *Renewable Energy*, 2016, 87: 346–352.
- [24] Daba B J, Hallegiorgis S M. Co-firing pellet of torrefied corncob and khat stem mixture with coal on combustion efficiency and parametric optimization[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(9): 3861–3873.
- [25] Myllymaa T, Holmberg H, Ahtila P. Techno-economic evaluation of biomass drying in moving beds: The effect of drying kinetics on drying costs[J]. *Drying Technology*, 2018, 37(10): 1201–1214.
- [26] Prakotmak P, Rattanamechaiskul C, Junka N. Modeling of multi-phase heat transfer and transport behaviors of paddy in rotary drum drying by CFD-DEM[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 73: 106551.
- [27] Prachayawarakorn S, Raikham C, Soponronnarit S. Effects of ripening stage and steaming time on quality attributes of fat free banana snack obtained from drying process including fluidized bed puffing[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(2): 946–955.
- [28] Liu Y, Bi D, Zhang C, *et al.* Analysis of exergy and carbon emission of torrefied biomass gasification coupled with coal-fired power generation system based on heat recovery[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2026, 193: 107392.
- [29] Akinyemi O S, Jiang L, Buchireddy P R, *et al.* Investigation of effect of biomass torrefaction temperature on volatile energy recovery through combustion[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2018, 140(11): 112003. ■

(上接第 27 页)

- [6] 李谢昆, 周卫征, 郭颖, 等. 微藻生物质制备燃料乙醇关键技术研究进展[J]. *中国生物工程杂志*, 2014, 34(5): 92–99.
- [7] Liu D, Su Z, Han Q, *et al.* Interactions of microbiota during solid-state cereal vinegar fermentation[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2026, 169: 105536.
- [8] 杨欣娅. 酿酒酵母强化小麦秸秆厌氧发酵产甲烷效果及机理研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2025.
- [9] Li N Y, Gao Y P, Liu X W, *et al.* Enhancing cider vinegar quality through the synergistic Co-fermentation of *Lactiplantibacillus plantarum* and *Acetobacter pasteurianus*: A metabolomic and transcriptomic approach[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2026, 240: 119018.
- [10] Muhammed R M Y, Cavoski I, Apa A C, *et al.* Valorization of organic third-category fruits through vinegar fermentation: A laboratory-scale evaluation of apples, peaches, and clementines[J]. *Foods*, 2026, 15(2): 238.
- [11] 杜潇. 甲壳类废物催化/氧化制备小分子有机酸及其机理研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2025.
- [12] 陈星. 黄水厌氧发酵产己酸的工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2025.
- [13] 侯晓君. 响应面法优化茶梗稀碱预处理及其酶解液发酵产琥珀酸[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
- [14] Ren F, Tan B. An acetic acid bacterium-Acetobacter indonesiensis SZAI and its role in fermented whole cereal volatile compounds and functional characteristics[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2026, 449: 111627.
- [15] 张江宁, 杨春, 张玲, 等. 红曲醋高产洛伐他汀低产桔青霉素的研究[J]. *中国调味品*, 2019, 44(1): 85–88.
- [16] 周跃慧. 维吉尼亚链霉菌诱变育种及发酵工艺优化的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [17] 柴云雷, 王鹏, 张晟, 等. 梨废渣发酵生产菌体蛋白的研究[J]. *中国饲料*, 2022, (11): 138–143, 147.
- [18] 熊霞霞, 肖昊, 刘帅, 等. 甜叶菊废渣在畜禽饲料中的综合应用及其作用机制研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2022, 58(6): 7–11.
- [19] 施英乔, 丁来保, 盘爱享, 等. 糠醛生产废水废渣的资源化利用研究进展[J]. *林产化学与工业*, 2016, 36(3): 133–138.
- [20] Hernández B J E, Plaza A M, Verdín J, *et al.* Impact of yeast-yeast interactions among autochthonous agave strains on acetate and ethyl ester production during agave juice fermentation[J]. *Food Research International*, 2026, 230: 118588. ■