

基于 35 kW 等离子体炬典型生物质气化处置 及多工况影响研究

冯超¹ 王泉斌² 乔瑜¹ 李腾³ 魏小林³

(1. 华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 中国舰船设计研究中心,
湖北 武汉 430064; 3. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 等离子体热处理技术用于煤/生物质等固体燃料的气化转化具有能量密度高、反应速率快的优势, 研发及应用前景广阔。本研究基于 35 kW 级直流非转移弧氮气等离子体炬搭建了一套固体燃料等离子体气化研究实验平台, 以大米为厨余垃圾生物质典型组分, 开展了一系列多工况条件下的等离子体气化反应实验, 得出以下结论: 等离子体炬的运行输出功率需与物料投入速率进行匹配, 研究表明单位热值的物料配合 0.26 倍能量的等离子体功率输入可达到最佳气化工况; 等离子体气化效率的提高与颗粒在等离子体射流中的停留时间密切相关, 物料颗粒粒径的大小需尽可能的保证停留时间的延长; 等离子体气化反应在过量空气系数约为 0.1 时达到最佳, 低于传统气化工艺参数 0.3; 一定的水分有助于等离子体气化反应的进行, 本研究最佳含水率为 8.4%; 等离子体气化过程物料中加入 5% 的 K_2CO_3 盐有利于促进气化反应进行, 同时降低气化残渣的石墨化程度; 本研究最佳工况所实现的冷煤气效率为 30.6%, 仍需对系统进行优化以进一步提升气化效率。

关键词: 生物质; 等离子体炬; 气化; 工况影响; 冷煤气效率

中图分类号: X382.1; TQ534.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-6339(2021)03-0205-07

Plasma Gasification of Biomass via 35kW Plasma Arc Torch System under Multi-conditions

FENG Chao¹, WANG Quan-bin², QIAO Yu¹, LI Teng³, WEI Xiao-lin³

(1. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Thermal plasma arc technology has the advantages of high heat source temperature and fast reaction rate. It is especially suitable for gasification of solid fuel as coal and biomass. However, development of such plasma technology and equipment is still insufficient in China. This work built a solid fuel plasma arc gasification system for biomass plasma gasification research. The plasma torch applied is a 35 kW power DC non transfer arc using nitrogen as energy carrier. Different sizes of rice grains were prepared and delivered into the thermal destruction system as the represent of kitchen waste biomass. A se-

收稿日期 2020-12-15 修订稿日期 2021-04-20

基金项目: 装备预研教育部联合基金项目(6141A02022529); 国家自然科学基金项目(51976068)。

作者简介: 冯超(1989~)男, 博士后研究员, 研究方向: 固废热处理。

ries of plasma gasification experiments was carried out and draw conclusions as follows: the output power of the plasma arc should be adjusted to match the input of the fuel energy and the best ratio of plasma arc torch output power to fuel energy input is 0.26; the residence time has strong influence on the efficiency of plasma arc gasification and the grain size of the biomass input into the reactor should be well controlled to make sure the residence time of the grain in the reactor as long as possible; the best excess air ratio for plasma arc gasification measured in this study is 0.1 which is lower than the conventional gasification value of 0.3; the best water content of the feedstock input into the reactor for plasma arc gasification is 8.4% in this study; addition of 5% of K_2CO_3 as catalyst is appropriate for plasma arc gasification; the highest cold gas efficiency achieved in this study is 30.6% , indicating the necessity of further improvement of the plasma gasification system.

Key words: biomass; plasma arc torch; gasification; condition interference; cold gas efficiency

0 背景

等离子体热处理技术具有中心温度高 ($>5\ 000\ ^\circ C$)、反应速率快的特点,可以极大地提高气化过程的碳转化率和合成气生成率^[1-2]。国外在该技术领域研发较早也较为成熟,随着近年来生物质能利用和固废处置需求的提升,更是将该技术进一步成功运用到生物质气化^[3]和有机/无机固废热处理领域^[4]。生物质作为新型洁净能源来源广泛,低热值生物质如秸秆、污泥、厨余垃圾等可以作为煤共气化的燃料组分,高热值如烘焙生物质、生物质焦、生物质油等可以作为燃料直接燃烧或气化利用^[5]。我国是煤炭、生物质和有机固废等固体燃料的生产大国,等离子体热处理技术市场前景广阔,然而由于等离子体运用技术研发起步较晚、研究仍不充分,相关研发工作亟待推进。

