

“‘燃煤+’耦合低碳发电及综合利用技术”专题

煤粉炉掺烧生物质发电技术研究进展

周义¹,张守玉¹,郎森¹,刘思梦¹,杨济凡¹,马达夫¹,胡南²,吴玉新³

(1.上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093;2.长春工程学院,吉林 长春 130103;3.清华大学 热能工程系,北京 100084)

摘要:面对碳达峰、碳中和的减排压力,生物质由于其来源广泛、储量丰富、排放清洁低碳等优点而备受关注。生物质种类繁多,包括农业秸秆、林业废弃物、禽畜粪便、生活垃圾及废弃油脂,燃煤电站掺烧生物质可有效降低CO₂排放量,增强锅炉侧燃料灵活性。介绍了生物质燃料特点,概述了其与煤混燃的燃烧特性、结渣特性以及污染物排放特性。对煤粉锅炉掺烧生物质的技术路线及其改造成本进行总结与比较,最后讨论了煤粉炉掺烧生物质的技术壁垒及解决方案。农林类生物质挥发分较高,反应活性较好,掺烧该生物质可改善燃料燃烧性能,增加炉内燃烧稳定性。但该类生物质中碱金属含量高,掺烧时易结渣,灰熔融温度及燃料中碱金属含量是预测锅炉结渣的重要指标。农林类生物质硫含量、氮含量、灰分及重金属含量均较低,掺烧可减少SO_x、NO_x、烟尘及重金属等污染物排放。污泥类生物质水分高、重金属含量高、热值低,燃烧特性不如煤,掺烧污泥易对锅炉燃烧及污染物排放产生不利影响,但质量比10%以下的污泥直接掺烧对机组影响不大。禽畜粪便、生活垃圾及废弃油脂气化后的生物质气用于煤粉炉掺烧可起到稳燃作用,减少锅炉SO_x、NO_x、烟尘及重金属等污染物排放。生物质与煤耦合发电技术中直接耦合方案较适合农林类生物质掺烧,间接耦合适用于禽畜粪便、生活垃圾及废弃油脂的掺烧,而污泥宜干化后掺烧。生物质经压缩成型后的成型燃料抗压强度及能量密度有较大提升,该技术可一定程度解决生物质储藏及运输等供应链问题;燃料预处理及抗结渣添加剂可降低燃料碱金属含量,提高灰熔融温度,降低锅炉结渣风险;烘焙处理可提高生物质可磨性,增加生物质掺烧比例,提高锅炉制粉系统对掺烧生物质的适应性;对锅炉燃烧器进行改造,合理配风可提高燃烧系统对掺烧生物质的适应性。农林类生物质原料的收购成本高于煤,且生物质发电量无法精确计量暂不能获得财政支持,经济性较差。掺烧生物质的经济性是现阶段阻碍生物质大规模掺烧的主要原因,较低成本的生物质来源及生物质发电量的计量难题亟待解决。

关键词:煤粉炉;生物质;掺烧;燃煤污染物;低碳;燃煤发电

中图分类号:TQ53;TK114 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2022)06-0026-09

Research progress of biomass blending technology in pulverized coal furnace for power generation

ZHOU Yi¹,ZHANG Shouyu¹,LANG Sen¹,LIU Simeng¹,YANG Jifan¹,MA Dafu¹,HU Nan²,WU Yuxin³

(1.School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2.Changchun Institute of Technology, Changchun 130103, China; 3.Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Under the pressure of carbon peak and carbon neutralization emission reduction, biomass has attracted much attention due to its characteristics of wide source, abundant reserves, clean and low-carbon emissions. There are many kinds of biomass, including straw, forestry waste, livestock manure, domestic waste and waste oil. Biomass blending in coal-fired power plants can effectively reduce carbon dioxide emissions and strengthen the flexibility transformation of boiler fuel side. The characteristics of biomass were introduced, and

收稿日期:2022-01-25;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CC22012502

基金项目:国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究资助项目(51761125011)

作者简介:周义(1994—),男,江苏沭阳人,硕士研究生。E-mail:260237435@qq.com

通讯作者:张守玉(1971—),男,吉林吉安人,教授,博士。E-mail:zhangsy-guo@163.com

引用格式:周义,张守玉,郎森,等.煤粉炉掺烧生物质发电技术研究进展[J].洁净煤技术,2022,28(6):26-34.

ZHOU Yi,ZHANG Shouyu,LANG Sen,et al.Research progress of biomass blending technology in pulverized coal furnace for power generation[J].Clean Coal Technology,2022,28(6):26-34.



移动阅读

the characteristics of combustion, slagging and pollutant emissions of biomass blending in pulverized were summarized. The technical routes and transformation cost of biomass blending in pulverized coal boiler were summarized and compared. Lastly, the technical barriers and solutions to co-combustion of biomass in pulverized coal boiler were discussed. Agroforestry biomass has high volatiles and good reactivity. Blending this kind of biomass can improve the fuel combustion performance and increase the combustion stability of the boiler. However, the alkali metal content in biomass is high, and it is easy to cause serious slagging when blending. The ash melting temperature and alkali metal content in fuel are important indicators for predicting boiler slagging. The sulfur content, nitrogen content, ash content and heavy metal content of agricultural and forestry biomass are low. The combustion of blending biomass can reduce SO_x , NO_x , soot and heavy metal emission. Sludge biomass has high moisture content, high heavy metal content, low calorific value, and less combustion characteristics than coal, so it is usually to have a bad influence on combustion and pollutant emission, but the direct blending sludge below 10% (mass ratio) has little effect on the unit. The biomass gas generated from the gasification of livestock manure, domestic waste and waste oil can play a role in stabilizing combustion in pulverized coal furnace and reduce SO_x , NO_x , soot and heavy metal emissions. The direct coupling scheme of biomass and coal coupling power generation technology is more suitable for the co-combustion of agricultural and forestry waste. The indirect coupling co-combustion is more suitable for the co-combustion of livestock manure and domestic waste, while sludge co-combustion needs to be dried. It is believed that the compressive strength and energy density of molded fuel made of biomass after compression molding are greatly improved, and this technology can solve the supply chain problems such as biomass storage and transportation. Fuel pretreatment and anti-slagging additives can reduce alkali metal content of biomass, improve ash melting temperature and reduce the risk of boiler slagging. Baking treatment can improve the grindability of biomass, increase the proportion of biomass blending, and improve the adaptability of boiler pulverizing system to biomass blending. The modification of boiler burners and reasonable air distribution can improve the adaptability of combustion system to mixed burning biomass. The acquisition cost of agricultural and forestry biomass raw materials is higher than that of coal, and inaccurate measurement of biomass power generation can not get financial support, the economy is poor. The economy of co-firing biomass is the main reason that hinders the large-scale co-firing of biomass. The measurement of low-cost biomass sources and biomass power generation needs to be solved urgently.

