



移动扫码阅读

杨若辰, 姜磊, 佟灿, 等. 城市生活垃圾气化及灰渣结渣特性研究 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(2): 170-181.

YANG Ruochen, JIANG Lei, TONG Can, et al. Study on Municipal Solid Waste Gasification and Ash Residue Slagging Characteristics [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(2): 170-181.

## 城市生活垃圾气化及灰渣结渣特性研究

杨若辰<sup>1</sup>, 姜磊<sup>1</sup>, 佟灿<sup>2</sup>, 宋丽<sup>2</sup>, 岳佳鑫<sup>2</sup>, 张雄<sup>1,\*</sup>,  
廖玮<sup>1</sup>, 邵敬爱<sup>1,3</sup>, 杨海平<sup>1</sup>, 张世红<sup>1</sup>, 陈汉平<sup>1</sup>

- 华中科技大学能源与动力工程学院煤燃烧与低碳利用全国重点实验室, 湖北武汉430074;
- 北京华宇辉煌生态环保科技股份有限公司, 北京100000;
- 华中科技大学能源与动力工程学院新能源科学与工程系, 湖北武汉430074)

**摘要:** 随着中国城市化进程的推进, 城市生活垃圾 (Municipal Solid Waste, MSW) 的清运量逐年上升。MSW 气化技术因其处理量大、经济附加值高、污染物排放水平低等优势而受到广泛关注。基于此, 通过固定床反应器探究了反应温度和当量比 (Equivalence Ratio, ER) 对 MSW 气化过程及焦油生成特性的影响规律, 研究了不同气化条件下垃圾气化灰渣的结渣倾向以及熔融过程。结果表明, 气化温度的升高能够促进 MSW 分解和焦油的裂解, 从而提高了产气率和气化气热值。ER 的升高能够在促进焦油转化为醛、酮、酸的同时提升气化气热值, 但 ER 过高会导致含碳气体的氧化, 致使气化气热值降低。综合来看, 当气化温度为 700 °C、ER 为 0.3 时, 气化气热值达到最大, 约为 23.51 MJ/Nm<sup>3</sup>, 同时该条件下气体产率显著提高, 而焦油的生成量处在较低水平。X 射线荧光光谱和灰熔点分析显示, MSW 气化灰渣的主要成分是 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO, 灰渣的半球温度 ( $T_{HT}$ ) 和流动温度 ( $T_{FT}$ ) 随 ER 的升高而升高。在多种工况下, 由于灰渣中碱性氧化物的影响, MSW 气化灰渣表现出严重的结渣倾向, 通过调整 MSW 原料配比或添加 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等添加剂可以有效缓解 MSW 灰渣结渣情况, 改善气化炉长期运行环境。

**关键词:** 城市生活垃圾; 气化; 灰渣; 熔融特性; 反应温度

中图分类号: X799.3

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)02-0170-12

### Study on Municipal Solid Waste Gasification and Ash Residue Slagging Characteristics

YANG Ruochen<sup>1</sup>, JIANG Lei<sup>1</sup>, TONG Can<sup>2</sup>, SONG Li<sup>2</sup>, YUE Jiabin<sup>2</sup>, ZHANG Xiong<sup>1,\*</sup>,  
LIAO Wei<sup>1</sup>, SHAO Jing'ai<sup>1,3</sup>, YANG Haiping<sup>1</sup>, ZHANG Shihong<sup>1</sup>, CHEN Hanping<sup>1</sup>

- State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
- Beijing Huayuhuihuang Eco-Environmental Protection Technology Co., Ltd., Beijing 100000, China;
- Department of New Energy Science and Engineering, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** With China's urbanization advancing, the annual volume of municipal solid waste (MSW) collection continues to rise. MSW gasification has gained significant attention due to its large processing capacity, economic benefits, and low pollutant emissions. This study systematically

收稿日期: 2024-07-20

修回日期: 2024-08-18

接受日期: 2024-08-21

DOI: 10.20078/j.eep.20240907

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51976075, 52176187)

第一作者: 杨若辰 (2000—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 主要研究方向为 CO<sub>2</sub> 催化转化。E-mail: m202271288@hust.edu.cn

\*通讯作者: 张雄 (1987—), 男, 湖北广水人, 副教授, 主要研究方向为能源清洁高效利用。E-mail: zhangxiong107@hust.edu.cn

investigates the effects of reaction temperature and equivalence ratio (ER) on MSW gasification using a fixed-bed reactor, focusing on syngas composition, tar formation characteristics, and slagging behavior of gasification ash. Additionally, the transformation of tar compounds and the fusion properties of gasification ash under varying conditions are explored. Experimental results show that increasing the gasification temperature enhances MSW decomposition and tar cracking, leading to higher syngas yield and calorific value. As ER increases from 0 to 0.3, tar conversion into oxygenated compounds such as aldehydes, ketones, and acids is promoted, significantly improving syngas calorific value. However, when ER exceeds 0.3, excessive oxidation of CO and H<sub>2</sub> reduces syngas quality and calorific value. At an optimal temperature of 700 °C and ER of 0.3, the highest syngas calorific value of about 23.51 MJ/Nm<sup>3</sup> is achieved, with increased gas yield and reduced tar formation. X-ray fluorescence (XRF) spectroscopy and ash fusion analysis indicate that MSW gasification ash primarily consists of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and CaO. As ER increases, the hemispherical temperature (THT) and flow temperature (TFT) of the ash rise, suggesting a decrease in slagging propensity. However, slagging tendency calculations indicate a significant tendency for slagging under various conditions, posing potential risks to long-term gasifier operation. This issue is attributed to the high content of alkali metal oxides (such as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and K<sub>2</sub>O) in the gasification ash. These oxides react with SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to form low-melting eutectic compounds, reducing ash viscosity and increasing adhesion, thus exacerbating slagging at high temperatures. The study further highlights that gasification ash composition is highly sensitive to operating conditions. Slagging issues can be mitigated by adjusting the MSW feedstock composition or by adding SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as additives to improve reactor stability. Additionally, while increasing ER promotes syngas yield by facilitating tar cracking, excessive ER leads to undesirable oxidation of valuable syngas components, resulting in a trade-off between syngas production and calorific value. In summary, reaction temperature and ER play crucial roles in determining MSW gasification efficiency and stability. Proper optimization of these parameters enhances syngas quality while reducing tar formation and slagging risks. The findings of this study provide theoretical support for the industrial application of MSW gasification technology and offer new insights into optimizing syngas composition, improving ash behavior, and advancing sustainable waste-to-energy conversion.

**Keywords:** Municipal Solid Waste; Gasification; Ash residue; Melting characteristics; Reaction temperature

## 0 引 言

随着中国城市化进程的加速,城市生活垃圾(MSW)清运量逐年上升。以2022年为例,我国MSW的年清运量达24 444.7万t<sup>[1]</sup>。目前,MSW的主要处理手段以填埋和焚烧为主<sup>[2]</sup>,其中焚烧垃圾总量高达19 502.1万t,卫生填埋量高达3 043.2万t<sup>[1]</sup>。MSW组成复杂,包括厨余垃圾、金属、废塑料、木屑及大量灰渣<sup>[3]</sup>,直接焚烧MSW会导致生成二噁英等大量有害物质,同时灰渣中的重金属、氯化物和硫化物等也可能造成二次污染<sup>[4]</sup>。因此,开发新型MSW处理技术,实现MSW资源化利用迫在眉睫。

