

烧结用生物质炭燃料制备及其性能研究

辛 闯, 唐 超, 何志军, 刘吉辉

(辽宁科技大学 a. 材料与冶金学院; b. 辽宁省绿色低碳与智能冶金重点实验室, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 为了探寻铁矿粉烧结用清洁型燃料,降低焦粉使用,本文利用两段炭化(即第一段炭化温度分别升至300、350、400℃保温30 min,第二段炭化温度升至600℃保温30 min)和一段炭化(直接升温至600℃,中间不保温)共4种工艺对木屑进行炭化,制备生物质炭。同时,分析了不同工艺下生物质炭的基础性能并且采用热重法对生物质炭-焦粉混合燃烧特性进行了试验研究。结果表明:与生物质相比,生物质炭具有较低的挥发分和较高的固定碳和热值,且结构更加致密,但是比焦粉的结构更疏松且多孔洞。一段炭化的生物质炭产率最高,产生热解气中的CO、CH₄、H₂含量最高,CO₂含量最低。4种炭化工艺中,采用一段炭化工艺生物质炭的着火点、燃尽温度、峰值温度最低,燃烧特性指数和平均失重速率最大,活化能最低,燃烧性最好。与焦粉相比,生物质炭-焦粉混合燃烧时具有更低的着火点、燃尽温度,燃烧性能更好。此外,生物质炭-焦粉混合燃烧时表现出两个主要阶段:低温区以生物质炭燃烧为主的“燃烧阶段I”,高温区以焦粉燃烧为主的“燃烧阶段II”。

关键词: 生物质炭; 炭化; 燃烧性能; 热解气; 烧结

中图分类号: TK6;TF54

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)05-0077-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.05.081

Research on preparation and performance of biochar fuel for sintering

XIN Chuang, TANG Chao, HE Zhijun, LIU Jihui

(University of Science and Technology Liaoning a. School of Materials and Metallurgy b. Key Laboratory of Green Low-Carbon and Intelligent Metallurgy, Anshan 114051, Liaoning, China)

Abstract: In order to explore the clean fuel for iron ore powder sintering and reduce the use of coke powder, four processes are used to carbonize wood chips and prepare biochar by two carbonization processes (i. e., the first carbonization temperature rises to 300, 350 and 400 °C for 30 min, respectively, and the second carbonization temperature rises to 600 °C for 30 min) and one carbonization (directly heating to 600 °C without insulation in the middle). At the same time, the basic properties of biochar under different processes are analyzed, and the mixed combustion characteristics of biochar and coke powder are experimentally studied by thermogravimetric method. The results show that, compared with biomass, biochar has lower volatile content and higher fixed carbon and calorific value, and the structure is denser, but the structure is looser and more porous than that of coke powder. The biochar yield of the carbonized stage is the highest, and the content of CO, CH₄ and H₂ in the pyrolysis gas is the highest, and the CO₂ content is the lowest. Among the four carbonization processes, the ignition point, burnout temperature and peak temperature of biomass charcoal using a carbonization process are the lowest, the combustion characteristic index and average weight loss rate are the largest, the activation energy is the lowest, and the flammability is the best. Compared with coke powder, biochar-coke powder has a lower ignition point, burnout temperature and better combustion performance when combusted by biochar-coke powder. In addition, there are two

收稿日期: 2025-04-28; **修回日期:** 2025-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374339&52474359); 中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202308)

作者简介: 辛 闯(2000—),男,硕士研究生,从事生物质燃料和生物质烧结研究。

通信作者: 何志军(1980—),男,博士,教授,从事低碳炼铁和资源化高效利用研究。

main stages in the mixed combustion of biochar and coke powder “combustion stage I” dominated by biochar combustion in the low temperature area, and “combustion stage II” with coke powder combustion in the high temperature area.

Key words: biochar; charring; combustion performance; pyrolysis gas; sinter

烧结为高能耗、重污染工艺，在钢铁企业中每年需要消耗大量煤炭能源，同时排放大量 NO_x 、 SO_2 和 CO_2 等污染物。数据统计表明，2024 年中国钢铁行业中烧结工序的焦炭消耗量约为 3.2 ~ 3.5 亿吨^[1-2]。因此，为实现“双碳”与可持续发展目标，存在大量碳消耗的烧结工序中寻求制备可替代的清洁新型燃料意义重大。

