

生物质气化耦合发电体系的合成气组分与能量分析

郑妍, 姚宣, 陈训强

(国能龙源环保有限公司, 北京市 海淀区 100039)

Analysis of Syngas Components and Energy in Biomass Gasification Coupled Power Generation System

ZHENG Yan, YAO Xuan, CHEN Xunqiang

(China Energy Longyuan Environmental Protection Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100039, China)

摘要: 碳达峰碳减排目标实现过程中, 充分挖掘生物质耦合发电是一项关键举措。通过 Aspen Plus 软件对生物质气化耦合发电体系中的气化过程进行了建模分析, 重点研究了当量比和环境压力对合成气组分的影响, 并结合计算结果探讨了合成气热值及能量的变化规律。结果表明, 随着当量比的增加, H_2 体积分数由 19.47% 单调降低至 5.19%; CO 体积分数在当量比为 0.3 附近达到最大值 22%; CH_4 体积分数随着当量比的增加呈现单调降低的状态, 从 1.3% 降至 0。依托理论研究的成果, 合成气体热值的曲线与 CO 和 H_2 表现出相同的变化规律, 在当量比 0.3~0.35 时达到最高值, 然后快速下降。考虑到带入炉膛的能量还有气体显焓, 提出了一种热值+显焓的合成气能量评价方式, 其在当量比为 0.35 时达到最大值, 也是生物质耦合气化系统的最优当量比区间。

关键词: 耦合发电; 生物质气化; 当量比; 合成气热值; 能量分析

ABSTRACT: To achieve the carbon emission reduction target, the use of biomass to replace traditional energy is a key measure. The gasification process in the biomass gasification coupled power generation system was modeled and analyzed by Aspen Plus. The influence of equivalence ratio and ambient pressure on the composition of syngas gas was investigated, and the variation law of calorific value and energy of syngas was discussed based on the calculation results. The results show that the volume fraction of H_2 shows a monotonically decreasing trend with the increase of the equivalence ratio, from 19.47% to 5.19%. The CO volume fraction reaches a maximum value of about 22% near the equivalence ratio of 0.3. The volume fraction of CH_4 shows a monotonically decreasing state with the increase of equivalence ratio, from 1.3% to 0. Relying on the results of theoretical research, the gas calorific value curve shows the same change rule as CO and H_2 , and reaches the highest value

when the equivalence ratio is 0.3. In the range of 0.3-0.35, the overall change is not obvious and then declines. Considering the energy brought into the furnace and the sensible enthalpy of the gas, a synthesis gas energy evaluation method of calorific value + sensible enthalpy was proposed, which reaches the maximum value when the equivalence ratio is about 0.35.

KEY WORDS: coupled power generation; biomass gasification; equivalence ratio; calorific value; energy analysis

0 引言

2020年9月22日, 我国向国际社会作出碳达峰、碳中和的郑重承诺^[1]。2020年中央经济工作会议明确将做好碳达峰、碳中和工作列为2020年八项重点任务之一。目前来看, 能源行业碳达峰、碳中和实施路径主要包括大力推动能源清洁化发展, 大力推动能源高效化发展, 大力推进能源消费侧电能替代和大力推进自然碳汇和碳捕集。在清洁能源建设方面, 除了加快太阳能基地、风电基地和水电基地因地制宜发展分布式清洁能源和海上风电之外, 还需要充分重视生物质能源。生物质能源是目前世界上应用最广泛的可再生能源之一, 消费总量仅次于煤炭、石油、天然气, 位居第4位, 它也是唯一可循环、可再生的炭源。利用农作物秸秆及农产品加工剩余物、林业剩余物和能源作物等生物质资源, 可以直接替代煤炭化石能源, 并实现碳零排放。因此碳达峰、碳减排目标实现过程中, 在优化能源结构方面, 充分挖掘生物质替代传统能源是一项关键

举措^[2-7]。

Aspen Plus 作为流程模拟软件,近年来已在各类物料的燃烧、气化领域得到了广泛的应用。本文针对目前的研究状况,利用 Aspen Plus 对生物质气化耦合发电体系中的气化过程进行了建模和分析。重点研究分析当量比和环境压力对合成气组分的影响,并结合计算结果探讨了合成气热值及能量的变化规律,并对如何进一步更高效实现耦合发电进行了研讨。