相对于卫生填埋和直接焚烧,MSW气化具有

处理量大、经济附加值高、污染物排放水平低等优点,被认为是最具前景的MSW处理技术之一<sup>[5]</sup>。与单一组分的燃料相比,MSW的构成复杂,其内部不同组分之间的相互作用和整体的气化特性受气化参数的影响较大。探究不同气化工况下的MSW气化特性有利于进一步提升气化技术经济性<sup>[6-7]</sup>。QI等通过机器学习发现,气化温度和当量比(Equivalence Ratio, ER)是最重要的影响因素<sup>[8]</sup>。在针对气化温度的研究中,LIN等基于固定床反应器研究了气化温度对气化气组分的影响,发现随着反应温度的上升,气化气中H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>的产量和碳转化率逐渐上升<sup>[9]</sup>。CHEN等发现高温条件下水煤气变换(Water-Gas Shift, WGS)反应和蒸汽-甲烷重整(Steam-Methane Reforming, REF)

反应的反应速率明显提高,导致气化气中  $H_2$ 、 $CH_4$  的产量持续上升<sup>[10]</sup>。SAKURAI 等通过研究 MSW 中具有代表性的 10 种组分各自的气化规律,发现 MSW 的气化过程主要发生在 450~650 °C 温度区间<sup>[11]</sup>。GU 等基于此,对中温条件下 MSW 的气化特性展开研究,发现气化温度在 600~650 °C 时合成气生成质量最高<sup>[12]</sup>。同时,ER 也是影响 MSW 气化特性的主要因素,CAI 等发现当 ER 处于 0.1~0.3 范围内时,ER 的增加对气化气有较强的正向作用,而当 ER 超过 0.3 后,其作用逐渐减弱<sup>[13]</sup>。ZHENG 等研究发现当 ER 从 0.2 增至 0.5 时,MSW 气化气中  $H_2$  和 CO 产率明显降低,CO<sub>2</sub> 产率明显升高<sup>[14]</sup>。现阶段研究多集中于中温气化条件下的气化气生成特性,但随着 MSW 处理规模的扩大和对 MSW 处理速度要求的提高,MSW 在更高温度、更高 ER 条件下的气化特性和焦油转化特性研究日益重要,对特定工况下 MSW 气化特性的研究对现有厂家的生产具有指导意义。

与其他燃料相比,MSW 的高灰分特性会导致气化过程出现大量气化灰渣堆积,进而导致系统效率和设备寿命下降。研究表明,不同灰渣成分对气化过程结渣特性影响存在差异,根据灰渣成分可将其分为碱性氧化物(如  $Fe_2O_3$ 、 $K_2O$  和  $Na_2O$  等)和酸性氧化物(如  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  等)2 类<sup>[4]</sup>。VAN 等发现酸性氧化物在灰熔融过程中能够形成“骨架”结构,进而提高灰熔点<sup>[15]</sup>。WEI 等将  $SiO_2$  作为添加剂,研究发现  $SiO_2$  的适量加入会促进霞石和铝硅酸钙的生成,进而降低灰渣熔点<sup>[16]</sup>。WANG 等重点研究了 ER 对灰渣中 Fe 形态的影响,发现弱还原性条件会使灰渣中  $Fe^{2+}$  比例提高,进而导致灰渣黏度下降,影响结晶行为和灰渣结构<sup>[17]</sup>。实际 MSW 中碱金属、碱土金属盐及其氧化物和其他非金属氧化物的相互作用复杂,仅对模拟 MSW 中的某一组分开展研究存在局限性,而对实际 MSW 在不同工况下的气化灰渣熔融及结渣特性开展研究具有更高的工程应用价值。

MSW 气化特性及灰渣结渣特性是影响气化炉经济性和长期运行可靠性的关键因素。现阶段研究多集中于对单一组分或模块化气化特性的影响,针对实际 MSW 气化特性及焦油转化特性的研究较少,气化过程焦油转化与气化气生成的交互作用尚未明确。基于 MSW 处理的实际生产需要,本文选取实际 MSW,通过固定床反应器探究

反应温度和 ER 对 MSW 气化过程及焦油生成特性的影响规律,并探讨不同气化条件下垃圾气化灰渣的结渣倾向以及熔融过程,为 MSW 气化技术的大规模应用及工艺优化提供理论指导。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

MSW 样品由北京华宇辉煌生态环保股份有限公司提供,样品取自北京市周边生活垃圾处理厂,由厨余垃圾、塑料、废纸、土壤等在内的多种废弃物组成。根据《生活垃圾采样和分析方法》(CJ/T313—2009)对样品进行采集,并采用液氮粉碎机对样品预处理,控制样品粒径小于 60 目,以确保后续测量和研究的准确性<sup>[4]</sup>。

### 1.2 样品基础特性

根据国家标准 GB/T 28731—2012 对预处理后的 MSW 进行工业分析,结果见表 1<sup>[4]</sup>。可以看出,MSW 具有高水分、高灰分的特点。

表 1 MSW 工业分析结果

Table 1 MSW proximate analysis results %

样品	$M_t$	$M_{ad}$	$V_{ad}$	$A_{ad}$	$FC_{ad}$
MSW	22.840	1.245	43.033	50.333	5.389

注:  $FC_{ad}$  采用减差法计算; ad 表示空气干燥基。

采用 Vario Micro cube 元素分析仪和 Rapid S cube 定硫仪对 MSW 空气干燥基中 C、H、N、O、S 元素的含量进行了测量,结果见表 2。

表 2 MSW 元素分析结果

Table 2 MSW ultimate analysis results %

样品	$w_C$	$w_H$	$w_O$	$w_N$	$w_S$
MSW	26.430	3.431	16.560	0.890	0.318

注: O 含量采用减差法计算。

采用德国艾卡公司 IKA C6000 型自动量热仪对 MSW 空气干燥基低位发热量进行测试。结果显示,由于 MSW 中存在大量灰分(超 50%),其低位发热量较低,约为 10.38 MJ/kg。

### 1.3 实验方法

采用 OTF-1200X 型立式固定床管式反应器进行实验研究。实验装置如图 1 所示。采用内径为 30 mm 的石英管作为气化室。石英管侧方设置有进气口,用于通入载气;尾部设置有出气口,出气口后部依次连接 2 个冰水浴冷凝瓶和 1 个 4 L 铝制气袋,分别用于收集液态产物和不凝性气体

产物。在热解实验中,将 $(500 \pm 5)$ mg 预处理后的 MSW 进料装在吊篮中放入石英管进行实验,输入气体为  $100\%N_2$ ,其流量由电子流量计控制,设置流量为  $100 \text{ mL/min}$ 。石英管温度分别设定为  $500$ 、 $600$ 、 $700$  和  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当石英管预热至设定温度后,将吊篮伸入石英管中部进行反应,反应时间控制为  $10 \text{ min}$ 。实验结束后,收集固体残余物称量;采用  $5 \text{ mL}$  甲醇溶解冷凝在冷凝瓶中的焦油,进行气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)分析;对收集在气袋中的气体样品进行 GC 分析。在气化实验中,依据元素分析的结果计算 MSW 完全氧化所需的理论需氧量,分别按照  $R_E=0$ 、 $0.3$ 、 $0.5$ 、 $0.7$  通入  $O_2$ ,同时控制  $N_2$  流量,使总进气量保持在  $100 \text{ mL/min}$ ,其余条件均不变。

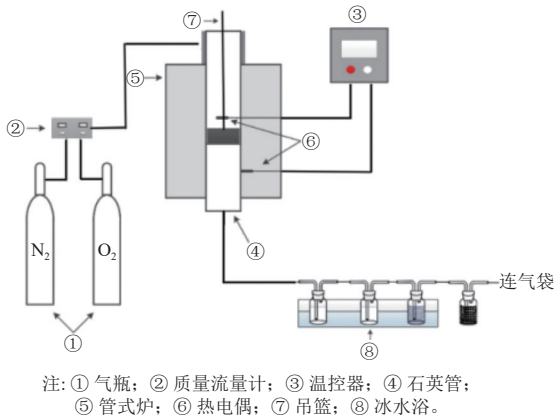


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Experimental setup diagram

## 1.4 分析方法

### 1.4.1 气体产物分析方法

采用 Panna A91 型气相色谱仪,采用 Agilent Carboxen 1000 填充柱,对合成气进行定量检测,分别采用热导池检测器(TCD)和氢火焰检测器(FID)测量  $H_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$  和  $C_1 \sim C_5$  的烃类产物。

