

赤铁矿磁化焙烧过程中生物质热解气化特性研究

晋国杰, 孙永升, 曹越

东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD951.1; TD925.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2023)03-0067-08
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2023.03.007

摘要 磁化焙烧工艺是处理复杂难选铁矿石有效的途径之一,但其生产过程中需要能源和还原剂,而生物质作为一种清洁能源,可热解出CO、CO₂、CH₄和H₂,其中的CO、CH₄和H₂可在铁矿石磁化焙烧的过程中作为还原剂使用,实现清洁生产。以玉米秸秆和赤铁矿为原料,研究了在磁化焙烧过程中秸秆型生物质的热解气化特性。利用气体成分分析仪和TG-FTIR,分析了不同条件下秸秆的裂解产物。气体成分分析结果表明,在焙烧温度700℃、N₂流量300 mL/min和秸秆与赤铁矿质量配比1:3的磁化焙烧条件下,CO_x的生成量达到了最大,为277.45 mL,此时秸秆热解效果最佳。TG-FTIR分析结果表明,赤铁矿的存在未改变秸秆热解产物的种类,但改变了产物的释放特性和生成量;在800℃以上的磁化焙烧过程中,DTG曲线出现了第二个失重峰,说明磁化焙烧过程中秸秆热解的反应速率大大加快。

关键词 赤铁矿;玉米秸秆;磁化焙烧;热解气化;TG-FTIR;气体成分分析仪

我国的铁矿储量丰富,但复杂难选铁矿资源所占比例高^[1],而磁化焙烧技术可解决大量难选铁矿石的资源化利用问题^[2-3]。磁化焙烧生产过程中需要能源和还原剂,目前常用的能源和还原剂主要来源于非再生化石燃料,导致焙烧过程中排放大量温室气体CO₂且易造成环境污染。因此采用清洁的还原气体作为难选铁矿焙烧的还原剂,能够有效减少磁化焙烧过程中的碳排放。生物质是继煤炭、石油和天然气之后的第四大能源,占能源总消费量的14%^[4],在“双碳”背景下,生物质作为一种低污染、可再生的碳中性资源,可有效改善我国的能源结构。作为一个农业大国,我国每年农作物秸秆总量约占生物质资源的50%,但超过半数的秸秆被直接焚烧处理,造成严重的环境污染和资源浪费^[5-6]。秸秆的主要组成元素为C、H、O、N,由纤维素、木质素、半纤维素等有机物组成,具有挥发分含量高、炭活性高的特点,易热解气化为CO₂、CO、CH₄和H₂^[7]。因此利用秸秆产生的CO和H₂作为难选铁矿磁化焙烧过程中的还原剂不仅能促进环境保护,避免秸秆直接焚烧造成的环境污染;还可以大大优化我国能源结构,减轻铁矿资源进口压力。

汪永斌^[8]、黄冬波^[9]和张士元等^[10]以锯末作为还原剂分别开展了褐铁矿和赤铁矿磁化焙烧试验研究,

获得了良好的分选指标;Rath等^[11-13]采用牛粪、坚果壳、椰子壳、干椰叶作为还原剂以焙烧温度650~750℃、还原剂用量15%、还原时间30~45min,得到了铁品位65%的精矿。上述研究结果表明,采用生物质进行铁矿石磁化焙烧是可行的,然而,目前尚处于起步探索阶段,对磁化焙烧过程中生物质的热解气化特性规律尚未开展深入研究,而研究生物质在磁化焙烧系统中的受热分解行为及影响因素,揭示秸秆悬浮焙烧过程中分解反应机理,调控其分解为还原性气体是实现铁矿物磁化还原的前提。因此本研究采用TG-FTIR和实时在线气体成分分析技术对磁化焙烧过程中秸秆的产物析出过程及产物组成进行了研究,以便深入了解磁化焙烧过程中的秸秆热解特性及热解规律。

1 试验原料和方法

1.1 试验原料

试验所使用的赤铁矿取自巴西,经破碎:磨矿至-0.074 mm含量占70%作为试验原料样品。赤铁矿样品的X射线衍射结果如图1所示、化学成分如表1、铁物相分析结果见表2,可见赤铁矿的全铁品位为67.34%,其中还含有少量的SiO₂、Al₂O₃、MgO,铁主要

收稿日期:2023-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52022019)

作者简介:晋国杰(1998-),男,硕士,主要从事难选铁矿石的高效利用。

通信作者:孙永升(1986-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事难选矿产资源清洁高效利用研究。

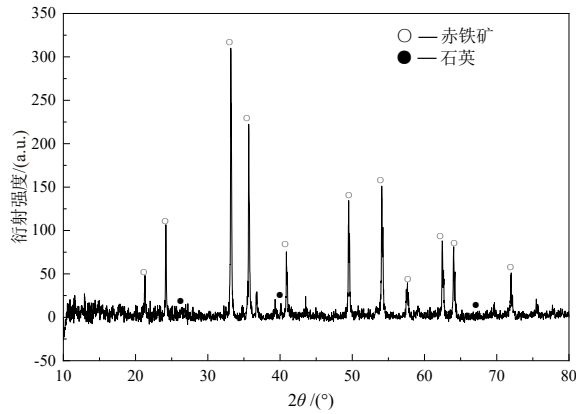


图 1 赤铁矿 XRD 分析图谱
Fig. 1 XRD pattern of the hematite

表 1 赤铁矿化学成分分析结果

Table 1 Chemical composition analysis results of the samples

成分	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn	TiO ₂	S	P
含量/%	67.34	0.88	0.80	0.38	0.05	0.24	0.13	0.047	<0.01	0.04