对于以有机组分为主的固体燃料,以往研究表明等离子体热化学反应过程的关键在于有效地提高等离子体热裂解/气化过程的合成气转化率^[6]。Hlina等^[7]利用110 kW 氩气/水蒸气直流等离子炬开展的木料、塑料、油脂气化研究表明,木料相较于塑料和油脂有更高的等离子体气化效率。Lee等^[8]的研究表明较高的含水率可以进一步提高煤在等离子体气化过程中的合成气转化率。Li等^[9]利用30 kW

直流等离子电弧开展针对化学危废的处置研究,实现了99.99%的碳处置率,残渣中多氯联苯含量远低于1.28 mg/kg。Shie等^[10]的研究表明稻草的等离子体气化效率会随含水率增加而提高,CO和H₂转化率可以高达90%。此外,国内还有很多学者用热分析法和Aspen Plus软件对等离子体气化过程的热效率、反应过程、气化效率等进行了模拟计算研究^[11-12],得出了一些工艺优化参数。

本研究针对生活垃圾等离子体气化焚烧处置设计搭建了基于35 kW 氮气直流等离子炬的气化焚烧实验平台,以典型厨余组分为研究对象,开展了不同工况条件下的气化反应研究,以期等离子体气化技术及装置的进一步研发提供参考经验。

1 实验

1.1 样品准备

厨余垃圾来源复杂,成分种类多样。除了水分外,淀粉类作为主食是我国厨余垃圾的主要组分。本次研究以大米为研究对象,为了保证物料实验过程中的均一性,通过烘干、破碎、筛分的方法对物料进行预处理,将粒径筛分至小于40目、20目和10目后分别取样进行实验。实验过程中物料的水含量通过按比例加水实现。物料的基础特性见表1。

表1 厨余大米样品的基础特性参数

物料	工业分析(% ^a)				元素分析(% ^a)			HHV ^c /MJ·kg ⁻¹
	A	V	FC	C	H	N	O ^b	
米	0.44	89.42	10.14	44.51	6.62	1.32	47.55	18.75

注:^a干燥基;^b差减法得到;^c经验公式计算得到^[13]。

以往研究表明碱金属盐可以在碳基燃料气化过程中起到催化作用,其中催化能力由强到弱表现为 $K_2CO_3 > Na_2CO_3 > KCl > NaCl > CaCl_2 / CaO$ ^[14]。因

此,为了对碱金属盐在厨余等离子体气化反应过程中的催化效果进行验证,本研究选取 K_2CO_3 作为催化剂,与大米样品混合后进行共气化实验。

1.2 实验台架

等离子体气化焚烧装置实验台架主要由进样器、等离子炬、气化室、燃烧室以及辅助系统构成。等离子炬采用由中国科学院力学研究所设计制造的35 kW 氮气直流等离子体发生器,其基本运行参数见表2。炬运行功率随载气流量、工作电流变化规律

表2 等离子炬基本运行参数

参数	最大功率/kW	功率范围/kW	输入电压/V	工作电流范围/A	工作电压范围/V	功率因子	载气流速/L·min ⁻¹
数值	35	18~35	380	80~150	190~220	0.93	50~90

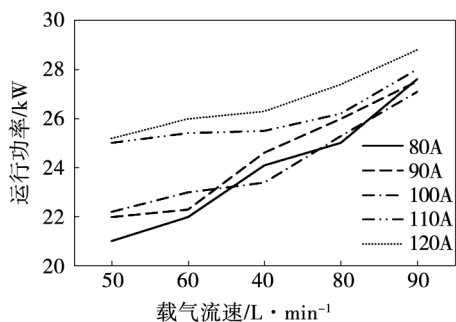


图1 等离子炬功率随载气流速及工作电流变化情况

等离子气流经由喷嘴处水平喷出后进入以石墨作为内壁的气化反应室。物料经由距喷嘴水平距离8 cm、垂直距离6 cm 处的上方进料口处向下进入气化反应室。根据红外热像仪对等离子体射流的观测,该进料位置有助于使物料直接进入等离子射流的核心区域。气化室中部接入热电偶对气化反应实时温度进行监测。实验选用螺旋进料机,质量流量范围约为5~24 kg/h。进样过程通入一定空气(1 L/min)作为辅助气流,防止进料口处物料受热影响而结焦堵塞。