### 1.4.2 焦油分析方法

采用 7890B/5977A 型气相色谱-质谱联用仪对 MSW 气化后的焦油产物进行定量分析。基于 NIST14.0 数据库表征的 GC-MS 光谱计算液态化化合物的组分。

### 1.4.3 灰熔点分析方法

实验采用 CAF Digital Imaging 型灰熔点分析仪(英国 CARBOLITE 公司)对 MSW 灰熔点进行检测。依据 GB/T 219—2008 规定的角锥法测定灰渣熔融的变形温度( $T_{DT}$ )、软化温度( $T_{ST}$ )、半球温度( $T_{HT}$ )和流动温度( $T_{FT}$ )。

### 1.4.4 灰成分分析方法

采用 M4 TORNADO 型微聚焦 X 射线荧光能谱仪(德国 Bruker 公司)对 MSW 气化灰渣进行 XRF 分析,计算灰渣中各组分的相对含量。

### 1.4.5 结渣特性分析方法

酸碱比  $B/A_1$ 、硅比  $G$ 、硅铝比  $S/A_2$ 、铁钙比  $F/C$  和生物质结渣综合指数  $A$  是判断灰渣结渣倾向的主要参数<sup>[4,18]</sup>。式(1)~(4)为酸碱比  $B/A_1$ 、硅比  $G$ 、硅铝比  $S/A_2$ 、铁钙比  $F/C$  的计算方法,各式中  $w$  代表对应组分的质量分数,判断标准见表 3。

$$B/A_1 = w(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O) / w(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2) \quad (1)$$

$$G = 100 \cdot w(SiO_2) / w(SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO) \quad (2)$$

$$S/A_2 = w(SiO_2) / w(Al_2O_3) \quad (3)$$

$$F/C = w(Fe_2O_3) / w(CaO) \quad (4)$$

表 3 结渣程度判别指标

Table 3 Indicators for determining the degree of slagging

参数	结渣程度		
	轻微	中等	严重
$T_{ST}/^\circ\text{C}$	>1 390	1 390~1 260	<1 260
$B/A_1$	<0.206	0.206~0.400	>0.400
$S/A_2$	<1.87	1.87~2.65	>2.65
$G$	>78.8	78.8~66.1	<66.1
$F/C$	<0.3 或 >3.0	0.3~3.0	接近 1

灰成分综合指数  $Rul$  可用于分析灰渣的沾污等级,其计算方法如式(5):

$$Rul = B/A_1 \times w(Na_2O) \quad (5)$$

其中:  $B = w(CaO + MgO + Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O)$ ;

$A_1 = w(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)$ 。

一般认为,  $Rul \leq 0.2$  时灰渣呈现轻微沾污倾向,  $0.2 < Rul \leq 0.5$  时灰渣呈现中等沾污倾向,  $0.5 < Rul \leq 1.0$  时灰渣呈现严重沾污倾向,  $Rul > 1.0$  时灰渣呈现非常严重的沾污倾向。

成灰综合指数  $R$  常用于判断灰渣结渣等级,其计算方法如式(6):

$$R = 1.24B/A_1 + 0.28 \times w(SiO_2) / w(Al_2O_3) - 0.002 3ST - 0.019G + 5.4 \quad (6)$$

一般认为,  $R \leq 1.50$  时灰渣呈现轻微结渣倾向,  $1.50 < R \leq 2.25$  时灰渣呈现中等结渣倾向,  $2.25 < R \leq 2.50$  时灰渣呈现严重结渣倾向,  $R > 2.50$  时灰渣呈现非常严重的结渣倾向;  $ST$  为软化温度数值。

由于 MSW 中存在大量以植物残骸、餐厨垃圾为主的生物质,故本文引入生物质结渣综合指数  $A_3$  辅助判断 MSW 的结渣情况,生物质结渣综合指数  $A_3$  的计算方法如式(7):

$$A_3 = w(\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3) / w(\text{CaO}) \quad (7)$$

式(7)中的分子项对生物质灰熔点具有提高的作用,因此该指数越大,生物质的灰熔点越高,而灰熔点对灰渣结渣情况具有显著影响。具体来说,  $A_3 > 5$  时灰渣呈现轻微结渣倾向,  $2 < A_3 \leq 5$  时灰渣呈现出中等结渣倾向,  $A_3 \leq 2$  时灰渣呈现严重结渣倾向。

## 2 结果和讨论

### 2.1 MSW 气化特性

#### 2.1.1 产气率

MSW 在不同气化条件下的产气率( $G_v$ )特性变化如图 2 所示。从图中可以看出,MSW 气体总产率主要受温度影响,当 ER 为 0 ( $R_E=0$ ) 时,随着温度由 500 °C 上升至 800 °C,  $G_v$  从 0.04  $\text{Nm}^3/\text{kg}$  上升至 0.22  $\text{Nm}^3/\text{kg}$ 。这是由于温度升高能够促进 MSW 中固态组分的热解和焦油的裂解,生成气体。在 ER 从 0 升高至 0.5 的过程中,各反应温度条件下的  $G_v$  均呈现升高趋势,这是由于  $\text{O}_2$  能够促进焦油的裂解、氧化和固体组分中含碳物质的转化,但随着 ER 的进一步升高,气体产物发生完全氧化,生成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,故在  $R_E=0.7$  条件下 MSW 气化  $G_v$  趋于平稳或出现略微下降的趋势。气化气中各组分在不同工况下的变化在下文中讨论。

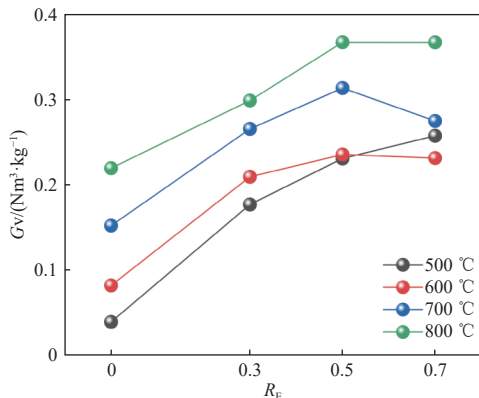


图 2 气化条件对气体产率的影响

Fig. 2 Effect of gasification conditions on gas yield

#### 2.1.2 $\text{H}_2$ 产率

MSW 在不同气化条件下的  $\text{H}_2$  产率特性变化如图 3 所示。从图中可以看出,MSW 气化  $\text{H}_2$  产率受温度影响明显,当  $R_E=0$  时,随着温度由

500 °C 上升至 800 °C,  $\text{H}_2$  产率从 0.08  $\text{mmol/g}$  上升至 1.82  $\text{mmol/g}$ 。本实验工况中,MSW 主要通过脱氢反应产生  $\text{H}_2$ ,反应温度升高能够有效促进脱氢反应的正向进行。此外,随着反应温度的上升,气化产物中的  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2\text{O}$  发生 WGS 反应,促进了  $\text{H}_2$  的生成<sup>[19]</sup>。此外,气化过程中产生的  $\text{H}_2\text{O}$  也会与 MSW 固态产物中的气化焦炭发生水蒸气碳化反应,生成  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$ 。一方面,反应温度的提高能够促进  $\text{H}_2\text{O}$  向 MSW 表面扩散,提高反应速率;另一方面,该反应是吸热反应,反应温度的提高能够促进反应的正向进行。因此,适当提高反应温度,能够促进 MSW 固态产物中焦炭的转化,降低 MSW 灰渣中的碳含量,提高气体的可燃性和热值。