表 2 赤铁矿铁物相分析结果

Table 2 Iron phase analysis results of the samples

铁物相	磁性铁 中铁	碳酸铁 中铁	赤铁矿 中铁	硫化铁 中铁	硅酸铁 中铁	全铁
含量/%	1.80	0.06	64.93	0.08	0.67	67.54
分布率/%	2.67	0.08	96.13	0.12	0.09	100.00

以赤铁矿形式存在, 赤铁矿中铁的分布率为 96.13%。

试验所用的玉米秸秆取自辽宁朝阳, 烘干后通过粉碎机粉碎至-1 mm 样品作为生物质样品。秸秆样品元素分析、成分分析和组分分析结果见表 3、表 4 和表 5。由表 3 可知, 秸秆型生物质的挥发分含量为 77.52%, 而固定碳含量为 15.54%; 由表 4 可知, 秸秆型生物质含量最多的三种元素为 C、H、O, 另外还有少量的 N、P、S 等元素; 由表 5 可知, 秸秆型生物质主要

由纤维素、半纤维素和木质素构成, 其中纤维素含量最高, 达到了 40.91%, 半纤维素为 28.57%, 木质素为 5.48%, 同时秸秆型生物质中其余抽提物达到了 24.92%。

表 3 秸秆成分分析结果

Table 3 Results of industrial analysis of straw

水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%	热值/(kJ·g ⁻¹)
5.57	1.37	77.52	15.54	16.84

表 4 秸秆元素分析结果

Table 4 Results of elemental analysis of straw

元素	C	H	O	N	P	S
含量/%	41.82	5.60	48.6	1.25	0.034	0.07

表 5 秸秆组分分析结果

Table 5 Results of composition analysis of straw

组分	纤维素	半纤维素	木质素	其他
含量/%	40.91	28.57	5.48	24.92

1.2 试验方法

1.2.1 秸秆裂解气体分析

秸秆热解试验在自制的焙烧系统(如图 2 所示)中进行。试验过程为: 称取一定量的秸秆和赤铁矿样品, 混合均匀后置于石英管中, 在 300 mL/min 流量下通入 N₂ 排出管内空气; 将炉温升至设定温度后, 将石英管放入炉内进行热解试验, 热解过程中不断通入一定流量的 N₂; 利用气体成分分析仪分析挥发物中 CO、CO₂、CH₄ 和 H₂ 的含量。试验结束后通过气体组分含量和气体生成量来表征秸秆的热解效果, 其中气体生成量由试验过程中检测到的气体量求和所得, 计算公式为:

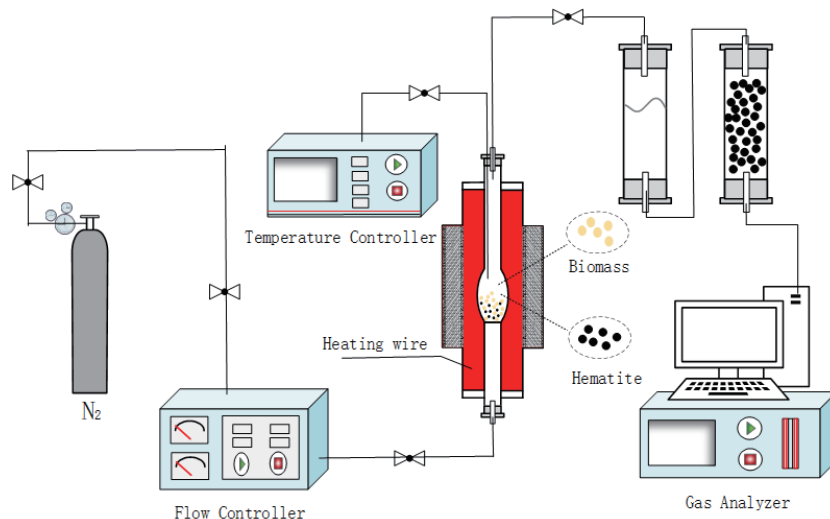


图 2 磁化焙烧热解系统
Fig. 2 Magnetization roasting and pyrolysis system

$$V_{(\text{CO})} = \sum_0^t Q_{t(\text{CO})} \cdot t = \sum_0^t \frac{Q_{(\text{N}_2)} \cdot t}{1 - X_{t(\text{CO})} - X_{t(\text{CO}_2)} - X_{t(\text{CH}_4)} - X_{t(\text{H}_2)}} \cdot X_{t(\text{CO})} \quad (1)$$

$$V_{(\text{CO}_2)} = \sum_0^t Q_{t(\text{CO}_2)} \cdot t = \sum_0^t \frac{Q_{(\text{N}_2)} \cdot t}{1 - X_{t(\text{CO})} - X_{t(\text{CO}_2)} - X_{t(\text{CH}_4)} - X_{t(\text{H}_2)}} \cdot X_{t(\text{CO}_2)} \quad (2)$$

$$V_{(\text{CH}_4)} = \sum_0^t Q_{t(\text{CH}_4)} \cdot t = \sum_0^t \frac{Q_{(\text{N}_2)} \cdot t}{1 - X_{t(\text{CO})} - X_{t(\text{CO}_2)} - X_{t(\text{CH}_4)} - X_{t(\text{H}_2)}} \cdot X_{t(\text{CH}_4)} \quad (3)$$

$$V_{(\text{H}_2)} = \sum_0^t Q_{t(\text{H}_2)} \cdot t = \sum_0^t \frac{Q_{(\text{N}_2)} \cdot t}{1 - X_{t(\text{CO})} - X_{t(\text{CO}_2)} - X_{t(\text{CH}_4)} - X_{t(\text{H}_2)}} \cdot X_{t(\text{H}_2)} \quad (4)$$