1.3 检测分析

气化后烟气组分通过傅里叶红外烟气分析仪(Gasmet DX-4000)直接测量,检测气体主要包括N₂、CO、CO₂、H₂、CH₄、H₂O。对于气化后的固体产物,利用X射线衍射仪(Panalytical X'Pert3 Powder)和拉曼光谱仪(Horiba Labram HR800)分别对其晶型及分子构象进行定性分析。

1.4 气化效率计算

冷煤气效率是气化过程能量转化效率评价的常用指标。等离子体气化过程的热效率,即合成气热能与系统投入能量比值,可以通过以下计算公式得到

$$\eta = \frac{m_g \cdot LHV_g}{m_f \cdot LHV_f + P_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_g ——合成气质量流速;
 LHV_g ——合成气低位热值;

见图1。由图2可知,随着载气流量的增加,炬运行时电离氮气分子所需的能量不断提高,产生等离子体射流的能量密度相应提升。为了保障等离子炬的安全稳定使用,在本次研究中,如不涉及流量和功率调整的情况下,实验均在氮气流量为60 L/min、工作电流为90 A、炬运行功率22 kW 条件下进行。

m_f ——物料质量流速;
 LHV_f ——物料低位热值;
 P_e ——等离子体功率。

2 结果分析及讨论

2.1 炬运行功率变化对气化过程的影响

理论上,等离子炬运行功率越大,等离子射流携带并进入气化室的能量越高,从而为气化反应过程提供更高的温度环境,促进裂解及甲烷重整等反应的进行。在既定等离子运行功率条件下,适度的物料供给速率决定了实际反应过程的反应效率。假设参数R为等离子运行过程输入系统功率与参与反应物料热值的比值(2)

$$R = \frac{P}{LHV \times m} \quad (2)$$

式中 P ——等离子体发生器输入功率;
 LHV ——参加反应物料的低位热值;
 m ——参加反应物料的进料质量流量。

R值越高则处理单位热量反应物料所投入的等离子能量越高。通过调节系统功率和进料速率,可以得到不同R值实验过程中的气化产气组分情况。利用米作为实验物料,调整R值为0.08~0.50时,气化实验结果见图2所示。

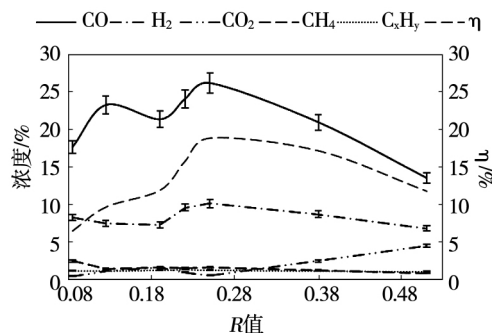
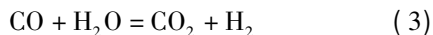


图2 气化产气随R值(单位热能燃料等离子体发生器输入功率比)变化情况

从图2可知,随着R值的不断变大,烟气中的CO、H₂、CO₂、CH₄、C_xH_y浓度变化规律不同,且并未

随 R 值呈现单一趋势变化。总体而言, CO 、 H_2 呈现先上升后下降的趋势。 R 值从 0.08 升到 0.26 时, CO 和 H_2 浓度分别从 17.7% 和 7.5% 上升到 26.6% 和 10.0%, 冷煤气效率 η 从 6.5% 增长到 18.8%。说明此过程等离子输出功率的提升有助于合成气的产生。而当 R 值进一步从 0.26 继续升到 0.50 时, CO 和 H_2 浓度分别降到了 13.5% 和 6.8%, η 下降至 11.8%, 说明当等离子输出功率超过某一限值时, 抑制了合成气的生成。同时, 当 R 值从 0.08 升至 0.50 时, CO_2 排放浓度先下降后提升: R 值为 0.08 到 0.26 时, CO_2 浓度从 1.7% 降至 0.6%; 当 R 值继续升至 0.5 时, CO_2 浓度升至 4.5%。

合成气(CO 和 H_2) 生成随等离子炬功率提升而先增大后减小的规律可以解释为: 在既定物料进样质量流量条件下, 等离子炬存在一个最佳合成气产生的输出功率工况条件; 当炬的功率低于最佳输出功率值时, 输出功率越高, 气化反应过程温度越高, 反应越剧烈, 合成气生成量越大; 当炬的功率高于最佳输出功率值时, 输出功率越高, 虽然气化反应温度越高, 但炬的氮气载气流速过快, 导致物料在高温区的停留时间过短, 同时, CO 与 H_2O 的水煤气反应(见公式(3))强度更大, 导致 CO 浓度降低而 CO_2 浓度提升