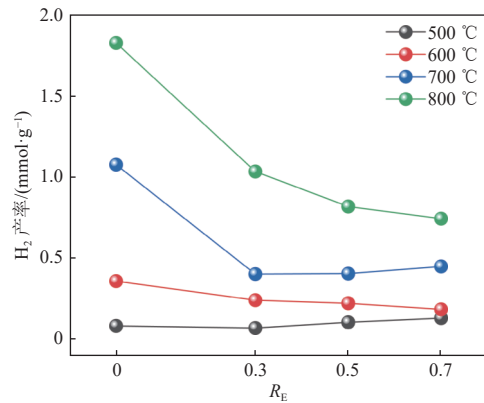


图 3 气化条件对  $\text{H}_2$  产率的影响

Fig. 3 Effect of gasification conditions on  $\text{H}_2$  yield

随着 ER 的提高,MSW 气化的  $\text{H}_2$  产率下降,在 ER 从 0 升至 0.7 的过程中,MSW 在 600、700 和 800 °C 条件下的  $\text{H}_2$  产率降幅均超过 50%,在 800 °C 条件下下降至 59%。这是因为  $\text{O}_2$  能够促进  $\text{H}_2$  发生氧化反应,MSW 气化过程中产生的  $\text{H}_2$  先与  $\text{O}_2$  发生反应,故随着 ER 的提高, $\text{H}_2$  产率明显下降。当 ER 进一步提高时, $\text{H}_2$  产率降低的趋势有所减弱,这是因为  $\text{O}_2$  通过促进 MSW 气化焦油的裂解进而促进了  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的生成,最终推动了 WGS 反应的正向进行。

此外,气化过程中生成的  $\text{CH}_4$  也会与  $\text{O}_2$  发生部分氧化重整反应生成  $\text{H}_2$  和  $\text{CO}$ ,但随着  $\text{O}_2$  浓度的进一步升高,完全氧化反应强度明显增加, $\text{CH}_4$  将直接转化为  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ <sup>[20]</sup>。

#### 2.1.3 $\text{CH}_4$ 产率

MSW 在不同气化条件下的  $\text{CH}_4$  产率特性变化如图 4 所示。从图中可以看出,MSW 气化过程中  $\text{CH}_4$  产率主要受温度影响,受 ER 影响较小。当  $R_E=0$  时,随着温度由 500 °C 上升至 800 °C,

CH<sub>4</sub> 产率从 0.11 mmol/g 升高至 1.95 mmol/g。这是因为 MSW 在气化温度较低时, 气化焦油中存在较多的长链烷烃和环烷烃。随着气化温度的进一步升高, 这些烃类物质会发生二次裂解产生 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 等其他短链烃类和 H<sub>2</sub>。当气化温度达到 700 °C 时, MSW 气化的 CH<sub>4</sub> 产量随着 ER 的提高而升高。这是因为当温度达到 700 °C 时, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 会发生脱氢反应裂解产生 CH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub>, 而 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 主要来自长链烃类的裂解, 较高的 ER 能够促进焦油的裂解和二次裂解。这一趋势在 ER 较高时更为明显。这是因为 ER 较低时气体中 CO<sub>2</sub> 浓度较高, 抑制了气化反应的进行。故气化温度达到 800 °C 时, CH<sub>4</sub> 的产量随着 ER 的提高而有所上升, 这也能够与图 3 中该温度下 H<sub>2</sub> 产率下降速度减缓相对应。

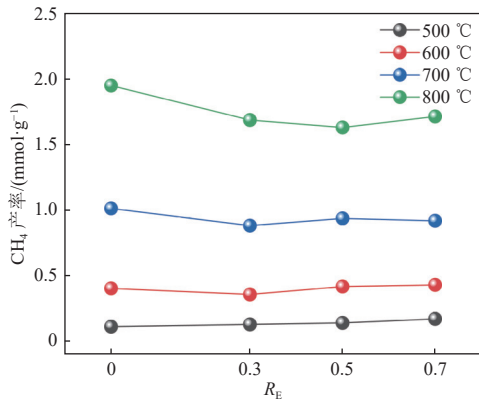


图 4 气化条件对 CH<sub>4</sub> 产率的影响

Fig. 4 Effect of gasification conditions on CH<sub>4</sub> yield

#### 2.1.4 CO<sub>2</sub> 产率

MSW 在不同气化条件下 CO<sub>2</sub> 产率特性变化如图 5 所示。MSW 气化过程中 CO<sub>2</sub> 产率主要受 ER 影响。这主要是因为 MSW 本身含氧量较低, 大量 O、Si 和其他金属形成稳定的氧化物或盐, 在该温度下无法参与反应, 其中 O<sub>2</sub> 主要来自外界输入。从图中可以看出, 随着 ER 的提高, MSW 气化气中 CO<sub>2</sub> 产率随之提高。这是因为随着 ER 的提高, MSW 气化产生的烃类气体、焦油和残炭迅速与 O<sub>2</sub> 发生氧化反应生成 CO<sub>2</sub> 及其他氧化物<sup>[21]</sup>。随着反应温度的进一步升高, MSW 中的碳酸盐发生分解反应产生大量 CO<sub>2</sub>。MSW 中的碳酸盐主要由 CaCO<sub>3</sub> 组成, 其分解温度为 740 °C。然而在 MSW 气化灰渣中多种盐的作用下, 其分解温度有所降低, 故气化温度从 600 °C 升至 700 °C 过程中, CO<sub>2</sub> 产量明显升高。值得注意的是, 在 ER 从 0 升高至 0.5 的过程中, 800 °C 条件下的 CO<sub>2</sub> 产率

略低于 700 °C。这是由于在 800 °C 条件下 MSW 气化产生的 CO<sub>2</sub> 扩散到 MSW 表面, 与焦炭发生 Boudouard 反应生成 CO。该反应是吸热反应, 较高的反应温度能够促进 CO<sub>2</sub> 和焦炭的转化, 促进 MSW 的完全气化。

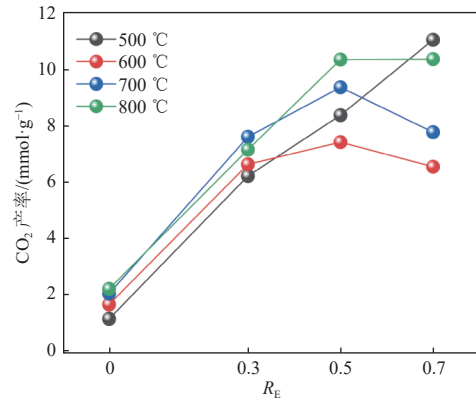


图 5 气化条件对 CO<sub>2</sub> 产率的影响

Fig. 5 Effect of gasification conditions on CO<sub>2</sub> yield

#### 2.1.5 CO 产率

MSW 在不同温度、ER 下 CO 产率特性变化如图 6 所示。MSW 热解气化过程中 CO 产率受 ER 和热解气化温度的双重影响。以 ER=0 为例, 在反应温度从 500 °C 升至 800 °C 的过程中, CO 产率从 0.26 mmol/g 升至 1.96 mmol/g。这是因为较高的反应温度能够促进焦油的裂解和固体组分中含碳物质的转化, 同时部分气化产物发生蒸汽重整反应生成 CO。此外, 气化产生的 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 在高温下快速向 MSW 表面扩散, 在 MSW 表面与气化焦炭发生的水蒸气碳化反应和 Boudouard 反应能够促进 CO 的生成, 同时高温能够促进该反应的正向进行。受这些因素影响, MSW 气化的 CO 产率在 ER 从 0 升至 0.5 的过程中随反应温度的升高而明显升高。然而当 ER 升至 0.7 时, 700 °C、800 °C 条件下的 CO 产率呈下降趋势, 且产率低于该条件下 500 °C、600 °C 的 CO 产率。这是因为 O<sub>2</sub> 的加入能够促进焦油的裂解和含碳物质的转化, 从而提高 CO 产率; 但随着 ER 的进一步升高, CO 会发生进一步氧化生成 CO<sub>2</sub>, 这一趋势随着反应温度的升高而加强。同时, 更高的温度也会促进水气变换反应进行, 故在高温 (T>700 °C)、高 O<sub>2</sub> 浓度 (R<sub>E</sub>>0.5) 的条件下, 热解气化气中 CO 产率出现下降趋势。以 800 °C 为例, 在 ER 从 0 升至 0.7 的过程中, CO 产率先从 1.96 mmol/g 升至 2.07 mmol/g, 随后下降至 1.81 mmol/g。