式中: $V_{(\text{CO})}$ 为系统内产生的 CO 总体积, mL; $V_{(\text{CO}_2)}$ 为系统内产生的 CO_2 总体积, mL; $V_{(\text{CH}_4)}$ 为系统内产生的 CH_4 总体积, mL; $V_{(\text{H}_2)}$ 为系统内产生的 H_2 总体积, mL, $Q_{t(\text{CO})}$ 为 t 时刻 CO 流速, mL/min; $Q_{t(\text{CO}_2)}$ 为 t 时刻 CO_2 流速, mL/min; $Q_{t(\text{CH}_4)}$ 为 t 时刻 CH_4 流速, mL/min; $Q_{t(\text{H}_2)}$ 为 t 时刻 H_2 流速, mL/min, $X_{t(\text{CO})}$ 为 t 时刻 CO 含量, %; $X_{t(\text{CO}_2)}$ 为 t 时刻 CO_2 含量, %; $X_{t(\text{CH}_4)}$ 为 t 时刻 CH_4 含量, %; $X_{t(\text{H}_2)}$ 为 t 时刻 H_2 含量, %, Q_{N_2} 为 N_2 流量, mL/

min。

1.2.2 TG-FTIR 分析

通过同步热分析仪和红外光谱仪联用对秸秆热解气化特性进行分析。称取一定量秸秆和赤铁矿样品放入坩锅中, 在 N_2 流速 35 mL/min、扫描温度范围 40~900 °C、升温速率 15 °C/min 的条件下进行试验。热解过程中产生的气体产物进入到红外光谱仪进行在线检测, 红外光谱波数范围为 400~4 000 cm^{-1} 。

2 试验结果

2.1 秸秆热解的气相组成分析

2.1.1 赤铁矿用量的影响

在焙烧温度 700 °C、秸秆用量 2 g 和 N_2 流量 300 mL/min 的条件下, 秸秆与赤铁矿质量对比对秸秆主要热解气组分(CO、 CO_2 、 CH_4 、 H_2)的气体含量和生成量的影响如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可知, 赤铁矿用量对气体产物的热解气化特性有着明显的影响。气体产物的含量曲线呈现为单峰形状, 随着反应的进行气体含量均先增大后减小。随着赤铁矿用量的增加, CO 和 CO_2 达到最大峰值所需的时间逐渐变短, CO_2 峰值出现时间由 145 s 提前至了 110 s, CO 的

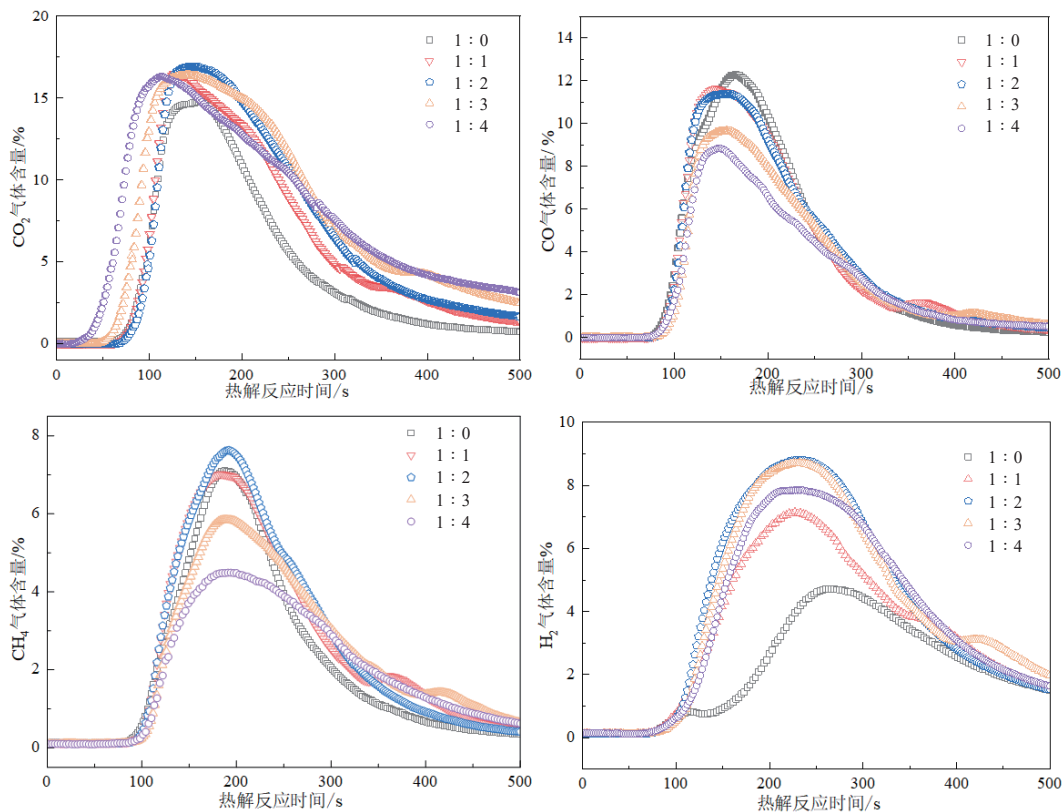


图 3 赤铁矿用量对气体含量的影响
Fig. 3 Effect of hematite dosage on gas phase component release rate fraction