1 生物质燃煤耦合发电技术

“十四五”期间我国可再生能源、天然气和核能装机的持续增长,以及高碳化石能源利用率的大幅降低,都给燃煤发电企业带来巨大的压力。2018年6月21日,国家能源局、生态环境部联合发布《关于燃煤耦合生物质发电技改试点项目建设的通知》(以下简称《通知》),确定了84个技改项目试点,涉及全国23个省、自治区、直辖市。2019年11月,发改委发布的《产业结构调整指导目录2019》,其中燃煤耦合生物质发电作为新增鼓励产业,被列入指导目录中。然而,随着生物质与燃煤机组耦合发电项目不再享受国家可再生能源电价附加资金补助,由地方制定出台相关政策措施,解决补贴资金问题,限制了耦合项目在“十三五”末期的进一步发展。但随着双碳目标的进一步明确以及地方政府相关政策的出台,比如山东省《关于2020年农林生物质直燃发电项目电价精准补贴有关事项的通知》,生物质耦合发电项目在“十四五”迎来了新的发展机遇^[8-11]。

从20世纪90年代起,欧洲就开始开展生物质燃烧技术研究与应用。在欧洲实施过生物质与煤炭耦合发电的燃煤电厂的数量很多,但只有少数几家进行过长期的、高比例的生物质耦合发电,这些发电厂大多位于荷兰、丹麦和英国。荷兰目前已经有超过50个项目,在荷兰的燃煤发电厂,耦合10%(质量比)的二次燃料已经相对成熟。英国是目前世界上采取生物质耦合技术最多的国家。英国共有16座大型火电厂完成了生物质耦合发电,其中13座为总容量超过1 000 MW的大型燃煤电厂^[12]。

国内目前生物质耦合发电项目包括国电长源荆门、华电襄阳、大唐长山等气化耦合发电项目以及华电十里泉、国电宝鸡等直燃耦合发电项目。整体来看,国内生物质耦合实际投运业绩很少,尚未经大量实践检验,生物质与燃煤机组耦合发电技术尚未完全成熟,有些关键设备的开发、制造,整体系统运行的安全性、可靠性等各方面需进一步完善^[13]。

生物质燃煤耦合发电技术可以分为直接耦合、间接耦合和并联耦合发电。直接耦合是将生物质处理至能够与原煤混燃的状态后直接在炉膛内燃烧的技术,可分为经简单处理后进入机组原磨机、经专用的制备(粉)系统后进入煤粉燃烧器、经专用的制备(粉)系统后进入单独的燃烧器等3种方式。间接耦合发电是指生物质气化或热解后,将所产生的气态产物经过处理送入燃煤机组。并联耦合发电是指生物质采用独立的燃烧装置完成燃烧及热量回收后,将产生的蒸汽并入耦合机组热力系统发电。整体来看,3种技术路线均有其适应的场景。针对生物质耦合比例较小的项目可采用直接耦合的方式,投资成本较小。气化和蒸汽可以实现高比例生物质耦合^[14]。

近年来,生物质气化耦合发电项目因为其在计量方面的优势,已成为生物质利用方面的热点技术。生物质气化是生物质燃料经热化学反应生成生物质燃气的过程(通常采用流化床反应器),反应生成的燃气主要包含一氧化碳、二氧化碳、氢气和一些烃类有机物。气化过程中产生可燃气体的比例与反应气氛和气化环境(压力、温度)关系,以及如何在发电系统内实现更高效率的能量利用急需得到进一步深入研究。但是由于生物质种类繁多、成分复杂、投资过大和运行成本比较高,直接进行具体的实验研究难度较大,寻找一种较为经济的方法替代或引导实验具有重要的意义。

2 计算模型

2.1 气化模型

本文采用 Aspen Plus 软件重点模拟生物质气化过程中产生的合成气的成分并对其进行分析。

实际生物质气化过程是一部分生物质发生燃烧，热量用于维持后续的气化过程，其间伴随着热解发生。因此，利用热解、燃烧和气化3个反应模块构建整个气化过程。气化模型采用吉布斯自由能方法构建。吉布斯反应器根据系统的吉布斯自由能趋于最小值的原则，计算同时到达化学平衡和相平衡的系统组成和相分布，吉布斯反应器是唯一能处理气液固三相平衡的反应器模块。