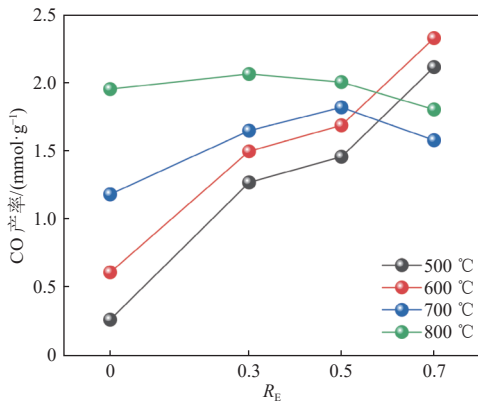


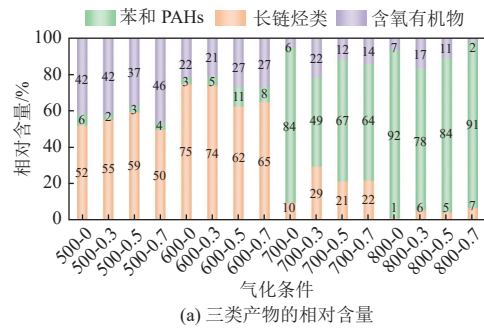
图 6 气化条件对 CO 产率的影响

Fig. 6 Effect of gasification conditions on CO yield

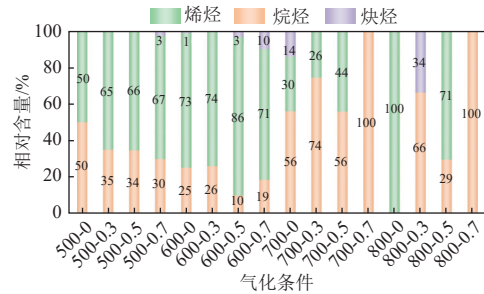
2.2 液态产物特性

MSW 在不同气化条件下的液态产物分布如图 7 所示。需要注意的是,图中展示的是 MSW 气化液态产物各组分的相对含量变化。随着温度和 ER 的提高,MSW 气化焦油的总产量呈下降趋势。由于 MSW 气化焦油产物种类众多,本文将焦油分为长链烃类、苯和多环芳烃 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)、含氧有机物 3 组,其在各个工况下的相对含量如图 7(a)所示。每组内部组分相对含量如图 7(b)~(d)所示。

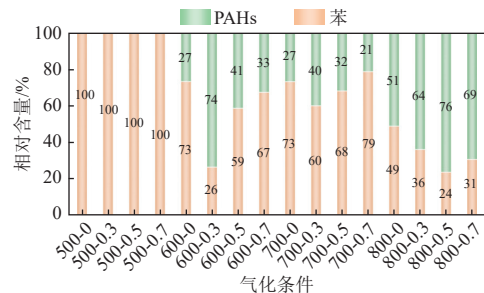
从图 7(a)中可以看出,随着反应温度的升高,MSW 热气化态产物中含氧有机物的占比逐渐降低。以 R<sub>E</sub>=0 时为例,反应温度从 500 °C 升至 800 °C 的过程中,含氧有机物在焦油的占比从 50% 时的 42% 在迅速降低至 800 °C 时的 7%。这是由于随着反应温度的升高,醇会发生脱水、裂解和氧化等反应,生成醛、酮、醚、酸等产物。此外,一些醇也可能与酸或醛类反应生成酯类化合物。反应温度的升高会促进这些吸热反应的进行<sup>[22]</sup>。这也与图中展现的焦油中醇类最先消失相对应。醚类、酯类在高温条件下会分别发生裂解反应和酯水解反应,生成以酸为主的其他物质。因此,随着反应温度的升高,酸类物质的占比逐渐升高。随着温度的进一步升高,焦油中的酸类发生脱羧、裂解和氧化等反应,醛发生脱羧、裂解和氧化等反应,生成 CO、CO<sub>2</sub> 等气态产物。故在反应温度达到 700 °C 以上时,这些物质在焦油中的占比迅速降低。从焦油中长链烃类的占比变化可以看出,随着反应温度的升高,MSW 气化产物中烃类的占比逐渐降低。以 R<sub>E</sub>=0 时为例,反应温度从 500 °C 升至 800 °C 的过程中,长链烃类在焦油中占比从 52% 降低至 1%。这是因为随着反应温



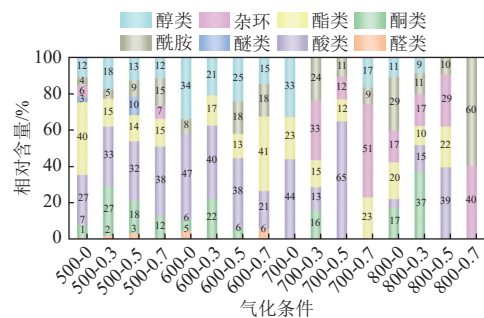
(a) 三类产物的相对含量



(b) 长链烃类中各组分相对含量



(c) 苯和 PAHs 中各组分相对含量



(d) 含氧有机物中各组分相对含量

注: 如反应温度 500 °C, R<sub>E</sub>=0 记为 500-0, 余同。

图 7 气化条件对液态产物组分的影响

Fig. 7 Effects of gasification conditions on the composition of liquid products

度的升高,焦油中的烃类分子会发生裂解、重排、氧化和缩合等多种反应,导致烃类分子的链状结构断裂产生低碳数的烷烃、烯烃和芳香烃以及环状化合物和聚合物。在反应温度从 500 °C 升至 600 °C 时,焦油中长链烃类物质占比升高,这可能是因为温度升高对含氧有机物分解的促进作用更为明显,导致了长链烃类相对含量的升高。

随着 ER 的提高,气化焦油中含氧化合物的占比总体呈现先上升后下降的趋势。以反应温度为 700 °C 时为例,在 ER 从 0 升高至 0.7 的过程中,焦油中含氧有机物的占比先从 10% 升高至 29%,随后降至 22%。这主要是当 ER 较低时,有机物氧化不完全,导致了醛、酮、酸等含氧化合物的生成;但随着 ER 的进一步提高,MSW 中的有机物完全氧化,焦油中醛、酮、酸等有机物的含量随之降低。此外, O<sub>2</sub> 作为气化过程中的氧化剂,会促进气化焦油中醛、酮等有机物的氧化反应,将之氧化为酸或其他氧化产物。该规律在反应温度较低时较为明显。焦油中烃类物质占比随 ER 的升高先升高后降低,这是因为 ER 的提高会促进焦油中长链碳氢化合物的完全氧化生成 CO<sub>2</sub>,而 CO<sub>2</sub> 可以作为焦油分解的催化剂,二者的作用能够进一步促进焦油的裂解和氧化<sup>[23]</sup>。

从图 7(c) 中苯和 PAHs 的含量变化可以看出,在反应温度较低时,焦油中几乎不存在 PAHs,随着反应温度的提高,焦油中苯和 PAHs 的占比

明显提高。以 R<sub>e</sub>=0 时为例,反应温度从 500 °C 升至 800 °C 的过程中,苯和 PAHs 在焦油中的占比从 6% 升高至 92%。一方面,这是由于 PAHs 的生成对反应温度的敏感性随反应温度的升高而升高,更高的温度促进了苯和 PAHs 的生成和苯向 PAHs 的转化<sup>[24]</sup>。另一方面,更高的反应温度促进了焦油中其他物质转化为气化气。从图 7(c) 可以看出,随着 ER 的提高,苯和 PAHs 中 PAHs 的占比先升高后降低。以反应温度为 700 °C 时为例,在 ER 从 0 升高至 0.7 的过程中,苯和 PAHs 中 PAHs 的占比先从 27% 升高至 40%,随后降低至 21%。这是因为 O<sub>2</sub> 能够促进苯向 PAHs 的转化,但随着 ER 的进一步升高,PAHs 开始氧化,故其含量在 ER 较高的工况下出现下降趋势。