因此, 等离子体能量的持续增加并不利于气化反应的充分进行, 实际应用过程中应充分考虑等离子输出功率与物料流入速率的匹配。

2.2 物料颗粒大小对气化过程的影响

图 3 展示了米作为物料时 $< 2 \text{ mm}$ 、 $< 0.8 \text{ mm}$ 和 $< 0.4 \text{ mm}$ 三种粒径在相同炬功率条件下的气化产气情况。可以看出, $< 0.8 \text{ mm}$ 粒径的物料在实验过程中气化效果最佳, CO 产气浓度达到 23.4%, 远高于粒径为 $< 2 \text{ mm}$ 和 $< 0.4 \text{ mm}$ 时的 18.5% 和 18.0%; 三种粒径等离子气化反应后的 H_2 产率相近, 约为 7.0%; $< 0.8 \text{ mm}$ 粒径物料气化过程 η 最高, 为 29.3%。实验结果表明物料粒径大小对气化反应过程产生显著影响。粒径 $< 2 \text{ mm}$ 的实验过程中气化室底部发现有部分碳物质沉淀, 表明部分物料进入气化室后未经完全反应便沉降到气化室底部, 可以作为解释其 CO 产生浓度较低的原因; 另外, 当粒径为 $< 0.4 \text{ mm}$ 时, 由于等离子体射流的气动作用, 颗粒更易于被快速携带出气化反应室, 导致物料气化裂解反应不能充分进行, 从而产生较多的 CH_4 。因此, 反应器和进样装置的设计要充分考虑物料在等离子射流中的受力特性, 尽可能多的增大

停留时间, 使反应充分进行。

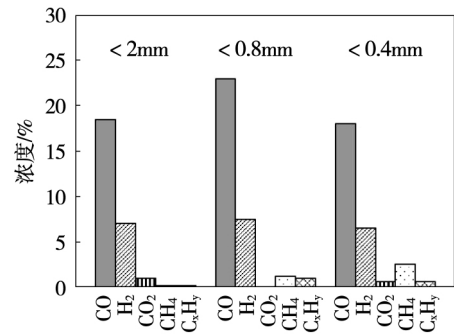


图 3 气化产气随进料粒径大小变化情况

2.3 过量空气系数对气化过程的影响

图 4 为米粉在不同过量空气系数条件下的气化气生成结果, 实验过程中的过量空气系数分别为 0.036、0.072、0.095、0.130、0.163。实验结果显示过量空气系数从 0.036 升到 0.163 的过程中, 气化气 CO 和 H_2 浓度呈现先提升后降低的趋势, 其中 CO 在过量空气系数为 0.095 时达到峰值 28.6%, H_2 在 0.130 达到峰值; CO_2 浓度经历了先降低后升高的过程; CH_4 和其他 C_xH_y 气体浓度变化不明显; 冷煤气效率 η 在 0.095 时达到峰值 21.6%。

实验表明, 过量空气系数 0.1 可以作为气化气 CO 和 H_2 的大致拐点; 拐点之前, 过量空气系数的提升有利于气化气的生成; 拐点之后, 过量空气系数的提升不利于气化气的生成。拐点之前, 过量空气系数的提升给系统提供更多的氧, 促使燃烧反应进行, 同时放出的热量促进了气化反应的进行。拐点之后, 过量的氧气使气化生成的 CO 和 H_2 进一步反应生成 CO_2 和 H_2O , 不利于气化气的生成。

其次, 通过本次实验还可以发现相较于传统气化工工艺通常使用约 0.3 的过量空气系数^[15], 由于等离子炬自身提供热能远大于传统燃烧器, 气化过程对于氧化反应释放热能的需求降低, 因此所需要的过量空气系数小于传统气化。

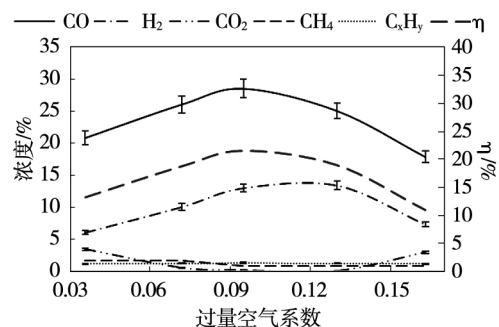
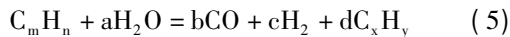