图 1 为气化反应过程流程图。整个计算流程为：生物质原料进入热解模块(DECOMP)进行分

解，产生气体和固体，其中固体部分与空气一起进入燃烧反应模块(COMBUST)进行燃烧，气体部分和燃烧过程产生的产物进入气化反应器(GASIFY)进行气化；气化产物通过分离模块(SEPATATE)进行分离，得到干燥的气体和水蒸气，将气化产生的气体称为合成气，合成气拥有一定的热值和温度，然后被送入耦合机组炉膛进行焚烧发电。整个反应过程的能量流程为：热解模块产生热量进入燃烧反应器，之后再进入气化反应器。

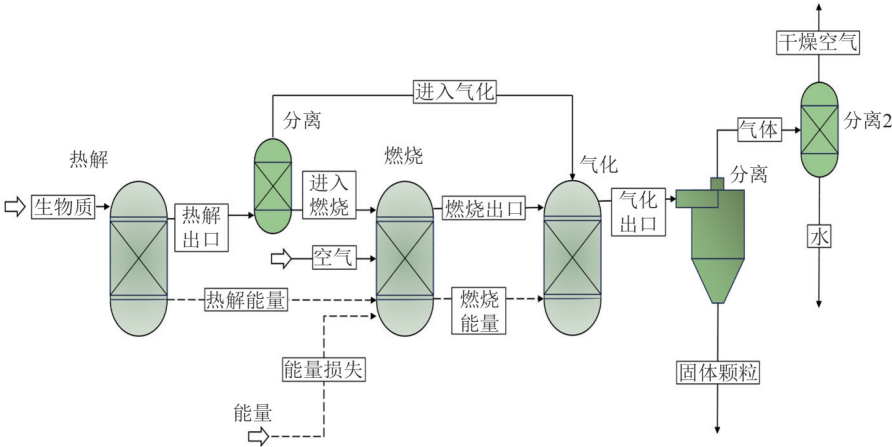


图 1 气化反应过程流程图

Fig. 1 Gasification reaction process flow chart

为了准确模拟生物质燃烧、气化，并简化气化模拟流程，对模拟作如下假设：气体与生物质在相关反应器内均为瞬间完全混合，反应稳定运行，所有反应均达到化学平衡，反应器内部分布均匀，不考虑热量和压力损失；气体产物成分仅考虑 H_2 、 N_2 、 O_2 、 S 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 SO_2 、 H_2S 、 NH_3 、 H_2O ；生物质完全转化，不考虑焦油含量，且灰分为惰性组分。

2.2 燃料分析

为了研究不同环境参数对生物质气化结果的影响，本文采用玉米秸秆作为气化原料。该原料经过破碎后，进行了工业和元素分析，具体结果如表 1 所示，该参数为模型输入参数。

秸秆原料与其他的生物质类似，拥有较高的挥发分，其干燥基挥发分质量分数超过 50%。元素分析中，C 和 O 为主要成分，其干燥无灰基质量分数分别为 54.72% 和 32.95%。灰收到基低位发

热量为 14.02 MJ/kg。灰成分方面，Na、K、Ca 等碱金属及碱土金属含量较高。

3 结果与分析

3.1 压力和当量比对气化过程的影响

当量比(即燃料系数，指燃料燃烧时完全燃烧理论所需要的空气量与实际供给的空气量之比)是影响实际气化反应过程最重要的因素，通常通过控制当量比来控制气化反应过程的温度和整体气化反应进程。当量比越大，越趋近于燃烧；当量比越小，越趋近于热解。在生物质气化耦合反应的进程中，需要燃烧一部分生物质用来提供气化所需的能量，因此当量比不能太低，否则会影响燃烧稳定性。但是当量比也不应过高，过高会导致烟气量和能耗增加，不利于气化后的气体送入燃煤机组进行耦合发电。根据表 1 的元素分析结果，秸秆气化后的可燃气体主体为 H_2 、 CO 和 CH_4 ，