### 2.3 气化气组分相对含量及热值特性

MSW 在不同气化条件下的气化气各组分相对含量和气化气低位热值(Low Heating Value, LHV)的变化特征如图 8 所示。需要注意的是,本文在讨论气化气组分占比和 气化气低位热值时仅

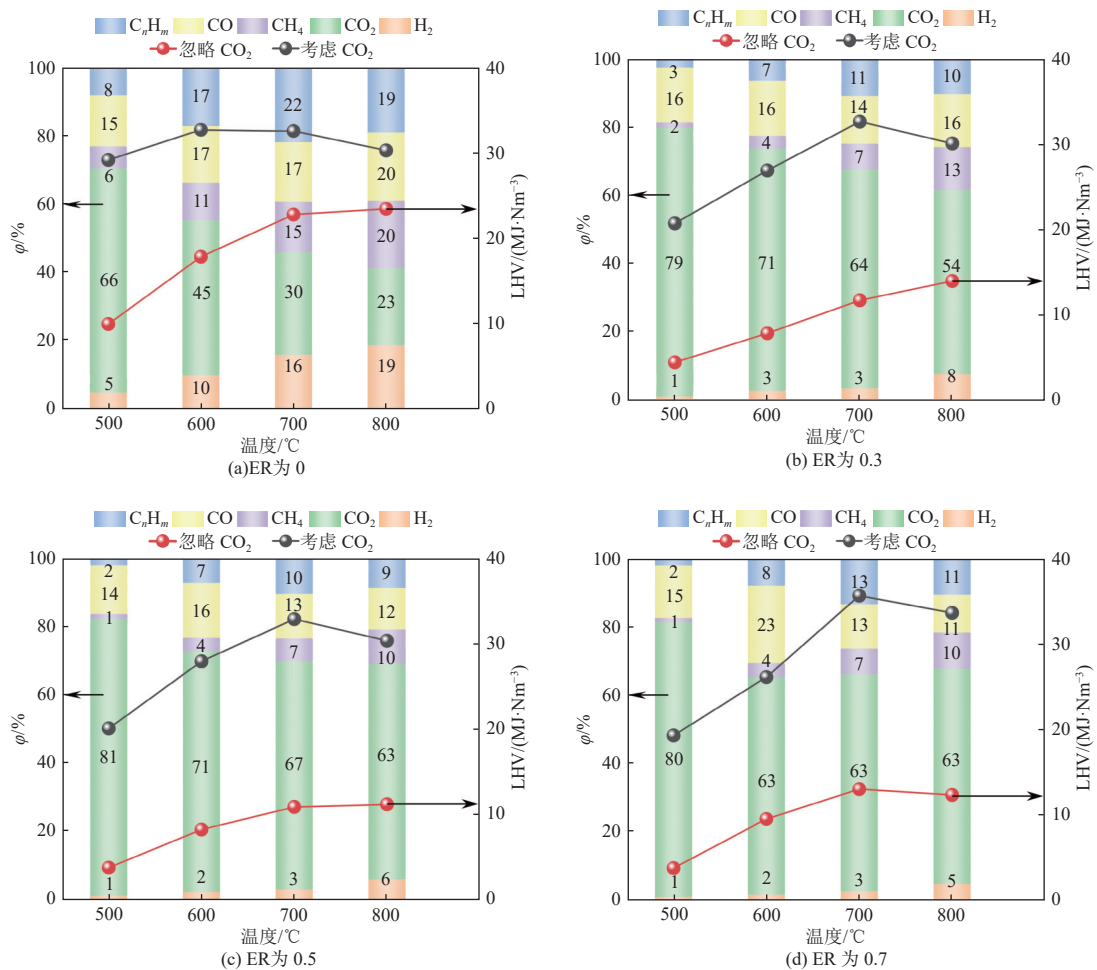


图 8 气化条件对气体组分和热值的影响

Fig. 8 Effects of gasification conditions on the gas composition and LHV



计算气化过程中产生的可燃气和 CO<sub>2</sub>, 残余气化剂和载气并未纳入计算。

从图 8 可以看出, 随着反应温度的升高, 气化气中 CO<sub>2</sub> 的占比逐渐降低, H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 的占比逐渐升高, 该趋势在反应温度超过 700 °C 时最明显, 这是由于反应温度超过 700 °C 后, WGS 反应和 SRF 反应的强度逐渐提高, 这些反应有助于 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 的生成。此外, 随着反应温度的升高, CO<sub>2</sub> 会与 MSW 表面的残炭发生反应生成 CO, 这也是高温工况下 CO 在气体产物中的占比基本保持稳定的原因。

从 ER 的影响来看, 随着其数值的提高, MSW 气化气中的 CO<sub>2</sub> 占比明显提高, H<sub>2</sub>、CO 和烃类的占比逐渐降低, 这是由于 ER 的提高促进了 H<sub>2</sub>、CO 和烃类的氧化。总体来看, O<sub>2</sub> 一方面能够促进焦油的裂解, 进而促进轻质烃类的生成, 另一方面会促进气态产物的氧化, 生成 CO<sub>2</sub>, 降低气化气的热值和经济效益。

从图 8 可以看出, MSW 气化气 LHV 受温度影响较大。在不考虑气化产生的 CO<sub>2</sub> 的情况下, MSW 气化气 LHV 整体呈现先上升后下降的趋势, 在 700 °C 达到最高, 达 32.65~35.62 MJ/Nm<sup>3</sup>。在不同 ER 条件下, 反应温度从 500 °C 升至 700 °C 的过程中气化气 LHV 提升幅度为 11.65%~84.60%, 最大提升发生在 R<sub>E</sub>=0.7 时。如前文所述, 出现该

趋势的主要原因是 ER 的提高促进了焦油的裂解, 生成大量可燃气。需要注意的是, 高浓度 O<sub>2</sub> 会促进含碳可燃气向 CO<sub>2</sub> 转化, 进而降低气化气的 LHV, 当考虑气体中的 CO<sub>2</sub> 后, MSW 气化气 LHV 明显降低, 在 800 °C 左右达到最大值, 为 11.17~23.51 MJ/Nm<sup>3</sup>, 仅为不考虑 CO<sub>2</sub> 时气化气 LHV 的 36.72%~77.41%, 但随反应温度的升高仍呈上升趋势。综上所述, 反应温度是影响 MSW 气化的主要因素, 反应温度的升高能够促进焦油向气化气的转化; 而 O<sub>2</sub> 一方面能够提升气化气的总产量进而提高气体的 LHV, 但另一方面会促进 CO<sub>2</sub> 的生成, 导致 LHV 的降低。

反应温度的升高能够促进 MSW 的热解气化, 提高 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO 和 CO<sub>2</sub> 的产率和反应速率; 但过高的反应温度会对设备提出更高要求, 降低机组运行经济性。本研究选取的 MSW 制备气化气最佳反应温度为 700 °C 左右, 最佳 ER 为 0.3 左右。

#### 2.4 MSW 灰渣结渣特性研究

灰熔融温度是表征生活垃圾气化灰渣物理性质的重要参数, 也是判断其结渣难易程度的指标。本文选取了 600 °C 条件下 R<sub>E</sub>=0、R<sub>E</sub>=0.3 和 700 °C 条件下 R<sub>E</sub>=0.3(下文记为 600-0、600-0.3 和 700-0.3) 的 MSW 气化灰渣的各项特性进行研究。通过 XRF 检测灰渣中不同氧化物成分, 见表 4。