Key words: pulverized coal fired boiler; biomass; blending combustion; pollutant from coal combustion; low carbon emission; coal-fired power generation

0 引 言

近年来,化石燃料过度使用造成的环境恶化、气候变暖等问题受到国际社会重视,控制 CO_2 排放已迫在眉睫。国家主席习近平在联合国第七十五届联合国气候大会郑重承诺:中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施, CO_2 排放力争于 2030 年前实现碳达峰,努力争取 2060 年前实现碳中和^[1]。

在我国所有工业部门中,发电行业是 CO_2 最大排放者,2019 年中国火力发电 CO_2 排放量达 4.3 Gt, 占全国总排放量的 41%。研究认为中国现有能源结构阻碍了碳中和、碳达峰目标的实现^[2]。为优化我国能源结构,火力发电需要为新能源让出发电负荷,然而风能、水能、光伏等新能源由于其随机性、间歇性等特点导致电网难以消纳。此外,现阶段燃煤机组调峰能力尚有不足致使“弃风”、“弃光”甚至部分地区“拉闸”现象发生^[3-6]。若强制控碳减排,关停煤电机组势必造成巨大的资产搁置,危害我国能源安全。

联合国气候变化委员会发布了各种电源碳排放强度,其中煤电、石油、天然气、生物质碳排放强度分

别为 1 001、840、469 和 18 g/kWh(以 CO_2 计)^[7],与煤电、石油、天然气相比,生物质的碳排放强度可忽略不计。生物质储量丰富、可再生、清洁、反应活性好^[8-10],利用现有煤粉炉掺烧生物质仅需适当改造,可实现 CO_2 快速减排,促进锅炉侧燃料灵活性转变^[11]。此外,农林类生物质中挥发分高,与煤混燃能改善燃料燃烧性能,降低着火热^[12],有助于机组低负荷稳燃并促进其向更低负荷调峰^[13]。而生活垃圾、禽畜粪便、污泥及废弃油脂类生物质资源化利用可使其无害化、资源化,利于环境治理。

燃煤耦合生物质发电技术在欧美国家应用甚广,煤/生物质混烧电站已达 200 余家^[14]。我国在《能源、电力“十三五”规划》中也坚定支持发展燃煤耦合生物质发电技术^[15],但由于起步晚,与欧美等发达国家还有一定差距。笔者总结生物质与煤混燃的燃烧特性、结渣特性及污染物排放特性,讨论了燃煤电站耦合生物质发电方式、改造路线以及技术壁垒,并对技术壁垒的应对措施进行概述,为燃煤电站掺烧生物质改造提供理论和技术支持。

1 掺烧生物质对燃烧、结渣、排放的影响

在尽量不改变机组结构的同时进行掺烧或煤种

改良等,可增强锅炉燃料灵活性,提高整个机组对燃料的适应性^[16]。机组对燃料的适应性是保证燃煤机组调峰潜力的基础。对于煤粉炉掺烧生物质而言,有必要对生物质燃料特点及其与煤混燃的燃烧、结渣及污染物排放特性进行研究。

1.1 生物质燃料特点

国际能源机构(IEA)将生物质定义为通过光合作用所形成的有机体,包括动植物以及微生物^[17],主要有农林废弃物、污泥、动物粪便、生活垃圾、废弃油脂。我国生物质资源量及其资源化利用现状如图1所示。同时,笔者对不同类型生物质燃料及煤的燃料性质进行统计,结果见表1。

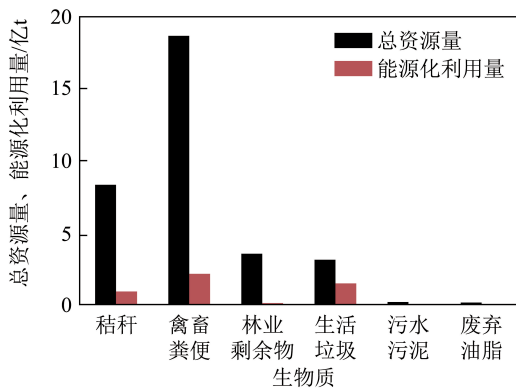


图1 我国生物质资源量及其资源化利用现状

Fig.1 Current situation of biomass resources and energy utilization in China

表1 不同生物质及煤的燃料性质统计(平均值)

Table 1 Statistics on properties of different types of biomass fuels and coals(average)

燃料	工业分析/%				热值/ (MJ·kg ⁻¹)
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	
木头 ^[18]	6.42	0.63	76.55	16.40	14~21
麦秆 ^[18]	8.54	9.55	64.95	15.60	23~28
粪便 ^[19]	10~26	—	60~75	10~16	11~17
污泥 ^[20]	25.24	35.35	34.57	4.84	7.50
烟煤 ^[18]	12.08	14.76	25.98	47.18	21.62
贫煤 ^[18]	3.48	37.94	8.83	49.95	19.43

1) 秸秆。截至2020年,我国秸秆资源年产量为8.29亿t,但资源化利用仅有8 821.5万t^[17],开发利用潜力巨大。秸秆挥发分高、固定碳低、低硫、低灰分,是良好的清洁燃料^[21]。但缺点是能量密度低、分布较分散,其供应受季节影响较大。

2) 林业剩余物。林业剩余物主要指林业的“三剩物”即砍伐剩余物、造材剩余物及加工剩余物,我国年林业剩余物产量约3.5亿t^[17]。与农业废弃物

秸秆相比,林业剩余物不仅具有高挥发分、低灰、低硫等特点,其纤维素含量较低、木质素含量较高,易破碎为粉末颗粒,较适于煤粉炉直接掺烧。

3) 污泥。由《3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书》可知,我国2020年污水污泥干重产量为1 447万t,仅有114.6万t被资源化利用^[17]。污泥主要特点为:高水分、高灰分、低热值以及较高的重金属含量^[22]。

4) 动物粪便。我国2020年畜禽粪便干重产量达18.7亿t,沼气化利用仅为2.11亿t^[17]。粪便类生物质主要特点为高水分、低灰分、相对较低的热值^[23]。