表1 生物质工业、元素分析结果		
Tab. 1 Biomass industry and elemental analysis results		
检测项目		数值
全水分质量分数/%		7.90
工业分析	干燥基灰分质量分数/%	7.06
	干燥基挥发分质量分数/%	68.80
	干燥基固定碳质量分数/%	24.14
	干燥无灰基碳质量分数/%	54.72
元素分析	干燥无灰基氢质量分数/%	5.05
	干燥无灰基氧质量分数/%	32.95
	干燥无灰基氮质量分数/%	0.40
	干燥无灰基硫质量分数/%	0.25
	收到基低位 发热量/(MJ/kg)	14.02
灰成分分析	w(SiO ₂)/%	57.50
	w(Al ₂ O ₃)/%	0.67
	w(Fe ₂ O ₃)/%	1.09
	w(CaO)/%	10.61
	w(MgO)/%	4.17
	w(TiO ₂)/%	0.13
	w(SO ₃)/%	2.73
	w(P ₂ O ₅)/%	ND
	w(K ₂ O)/%	16.53
	w(Na ₂ O)/%	2.49

因此重点分析这3种气体的变化规律。图2为气态组分随当量比的变化，可以看出，H₂体积分数随当量比的增加呈现单调降低的趋势，由19.47%降低至5.19%，这是由于随着当量比的提高和空气量的增加，H₂被氧化比例提高，其含量逐渐降低。CO体积分数随当量比的增加呈现先增加后降低趋势，在当量比为0.3附近达到最大值，约为22%，这是由于C元素随着氧化比例提高，产物主体首先是CO，然后再变为CO₂。CH₄随着当量比的增加呈现单调下降的状态，从1.3%降低至接近于0，这是因为当量比提高，会导致氧气含量和温度提高，所以CH₄几乎完全被氧化。

当气化反应的压力从101.325 kPa增加至506.625 kPa时，H₂、N₂、CO、CO₂、CH₄和H₂O的体积分数整体变化不大，如图3所示。H₂体积分数随压力的增加呈现单调降低的趋势，由14.17%降低至11.94%。CO体积分数随压力的增加也通常呈现单调降低的趋势，由21.63%降低至20.72%，降低幅度较H₂低。CH₄随着反应压力的

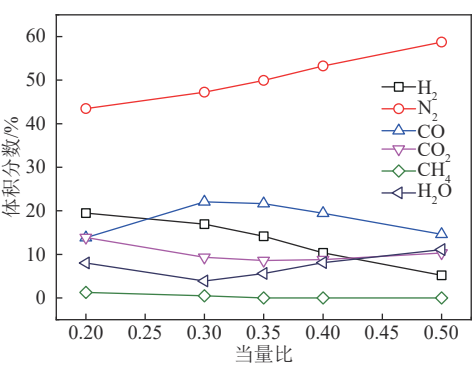


图2 气态组分随当量比的变化
Fig. 2 Variation of gaseous components with equivalence ratio

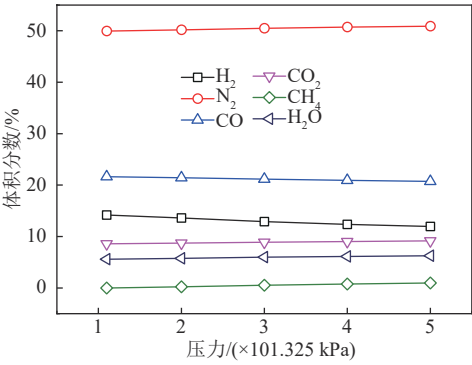


图3 气态组分随气体压力的变化
Fig. 3 Variation of gaseous components with gas pressure

增加呈现单调增加的状态，从0.003 8%增加至0.095%，但是由于CH₄在整体可燃气体中的体积分数较小，因此其对于整个合成气热值的影响较小。

3.2 压力和当量比对合成气能量的影响

因为气化耦合发电系统是要将合成气送入耦合机组炉膛进行焚烧发电，因此，通常人们比较关注合成气的热值。图4显示了H₂、CO和CH₄气体的热值随当量比的变化，同时也给出了3种气体热值之和随当量比的变化规律。热值是通过每小时产出的可燃气体量乘以其本身的热值得出。从图4中可以看出，随着当量比增加，CO和H₂热值均呈现出先增加后下降的趋势，这与气化过程产生气体的量与其所占体积分数有关。CH₄热值基本上随着当量比的降低而逐渐降低。从合成气总热值曲线来看，其与CO和H₂热值展现了相同的变化规律，在当量比为0.3时达到最高值，在当量比为0.3~0.35这一区间，整体变化幅度不大，