峰值出现时间由 165 s 提前至了 148 s。这是由于羧基 (-COOH) 和羰基 (C=O) 的断裂重整是产生 CO 和 CO₂ 的主要来源, 赤铁矿促进了羰基和羧基的断裂重整导致的。同时可以看出 CO₂ 和 CO 的生成量随着赤铁矿用量的增加表现出较大的差异, CO₂ 的生成量随着赤铁矿用量的增加而迅速增加, 在秸秆铁矿质量配比达到 1 : 4 时, 生成量达到最大 271.6 mL, 明显高于秸秆单独热解; CO 的气体生成量呈现出了先缓缓上升后快速下降的趋势, 这是由于热解生成的 CO 与赤铁矿生成磁铁矿和 CO₂。随着赤铁矿用量的增加, CH₄ 的生成量虽有所提高, 但气体含量峰值反而有所下降, 这是由于: 一方面 CH₄ 的生成主要来自含有甲氧基的木质素, Fe₂O₃ 的加入使得甲氧基的反应变得更加剧烈^[4], 另一方面 CH₄ 作为还原气, 将 Fe₂O₃ 还原, 从而导致了气体含量峰值的降低。H₂ 的气体含量峰值和气体生成量也都随着赤铁矿的增加有着大幅提高, 达到峰值的时间也大幅提前。而 H₂ 的产生主要来自于秸秆羟基 (-OH) 的断裂和热缩聚阶段的芳香重构化反应^[5], 说明赤铁矿可有效促进秸秆的小分子键断裂和缩聚成环反应。

根据前文所述, 赤铁矿促进秸秆中化学键的断裂生成了小分子含氧化合物, 因此采用含氧化合物 CO_x (CO+CO₂) 的产量代表磁化焙烧系统中秸秆热解

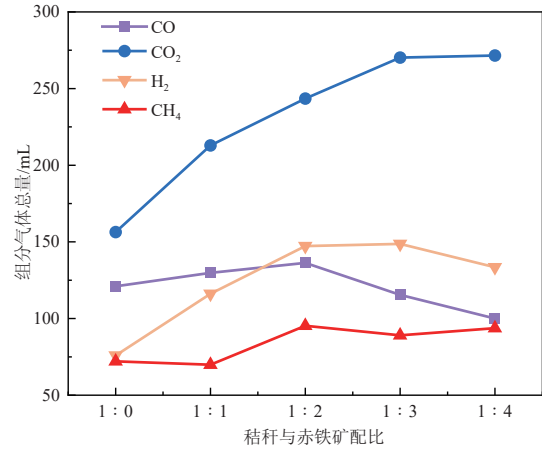


图4 赤铁矿用量对气体生成量的影响
Fig. 4 Effect of hematite dosage on output of gas products

效果。在秸秆赤铁矿配比为 1 : 3 时, 此时 CO_x 产量最大为 371.56 ml, 相较秸秆单独裂解的 277.45 mL, CO_x 的产量提升了约 34%。

2.1.2 焙烧温度的影响

对比秸秆赤铁矿质量配比为 1 : 3 的磁化焙烧过程中秸秆热解气组分的变化情况与秸秆单独热解的热解气组分的变化情况, 考察焙烧温度对秸秆热解气 (CO、CO₂、CH₄、H₂) 的影响, 结果如图 5~图 7 所示。由图 5 和图 6 可知随着焙烧温度的提高, 磁化焙烧过

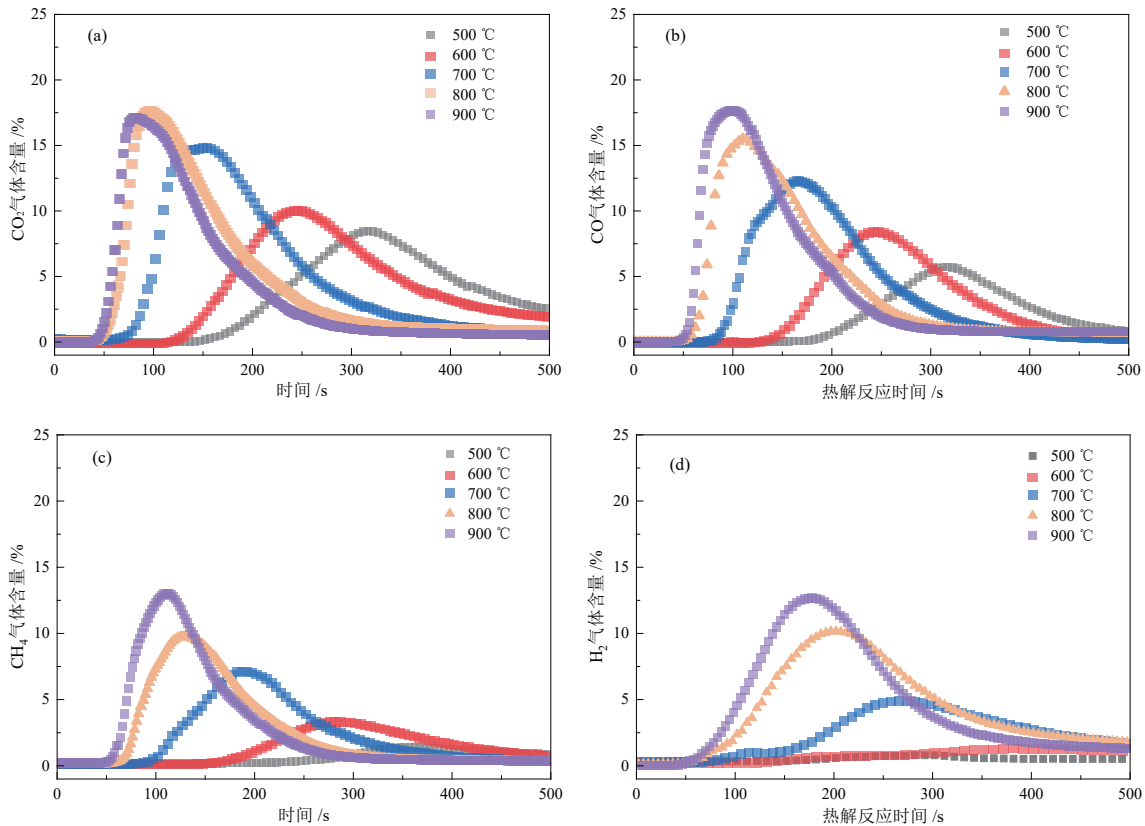


图5 温度对气体含量的影响
Fig. 5 Effect of temperature on gas content in separate pyrolysis system

