

生物质中水分对共气化化学链发电系统的影响研究

周 宇

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月29日; 录用日期: 2025年4月22日; 发布日期: 2025年4月30日

摘 要

生物质与煤的共气化发电技术是一项具有发展前景的技术, 能够有效降低化石燃料对环境的污染。本研究运用Aspen Plus软件对生物质与煤共气化化学链联合循环发电系统进行模拟, 探究生物质中水分对共气化发电系统的影响。研究表明, 当芦竹质量掺杂比例一定时, 降低芦竹水分含量会减少燃料反应器出口烟气流量, 提高NiO转化率和干燥器的热负荷。并且, 水分含量的降低能够有效的提高共气化发电系统的净发电效率。当芦竹质量掺杂比例为10%且水分为0%时, 系统净发电效率高达42.35%。

关键词

化学链, 生物质与煤共气化, 净发电效率, Aspen Plus, 水分

Effect of Blending Ratio on Co-Gasification Chemical Looping Power Generation System

Yu Zhou

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 29th, 2025; accepted: Apr. 22nd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

The co-gasification power generation technology of biomass and coal is a promising technique that can effectively reduce the environmental pollution caused by fossil fuels. This study employs Aspen Plus software to simulate a biomass and coal co-gasification chemical looping combined (CLC) cycle power generation system, investigating the impact of moisture in biomass on the co-gasification power generation system. The research findings indicate that, when the mass blending ratio of *Arundo donax* is constant, reducing its moisture content can decrease the flue gas flow rate at the fuel reactor outlet, enhance the conversion rate of NiO, and increase the thermal load of the dryer. Moreover, the reduction in moisture content can effectively boost the net power generation

efficiency of the co-gasification power generation system. When the mass blending ratio of *Arundo donax* is 10% and its moisture content is 0%, the system's net power generation efficiency can reach as high as 42.35%.

Keywords

Chemical Looping, Biomass and Coal Co-Gasification, Net Power Generation Efficiency, Aspen Plus, Moisture

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球能源结构正在逐步向低碳转型,但化石燃料仍占主导地位[1]。中国的“双碳”战略,即在2030年前实现碳达峰和在2060年前实现碳中和,是一项旨在应对气候变化和推动绿色发展的国家战略。为实现这一目标,中国计划通过多方面的努力来减少碳排放并促进经济转型,而科学地利用碳捕集技术则可以很好地解决这一难题。

目前,燃煤电厂的二氧化碳捕集技术主要包括三种方式:燃烧前捕集、燃烧后捕集和燃烧中捕集。化学链燃烧是一种新型燃烧中碳捕集技术,是由德国科学家 Richter 和 Knoche 在1983年首次提出的,由于在化学链燃烧中,燃料与氧化剂分开反应,通常通过金属氧化物(如铁、铜、钴等)提供氧原子。这使得CO₂的生成与空气分隔开,便于CO₂的收集和存储。因此,被认为是最有前途的碳捕集方法之一。并且,气化化学链相比于传统的化学链燃烧而言,具有燃料适应更强、反应速率更快、热效率更高以及CO₂分离效果更好等优势。

生物质能是最有潜力取代化石燃料的碳中性材料。现如今已有很多科学学者对生物质与煤共气化发电系统进行了模拟研究,并探究不同运行参数对污染物的排放和电厂能耗的影响。Ozonoh 等[2]评估了一种5 MW 生物质与煤共气化热电联产(CHP)发电系统的环境影响。研究表明,随着生物质掺混比例的增加,系统中的CO、CO₂、SO₂和NO_x排放逐渐减少。Long 等[3]研究了生物质掺混比例对系统热效率的影响,发现当掺混比例在10%到30%之间时,热效率的变化在1%以内。此外,将10%的生物质与低品位煤混合可以提高热效率0.7%[4]。Kuo 等[5]评估了0%~100%烘烤生物质含量的煤与烘烤生物质混合物的共气化效果。研究表明,当烘烤生物质掺杂比为80%时,燃气轮机提供了1352.55 kW的净功率输出,系统效率高达58.94%。Qin 等[6]分析了一种生物质共气化和太阳能辅助加氢煤基甲醇多联产发电系统。结果表明,当煤的进料速率保持在100 t/h不变,而生物质进料速率从0增加到40 t/h时,系统的能量效率从53.56%降低到51.64%。

然而,生物质原料中的水分会影响气化过程的热效率,高水分含量的生物质在气化过程中会消耗额外的能量用于水分蒸发,从而降低气化温度,导致反应速率减慢,影响气化效率。因此,生物质中的水分含量过高不利于气化过程。因此,本文使用 Aspen Plus 化工模拟软件生物质干燥过程与生物质与煤共气化化学链联合循环发电系统进行耦合,探究生物质中的水分含量对共气化发电系统的影响。

2. 共气化发电系统模型搭建

2.1. 共气化材料

由于准东煤具有低硫含量和丰富的储量,因此被选作煤的原料。芦竹则因其高挥发分含量、低分解

温度、广泛分布、高产量、强生态适应性、易于繁殖和管理以及适合机械化收割而被选中[7]。表 1 展示了准东煤和芦竹在收到基状态下的工业分析和元素分析。准东煤和芦竹的高位热值分别为 27.88 MJ/kg 和 10.93 MJ/kg。

Table 1. Properties of the raw coal and preprocessed biomass (as-received basis)
表 1. 原料煤和预处理生物质的特性(收到基)