5) 生活垃圾。当前我国生活垃圾年产量为3.1亿t,其中垃圾焚烧量约为1.43亿t^[17]。其特点为:热值低、重金属含量高、污染重。

6) 废弃油脂。油脂废弃物指食品加工业及餐饮业中不能再使用的动植物油脂,我国废弃油脂年产量为1 055.1万t,资源化利用量为52.76万t^[17]。

1.2 生物质/煤混燃燃烧特性

燃料的燃烧特性是锅炉燃烧设备设计的主要依据,主要包括燃料的燃点、燃烧速率、热值、燃尽温度等^[24]。

对于农林废弃物类生物质而言,其高挥发分、低碳含量的燃料性质决定了该类生物质具有较好的反应活性及低热值^[25-29]。而煤较低的挥发分、较高的含碳量决定了煤的高热值,也导致反应活性较差。相对燃煤而言,生物质与煤混燃增加了燃料挥发分含量,使其燃烧过程中局部挥发分增加,提高局部挥发分与氧气体积分数的比值,燃点为不同环境温度与挥发分等参量的函数,挥发分与氧气体积分数比越大越易着火^[30]。因此,掺烧该类生物质可降低混合燃料的燃点使燃烧提前^[26]。王健等^[27]对不同掺混比例下平朔煤与棉秆混合焦的燃烧特性进行研究,发现掺入一定比例棉秆焦可降低混合焦燃烧活化能从而降低燃点、提高燃烧速率,但生物质焦与煤焦燃烧速率及夺氧能力的不同使混合燃料的燃烧速率与掺烧比例呈非线性变化。戴惠玉^[28]研究不同比例锯末和煤的燃烧特性,发现随生物质掺烧量的增加,燃料燃烧性能越好,而燃尽性能变化不大,但仍存在最佳混燃比。王华山等^[29]研究了兰炭和稻壳混燃的燃尽性能,发现生物质灰熔融温度低,随生物质添加比例增加,燃烧产生的灰分会堵塞燃料细孔,抑制挥发分析出和焦炭燃烧。综上,虽然生物质掺烧可降低燃料燃点,促进煤燃烧,但掺混比对燃烧速率及燃尽性能的影响不同,仍需进一步研究。

对于污泥类生物质,其含水量高和灰分高的特点导致热值较低,但经干燥脱水后热值与褐煤相当^[21],增加了其能源化利用的可能性。煤与干化后污泥混燃时,由于污泥中挥发分相对较高,混合燃料的燃点降低,着火稳定性高于煤。高挥发分燃料性质特点往往会使燃尽提前^[30]。但污泥灰含量较高,其综合燃烧特性指数低于煤,整体燃烧性能不如煤。

煤粉炉掺烧禽畜粪便、湿垃圾等生物质时,通常将该类生物质经气化炉生成 CH_4 、 CO 、 H_2 等低燃点生物质气,然后通入煤粉炉耦合燃烧。低燃点气体的作用与挥发分类似,可降低燃点,改善燃烧特性,提高燃烧稳定性^[31]。

掺烧农林类生物质及生物质气可改善燃烧特性。煤粉炉掺烧农林生物质及生物质气时炉膛只需维持在煤粉燃点以上^[32],即可顺利着火。一次风着火距离与燃料挥发分呈负相关关系^[30],即挥发分含量越高着火距离越短,越有利于锅炉稳定燃烧。因此,利用该特性可在锅炉不投油时,增加锅炉低负荷燃烧稳定性,提高机组调峰能力。

1.3 生物质/煤混燃结渣特性

锅炉结渣是复杂的物理化学过程,农林类生物质及污泥类生物质中富含大量无机元素,其与煤混燃过程中易生成气相冷凝细灰及低温共熔体^[33],黏附在换热面上易造成结渣。结渣是生物质/煤混燃的最大风险,而灰熔融温度及烟气中碱金属含量是反映锅炉结渣状况的重要参数。

影响生物质/煤灰熔融温度的元素主要有K、Na、Ca、Mg、S、Cl、Fe、Al、Si、P等^[22]。黄东东等^[34]认为灰中成分可分为酸性氧化物(SiO_2 、 Al_2O_3)及碱性氧化物(K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 MgO),酸性阳离子具有较高的离子势,易与氧离子结合形成多聚物提高灰熔融温度;而离子势较低的碱性阳离子作为氧的给予体能解聚多聚物,降低灰熔融温度。非金属元素Cl、S含量对碱金属及碱土金属的成灰过程有重要影响,Cl元素可以增大燃烧过程中碱金属的析出比例^[35],S元素虽然会与碱金属发生硫化反应降低烟气中碱金属含量,但生成的硫酸盐易在换热面上冷凝,形成黏性表层进而捕获烟气中灰颗粒造成锅炉结渣^[36]。因此,煤粉炉掺烧生物质需考虑混合燃料的酸碱比及碱金属含量^[35]。农林废弃物碱金属含量高,大量掺烧时易结渣;而污泥灰含量较高,相较于农林废弃物更易积灰,因此污泥掺烧过程中需控制污泥掺烧量,注意炉膛及时吹灰;而掺烧生物质气可一定程度缓解灰熔融温度低引起的炉底结

渣^[21],但生物质气中仍含有碱金属,易形成气相冷凝细灰进而造成结渣。

1.4 生物质/煤混燃污染物排放特性

煤粉炉掺烧生物质可有效降低 CO_2 排放,但 SO_x 、 NO_x 等污染物排放取决于燃料硫含量、氮含量及炉膛燃烧温度等^[37-38]。

1) SO_x 排放。农林类生物质硫含量较低^[18],因此在掺烧生物质时锅炉硫化物排放量低。此外,生物质中富含K、Ca、Mg等碱金属,其与煤燃烧过程中,碱金属会与烟气 SO_2 反应生成硫酸盐起到良好的固硫作用,可进一步降低烟气中 SO_x 含量^[39]。而污泥含硫量通常比煤高且主要以易挥发的有机硫形态赋存^[23],不适合大量掺烧,但低比例掺烧时,煤中Ca等矿物质可与 SO_x 发生反应固硫,对 SO_x 排放影响不大^[40]。生物质气中硫含量极低,掺烧生物质气可有效降低 SO_x 排放^[41]。

2) NO_x 排放。燃煤锅炉烟气中 NO_x 生成方式比较复杂。燃烧过程中生成的 NO_x 可分为燃料型、热力型及快速型,燃料型 NO_x 占75%左右,热力型约占20%,快速型 NO_x 生成量较少^[42]。