与煤炭等化石能源相比，生物质能具有“全球储量大、成本低、可再生、碳中和”等特点，并且 S 和 N 元素含量低^[3-4]。中国范围内生物质能产出总量约为 2 800 PJ，其中农业废弃物约占 50%，还有接近 12% 的森林生物质^[5]。以生物质为原料制备清洁燃料用于烧结，是实现“绿色冶金”的重要方向之一。SEO 等^[6]将黄杨木和炼焦煤按不同比例混合对生物质进行炭化，发现生物质焦热值高于 29.3 MJ/kg，着火点温度在 400 ~ 600 °C。XU 等^[7]探索热解温度对废竹筷子的结构和燃烧行为的影响。发现随着热解温度从 573 K 上升到 973 K，生物质炭中固定碳质量分数从 46.57% 上升到 82.83%，挥发分从 56.43% 下降到 6.86%。HADEY 等^[8]采用花生壳和甘蔗渣在不同热解温度梯度下制备生物质炭燃料，发现生物质炭热值随着炭化温度提高而增大，生物质炭比生物质有更好的燃烧性能。由此可见，众多学者对生物质炭化温度选择主要采用从室温加热到目标温度，而对炭化中间过程进行保温处理影响生物质炭性能以及炭化过程中产生的热解气成分研究很少。

所以，本研究采用木屑生物质在两段炭化和一段炭化工艺下制备生物质炭，对生物质炭热值、工业分析、热解气成分等进行对比研究。此外，利用热重分析仪探究了生物质炭单独燃烧和生物

质炭-焦粉在不同配比下混合燃烧特性，对生物质炭制备和烧结用固体燃料转型以及降低焦粉使用提供借鉴与参考。

1 试验原料与方案

1.1 试验原料

试验选取废弃的生物质(木屑)和某钢铁厂焦粉为原料，其主要元素与工业分析如表 1 所示。由表 1 可知，焦粉中 C 和固定碳质量分数分别为 88.26%、83.80%，均高于生物质的 46.21%、13.09%。但生物质的挥发分质量分数比焦粉更高，为 82.27%。此外，生物质的 N 和 S 元素质量分数分别为 0.26% 和 0，低于焦粉的 1.31% 和 0.63%。

1.2 试验方案

1.2.1 生物质炭制备

生物质炭制备采用的管式炉反应器[图 1(a)]，在炭化过程中，通入 200 mL/min 的 N_2 作为保护气直至试验结束。炭化过程中收集产生的热解气并采用烟气分析仪对其成分和含量进行分析。为了对比不同的温度与保温制度对生物质炭化过程中产生的热解气成分以及生物质炭性能的影响，生物质炭制备试验采用 4 种不同的工艺方案。其中，方案 4 中将木屑置于管式炉中，以 10 °C/min 的升温速率从 25 °C 直接升温到 600 °C，并且升温过程不进行任何保温处理，当达到终点温度时保温 30 min，此过程定义为一段炭化工艺。方案 1~3 将木屑的第一段炭化温度先分别升温至 300、350 °C 和 400 °C，达到设定温度后保温 30 min，然后继续加热至 600 °C，达到终点温度时保温 30 min。此过程定义为两段炭化工艺，具体方案见表 2。

表 1 原料主要元素和工业分析

Table 1 Main elemental analysis and industrial analysis of raw materials

燃料	元素分析(质量分数) /%					工业分析(质量分数) /%				热值 / (MJ·kg ⁻¹)
	C	H	O	N	S	固定碳	挥发分	灰分	水分	
生物质	46.21	5.65	46.95	0.26	0	13.09	82.27	1.54	3.10	15.47
焦粉	88.26	0.31	4.30	1.31	0.63	83.80	2.35	4.03	0	31.62

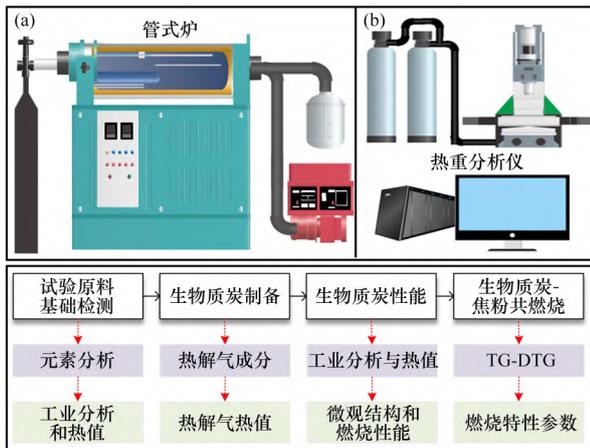
表 2 炭化试验

Table 2 Biomass carbonisation experiment

方案编号	第一段炭化温度/℃	中间保温时间/min	第二段炭化温度(终点温度)/℃	终点温度保温时间/min	升温速率/(℃·min ⁻¹)
1	300	30	600	30	10
2	350	30	600	30	
3	400	30	600	30	
4	—	—	600	30	