	准东煤	芦竹
工业分析(%)		
水分	4.1	42.01
挥发分	28.48	46.5
灰分	11.98	1.99
固定碳	55.43	9.5
元素分析(%)		
C	69.43	46.73
H	4.12	5.73
O	8.25	46.28
N	1.25	0.54
S	0.72	0.52

2.2. 系统运行参数和流程

表 2 列出了基本的操作参数，包括各单元的操作压力和温度，以及压缩机、蒸汽轮机和泵的等熵效率和机械效率等。其中燃料反应器和空气反应器均在 30 bar 的压力下运行。燃料反应器和空气反应器的操作温度分别为 900℃ 和 1300℃。三级蒸汽轮机在不同的压力下运行，分别为 170.5 bar、83.3 bar 和 17.7 bar。在这种情况下，输入燃料的总热值保持恒定为 150 MW，从而确定所需的煤和生物质的质量流量，如表 3 所示。由于煤和生物质是非常规组分，气化反应需要分两步实现。首先在 RYield 反应器中将燃料混合物分解为气体混合物。然后将气体混合物转移到 RGibbs 反应器中进行进一步反应。Gibbs 反应器中的产物组成是基于系统吉布斯自由能最小化来估算的。在此过程中，使用逆流 MHeatX 模块模拟余热回收蒸汽发生器(HRSG)。模拟选用 SRK 作为整个发电系统模拟计算的物性方法，选择 NiO 作为载氧体材料。

Table 2. Operating parameters of each component in the biomass and coal co-gasification chemical looping combined cycle power generation system [8]-[11]

表 2. 生物质与煤共气化化学链联合循环发电系统中各个组件的运行参数[8]-[11]

单元	参数
燃料	准东煤、芦竹(总输入热值为 150 MW)
空气	入口温度: 20℃, 入口压力: 1 bar, 空气: 21% O ₂ 和 79% N ₂ (基于体积)
气化过程	温度: 1371℃, 压力: 42.4 bar
化学链燃烧装置	燃料反应器: 900℃/30 bar, 空气反应器: 1300℃/30 bar, 两个反应器均采用吉布斯自由能最小化模型

续表

干燥过程	温度: 105℃; 压力: 1 bar
脱硫装置	H ₂ S 去除率 > 99%
汽轮机和余热锅炉	三压再热水蒸汽系统的蒸汽参数: S ₂ : 170.5 bar/413℃, S ₄ : 83.3 bar/355℃, S ₅ : 17.7 bar/206℃; 主蒸汽压力: 250 bar, 再热温度: 540℃, 排气温度: 90℃, 冷凝器压力: 0.045 bar, 等熵效率: 0.88, 机械效率: 0.99
CO ₂ 压缩	压力: 110 bar, 压缩机等熵效率: 0.88, 机械效率: 0.99
气体透平	排放压力: 1.05 bar, 排放温度: 510℃~550℃之间, 等熵效率: 0.88, 机械效率: 0.99
泵	压力: 150 bar, 等熵效率: 0.88, 机械效率: 0.99
CO ₂ 回流比	5%

Table 3. Mass flow rate ratios of *Arundo donax* to Zhundong Coal
表 3. 芦竹与准东煤质量流量配比

掺杂比例(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
芦竹(kg/s)	0	0.57	1.23	1.97	2.84	3.87	5.08	6.55	8.38	10.69
准东煤(kg/s)	5.38	5.16	4.9	4.61	4.27	3.87	3.39	2.81	2.10	1.19

生物质干燥过程如图 1 所示。该流程包括生物质的干燥单元以及气固分离单元两部分。干燥单元为 (Rstoic-DRY)，湿生物质和干燥介质空气分别从反应器的上部和下部进料，通过在 DRY 模块中设置计算机，并利用 Fortran 语句将湿生物质进行干燥处理。待湿生物质被干燥完后，所有物料一起进入气固分离单元(DRIER)进行固气分离。带有水汽的干燥介质从上部排出，干燥完的生物质则从下部排出。该流程可以模拟计算将已知含水量的湿生物质干燥到预定的干燥程度以及所需要的干燥温度和干燥流量等，结果参数均可以在干燥单元为(Rstoic-DRY)模块中进行设置。其中，在 DRY 模块中编写的 Fortran 程序如下：

H2ODRY = M
CONVE = (H2OIN-H2ODRY)/(100-H2ODRY)

“M”表示为干燥后生物质中水分的含量。

然而，由于生物质在干燥过程中水分的改变，生物质的工业元素组成和元素组成同时也会发生相应的变化。收到基向干燥基转化过程可以利用式(1~4)计算得出。计算结果如表 4 所示：

收到基组分→空干基组分：

$$R_{ad} = R_{ar} \frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}} \quad \text{式(1)}$$

收到基组分→干燥基组分：

$$R_{ad} = R_{ar} \frac{100}{100 - M_{ar}} \quad \text{式(2)}$$

收到基热值→空干基热值：

$$Q_{ad} = Q_{ar} \frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}} \quad \text{式(3)}$$

收到基热值→干燥基热值：

$$Q_{ad} = Q_{ar} \frac{100}{100 - M_{ar}}$$

式(4)