表 4 优选工况下灰渣主要组分

Table 4 Main components of ash under optimal operating conditions gomh

工况	组成												
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	ZnO	其他
600-0	50.229	15.128	12.120	5.487	4.620	2.737	1.372	1.042	0.897	0.221	0.147	0.140	5.861
600-0.3	49.794	14.225	11.941	4.983	4.276	3.038	1.234	1.029	3.451	0.195	0.129	0.107	5.596
700-0.3	52.932	13.672	11.842	4.692	3.999	2.949	1.209	0.952	2.281	0.182	0.127	0.103	5.062

从表中可以看出, MSW 灰渣中主要氧化物为 SiO<sub>2</sub>、CaO 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。由于本文选取的高灰分 MSW 在气化前未经筛分, 故灰渣中 SiO<sub>2</sub> 占比较高, 达 49.794%~52.932%。CaO 主要为 CaCO<sub>3</sub> 的受热分解产物。此外, 灰渣中存在大量的金属氧化物, 主要来自塑料垃圾的金属涂层和其他金属垃圾。600-0 工况下灰渣中氧化物的氧均来自 MSW 内部, 600-0.3 和 700-0.3 工况下灰渣中氧化物的氧一部分来自 MSW 内部, 另一部分则来自实验过程中通入的 O<sub>2</sub>。

本文测试了 3 个优选工况下灰渣的 T<sub>DT</sub>、T<sub>ST</sub>、

T<sub>HT</sub> 和 T<sub>FT</sub>。各组灰渣样品变化如图 9~11 所示, 特征温度汇总见表 5。

从图 9~11 的灰渣熔融状态变化和表 5 的灰熔点数据可以看出, 当温度低于 1 150 °C 时, MSW 灰渣变化不大, 当温度超过 T<sub>DT</sub> 后, 随着温度的升高, 灰渣体积迅速收缩, 出现熔融现象; 温度超过 1 200 °C 后, 灰渣熔体流动性增强, 开始向四周铺展, 当温度进一步升高至 T<sub>FT</sub> 左右时, 灰渣发生低温共融, 出现大量液相共融物; 温度超过 1 400 °C 后灰渣完全熔融, 熔融灰呈透明状流动并向外铺展。从表 5 中可以看出, MSW 灰渣熔融特

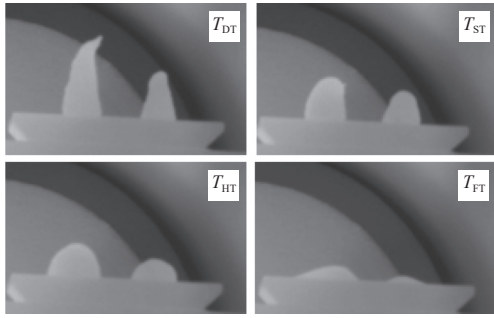


图 9 600-0 工况下灰渣熔融过程  
Fig. 9 Ash melting process under 600-0 gasification conditions

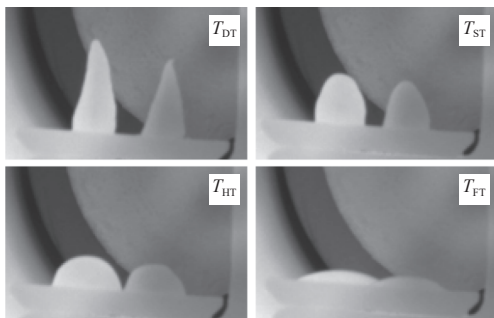


图 10 600-0.3 工况下灰渣熔融过程  
Fig. 10 Ash melting process under 600-0.3 gasification conditions

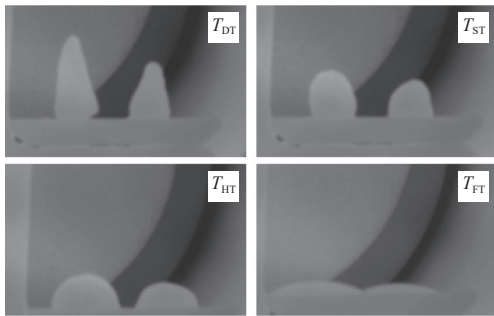


图 11 700-0.3 工况下灰渣熔融过程  
Fig. 11 Ash melting process under 700-0.3 gasification conditions

表 5 不同气化条件下的灰熔点  
Table 5 Ash melting point under different gasification conditions

参数	600-0	600-0.3	700-0.3
$T_{DT}$	1 154	1 162	1 164
$T_{ST}$	1 174	1 184	1 184
$T_{HT}$	1 198	1 220	1 230
$T_{FT}$	1 252	1 374	1 392

性与反应温度关系不大,但随着气化过程中 ER 的提高,灰渣的  $T_{HT}$  和  $T_{FT}$  呈现上升趋势。这是由于

随着 ER 的提高,易熔融的含钠硅铝酸盐含量降低,灰渣熔点也随之提高<sup>[25]</sup>。此外,在热解工况下,残渣中还有少量残炭(分析测试优选工况残渣的碳灼减率为 3% 左右),促进了熔点较低的矿物质生成,这些矿物质进一步与其他高熔点矿物质形成低温共融体,降低了灰熔融温度。

从酸性氧化物的组成来看,相对于  $Al_2O_3$ ,残渣中  $SiO_2$  占比较高,使各个工况下的硅比和硅铝比均处于较高水平。 $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  能够形成骨架结构提高灰熔点。然而与燃煤灰渣相比(熔点约为 1 500 °C),MSW 气化灰渣灰熔点较低。这是由于残渣中作为影响结渣特性第一主成分的碱金属会与  $SiO_2$  和  $Al_2O_3$  发生共融反应,进而降低熔点。具体地说,碱金属起助熔作用的原因是  $SiO_2$  容易与碱金属和碱土金属氧化物生成低熔点矿物质和无定型结构、无固定熔点的玻璃体物质,此类物质会随温度升高而软化,最终完全变为熔融态;此外, $SiO_2$  在灰中部分以矿物晶体的形式存在,如石英、方石英等,但其余是以非晶体的形态存在。 $SiO_2$  是网络形成体氧化物,其含量较高时,无多余碱金属氧化物与其相结合,多余的  $SiO_2$  呈游离态会提高灰熔点。总体来看,以  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  为主的残渣受其他碱金属的低温共融作用,呈现出较低的软化温度(约为 1 180 °C),使残渣出现较易结渣的倾向。

依据表 2 对 MSW 气化灰渣中氧化物的分析结果和 1.4.5 节中所述的 MSW 结渣特性分析方法,对能够揭示前文所述 3 种灰渣结渣特性的代表性参数(包括软化温度  $T_{ST}$ 、酸碱比  $B/A_1$ 、硅铝比  $S/A_2$ 、硅比  $G$ 、铁钙比  $F/C$ 、灰成分综合指数  $R_{ul}$ 、成灰综合指数  $R$  和生物质结渣综合指数  $A_3$ )进行了分析,结果见表 6。

从表 6 可以看出,在多种评估模式下,MSW 气化灰渣在多工况下均表现出严重的结渣倾向。这是由于 MSW 灰渣中含有大量的金属及非金属氧化物,这些物质既是灰渣的主要组成部分,也会对 MSW 的结渣特性产生重要影响。具体来说,MSW 灰渣中 Fe 和 K 的含量较高,其与灰渣中的硅酸盐等成分发生反应形成稳定的硅酸盐化合物,会促进灰渣的结晶和固化。 $R_{ul}$  在 ER 从 0 升高至 0.3 时明显升高,这主要是由于 ER 的升高促进了  $Na_2O$  的形成。此外, $Fe_2O_3$  和  $K_2O$  等碱性氧化物具有较低的离子势,可以通过抑制灰渣中多聚物的形成进而降低灰熔点<sup>[26]</sup>。故灰渣中大量存

表 6 不同气化条件下灰渣结渣程度分析

Table 6 Analysis of the degree of ash slagging under different gasification conditions