然后随当量比增加,热值下降幅度加快。由此可以得出,气化耦合体系的当量比在0.3~0.35对于合成气热值最有利。

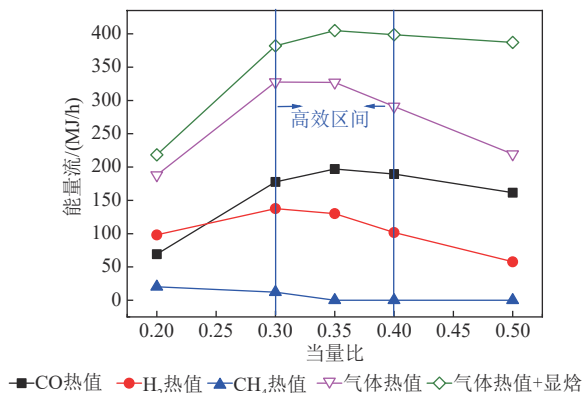


图4 合成气热值及能量随当量比的变化规律

Fig. 4 Variation of calorific value and energy of syngas with equivalence ratio

然而,除了合成气热值外,带入炉膛的还有一部分是显焓所对应的能量。如果合成气的温度整体低于炉膛内的烟气温度,那么还需要再燃烧合成气或者煤来提高气体的温度。因此,提出了一个用来评价合成气能量的综合指标,即用可燃气体热值+显焓的方式(忽略合成气送入炉膛时的能量损失)。那么同样从图4中可以看出,合成气能量综合指标随着当量比的增加,呈现出先增加后下降的趋势,在0.35左右达到最大值,在0.3~0.4基本相差不大。

相比于单独用热值的评价方式,用合成气热值+显焓的方式,整体气化过程当量比在0.3~0.4,处于一个相对高效的区间,比通过热值分析得出的0.3~0.35范围要宽,更利于整个气化过程的控制。

同时,进一步评估了热值和热值+显焓随压力的变化规律,如图5所示。从图5中可以看出, H_2 和 CO 的热值随着压力的增加呈现单调降低的趋势,而 CH_4 的热值随着压力的增加而增加;3种可燃气体整体热值随着压力的增加略微降低;热值+显焓随着压力的增加整体变化幅度不大。因此,对于气化耦合体系,合成气的能量受环境压力的影响较小。

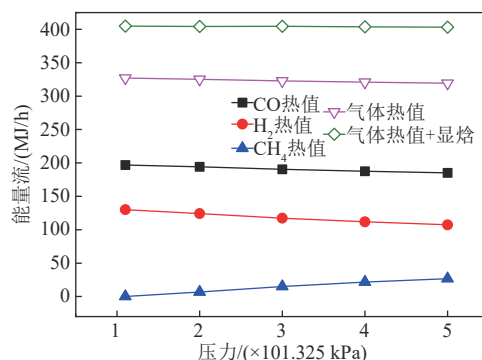


图5 合成气热值及能量随压力的变化规律

Fig. 5 Variation of calorific value and energy of syngas with pressure

4 结论

通过 Aspen Plus 方法对生物质气化耦合发电体系中的气化过程进行了建模和分析。重点对当量比和环境压力对合成气气体组分的影响进行了分析,并结合计算结果探讨分析了合成气热值及能量的变化规律。

依据模拟计算结果, H_2 、CO 和 CH_4 三种主要可燃气体的变化规律如下: H_2 体积分数随当量比的增加呈现单调降低的趋势,由 19.47% 降低至 5.19%; CO 体积分数随当量比的增加呈现先增加后降低趋势,在当量比为 0.3 的附近达到最大值,约为 22%; CH_4 体积分数随着当量比的增加呈现单调降低的趋势,从 1.3% 降低至接近于 0。环境压力对 3 种气体的含量影响较小。

依托理论研究的成果,合成气总热值与 CO 和 H_2 热值展现了相同的变化规律;在当量比为 0.3 时达到最高值,在 0.3~0.35 这一区间,整体变化幅度不大,当量比大于 0.35 后下降幅度加快。考虑到带入炉膛的能量还有气体显焓,提出了一种热值+显焓的合成气能量评价方式,其在当量比为 0.35 左右达到最大值,在 0.3~0.4 变化不大。因此可以得出,当量比在 0.3~0.4,合成气热量较高,生物质气化反应当量比应优选在此高效区间内。同时,合成气热值+显焓受环境压力的影响较小。

参考文献

- [1] 新华网. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. (2020-09-22)[2022-10-20].