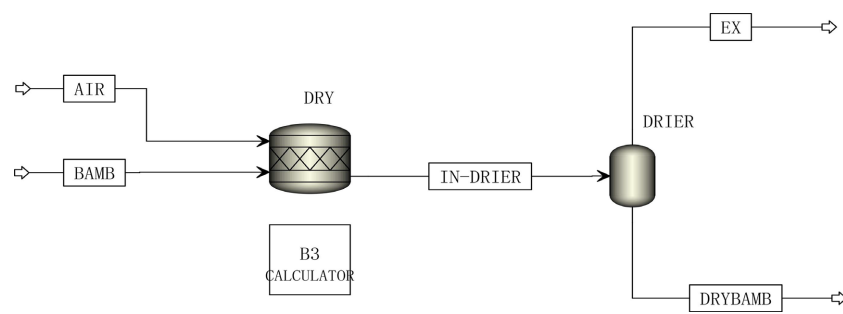


Figure 1. Flowchart of biomass drying process
图 1. 生物质干燥流程图

Table 4. Proximate and ultimate analysis of biomass at different drying levels
表 4. 生物质不同干燥程度下的工业分析和元素分析

工业分析				元素分析					高位热值 MJ/kg
水分	灰分	挥发分	固定碳	C	H	O	N	S	
42.01	1.99	46.5	9.5	27.29	3.39	24.79	0.35	0.07	10.93
30	2.40	56.13	11.47	32.94	4.09	29.92	0.42	0.08	13.19
20	2.75	64.15	13.11	37.65	4.68	34.20	0.48	0.10	15.08
10	3.09	72.17	14.74	42.35	5.26	38.47	0.54	0.11	16.96
0	3.43	80.19	16.38	47.06	5.85	42.75	0.60	0.12	18.85

如图 2 所示，为生物质与煤共气化化学链联合循环发电系统的工艺流程图。流程的主要组件包括：干燥器、CLC 反应器、涡轮机、压缩机、分离装置、热交换器、余热回收蒸汽发生器以及碳捕集与封存装置。

生物质在干燥器中进行干燥处理后与煤在 RYield 反应器中进行热解，后被输送到化学链燃烧装置中进行氧化还原反应。其中，生物质干燥出来的水分(EX-Moisture)与初始的空气(A0)进行换热，出口温度为 40℃。与此同时，燃料反应器(FR)和空气反应器(AR)需保持高温高压环境。来自 FR 的出口流股被送到气固分离器(Sep1)中，气体流(烟气)和固体残留物(还原的金属氧化物和灰分)被分离。烟气(G1)被送到余热回收蒸汽发生器(HRSG)中进行余热回收。而烟气送至 CO₂ 捕集单元之前，需要先将其输送至气体净化单元与 MnO 反应以去除 SO₂ 和其他污染物，并且脱硫后的 CO₂ 流部分回流到 AR，作为燃料的气化介质。来自 FR 出口的固体流被送到旋风分离器，以将金属颗粒与灰分分离，灰分中的热能通过与冷流的热交换器被回收。分离出的金属颗粒(ME)随后流入 AR，在 30 bar 的压力下与压缩空气反应生成金属氧化物(MEO)，然后，循环回 FR 进入下一个循环。在 HRSG 单元中，来自 FR 和 AR 的高温烟气将热量传递给蒸汽，以生成用于发电的高温高压蒸汽。

其中，RYield 模块为计算收率的反应器，其主要作用是将燃料裂解为 H₂O、C、H₂、S、O₂、N₂ 和灰分，并且导出裂解热，为后续气化模块的计算做准备。然而，各个产物的收率则是通过将 Fortran 程序导入到 Calculator 模块中进行计算所得出。模拟编写的 Fortran 程序如下：

$$FACT=(100-WATER1(1))/100$$

$$ASH=ULT(1)/100*FACT$$

$$CARB=ULT(2)/100*FACT$$

$$H2=ULT(3)/100*FACT$$

$$N2=ULT(4)/100*FACT$$

$$CL2=ULT(5)/100*FACT$$

$$SULF=ULT(6)/100*FACT$$

$$O2=ULT(7)/100*FACT$$

$$WATER=WATER1(1)/100$$

在流程图中,载氧体用“M”标记,气体用“G”标记,空气用“A”标记,蒸汽用“S”标记。在电厂模拟过程中,作出了如下五点假设:

- 1) 芦竹和碳的残留物可以忽略不计。
- 2) 泵、压缩机、涡轮机的等熵效率为 0.88, 机械效率为 0.99 [12]。
- 3) 空气反应器中残留的炭可以忽略不计。
- 4) 灰分规定为非反应成分。
- 5) 反应器中的热损失和压降可以忽略不计。