1.2.2 生物质炭-焦粉混合非等温燃烧试验

燃烧特性研究采用热重分析仪[图1(b)], 升温速率设定为10℃/min, 终点温度设定为900℃, 达到终点温度保温30min。为了探究未来实际烧结生产中不同比例生物质炭替代焦粉时, 燃料燃烧性能的变化, 试验选取通过方案4制备得到的生物质炭并分别采用生物质炭配比为10%、20%、30%、40%、60%探究生物质炭-焦粉混合非等温燃烧特性。



(a) 管式炉; (b) 热重分析仪

图 1 试验方案

Fig. 1 Experimental scheme

1.2.3 燃烧特性评价指标

试验采用着火点(T_i ,℃)、峰值温度(T_{max} ,℃)、燃尽温度(T_f ,℃)、最大失重速率(v_{DTGmax} ,%/min)、平均失重速率($v_{DTGmean}$,%/min)和燃烧特性指数 P [式(1)]综合评价生物质炭燃烧特性。同时采用CR法[式(2)]对生物质炭非等温燃烧反应的活化能进行计算, 对其反应的难易程度进行动力学分析。

$$P = \frac{v_{DTGmax} \cdot v_{DTGmean}}{T_i^3} \quad (1)$$

$$\ln\left(\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right) - \frac{E}{RT} \quad (2)$$

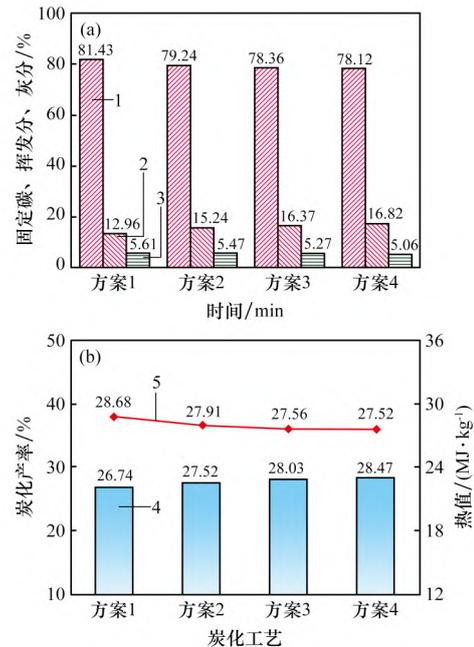
式中: α 是转化率; T 是开氏温度, K; A 是指前因子; R 为理想气体常数, 为8.314; β 为升温速率, %/min; E 是活化能, kJ/mol。

2 试验结果与分析

2.1 生物质炭的理化性能及微观结构

2.1.1 生物质炭产率和工业分析

生物质炭产率、热值与工业分析如图2所示。从图2可以看出, 与生物质相比, 采用不同炭化温度工艺得到的生物质炭的挥发分明显降低, 固定碳和灰分含量显著提高。当两段炭化(方案1~3)中第一段炭化温度升高以及采用一段炭化工艺(方案4), 生物质炭挥发分和产率逐渐升高, 固定碳、灰分和热值逐渐降低。其中一段炭化工艺的产率最高, 为28.68%; 方案1的固定碳和热值最高, 分别为81.43%和28.68MJ/kg。但与生物质相比, 生物质炭的挥发分均降低, 固定碳和热值均提高。



(a) 工业分析; (b) 产率与热值

1—固定碳; 2—挥发分; 3—灰分; 4—炭化产率; 5—热值。

图 2 生物质炭产率、热值与工业分析

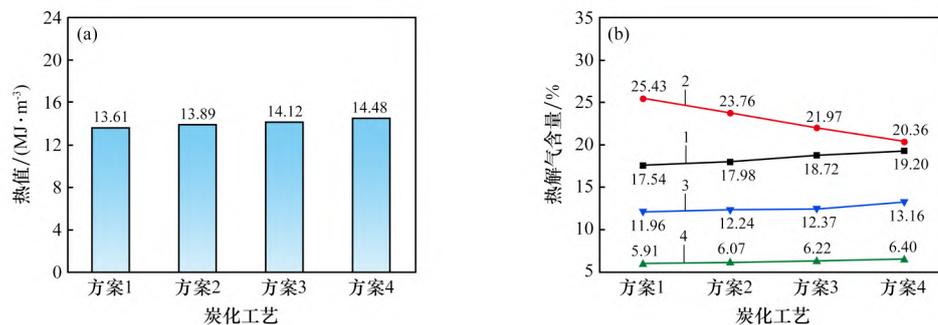
Fig. 2 Biochar yield, calorific value and proximate analysis

