

## 燃煤机组直燃耦合与气化耦合发电研究进展

王光磊<sup>1</sup>, 孙立刚<sup>1</sup>, 赵传进<sup>2</sup>, 谢泊男<sup>2</sup>, 张 海<sup>2</sup>, 范卫东<sup>2</sup>

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:**在当前全球致力于实现碳达峰与碳中和的双碳目标背景下,如何高效提升可再生能源的利用比例,逐步减少对煤炭等传统化石能源的依赖,已成为世界各国能源战略转型的关键议题。生物质能源,作为一种潜力巨大的可再生资源,因其总量丰富、来源广泛、易于存储与运输的特点,在推动能源结构绿色转型中扮演着重要角色。若将生物质能源与燃煤锅炉进行大比例耦合利用,可减少温室气体、氮氧化物、硫氧化物等环境污染物的排放。生物质燃料因其挥发分含量高、反应活性强、灰分和硫含量较低的优势,使其不仅能作为直燃耦合的原料,而且也能在气化后与煤粉耦合燃烧。无论是采用生物质直燃耦合发电技术还是生物质气化耦合燃烧发电技术,由于需要更新的设备较少、燃料资源利用率较高,已成为传统火力发电厂典型的低碳转型方向。本文从我国生物质资源量和利用情况出发,系统梳理了生物质与煤粉直燃耦合发电技术研究现状以及生物质气化耦合燃烧发电技术研究现状,汇总了生物质与煤粉直燃耦合以及生物质气化耦合燃烧的污染物排放、积灰、结渣以及腐蚀等方面的研究,并总结了生物质耦合燃烧发电现有的国内外工程经验,评估了该技术未来的发展趋势。可为生物质能源高效利用和火电行业低碳改造提供理论支撑。

**关键词:** 直燃耦合; 气化耦合; 污染物排放; 积灰; 腐蚀**中图分类号:** TM621 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2025)01-0001-24

## Research advancements in co-firing of coal powder and biomass

WANG Guanglei<sup>1</sup>, SUN Linggang<sup>1</sup>, ZHAO Chuanjin<sup>2</sup>, XIE Bonan<sup>2</sup>, ZHANG Hai<sup>2</sup>, FAN Weidong<sup>2</sup>

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute, Jinan 250013, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Against the backdrop of the current global commitment to achieving the dual-carbon goals of carbon peaking and carbon neutrality, the question of how to effectively increase the proportion of renewable energy and reduce the reliance on traditional fossil fuels such as coal has become a key issue in the transformation of the energy strategies of countries around the world. Biomass energy, as a renewable resource with great potential, has emerged as a promising avenue with its abundant quantity, widespread availability, convenient storage and transportation. The significant coupling of biomass in coal-fired boilers can effectively reduce emissions of greenhouse gases, nitrogen oxides, sulfur oxides, and other pollutants. Additionally, due to the high volatile content, high reactivity, low ash and sulfur element in biomass, it can be used not only as a direct combustion feedstock but also a coupled fuel with coal powder combustion after gasification. Whether adopting the direct combustion coupled power generation technology or gasification coupled combustion power generation technology, the mainstream direction for the transformation of traditional thermal power plants is evident, given the minimal need for equipment upgrades and the high utilization rate of fuel resources. This paper start from the biomass resources and utilization in China, systematically reviews the current research status of biomass and the direct coupled combustion, as well as the gasification coupled combustion, with the focus on the research on emissions of pollutants, ash accumulation, slagging, and corrosion aspects. Further, we summarize the existing engineering project at home and abroad, and make an evaluation of the future development trend of this technology is evaluated. This work will provide theoretical support for the low-carbon transformation of the thermal power industry.

**收稿日期:** 2023-12-18; **策划编辑:** ; **责任编辑:** 黄小雨 **DOI:** 10.13226/j.issn.1006-6772.23121804**基金项目:** 国家电力投资集团 C 类课题资助项目(37-K2023-113)**作者简介:** 王光磊(1988—),男,山东莱芜人,高级工程师。E-mail: wangguanglei@sdepci.com**通讯作者:** 张 海(1987—),男,江苏苏州人,副教授。E-mail: zhanghai@sytu.edu.cn**引用格式:** 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):1-24.

WANG Guanglei, SUN Linggang, ZHAO Chuanjin, et al. Research advancements in co-firing of coal powder and biomass[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(1): 1-24.



**Key words:** direct combustion coupling; gasification coupling; pollutant emissions; ash accumulation; corrosion

## 0 引言

双碳目标下对煤电机组进行低碳改造是必经之路,但按照现有的煤电技术,提升燃煤发电效率十分困难,而CCUS等直接降低碳排放的工艺尚不能充分推广。因此,应考虑从能源输入端对电厂进行调控,以达到降低碳排放的效果。国家能源局发布的《2021年生物质发电项目建设工作方案》中指出,生物质作为固体燃料,煤电企业应利用现有优势,加快燃料侧灵活性转变。而生物质作为一种零碳的固体燃料,与煤粉掺混燃烧能充分发挥火电燃料灵活性的特点,生物质既可以与煤粉进行直燃耦合发电,也可以在气化后与煤粉混合燃烧发电<sup>[1]</sup>。

我国生物质资源总量丰富,结合边际性土地上能源林草的生物质能源,我国生物质资源量可达5.49亿t标煤<sup>[2]</sup>。据文献统计估算,如果能开发利用7亿t标准煤的生物质,将累计减排约20亿tCO<sub>2</sub><sup>[3]</sup>。因此,合理的开发利用生物质资源是我国实现碳减排的重要途径。我国生物质资源量和利用情况存在不匹配的问题,热值和总资源量都相对较高的秸秆和林业剩余物利用程度很低<sup>[4]</sup>。目前生物质利用仍以农村利用为主,而在生物质发电领域,尽管生物质挥发分含量高,着火性能好,灰分以及硫元素较低,但是与传统煤等化石能源相比,生物质回收利用成本较高,发电效率低,这些劣势大幅度降低了其在发电市场的竞争力。《3060零碳生物质能发展潜力蓝皮书》指出,我国生物质能开发潜力约为4.6亿t标准煤,但目前实际转化为能源的资源不足0.6亿t标准煤,转化率仅约为13%。

为更好地引导生物质能源的发展,国家发布了《中华人民共和国可再生能源法》<sup>[5]</sup>以及《“十四五”可再生能源发展规划》等文件,指出要推动生物质多元化开发。因此,大力发展煤电与生物质能耦合发电是大势所趋,是我国实现双碳目标、调整能源结构和社会绿色发展的重要方向。

## 1 生物质与煤粉直燃耦合

生物质与煤的直燃耦合是目前最常见的生物质利用方式之一,该技术可以在不增加过多设备成本的情况下,实现火电的低碳改造。据国际可再生能源署统计,全球生物质与煤耦合燃烧的发电厂数量已达到240余所,且大多数采用直燃耦合的方式<sup>[6]</sup>,该技术多适用于50~700MWe范围内的大多数燃料和锅炉类型组合<sup>[7]</sup>。目前主流的直燃耦合技术根据

生物质粉碎和掺混位置可分为以下4种(如图1所示):(a)共磨工艺。该工艺将生物质与煤粉直接混合后送入磨煤机内进行共同研磨。然而,生物质与煤粉的粉碎性能不同,且生物质挥发分较高,因此在共同研磨过程中需要严格防止生物质自燃,否则会降低该研磨方案的安全性,这也导致了直燃耦合时生物质掺混比一般小于3%;(b)共管工艺。该工艺是将生物质和燃煤分别进行粉碎,然后将生物质颗粒通过磨煤机的入口管道与煤粉混合,最后进入燃烧器进行燃烧。由于该工艺涉及的管道和控制系统较复杂,所以目前应用较为有限。然而,应用该工艺的煤电厂设备更新成本相对较低,只需额外添加管道和生物质磨碎机即可实现,在有较好的管路和控制系统的情况下切实可行。(c)独立喷燃工艺。该工艺将生物质单独粉碎喷入燃烧器后与煤粉分别燃烧,采用该工艺需要对锅炉燃烧器进行更新,投资成本相对较高;(d)再燃工艺。该工艺将生物质粉末送入锅炉的再燃燃烧器,利用生物质具有较强的还原特性,以降低炉内氮氧化物(NO<sub>x</sub>)浓度。由于该工艺独立燃烧生物质和煤粉,因此添加生物质对煤粉的燃烧影响很小,可以实现0~100%不同比例的混烧。但值得注意的是,工艺的实施需要有相应的生物质再燃燃烧器和适当的调控措施,以确保稳定的燃烧效果和排放控制,因此投资成本最高。

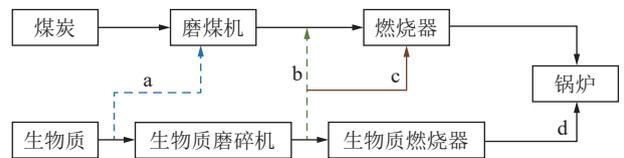


图1 直燃耦合的4种技术方案

Fig. 1 Four technical approaches for direct coupled combustion

### 1.1 直燃耦合设备

目前,在生物质与煤粉直燃耦合的项目中,48%采用悬浮燃烧技术,24%采用鼓泡流化床,19%采用循环流化床,9%采用炉排锅炉技术<sup>[8]</sup>,下面将对这4类生物质与煤粉直燃耦合技术进行介绍。

1) 悬浮燃烧技术。悬浮燃烧技术进行生物质与煤粉耦合示意如图2所示,悬浮燃烧技术对燃料要求较低,因此可很好的进行生物质与煤粉燃烧,不用对生物质与煤粉的品质进行精细挑选,但由于需要大量的空气保证悬浮状态,导致噪声较大,同时相比于其他技术,风机能源输入更多,此外由于空燃比较大,导致燃烧易产生局部高温,氮氧化物和二氧化硫等污染物排放无法完全有效避免。国内外

学者也多从污染物控制和缓解局部超温方面对该技术进行优化。刘圣勇等<sup>[10-11]</sup>针对预燃室进行了特殊设计,同时分析了进风量对燃烧效率和氮氧化物排放的影响,实验结果表明二次风应采用较高风速,

且在燃烧器优化设计后氮氧化物排放主要为燃料型,受局部超温影响较小。JIA 等<sup>[9]</sup>开展了 0.5 MW 的中试规模试验,探究了悬浮燃烧下不同的生物质和煤炭共烧比例,并得到了相应的排放因子。

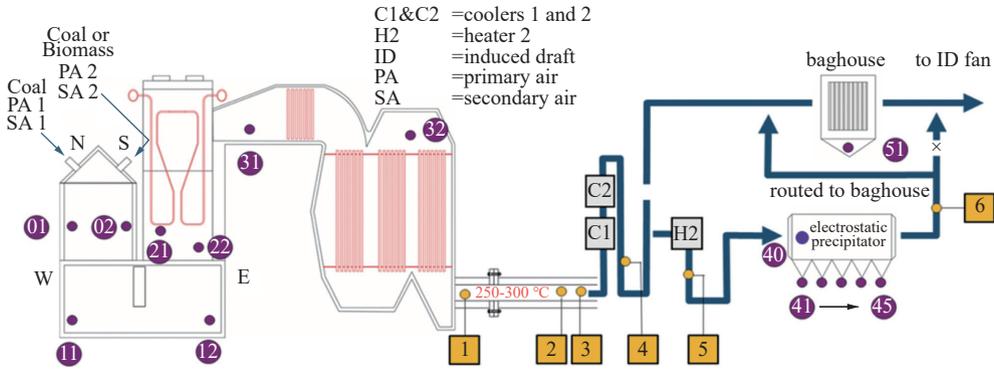


图 2 悬浮燃烧技术示意<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of suspended combustion technology<sup>[9]</sup>

2) 鼓泡流化床。鼓泡流化床的装置示意如图 3 所示。鼓泡流化是一种特殊沸腾现象,底端空气进气速度高于起始流化速度,物料能随气体流动,同时低于湍流流化速度,形成了一个动态的颗粒床层,气流通过床层颗粒间的空隙,使颗粒悬浮并呈现明显的流化状态。此时颗粒比表面积较大,与气体之间的传质传热性能很好,且气流速度相对较低,因此在生物质与煤粉直燃耦合中应用较为广泛。但在实际工业生产中,由于颗粒物易发生聚集现象,严重影响流化状态,因此如何预防颗粒聚集是国内外学者广泛关注的方向。祝康<sup>[13]</sup>等通过 CFD 模拟和实验发现圆周排布的气体分布板较之于方形排布的颗粒流态化更均匀。PIO 等<sup>[14]</sup>发现在使用鼓泡流化床进行污泥掺烧时,由于其无机物含量较高,导致系统效率下降以及飞灰聚集。因此在使用

鼓泡流化床进行生物质与煤粉直燃耦合时,应该尽量选取有机成分相对较高的生物质,并采用合理的导流结构。

3) 循环流化床。循环流化床的装置示意如图 4 所示。循环流化床燃料适应性广,炉床热容量大,因此无需制成细煤粉,一般燃料颗粒在 0~13 mm 即能保证燃料的高效稳定燃烧,故能在生物质与煤粉直燃耦合中得到应用<sup>[16]</sup>。循环流化床燃烧氮氧化物排放少,环保性能优越。孙锦余等<sup>[17]</sup>发现循环流化床燃烧降低了 NO<sub>x</sub> 排放,在 30% 的大比例掺混废木材后 NH<sub>3</sub> 和 HCN 量逐渐增加,导致了 NO<sub>x</sub> 排放量开始下降。但循环流化床局部高温区域易与燃料颗粒发生磨损,由于通入气体流速较快,并布置旋风分离器,导流板等较大风阻的部件,导致机组能耗水平相对较高。

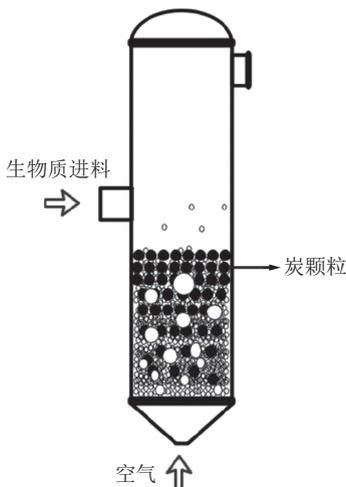


图 3 鼓泡流化床示意图<sup>[12]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of a bubbling fluidized bed<sup>[12]</sup>

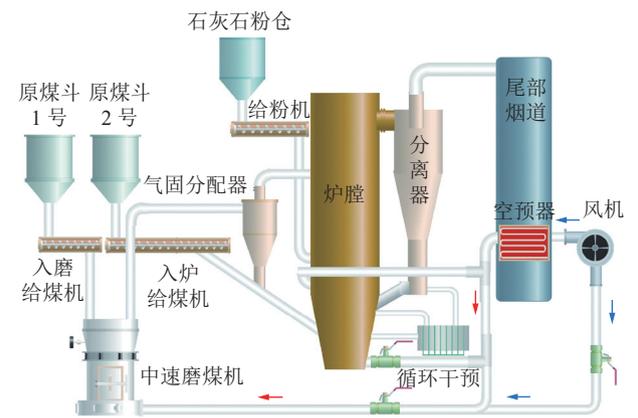


图 4 循环流化床示意<sup>[15]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of circulating fluidized bed<sup>[15]</sup>

4) 炉排炉。炉排炉的装置示意如图 5 所示。活动和固定炉排由耐热合金钢制成,适合大颗粒生物

质与煤粉的直接掺混燃烧,减少了颗粒粉碎能耗,且炉排燃烧设备结构简单,易于调节和后期设备维护,但此类装置燃烧速度慢,难以完全燃烧,炉膛负荷较小,热效率较低。随着高热值( $\sim 17\,572.8\text{ kJ/kg}$ )的生物质处置需求的增加,炉排燃烧技术易发生局部超温,进而影响使用寿命<sup>[14]</sup>。李开乐等<sup>[19]</sup>构建了燃料种类和掺混比的局部高温表征模型,在燃烧木屑时发现木屑的稀疏会导致温度分布不均,而提高过量空气系数会减少局部高温现象。

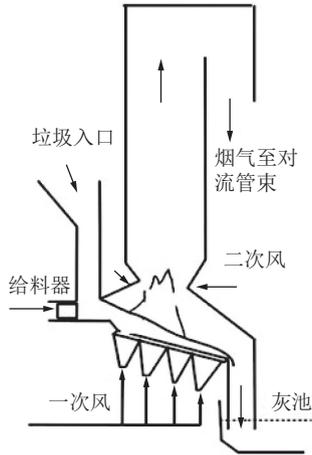


图5 炉排燃烧结构示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of grate combustion<sup>[18]</sup>

## 1.2 直燃耦合研究现状

由于生物质直燃耦合发电环境效益好、初始投资少,国际上对于生物质直燃耦合发电技术研究较多,主要聚焦于生物质与煤协同效应,运行规律以及经济性分析等。SUN等<sup>[20]</sup>为提高流化床燃烧效率和壁面传热系数,采用大尺寸( $0\sim 6\text{ mm}$ )的生物质颗粒进行直燃耦合,实验结果显示,随着生物质含量的上升,传热效率提高约10%。STEER等<sup>[21]</sup>对500 MW大规模生物质直燃耦合中遇到的问题进行了研究,发现二次风对于保证锅炉稳定运行和减少未完全燃烧损失起到了关键作用。PALSTRA等<sup>[22]</sup>采用对碳的同位素标记计量进行了生物质发电量的准确计算,解决了煤与生物质耦合燃烧的经济补偿问题和无法对生物质进行精准计量的问题。DARMAWANA等<sup>[23]</sup>开展了空心果穗与煤炭直燃耦合燃烧的实验和模拟研究,给出了此类生物质耦合燃烧的理想共燃比。PEREZ-JELDRES等<sup>[24]</sup>通过CFD模拟研究了150 MW锅炉木屑与煤掺混燃烧性能,结果显示由于生物质的协同效应,能加快燃料颗粒的燃烧速度,同时提高了热功率。MUN等<sup>[25]</sup>考察了木屑颗粒、空心果串颗粒、棕榈仁壳、核桃壳以及干燥研磨加工的生物质颗粒五种生物质原料在10%的掺混比下与低阶煤共燃对电厂效率的影