掺烧农林生物质是减少 NO_x 排放的重要方法,该类生物质与煤混燃过程中,生物质中挥发分大量释放并与煤粉夺氧燃烧导致煤粉周围出现局部贫氧,可有效抑制中间产物向 NO_x 转化^[43]。其次,生物质中氮常以氨基形式存在,易于还原气氛下生成 CH_i 、 NH_i 等基团,将生成的 NO_x 转化为HCN和 N_2 ^[44]。此外,生物质热值较低,掺烧生物质时炉膛温度相应降低,可减少热力型 NO_x 的生成,但锅炉过低的烟温易导致SCR脱硝催化剂失活^[32]。倪刚等^[18]在50 kW下行炉上对生物质与贫煤混燃的掺烧位置进行研究,发现生物质从还原区且接近燃尽区射入对NO的还原效果较好。但实际改造过程中考虑到掺烧方式、燃料性质及改造成本,生物质通常从锅炉最上层或最下层备用燃烧器喷入^[44]。

污泥中有较多蛋白质,其氮元素含量高于原煤。少量掺烧时,污泥中挥发分会夺氧燃烧并生成 CH_i 及 NH_i 基团,降低热力型 NO_x 生成,但大量掺烧会导致燃料型 NO_x 排放增加。TAN等^[45]通过现场试验发现污泥掺烧比小于7.35%(质量比)时, NO_x 排放量随掺混比上升而下降。

生物质气的主要成分为 CH_4 、 CO 、 H_2 等气体,均为可与NO发生反应的还原性气体,掺烧生物质气可有效降低 NO_x 排放量。杨章宁等^[46]在50 kW下行炉上对生物质气与贫煤混燃的掺烧量、掺烧位

置进行研究,发现生物质气从燃尽区附近喷入燃烧对 NO_x 排放量的降低效果最好,且随着生物质气掺烧量的增加, NO_x 排放量逐渐降低。

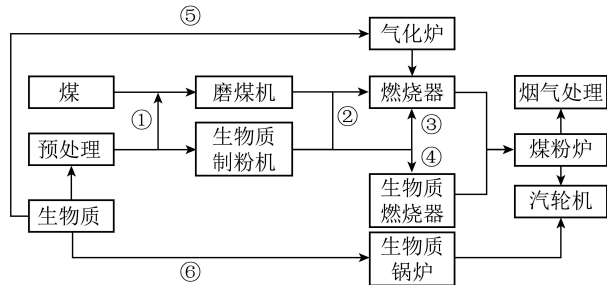
3) 颗粒物排放。燃煤机组颗粒物排放主要来源于燃料灰分,通常燃料灰分越高,烟气中的颗粒物含量越高^[47]。农林生物质和生物质气中灰含量低,掺烧会降低烟尘排放,但农林生物质燃烧后会生成大量亚微米细颗粒,常规的静电除尘无法将其完全脱除,因此需要加装布袋除尘器等除尘设备^[32]。污泥灰分高,掺烧时颗粒物排放高。

4) 重金属排放。相较于农林废弃物、生物质气,污泥富含重金属,电厂掺烧污泥后锅炉烟气以及飞灰中的重金属也会增加^[48]。污泥掺烧过程中,挥发性较强的重金属如 As、Hg、Se 富集于烟气中,而挥发性较差的重金属如 Pb、Cu、Cr、Ni 多富集在灰渣中^[40]。李德波等^[49]对某 330 MW 锅炉掺烧不同比例污泥,研究了重金属排放特性,发现污泥掺烧质量分数在 8% 以下时对机组重金属排放无明显影响。

2 掺烧方式灵活性

2.1 农林废弃物的掺烧方式

适用于燃煤电站耦合生物质的方案有 3 种:直接耦合、间接耦合和并联耦合^[2]。直接耦合是将预处理后的生物质与煤粉一同送入锅炉燃烧;间接耦合是将生物质燃烧或气化后生成的气体引入锅炉发电,禽畜粪便、湿垃圾及废弃油脂类生物质通常采用该种耦合方式;并联耦合是煤与生物质分别采用各自的燃烧系统即煤粉炉和生物质锅炉,二者产生的蒸气进入机组热力系统耦合发电。3 种掺烧方案示意如图 2 所示。



- ① 直接耦合, 生物质与煤共用磨煤机;
 ② 直接耦合, 生物质与煤用不同磨煤机, 共用输粉管及燃烧器;
 ③ 直接耦合, 生物质与煤用不同磨煤机、输粉管, 共用燃烧器;
 ④ 直接耦合, 生物质与煤用不同磨煤机、输粉管, 独立燃烧器;
 ⑤ 间接耦合, 生物质先气化, 气化气进入锅炉耦合燃烧;
 ⑥ 并联耦合, 生物质在生物质锅炉中燃烧产生蒸气, 蒸气与煤粉炉蒸气耦合发电

图 2 煤粉炉掺烧生物质的技术路线

Fig.2 Technical routes of biomass blending in pulverized coal furnace

间接耦合可避免因碱金属含量高引发的锅炉结渣问题,避免生物质制粉繁琐问题,燃料适应性强,也利于回收粉煤灰。并联耦合同样可减少掺烧生物质带来的沾污、结渣问题,有利于粉煤灰及生物质灰的分级回收利用。但间接耦合需要加装生物质气化炉,并联耦合需要新增生物质锅炉。间接耦合和并联耦合改造成本及运行成本都较高,是直接耦合生物质的 4~9 倍,3 种耦合形式的改造投资及运行成本^[14]见表 2。直接耦合更适合我国燃煤机组的改造。

表 2 掺烧生物质直接、间接和并联耦合的改造、运行成本

项目	元/kWh		
	直接耦合	间接耦合	并联耦合
改造成本	2 790~3 575	195 000~26 000	10 400~16 250
运行成本	71~124	975~1300	416~650

直接耦合根据生物质的掺烧位置不同有 4 种耦合方式^[50]:制粉处耦合、一次风管处耦合、燃烧器处耦合以及独立燃烧器处耦合方式,具体如图 2 所示。

制粉处耦合即将预处理后生物质与煤一起送入磨煤机中磨制成粉,在一次风气流的作用下经燃烧器进入炉膛燃烧。该种耦合方式几乎不需对现有锅炉设备进行改造,成本较低。但生物质磨制困难且易堵塞输粉管道^[51],生物质可掺烧比例较小(热值比 0~10%)^[14]。