2.1.2 生物质热解气成分热值

对生物质炭化过程中产生的热解气成分和含量及热值进行了分析,结果如图3所示。从图3(a)看出,随着两段炭化(方案1~3)中第一段炭化温度升高,热解气热值从13.61 MJ/m³(方案1)升高³到14.12 MJ/m³(方案3),但是采用一段炭化(方案4)的热解气热值最高,为14.48 MJ/m³。图3(b)显示,炭化温度制度不同会影响其热解气成分的含量,当两段炭化中第一段炭化温度升高,CO、CH₄、H₂含量升高,CO₂含量降低,但是采用一段炭化的热解气中CO、CH₄、H₂含量最高,CO₂含量最低。

2.1.3 生物质炭的微观结构

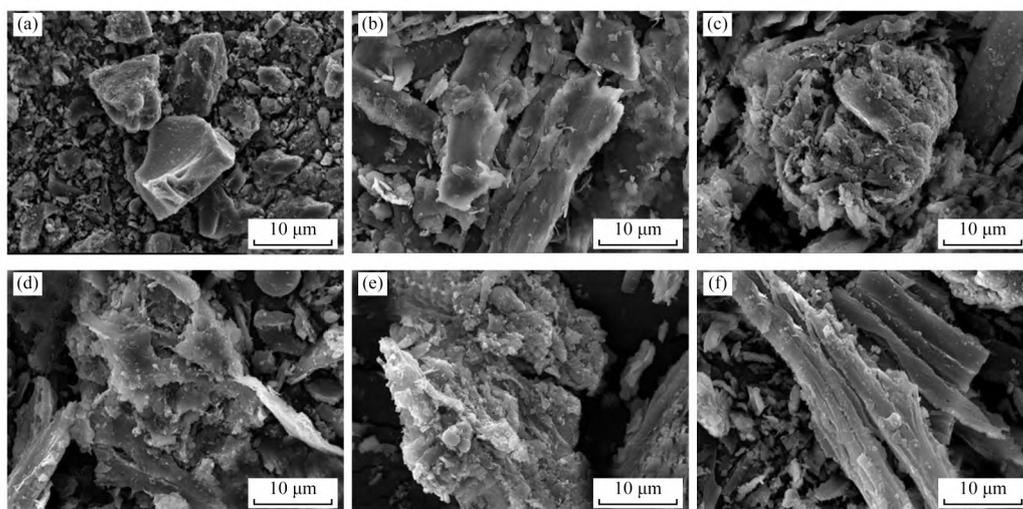
焦粉、生物质及生物质炭微观结构如图4所示



(a) 热值; (b) 成分与含量
1—CO; 2—CO₂; 3—CH₄; 4—H₂。

图3 热解气热值、成分及含量

Fig. 3 Calorific value, composition and content of pyrolysis gas



(a) 焦粉; (b) 生物质; (c) 方案1; (d) 方案2; (e) 方案3; (f) 方案4

图4 焦粉、生物质及生物质炭微观结构

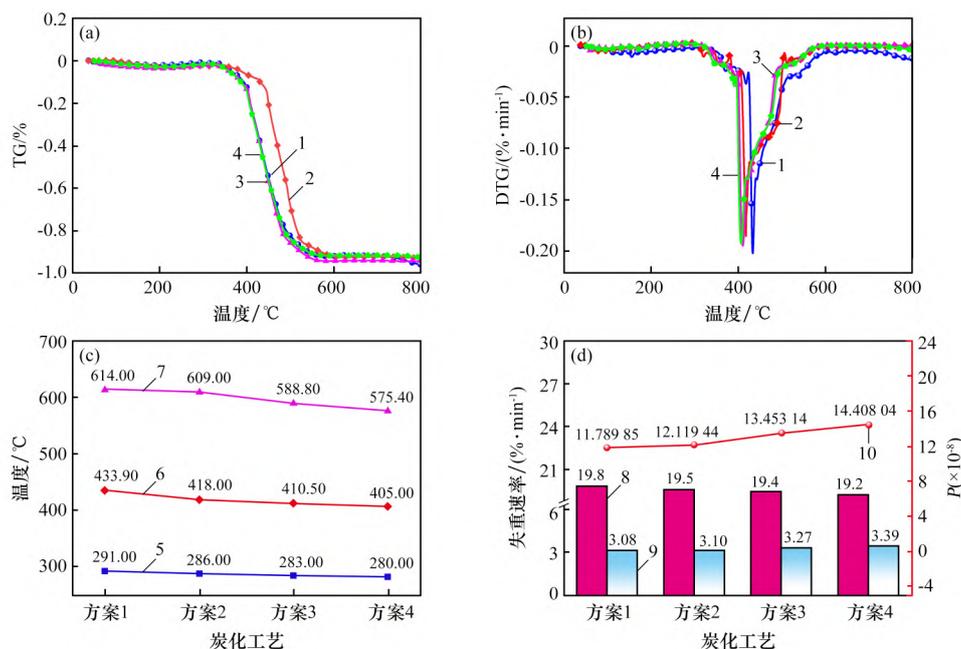
Fig. 4 Microstructure of coke fines, biomass, and biochar