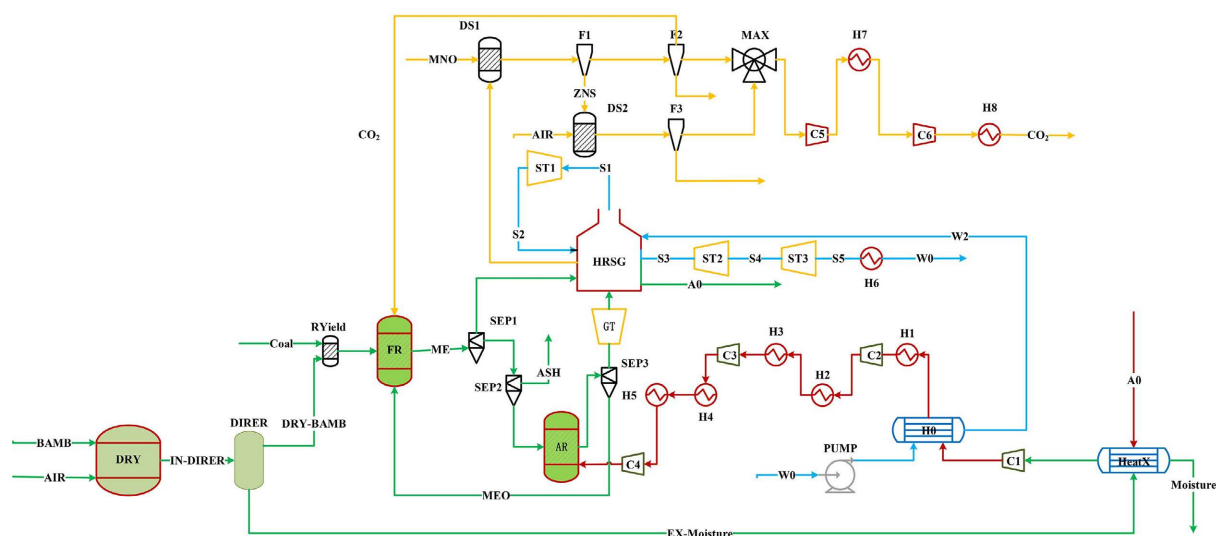


Figure 2. Flowchart of the co-gasification chemical looping combined cycle power generation system integrated with biomass drying

图 2. 集成生物质干燥的共气化化学链联合循环发电系统流程图

3. 计算方法

为了对生物质与煤共气化化学链联合循环发电系统的性能进行全面的研究,需要对发电系统进行能量和焓分析。以下热力学分析都是基于 100%热负荷条件下进行的。

$$Q-W = \sum_{in} m_i h_i - \sum_{out} m_i h_i \quad \text{式(5)}$$

其中, Q 表示子系统的净热流率; W 表示系统对环境所做的功; m_i 和 h_i 分别表示流体的质量流量和比焓。子系统的能量效率可以表示为:

$$\eta_i = \frac{E_{out,i}}{E_{in,i}} \quad \text{式(6)}$$

$E_{out,i}$ 表示子系统 i 的能量输出； $E_{in,i}$ 表示子系统 i 的能量输入。

然而，发电系统的净发电效率是净输出功率与燃料热输入之比。净输出功率是通过从总发电量中减去电厂自身的电力消耗得到的。总发电量是气体透平和蒸汽轮机输出的总和，而电厂自身的电力消耗包括空气压缩机和所有辅助设备使用的电力。发电系统的净发电效率计算如下：

电厂的总发电效率通过以下公式计算：

$$\text{总发电效率} = \frac{\text{总发电量}}{\text{输入燃料总化学能}} \quad \text{式(7)}$$

系统产生的净功率(P_{net})计算如下：

$$P_{net} = (P_{GT} + P_{ST}) - (P_{CCS} + P_{FWP} + P_{ACU}) \quad \text{式(8)}$$

其中， P_{GT} 和 P_{ST} 分别是气体透平和蒸汽轮机产生的电量； P_{CCS} 和 P_{FWP} 是 CO_2 压缩和给水泵消耗的电量； P_{ACU} 是空气压缩机单元消耗的电量。电厂的净发电效率通过以下公式计算：

$$\text{净发电效率} = \frac{\text{净发电量}}{\text{输入燃料总化学能}} \quad \text{式(9)}$$

4. 模拟结果与分析

通过对集成生物质干燥的共气化化学链联合循环发电系统的模拟研究，计算结果如下。图 3 所示为芦竹干燥后水分含量对燃料反应器出口烟气各组分含量的影响(芦竹掺杂比为 10%)。可以得出，随着水分含量的降低，燃料反应器出口烟气中各组分的含量呈现出相同的变化趋势。水蒸气的量从 510.4 kmol/h 下降到 443.0 kmol/h，CO 的量从 10.2 kmol/h 下降到 10.0 kmol/h； CO_2 含量从 1157.3 kmol/h 降至 1135.2 kmol/h； H_2 含量从 2.75 kmol/h 降至 2.38 kmol/h。结果表明，芦竹干燥后，水分含量降低，导致燃料反应器出口烟气总量下降。

图 4 所示为芦竹干燥后水分含量对压缩空气流量以及 NiO 转化率的影响(芦竹掺杂比为 10%)。可以得出，随着水分含量的降低，压缩空气的流量逐渐增加，从 42.01% 时的 382,040 kg/h 上升到 0 时的 395,180 kg/h，显示出水分含量与压缩空气需求量的负相关关系。同时，NiO 的转化率也随水分含量的降低而逐步提高，从 42.01% 水分时的 96.97% 上升到 0% 水分时的 98.94%。这种趋势表明芦竹水分含量越低，系统中 NiO 的转化率越高，芦竹水分含量的减少不仅减少了压缩空气的消耗需求，还提高了 NiO 的转化效率。主要原因有以下三点：

1) 生物质中的水分蒸发需要吸收大量潜热，生物质中的水分含量过高，会降低系统温度。而 NiO 与生物质的还原反应(如 $2\text{NiO} + \text{C} \rightarrow 2\text{Ni} + \text{CO}_2$)通常为吸热反应，温度的降低会导致反应的吉布斯自由能升高，使反应驱动力减弱，导致 NiO 转化率降低。