一次风管处耦合是将预处理后生物质送入专用磨煤机磨制成粉,磨制完的生物质粉与煤粉在一次风管处混合并由一次风携带经燃烧器进入锅炉燃烧。辊式磨煤机、锤片磨和直吹式制粉系统较适合生物质粉的磨制运输^[32,44]。该种耦合方式改造成本除新增专用生物质制粉设备外,无其他投资且改造过程不影响原机组运行。目前,该种燃烧方式最多可以掺烧 20% (热值比) 的生物质^[14]。

燃烧器处耦合和一次风管处耦合相似,采用同样的独立生物质制粉设备,但生物质粉与煤粉于燃烧器处混合。该种耦合方式大大降低了生物质粉堵管风险,扩大了生物质粉粒径要求,提高了生物质耦合比例(10%~50%)^[14],但仍需建设复杂的生物质粉输送管路。此外,由于生物质碱金属含量高、燃点低、着火距离短,掺烧过程中可能会出现燃烧器结焦、烧毁现象,因此还需对原煤粉燃烧器进行相应改造^[52]。

独立燃烧器耦合方案即生物质磨制完成后经专

用输粉管道直接由生物质专用燃烧器送入炉膛燃烧。此时,生物质粉制备以及燃烧完全独立于燃煤系统,进一步提高了生物质掺烧比例(50%~100%)^[14]。该方案改造成本在4种方案中最高,生物质掺烧量也最高。

2.2 污泥的掺烧方式

掺烧污泥方式通常分为直接掺烧、机组烟气直接干化后掺烧及蒸气间接干化后掺烧3种。煤粉炉的湿污泥含水量高、热值低不适合直接掺烧,通常需将污泥干化后掺烧^[53]。

烟气直接干化污泥掺烧即利用锅炉高温烟气作为热源干燥污泥,干化后污泥与煤混合后一同送入磨煤机制粉,干化后产生的废气送入炉膛燃烧,如图3所示。炉膛高温及锅炉的脱硫、脱硝系统可满足污泥适量掺烧的排放问题。该种方案对锅炉效率影响不大,成本适中,但掺烧量过大时,所需烟气量大,易降低锅炉主蒸气参数^[53]。

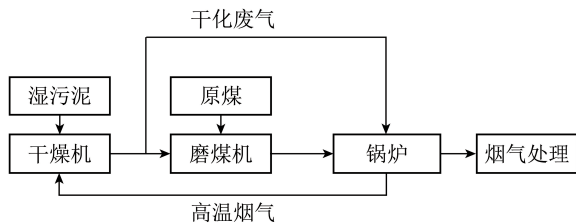


图3 烟气直接干化污泥掺烧工艺

Fig.3 Process route of sludge dried by flue gas directly blending in co-combustion

蒸气间接干化污泥掺烧即利用汽轮机抽汽作为热源干燥污泥,干化后的污泥与原煤一同送入磨煤机制粉。干化产生的可凝废气通过冷凝器冷凝成水,不可凝废气则通入锅炉燃烧,如图4所示。该种掺烧方式的热源来自汽轮机抽气,对锅炉主蒸气参数影响较小,可实现污泥的大量干化掺烧,但对凝结废水的处理较为困难,成本较高^[40]。

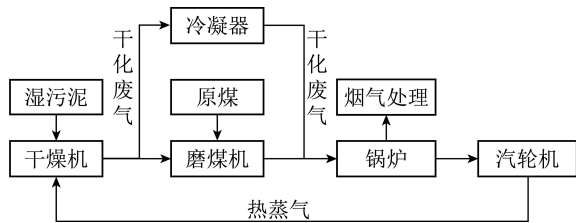


图4 蒸气间接干化污泥掺烧工艺

Fig.4 Process route of sludge dried by steam indirectly blending in co-combustion

3 煤粉炉掺烧生物质壁垒及应对措施

3.1 农林废弃物的供应与储运

煤粉炉掺烧生物质对燃料的需求量大,生物质

原料供应是限制生物质发电的核心问题。我国农业作业多以家庭式耕种为主,作物种植规模小,相对分散。其次,我国农业废弃物需要集中收购且收购过程较大程度依赖农户意愿。因此,需建立较全面的农业生产体系,优化秸秆收购模式,健全生物质供应的相关政策,推进生物质能的利用。

对于生物质储运而言,先进燃煤机组掺烧生物质不可能将生物质以散料形式运到布置紧凑的电厂。将生物质压缩成型后运输至发电厂,可减少生物质散料运输成本及火电厂的储藏成本,且经压缩成型后的生物质颗粒能量密度及抗压强度也会显著提高^[10],利于火力发电厂的掺烧利用。

3.2 制粉、燃烧系统适应性

农林废弃物类生物质难以破碎,需采取合适的生物质制粉设备,如锤磨机、辊式磨煤机可满足生物质制粉需求。其次,对原料进行烘焙处理使其可磨性较好、疏水、热值增加^[14],提高该类生物质掺烧对制粉系统的适应性。农林废弃物挥发分高,掺烧时易造成着火提前,引起燃烧器超温进而造成燃烧器表面结焦或烧毁。因此,大比例掺烧生物质时,需适当调节一、二次风的风速,提高该类生物质掺烧对燃烧系统的适应性。

污泥类生物质含水量多,经干化后含水量仍达30%^[40],极易堵塞煤仓下料口及磨煤机入口,因此需控制污泥掺烧量并使污泥与煤混合均匀。

3.3 掺烧农林生物质的沾污、结渣问题

掺烧生物质的最大风险为锅炉的沾污、结渣问题。生物质中碱金属含量高,燃烧过程中引发的结渣^[21]严重威胁机组安全性和经济性。燃料预处理及抗结渣添加剂可缓解掺烧生物质带来的结渣情况。相关研究表明^[34]向燃料中掺烧一些富含 SiO_2 、 Al_2O_3 的酸性添加剂改变灰分酸碱比可起到抗结渣作用。利用水洗、醋酸铵洗以及盐酸洗等洗涤方式^[54]脱除了生物质中不同赋存形式的钾,可在提高生物质灰熔融温度的同时降低了锅炉炉膛烟气中钾含量,降低锅炉结渣的可能,也可减少碱金属含量高可能带来催化剂堵塞、中毒等问题^[55]。

3.4 煤粉炉掺烧生物质的经济性

按热值折算生物质发电成本大多高于煤炭。无政府补贴的情况下,发电企业掺烧生物质大多亏本。污泥类生物质的掺烧虽会增加发电成本,但考虑到环境效益且依据现有补贴^[56]仍可获得一定的经济效益。而掺烧农林废弃物类生物质因其生物质掺烧发电量难以精确计量,无法获取国家财政支持,步履维艰^[57]。间接耦合及并联耦合中生物质发电量的监