图 4 气化产气随过量空气系数变化情况

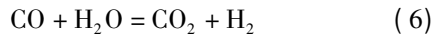
2.4 水含量对气化过程的影响

实验选取 2.1%、4.2%、6.3%、8.4%、11.6% 五种含水率进行等离子气化过程水含量影响研究。图 5 展示了 5 种含水率物料在相同工况下的等离子气化产气浓度情况。实验表明 随着含水率的提升, CO、H₂、CH₄、C_xH_y 浓度先提升后降低, CO₂ 浓度无明显变化。其中, CO 浓度在 8.4% 含水率达到峰值 32.9%, H₂ 浓度在 8.4% 含水率达到峰值 11.1%, CH₄ 浓度在 6.3% 含水率达到峰值 3.6%, C_xH_y 浓度在 6.3% 含水率达到峰值 3.1% η 在 8.4% 时达到峰值 30.6%。

以上实验结果表明一定的含水率有利于等离子气化反应的进行。水分经过蒸发后成为蒸汽,并通过对水煤气反应(4)和蒸汽重整反应(5)促进气化气(CO、H₂、以及 CH₄、C_xH_y)的生成



另外,过量的含水率会造成气化气含量的降低。首先,过量的水分产生的蒸汽会与 CO 发生水气变换反应(6)造成 CO 产量的降低



其次,过量的水分会降低物料进入气化器中的反应温度,造成气化气产量的降低。

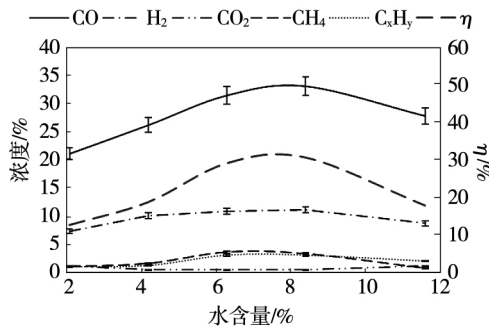


图 5 气化产气随水含量变化情况

2.5 钾盐催化对气化过程的影响

实验混合大米物料与 K₂CO₃ 盐在较低 R 值(0.1) 情况下进行气化实验,研究 K 盐对等离子气化过程的催化作用,其中 K 含量分别为 0、1.0%、2.5%、5.0%、7.5%。图 6 展示了不同钾盐含量对气化气 CO 和 H₂ 生成浓度的影响。实验表明 K 盐的添加对 CO 的生成有显著的促进,当 K 含量由 0 增至 7.5% 时,CO 浓度由 17.7% 提升至 21.4%,而 H₂ 浓度无明显变化。以往研究表明, K₂CO₃ 在气化反应过程中会通过一系列循环的氧化还原反应增强碳的水煤气反应进程^[16],从而促进 CO 的生成,反应过程包括

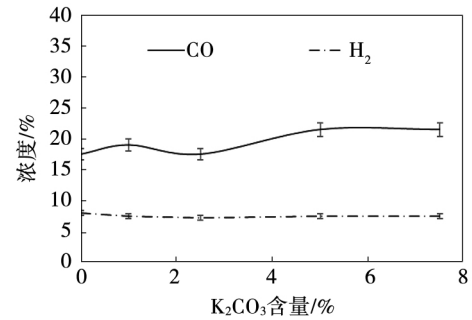
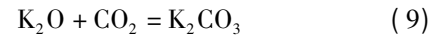
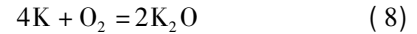
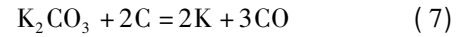