2) 高水分含量的生物质在气化过程中会生成大量水蒸气，这些水蒸气与气化生成的可燃性气体(如 CO 和 H_2)混合后，会稀释燃料浓度。并且，水蒸气扩散需克服传质阻力，且蒸发吸热会延缓生物质热解和挥发分的释放，导致 NiO 反应滞后。干燥生物质的热解速率更快，挥发分与 NiO 的混合更均匀，缩短反应时间，提升转化效率。

3) NiO 在高水蒸气环境中容易发生表面覆盖现象，降低其活性。这种现象在化学链反应系统中尤为明显。水蒸气会形成薄层或促进生成副产物，覆盖在载氧体颗粒表面，阻碍氧化还原反应的进行，导致载氧体的再生过程受阻，降低转化率。

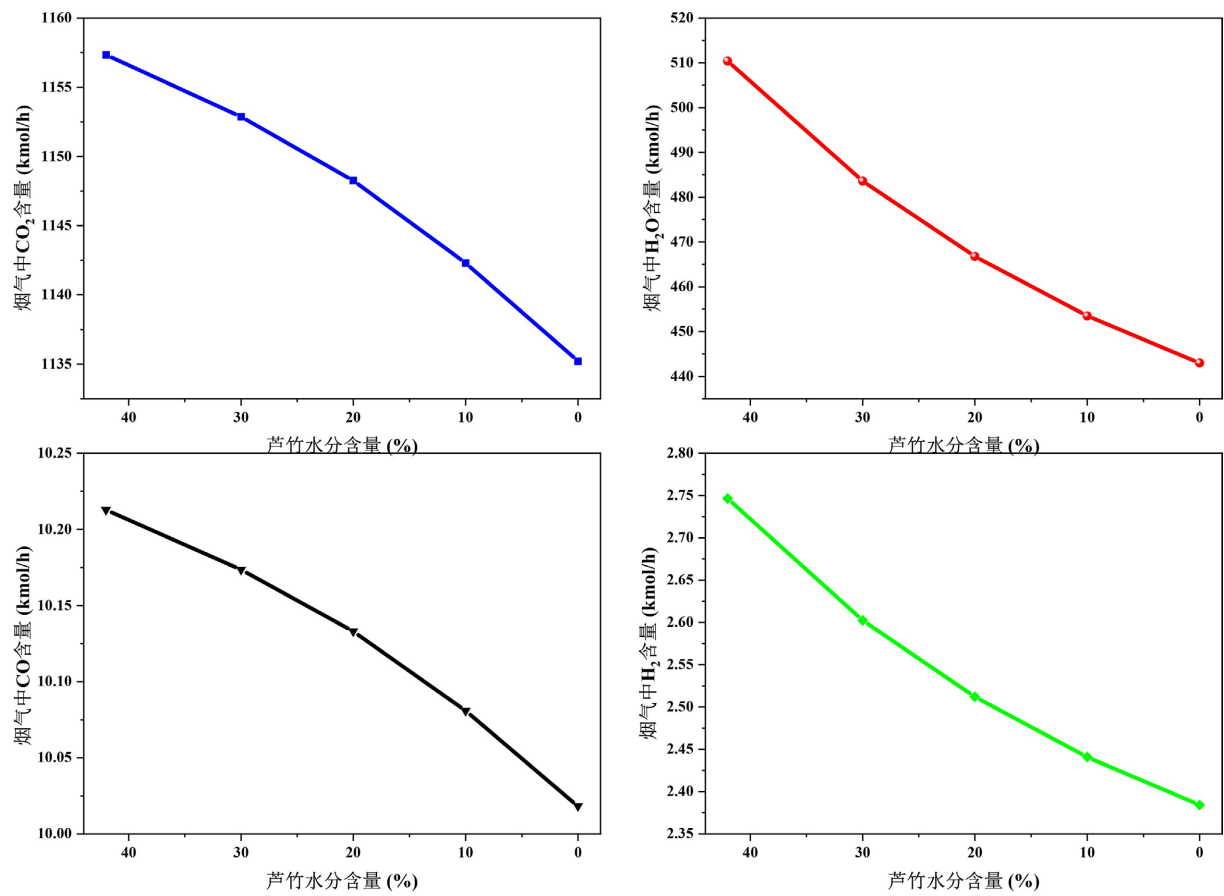


Figure 3. Effect of *Arundo donax* moisture content on the flue gas component concentrations at the fuel reactor outlet (blending ratio of *Arundo donax* is 10%)

图 3. 芦竹水分含量对燃料反应器出口烟气各组分含量的影响(芦竹掺杂比为 10%)