测手段已取得一定突破,但直接耦合中生物质发电量计量技术仍需进一步研究。清华大学孟庆慧等^[58]提出一种¹⁴C同位素在线监测生物质混燃比的方法,可实现生物质发电量的精确检测,该技术已成功示范。

4 结语与展望

面对双碳压力,我国优化能源产业结构势在必行,生物质作为碳排放量极低的碳质燃料具有来源广、产量丰富等特点,利用潜力巨大,生物质掺烧可实现CO₂快速减排。目前限制生物质大量掺烧的因素主要为:生物质燃料的来源及储运、生物质燃料发电量的单独计量。对此,提出如下建议:

1) 生物质分布零散,储存与运输成本高。建议推行集中化的生物质收购模式,建立合理生物质市场秩序。同时进一步开发生物质压缩成型技术,提高生物质成型燃料的抗压强度、能量密度,降低生物质供应链的风险。

2) 由于生物质发电量难以单独计量导致其暂无法获得财政补贴,掺烧生物质发电企业难以盈利。建议采用¹⁴C同位素在线监测技术以实现生物质发电量的精准计量。

3) 农林废弃物类生物质反应活性好、挥发分含量高、燃点低,掺烧高挥发分燃料可以提升锅炉低负荷下稳燃能力。受制于生物质燃料的供应,短期内难以实现燃煤机组大量掺烧生物质,建议将其作为调峰“煤”使用^[13]。上海理工大学碳基燃料清洁转化实验室以新疆棉杆及新疆褐煤为原料,研究掺烧生物质对燃烧稳定性的影响,并运用计算流体力学软件采用燃烧器处耦合方案对锅炉低负荷下掺烧生物质的稳燃性能进行仿真,相关试验台及仿真模型正在搭建中。

参考文献 (References):

[1] 新华社.习近平:中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和[EB/OL].(2022-02-16)[2022-03-25].http://www.cnenergynews.cn/zhuanti/2022/02/16/detail_20220216117678.html.

[2] 王一坤,邓磊,贾兆鹏,等.燃煤机组大比例直接耦合生物质发电对机组影响研究[J].热力发电,2021,50(12):80-91.
WANG Yikun, DENG Lei, JIA Zhaopeng, et al. Study on the impact of large-scale direct coupling biomass power generation on coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12):80-91.

[3] 张绪辉,杨兴森,辛刚,等.燃煤火电机组深度调峰运行试验研究[J].洁净煤技术,2022,28(4):144-150.
ZHANG Xuhui, YANG Xingsen, XIN Gang, et al. Experimental study on deep peaking operation of coal-fired thermal power unit[J]. Clean coal Technology, 2011, 28(4):144-150.

[4] VALENCIA Felipe, BILLI Marco, URQUIZA Anahí. Overcoming energy poverty through micro-grids: An integrated framework for resilient, participatory sociotechnical transitions[J]. Energy Research & Social Science, 2021, 75:102030.

[5] YI Yong, WANG Liming, CHEN Zhengying. Estimating the environmental impacts of HVDC and UHVDC lines for large-scale wind power transmission considering height-dependent wind and atmospheric stability[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022, 138:107868.

[6] 马达夫,张守玉,何翔,等.煤粉锅炉超低负荷运行的技术问题和应对措施[J].动力工程学报,2019,39(10):784-791,803.
MA Dafu, ZHANG Shouyu, HE Xiang, et al. Technical problems and countermeasures for ultra-low load operation of pulverized coal boilers[J]. Journal of Power Engineering, 2019, 39(10):784-791,803.

[7] 朱法华,王玉山,徐振,等.中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究[J].电力科技与环保,2021,37(3):9-16.
ZHU Fahua, WANG Yushan, XU Zhen, et al. Research on the development path of carbon peak and carbon neutralization in China's power industry[J]. Power Technology and Environmental Protection, 2021, 37(3):9-16.

[8] XU Jiaqing, ZHANG Shouyu, SHI Yue, et al. Upgrading the wood vinegar prepared from the pyrolysis of biomass wastes by hydrothermal pretreatment[J]. Energy, 2021, 16:122631.

[9] WANG Caiwei, ZHANG Shouyu, WU Shunyan, et al. Multi-purpose production with valorization of wood vinegar and briquette fuels from wood sawdust by hydrothermal process[J]. Fuel, 2020, 282:118775.

[10] CAO Zhongyao, ZHANG Shouyu, HUANG Xiaohe, et al. Correlations between the compressive strength of the hydrochar pellets and the chemical components: Evolution and densification mechanism[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2020, 152:104956.

[11] LI Jin, WANG Rui, LI Haoran, et al. Unit-level cost-benefit analysis for coal power plants retrofitted with biomass co-firing at a national level by combined GIS and life cycle assessment[J]. Applied Energy, 2021, 285:116494.

[12] 许旭斌,戴航,赵帆,等.恒温下玉米芯焦与煤混燃动力学研究[J].太阳能学报,2021,42(4):16-23.
XU Xubin, DAI Hang, ZHAO Fan, et al. Study on co-combustion kinetics of corncoke and coal at constant temperature[J]. Solar Energy Journal, 2021, 42(4):16-23.

[13] 张广才,周科,鲁芬,等.燃煤机组深度调峰技术探讨[J].热力发电,2017,46(9):17-23.
ZHANG Guangcai, ZHOU Ke, LU Fen, et al. Discussion on deep peak shaving technology of coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9):17-23.

[14] 杨卧龙,倪煜,曹珑.生物质直接混烧技术在燃煤电站的应用研究进展[J].可再生能源,2021,39(8):1007-1012.
YANG Wolong, NI Yu, CAO Shuang. Research progress on the application of biomass direct co-firing technology in coal-fired power plants[J]. Renewable energy, 2021, 39(8):1007-1012.