响,结果显示由于低阶煤热值较低,而干燥研磨加工生物质需要额外消耗电能,导致电厂在添加生物质后效率下降,证明低阶煤不适合进行生物质的直接掺混燃烧。

为了加快传统火电厂的升级转型与实现绿色低碳的战略要求,中国学者也在生物质与煤直燃耦合方面开展了大量的研究,同样发现生物质与煤粉直燃耦合存在多种协同促进机制。彭瑞祥等<sup>[26]</sup>通过实验分析发现,生物质中碱金属K和Na对煤燃烧的挥发分和固定碳具有催化促进作用。吕洪坤等<sup>[27]</sup>模拟了在1000 MW锅炉中不同掺混比下锅炉燃料燃尽率和灰渣量的影响,结果发现在生物质掺混后能提高燃尽率,但灰渣量会随着掺混比例的提高而增加。山东大学武鹏魁等<sup>[28]</sup>研究了生物质与兰炭的掺混燃烧特性,通过热重分析实验发现,混合燃料的着火温度与秸秆的着火温度相近,玉米秸秆掺混比在30%~40%时,着火特性指数是兰炭的1.1~1.7倍,同时在加入3%的二氧化锰作为助燃剂后改善了燃烧性能。王俊等<sup>[29]</sup>模拟了600 MW锅炉中16.7%的掺混比下更改生物质喷入位置和颗粒粒径对于燃烧过程和 $\text{NO}_x$ 排放的影响,结果显示,喷口位置和颗粒粒径的变化对炉膛内烟气温度和 $\text{O}_2$ 和CO组分体积分数影响较小,但颗粒粒径的增大会导致出口 $\text{NO}_x$ 含量的增大。

文献分析发现,直燃耦合是生物质利用的主要形式,掺混比在10%以下时,对电厂效率影响较小,添加生物质后由于其与煤粉的协同效应,提高了煤粉着火性能,且提高了燃料燃烧速度,进而增大了单位时间的热效率。针对不同的锅炉类型,掺混生物质的影响往往不一样,流化床由于内部热容量较大,能使得生物质充分燃烧,减少生物质带来的不良影响,二次风的喷入方式和管道布局对锅炉稳定运行和延长设备寿命十分重要。此外针对不同煤质特性的掺混效果表明,热值低的煤炭不适合进行直接掺混燃烧,会降低电厂发电效率。

## 1.3 直燃耦合缺陷

尽管生物质直燃耦合发电技术能提高着火性能,降低碳排放,有较高的经济和环境效益,但仍然存在以下3方面问题待解决:

1) 生物质适配性太低。由于不同生物质破碎方式一般不同,使用不同类型的生物质会导致破碎粒度不均匀,从而导致生物质颗粒在管道运输时发生堵塞,为保证颗粒的均匀和燃烧稳定,电厂往往只采用单一特性生物质,不能有效利用当地其余种类的生物质,且影响燃料的收购<sup>[30]</sup>,燃料灵活性相对较差。

2) 原料价格高。由于生物质价格与煤炭价格倒挂, 根据国能集团调研资料显示, 随着生物质燃烧项目的增加, 电厂的生物质收购成本从 50~150 元/t 升高至 300~400 元/t, 在江苏北部等地价格峰值甚至超过 400 元/t<sup>[31]</sup>, 而相反煤炭价格低落, 导致使用生物质掺混的电厂出现亏损。

3) 受热面易结焦结渣。生物质普遍含有丰富的碱金属和碱土金属, 灰熔点较低, 导致结渣问题。此外生物质在高温下碱金属升华与烟气中的 SO<sub>2</sub> 结合形成硫酸盐等物质, 消耗换热器表面氧化铁保护膜, 进而腐蚀管壁。在积灰和腐蚀的共同作用下, 易发生爆管事故, 增加企业维护检修成本<sup>[32]</sup>。同时生物质氯元素含量较高, 高温下易挥发并形成焦油粘接在锅炉受热面上, 导致受热面结焦并腐蚀。

## 2 生物质气化耦合煤粉燃烧

生物质气化与煤混燃发电技术是一种将生物质首先在特定的热力学条件下热解、氧化和重组转化为低分子烃的合成可燃气体, 然后再与煤粉混合燃烧发电的过程, 如图 6 所示。这种技术能够通过部分氧化将能量密度相对较低的生物质转化为能量密度较高的可燃生物气。相关研究表明, 在相同发电量情况下, 与生物质直接燃烧发电相比, 生物质气化与煤混燃发电能够降低 CO<sub>2</sub>、NO 和 SO<sub>2</sub> 的生成量<sup>[34]</sup>。因此, 生物质气化与煤耦合燃烧方式在环境保护方面具备较大的优势。此外, 与生物质煤粉直燃耦合时需要将生物质粒径控制 1 mm 以下<sup>[24]</sup> 相比, 采用

气化技术由于对生物质粒径要求不大, 扩大了生物质原料的可利用范围, 同时由于生物质灰未进入锅炉, 从而避免了由于生物质本身带来的结焦和高温腐蚀等问题。

GARG M 是国际上最早开展生物质气化的研究者<sup>[35]</sup>, 提出了通过生物质生成富含 H<sub>2</sub> 和 CO 的合成气(其合成工艺如图 7 所示)。目前主要使用的气化器包括固定床气化、流化床气化和气流床气化等。固定床气化技术指生物质在固定床中经过加热干燥, 热解, 氧化和还原, 最终生成可燃气体混合物的技术, 根据气流方向可分为下吸式固定床、上吸式固定床, 横吸式固定床等, 而比较广泛的是下吸式固定床和上吸式固定床<sup>[37]</sup>, 该技术产气热值较高。流化床气化主要有鼓泡床气化和循环流化床气化等, 该技术的产气热值可在一定范围内进行灵活调整。而气流床与前两者相比, 反应温度更高, 在 1 000 °C 以上, 产气热值较高, 合成气中焦油浓度较小<sup>[38]</sup>。

### 2.1 气化装置

1) 固定床气化器。固定床气化器示意图如图 8 所示。固定床气化炉与其他气化设备相比, 碳转化率高, 但生成合成气量较少。固定床气化器能很好地实现物料的热解气化, 但却存在着气化效率不高, 且会产生焦油, 影响气化设备的稳定运行。因此, 国内外关于生物质固定床气化的研究主要聚焦于生物质气化效率的提升, 以及焦油生成与排放控制机理。比如, ZHANG 等<sup>[39]</sup> 分析了在固定床上煤

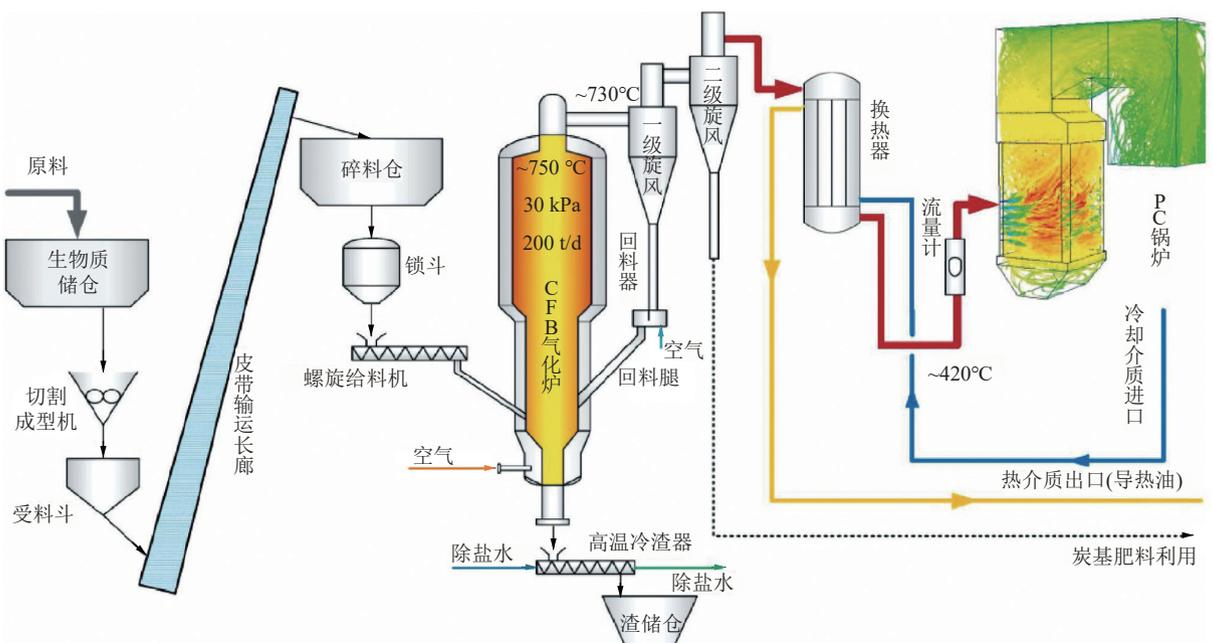
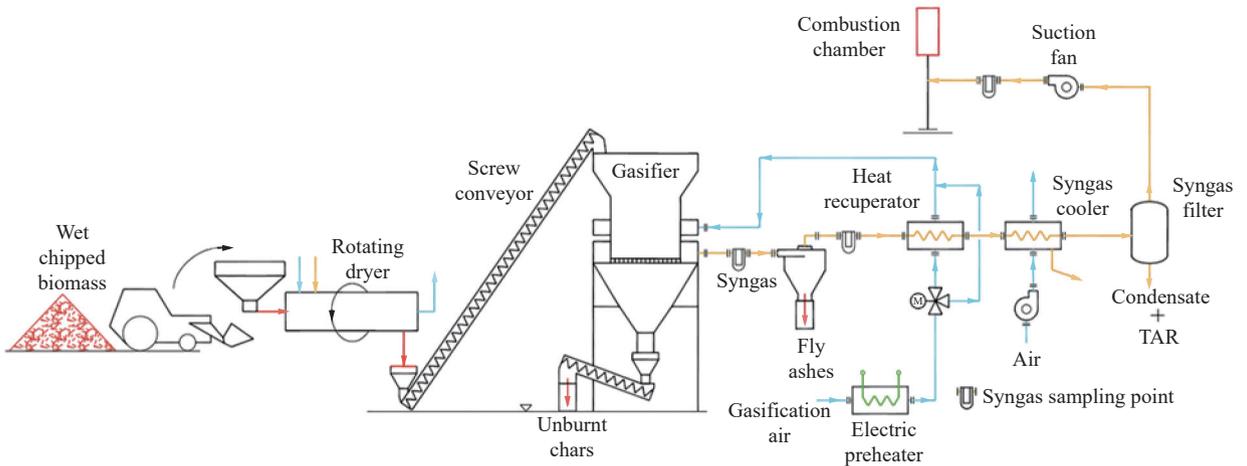
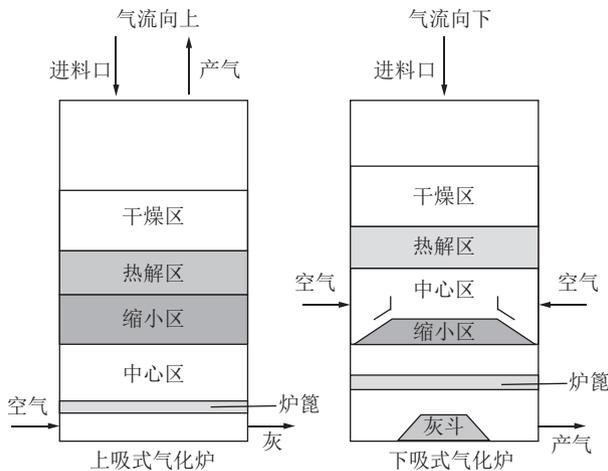


图 6 生物质气再燃烧过程<sup>[33]</sup>

Fig. 6 Biomass gas reburning process<sup>[33]</sup>

图 7 生物质气化燃烧工艺流程图<sup>[36]</sup>Fig. 7 The flowchart for biomass gasification and combustion process<sup>[36]</sup>图 8 固定床气化技术示意<sup>[37]</sup>Fig. 8 Schematic diagram of fixed bed gasification<sup>[37]</sup>

与生物质不同混合方式对裂解合成气成分的影响, 实验结果显示颗粒的混合效果越好, 协同效应越明显, 提高了产气效率。WANG 等<sup>[40]</sup> 通过下吸式固定床气化炉进行了富氧气化的实验研究, 发现增大氧浓度有利于生物质气化, 但生成气体中  $H_2/CO$  比率几乎不受影响。YANG 等<sup>[41]</sup> 探索了 Ni、Fe 和 Ca 对于生物质气化的催化作用, 结果显示固定床气化炉中添加铁后  $H_2$  产率最高, 且能长期维持良好的催化活性。而在固定床的焦油控制方面, 对于下吸式固定床气化炉, 由于气化剂流动向下, 焦油会在高温区继续热解为有效气体, 而在上吸式气化炉中, 焦油在产生后进入温度较低的干燥层, 导致焦油含量较多<sup>[42]</sup>。随着气化温度和停留时间的升高, 焦油产率会不断下降, 同时也导致了焦油中芳香类或多环芳烃化合物的含量增加<sup>[43]</sup>。此外随着气化压力的上升, 焦油含量不断减少, 增强了焦油的裂解转化。

2) 流化床气化器。流化床气化器示意如图 9 所

示。生物质颗粒在流化床气化器中停留时间长, 焦油相对较少, 且处理量大, 易实现工业化应用, 但存在碳损失较大, 耗氧量大的缺陷。关于流化床气化方面的研究, 国内外学者同样聚焦于焦油控制及气化参数调控。袁野等<sup>[45]</sup> 发现煤粉与生物质共气化能有效降低焦油含量, 在准东煤掺混比例为 40% 的条件下, 升高温度或提高空气当量比均有利于控制合成气中焦油量。黄亚继等<sup>[46]</sup> 研究了生物质的富氧流化床气化, 结果表明随着富氧程度的上升, 可燃组分增加, 合成气热值上升, 气化效率增大。钟振宇等<sup>[47]</sup> 利用鼓泡流化床对稻草颗粒和稻壳进行了低温空气气化研究, 结果表明, 为提高气化效果和产气率, 需要适当提高气化温度, 增大当量比。EMIOLA-SADIQ 等<sup>[48]</sup> 通过开展中试规模大豆壳颗粒流化床气化实验, 发现在 30% 的生物质负载情况下仍可进行较好的气化, 反应温度对合成气质量的影响最大。以上研究进一步证明了通过气化过程参数的调控可以改善气化效率同时优化合成气组分。此外, 针对流化床床层烧结固化问题, 国内外学者也有研究。ROBINSON T 等<sup>[49]</sup> 通过喷射鼓泡流化床气化实验研究发现木屑和 PET 混合气化能防止床层的烧结固化。廖新杰等<sup>[50]</sup> 针对树皮和秸秆进行了气化实验, 研究结果显示, 在空气当量比为 0.24 时气化效果最佳, 一次风温度的提升对气化效果没有显著影响, 但会明显提高炉膛底部温度, 容易导致 K、Mg 等碱金属在床层的富集结渣。

3) 气流床气化器。固定床气化器示意如图 10 所示, 生物质进入气流床后被高速气流分散, 单独热解及气化, 碳转化率可达到 95% 以上<sup>[52]</sup>, 气化压力高, 提高了合成气产量, 但由于喷嘴在高温区工作, 导致了寿命短, 投资高。气化床采用纯氧作气化剂, 与流化床相比气化剂气流速度更快, 生物质