示。由图4可知,焦粉微观形貌呈现出光滑的大小不均匀的块状结构[图4(a)]。生物质的颗粒较大,具有片状结构,颗粒之间相互叠加交织在一起[图4(b)]。而采用两段炭化(方案1~3)生物质炭的表面粗糙,小颗粒物质镶嵌在大颗粒物质表面,同时呈现出多孔的“蜂窝状”结构,孔隙之间有更好的连通性。两段炭化中的生物质炭,方案3形成的孔隙更多并且分布更均匀,连通性更好[图4(e)]。一段炭化(方案4)生物质炭的结构主要是“管状”结构,并且具有更发达的孔隙结构[图4(f)],在4种炭化工艺中结构最稀疏。

2.2 生物质炭非等温燃烧特性及动力学分析

2.2.1 生物质炭非等温燃烧特性

生物质炭非等温燃烧特性见图5。从图5(a)



(a) TG 曲线; (b) DTG 曲线; (c) T_i 、 T_{max} 和 T_f ; (d) v_{DTCmax} 、 $v_{DTCmean}$ 和 P

1~4—方案1~4; 5—着火点温度(T_i); 6—峰值温度(T_{max}); 7—燃尽温度(T_f); 8—最大失重速率(v_{DTCmax}); 9—平均失重速率($v_{DTCmean}$); 10—燃烧特性指数(P)。

图5 生物质炭非等温燃烧热重曲线及燃烧特性参数

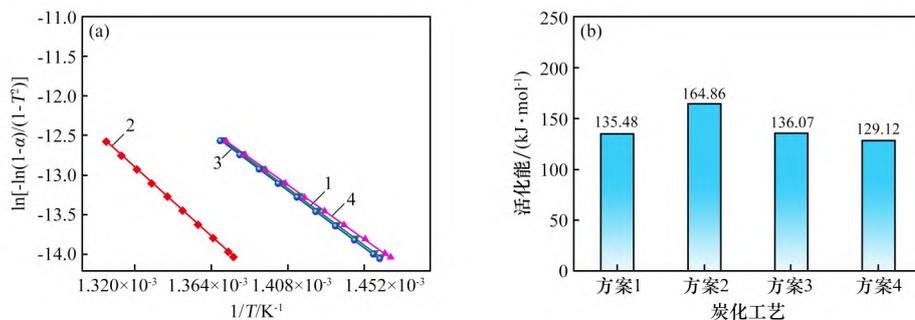
Fig. 5 Biochar TG-DTG curves and combustion characteristic parameters

和(c)可知,两段炭化生物质炭的 T_i 、 T_{max} 和 T_f 比一段炭化更高,当第一段炭化温度升高时, T_i 、 T_{max} 和 T_f 降低。其中,方案4是4种生物质炭中 T_i 、 T_{max} 和 T_f 最低的,分别为280.00、405.00℃和575.40℃,燃烧性能最佳,燃烧更容易。从图5(b)和(d)可知,4种生物质炭的 $v_{DTCmean}$ 从3.08%/min增加到3.39%/min, v_{DTCmax} 从19.8%/min减小到19.2%/min。其中方案4的生物质炭 P 和 $v_{DTCmean}$ 最大,分别为 $14.408\ 04 \times 10^{-8}$

和3.39%/min,燃烧性能最好。

2.2.2 生物质炭非等温燃烧反应动力学

对生物质炭非等温燃烧反应的活化能进行计算,结果如图6所示。由图6可知,两段炭化工艺(方案1~3)中第一段炭化温度升高,生物质炭非等温燃烧反应活化能先升高后降低。其中方案2生物质炭的活化能最大,为135.48 kJ/mol,并且与氧气发生燃烧反应最难,这与其微观结构更加致密相关性很大。方案4(一段炭化)的活化能最



(a) 拟合曲线; (b) 活化能

1—方案1, $y=9.777\ 32-16\ 295.183\ 36x$, $R^2=0.999$; 2—方案2, $y=13.268\ 38-19\ 829.639\ 64x$, $R^2=0.998$;

3—方案3, $y=9.846\ 37-16\ 366.027\ 50x$, $R^2=0.999$; 4—方案4, $y=8.740\ 28-15\ 530.167\ 32x$, $R^2=0.999$ 。