气化条件	$T_{ST}/^{\circ}\text{C}$	$B/A_1$	$S/A_2$	$G$	$F/C$	$R_{ul}$	$R$	$A_3$
600-0	1 174	0.453	4.144	68.265	0.363	0.407	3.125	1.345
600-0.3	1 184	0.476	4.170	69.110	0.350	1.643	3.121	1.403
700-0.3	1 164	0.418	4.470	71.290	0.343	0.954	3.092	1.425

在的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{K}_2\text{O}$  会导致 MSW 灰渣严重的结渣倾向,而在垃圾粉碎过程中适量添加  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  可以有效改善灰渣的硅比和硅铝比,进而改善灰渣的结渣倾向,但需要注意这类添加剂本身也是灰渣的组成部分;此外,MSW 灰渣中存在大量碱金属氧化物,易与  $\text{SiO}_2$  形成共熔物,导致灰渣软化温度降低,进而加剧结渣倾向,故在实际生产操作中需要控制此类添加剂的投入总量。

### 3 总 结

本文通过研究北京华宇辉煌科技股份有限公司提供的高灰分 MSW 的气化特征和灰渣特性,得到如下结论。

(1) 在高灰分 MSW 的气化过程中,气化温度占据主要作用。气化温度的提高能够促进 MSW 气化焦油的裂解,生成  $\text{H}_2$ 、轻质烃类和其他可燃气体,进而提高气化气的热值。

(2) 气化温度和 ER 的提高能够促进 MSW 气化焦油的氧化和裂解,进而促进气化焦油向气化气的转化,提高气化气总产量,但 ER 过高会导致气化气中含碳物质的氧化和焦油的完全氧化,降低气化气的低位热值。

(3) 高灰分 MSW 的气化灰渣主要以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主,气化过程中 ER 的升高能够提高灰渣的半球温度和流动温度。

(4) 灰渣中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  和其他碱性金属氧化物含量较高,易与  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  形成低温共熔体,降低灰熔点;此外,碱性金属氧化物本身较低的离子势会抑制灰渣中多聚物的形成,加剧灰渣结渣倾向。

#### 参考文献 (References) :

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.  
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.

[2] 常可可. 西藏高原村镇垃圾热解气化机理及多环芳烃释放规律研究 [D]. 拉萨: 西藏大学, 2023: 6-7.

CHANG Keke. Study on pyrolysis and gasification mechanism and release rule of PAHs of rural solid wastes in Tibetan Plateau[D]. Lhasa: Tibet University, 2023: 6-7.

[3] DU Yufeng, JU Tongyao, MENG Yuan, et al. A review on municipal solid waste pyrolysis of different composition for gas production[J]. *Fuel Processing Technology*, 2021, 224: 107026.

[4] 洪千惠. 生活垃圾灰渣流动性及重金属浸出毒性研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2023: 1-2.  
HONG Qianhui. Study on flow characteristics and heavy metal leaching toxicity of municipal solid waste ash slag[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2023: 1-2.

[5] ARENA U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review[J]. *Waste Management*, 2012, 32(4): 625-639.

[6] 马亮. 煤与垃圾衍生燃料的流化床两步法气化工艺的模拟研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2021: 5-6.  
MA Liang. Simulation study on the fluidized bed two-step gasification process of coal and refuse derived fuels[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021: 5-6.

[7] YOU Siming, OK Y S, TSANG D C W, et al. Towards practical application of gasification: A critical review from syngas and biochar perspectives[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018, 48( 22-24) : 1165-1213.

[8] QI Jingwei, WANG Yijie, XU Pengcheng, et al. Study on the co-gasification characteristics of biomass and municipal solid waste based on machine learning[J]. *Energy*, 2024, 290: 130178.

[9] LIN Chuanjin, ZHANG Jing, ZHAO Peitao, et al. Gasification of real MSW-derived hydrochar under various atmosphere and temperature[J]. *Thermochemica Acta*, 2020, 683: 178470.

[10] CHEN Guanyi, ALI JAMRO I, SAMO S R, et al. Hydrogen-rich syngas production from municipal solid waste gasification through the application of central composite design: An optimization study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(58): 33260-33273.

[11] SAKURAI Y, SUGIMURA E, ITO T, et al. Product characteristics and heat of reaction of municipal solid waste in pyrolysis and gasification at low temperatures[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2024, 26( 3) : 1418-1431.

- [12] GU Qinyang, WU Wei, JIN Baosheng, et al. Analyses for synthesis gas from municipal solid waste gasification under medium temperatures[J]. *Processes*, 2020, 8(1): 84.
- [13] CAI Jianjun, ZENG Ronghua, ZHENG Wenheng, et al. Synergistic effects of co-gasification of municipal solid waste and biomass in fixed-bed gasifier[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 148: 1-12.
- [14] ZHENG Xiaoyuan, CHEN Chong, YING Zhi, et al. Experimental study on gasification performance of bamboo and PE from municipal solid waste in a bench-scale fixed bed reactor[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 117: 393-399.
- [15] VAN DYK J C. Understanding the influence of acidic components (Si, Al, and Ti) on ash flow temperature of South African coal sources[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(3): 280-286.
- [16] WEI Bo, WANG Xuebin, TAN Houzhang, et al. Effect of silicon-aluminum additives on ash fusion and ash mineral conversion of Xinjiang high-sodium coal[J]. *Fuel*, 2016, 181: 1224-1229.
- [17] WANG Jiajian, GUO Qinghua, WEI Juntao, et al. Understanding the influence of iron on fluidity and crystallization characteristics of synthetic coal slags[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 209: 106532.
- [18] 洪千惠, 刘霞, 吴昊, 等. 城市生活垃圾灰渣的熔融和黏温特性研究 [J]. *燃料化学学报(中英文)*, 2023, 51(3): 405-414.  
HONG Qianhui, LIU Xia, WU Hao, et al. Study on fusibility and viscosity-temperature characteristics of municipal solid waste ash[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2023, 51(3): 405-414.
- [19] ALI JAMRO I, CHEN Guanyi, BALOCH H A, et al. Optimization of municipal solid waste air gasification for higher H<sub>2</sub> production along with the validation *via* kinetics and statistical approaches[J]. *Fuel*, 2022, 322: 124137.
- [20] WANG Bingwen, ALBARRACÍN SUAZO S, PAGÁN TORRES Y, et al. Advances in methane conversion processes[J]. *Catalysis Today*, 2017, 285: 147-158.
- [21] NÁSNER A M L, LORA E E S, PALACIO J C E, et al. Refuse derived fuel (RDF) production and gasification in a pilot plant integrated with an Otto cycle ICE through Aspen plus™ modelling: Thermodynamic and economic viability[J]. *Waste Management*, 2017, 69: 187-201.
- [22] COUTO N D, SILVA V B, ROUBOA A. Thermodynamic evaluation of portuguese municipal solid waste gasification[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139: 622-635.
- [23] COUTO N, SILVA V, CARDOSO J, et al. 2nd law analysis of Portuguese municipal solid waste gasification using CO<sub>2</sub>/air mixtures[J]. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2017, 20: 347-356.
- [24] CHAN WEI PING, AL MUNAWARAH BINTE YUSOFF S, VEKSHA A, et al. Analytical assessment of tar generated during gasification of municipal solid waste: Distribution of GC-MS detectable tar compounds, undetectable tar residues and inorganic impurities[J]. *Fuel*, 2020, 268: 117348.
- [25] CHEN Xiaodong, KONG Lingxue, BAI Jin, et al. Study on fusibility of coal ash rich in sodium and sulfur by synthetic ash under different atmospheres[J]. *Fuel*, 2017, 202: 175-183.
- [26] LI Fenghai, HUANG Jiejie, FANG Yitian, et al. The effects of leaching and floatation on the ash fusion temperatures of three selected lignites[J]. *Fuel*, 2011, 90(7): 2377-2383.