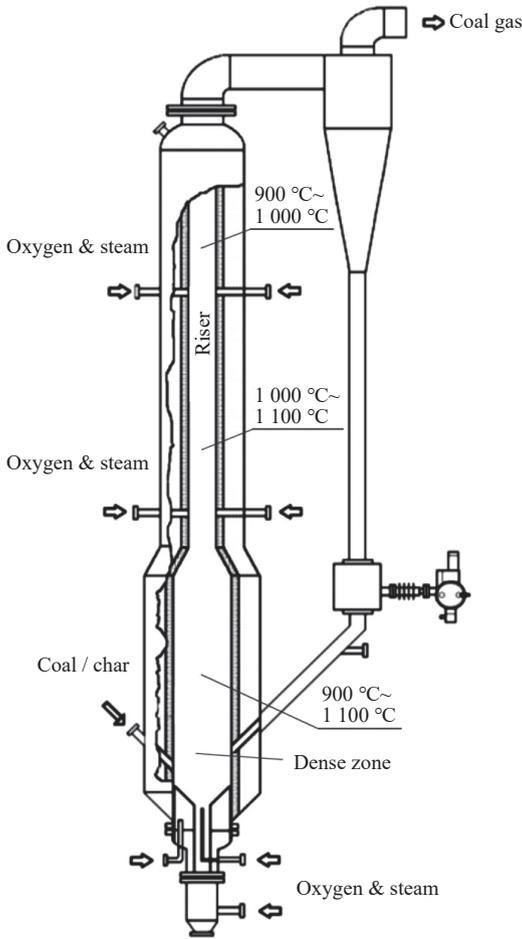


图 9 流化床气化器<sup>[44]</sup>

Fig. 9 Schematic diagram of fluidized bed gasifier<sup>[44]</sup>

进入后被喷头雾化, 瞬间经历干馏、燃烧、还原等阶段, 生物质颗粒在被气化的过程中随气体一起流动, 因此称气流床。同样的, 针对气流床, 生物质与煤粉共气化也得到了广泛的关注。周金豪等<sup>[53]</sup>模拟了生物质与煤共气化的工艺过程, 与煤粉相比, 生物质代替煤不会明显改变气化效果, 而在生物质质量分数为 20% 时, 气化效果最佳, 有效气产率达到最高。TROP 等<sup>[54]</sup>通过模拟发现生物质与煤气流床共气化的经济性比单独煤气化更优, 二氧化碳的净排放量更低。此外, 反应温度和气体氛围等也是气化过程的重要影响因素。周劲松等<sup>[55]</sup>使用小型气流床气化系统对木屑等生物质进行气化研究, 分析了反应温度对生物质组分和残炭特性的影响。PARK 等<sup>[56]</sup>发现, 当氧气浓度达到 30% 时, 气化效果最佳, 冷煤气效率达到 78.00%, 碳转化效率达到 80.24%。冯飞等<sup>[57]</sup>使用高温高压气流床气化炉进行分析发现, 较高的气化压力会阻碍挥发分从焦炭中析出, 同时焦炭表面孔径增大, 使得表面反应活性随反应时间始终增大, 提高了气化效率。然而一般来说, 气流床相比于流化床在 100 MW 到 500 MW 范围内冷煤气效率方面略低<sup>[58]</sup>, 这是因为气固两相

间的质量和热传递性能相对较差, 但由于气化床的可靠性和便捷性, 较小规模和低投资的项目更加适合。

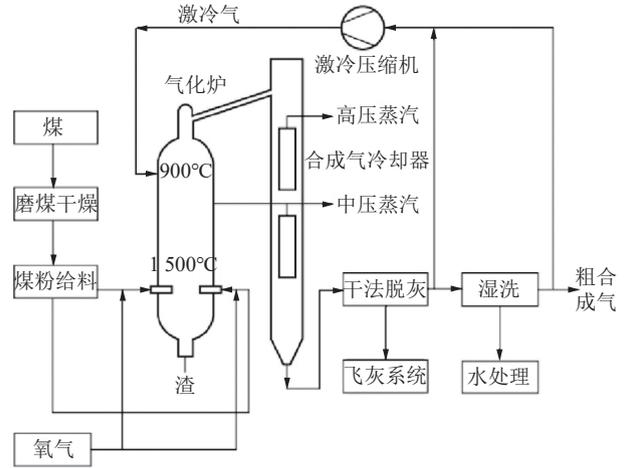


图 10 气流床示意<sup>[51]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of fluidized bed diagram<sup>[51]</sup>

## 2.2 气化耦合研究现状

在生物质气化与煤粉混燃方面, 为提高气化效率, 减少对锅炉运行影响, 国内外研究者重点分析了掺混比和喷入位置的影响, 取得了许多相关研究成果。KALISZ 等<sup>[59]</sup>分析了煤粉炉掺混低热值生物质合成气对锅炉性能的影响, 结果表明与直接耦合燃烧相比, 生物质气化后掺混燃烧会对锅炉的运行产生更小的影响, 并且合成气热值越高对锅炉运行的影响越小。SUTAR 等<sup>[60]</sup>设计开发了 4kW 和 2.5kW 的小型气化炉, 气化效率可达 80%。PARK 等<sup>[56]</sup>开展了富氧条件下的生物质气化以去除生物质气化中的焦油, 提高气化效率。实验结果表明, 当氧气浓度达到 30% 时, 气化效果最佳, 冷煤气效率达到 78.00%, 碳转化效率达到 80.24%。

我国的生物质气化混燃技术虽然起步较晚, 但发展较快并走向成熟<sup>[51, 57-61]</sup>。徐皓鹏等<sup>[61]</sup>通过 Fluent 模拟了 600 MW 锅炉内生物质合成气与煤粉混合燃烧的情况, 发现随着掺混比的上升, 烟气排放量上升, 但燃烧温度有所降低。李家护等<sup>[62]</sup>模拟了 300 MW 锅炉内生物质与煤粉掺混燃烧时生物质气喷入位置对温度场和 NO<sub>x</sub> 排放的影响, 结果发现, 随着喷入位置的下降, 煤粉燃尽区最高平均温度升高, 导致 NO 排放量上升。王西伦等<sup>[63]</sup>对 660 MW 超临界燃煤锅炉掺混燃烧进行了数值模拟, 结果表明, 与低热值的燃气共燃会导致飞灰含碳量上升, 降低煤炭的燃烧强度。

根据文献结果显示, 在生物质合成气与煤粉掺烧发电方面, 学者主要关注操作参数 (如锅炉负荷

和混燃比)以及结构参数(如喷嘴位置)对燃烧性能、污染物排放以及机组的影响。此外,相较于生物质直接与煤粉燃烧耦合,生物质气化耦合燃烧极大地扩展了生物质燃料的应用范围。另外,由于生物质合成气与煤粉耦合发电的门槛较低,适用于小容量规模的锅炉和大容量规模的锅炉,具有广阔的应用前景。这些研究结果对于推动生物质能源的有效利用、减少温室气体排放以及不同容量规模锅炉的设计与运行等方面具有重要意义。

### 2.3 气化耦合缺陷

综合文献显示,生物质气化与煤粉耦合燃烧存在的问题主要为以下3个方面:

1) 气化器焦油多,易堵塞。在生物质气化过程中异味大,在温度范围控制不精确时易产生焦油,而目前气体净化技术还不成熟,焦油去除难度较大,容易引起二次污染<sup>[64]</sup>,导致管道堵塞,清理困难。

2) 气化过程能耗大,生物质能量损失大。在生物质气化过程中必须使用风机进行气化剂输运,导致需要额外电力为风机供能,且产生的合成气出口温度达到800~900℃,无法得到直接利用<sup>[65]</sup>,此外生物质气化后有部分残炭,造成原料浪费。

3) 易降低锅炉热效率。由于生物质本身水分高于煤粉,在热解气化后,生物质合成气中的水分也以过热蒸汽的形式进入了燃煤锅炉,同时由于生物质气热值一般低于煤粉,易导致锅炉热效率的降低。

## 3 生物质燃料耦合策略

我国可作为能源利用的生物质总量约4.6亿t,包括农业废弃物资源量约2亿t标准煤,林业废弃物资源量约2亿t标准煤,其余相关有机废弃物0.6亿t标准煤<sup>[66]</sup>。

2023年非化石能源在我国电力装机容量结构中的占比达到50.9%<sup>[67]</sup>,但在发电量中的占比则仅为36.2%,其中生物质发电装机容量占比4.4%<sup>[68]</sup>,相比其他能源类型而言具有较大的发展空间。

从目前广泛存在的生物质资源看,可以大致分为林业资源、农业资源、生活污水和工业有机废水、城市固体废弃物和畜禽粪便等五大类,其中林业资源、农业资源和垃圾污泥是目前生物质电厂主要使用的原料,畜禽粪便目前一般通过生物转化技术转化为沼气后作为气体燃料进行燃烧。

1) 林业生物质资源。林业生物质资源是指森林生长和林业生产过程提供的生物质能源,主要是天然木材和木材废弃物,加工产生的废弃物相对较少。相对于农业生物质,林业生物质资源具有较高的木质燃料密度和热值,木质燃料的热值是秸秆的

近2倍<sup>[69]</sup>,这使其在能源利用方面具有明显的优势。此外,林业生物质资源的总量不容易受到季节影响,为生物质可持续利用提供了更为稳定的能源来源。然而,林业生物质资源也存在一些挑战,例如水分较高(15%~45%)<sup>[66]</sup>、形状不规则,这给其收集、运输和燃烧过程带来一定的困难。林业生物质在发电时一般掺混比在30%以下,通过对林业生物质资源进行干燥和压缩加工为成型生物质燃料,可以提高其泛用性,使其在直燃耦合和气化耦合两种方式上均能得到很好利用,并可实现100%生物质燃烧发电。特别地,林业生物质资源适合循环流化床锅炉的直燃耦合方式,炉膛的热容量能减少水分对炉膛热效率的影响。

2) 农业生物质资源。农业生物质能资源是指农业作物(大豆、芒草等),农业生产过程中的废弃物(秸秆、稻草等)和农业加工业的废弃物(稻壳、棕榈壳等)。农业生物质含硫量低,可再生,成本相对较低,与林业生物质相比分布集中,能较好的进行采集和统一处理。但农业生物质区域性和季节性明显,导致生物质处理成本居高不下。针对于农业生物质,可以通过致密压缩成型处理提高其能量密度,生物技术转化为沼气,此外也可以在简单处理后进行掺混燃烧,针对于棕榈壳等热值较高的生物质可采取直燃耦合模式,英国的Tibury电厂使用棕榈壳生物质达到了100%的掺混比,而对于秸秆和稻壳等可采取低掺混比气化间接耦合模式,也可采取对机组运行影响较小的直燃耦合中的独立喷燃技术,十里泉电厂在完成生物质独立喷燃技术改造后可实现燃煤标杆上网电价。

3) 垃圾污泥生物质资源。垃圾污泥生物质资源包括城市固体废弃物等垃圾资源和洗煤污泥等有机物含量较多的污泥资源。城市固体有机废弃物的组成成分是非常复杂的,受到多种因素的影响,必须综合考虑当地居民生活水平、能源消

费结构、城镇建设、自然条件、传统习惯以及季节变化等因素,才能制定出针对性的废弃物管理方案。污泥是一种由有机残片、细菌体、无机颗粒和胶体等组成的非均质体,难以通过沉降进行彻底的固液分离,污泥相对而言量比较稳定,不受季节影响,但由于其水分过高,作为能源难以被直接利用。垃圾和污泥需要通过干燥成型处理之后才能真正作为燃料,但一般掺混比仍较低,污泥与煤粉在共磨时易造成磨煤机落煤斗堵塞,因此必须进行单独粉碎,此外由于垃圾和污泥存在较多的无机物,因此直接进行气化处理经济性不高,目前电厂使用该工艺较少。华能福州电厂在2022年通过污泥与煤

粉的直燃耦合实现了污泥的全封闭,一体化处理<sup>[70]</sup>,荷兰的 Maasvlakte 电厂在 2019 年通过共管工艺实现了 15%~30% 的污泥为主的生物质掺烧<sup>[71]</sup>。

#### 4 煤粉与生物质的耦合反应规律研究

表 1 给出了部分种类生物质与煤粉的物理化学

性质。从化学元素组成角度看,生物质中富含碳水化合物,因此,大多数生物质干燥时的 O 质量分数较多,约为 40%,C 元素作为生物质中的主要元素,在干燥时质量分数在 50%左右,H 质量分数在 5%~7%,同时也含有一定量的 N、S 和 Cl 等元素,通常质量分数都小于 1.5%。

表 1 常见的生物质与煤物理化学性质对比<sup>[72]</sup>

Table 1 Comparison of common physical and chemical properties of biomass and coal<sup>[72]</sup>

项目	木屑	草	稻秆	果壳	树皮	煤	
工业分析/%	$M_{ar}$	15.90	30.70	10.40	9.00	13.00	8.10
	$A_{ar}$	0.50	2.49	7.71	9.83	3.22	10.84
	$V_{ar}$	70.30	55.78	66.42	64.78	64.09	31.13
	$FC_{ar}$	13.29	11.02	15.48	16.40	19.69	49.93
元素分析/%	$\omega(C_{daf})$	51.20	49.60	48.80	50.40	53.80	79.40
	$\omega(H_{daf})$	6.15	5.72	5.99	6.28	5.84	5.29
	$\omega(O_{daf})$	42.40	43.90	43.90	42.60	40.00	12.20
	$\omega(N_{daf})$	<0.5	<1.5	<1.5	<1.5	<0.5	1.5
	$\omega(S_{daf})$	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1.4
	$\omega(Cl_{daf})$	0.027	0.196	0.196	0.496	0.022	0.250
	$\omega(Si_{daf})$		0.678	0.678	1.703	0.042	2.515
	$\omega(Al_{daf})$		0.010	0.010	0.158	0.019	1.312
	$\omega(Fe_{daf})$		0.018	0.011	0.142	0.009	0.726
	$\omega(Ca_{daf})$		0.127	0.127	0.469	1.362	0.542
	$\omega(Mg_{daf})$		0.053	0.053	0.182	0.073	0.167
	$\omega(Na_{daf})$	0.003	0.032	0.032	0.061	0.004	0.114
	$\omega(K_{daf})$	0.068	0.763	0.763	1.163	0.163	0.129
	热值/(MJ·kg <sup>-1</sup> )	$Q_{LHV,daf}$	19	18.5	18.5	18.1	19.7

针对于生物质的燃烧特性,国内外学者也开展了众多研究,生物质相比于煤粉着火温度更低,笔者选取了几种不同类型的生物质,表 2 对比了多种不同类别的生物质与煤粉的燃烧性能。闫升太等<sup>[78]</sup>选取灰分含量最小的柏木炭进行动力学分析发现,指前因子对温度的敏感性高于对反应面积或碳氧比的敏感性。

在生物质与煤混燃时,研究结果表明生物质与烟煤直燃耦合能有效改善煤粉的燃烧特性,降低其着火温度和燃尽温度,提高燃尽指数及燃烧特性指数<sup>[79]</sup>。但是,掺混燃烧也会影响燃烧室的温度,相比纯煤燃烧温度更低,但高于生物质燃烧温度,赵嵩颖等<sup>[80]</sup>的研究表明,玉米秸秆、稻秆等农业生物质颗粒与煤混合燃烧的超过 15% 后,燃烧室的最高

温度比单独燃煤时降低至少 150 K。王华山等<sup>[81]</sup>分析无烟煤与浒苔的热重曲线发现,随着掺混比的上升,曲线向纯生物质燃烧方向靠近,在掺混比 25% 时存在明显的协同效应,有助于混合燃料燃烧。

煤粉在加入生物质进行掺混后燃烧特性和热化学反应机理会发生变化,姚锡文<sup>[82]</sup>发现在掺混后灰熔点发生了降低,玉米秸秆与煤粉 25% 的掺混比时,当温度达到 1 000 °C,混燃灰就出现轻微熔融现象,这是由于生物质中 K、Fe、Ca 元素在燃烧中与灰渣形成了低温共熔体。鲁光武等<sup>[83]</sup>使用 Coats-Redfern 方法计算发现,生物质与无烟煤直燃耦合的活化能远低于无烟煤单独燃烧时的活化能。生物质的孔高孔隙率、燃烧前期挥发分的逸出和后期碱金属

表2 不同生物质与煤粉的燃烧性能对比<sup>[72-77]</sup>Table 2 Comparison of combustion performance of different biomass and pulverized coal<sup>[72-77]</sup>

项目	耗牛粪	高山松	稻壳	玉米秸秆	烟煤	无烟煤
着火温度/℃	275	308	266	253	411	541
燃尽温度/℃	403	496	496	478	618	727
最大燃烧效率/(%·min <sup>-1</sup> )	8.93	19.65	7.81	7.42	10.41	10.31

和碱土金属对焦炭燃烧的催化作用共同导致了活化能的下降<sup>[84]</sup>。韩冰<sup>[85]</sup>通过实验发现,有机官能团的结构对燃烧性能有很大影响,随着温度上升,秸秆和竹子的纤维素分解,含氧官能团降低,导致在燃烧时主要以焦炭的燃烧阶段为主,秸秆和竹子燃烧时只有少量的氢原子存在于脂肪族结构的主干或分支中,说明秸秆和竹子的挥发分较为稳定,不宜在低温下分解,使得生物质可以在低温区为煤的燃烧提供热量。而在焦炭主导燃烧的高温区,刘浪等发现<sup>[84]</sup>微晶结构会朝着石墨化的方向进行,趋于有序化,在加入生物质之后,为焦炭提供了额外的H和O原子,改善了焦炭的燃烧反应,同样的,邹海旭等<sup>[86]</sup>也发现麦秆在高温下会产生苯氧基自由基,进攻煤分子,加快煤的聚解。

学者们发现,在掺混比较低时,生物质对煤粉燃烧的性能为促进作用,而在继续提升掺混比后,协同效应会下降<sup>[84]</sup>。袁野<sup>[87]</sup>研究发现,在提高掺混比后稻壳灰中大量的SiO<sub>2</sub>会阻碍固定碳的燃烧,抑制稻壳与煤粉的协同作用。刘巧霞等<sup>[88]</sup>通过实验发现在掺混比为30%时,核桃壳掺混煤粉后纤维素分解的活化能降低了23.3%,但在继续提升核桃壳掺混比后,活化能相比于单独纤维素分解升高了,说明二者产生了抑制作用。

## 5 生物质与煤粉掺混燃烧污染物排放特性

### 5.1 硫氧化物排放特性

在单独燃烧煤粉时,煤中的可燃硫分会在高温氧化气氛中转化为SO<sub>2</sub>。其中,有一部分SO<sub>2</sub>会与煤粉中的碱金属化合物发生化学反应,形成硫酸根后留存于灰渣中,同时,还有少量的SO<sub>2</sub>会被氧化为SO<sub>3</sub>气体,占SO<sub>2</sub>的2%以下<sup>[89]</sup>。可燃硫分由最活泼的小分子和具有较高活性的结构链开始断键氧化,在加热过程中,它们会释放出S<sub>n</sub>和H<sub>2</sub>S气体,随着反应的进行,挥发性物质逐渐释放。高温气体会深入煤炭内部导致可燃硫分完全氧化,而不可燃的煤质会在灰渣中积聚并排出。在单独燃烧生物质时,由于生物质含硫量较少,木屑的含硫量在煤粉