图6 生物质炭非等温燃烧反应动力学

Fig. 6 Reaction kinetics of non-isothermal combustion of biochar

表 3 生物质炭非等温燃烧反应动力学参数

Table 3 Kinetic parameters of non-isothermal combustion reaction of biochar

炭化工艺	温度区间/°C	拟合曲线	拟合度(R^2)	指前因子(A)	活化能/($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)
方案 1	336 ~ 580	$y = 9.78 - 162\ 95.18x$	0.999	2.88×10^9	135.48
方案 2	429 ~ 579	$y = 13.27 - 198\ 29.64x$	0.998	1.15×10^{11}	164.86
方案 3	331 ~ 581	$y = 9.85 - 163\ 66.03x$	0.999	3.10×10^9	136.07
方案 4	339 ~ 569	$y = 8.74 - 155\ 30.17x$	0.999	9.70×10^8	129.12

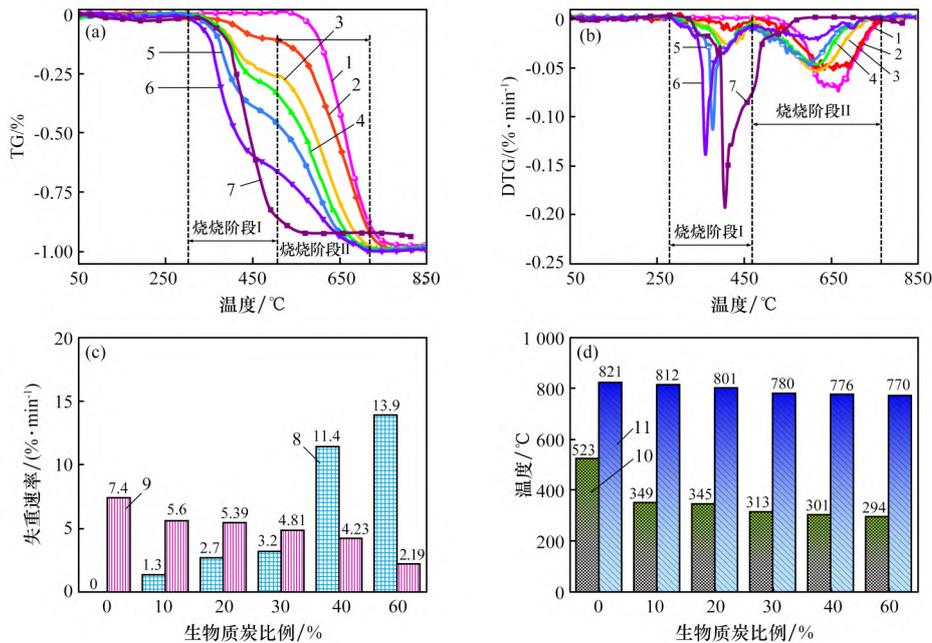
小, 为 129.12 kJ/mol , 燃烧反应最容易, 因为其结构更加疏松, 可为与氧气接触提供更多的通道。

2.3 生物质炭-焦粉混合燃烧性能分析

2.3.1 生物质炭-焦粉非等温混合燃烧特性

对生物质炭-焦粉混合燃烧特性进行了考察。由图 7(a) 和 7(b) 知, 与焦粉单独燃烧相比, 生物质炭-焦粉混合燃烧时的 TG 曲线明显出现“燃烧阶段 I”和“燃烧阶段 II”两个不同失重速率阶段, 并且 DTG 曲线出现“双峰”现象。与生物质炭单独燃烧相比, 生物质炭-焦粉混合燃烧 T_i 与 T_f (图 5) 明显提高, 而与焦粉单独燃烧相比, T_i 与 T_f 明显降低。并且提高生物质炭配比, 生物质炭-焦粉混合燃烧的 T_i 和 T_f 降低。图 7(c) 显示, 随着生物质炭配比升高, 生物质炭-焦粉混合燃烧的 $T_{\text{max}1}$ 和 $T_{\text{max}2}$

向低温区移动, $v_{\text{DTGmax}1}$ 升高并且 $v_{\text{DTGmax}2}$ 降低。分析图 7(c) 能够得到, $v_{\text{DTGmax}1}$ 由 0 升高到 13.9 $\%/ \text{min}$, $v_{\text{DTGmax}2}$ 由 7.4 $\%/ \text{min}$ 减小到 2.19 $\%/ \text{min}$ 。综合来看, 生物质炭-焦粉混合燃烧时, 与焦粉单独燃烧相比燃烧性能得到增强, 并且随着生物质炭比例的提高, 生物质炭-焦粉混合燃烧性能进一步增强。这些结果说明, “燃烧阶段 I”主要是生物质炭挥发分析出并燃烧以及固定碳燃烧, 而“燃烧阶段 II”主要是焦粉燃烧, 它们之间存在相互配合作用。烧结过程中配加生物质炭, 它与焦粉这种相互配合作用在烧结过程中的体现: 烧结前期生物质炭作为主要供热源, 为焦粉的点燃与矿相熔融提供预热, 减少了点火时的外加热源; 焦粉能够弥补生物质炭燃烧过快导致后期供热不足的缺点。