图 6 气化产气随碳酸钾添加变化情况

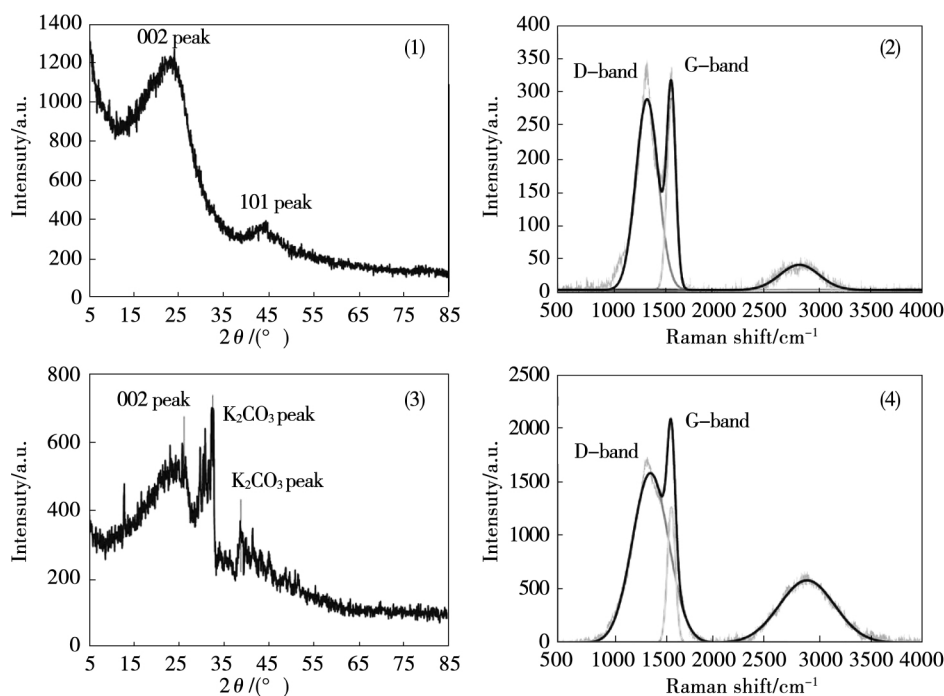
同时,图 7 展示了添加 K₂CO₃ 盐前后的气化残渣 XRD 和 Raman 扫描对比图。从图 7(1) 中 002 峰($2\theta = 26.3^\circ$) 和 101 峰($2\theta = 43.2^\circ$) 可知,气化残渣形成了典型的由芳香层叠加的微晶结构^[17],表明气化过程中残炭进行了石墨化演变。图 7(2) 显示气化残渣分别在 1595 cm⁻¹ 和 1356 cm⁻¹ 存在 G 峰和 D 峰,代表石墨片层芳香环结构碳 sp² 电子结构的 E_{2g} 联合振动^[18] 和类金刚石碳 sp³ 电子结构的 A_{1g} 联合振动^[19],对应了 XRD 显示的石墨化结构。相较而言,图 7(3) 显示的添加 K₂CO₃ 盐后气化残渣的 101 峰不再显著,代替的是 K₂CO₃ 峰,表明石墨化程度有所降低。Raman 扫描图中的 G 峰和 D 峰积分强度比率 I_D/I_G 通常可以用于表征石墨化程度的高低^[20],相较于图 7(2) I_D/I_G 值约为 1.267,图 7(4) 中 I_D/I_G 值变为 0.975,同样表明添加 K₂CO₃ 盐后气化残渣的石墨化强度变弱。根据气化残渣的 XRD 和 Raman 分析结果表明添加 K₂CO₃ 盐对残渣石墨化程度有所抑制,间接表明其对气化过程的促进。

3 结论

本文通过自行搭建的基于 35 kW 氮气直流等离子体炬的生物物质气化反应实验平台,开展了一系列以大米为厨余垃圾生物物质代表的等离子体气化实验,探究了等离子体炬功率、物料颗粒大小、过量空气系数、水分含量、K 盐催化剂等工况变化对等离子体气化过程的影响。研究结果表明:

(1) 等离子体功率的选择应充分考虑等离子体输出功率与物料流入速率的匹配程度,本研究表明单位能量物料需投入 0.26 倍的等离子体能量可达到最佳气化效果;

(2) 等离子体气化效率的提高与颗粒在等离子体射流中的停留时间密切相关,物料颗粒粒径的大小需尽可能的保证停留时间的延长;



注: (1) 米粉气化残渣 XRD 扫描图 (2) 米粉气化残渣 Raman 扫描图 (3) 米粉添加 K_2CO_3 气化残渣 XRD 扫描图 (4) 米粉添加 K_2CO_3 盐气化残渣 Raman 扫描图

图 7 添加 K_2CO_3 盐前后的米粉气化残渣 XRD 和 Raman 扫描图

(3) 等离子体气化过程在过量空气系数约为 0.1 时达到最佳, 低于传统气化工序参数 0.3;

(4) 一定的水分有助于等离子体气化反应的进行, 本研究中最佳含水率为 8.4%;