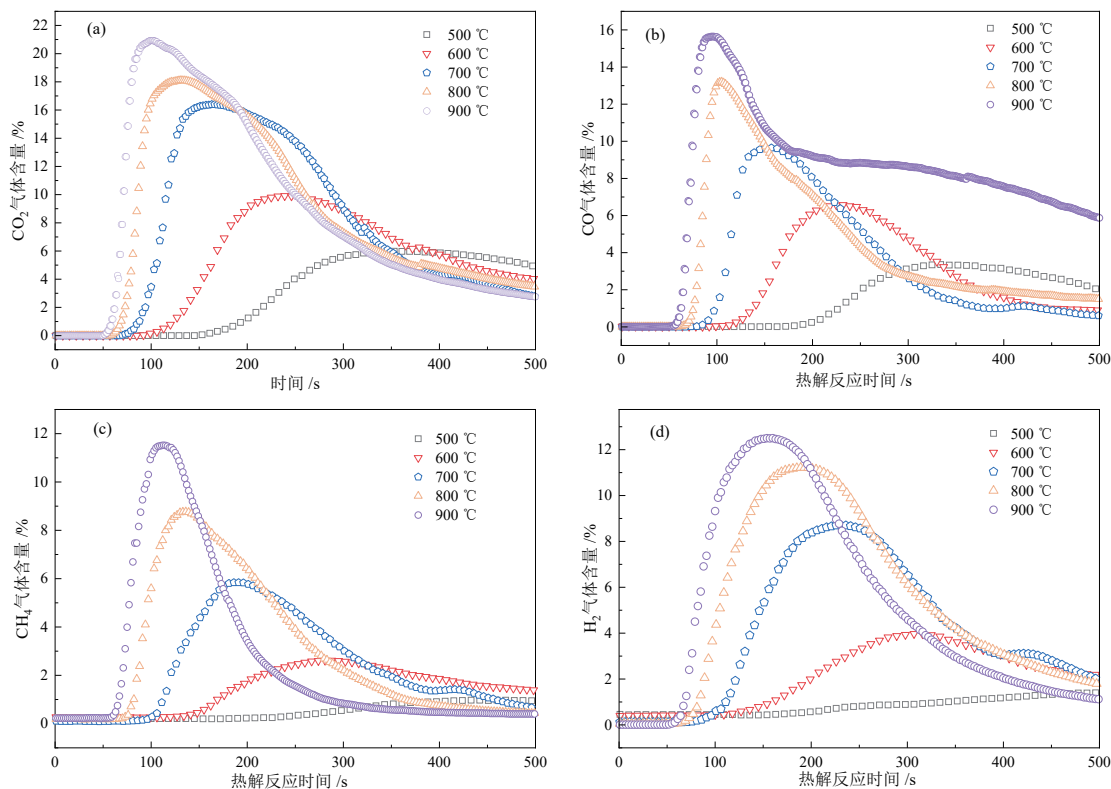


图 6 磁化焙烧过程中温度对气体含量的影响
Fig. 6 Effect of temperature on gas content in magnetized roasting system

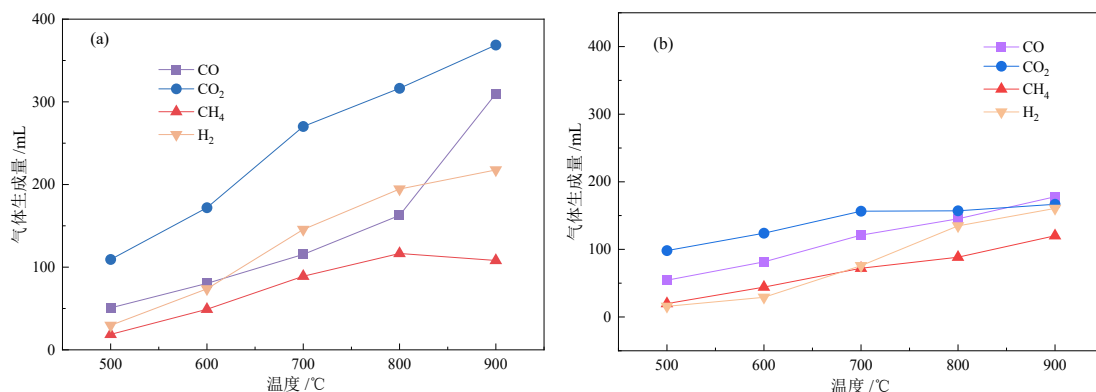


图 7 温度对气体生成量的影响(a 为磁化焙烧过程, b 为秸秆热解)
Fig. 7 Effect of temperature on gas production in different systems

程中的气体含量变化与秸秆单独热解的气体含量变化呈现出相同的变化趋势。温度的升高使得各种气体峰值提高, 峰值出现的时间提前。但不同的是, 首先, 磁化焙烧过程中的气体含量变化更加明显, 各个温度区间的变化幅度更大; 其次, 相较于秸秆单独裂解, 各温度下磁化焙烧过程中的气体含量的峰值更高, 峰值出现时间更快。同时, 随着温度升高, 气体含量曲线呈现了一定的不连续性, 尤其是在磁化焙烧过程中, 这种不连续性愈发明显, 这可能是因为秸秆中纤维素和木质素同时分解导致的, 而赤铁矿的加入加剧了两种物质的分解。