[15] 李琼慧,王彩霞.从电力发展“十三五”规划看新能源发展

- [J]. 中国电力,2017,50(1):30-36.
- LI Qionghui, WANG Gaixia. From the perspective of the 13th Five-Year Plan of electric power development, new energy development[J]. China Electric Power,2017,50(1):30-36.
- [16] 黄东风,余孝云,何斯征,等. 国际可再生能源统计实践的启示[J]. 中国能源,2015,37(4):14-18.
- HUANG Dongfeng, SHE Xiaoyun, HE Sizheng, et al. Enlightenment of international renewable energy statistics practice[J]. China Energy,2015,37(4):14-18.
- [17] 中国产业发展促进会生物质能产业分会. 3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书[M]. 北京:中国产业发展促进会生物质能产业分会,2021.
- [18] 倪刚,杨章宁,冉桑铭,等. 生物质与煤直接耦合燃烧试验研究[J]. 洁净煤技术,2021,27(3):198-203.
- NI Gang, YANG Zhangning, RAN Shenming, et al. Experimental study on direct coupled combustion of biomass and coal[J]. Clean Coal Technology,2021,27(3):198-203.
- [19] 朱志平,董红敏,魏莎,等. 中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(4):743-748.
- ZHU Zhiping, DONG Hongmin, WEI Sha, et al. Effects of livestock manure management changes on greenhouse gas emissions in China[J]. Journal of Agricultural Environmental Science,2020,39(4):743-748.
- [20] 张自丽,孙光,段伦博. 煤与污泥混燃及污染物逸出特性研究[J]. 洁净煤技术,2022,28(3):118-129.
- ZHANG Zili, SUN Guang, DUAN Lunbo. Study on the characteristics of mixed combustion of coal and sludge and emission of pollutants[J]. Clean coal technology,2022,28(3):118-129.
- [21] 刘宏宇,张守玉,宋晓冰,等. 抗结渣生物质燃料研究进展[J]. 洁净煤技术,2020,26(1):22-31.
- LIU Hongyu, ZHANG Shouyu, SONG Xiaobing, et al. Research progress of anti-slagging biomass fuel[J]. Clean Coal Technology,2020,26(1):22-31.
- [22] 张培争,张守玉,张一帆,等. H_2O_2 添加对城市污泥水热处理产理化特性的影响[J]. 环境工程学报,2021,15(9):2996-3003.
- ZHANG Peizheng, ZHANG Shouyu, ZHANG Yifan, et al. Effect of H_2O_2 addition on physicochemical properties of municipal sludge hydrothermal treatment products[J]. Environmental Engineering Journal,2021,15(9):2996-3003.
- [23] 王玉琪. 牛粪秸秆压成块效益佳[J]. 农村新技术,2012(11):53.
- WANG Yuqi. Batching of cow dung straw is good[J]. New rural technology,2012(11):53.
- [24] 朱峰岸. 生物质与煤混燃研究现状与展望[J]. 农业工程与装备,2021,48(4):1-3.
- ZHU Feng'an. Research status and prospect of biomass and coal CO combustion[J]. Agricultural Engineering and Equipment,2021,48(4):1-3.
- [25] SITI Shawalliah Idris, NORAZAH Abd Rahman, KHUDZIR Ismail. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA) [J]. Bioresource Technology,2012,123:581-591.
- [26] SAHU S G, SARKAR P, CHAKRABORTY N, et al. Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars [J]. Fuel Processing Technology,2009,91(3):369-378.
- [27] 王健,张守玉,郭熙,等. 平朔煤和生物质共热解实验研究[J]. 燃料化学学报,2013,41(1):67-73.
- WANG Jian, ZHANG Shouyu, GUO Xi, et al. Experimental study on co-pyrolysis of Pingshuo coal and biomass[J]. Journal of Fuel Chemistry,2013,41(1):67-73.
- [28] 戴惠玉. 生物质与煤混合燃烧特性及动力学分析[D]. 吉林:东北电力大学,2013.
- [29] 王华山,房瑀人,张歆悦,等. 煤与生物质掺混燃烧特性[J]. 科学技术与工程,2020,20(8):3053-3061.
- WANG Huashan, FANG Yuren, ZHANG Xinyue, et al. Coal and biomass blended combustion characteristics [J]. Science, Technology and Engineering,2020,20(8):3053-3061.
- [30] 李凤瑞. 燃煤锅炉直流一次风粉着火距离的预测模型及其理论分析[J]. 锅炉技术,2011,42(2):36-40.
- LI Fengrui. Prediction model and theoretical analysis of ignition distance of direct current primary air powder in coal-fired boiler [J]. Boiler Technology,2011,42(2):36-40.
- [31] AMYOTTE Paul R, MINTZ Kenneth J, PEGG Michael J, et al. The ignitability of coal dust-air and methane-coal dust-air mixtures [J]. Fuel,1993,72(5):671-679.
- [32] 王一坤,徐晓光,王翔,等. 燃煤机组多源耦合发电技术及应用现状[J]. 热力发电,2022,51(1):60-68.
- WANG Yikun, XU Xiaoguang, WANG Xu, et al. Multi-source coupling power generation technology and application status of coal-fired units [J]. Thermal power generation,2022,51(1):60-68.
- [33] 陈汉平,李至,司耀辉,等. 煤与生物质混燃灰渣特性分析[J]. 电站系统工程,2015,31(3):1-4,8.
- CHEN Hanping, LI Zhi, SI Yaohui, et al. Characteristic analysis of coal and biomass co-combustion ash [J]. Power Plant System Engineering,2015,31(3):1-4,8.
- [34] 黄东东,张守玉,常明,等. 高钠煤灰烧结特性研究进展[J]. 洁净煤技术,2021,27(1):83-94.
- HUANG Dongdong, ZHANG Shouyu, CHANG Ming, et al. Research progress on sintering characteristics of high sodium coal ash [J]. Clean coal technology,2021,27(1):83-94.
- [35] 李平,梁钦锋,刘霞,等. 酸碱比值与助熔剂对煤灰熔融流动温度影响的研究[J]. 大氮肥,2010,33(2):107-111.
- LI Ping, LIANG Qinfeng, LIU Xia, et al. Effect of acid-base ratio and flux on ash fusion temperature [J]. Large Nitrogen Fertilizer,2010,33(2):107-111.
- [36] FORSBERG C, BROSTRÖM M, BACKMAN R, et al. Principle, calibration, and application of the in situ alkali chloride monitor [J]. Review of Scientific Instruments,2009,80(2):23104.
- [37] 董静兰,马凯. 富氧气氛下煤与生物质掺烧时污染物排放特性[J]. 太阳能学报,2018,39(3):829-836.
- DONG Jinglan, MA Kai. Emission characteristics of pollutants from co-combustion of coal and biomass under oxygen-enriched