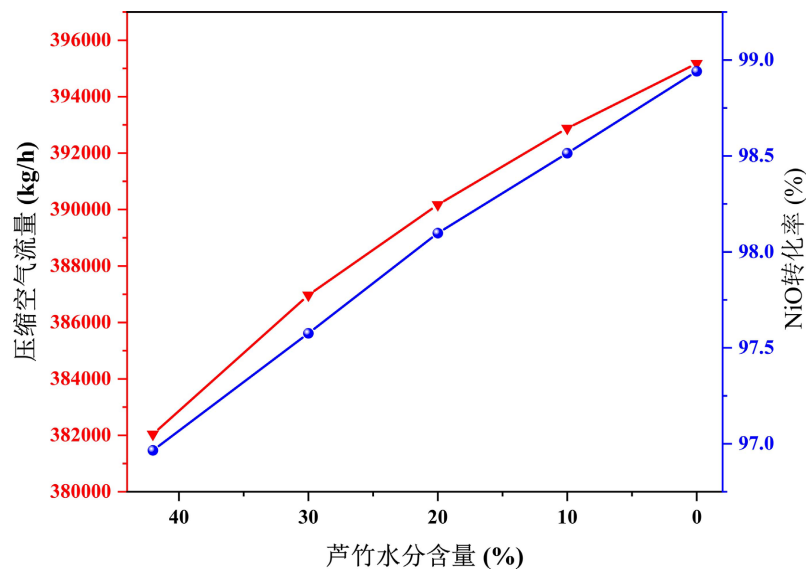


Figure 4. Impact of *Arundo donax* moisture content on compressed air flow rate and NiO conversion rate (blending ratio of *Arundo donax* is 10%)

图 4. 芦竹水分含量对压缩空气流量以及 NiO 转化率的影响(芦竹掺杂比为 10%)

图 5 显示了芦竹质量掺杂比例与干燥后水分含量对干燥器热负荷的影响。从图中可以得出，掺杂比例相同时，随着芦竹中水分含量的减少，干燥器的热负荷显著增加。例如，在芦竹掺杂比为 10%，水分含量 30% 时，干燥器的热负荷为 793.65 kw，而水分降为 0% 时，热负荷上升到 1732.50 kw。这表明，当芦竹质量比例一定时，干燥后芦竹水分含量越低意味着生物质被干燥得更彻底，干燥器则需要提供更多的热量去除额外的水分，导致热负荷增加。而在相同的水分含量条件下，随着芦竹掺杂比例的增加，干燥器的热负荷显著增加。例如，在水分含量为 0% 的条件下，掺杂比为 10% 时，干燥器热负荷为 1732.50 kw，而掺杂比为 90% 时，热负荷则上升到 28340.84 kw。主要原因是由于，芦竹本身水分含量较高，在提高质量占比的同时，如需达到相同的干燥效果，芦竹需要吸收更多的热量，最终导致干燥器的热负荷直线上升。从整体数据可以看出，当干燥后芦竹的水分含量和准东煤比例同时降低时，热负荷显著提升。由此可以得出，芦竹干燥后的含水量以及芦竹的质量比对生物质共气化联合循环发电系统整体的热经济性有着显著的影响。

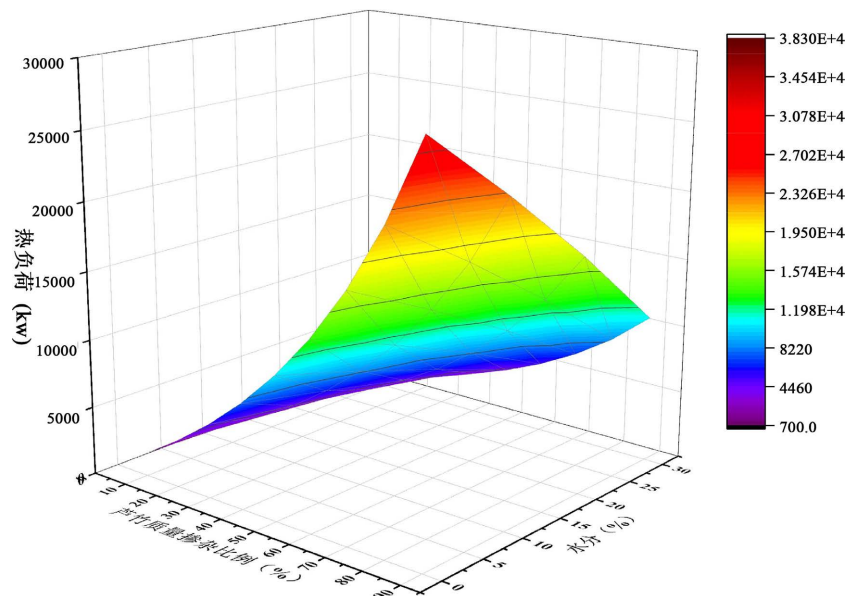


Figure 5. Effect of *Arundo donax* mass blending ratio and moisture content after drying on dryer thermal load

图 5. 芦竹质量掺杂比例与干燥后水分含量对干燥器热负荷的影响

如图 6 所示，展示了芦竹质量掺杂比例与干燥后水分含量对燃气轮机输出功率的影响。结果表明，不同的芦竹水分含量对燃气轮机的输出功率有显著影响，具体表现为：随着芦竹水分含量的降低，燃气轮机的输出功率逐步增加。例如，在芦竹质量占比为 10%，水分含量为 42.01% 时，输出功率为 85460.18 kW；而当水分含量降至 0% 时，输出功率上升到 92629.41 kW，同样的趋势也适用于其他的质量比。导致这一现状的原因有以下两点：

1) 燃气轮机输出功率受燃料燃烧产生的热量影响，而水分较高的燃料会吸收燃烧热用于蒸发水分，从而降低了可用的有效热值。当水分含量降低时，燃料的热值提高，因此燃气轮机能够产生更高的输出功率。

2) 当芦竹质量比例不变时，减少芦竹中的含水量，等同于降低燃料中氧原子的数量。因此，在化学链循环过程中需要提供更多的载氧体以及压缩空气，当用于氧化载氧体颗粒的压缩空气的量增多时，燃