- http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527647.htm.
- Xinhuanet. Xi Jinping delivered an important speech at the general debate of the 75th session of the United Nations General Assembly[EB/OL]. (2020-09-22)[2022-10-20]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527647.htm.
- [2] 冯凯辉, 闫湖, 戴吴珍, 等. 计及能源利用效率的含生物质沼气发电农村能源系统优化运行[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 172-178.
- FENG K H, YAN H, DAI W Z, et al. Optimal operation of rural energy system with biomass biogas power generation considering energy utilization efficiency[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 172-178.
- [3] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 54-64.
- JIANG H L, LIU Y X, FENG Y M, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th Five-Year plan under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 54-64.
- [4] 童光毅. 基于双碳目标的智慧能源体系构建[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 1-6.
- TONG G Y. Construction of smart energy system based on dual carbon goal[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 1-6.
- [5] 孙永明, 袁振宏, 孙振钧. 中国生物质能源与生物质利用现状与展望[J]. 可再生能源, 2006(2): 78-82.
- SUN Y M, YUAN Z H, SUN Z J. The status and future of bioenergy and biomass utilization in China[J]. Renewable Energy, 2006(2): 78-82.
- [6] 许红星. 我国能源利用现状与对策[J]. 中外能源, 2010, 15(1): 3-14.
- XU H X. Energy utilization in China and countermeasures[J]. Sino-global Energy, 2010, 15(1): 3-14.
- [7] 薛凯, 王义函, 陈衡, 等. 槽式太阳能辅助生物质热电联产系统热力学性能分析[J]. 发电技术, 2021, 42(6): 653-664.
- XUE K, WANG Y H, CHEN H, et al. Thermodynamic performance analysis of a parabolic trough solar-assisted biomass-fired cogeneration system[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(6): 653-664.
- [8] 毛健雄. 燃煤耦合生物质发电[J]. 分布式能源, 2017, 2(5): 47-54.
- MAO J X. Co-firing biomass with coal for power generation[J]. Distributed Energy, 2017, 2(5): 47-54.
- [9] 高金锴, 佟瑶, 王树才, 等. 生物质燃煤耦合发电技术应用现状及未来趋势[J]. 可再生能源, 2019, 37(4): 501-506.
- GAO J K, TONG Y, WANG S C, et al. The current situation and future development tendency of biomass-coal coupling power generation system[J]. Renewable Energy, 2019, 37(4): 501-506.
- [10] 郭威, 杨鹏, 孙胜博, 等. 计及生物质能的热电联供系统经济运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 88-96.
- GUO W, YANG P, SUN S B, et al. Optimization strategy of a rural combined heat and power system considering biomass energy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 88-96.
- [11] 云慧敏, 代建军, 李辉, 等. 生物质耦合燃煤发电经济环境效益评估[J]. 化工学报, 2021, 72(12): 6311-6327.
- YUN H M, DAI J J, LI H, et al. Economic and environmental assessment of biomass coupled coal-fired power generation[J]. CIESC Journal, 2021, 72(12): 6311-6327.
- [12] DAI J J, SOKHANSANJ S, MELIN S, et al. Overview and some issues related to co-firing biomass and coal[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2008, 86(3): 367-386.
- [13] SUN R W, LIU T T, CHEN X D, et al. A biomass-coal co-firing based bi-level optimal approach for carbon emission reduction in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123318.
- [14] 王一坤, 徐晓光, 王栩, 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 Y K, XU X G, WANG X, et al. Multi-source coupling coal-fired power generating technology and its application status[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 60-68.

收稿日期: 2022-10-24。

作者简介:



郑妍

郑妍(1989), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为煤基清洁发电技术、污染物控制, 12062255@chnenergy.com.cn。

(责任编辑 辛培裕)