的30%以下<sup>[90]</sup>,导致生物质燃烧排放时SO<sub>2</sub>含量较低,此外生物质颗粒中含有较多碱金属化合物,能较好的吸附SO<sub>2</sub>气体固定于灰渣中。

生物质对于煤粉燃烧时硫的迁移和转化特性具有协同作用,影响因素较多,得到了学者的广泛关注<sup>[91]</sup>。在生物质与煤粉掺混过程中,输入条件如生物质种类、煤炭含硫量以及生物质掺混比将直接影响SO<sub>x</sub>放浓度,其他操作条件如氧气浓度和运行温度等因素的将间接影响SO<sub>x</sub>的排放浓度。FRYDA等<sup>[92]</sup>研究了肉骨粉与三类不同主燃料共燃,结果显示,肉骨粉燃烧后的灰烬并未产生明显的脱硫效果,并将SO<sub>2</sub>的减少归因于肉骨粉的含硫量更低。KWONG等<sup>[93]</sup>研究了稻谷与煤粉共燃过程中气体污染物的变化,也得到了相似的结论。然而,XIE等<sup>[94]</sup>在30kW循环流化床上的掺混燃烧实验发现SO<sub>2</sub>排放量与燃料硫含量之间呈非线性增长关系,同样的,MOLCAN等<sup>[95]</sup>采用火焰成像技术研究了锯末和煤粉掺混燃烧,结果发现掺混生物质后SO<sub>2</sub>的排放浓度下降。更进一步的,徐金苗等<sup>[96]</sup>以神华煤和玉米秆、树皮为混燃样品,建立了SO<sub>2</sub>释放量与混燃比的关系模型,发现掺混后SO<sub>2</sub>的排放量下降主要是由于生物质与煤粉的协同作用,而非仅仅是由于低硫生物质燃料。关于掺混燃烧后SO<sub>2</sub>排放量下降的原因,目前可以认为是多方面因素影响的结果,包括协同作用改变化学反应和燃烧过程、生物质中碱金属的固硫作用、生物质中催化剂促进SO<sub>2</sub>转化为低价态硫化物、燃烧后灰的吸收作用以及氮氧化物的作用等。

1) 碱金属对硫氧化物排放的影响。在掺混燃烧过程中,生物质中的碱金属化合物如CaO、MgO、CaCO<sub>3</sub>等在高温下对于SO<sub>2</sub>有很好的吸收作用<sup>[97]</sup>。刘兆萍等<sup>[98]</sup>对比了不同碱金属含量的生物质在掺混燃烧后SO<sub>2</sub>的排放量,发现K、Ca、Mg三种元素化合物含量较高的草本类生物质比化合物含量较低的木本类生物质对SO<sub>2</sub>析出和吸收影响更大。VAN LITH<sup>[99]</sup>和柏松松<sup>[100]</sup>等认为生物质焦炭与燃料中的硫之间可以在发生二次反应后在底灰中发生固硫反应,首先释放的SO<sub>2</sub>被焦炭较大的比表面积和孔隙结构捕获,之后与碱金属反应形成硫酸盐。WANG等<sup>[101]</sup>通过对烟气中颗粒物的化学成分分析发现,碱金属氯化物发生的轻微氯磺化反应使得SO<sub>2</sub>含量下降。LIU等<sup>[102]</sup>模拟了流化床上生物质与煤粉掺混燃烧时SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的排放情况,结果发现,生物质的低硫特性和高Ca/S能有效的降低SO<sub>2</sub>浓度,同时降低了N<sub>2</sub>O和NO的排放量。薛则禹<sup>[103]</sup>通过热力学软件、管式炉和流化床燃烧试验,研究发现混烧

时由于S元素受到碱金属K硫酸盐化与氧气氧化的竞争,SO<sub>2</sub>的排放量在高温段呈现波动趋势,在低温段能更好的进行固硫作用。

2) 温度对硫氧化物排放的影响。温度对生物质与煤混烧过程中固硫效果有一定的影响。具体影响程度取决于燃烧方式和生物质种类<sup>[76-77, 79]</sup>。因此,根据具体情况选择合适的温度范围,综合考虑燃料组成和燃烧工艺参数,才能最大程度地提高生物质与煤混烧过程中的固硫效果。

张小英等<sup>[104]</sup>和JIA等<sup>[105]</sup>发现生物质与煤粉在流化床锅炉上共燃时,生成SO<sub>2</sub>的体积浓度随床温的上升而增加,相比于直接进行煤粉燃烧,添加生物质后SO<sub>2</sub>的减排率随床温的升高呈起伏变化,温度850℃时减排率最大。彭瑞祥等<sup>[26]</sup>通过实验分析发现,随着燃烧温度从800℃上升到1000℃,挥发分SO<sub>2</sub>和焦炭SO<sub>2</sub>的析出速率上升,此外高温导致煤灰和生物质灰中固硫物质分解也使得SO<sub>2</sub>排放量上升。YANIK等<sup>[106]</sup>发现在900~1100℃范围内,橄榄树枝干煤粉混燃释放SO<sub>2</sub>几乎不受温度的影响,而家禽粪便等生物质与煤粉混燃释放SO<sub>2</sub>随温度的升高而增加。

3) 其它因素对硫氧化物排放的影响。文献调查显示,氧气含量会影响SO<sub>2</sub>排放。BAGOUR等<sup>[107]</sup>研究了流化床上湿度和过量空气比对白松木与加拿大褐煤共燃对有害气体排放的影响,结果表明木材生物质与挥发分含量高的煤炭掺混时能大量减少SO<sub>2</sub>排放,且增加过量空气会导致SO<sub>2</sub>排放量的上升。而张小桃等<sup>[108]</sup>的研究却显示了相反的结果,SO<sub>2</sub>排放浓度随炉膛过量空气系数的增加而减少。安敬学等<sup>[109]</sup>通过实验发现掺混燃烧含氧量在1.9%~7.9%区间内,随着含氧量的升高,SO<sub>2</sub>排放量趋势先升高后下降,且含氧量在3%时,SO<sub>2</sub>排放量达到峰值。KEIVANI等<sup>[110]</sup>在富氧混燃实验中发现,氧浓度体积比在21%~27%之间时,能有效降低SO<sub>2</sub>排放量。

除了氧气对SO<sub>2</sub>排放的影响外,燃烧时空气中其他气体成分也对SO<sub>2</sub>的排放有影响。张啸天<sup>[111]</sup>通过循环流化床研究了生物质与煤富氧混合燃烧,结果表明,再循环烟气中CO/NO/SO<sub>2</sub>组合对污染物的生成具有协同效应,可以降低NO和SO<sub>2</sub>的排放。燃料粒径的大小对混烧的固硫作用也有影响,杨晋川<sup>[112]</sup>通过小型流化床进行油页岩、褐煤和混合样品的污染物气体释放试验,结果表明,燃料粒径增大时,SO<sub>2</sub>排放随时间仍呈现单峰趋势,且排放峰值逐渐上升,同时释放SO<sub>2</sub>时间延后。

## 5.2 氮氧化物排放特性

在单独进行煤粉燃烧时,氮污染物主要为氮氧化物,其中NO含量占90%以上,NO<sub>2</sub>其次,占5%~10%,此外还有少量的N<sub>2</sub>O,占1%左右。NO<sub>x</sub>的形成机理主要有热力型NO<sub>x</sub>、快速性NO<sub>x</sub>和燃料型NO<sub>x</sub>三种,N<sub>2</sub>O的生成与燃料型NO<sub>x</sub>的生成以及还原反应密切相关。煤中氮元素主要以有机氮的形式存在,吡咯氮、吡啶氮和少量的季氮是有机氮的主要形式,在煤燃烧过程中,NO<sub>x</sub>和N<sub>2</sub>的释放量受到氮的化学形式影响<sup>[113]</sup>。目前掺混生物质的电厂中一般使用农林类生物质,农林类生物质氮元素存在形式可分为蛋白质氮和非蛋白质氮<sup>[114]</sup>。在单独燃烧多种类型的生物质时,氮氧化物浓度波动较大,难以使用统一的脱硝方式。由于生物质与煤粉在氮元素存在形式上存在差异,在掺混时不能直接通过煤粉调控方式对二者耦合燃烧的NO<sub>x</sub>进行调控,需要考虑在多种因素影响下二者的协同作用。

首先分析燃料中氮元素对氮氧化物排放的影响。REN等<sup>[115]</sup>指出氮氧化物排放中80%属于燃料型氮氧化物。ZHAO等<sup>[116]</sup>分析了不同海洋藻类生物质与煤粉混燃特性,发现氮氧化物的排放量与生物质内氮含量没有明确的因果关系。关于掺混比对氮氧化物排放的影响,国内外学者研究结果并不一致。张定海<sup>[117]</sup>研究了生物质与煤粉的直燃耦合与气化间接耦合,实验结果表明,不同煤种的氮氧化物浓度变化规律一致,生物质掺烧比例越大,氮氧化物排放越低,生物质气送入锅炉后,会导致原来主燃料飞灰含碳量上升,燃尽度下降。同样地,WANG等<sup>[118]</sup>在使用氧燃料燃烧技术进行混合燃料燃烧时也发现随着掺混比的上升,氮氧化物排放量下降。掺混比对氮氧化物的影响还与煤炭种类有关,LIU等<sup>[119]</sup>通过CFB数值模拟分析了氮氧化物与煤种的关系,结果显示,无烟煤与玉米秸秆掺混燃烧后氮氧化物的排放浓度随着秸秆掺混比的增加而升高,而相反的,褐煤与玉米秸秆和烟煤与玉米秸秆掺混燃烧后氮氧化物的排放浓度随着秸秆掺混比的增加而减少。

1) 碱金属对氮氧化物排放的影响。文献调研显示,生物质中含有的碱金属(Na、K、Ca等)及其化合物,对NO、N<sub>2</sub>O的还原反应具有催化作用,从而减少了有害气体的排放。李尚等<sup>[120]</sup>指出碱金属及碱土金属还可以通过催化燃料氮向N<sub>2</sub>和焦炭氮转化,降低气态含氮产物中NH<sub>3</sub>、HCN的比例,从而抑制了NO<sub>x</sub>前驱物的释放。

ZHAO等<sup>[121]</sup>发现Na对NO在焦炭表面的还原反应有较强的催化作用,而对NO与CO的反应影

响不大。WANG等<sup>[122]</sup>通过携带流反应器研究了固有矿物质与额外添加碱金属对氮氧化物的影响,结果发现催化效果呈现如下顺序:Na > K > Fe > Ca。刘兆萍等<sup>[98]</sup>认为在添加碱性物质后能有效提前NO整体析出时间,在生物质与煤混合燃料中添加K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>能降低NO排放总量,但添加MgO后却促进了NO的排放。ZHAO等<sup>[123]</sup>和XU等<sup>[124]</sup>使用密度泛函理论分析了K元素对NO还原的影响,发现K元素通过增加焦炭表面电子密度,提高了电子给予能力,从而降低了NO与焦炭非均相反应能垒,提高了反应平衡常数。

温正城等<sup>[125]</sup>通过量子化学分析证明金属钙对NO的还原活性优于焦炭。徐明新等<sup>[126]</sup>根据中试平台流化床实验结果发现,添加脱硫剂石灰石进行共燃会造成NO的略微升高。张丽徽等<sup>[127]</sup>进行了实验室规模流化床生物质与煤粉混燃实验,结果表明使用额外添加了有机钙的干化污泥生物质能显著提高脱硝率。Li等<sup>[128]</sup>研究了在生物质燃烧过程中添加CaO的脱硝效果,发现在825℃时脱硝效率可达到98%,但随着Ca循环次数的增加,脱硝效率会缓慢下降。

2) 温度对氮氧化物排放的影响。部分学者认为提高混燃温度会加剧NO排放。肖申等<sup>[129]</sup>开展了生物质化学链燃烧实验研究,证明生物质中的氮元素主要存在于蛋白质和氨基酸中,加热后产生的挥发分为主要氮源,温度升高加剧了NO和NO<sub>2</sub>的生成,但N<sub>2</sub>O的生成速率与温度相关性不大。ZHANG等<sup>[130]</sup>分析污泥与煤粉混燃时发现在从700~900℃,NO排放量增加缓慢。但部分学者发现了其他现象,徐明新<sup>[126]</sup>借助小型鼓泡流化床开展混燃实验,发现提高燃烧温度会提高再循环烟气NO的还原率。ZHANG等<sup>[131]</sup>进行了干锯木厂污泥与煤粉的混燃,发现随着温度上升,NO排放量先升高后下降,在900℃时排放因子达到最高。

3) 氧浓度对氮氧化物排放的影响。部分学者认为提高氧浓度会提高NO排放浓度。HOFBAUER等<sup>[132]</sup>和DUAN<sup>[133]</sup>等发现提高空气含氧量从21%到40%,NO排放浓度呈现升高趋势,这可能是氧气浓度较高导致了燃烧温度升高。但是另一部分学者认为提高氧气浓度会导致NO排放浓度呈现不同趋势。HU等<sup>[134]</sup>通过燃烧实验发现随着氧气含量从20%到80%增长时,氮氧化物含量先升高,并在过量空气系数达到0.8后急剧下降。张小桃等<sup>[108]</sup>以骏龙电厂为例分析了过量空气系数与NO排放的关系,发现随着过量空气系数增大,NO排放浓度先增大后下降。

在富氧气氛下(O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>),由于CO<sub>2</sub>浓度升高,而CO<sub>2</sub>比热容大于N<sub>2</sub>比热容,降低了混合燃料燃烧温度,减少了N<sub>2</sub>在高温下发生氧化反应的速率,而同时高浓度的CO<sub>2</sub>导致了较高的CO,促进了NO的还原,最终使得NO排放量下降<sup>[135]</sup>。考虑到富氧燃烧消耗燃料更多,因此在燃烧同样燃料时,排放NO量更低于空气气氛<sup>[136]</sup>。

4) 其他因素对氮氧化物排放的影响。除以上提到的氧浓度、温度等因素的影响之外,还有一些其他因素也会对氮氧化物排放产生重要影响,比如富氧燃烧气氛中的CO、高浓度CO<sub>2</sub>、再循环烟气中的NO等。WANG等<sup>[137]</sup>分析发现富氧燃烧技术中CO对NO的还原起着重要的催化作用,而CO的浓度主要由焦炭气化反应决定。TOURUNEN等<sup>[138]</sup>也提出焦炭和CO对NO的还原十分重要。DE DIEGO等<sup>[139]</sup>发现富氧燃烧技术中大约60%~70%的再循环NO被还原为N<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O,且转化为N<sub>2</sub>O的比例低于5%。张恒等<sup>[140]</sup>研究了平凉煤与麦秆混合燃料在管式炉上氮元素的迁移特性,结果显示,在高温CO<sub>2</sub>气氛下,半焦中氮含量降低,NH<sub>3</sub>以及N<sub>2</sub>的产率增加,麦秆的HCN产率升高。

此外,有研究者也发现,氮氧化物排放还受到烟气中SO<sub>2</sub>浓度的影响。CHANG等<sup>[141]</sup>发现SO<sub>2</sub>在焦炭表面的化学吸附导致了活性位点的增加,从而提高了NO的转化率。DE DIEGO等<sup>[139]</sup>发现SO<sub>2</sub>通过抑制CO氧化使得CO浓度提高,进而促进CO对NO的还原作用。柳殿彬<sup>[142]</sup>模拟发现再循环SO<sub>2</sub>可以明显强化NO的还原反应,并提出在掺混燃烧中额外添加硫酸铵以控制Cl腐蚀和保证NO<sub>x</sub>超低排放的技术思路。此外,水蒸气含量对氮氧化物的排放也有着影响,田路泞等<sup>[143]</sup>发现在额外添加水蒸气后,NO还原反应增强,NO排放量下降,但由于水蒸气会加速CaO的烧结,降低了CaO对NO还原反应的催化作用,导致随水蒸气含量从5%升高到20%,NO排放量虽然下降,但趋势逐渐放缓。ZHU等<sup>[144]</sup>研究了空气中水蒸气含量对流化床掺混燃烧的影响,结果显示,在氧含量小于30%时,由于水蒸气与焦炭的水煤气反应,生成的还原性气体降低了氮氧化物排放量,但在氧含量大于40%时,高氧高温环境促进水蒸气产生OH自由基,反而增加了氮氧化物排放量。

除了入炉空气成分对氮氧化物排放有影响之外,燃料的成分和粒径等因素也对氮氧化物排放有着一定的影响。张小桃等<sup>[145]</sup>研究发现生物质中的烃类化合物与降氮效果呈现正相关,在再燃区能促进NO向N<sub>2</sub>的转化。王俊等<sup>[29]</sup>模拟600MW锅炉

中不同粒径生物质颗粒对于  $\text{NO}_x$  排放的影响,发现颗粒粒径的增大会降低生物质燃尽率,导致出口  $\text{NO}_x$  含量的增大。