气轮机在相同情况下的输出功率也会随之增加。所以，减少芦竹中的水分含量，有助于提升燃气轮机的热效率，从而提高燃气轮机的输出功率。

除此之外，在相同水分含量条件下，不同的质量比也会影响燃气轮机的输出功率。随着芦竹掺杂比例的增加，燃气轮机的输出功率呈现下降趋势。例如，在水分含量为 0% 的情况下，掺杂比为 10% 时的输出功率为 92629.4052 kW，而当掺杂比为 90% 时，输出功率降至 85373.4849 kW，这一趋势在其他水分含量条件下也保持一致。这主要是由于，准东煤和芦竹的燃烧特性不同。准东煤相比较芦竹具有较高的燃烧热值和燃烧效率，因此，当芦竹质量比例增加时，总体燃料的热值降低，燃气轮机的输出功率也随之降低。总体而言，当芦竹水分含量较低且芦竹比例较低时，燃气轮机的输出功率达到最大，这表明在低水分、低芦竹占比的条件下，燃气轮机能够更充分地利用燃料的热值，产生更高的输出功率，有助于提升共气化发电系统的发电效率。

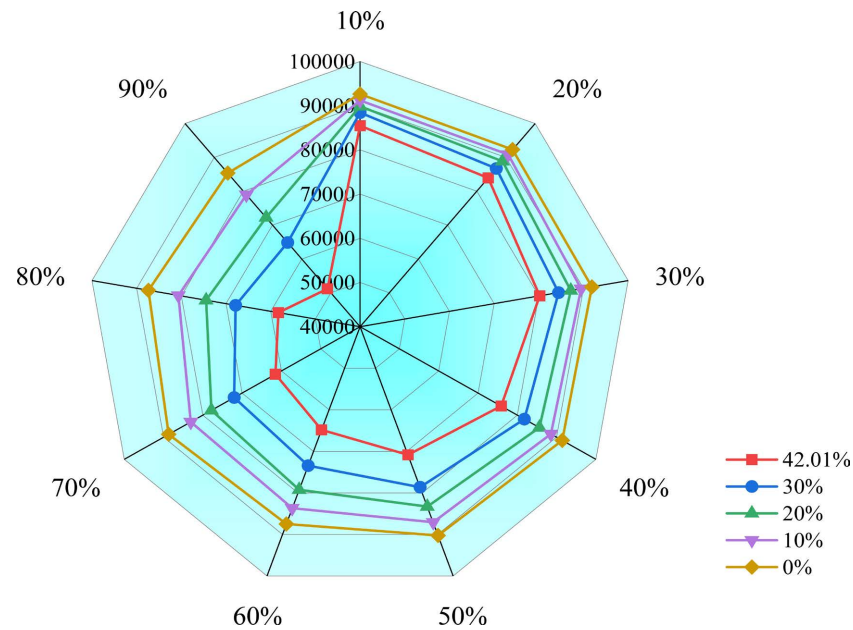


Figure 6. Effect of *Arundo donax* mass blending ratio and moisture content after drying on gas turbine output power (unit: kW)

图 6. 芦竹质量掺杂比例与干燥后水分含量对燃气轮机输出功率的影响(单位: kW)

图 7 所示为芦竹质量掺杂比例与水分含量对生物质共气化化学链联合循环发电系统净发电效率的影响。从图中可以得出，在不考虑水分对系统发电效率影响时，水分含量为 42.01% 时，随着芦竹质量掺杂比例从 10% 增长至 90%，系统的净发电效率从 40.84% 逐渐降低到 32.97%。然而，当芦竹掺质量掺杂比例一定时，随着芦竹水分含量从 42.01% 下降至 0%，共气化发电系统的净发电效率均有所提高。值得注意的是，当芦竹质量掺杂比为 10%，芦竹水分含量从 42.01% 降至 0% 时，系统净发电效率从 40.84% 上升到 42.35%。这表明，水分含量的降低能够有效提升系统整体的发电效率。综上所述，提高生物质与煤共气化化学链联合循环发电系统的发电效率，需保持较低的生物质质量占比，并尽量降低生物质中的水分含量。通过这一改进，可以在生物质共气化发电的同时，充分利用生物质与煤协同作用和煤的高热值优势，以减少碳排放，提升能源的利用效率，为清洁能源的推广应用提供了有力支持。同时，也为未来高效、环保的能源转化技术提供了优化路径。