(5) 等离子体气化过程物料中加入 5% 的 K_2CO_3 盐有利于促进气化反应进行, 同时降低气化残渣的石墨化程度;

(6) 受限于反应器的设计以及系统稳定性, 此等离子体气化研究过程所得到冷煤气效率最高为 30.6%。后续研究仍将通过优化进样及反应器结构设计, 进一步提高气化效率。

参考文献

[1] Messerle VE, Karpenko EI, Ustimenko AB. Plasma Assisted Power Coal Combustion in the Furnace of Utility Boiler: Numerical Modeling and Full-scale Test [J]. Fuel, 2014 (126): 294-300.

[2] Messerle VE, Ustimenko AB, Lavrichshev OA. Comparative Study of Coal Plasma Gasification: Simulation and Experiment [J]. Fuel, 2016(164): 172-180.

[3] Huang H, Tang L. Treatment of Organic Waste Using Thermal Plasma Pyrolysis Technology [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(4): 1331-1337.

[4] Rohani V, Takali S, Gérard G, Fabry F, Cauneau F, Fulcheri L. A New Plasma Electro-burner Concept for Biomass and Waste Combustion [J]. Waste and Biomass Valorization, 2017, 8(8): 2791-2805.

[5] 李高潮, 卢怀宇, 孙启德, 等. 基于可再生能源的冷

热电联供系统集成配置与运行优化研究进展 [J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(3): 106-119.

[6] Gomez E, Rani DA, Cheeseman CR, Deegan D, Wise M, Boccaccini AR. Thermal Plasma Technology for the Treatment of Wastes: A Critical Review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(2): 614-626.

[7] Hlina M, Hrabovsky M, Kavka T, Konrad M. Production of High Quality Syngas from Argon/Water Plasma Gasification of Biomass and Waste [J]. Waste Management, 2014, 34(1): 63-68.

[8] Lee HG, Park H-W, Choi S, Park H-S, Park D-W. Production of Synthesis Gas from Coal by DC Non-transferred Steam Plasma Gasification System [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2014, 47(4): 334-342.

[9] Li Yaojian, Huang Zhiqin, Xu Yongxiang, Hongzhi S. Plasma-arc Technology for the Thermal Treatment of Chemical Wastes [J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26(4): 731-737.

[10] Shie JL, Chen LX, Lin KL, Chang CY. Plasmatron Gasification of Biomass Lignocellulosic Waste Materials Derived from Municipal Solid Waste [J]. Energy, 2014(66): 82-90.

[11] Favas J, Monteiro E, Rouboa A. Hydrogen Production Using Plasma Gasification with Steam Injection [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(16): 10997-1005.

[12] Janajreh I, Raza SS, Valmundsson AS. Plasma Gasification Process: Modeling, Simulation and Comparison with Conventional Air Gasification [J]. Energy Conversion and Management, 2013(65): 801-809.

[13] Sheng C, Azevedo JLT. Estimating the Higher Heating

Value of Biomass Fuels from Basic Analysis Data [J]. Biomass and Bioenergy 2005 28(5): 499 – 507.

[14] Liu Zl ,Zhu Hh. Steam Gasification of Coal Char Using Alkali and Alkaline – earth Metal Catalysts [J]. Fuel ,1986 ,65 (10) :1334 – 1341.

[15] Zhang Q ,Dor L ,Zhang L ,Yang W ,Blasiak W. Performance Analysis of Municipal Solid Waste Gasification with Steam in a Plasma Gasification Melting Reactor [J]. Applied Energy 2012(98) : 219 – 229.

[16] Veraa MJ ,Bell AT. Effect of Alkali Metal Catalysts on Gasification of Coal Char [J]. Fuel ,1978 ,57(4) : 194 – 200.

[17] 闵凡飞,陈清如,张明旭. 新鲜生物质热解气化石焦特性的 XRD 研究 [J]. 中国矿业大学学报 ,2006 ,35(3) : 336 – 340.

[18] 周德凤,谢海明,赵艳玲,王荣顺. 酚醛树脂热解炭材料的石墨化程度及其电化学性能 [J]. 功能材料 2005 ,36 (1) : 83 – 5.

[19] 方容川. 固体光谱学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社 2003.

[20] 周慧龙,肖刚,吴荣兵,等. 炭化温度对木质素导电炭石墨化结构的影响 [J]. 浙江大学学报(工学版) 2014 ,48 (11) : 2066 – 2071.