### 5.3 颗粒物排放的特性

由于生物质燃料碱金属成分较高,在控制烟气出口  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  浓度的同时也容易导致在扩散过程中发生气相凝结,进而形成颗粒物,其形成途径见图 11 所示。研究指出生物质燃烧产生的颗粒物含有多环芳烃,易对人体产生危害<sup>[146]</sup>。 $\text{PM}_{1-10}$  中的难溶性成分主要由 4 种耐火元素 (Al、Ca、Mg、Fe) 与 Si 元素组成<sup>[147]</sup>,而小粒径的颗粒物  $\text{PM}_1$  主要由 S、P 的碱金属硫酸盐形态和磷酸盐形态组成<sup>[148]</sup>。BOMAN 等<sup>[149]</sup> 分析了六种不同的生物质颗粒类型,发现排放颗粒主要为  $\text{PM}_1$ , 占据约 90% 的质量比。同时,对比燃煤锅炉,生物质锅炉会排放更多颗粒物,耿春梅等<sup>[150]</sup> 开展了热功率近似的木质、秸秆和煤粉锅炉的颗粒物排放测试,结果显示两个生物质锅炉颗粒物排放不能达到北京市大气污染物排放标准,颗粒物中  $\text{PM}_{2.5}$  相比于煤粉锅炉平均排放因子高 36.84%, 而  $\text{PM}_{10}$  低 30.42%。

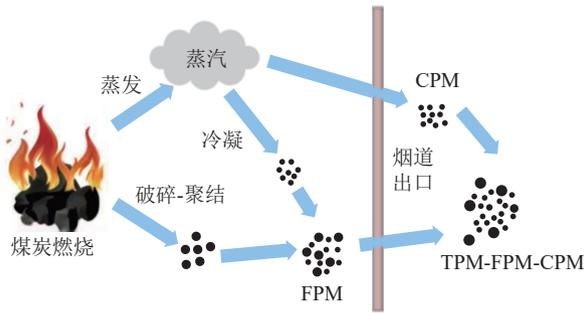


图 11 颗粒物形成机理<sup>[23]</sup>

Fig. 11 Particulate matter formation mechanism diagram<sup>[23]</sup>

此外由于目前使用生物质大多为木本类生物质,三素组分(纤维素、半纤维素和木质素)含量较高,使得在挥发分在燃烧初期时或炉膛温度较低时会产生大量有机挥发分,在成核后凝聚为有机质颗粒物<sup>[151]</sup>。SIMONEIT 等<sup>[152]</sup> 研究发现颗粒物主要由纤维素降解产生的单糖衍生物产生,也证明了三素是重要的颗粒物排放源头之一。充分燃烧对于颗粒物减排十分重要,LESKINEN 等<sup>[153]</sup> 通过实验发现在高效燃烧的条件下,排放颗粒物尺寸小,  $\text{PM}_1$  排放量也下降。

不同类型生物质的混合往往能通过相互作用降低碱金属生成颗粒物的反应趋势,杨伟<sup>[154]</sup> 研究发现通过添加富 Si 元素的生物质并进行成型加工能促进硅酸盐反应的生成,进而有效减少  $\text{PM}_1$  生成,其中稻壳和樟木混合成型产生的交互作用能极大地降

低  $\text{PM}_1$  的排放量。WANG 等<sup>[155]</sup> 发现污泥对麦秆的颗粒物排放存在抑制作用,促进了麦秆中 K 元素从原先低熔点硅酸盐向高熔点的钾铝硅酸盐的转化,从而使得原本的颗粒物能固定在灰烬中。同样的,SKOGLUND 等<sup>[156]</sup> 通过污泥与农业生物质的混合,也发现污泥能促进颗粒物向高熔点硅酸盐的转化。

文献分析发现,与煤粉相比,生物质燃料在燃烧时颗粒物排放量更高。分析生物质组分特征可以发现,改善碱金属和三素对颗粒物的影响能直接降低其排放量,在生物质燃料中加入添加剂或混合不同类型生物质能缓解生物质燃烧过程的颗粒物的排放。此外,改善燃烧设备从而提高燃烧性能可以减少颗粒物的排放,这是改善颗粒物排放的通用方法,张志清等<sup>[157]</sup> 分析高温过程颗粒物形态变化发现颗粒物在高温下产生了表面断层和颗粒物破碎现象,导致粒径下降。而在锅炉温度过高后,由于生物质灰渣熔点相对较低,易发生烧结,空气中颗粒物浓度上升<sup>[158]</sup>,因此需要控制炉膛温度以避免局部高温导致的颗粒物排放。同时不难发现,目前针对与颗粒物排放的研究主要集中在木质类生物质,而对秸秆类等其他生物质的颗粒物减排研究甚少。

## 6 燃煤耦合生物质对设备的积灰、结渣和腐蚀现象研究

生物质锅炉燃烧对设备的影响主要可分为积灰、结渣和壁面腐蚀三方面,三者相互影响,是制约生物质与煤粉耦合燃烧推广的重要因素,三种问题的成因如图 12 所示。

1) 积灰现象。受热面产生积灰现象的几种途径如图 13 所示。当生物质受热并燃烧时,活跃态碱金属元素会通过挥发分形式析出,碱金属元素在燃烧过程中以氯化物、硫酸盐、氢氧化物、单质和氧化物的形式存在。当气态的碱金属盐遇到换热面时,会与温度较低的换热面碰撞并凝固为低熔点的  $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  等固态颗粒,逐渐附着在换热面上形成积灰。积灰可分为高温、中温和低温受热面积灰<sup>[160]</sup>。高温粘接性积灰主要集中在温度  $700 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$  及以上的对流换热面上,在化学反应和烧结的作用下形成坚固的积灰层,难以通过吹灰的方式进行清除。中温松散型积灰通常集中在  $300 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$  间,低温受热面积灰则主要集中在烟道尾部的空气预热器上。烟温低时硫酸盐较为稳定,在接触到换热壁面后形成灰颗粒凝结、沉积下来,在烟温高时硫酸盐会与碱金属形成熔点较低 ( $500 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的复合硫酸盐<sup>[161]</sup>,形成局部熔融态,捕获烟气中飞灰颗粒,导致积灰加厚。这些积灰会降低换热效率,进而影

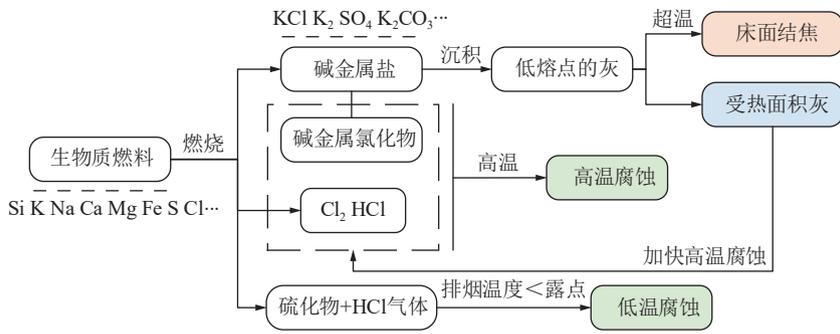
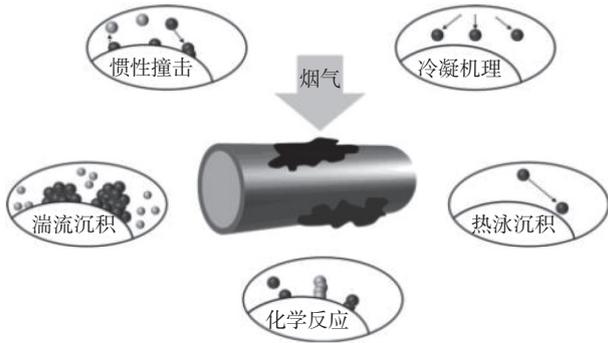


图 12 积灰、结渣和腐蚀的流程示意

Fig. 12 Schematic diagram of corrosion process

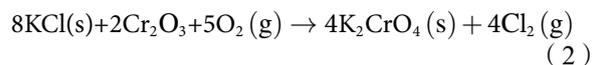
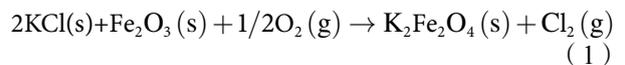
图 13 受热面积灰形成途径示意<sup>[159]</sup>Fig. 13 Schematic diagram of ash formation pathway<sup>[159]</sup>

响锅炉效率。如何有效地去除飞灰是生物质锅炉运行的关键，DENG 等<sup>[162]</sup>通过水洗、酸洗等步骤对生物质进行预处理，能减少受热面积灰，证明碱金属是导致积灰的重要因素之一。LIU 等<sup>[163-164]</sup>分析了流化床在三种不同床层温度下的积灰情况，发现积灰内层由碱金属和碱土金属熔融物颗粒组成，而外层由松散的硅铝酸盐组成，且随着床层温度的下降，取样探针表面积灰现象产生缓解，说明目前亟需解决的是高温区积灰现象。姜春光等<sup>[161]</sup>研究发现高温过热器，低温过热器积灰外层 Ca、Si 含量较高，而内层 K、Cl 含量较高，高温受热面沉积初始层 KCl 成分含量最高超过 56%，说明降低燃料中 KCl 含量对减缓或避免生物质锅炉受热面沉积起到至关重要作用。由此可见，通过水洗、酸洗等方式改善生物质碱金属含量，同时优化高温区烟道结构，是解决积灰问题的重要策略。

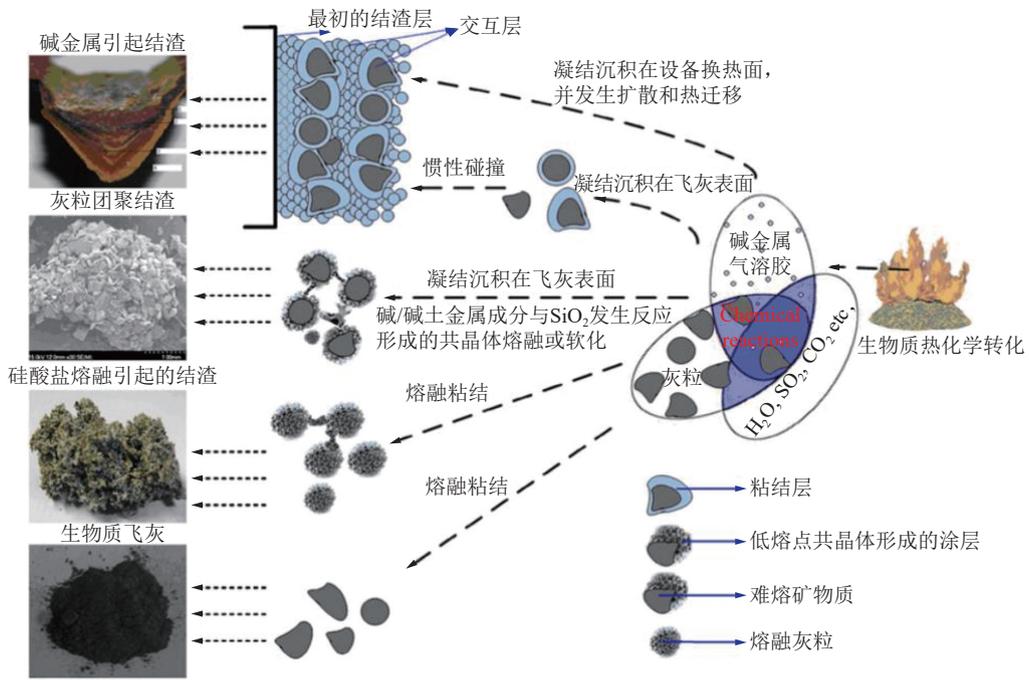
2) 结渣现象。图 14 归纳了生物质热化学转化中飞灰和结渣的形成过程。生物质在燃烧时高含量的 K、Na 等碱金属元素会与 Si 元素形成低熔点的熔体，在水冷壁表面形成粘性沉积物，在炉膛内受热后形成熔融、半熔融或固态沉积物的结渣层，在粘性捕捉和物理化学作用下，结渣层厚度和硬度逐渐上升。与积灰不同的是，结渣一般是大块的，并往往粘结大量灰分和其他杂质，产生位置也不同。结渣层的出现会导致传热受阻，降低传热效率，而

未经有效换热的烟气可能会进一步导致再热器、省煤器、空气预热器等的温度超过设计范围，严重影响设备的安全性。周伟健<sup>[166]</sup>分析发现钾盐能降低灰熔点，从而增大结渣倾向，而生物质中 SiO<sub>2</sub> 较多时能弱化这种结渣倾向，因此掺混高含量 SiO<sub>2</sub> 和低含量 K 元素的生物质能缓解燃烧结渣现象。刘洋等<sup>[167]</sup>对过热器上沉积的完整渣块进行晶相分析，发现渣块主要是由于低熔点碱金属盐结晶析出并粘附灰中颗粒。廖新杰等<sup>[50]</sup>通过生物质气化中试试验发现结渣的主要原因在于 K、Mg 元素的富集。姚锡文等<sup>[168]</sup>研究了玉米芯的特性，发现灰分在 815 ℃ 时发生了软化熔融。WANG 等<sup>[169]</sup>发现在添加沸石后，灰的变形温度提高至 1 000 ℃，说明炉膛温度与添加剂对结渣过程也有着较大影响。由此可见，通过水洗、酸洗、控制生物质碱金属占比，加入添加剂形成高熔点灰以及优化烟道结构，均能从一定程度上缓解结渣现象。

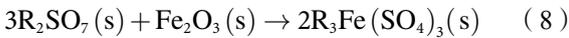
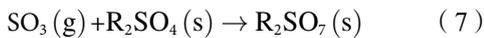
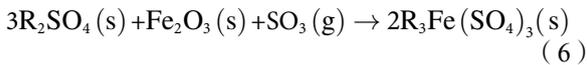
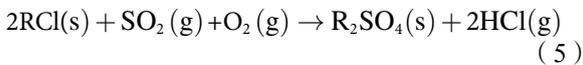
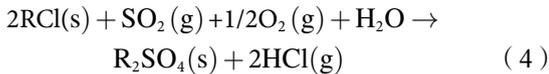
3) 腐蚀现象。在生物质燃烧过程中，主要存在两种类型的腐蚀，分别是氯腐蚀和硫腐蚀<sup>[170]</sup>。氯腐蚀主要是由生物质燃烧后产生的碱金属氯化物和气态氯化物 (HCl、Cl<sub>2</sub>) 引起的，氯离子穿透金属氧化层后与金属发生化学反应生成氯化物导致金属腐蚀，研究显示 KCl 在高温腐蚀中影响较大，远高于氯气<sup>[171]</sup>。KCl 与钢材 Fe 和防腐蚀添加元素 Cr 的反应式见式 (1) 一式 (2)。此外，在高温下，熔融态的 KCl 会电离出 Cl<sup>-</sup>，能直接与 Fe 发生高温电化学腐蚀<sup>[172]</sup>，反应式见式 (3)，且反应速率高于固相反应。



硫腐蚀是由碱金属硫酸盐与烟气中的 SO<sub>3</sub> 共同作用引起的。在燃烧过程中，燃料中的硫元素会被氧化形成 SO<sub>2</sub>，SO<sub>2</sub> 会与碱金属反应腐蚀管壁，反应式见式 (4) 一式 (5)，其中 R 表示 K 或 Na。同时

图 14 生物质热化学转化中飞灰和结渣的形成<sup>[165]</sup>Fig. 14 Formation of fly ash and slag in the thermochemical conversion of biomass<sup>[165]</sup>

烟气  $\text{SO}_2$  氧化生成  $\text{SO}_3$ 。  $\text{SO}_3$  与反应式 (4) 一式 (5) 中生成的碱金属硫酸盐 (如  $\text{K}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 在管壁氧化物 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 的催化作用下生成复合硫酸盐, 反应见式 (6) 一式 (8), 三硫酸铁是复合硫酸盐中最常见的腐蚀剂之一, 硫酸盐向熔点更低的复合硫酸盐的转化导致管壁发生了进一步腐蚀<sup>[173]</sup>。氯腐蚀和硫腐蚀严重影响了生物质锅炉金属换热器的设备寿命。



在生物质锅炉的运行过程中, 高温受热面的腐蚀是锅炉运行效率低、管壁减薄引起爆管的重要原因, 高温受热面的腐蚀往往伴随着积灰和结渣过程。为控制高温腐蚀问题, 在温度高于  $500^\circ\text{C}$  后, 腐蚀会出现明显的加速, 在  $700^\circ\text{C}$  后由于复合硫酸盐的不稳定分解腐蚀速率下降<sup>[174]</sup>, 因此目前大多数电厂直接控制主蒸汽温度低于  $450^\circ\text{C}$ , 这严重限制了生物质电厂发电效率的提升。

研究表明, 硫和氯对过热器的腐蚀效率不同, 燃料硫氯摩尔比  $n(\text{S})/n(\text{Cl})$  用于评估富含生物质燃料的腐蚀倾向。当  $n(\text{S})/n(\text{Cl}) < 2$  时, 会增加过热器

等对流换热面的腐蚀风险; 而当  $n(\text{S})/n(\text{Cl}) \geq 4$  时, 则会降低腐蚀风险<sup>[175]</sup>。KASSMAN 等<sup>[176]</sup> 研究发现通过添加剂以减少烟气中氯化物的浓度能有效缓解受热面的腐蚀。RUDOLF 等<sup>[177]</sup> 研究发现, 即使是 Cl 和 S 含量相对较低的生物质, 生物质电厂换热器在  $477^\circ\text{C}$  时也存在腐蚀, 研究认为氯在腐蚀中也可作为催化剂加剧腐蚀现象, 因此在一般锅炉温度下需要主要考虑氯腐蚀, 在添加硫酸铵等进行“氯脱除”工艺可以满足一般锅炉温度的耐腐蚀要求<sup>[176]</sup>。而针对于较高温度的 ( $600 \sim 900^\circ\text{C}$ ) 锅炉, 可通过添加钼 (Mo) 和钨 (W) 的盐类减轻碱金属硫化物和氯化物沉积引发的高温腐蚀<sup>[178]</sup>。