- atmosphere[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2018, 39(3): 829-836.
- [38] 毕玉森. 低氮氧化物燃烧技术的发展状况[J]. *热力发电*, 2000, 29(2): 2-9.
- BI Yusen. Development of low nitrogen oxide combustion technology[J]. *Thermoelectric Power Generation*, 2000, 29(2): 2-9.
- [39] 马静颖. 含盐高浓度有机废液的蒸发结晶及流化床焚烧处理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [40] 王飞, 张盛, 王丽花. 燃煤耦合污泥焚烧发电技术研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(3): 82-94.
- WANG Fei, ZHANG Sheng, WANG Lihua. Research progress of coal-fired coupled sludge incineration power generation technology[J]. *Clean coal technology*, 2022, 28(3): 82-94.
- [41] 韩伟哲, 王爱军, 张小桃, 等. 生物质(气)耦合燃煤锅炉运行性能及污染物分析[J]. *能源研究与管理*, 2021(4): 74-79.
- HAN Weizhe, WANG Aijun, ZHANG Xiaotao, et al. Operation performance and pollutant analysis of biomass (gas) coupled coal-fired boilers[J]. *Energy Research and Management*, 2021(4): 74-79.
- [42] 官家宏. 电站煤粉炉氮氧化物控制技术[J]. *电力设备管理*, 2018(10): 84-88, 91.
- GONG Jiahong. Nitrogenoxide control technology of pulverized coal boiler in power station[J]. *Power Equipment Management*, 2018(10): 84-88, 91.
- [43] 张新. 电站锅炉掺烧生物质的污染物释放特性试验研究[J]. *山西电力*, 2018(5): 69-72.
- ZHANG Xin. Experimental study on pollutant release characteristics of biomass blended boilers[J]. *Shanxi Electric Power*, 2018(5): 69-72.
- [44] 王学斌, 谭厚章, 陈二强, 等. 300 MW 燃煤机组混燃秸秆成型燃料的试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(14): 1-6.
- WANG Xuebin, TAN Houzhang, CHEN Erqiang, et al. Experimental study on blended straw briquette fuel for 300 MW coal-fired units[J]. *Journal of China Electrical Engineering*, 2010, 30(14): 1-6.
- [45] PENG Tan, MA Lun, JI Xia, et al. Co-firing sludge in a pulverized coal-fired utility boiler: Combustion characteristics and economic impacts[J]. *Energy*, 2017, 119: 392-399.
- [46] 杨章宁, 卢啸风, 倪刚, 等. 生物质气与煤粉耦合燃烧再燃还原 NO 热态试验研究[J]. *动力工程学报*, 2020, 40(10): 781-785, 814.
- YANG Zhangning, LU Xiaofeng, NI Gang, et al. Biomass gas and reductive coupling of pulverized coal combustion and combustion NO hot state experimental research[J]. *Journal of Power Engineering*, 2020, 40(10): 781-785, 814.
- [47] 梁俊宁, 张振文, 高晓庆, 等. 煤质对锅炉大气污染物排放量的影响[J]. *煤炭转化*, 2015, 38(1): 91-96.
- LIANG Junning, ZHANG Zhenwen, GAO Xiaoping, et al. Effect of coal quality on emission of atmospheric pollutants from boilers[J]. *Coal conversion*, 2015, 38(1): 91-96.
- [48] 张晴, 莫华, 徐海红, 等. 燃煤电厂掺烧废弃物现状及环境管理建议[J]. *环境工程*, 2020, 38(6): 202-207.
- ZHANG Qing, MO Hua, XU Haihong, et al. Present situation of co-combustion waste in coal-fired power plants and suggestions for environmental management[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(6): 202-207.
- [49] 李德波, 孙超凡, 冯斌全, 等. 300 MW 燃煤电厂污泥掺烧技术研究及应用[J]. *浙江电力*, 2019, 38(7): 109-114.
- LI Debo, SUN Chaofan, FENG Binquan, et al. Research and application of sludge blending technology in 300 MW coal-fired power plants[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(7): 109-114.
- [50] 毛健雄. 燃煤耦合生物质发电[J]. *分布式能源*, 2017, 2(5): 47-54.
- MAO Jianxiong. Coal-fired coupled biomass power generation[J]. *Distributed energy*, 2017, 2(5): 47-54.
- [51] 刘家利, 王志超, 邓凤娇, 等. 大型煤粉电站锅炉直接掺烧生物质研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2019, 25(5): 17-23.
- LIU Jiali, WANG Zhichao, DENG Fengjiao, et al. Research progress on direct combustion of biomass in large pulverized coal power plant boilers[J]. *Clean coal technology*, 2019, 25(5): 17-23.
- [52] 陈大元, 王志超, 李宇航, 等. 燃煤机组耦合污泥发电技术[J]. *热力发电*, 2019, 48(4): 15-20.
- CHEN Dayuan, WANG Zhichao, LI Yuhang, et al. Coal-fired unit coupled sludge power generation technology[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(4): 15-20.
- [53] 王一坤, 邓磊, 柳宏刚, 等. 湿污泥掺烧量对抽烟气干化污泥耦合发电机组影响[J]. *热力发电*, 2020, 49(11): 47-54.
- WANG Yikun, DENG Lei, LIU Honggang, et al. The effect of wet sludge co-firing quantity on the flue gas drying sludge coupling generator set[J]. *The thermal power generation*, 2020, 49(11): 47-54.
- [54] MU Lin, LI Tong, WANG Zhen, 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.
- [55] AGBOR Ezinwa, ZHANG Xiaolei, KUMAR Amit. A review of biomass co-firing in North America[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 930-943.
- [56] 郭名女, 唐强, 李建雄, 等. 城镇污水厂污泥与煤混烧发电的技术经济分析[J]. *中国给水排水*, 2008(16): 22-25.
- GUO Mingnv, TANG Qiang, LI Jianxiong, et al. Techno-economic analysis of power generation by sludge and coal co-combustion in municipal wastewater treatment plants[J]. *Water Supply and Drainage in China*, 2008(16): 22-25.
- [57] 井新经, 陈运, 张海龙, 等. 生物质耦合发电技术及发电量计算方法[J]. *热力发电*, 2019, 48(12): 31-37.
- JING Xinjing, CHEN Yun, ZHANG Hailong, et al. Biomass coupling power generation technology and power generation calculation method[J]. *Thermodynamic Power Generation*, 2019, 48(12): 31-37.
- [58] 孟庆慧, 吴玉新, 张扬, 等. 一种基于¹⁴C 同位素在线检测的生物质混燃比监测系统: CN207992199U[P]. 2018-10-19.