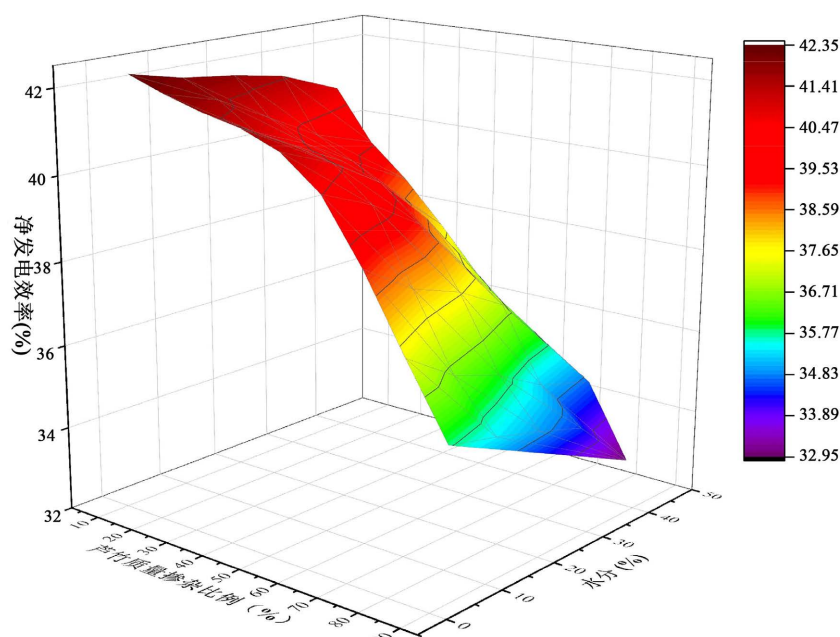


Figure 7. Effect of *Arundo donax* mass blending ratio and moisture content after drying on the net power generation efficiency of the biomass co-gasification chemical looping combined cycle power generation system

图 7. 芦竹质量掺杂比例与干燥后水分含量对生物质共气化化学链联合循环发电系统净发电效率的影响

5. 结论

通过将生物质干燥过程与煤与生物质共气化化学链联合循环发电系统进行耦合，探究生物质中的水分含量对共气化发电系统的影响。得出如下结论：

- 1) 芦竹质量掺杂比例一定时，降低芦竹水分会导致燃料反应器出口烟气总量减少，同时系统对压缩空气的需求降低，NiO 转化率提高。
- 2) 当芦竹水分的含量相同时，芦竹质量掺杂比例越高，干燥出的水分也就越多，并且随着干燥程度的加大，干燥器的热负荷也逐渐增加。
- 3) 降低芦竹中的水分含量和芦竹的掺杂比例，有助于提升燃气轮机的输出功率。并且，当芦竹质量掺杂比例为 10%且水分含量为 0%时，系统的净发电效率高达 42.35%。

参考文献

- [1] Cormos, C. and Cormos, A. (2013) Assessment of Calcium-Based Chemical Looping Options for Gasification Power Plants. *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 2306-2317. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.128>
- [2] Ozonoh, M., Aniokete, T.C., Oboirien, B.O. and Daramola, M.O. (2018) Dataset on the Assessment of the Environmental, Economic and Energy Parameters of 5 MW CHP Co-Gasification Plant Using South African Coal, Biomass and Waste-Tyre. *Data in Brief*, **21**, 2598-2608. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.10.117>
- [3] Long, H.A. and Wang, T. (2011) Case Studies for Biomass/Coal Co-Gasification in IGCC Applications. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011*, Vancouver, 6-10 Jun 2011, 547-561. <https://doi.org/10.1115/GT2011-45512>
- [4] Long, H.A. and Wang, T. (2016) Parametric Techno-Economic Studies of Coal/Biomass Co-Gasification for IGCC Plants with Carbon Capture Using Various Coal Ranks, Fuel-Feeding Schemes, and Syngas Cooling Methods. *International Journal of Energy Research*, **40**, 473-496. <https://doi.org/10.1002/er.3452>
- [5] Kuo, P.C. and Wu, W. (2015) Design of Co-Gasification from Coal and Biomass Combined Heat and Power Generation System. *Energy Procedia*, **75**, 1120-1125. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.523>

-
- [6] Qin, Z., Tang, Y., Zhang, Z. and Ma, X. (2021) Techno-Economic-Environmental Analysis of Coal-Based Methanol and Power Poly-Generation System Integrated with Biomass Co-Gasification and Solar Based Hydrogen Addition. *Energy Conversion and Management*, **228**, Article 113646. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113646>
 - [7] Wang, X., Yang, J., Zhang, Z., Yang, J. and Shen, B. (2022) Techno-Economic Assessment of Poly-Generation Pathways of Bioethanol and Lignin-Based Products. *Bioresource Technology Reports*, **17**, Article 100919. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100919>
 - [8] Bhui, B. and Prabu, V. (2021) Techno-Economic Evaluation of Electronic Waste Based Oxygen Carriers for Co-Chemical Looping Combustion of Coal and Biomass Integrated Combined Cycle Power Generating Systems. *Energy Conversion and Management*, **236**, Article 114075. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114075>
 - [9] Mishra, N., Bhui, B. and Vairakannu, P. (2019) Comparative Evaluation of Performance of High and Low Ash Coal Fuelled Chemical Looping Combustion Integrated Combined Cycle Power Generating Systems. *Energy*, **169**, 305-318. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.043>
 - [10] Luo, M., Yi, Y., Wang, C., Liu, K., Pan, J. and Wang, Q. (2018) Energy and Exergy Analysis of Power Generation Systems with Chemical Looping Combustion of Coal. *Chemical Engineering & Technology*, **41**, 776-787. <https://doi.org/10.1002/ceat.201700495>
 - [11] Kuo, P., Chen, J., Wu, W. and Chang, J. (2018) Integration of Calcium Looping Technology in Combined Cycle Power Plants Using Co-Gasification of Torrefied Biomass and Coal Blends. *Energy Conversion and Management*, **174**, 489-503. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.044>
 - [12] Prabu, V. (2015) Integration of *in-Situ* CO₂-Oxy Coal Gasification with Advanced Power Generating Systems Performing in a Chemical Looping Approach of Clean Combustion. *Applied Energy*, **140**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.056>