在过热器的材质选择上, 实验数据表明铁和铬的腐蚀比镍严重<sup>[179]</sup>, 因此可以在高温过热器的选择上使用添加 Ni 的不锈钢材质, Eshete1250 高 Ni 的不锈钢在  $650^\circ\text{C}$  时仍能保证良好的抗氧化性和抗蠕变性能<sup>[180]</sup>, Ni 含量超过 50% 的镍基合金是解决生物质高温腐蚀的良好材料, 目前 CORNELIA<sup>[181]</sup> 针对 Ni-Cr-Mo 合金开展实验研究, 发现其作为过热器具有良好的耐蚀性。由于镍基合金相对成本较高, 使用镍基涂层的不锈钢成为广泛关注热点, LIU 等<sup>[182]</sup> 制备三种熔覆层发现 50Ni-30Mo-20Si 在  $800^\circ\text{C}$  的高温下仍能保持良好的抗氧化性, KAWAHARA<sup>[183]</sup> 发现 NiCrBSi 合金涂层能有效延长生物质锅炉管壁服役寿命。由此可见, 控制燃料碱金属、氯元素和硫元素含量, 通过添加抑制剂转变碱金属盐, 控制炉膛温度, 更改耐腐蚀高温换热器

或添加涂层,是缓解腐蚀问题,延长高温换热器寿命的重要途径。

## 7 国内外工程经验与发展趋势

生物质发电的历史根源可以追溯至 20 世纪 70 年代,石油危机的爆发导致了能源消费结构的改变,为了保证能源安全,生物质等新能源得到了蓬勃发展。相比较而言,我国的生物质发电技术起步则较晚,始于 20 世纪 90 年代,而此时各国生物质发电也迎来了巅峰时期,丹麦首创成立了全球首个生物质发电厂,而波兰学者提出生物质与煤粉掺混燃烧是利用生物质最有效的方式<sup>[184]</sup>。目前从国际电厂数量的角度来看,欧盟在煤与生物质耦合燃烧发电方面积累了丰富的经验<sup>[66]</sup>。

英国的 Drax 电厂作为全球最大的生物质混烧电厂,自 2012 年起逐步完成了其中四台机组的 100% 生物质燃料化改造,实现了这四台机组的零煤燃烧发电。2019 年荷兰的 Maasvlakte 电厂对煤粉与生物质耦合锅炉设置了 CO<sub>2</sub> 捕集装置进行深度减排,丹麦的 DONGEnergy 电厂在 2023 年完成了生物质的 100% 替代并预计在 2025 年实现碳中和。循环流化床(CFB)锅炉燃料混合效果好、停留时间较长,波兰的 Lagisza 电厂建立了全球首座超临界循环流化床电厂。此外,韩国的南方电力在 2016 年正式投运,建设了全球首个超超临界 CFB 锅炉电厂。而位于芬兰的 AlholmensKraft 电厂则是全球最大容量的 100% 生物质燃烧 CFB 锅炉电厂。

在国内方面,首个探索煤粉和秸秆耦合发电的示范项目是国内的十里泉电厂,在 2005 年正式启动。该电厂最高实现了 20% 的秸秆掺烧比例,主要采用小麦秸秆作为设计燃料。此外,国电荆门发电厂于 2013 年 10 月正式投运,通过国家可再生能源发展基金的资助,每年实现了可观的盈利,该电厂所采用的设计燃料为生物质气和煤粉。2017 年年底,国家能源局启动了生物质混烧发电试点工作,其中包括 58 个农林生物质耦合项目,29 个污泥耦合项目和 2 个垃圾耦合项目,这些项目预计每年增加 8 300 GWh 的生物质电量,替代燃煤约 262 万 t,减排 CO<sub>2</sub> 约 733 万 t<sup>[185]</sup>。2021 年,国家能源局针对农林生物质发电进行了进一步的补贴支持,助推生物质发电更好进行<sup>[186]</sup>。此外,《“十四五”生物经济发展规划》推动了向热电联产的转型升级。针对生物质气化项目,宁波能源利用合适的温度,实现了合成气与焦炭的双产出<sup>[187]</sup>。

目前燃煤与生物质混烧已向大容量机组、大比例掺烧方向发展,表 3 列举了全球部分在运的超过

100 MW 的大容量生物质与煤粉混烧发电厂。

表 3 全球在运的生物质与煤粉掺混电厂情况  
Table 3 The Global Status of Co-Firing Biomass and Pulverized Coal Power Plants

国家	电厂	机组容量/ MW	掺混比例	生物质类型
英国	Fiddler's Ferry	4×500	20%	压制废木屑颗粒、 废橄榄油
	Drax	6×660	100%	秸秆与木屑的压制 颗粒
荷兰	Amer	600	80%	木屑颗粒
	Maasvlakte #3	2×1 100	20%	肉骨粉等
	Eemshaven	2×800	25%	木屑颗粒
波兰	Lagisza	460	10%	洗煤污泥
芬兰	AlholmensKraft	265	50%	木屑颗粒
丹麦	Avedore	575	100%	稻草颗粒
	DONGEnergy	2×430	100%	秸秆和木屑颗粒
奥地利	Zeltweg	137	30%	生物质合成气
中国	国电荆门电厂	660	15%	生物质合成气
	十里泉电厂	140	20%	小麦秆
	秦热电厂	2×300	10%	城市污泥

综上所述,掺混生物质主要以农业秸秆和林业废弃木材木屑为主,由于生物质掺混比例可以进行调整,因此发电量不会受到生物质来源的季节性影响。此外,考虑到设备的更新成本和操作便捷性,目前全球直接进行煤粉与生物质混燃的居多。

## 8 总 结

生物质与煤粉耦合掺混燃烧利用作为一种低碳能源和可持续发展的重要战略方向,已在全球范围内引起了广泛关注。目前主要有两种方式实现生物质与煤粉的混合燃烧,分别是直燃耦合和气化耦合。直燃耦合是将生物质和煤粉直接混合后共同投入燃烧设备,而气化耦合则是将生物质在气化器中气化为合成气,与煤粉在不同形式下混合燃烧。两种方式各有优势,直燃耦合简单高效,而气化耦合更有利于控制气体组分,保证炉膛热负荷。

在国内外工程实践中,一些生物质与煤粉直燃耦合的电厂已经建成并投入运行,取得了一定的经验。这些工程不仅在提高燃料资源利用率方面取得显著效果,而且在降低温室气体排放和推动可再生能源发展方面也发挥了积极作用。然而,氮氧化

物、硫氧化物以及颗粒物的排放问题仍然是亟待解决的难题, 有效控制这些污染物的排放, 降低环境风险, 是未来生物质与煤粉耦合利用的研究和工程实践的重点。此外, 积灰结渣和腐蚀对设备的影响也是当前研究的热点之一。由于生物质的灰化特性与煤存在差异, 导致在掺混燃烧过程中产生的灰渣可能对锅炉、燃烧器以及受热面等设备造成不同程度的腐蚀和结渣问题, 本文对目前主要解决方案进行了分析。未来的研究需要深入探讨在不同生物质和煤混合比例下, 如何优化燃烧系统和管道、受热面材料与烟道设计, 以确保生物质与煤粉耦合利用的长期稳定运行。

综合而言, 生物质与煤粉的耦合利用在能源可持续发展中具有广阔的前景, 但仍需深入研究和实践, 以解决当前面临的污染物排放、设备腐蚀等问题, 推动该技术在工业应用中更为广泛的推广。

## 9 展 望

生物质作为一种零碳能源, 在与煤粉直接耦合或气化后耦合的应用中, 能够在现有火电厂基础上投资少许设备实现高效发电, 并对减少碳排放产生显著效果。目前科研人员在生物质与煤粉直接燃烧耦合和气化耦合方面取得了一定的研究进展。然而, 考虑到生物质种类繁多, 燃烧后产生的污染物种类与含量各异, 对设备的影响也不尽相同, 情况相当复杂。

在基础研究方面, 有必要着重探究不同混合比例的协同效应及其在燃烧稳定性与燃烧污染物排放的影响规律。在热解行为方面, 需对不同类型生物质的热解行为展开研究, 优化热解过程和条件, 以提升能量转化效率。在换热器材料方面, 需要开发新型涂层材料和技术, 以在有效缓解高温腐蚀现象发生的同时降低额外成本。在应用研究领域, 需要设计并调节燃烧室温度, 并优化高温区烟道设计, 以缓解积灰、结渣和腐蚀问题。针对混合双燃料系统, 应设计适用的燃烧系统, 实现在不同混合比例下的调节, 保证在各种电力需求下实现高效、稳定的燃烧过程。此外, 在热电联产系统中添加生物质也需要进一步的研究和开发。鉴于目前电力需求波动较大, 削峰填谷成为学者们关注的焦点, 鉴于生物质热值一般较低于煤粉, 未来的研究方向将包括通过大规模耦合燃烧生物质来实现深度调峰。

## 参考文献 (References):

[1] 王雪茜, 陈正华, 孙军. 玉米秸秆能源化利用途径与方法 [J]. *中国资源综合利用*, 2014, 32(10): 35-38.

WANG Xueqian, CHEN Zhenghua, SUN Jun. Research on approach and method of corn straw utilization[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2014, 32(10): 35-38.

[2] 石元春, 程序, 朱万斌. 当前中国生物质能源发展的若干战略思考 [J]. *科技导报*, 2019, 37(20): 6-11.

SHI Yuanchun, CHENG Xu, ZHU Wanbin. Strategic thinking about China's bioenergy development[J]. *Science & Technology Review*, 2019, 37(20): 6-11.

[3] KANG Y T, YANG Q, BARTOCCI P, et al. Bioenergy in China: Evaluation of domestic biomass resources and the associated greenhouse gas mitigation potentials[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 127: 109842.

[4] 卫洪建. 中国农林剩余物和能源作物资源评估及减排效益分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

[5] 丁仲礼. 全国人民代表大会常务委员会执法检查组关于检查《中华人民共和国可再生能源法》实施情况的报告——2019年12月24日在第十三届全国人民代表大会常务委员会第十五次会议上 [J]. *中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报*, 2020(1): 144-51.

[6] 生物质能“十三五”规划 [R]. 北京: 国家能源局, 2016.

[7] AL-MANSOUR F, ZUWALA J. An evaluation of biomass co-firing in Europe[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34(5): 620-629.

[8] ORAVAINEN H. IEA bioenergy Task 32: Biomass combustion and cofiring[C]. //VTT Symposium. [S. I.]: Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, 2002.

[9] JIA L, GEDDIS P, MADRALI S, et al. Determination of emission factors for co-firing biomass and coal in a suspension fired research furnace[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(9): 7342-7356.

[10] 刘洪福, 刘圣勇, 翟万里, 等. 生物质悬浮燃烧器的设计与研究 [J]. *节能技术*, 2017, 35(1): 60-65.

LIU Hongfu, LIU Shengyong, ZHAI Wanli, et al. The design and research of biomass suspension burner[J]. *Energy Conservation Technology*, 2017, 35(1): 60-65.

[11] 张品, 刘圣勇, 隋继学, 等. 生物质悬浮燃烧器的实验研究 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(11): 347-352.

ZHANG Pin, LIU Shengyong, SUI Jixue, et al. Experimental study of biomass suspension burner[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(11): 347-352.

[12] 邓尚致. 鼓泡流化床生物质气化过程中焦油和可燃气体的生成特性 [D]. 青岛: 青岛大学, 2022.

[13] 祝康. 鼓泡流化床气固两相流化特性数值模拟和实验研究 [D]. 广州: 广州大学, 2023.

[14] PIO D T, TARELHO L A C, NUNES T F V, et al. Co-combustion of residual forest biomass and sludge in a pilot-scale bubbling fluidized bed[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119309.

[15] 吕俊复, 尚曼霞, 柯希玮, 等. 粉煤循环流化床燃烧技术 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 430-437.

LYU Junfu, SHANG Manxia, KE Xiwei, et al. Powdered coal circulating fluidized bed combustion technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 430-437.

[16] 孙海文. 循环流化床炉内喷氨脱硝特性数值模拟研究 [D]. 吉

- 林:东北电力大学, 2023.
- [17] 孙锦余, 刘晓伟, 戴高峰, 等. 15 MW 生物质循环流化床  $\text{NO}_x$  和温室气体排放特性 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(9): 32–37.
- SUN Jinyu, LIU Xiaowei, DAI Gaofeng, et al. Characterization of  $\text{NO}_x$  and greenhouse gas emissions in a 15 MW biomass circulating fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(9): 32–37.
- [18] 岳敏. 生活垃圾焚烧炉炉型及炉内配风对燃烧的影响研究 [J]. 工程技术研究, 2019, 4(3): 22–25.
- YUE Youmin. Study on the influence of domestic waste incinerator type and furnace air distribution on combustion[J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(3): 22–25.
- [19] 彭一丁. 29MW 往复式炉排热水锅炉 SNCR 脱硝技术研究 [J]. 区域供热, 2022(1): 108–110, 115.
- PENG Yiding. Study on SNCR denitrification technology of 29MW reciprocating grate hot water boiler[J]. District Heating, 2022(1): 108–110, 115.
- [20] SUN P, HUI S E, GAO Z X, et al. Experimental investigation on the combustion and heat transfer characteristics of wide size biomass co-firing in 0.2 MW circulating fluidized bed[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52(2): 284–292.
- [21] STEER J, MARSH R, GRIFFITHS A, et al. Biomass co-firing trials on a down-fired utility boiler[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 66: 285–294.
- [22] PALSTRA S W L, MEIJER H A J. Biogenic carbon fraction of biogas and natural gas fuel mixtures determined with  $^{14}\text{C}$  [J]. Radiocarbon, 2014, 56(1): 7–28.
- [23] DARMAWAN A, BUDIANTO D, AZIZ M, et al. Hydrothermally-treated empty fruit bunch cofiring in coal power plants: A techno-economic assessment[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 297–302.
- [24] PÉREZ-JELDRES R, CORNEJO P, FLORES M, et al. A modeling approach to co-firing biomass/coal blends in pulverized coal utility boilers: Synergistic effects and emissions profiles[J]. Energy, 2017, 120: 663–674.
- [25] MUN T Y, TUMSA T Z, LEE U, et al. Performance evaluation of co-firing various kinds of biomass with low rank coals in a 500 MWe coal-fired power plant[J]. Energy, 2016, 115: 954–962.
- [26] 彭瑞祥. 煤混生物质的富氧燃烧特性及污染物排放特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [27] 吕洪坤, 齐晓娟, 童家麟, 等. 某超超临界 1000 MW 锅炉生物质与煤粉混烧数值模拟及优化 [J]. 可再生能源, 2018, 36(6): 791–796.
- LV Hongkun, QI Xiaojuan, TONG Jialin, et al. Numerical simulation and optimization of co-firing of coal and biomass for a 1 000 MW ultra-supercritical boiler[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(6): 791–796.
- [28] 武鹏魁. 兰炭/生物质混合燃料燃烧特性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [29] 王俊, 龙慎伟, 马同胜, 等. 660 MW 煤粉锅炉掺烧生物质数值模拟 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(5): 143–151.
- WANG Jun, LONG Shenwei, MA Tongsheng, et al. Numerical simulation of co-firing characteristics of coal and biomass in a 660 MW boiler[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(5): 143–151.
- [30] 史帆. 生物质热电工程风险及经济影响分析 [J]. 化工管理, 2022(12): 154–156.
- SHI Fan. Analysis of the risk and economic impact of biomass thermoelectric engineering[J]. Chemical Management, 2022(12): 154–156.
- [31] 朱孝成, 窦克军, 王振中, 等. 中国农林生物质发电项目经济性分析 [J]. 全球能源互联网, 2022, 5(2): 182–187.
- ZHU Xiaocheng, DOU Kejun, WANG Zhenzhong, et al. Economic analysis of China's agricultural and forestry biomass power generation projects[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(2): 182–187.
- [32] 徐建东, 张保. 某生物质电厂低温过热器爆管原因分析 [J]. 江西电力职业技术学院学报, 2019, 32(3): 3–4.
- XU Jiandong, ZHANG Bao. Cause analysis of tube burst of low temperature superheater in a biomass power plant[J]. Journal of Jiangxi Vocational and Technical College of Electricity, 2019, 32(3): 3–4.
- [33] 吴智泉, 韩中合, 向鹏, 等. 生物质气化与燃煤耦合发电系统能流和 $\dot{m}$ 流分析 [J]. 分布式能源, 2017, 2(6): 8–14.
- WU Zhiquan, HAN Zhonghe, XIANG Peng, et al. Energy and exergy flow analysis of biomass gasification-coal coupling power generation system[J]. Distributed Energy, 2017, 2(6): 8–14.
- [34] ZHANG X T, LI K Y, ZHANG C, et al. Performance analysis of biomass gasification coupled with a coal-fired boiler system at various loads[J]. Waste Management, 2020, 105: 84–91.
- [35] GARG M, PISKORZ J, SCOTT D S, et al. The hydrogasification of wood[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1988, 27(2): 256–264.
- [36] FORMICA M, FRIGO S, GABBRIELLI R. Development of a new steady state zero-dimensional simulation model for woody biomass gasification in a full scale plant[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 120: 358–369.
- [37] 王伟. 污泥固定床气化实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [38] 张科达, 梁大明, 王鹏, 等. 生物质气流床气化技术的研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2009, 15(1): 51–54.
- ZHANG Keda, LIANG Daming, WANG Peng, et al. R & D of biomass entrained flow gasification technology[J]. Clean Coal Technology, 2009, 15(1): 51–54.
- [39] ZHANG Y, ZHENG Y. Co-gasification of coal and biomass in a fixed bed reactor with separate and mixed bed configurations[J]. Fuel, 2016, 183: 132–138.
- [40] WANG Z Q, HE T, QIN J G, et al. Gasification of biomass with oxygen-enriched air in a pilot scale two-stage gasifier[J]. Fuel, 2015, 150: 386–393.
- [41] YANG G, HU Q, HU J H, et al. Hydrogen-rich syngas production from biomass gasification using biochar-based nanocatalysts[J]. Bioresource Technology, 2023, 379: 129005.
- [42] 郭放. 生物质气化燃气焦油及污染物整体脱除方法应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [43] 贺鹏. 热解温度对生物质焦油裂解率影响的实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