由图 7 可知, 在 500~900 °C 的温度范围内, 秸秆热解气体生成量均随温度的升高而呈单调递增的趋

势。与秸秆单独热解相比, 磁化焙烧过程中秸秆的气体生成量在各个温度下都迅速增加, 700 °C 以后两者差距愈发拉大。这是因为高温使得多环芳烃化学键断裂, 生成小分子有机物, 小分子有机物进一步反应生成气体, 从而使得热解气生成量增多。而在超过 700 °C 的高温条件下, 赤铁矿易产生过还原的状况, 同时赤铁矿和秸秆的混合物易出现烧结现象。因此综合考虑确定了最佳焙烧温度为 700 °C。

2.1.3 氮气流量的影响

在焙烧温度 700 °C、秸秆、赤铁矿用量配比 1 : 3 的条件下, 改变 N₂ 流量, 考察 N₂ 流量对气体产物生成量的影响。从图 8 可以看出, N₂ 流量越大, CO₂、CH₄ 和 H₂ 的生成量越低, 是因为 N₂ 流量越大, 挥发分在焙

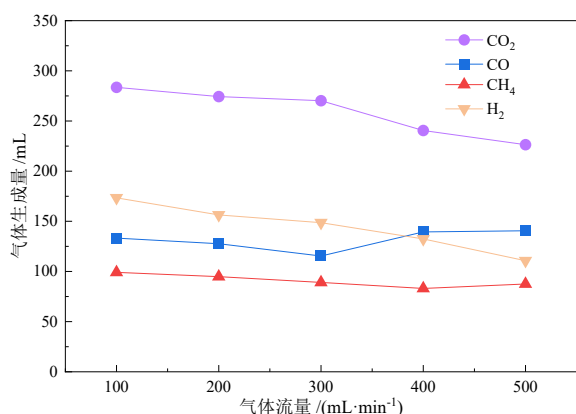


图 8 N₂ 流量对气体生成量的影响
Fig. 8 Effect of N₂ flow rate on gas production

烧系统内停留时间越短, 导致无法充分二次裂解生成小分子物质, 从而造成气体产物生成量的减少。而 CO 在 300 mL/min 的 N₂ 流速后, 反而检测出的生成量有所上涨, 是因为随着 N₂ 流速的增大, CO 在焙烧区内停留的时间过短, 没有充分与赤铁矿反应就被排出, 反而检测出的 CO 含量增高。

2.2 磁化焙烧过程中秸秆热裂解的 TG-FTIR 分析

2.2.1 TG-DTG 曲线分析

在升温速率 15 °C/min、秸秆与赤铁矿质量配比 1 : 3 和 N₂ 气氛的的试验条件下, 对秸秆热解进行热重分析。磁化焙烧过程中秸秆热解和秸秆单独热解的 TG 和 DTG 曲线如图 9 所示。由图 9 可知, 秸秆单独热解的过程中, 在 328 °C 出现唯一失重峰, 此时失重速率最大, 为 0.001 56%/min, 最终热解失重率为 87%, 这是由于秸秆水分和挥发分的析出导致的。而在磁化焙烧过程中, 最终热解失重率达到了 27%, 此时失重率较低是因为混合物中赤铁矿失重率较低导致的; 同时热重过程中出现了两个明显的失重峰, 分别出现在了 340 °C 和 860 °C 左右, 340 °C 时失重率达到了 15%, 这主要是由于秸秆热解导致的水分和挥发分析出, 失

重速率达到了 0.002 25%/min, 此时失重速率较秸秆单独热解大大提高; 在 860 °C 时的失重率达到 25%, 这是由于秸秆在磁化焙烧过程中发生了气化反应, 导致了混合物失重, 并且由于反应属于大部分挥发分析出后的残留物反应, 因此 860 °C 的失重速率为 0.000 468 %/min, 较 340 °C 时的失重速率较低。以上结果说明磁化焙烧过程中, 赤铁矿的存在加快了秸秆热解的反应速率, 这是由于磁化焙烧系统中, 赤铁矿促进了秸秆中纤维素、半纤维素和木质素等大分子的热解, 使得脱羟、脱羧和脱羰反应, 开环和解聚反应进行得更加剧烈, 并使得秸秆在高温下发生了气化反应。

2.2.2 秸秆热解的红外光谱分析

图 10 和图 11 分别为秸秆热解和磁化焙烧系统中秸秆热解产物的三维红外光谱图。通过三维光谱图中吸收带的波数位置及吸收峰强度, 可以了解几种重要的析出挥发分在整个热裂解过程中的析出规律, 测定析出产物中的官能团分布, 进而定性分析出产物的演变规律。由图 10 和图 11 分析可知, 在秸秆热裂解的主反应阶段, 可以清楚地看到 4 000 ~ 3 600 cm⁻¹ 波段对应的 O-H 伸缩振动峰最为明显, 这是由于水的析出。在 2 250 ~ 2 400 cm⁻¹、570 ~ 720 cm⁻¹ 处对应的 CO₂ 特征峰与 2 180 cm⁻¹、2 110 cm⁻¹ 处对应的 CO 特征峰表明该阶段有 CO₂ 和 CO 的生成, 在磁化焙烧过程中, CO₂ 与 CO 的特征峰强度明显高于秸秆单独热解的特征峰强度, 根据比尔-朗勃尔定律可知, 气体浓度可以由吸光度的强度表征, 因此可以得出, 磁化焙烧过程中, 秸秆热解出的 CO₂ 和 CO 的浓度明显增加, 与前文的同步气体成分分析仪所得出的结果一致。同时, 在 3 100 ~ 2 600 cm⁻¹、1 850 ~ 1 640 cm⁻¹、1 600 ~ 800 cm⁻¹ 等处出现了 C-H 伸缩振动、C=O 伸缩振动和 C-O、C-C 骨架的伸缩振动, 表明热解产物中有 CH₄、C₂H₆、C₂H₄ 等烃类气体和醇类、醛类和羧酸类等大分子物质。与秸秆热解相比, 磁化焙烧过程中秸秆热解的 FTIR 谱图展示出了相似的振动峰, 但振动峰