(a) TG 曲线; (b) DTG 曲线; (c) 失重速率; (d) T_i 和 T_f

1—100% 焦粉。焦粉中生物质炭质量分数/%: 2—10; 3—20; 4—30; 5—40; 6—60。7—100% 生物质炭;

8—第一失重峰速率($v_{\text{DTGmax}1}$); 9—第二失重峰速率($v_{\text{DTGmax}2}$); 10—着火温度(T_i); 11—燃尽温度(T_f)。

图 7 不同配比下生物质炭-焦粉共同燃烧特性

Fig. 7 Co-combustion characteristics of biochar/coke powder with different ratios

2.3.2 生物质炭-焦粉非等温混合燃烧反应动力学

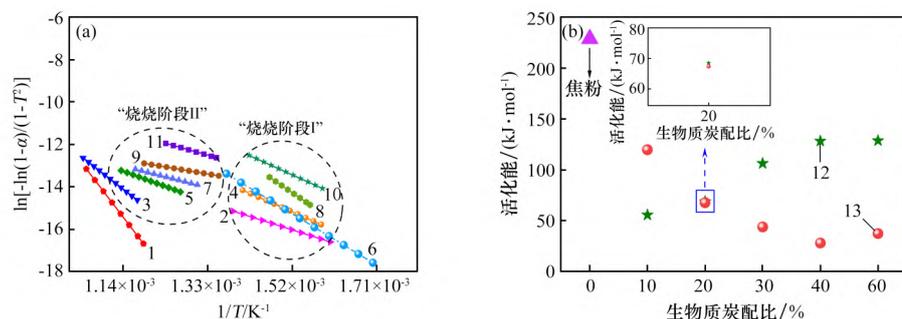
利用 CR 法对生物质炭-焦粉非等温混合燃烧反应的“燃烧阶段 I”和“燃烧阶段 II”的活化能 E 进行了拟合计算, 得到的结果如图 8 和表 4 所示。从图 8(a) 和 8(b) 可知, 焦粉单独燃烧时, 反应的活化能最大, 燃烧反应更难, 但是焦粉-生物质炭体系的燃烧反应活化能都明显小于焦粉单独燃烧, 因此烧节点火时以及整个反应中需要的热量也少于焦粉。生物质炭-焦粉混合燃烧时, 随着生物质炭比例从 10% 提高到 40% 时, “燃烧阶段 I”的活化能呈现出上升趋势, “燃烧阶段 II”的活化能逐渐下降。但是, 当生物质炭比例达到 60% 时, “燃烧阶段 I”的活化能降低, “燃烧阶段 II”的活化能升高。同时, 在每一个生物质炭添加量

对应的“燃烧阶段 I”的活化能基本高于“燃烧阶段 II”(10% 添加量除外)。

3 结 论

(1) 与生物质相比, 生物质炭挥发分低, 固定碳和热值高, 结构更加致密; 方案 1(两段炭化)炭化工艺的固定碳和热值最高、挥发分最低; 方案 4(一段炭化)的生物质炭产率最高, 为 28.47%, 并且其热解气中 CO 、 CH_4 、 H_2 含量最高, CO_2 含量最低。

(2) 两段炭化(方案 1~3)中第一段炭化温度升高, 生物质炭着火点、峰值温度和燃尽温度降低; 平均失重速率和燃烧特性指数随着第一段炭化温度升高而增大, 而最大失重呈现降低趋势。



(a) 线性拟合; (b) 活化能

1~11—方案 1~11; 12—“燃烧阶段 I”活化能; 13—“燃烧阶段 II”活化能。

图 8 生物质炭-焦粉非等温共燃烧反应动力学

Fig. 8 Reaction kinetics of non-isothermal co-combustion of biochar-coke powder

表 4 生物质炭-焦粉非等温混合燃烧反应动力学参数

Table 4 Kinetic parameters of non-isothermal co-combustion reaction of biochar-coke powder