- [44] 房倚天, 王志青, 李俊国, 等. 多段分级转化流化床煤气化技术研究开发进展 [J]. *煤炭转化*, 2018, 41(3): 1–11.  
FANG Yitian, WANG Zhiqing, LI Junguo, et al. Research and development progress in multi-stage conversion fluidized bed coal gasification technology[J]. *Coal Conversion*, 2018, 41(3): 1–11.
- [45] 袁野, 姜华伟, 郭庆杰, 等. 鼓泡流化床准东煤与松木屑共催化气化过程中焦油的生成特性 [J]. *煤炭转化*, 2023, 46(5): 64–72.  
YUAN Ye, JIANG Huawei, GUO Qingjie, et al. Generation characteristics of tar during catalytic co-gasification of Zhundong coal and pine sawdust in bubbling fluidized bed[J]. *Coal Conversion*, 2023, 46(5): 64–72.
- [46] 黄亚继, 伏启让, 牛淼淼, 等. 生物质流化床富氧化过程热平衡模型 [J]. *太阳能学报*, 2016, 37(2): 494–499.  
HUANG Yaji, FU Qirang, NIU Miaomiao, et al. Thermodynamic equilibrium model of biomass gasification process with enriched oxygen in fluidised bed gasifier[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2016, 37(2): 494–499.
- [47] 钟振宇. 生物质两段式气化熔融燃烧耦合试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [48] EMIOLA-SADIQ T, ZHANG L F, DALAI A, et al. Parametric and hydrodynamics studies on gasification performance of biomass pellets in a pilot-scale fluidized bed gasifier[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 14(14): 16339–16361.
- [49] ROBINSON T, BRONSON B, GOGOLEK P, et al. Comparison of the air-blown bubbling fluidized bed gasification of wood and wood-PET pellets[J]. *Fuel*, 2016, 178: 263–271.
- [50] 廖新杰, 张世红, 李姜昊, 等. 生物质流化床气化与结渣特性中试试验 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 235–241.  
LIAO Xinjie, ZHANG Shihong, LI Jianghao, et al. Pilot-scale test on gasification and slagging characteristics of biomass in fluidized bed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(4): 235–241.
- [51] 郑志行, 李谦, 张家元, 等. 基于 Aspen Plus 的 Shell 气流床工业气化炉模拟 [J]. *化工进展*, 2021, 40(4): 2152–2160.  
ZHENG Zhihang, LI Qian, ZHANG Jiayuan, et al. Simulation of industrial Shell entrained flow bed by Aspen Plus[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(4): 2152–2160.
- [52] 高瑞, 代正华, 黄波, 等. 耦合热解-气化过程的两段气流床工艺模拟研究 [J]. *化学工程*, 2019, 47(4): 69–74.  
GAO Rui, DAI Zhenghua, HUANG Bo, et al. Simulation of two-stage entrained flow process in coupling pyrolysis and gasification[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2019, 47(4): 69–74.
- [53] 周金豪, 陈雪莉, 郭强, 等. 基于 ASPEN PLUS 模拟生物质与煤气流床共气化工艺 [J]. *太阳能学报*, 2010, 31(9): 1112–1116.  
ZHOU Jinhao, CHEN Xueli, GUO Qiang, et al. Process simulation of biomass and coal entrained-flow co-gasification based on aspen plus[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2010, 31(9): 1112–1116.
- [54] TROP P, ANICIC B, GORICANEC D. Production of methanol from a mixture of torrefied biomass and coal[J]. *Energy*, 2014, 77: 125–132.
- [55] 周劲松, 赵辉, 曹小伟, 等. 生物质气流床气化特性及残炭特性的研究 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2009, 43(1): 128–134.  
ZHOU Jinsong, ZHAO Hui, CAO Xiaowei, et al. Biomass entrained flow gasification and residue behavior[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(1): 128–134.
- [56] PARK S W, LEE S Y, JEONG Y O, et al. Effects of oxygen enrichment in air oxidants on biomass gasification efficiency and the reduction of tar emissions[J]. *Energies*, 2018, 11(10): 2664.
- [57] 冯飞, KRISHNAMOORTHY Vijayaragavan, PISUPATI Sarma V. 高温高压气流床气化炉中生物质焦炭的孔结构特征及活性试验 [J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(6): 766–771, 776.  
FENG Fei, VIJAYARAGAVAN K, PISUPATI S V. Pore structural characteristics and gasification reactivity of bio-chars in high-temperature and high-pressure entrained flow gasifier[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(6): 766–771, 776.
- [58] TREMEL A, BECHERER D, FENDT S, et al. Performance of entrained flow and fluidised bed biomass gasifiers on different scales[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 69: 95–106.
- [59] KALISZ S, PRONOBIS M, BAXTER D. Co-firing of biomass waste-derived syngas in coal power boiler[J]. *Energy*, 2008, 33(12): 1770–1778.
- [60] SUTAR K B, KOHLI S, RAVI M R. Design, development and testing of small downdraft gasifiers for domestic cookstoves[J]. *Energy*, 2017, 124: 447–460.
- [61] 徐皓鹏, 任少辉, 邵敬爱, 等. 对冲锅炉生物质气与煤粉混燃模拟研究 [J]. *洁净煤技术*, 2018, 24(5): 61–67.  
XU Haopeng, REN Shaohui, SHAO Jing'ai, et al. Numerical study on co-combustion process of biomass gas and pulverized coal in an opposed boiler[J]. *Clean Coal Technology*, 2018, 24(5): 61–67.
- [62] 李加护, 王小涛, 高硕, 等. 300MW 燃煤锅炉掺烧生物质燃气的数值模拟 [J]. *动力工程学报*, 2020, 40(6): 440–446.  
LI Jiahu, WANG Xiaotao, GAO Shuo, et al. Numerical simulation on co-firing characteristics of coal and biomass gas in a 300 MW boiler[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2020, 40(6): 440–446.
- [63] 王西伦, 初伟, 刘平, 等. 生物质气化耦合燃煤发电机组的燃烧特性分析 [J]. *电力科技与环保*, 2021, 37(5): 22–28.  
WANG Xilun, CHU Wei, LIU Ping, et al. Analysis of combustion characteristics of biomass gasification-coupled co-firing generator sets[J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2021, 37(5): 22–28.
- [64] LIU W T, TIAN Y, YAN H, et al. Gasification of biomass using oxygen-enriched air as gasification agent: A simulation study[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, 13(17): 15993–16000.
- [65] MCKENDRY P. Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 83(1): 55–63.
- [66] 毛健雄. 燃煤耦合生物质发电 [J]. *分布式能源*, 2017, 2(5):

- 47-54.
- MAO Jianxiang. Co-firing biomass with coal for power generation[J]. *Distributed Energy*, 2017, 2(5): 47-54.
- [67] 何欣荣, 桑彤. 我国非化石能源发电装机容量占比过半 [N]. 新华每日电讯, 2023-06-12(3).
- [68] 电力规划总院. 中国能源发展报告 2023 [EB/OL]. (2023-08-31) <https://mp.weixin.qq.com/s/tcVihRnMPLy9YGni7kix1w>.
- [69] 马岩. 我国林业生物质能源资源蓄积量的估算 [C]//中国林学会. 第二届中国林业学术大会——S11 木材及生物质资源高效增值利用与木材安全论文集. 南宁, 2009: 584-588.
- [70] 黄戎杰, 余少林, 孙漫, 等. 华能电厂变废为宝 城市污泥“浴火重生” [N]. 2021-08-29.
- [71] READ A, GITTINS C, UILENREEF J, et al. Lessons from the ROAD project for future deployment of CCS[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 91: 102834.
- [72] CASTELLS B, AMEZ I, MANIC N, et al. Kinetic study of different biomass pyrolysis and oxygen-enriched combustion[J]. *Thermal Science*, 2022, 26(5 Part B): 4131-4145.
- [73] 王华山, 王跃康, 张天航, 等. 煤与牛骨混合燃烧过程及热动力学分析 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(10): 3972-3977.
- WANG Huashan, WANG Yuekang, ZHANG Tianhang, et al. Analysis of coal-beef bone co-combustion and the thermal dynamics[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(10): 3972-3977.
- [74] 杨继元, 乔军强, 芦海云. 烟煤燃烧特性的热重分析 [J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(S2): 236-239.
- YANG Jiyuan, QIAO Junqiang, LU Haiyun. Thermogravimetric analysis of combustion characteristics for bituminous coals[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(S2): 236-239.
- [75] 陈欢欢, 姜戎雅, 刘建彪, 等. 牦牛粪生物质燃烧特性及动力学研究 [J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(12): 162-167.
- CHEN Huanhuan, JIANG Xuya, LIU Jianbiao, et al. Study on combustion characteristics and kinetics of yak manure[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(12): 162-167.
- [76] 胡可, 雷家柳, 江昆, 等. 3种农业生物质的燃烧特性及动力学特征 [J]. *湖北理工学院学报*, 2023, 39(4): 26-31.
- HU Ke, LEI Jialiu, JIANG Kun, et al. Combustion properties and kinetics characteristics of three agricultural biomass[J]. *Journal of Hubei Polytechnic University*, 2023, 39(4): 26-31.
- [77] 罗红英, 顾岩城, 赖佳斯, 等. 西藏三种木材生物质的燃烧特性及动力学分析 [J]. *高原农业*, 2024, 8(1): 1-10.
- LUO Hongying, GU Yancheng, LAI Jiassi, et al. Combustion characteristics and kinetic analysis of three types of wood biomass in Tibet[J]. *Journal of Plateau Agriculture*, 2024, 8(1): 1-10.
- [78] 闫升太, 李舒琪, 徐攀, 等. 热分析仪中生物质炭氧化特性及面反应动力学分析 [J]. *太阳能学报*, 2023, 44(11): 406-412.
- YAN Shengtai, LI Shuqi, XU Pan, et al. Oxidation characteristics and kinetics of biochar in thermal analyzer based on surface reaction[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(11): 406-412.
- [79] TOLEDO M, ROSALES C, SILVESTRE C, et al. Numerical simulation of the hybrid filtration combustion of biomass[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(46): 21131-21139.
- [80] 赵嵩颖, 徐建光, 樊洪仁, 等. 生物质颗粒燃烧特性的数值模拟及实验研究 [J]. *热科学与技术*, 2023, 22(6): 563-569.
- ZHAO Songying, XU Jianguang, FAN Hongren, et al. Numerical simulation and experimental study on combustion characteristics of biomass particles[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2023, 22(6): 563-569.
- [81] 王华山, 王跃康, 张歆悦, 等. 煤与泔苔混合燃烧过程分析及动力学研究 [J]. *煤炭转化*, 2020, 43(1): 26-32.
- WANG Huashan, WANG Yuekang, ZHANG Xinyue, et al. Analysis of combustion process and kinetics of coal mixed with enteromorpha[J]. *Coal Conversion*, 2020, 43(1): 26-32.
- [82] 姚锡文, 刘清华, 许开立. 玉米秸秆与烟煤混燃过程灰熔融特性试验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(12): 4515-4522.
- YAO Xiwen, LIU Qinghua, XU Kaili. Experimental study on ash melting characteristics of mixed combustion of corn stalk and bituminous coal[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(12): 4515-4522.
- [83] 鲁光武. 生物质混煤燃烧特性的实验及动力学研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- LU Guangwu. Experimental and kinetic study on combustion characteristics of biomass blended coal[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [84] 刘浪, 曾靖淞, 焦庆瑞, 等. 生物质与烟煤混合燃烧特性及动力学分析研究 [J]. *煤化工*, 2022, 50(1): 40-48.
- LIU Lang, ZENG Jingsong, JIAO Qingrui, et al. Study on combustion characteristics and kinetic analysis of biomass mixed with bituminous coal[J]. *Coal Chemical Industry*, 2022, 50(1): 40-48.
- [85] 韩冰. 生物质颗粒对煤粉燃烧行为的影响研究 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.
- [86] 邹海旭, 白翔, 樊星. 低阶煤与麦秆共热溶的协同效应 [J]. *煤化工*, 2023, 51(4): 86-90.
- ZOU Haixu, BAI Xiang, FAN Xing. Study on synergistic effect of co-thermal dissolution of wheat straw and low-rank coal[J]. *Coal Chemical Industry*, 2023, 51(4): 86-90.
- [87] 袁野. 粉煤及生物质高温裂解部分气化过程的反应机理及中试试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [88] 刘巧霞, 高亚男, 杨会民, 等. 核桃壳与油房梁煤的共热解协同效应 [J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(8): 30-40.
- LIU Qiaoxia, GAO Yanan, YANG Huimin, et al. Synergistic effect for co-pyrolysis of BHTK and CYFL[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(8): 30-40.
- [89] 姜彦立, 周新华, 郝宇. 燃煤锅炉硫分排放特性研究 [J]. *中国煤炭*, 2006, 32(6): 56-57.
- [90] 徐建光. 不同生物质颗粒混燃的数值模拟及实验研究 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2022.
- [91] 魏夜香, 张霄羽, 张红. 中国二氧化硫的时空分布及主要排放来源研究 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43(11): 5678-5686.
- WEI Yexiang, ZHANG Xiaoyu, ZHANG Hong. Spatial and temporal distribution of sulfur dioxide and main emission sources in China[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(11): 5678-5686.

- [92] FRYDA L, PANOPOULOS K, VOURLIOTIS P, et al. Experimental investigation of fluidised bed co-combustion of meat and bone meal with coals and olive bagasse[J]. *Fuel*, 2006, 85(12-13): 1685-1699.
- [93] KWONG P C W, CHAO C Y H, WANG J H, et al. Co-combustion performance of coal with rice husks and bamboo[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(35): 7462-7472.
- [94] XIE J J, YANG X M, ZHANG L, et al. Emissions of SO<sub>2</sub>, NO and N<sub>2</sub>O in a circulating fluidized bed combustor during co-firing coal and biomass[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(1): 109-116.
- [95] MOLCAN P, LU G, LE BRIS T, et al. Characterisation of biomass and coal co-firing on a 3MWth Combustion Test Facility using flame imaging and gas/ash sampling techniques[J]. *Fuel*, 2009, 88(12): 2328-2334.
- [96] 徐金苗, 吕子安, 李定凯. 煤与生物质混燃过程中 SO<sub>2</sub> 释放规律研究 [J]. 热力发电, 2010, 39(10): 20-24.  
XU Jinmiao, LÜ Zian, LI Dingkai. Study on SO<sub>2</sub>-releasing regularity in the process of mixedly burning coal and biomass[J]. *Thermal Power Generation*, 2010, 39(10): 20-24.
- [97] MU L, LI T, WANG Z, et al. Influence of water/acid washing pretreatment of aquatic biomass on ash transformation and slagging behavior during co-firing with bituminous coal[J]. *Energy*, 2021, 234: 121286.
- [98] 刘兆萍. 碱性物质对生物质混煤燃烧及污染物排放特性影响规律研究 [D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [99] VAN LITH S C, ALONSO-RAMÍREZ V, JENSEN P A, et al. Release to the gas phase of inorganic elements during wood combustion. part 1: development and evaluation of quantification methods[J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(3): 964-978.
- [100] 柏继松. 生物质燃烧过程氮和硫的迁移、转化特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [101] WANG X B, HU Z F, WANG G G, et al. Influence of coal co-firing on the particulate matter formation during pulverized biomass combustion[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2019, 92(3): 450-458.
- [102] LIU Q W, ZHONG W Q, YU A B, et al. Modelling the co-firing of coal and biomass in a 10 kWth oxy-fuel fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 2022, 395: 43-59.
- [103] 薛则禹. 流化床内煤和生物质混烧过程中碱金属、重金属的迁移特性及排放控制研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [104] 张小英, 马晓茜, 邹治平. 循环流化床中谷壳与煤共燃 SO<sub>2</sub> 生成特性研究 [J]. 煤炭转化, 2005, 28(4): 50-52.  
ZHANG Xiaoying, MA Xiaoqian, ZOU Zhiping. Study on generation of SO<sub>2</sub> during co-combustion of biomass and coal in circulating fluidized bed[J]. *Coal Conversion*, 2005, 28(4): 50-52.
- [105] JIA X R, DING Y Q, ZHAO Y B, et al. Investigation of the pollutant emission characteristics of blends of biomass and coal gangue in a fluidized bed[J]. *Thermal Science*, 2022, 26(5 Part B): 4333-4343.
- [106] YANIK J, DUMAN G, KARLSTRÖM O, et al. NO and SO<sub>2</sub> emissions from combustion of raw and torrefied biomasses and their blends with lignite[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 227: 155-161.
- [107] BADOUR C, GILBERT A, XU C, et al. Combustion and air emissions from co-firing a wood biomass, a Canadian peat and a Canadian lignite coal in a bubbling fluidised bed combustor[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2012, 90(5): 1170-1177.
- [108] 张小桃, 李柯颖, 赵伟, 等. 燃煤锅炉掺烧生物质气运行效率及污染物排放模拟 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 194-202.  
ZHANG Xiaotao, LI Keying, ZHAO Wei, et al. Simulation on operation efficiency and pollutant emissions of coal-fired boiler with bio-gas co-firing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(11): 194-202.
- [109] 安敬学. 燃煤电厂锅炉混燃生物质的应用研究 [D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2010.
- [110] KEIVANI B, OLGUN H, ATIMTAY A T. Co-combustion of biocoal and lignite in a circulating fluidised bed combustor to decrease the impact on global warming[J]. *International Journal of Global Warming*, 2019, 18(2): 120-137.
- [111] 张啸天. 生物质与煤富氧混合燃烧污染物生成机理和成灰特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2017.
- [112] 杨晋川. 褐煤与油页岩混合燃烧特性及污染物排放分析 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [113] 刘佳, 郭欣, 郑楚光. 煤中吡咯与吡啶类氮热解的分子动力学模拟 [J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(4): 357-362.  
LIU Jia, GUO Xin, ZHENG Chuguang. Molecular dynamics simulation for pyrolysis of pyrrole and pyridine compounds in coal[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2015, 21(4): 357-362.
- [114] 聂虎, 余春江, 柏继松, 等. 生物质燃烧中硫氧化物和氮氧化物生成机理研究 [J]. 热力发电, 2010, 39(9): 21-26, 34.  
NIE Hu, YU Chunjiang, BAI Jisong, et al. Study on formation mechanisms of sulphide and nitrogen oxides in combustion of biomass[J]. *Thermal Power Generation*, 2010, 39(9): 21-26, 34.
- [115] REN Q Q, ZHAO C S. Evolution of fuel-N in gas phase during biomass pyrolysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 408-418.
- [116] ZHAO B T, SU Y X, LIU D Y, et al. SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> emissions and ash formation from algae biomass combustion: Process characteristics and mechanisms[J]. *Energy*, 2016, 113: 821-830.
- [117] 张定海. 煤与生物质直接和间接耦合燃烧特性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [118] WANG X B, ZHANG J Y, XU X W, et al. Numerical study of biomass co-firing under oxy-MILD mode[J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 2566-2576.
- [119] LIU Y Q, TAN W Y, LIANG S H, et al. Comparative study on the co-combustion behavior of torrefied biomass blended with different rank coals[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, 14(1): 781-793.
- [120] 李尚, 金晶, 林郁郁, 等. 准东煤与污泥共热解过程中 NO<sub>x</sub> 前驱物释放规律 [J]. 化工学报, 2017, 68(5): 2089-2095.  
LI Shang, JIN Jing, LIN Yuyu, et al. Release of NO<sub>x</sub> precursors in co-pyrolysis process of Zhun Dong coal mixed with sludge[J].