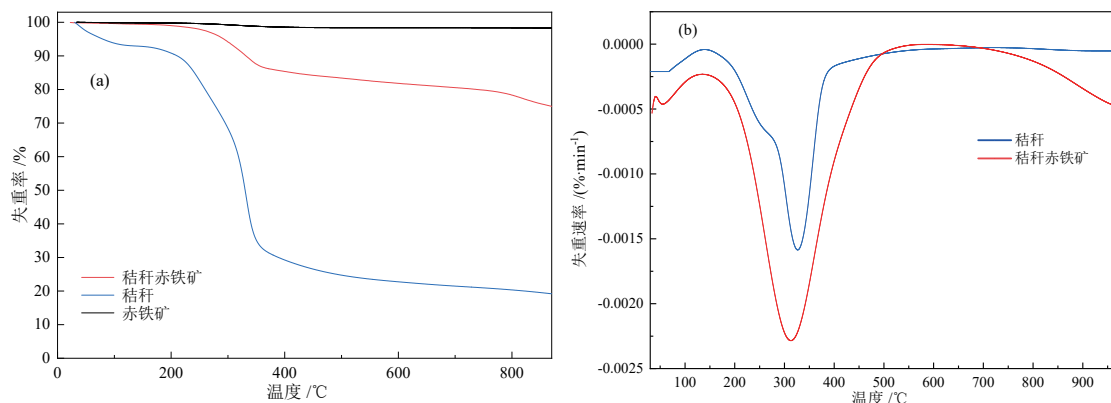


图 9 秸秆热解的 TG 和 DTG 曲线
Fig. 9 TG and DTG curves of straw pyrolysis

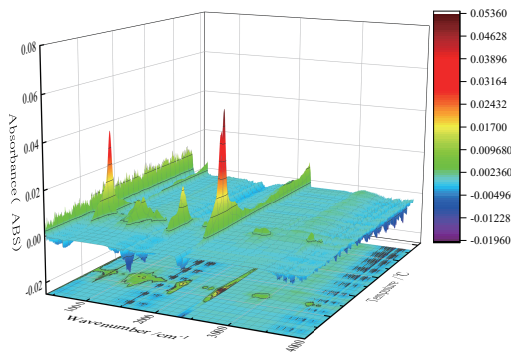


图 10 秸秆热解的三维红外光谱图
Fig. 10 FTIR spectra of straw pyrolysis under separate roasting system

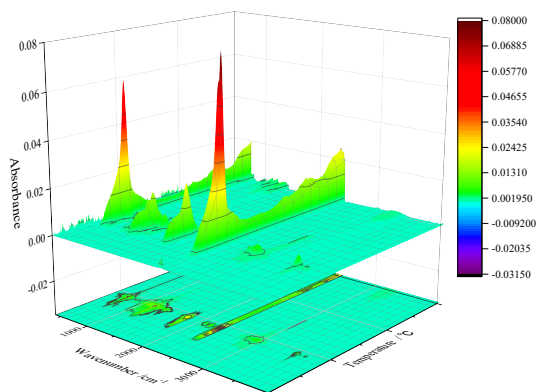


图 11 磁化焙烧系统中秸秆热解的三维红外光谱图
Fig. 11 FTIR spectra of straw pyrolysis under magnetization roasting system

的强度却有所变化,可以推断出赤铁矿对秸秆热解气体产物的种类影响不大,但对产物的释放特性和生成量却有着显著影响。

3 结论

(1)同步气体成分分析仪的试验结果表明,在焙烧温度 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、气体流量 300 mL/min 、秸秆与赤铁矿质量比为 $1:3$ 的情况下,秸秆热解气化的效果较好。该条件下相比于秸秆单独裂解,秸秆的热解气 CO_2 、 H_2 和 CH_4 的气体生成量大幅提升,气体含量峰值的出现时间也有显著提前,说明磁化焙烧过程中秸秆热解的反应速率得到了很大提高。

(2)TG-FTIR 分析结果表明,相比于秸秆单独热解,磁化焙烧过程中秸秆热解出现了两个失重峰,证明在高温磁化焙烧过程中的秸秆发生了气化反应;同时在磁化焙烧过程中,赤铁矿对秸秆热解气体产物的种类影响不大,但对产物的释放特性和生成量却有着显著影响,说明赤铁矿改变了秸秆的热解过程,加快了秸秆的反应速率。

参考文献:

[1] 韩跃新,孙永升,李艳军,等.我国铁矿选矿技术最新进展[J].金属

矿山,2015(2):1-11.

HAN Y X, SUN Y S, LI Y J, et al. Latest progress of mineral processing technology of iron ore[J]. Metal Mine, 2015(2): 1-11.