方案编号	生物质炭配比/%	燃烧阶段	温度区间/°C	拟合曲线	拟合度(R^2)	指前因子(A)	活化能/ $(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
1	0 (100% 焦粉)	—	563 ~ 762	$y = 16.02 - 27\ 571.26x$	0.998	2.50×10^{11}	229.23
2	10	燃烧阶段 I	348 ~ 496	$y = -5.92 - 6\ 651.57x$	0.986	1.79×10^2	55.30
3		燃烧阶段 II	523 ~ 743	$y = 2.33 - 14\ 392.28x$	0.996	1.48×10^6	119.66
4	20	燃烧阶段 I	340 ~ 500	$y = -2.64 - 8\ 242.61x$	0.976	5.88×10^3	68.53
5		燃烧阶段 II	515 ~ 715	$y = -3.97 - 8\ 107.27x$	0.960	1.53×10^3	67.40
6	30	燃烧阶段 I	315 ~ 455	$y = 4.15 - 12\ 774.99x$	0.966	6.74×10^7	106.21
7		燃烧阶段 II	492 ~ 691	$y = -7.05 - 5\ 234.20x$	0.972	4.54×10^1	43.52
8	40	燃烧阶段 I	368 ~ 463	$y = 9.18 - 15\ 427.77x$	0.976	1.50×10^9	128.27
9		燃烧阶段 II	465 ~ 669	$y = -9.00 - 3\ 322.19x$	0.995	4.10×10^1	27.62
10	60	燃烧阶段 I	307 ~ 455	$y = 10.02 - 15\ 356.78x$	0.973	3.45×10^9	128.68
11		燃烧阶段 II	468 ~ 712	$y = -6.59 - 4\ 439.55x$	0.960	4.44×10^4	36.91

4 种炭化工艺中一段炭化(方案 4)生物质炭的燃烧性能更好,燃烧反应更容易。

(3) 生物质炭-焦粉混合燃烧时主要分为两个阶段:低温区时以生物质炭燃烧为主的“燃烧阶段 I”,高温区以焦粉燃烧为主的“燃烧阶段 II”。并且生物质炭-焦粉混合燃烧比焦粉燃烧有更低的着火点、峰值温度、燃尽温度和非等温燃烧反应活化能,燃烧性能更好。

参考文献:

- [1] 何志军,盛宏沅,高立华,等. 利用生物质能实现低碳炼铁的研究进展[J]. 钢铁,2025,60(1):1-14.
HE Zhijun, SHENG Hongyuan, GAO Lihua, et al. Research progress on utilizing biomass energy to achieve low-carbon ironmaking[J]. Iron & Steel, 2025, 60(1): 1-14.
- [2] WANG Yihan, HE Xi, JIANG Feng. The energy conservation and emission reduction potentials in China's iron and steel industry: Considering the uncertainty factor[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 413: 137519.
- [3] 魏汝飞,朱玉龙,龙红明,等. 生物质铁矿球团研究现状与展望[J]. 烧结球团,2022,47(1):29-37.
WEI Rufeif, ZHU Yulong, LONG Hongming, et al. Research status and prospect of biomass iron ore pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1): 29-37.
- [4] VIJAY V, KAPOOR R, SINGH P, et al. Sustainable utilization of biomass resources for decentralized energy generation and climate change mitigation: A regional case study in India[J]. Environmental Research, 2022, 212: 113257.
- [5] 周彦名,王娇月,王诗云,等. 我国生物质资源能源开发利用潜力评估[J]. 生态学杂志,2024,43(9):2702-2713.
ZHOU Yanming, WANG Jiaoyue, WANG Shiyun, et al. Assessment of biomass resources for energy use potential in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(9): 2702-2713.
- [6] SEO M W, JEONG H M, LEE W J, et al. Carbonization characteristics of biomass/coking coal blends for the application of bio-coke[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 394: 124943.
- [7] XU R S, DENG S L, WANG W, et al. Structural features and combustion behaviour of waste bamboo chopstick chars pyrolysed at different temperatures[J]. BioEnergy Research, 2020, 13(2): 439-451.
- [8] HADEY C, ALLOUCH M, ALAMI M, et al. Preparation and characterization of biochars obtained from biomasses for combustible briquette applications[J]. The Scientific World Journal, 2022, 2022(1): 2554475.
- [16] WANG C Y, YEH I H, MARK LIAO H Y. YOLOv9: Learning what you want to learn using programmable gradient information[M]. Computer Vision-ECCV 2024. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 1-21.
- [17] 周建国,周路明,王剑宇,等. 基于优化分解与误差修正的光伏发电功率预测[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 502-509.
ZHOU Jianguo, ZHOU Luming, WANG Jianyu, et al. Pv power forecasting based on optimal decomposition and error correction[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 024, 45(7): 502-509.
- [18] 张璋,常亮,田明华,等. 基于 CATPCA 的优化 Transformer 卫星电源消耗时序预测研究[J]. 北京理
工大学学报, 2023, 43(7): 744-754.
ZHANG Zhang, CHANG Liang, TIAN Minghua, et al. Power consumption time series forecast based on CATPCA for optimal transformer satellite[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(7): 744-754.
- [19] 蒋亚楠,郑林枫,许强,等. 机理引导下的阶跃型滑坡位移预测深度学习模型[J]. 测绘学报, 2024, 53(6): 1128-1139.
JIANG Yanan, ZHENG Linfeng, XU Qiang, et al. Step-like displacement prediction of landslides guided by deformation mechanism[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2024, 53(6): 1128-1139.

(上接第 34 页)