- CIESC Journal, 2017, 68(5): 2089–2095.
- [121] ZHAO Z B, QIU J S, LI W, et al. Influence of mineral matter in coal on decomposition of NO over coal chars and emission of NO during char combustion[J]. *Fuel*, 2003, 82(8): 949–957.
- [122] WANG Z H, ZHOU J H, WEN Z C, et al. Effect of mineral matter on NO reduction in coal reburning process[J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(4): 2038–2043.
- [123] ZHAO S H, XUN C, XU W J. Density functional theory study on the catalytic reduction of nitric oxide over the bio-char surface during biomass reburning: The influence of inherent potassium[J]. *Fuel*, 2023, 342: 127923.
- [124] XU Z Y, WANG C B, YUE S. A theoretical insight into the mechanism of NO heterogeneous reduction on char surface: The catalytic effect of potassium[J]. *Fuel*, 2023, 340: 127568.
- [125] 温正城, 王智化, 周俊虎, 等. 金属钙对煤焦异相还原 NO 催化机理的量子化学研究 [J]. *燃烧科学与技术*, 2009, 15(6): 505–510.  
WEN Zhengcheng, WANG Zhihua, ZHOU Junhu, et al. Quantum chemistry study on catalytic mechanism of Ca on NO-char heterogeneous reaction[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2009, 15(6): 505–510.
- [126] 徐明新. 煤循环流化床富氧燃烧 NO 转换机理实验研究 [D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2017.
- [127] 张丽徽. 有机钙协同减排生物质燃烧 SO<sub>2</sub> 和 NO 实验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [128] LI B Y, LI Y J, ZHANG W, et al. Simultaneous NO/SO<sub>2</sub> removal by coconut shell char/CaO from calcium looping in a fluidized bed reactor[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2020, 37(4): 688–697.
- [129] 肖申. 生物质化学链燃烧过程中氮的迁移机理研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [130] ZHANG L H, DUAN F, CHYANG C. Utilization of an organic calcium compound to reduce SO<sub>2</sub> and NO emissions from sewage sludge combustion[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(3): 3950–3957.
- [131] ZHANG Z L, ZENG Q D, HAO R L, et al. Combustion behavior, emission characteristics of SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> and NO, and *in situ* control of SO<sub>2</sub> and NO during the co-combustion of anthracite and dried sawdust sludge[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 716–726.
- [132] HOFBAUER G, BEISHEIM T, DIETER H, et al. Experiences from oxy-fuel combustion of bituminous coal in a 150 kWth circulating fluidized bed pilot facility[J]. *Energy Procedia*, 2014, 51: 24–30.
- [133] DUAN L B, ZHAO C S, ZHOU W, et al. Effects of operation parameters on NO emission in an oxy-fired CFB combustor[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(3): 379–384.
- [134] HU Y, NAITO S, KOBAYASHI N, et al. CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases[J]. *Fuel*, 2000, 79(15): 1925–1932.
- [135] WALL T, LIU Y H, SPERO C, et al. An overview on oxyfuel coal combustion: State of the art research and technology development[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2009, 87(8): 1003–1016.
- [136] LI W, LIU D B, LI S Y, et al. Combustion performance and ash compositions during biomass/semi-coke blended fuel oxy-fuel circulating fluidized bed combustion[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(3): 3522–3531.
- [137] WANG C A, DU Y B, CHE D F. Investigation on the NO reduction with coal char and high concentration CO during oxy-fuel combustion[J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(12): 7367–7377.
- [138] TOURUNEN A, SAASTAMOINEN J, NEVALAINEN H. Experimental trends of NO in circulating fluidized bed combustion[J]. *Fuel*, 2009, 88(7): 1333–1341.
- [139] DE DIEGO L F, DE LAS OBRAS-LOSCERTALES M, RUFAS A, et al. Pollutant emissions in a bubbling fluidized bed combustor working in oxy-fuel operating conditions: Effect of flue gas recirculation[J]. *Applied Energy*, 2013, 102: 860–867.
- [140] 张恒, 王勤辉, 梁晓锐, 等. CO<sub>2</sub> 气氛下煤/生物质混合热解过程氮转化特性实验 [J]. *热力发电*, 2019, 48(4): 8–14.  
ZHANG Heng, WANG Qinhui, LIANG Xiaorui, et al. Experimental study on transformation characteristics of nitrogen during coal/biomass co-pyrolysis in CO<sub>2</sub> atmosphere[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(4): 8–14.
- [141] CHANG H, LI B Q, LI W, et al. The influence of mineral matters in coal on NO-char reaction in the presence of SO<sub>2</sub>[J]. *Fuel*, 2004, 83(6): 679–683.
- [142] 柳殿彬. 高碱燃料富氧燃烧碱金属硫酸盐化反应特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2020.
- [143] 田路泞, 陈振辉, 王贤华, 等. 水蒸气和石灰石对流化床富氧燃烧 NO 的影响 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(8): 95–99.  
TIAN Luning, CHEN Zhenhui, WANG Xianhua, et al. Effect of steam and limestone on NO during oxy-fuel fluidized bed combustion[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 42(8): 95–99.
- [144] ZHU C Q, LIU S Y, LIU H, et al. NO<sub>x</sub> emission characteristics of fluidized bed combustion in atmospheres rich in oxygen and water vapor for high-nitrogen fuel[J]. *Fuel*, 2015, 139: 346–355.
- [145] 张小桃, 张卫东, 慕昊良, 等. 600 MW 机组燃煤锅炉耦合生物质气再燃污染物排放研究 [J]. *热力发电*, 2021, 50(6): 26–32.  
ZHANG Xiaotao, ZHANG Weidong, MU Haoliang, et al. Pollutant emission of a 600 MW coal-fired boiler coupled with biomass gas reburning[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(6): 26–32.
- [146] HAYS M D, KINSEY J, GEORGE I, et al. Carbonaceous particulate matter emitted from a pellet-fired biomass boiler[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(9): 536.
- [147] WANG Q Y, ZHANG L, SATO A, et al. Interactions among inherent minerals during coal combustion and their impacts on the emission of PM<sub>10-1</sub>. 1. emission of micrometer-sized particles[J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(2): 756–765.
- [148] 于敦喜. 燃煤细颗粒物的模态识别及其形成机理 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [149] BOMAN C, NORDIN A, BOSTRÖM D, et al. Characterization

- of inorganic particulate matter from residential combustion of pelletized biomass fuels[J]. *Energy & Fuels*, 2004, 18(2): 338–348.
- [150] 耿春梅, 陈建华, 王歆华, 等. 生物质锅炉与燃煤锅炉颗粒物排放特征比较 [J]. *环境科学研究*, 2013, 26(6): 666–671.  
GENG Chunmei, CHEN Jianhua, WANG Xinhua, et al. Comparative study on the particle emission characteristics of biomass boiler with coal-fired industrial boiler[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(6): 666–671.
- [151] JOHANSSON L S, LECKNER B, GUSTAVSSON L, et al. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(25): 4183–4195.
- [152] SIMONEIT B R T, SCHAUER J J, NOLTE C G, et al. Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(2): 173–182.
- [153] LESKINEN J, TISSARI J, USKI O, et al. Fine particle emissions in three different combustion conditions of a wood chip-fired appliance—Particulate physico-chemical properties and induced cell death[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 86: 129–139.
- [154] 杨伟. 生物质成型燃料燃烧颗粒物生成特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [155] WANG L, LØVÅS T, HOUSHFAR E. Effect of sewage sludge addition on potassium release and ash transformation during wheat straw combustion[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2014, 37: 7–12.
- [156] SKOGLUND N, GRIMM A, ÖHMAN M, et al. Effects on ash chemistry when co-firing municipal sewage sludge and wheat straw in a fluidized bed: Influence on the ash chemistry by fuel mixing[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 27(10): 5725–5732.
- [157] 张志清, 郭庆华, 黄宇宸, 等. 高温过程对气化炉内颗粒物形态结构演变的影响 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(24): 7287–7294, 7455.  
ZHANG Zhiqing, GUO Qinghua, HUANG Yuchen, et al. Effect of high temperature process on the morphology structure evolution of particles inside a gasifier[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(24): 7287–7294, 7455.
- [158] THUNMAN H, LECKNER B. Influence of size and density of fuel on combustion in a packed bed[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2939–2946.
- [159] 姚锡文, 许克强, 刘清华, 等. 生物质热转化过程中积灰沾污结渣特性及趋势预测研究进展 [J]. *安全与环境学报*: 1–9.
- [160] PERDEW J P, CONSTANTIN L A. Laplacian-level density functionals for the kinetic energy density and exchange-correlation energy[J]. *Physical Review B*, 2007, 75(15): 155109.
- [161] 姜春光, 李定青, 王鹏, 等. 生物质 CFB 锅炉受热面沉积结构和空间分布特性研究 [J]. *山东电力技术*, 2023, 50(3): 63–68.  
JIANG Chunguang, LI Dingqing, WANG Peng, et al. Study on deposition structure and spatial distribution characteristics on heating surface of biomass-fired CFB boiler[J]. *Shandong Electric Power*, 2023, 50(3): 63–68.
- [162] DENG L, ZHANG T, CHE D F. Effect of water washing on fuel properties, pyrolysis and combustion characteristics, and ash fusibility of biomass[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 106: 712–720.
- [163] LIU Z, LI J B, WANG Q H, et al. An experimental investigation into mineral transformation, particle agglomeration and ash deposition during combustion of Zhundong lignite in a laboratory-scale circulating fluidized bed[J]. *Fuel*, 2019, 243: 458–468.
- [164] LIU Z, LI J B, ZHU M M, et al. Experimental investigation into ash deposition and Na migration characteristics during combustion of high sodium Zhundong lignite in a circulating fluidized bed operating at low temperatures[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(1): 188–198.
- [165] NIU Y Q, ZHU Y M, TAN H Z, et al. Investigations on biomass slagging in utility boiler: Criterion numbers and slagging growth mechanisms[J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 128: 499–508.
- [166] 周伟健. 燃煤-生物质锅炉灰结渣特性及烟气高温腐蚀行为研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [167] 刘洋, 刘正宁, 谭厚章, 等. 生物质灰结渣机理研究 [J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(5): 895–899.  
LIU Yang, LIU Zhengning, TAN Houzhang, et al. Mechanism of biomass ash slagging[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(5): 895–899.
- [168] 姚锡文, 许开立, 王文菁, 等. 玉米芯生物质灰的物理化学特性 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(1): 100–104.  
YAO Xiwen, XU Kaili, WANG Wenjing, et al. Physicochemical characteristics of corn cob biomass ash[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(1): 100–104.
- [169] WANG L, SKREIBERG Ø, BECIDAN M. Investigation of additives for preventing ash fouling and sintering during barley straw combustion[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70(2): 1262–1269.
- [170] 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(5): 31–38, 63.  
XU Jiajun. Deposition and corrosion analysis of medium temperature superheater in biomass circulating fluidized bed boiler[J]. *Boiler Technology*, 2022, 53(5): 31–38, 63.
- [171] SANDBERG J, FDHILA R B, DAHLQUIST E, et al. Dynamic simulation of fouling in a circulating fluidized biomass-fired boiler[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(5): 1813–1824.
- [172] 杨波, 钟志强, 黄巧贤, 等. 垃圾焚烧锅炉的高温氯腐蚀研究进展 [J]. *广东电力*, 2016, 29(6): 5–11, 17.  
YANG Bo, ZHONG Zhiqiang, HUANG Qiaoxian, et al. Research development of high temperature chlorine corrosion in waste incineration boilers[J]. *Guangdong Electric Power*, 2016, 29(6): 5–11, 17.
- [173] 庞胜娇. 三种合金耐硫酸盐/氯盐腐蚀行为研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [174] CHEN L, YONG S Z, GHONIEM A F. Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, 38(2): 156–214.
- [175] 陈刚, 康顺顺, 赵坤, 等. 生物质燃烧过程中结焦、积灰及腐蚀形成机理及其抑制剂开发研究进展 [J]. *新能源进展*, 2022, 10(4): 305–315.

- CHEN Gang, KANG Shunshun, ZHAO Kun, et al. Recent advances in the formation mechanism of slagging, fouling, and corrosion during biomass combustion and the development of inhibitors[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2022, 10(4): 305–315.
- [176] KASSMAN H, BERG M. The chlorout concept - measurement and reduction of corrosive alkali chloride [J]. *ThermalNet Newsletter*. 2006, (3).
- [177] RIEDL-NARENTENAU R, DAHL J, OBERNBERGER I, et al. Corrosion in fire tube boilers of biomass combustion plants [C]. //Proceedings of the China International Corrosion Control Conference. China Chemical Anticorrosion Technology Association Beijing, China, 1999, 99: 2-6.
- [178] SCHOFIELD K. New method to minimize high-temperature corrosion resulting from alkali sulfate and chloride deposition in combustion systems. II. molybdenum salts[J]. *Energy & Fuels*, 2005, 19(5): 1898–1905.
- [179] ZAHS A, SPIEGEL M, GRABKE H J. Chloridation and oxidation of iron, chromium, nickel and their alloys in chloridizing and oxidizing atmospheres at 400–700°C [J]. *Corrosion Science*, 2000, 42(6): 1093–1122.
- [180] SPINDLER M W, SPINDLER S L. Creep deformation, rupture and ductility of Esshete 1250 weld metal[J]. *Materials Science and Technology*, 2014, 30(1): 17–23.
- [181] RICHARDSON-BOEDLER C. Metal passivity as mechanism of metal carcinogenesis: Chromium, nickel, iron, copper, cobalt, platinum, molybdenum[J]. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2007, 89(1): 15–70.
- [182] LIU J, CHEN Y, ZHANG J. Oxidation behavior of Ni–Mo–Si alloy coatings fabricated on carbon steel by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 375: 903–910.
- [183] KAWAHARA Y. Recent trends and future subjects on high temperature corrosion prevention technologies in high efficiency waste-to-energy plants[J]. *Zairyo-to-Kankyo*, 2005, 54(5): 183–194.
- [184] ERICSSON K. Co-firing: A strategy for bioenergy in Poland?[J]. *Energy*, 2007, 32(10): 1838–1847.
- [185] 国家能源局. 国家能源局和环境保护部发布《关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知》[EB/OL]. (2017-11-27) [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201712/t20171204\\_3065.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201712/t20171204_3065.htm).
- [186] 国家能源局. 关于印发《2021 年生物质发电项目建设工作方案》的通知 [EB/OL]. (2021-08-11) [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-08/19/content\\_5632087.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-08/19/content_5632087.htm).
- [187] 洪瑜, 邬晨, 王润煜, 等. 双碳背景下农林生物质利用新趋势 [J]. *中国科技信息*, 2024(2): 122–126.