- [2] 孙永升,曹越,韩跃新,等.磁化焙烧冷却过程中磁铁矿氧化动力学[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(12):1759-1763.
SUN Y S, CAO Y, HAN Y X, et al. Oxidation kinetics of magnetite during magnetization roasting and cooling[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(12): 1759-1763.
- [3] 韩跃新,李艳军,高鹏,等.复杂难选铁矿石悬浮磁化焙烧-高效分选技术[J].钢铁研究学报,2019,31(2):89-94.
HAN Y X, LI Y J, GAO P, et al. Suspension magnetization roasting and high efficiency separation technology of complex refractory iron ore[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2): 89-94.
- [4] 张波,刘锐,张岩.合成气组分对生物质热解特性的影响研究[J].山西化工,2022,42(6):507-515.
ZHANG B, LIU R, ZHANG Y. Effect of syngas components on pyrolysis characteristics of biomass[J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(6): 507-515.
- [5] CAO Y, SUN Y S, GAO P, et al. Mechanism for suspension magnetization roasting of iron ore using straw-type biomass reductant[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31: 1075-1083.
- [6] 李保卫,李解,杨仲禹,等.玉米秸秆热解特性及动力学研究[J].太阳能学报,2017,38(12):3444-3449.
LI B W, LI X, YANG Z Y, et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of corn straw[J]. Acta Solar Energy Sinica, 2017, 38(12): 3444-3449.
- [7] 黄娜,高岱巍,李建伟,等.生物质三组分热解反应及动力学的比较[J].北京化工大学学报(自然科学版),2007(5):462-466.
HUANG N, GAO D W, LI J W, et al. Comparison of pyrolysis reaction and kinetics of three components of biomass[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2007(5): 462-466.
- [8] 汪永斌,朱国才,池汝安,等.生物质还原磁化褐铁矿的实验研究[J].过程工程学报,2009,9(3):508-513.
WANG Y B, ZHU G C, CHI R A, et al. Experimental study on magnetization of limonite by biomass reduction[J]. Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(3): 508-513.
- [9] 黄冬波,宗燕兵,邓振强,等.鲕状赤铁矿生物质低温磁化焙烧[J].工程科学学报,2015,37(10):1260-1267.
HUANG D B, ZONG Y B, DENG Z Q, et al. Low temperature magnetization roasting of oolitic hematite biomass[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2015, 37(10): 1260-1267.
- [10] 张士元,冯雅丽,李浩然.生物质磁化焙烧赤铁矿的研究[J].矿业工程,2016,14(4):31-33.
ZHANG S Y, FENG Y L, LI H R. Research on magnetized roasting of hematite by biomass[J]. Mining Engineering, 2016, 14(4): 31-33.
- [11] SWAGAT S. RATH, DANDA SRINIVAS RAO, ALOK TRIPATHY, et al. Biomass briquette as an alternative reductant for low grade iron ore resources[J]. Biomass and Bioenergy, 2018, 108.
- [12] SWAGAT S. RATH, DANDA S. RAO, BARADA K, et al. A novel approach for reduction roasting of iron ore slime using cow dung[J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 157.
- [13] SWAGAT S. RATH, DANDA, SRINIVAS, et al. Dolomite as a Reductant in the Reduction Roasting of Iron Ore Slimes[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Mate, 2017, 24(12): 1341-351.
- [14] ZHANG Y, SHIRO KAJITANI, MASAMI ASHIZAWA, et al. Tar

destruction and coke formation during rapid pyrolysis and gasification of biomass in a drop-tube furnace[J]. *Fuel*, 2010, 89: 302–309.

[15] ANTAL M J, FRIEDMAN H L, ROGERS F E. Kinetics of cellulose pyrolysis in nitrogen and steam[J]. *Combustion Science and Technology*, 1980, 21: 141–152.

Study on Characteristics of Biomass Pyrolysis Gasification During Magnetization Roasting of Hematite

JIN Guojie, SUN Yongsheng, CAO Yue

School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: The magnetization roasting process is one of the effective ways to treat complex and refractory iron ores. However, energy and reducing agents are required during its production process. As a clean energy source, biomass can be thermally decomposed to produce CO, CO₂, CH₄, and H₂, among which CO, CH₄, and H₂ can be used as reducing agents in the magnetization roasting process of iron ore, achieving clean production. Using corn straw and hematite as raw materials, the thermal decomposition and gasification characteristics of straw biomass were investigated during magnetization roasting. Gas composition analysis results showed that under the magnetization roasting conditions of 700 °C, N₂ flow rate of 300 mL/min, and straw-hematite mass ratio of 1 : 3, the maximum production of CO₂ reached 277.45 mL, indicating the optimal thermal decomposition effect of straw. TG-FTIR analysis results showed that hematite did not change the type of straw pyrolysis products, but altered the release characteristics and production of the products. In the magnetization roasting process above 800 °C, the DTG curve exhibited a second weight loss peak, indicating a significant increase in the reaction rate of straw thermal decomposition during magnetization roasting.

Keywords: hematite; corn straw; magnetization roasting; pyrolysis gasification; TG-FTIR; gas analyzer

引用格式: 晋国杰, 孙永升, 曹越. 赤铁矿磁化焙烧过程中生物质热解气化特性研究[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(3): 67–74.

JIN Guojie, SUN Yongsheng, CAO Yue. Study on characteristics of biomass pyrolysis gasification during magnetization roasting of hematite[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2023, 43(3): 67–74.

投稿网址: <http://kcbhly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



通信作者简介:

孙永升(1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 国家优秀青年科学基金获得者, 东北大学资源与土木工程学院矿物工程系主任, 辽宁省颗粒学会理事, 中国硅酸盐学会矿物材料分会青年理事, 《中南大学学报(英文版)》《International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials》《International Journal of Mining Science and Technology》等 SCI 期刊青年编委, 主要从事难选矿产资源清洁高效利用研究。