(上接第 204 页)

通过公式(7),可以将电网中源侧各类型新能源出力与负荷侧功率综合考虑,通过利用频段的阈值量化选取,考虑了电网信息,由此实现了结合源-网-荷信息的风电爬坡事件综合识别方法。该方法从电网整体运行的角度出发,对实际调度运行具有重要意义。

4 结论及展望

本文针对结合源-网-荷信息的风电爬坡事件综合识别方法进行了研究,结论如下:

(1) 提出了相对风电功率曲线的定义及获取方法,在相对风电功率曲线上定义风电爬坡事件;通过负荷曲线将网侧和负荷侧信息予以考虑,进而使得爬坡定义考虑了风电的正反调峰特性,并给出了基于实际电网负荷及风电场数据的相应分析;

(2) 结合电网频率来确定风电爬坡事件的阈值,并给出了不同电网容量的量化选取方法,利用实际风电场数据论证了其合理性;

(3) 提出了结合源-网-荷信息的爬坡事件综合识别方法,并将源侧定义从单一风电侧延伸为电网中全体新能源发电,从电网实际调度运行角度,提高了爬坡事件识别方法的合理性与实用性。

本文对风电场出现大规模功率爬坡事件的预警及控制有重要意义。后期,还将进一步研究风电爬坡事件的时空分布特性、精确预报等更深层次的问题。

参考文献

[1] Pichault M ,Vincent C ,Skidmore G ,et al. Characterisation of Intra – hourly Wind Power Ramps at the Wind Farm Scale and Associated Processes [J]. Wind Energy Science ,2021 ,6 (1) : 131 – 147.

[2] 赵晟凯,邹欣,李旭霞,等. 直驱风电系统自适应惯量和一次调频协调控制策略 [J]. 电网与清洁能源 2020 ,36 (9) : 76 – 84.

[3] Pereyra – Castro K ,Caetano E ,Oscar Martínez – Al-

varado , et al. Wind and Wind Power Ramp Variability over Northern Mexico [J]. Atmosphere 2020 ,11(12) : 1281.

[4] 李强年,赵巧妮,聂龑. 基于层次分析法(AHP)的风电产业发展影响因素探析——以甘肃省酒泉风力发电基地为例 [J]. 电网与清洁能源 2019 ,35(10) : 75 – 81.

[5] Zhou B ,Duan H ,Wu Q ,et al. Short – term Prediction of Wind Power and its Ramp Events based on Semi – supervised Generative Adversarial Network [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2021(125) : 106411.

[6] Han L ,Qiao Y ,Li M ,et al. Wind Power Ramp Event Forecasting based on Feature Extraction and Deep Learning [J]. Energies 2020(13) : 6449.

[7] 李舟,乔文,谈震,等. 基于行波特征频率的配电网混合线路故障定位方法 [J]. 电网与清洁能源 2021 ,37(5) : 33 – 42 ,51.

[8] 张东英,代悦,张旭,等. 风电爬坡事件研究综述及展望 [J]. 电网技术 2018 ,42(6) : 1783 – 1792.

[9] Cheneka B R ,Watson S J ,Basu S. A Simple Methodology to Detect and Quantify Wind Power Ramps [J]. Wind Energy Science 2020 ,5(4) : 1731 – 1741.

[10] Li J ,Song T ,Liu B ,et al. Forecasting of Wind Capacity Ramp Events Using Typical Event Clustering Identification [J]. IEEE Access 2020(8) : 176530 – 176539.

[11] 崔明建,孙元章,柯德平. 基于原子稀疏分解和 BP 神经网络的风电功率爬坡事件预测 [J]. 电力系统自动化 ,2014 ,38(12) : 6 – 11.

[12] Kosovic B ,Haupt S E ,Adriaansen D ,et al. A Comprehensive Wind Power Forecasting System Integrating Artificial Intelligence and Numerical Weather Prediction [J]. Energies 2020 (13) : 1372.

[13] 欧阳庭辉,查晓明,秦亮,等. 基于相似性修正的风电功率爬坡事件预测方法 [J]. 中国电机工程学报 2017 ,37 (2) : 572 – 580.

[14] Cui M ,Zhang J ,Feng C ,et al. Characterizing and Analyzing Ramping Events in Wind Power ,Solar Power ,Load ,and Netload [J]. Renewable Energy 2017(111) : 227 – 244.