直接还原与熔融还原

生物质热解特性及其还原铁精矿研究

黄柱成，金芸芸，易凌云，王 林，胡建家
（中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要： 生物质低碳环保，用于铁矿石还原可以实现钢铁企业绿色发展，为探究一种快速高效的直接还原方法，本文对其热解特性和铁精矿的还原进行了研究。结果表明，生物质在较低温度下可快速热解，热解温度为693 ℃时，失重率达到66.76%，最大失重速率可达7.85 min；生物质热解生成的气相产物主要有CO、CO_2、CH_4、C_2H_4、H_2等，且铁矿石的添加有利于碳氢化合物转化生成CO，足够量的固定碳存在是实现生物质铁精矿低温快速还原的保证。当碳铁摩尔比为0.4，还原温度为1 050 ℃时，还原产物的金属化率为82.97%，可实现铁精矿的低温快速还原。

关键词： 生物质；铁精矿；热解特性；失重速率；气相产物
中图分类号： TF111.13 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)03－0065－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.03.041

Research on biomass pyrolysis characteristics and iron concentrate reduction

HUANG Zhucheng，JIN Yunyun，YI Lingyun，WANG Lin，HU Jianjia
(*School of Minerals Processing and Bioengineering，Central South University，Changsha* 410083，*Hunan*，*China*)

Abstract: Biomass is low carbon and environmentally friendly，which can be used for iron ore reduction to realize the green development for iron and steel enterprises. In order to explore a fast and efficient direct reduction method，the pyrolysis characteristics of biomass and the reduction of iron concentrate are studied. The results show that，the biomass can be rapidly pyrolyzed at low temperature. When the pyrolysis temperature is 693 ℃，the weight loss rate reaches 66.76%，and the maximum weight loss rate reaches 7.85%/min. The gaseous product generated by biomass pyrolysis mainly include CO，CO_2，CH_4，C_2H_4，H_2，etc.，the addition of iron ore is conducive to the transformation of hydrocarbons into CO，and the existence of sufficient fixed carbon is the guarantee to realize the rapid reduction of biomass iron concentrate at low temperature. When the molar ratio of carbon to iron is 0.4 and the reduction temperature is 1 050 ℃，the metallization rate of the reduction products is 82.97%，the rapid reduction of iron concentrate at low temperature can be realized.

Key words: biomass；iron concentrate；pyrolysis characteristics；weight loss rate；gaseous product

生物质储量丰富，全球每年经由光合作用形成的生物质可达1 730亿t，其能源蕴藏量相当于全球能源消耗量的10～20倍[1-2]。在缺氧或少氧的条件下对生物质进行热解可将其转化为便于储存和运输的液体、气体和生物质炭[3]。生物质作为一种可再生的低碳能源和还原剂，相比矿物能源的燃烧过程，因其具有含S量极低，含N量不超过0.2%的特点，对环境更为友好[4-5]。国内外学者针对生物质或炭用于还原做了大量的研究工作，THOMAS等[6]以农业残余物所制木炭代替传统还原剂用于铁氧化物进行研究，使用转底炉对其进行还原，发现木炭相对焦炭而言具有更好的还原效果，且还原所得产物有害元素S质量分数更低。SHIGERU等[7]对含生物质焦的含碳铁压块进行了反应性研究，基于碳铁复合材料反应模型分析高炉还

收稿日期：2021－03－05；修回日期：2021－03－15
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51504230)
作者简介：黄柱成(1964—)，男，教授，博士生导师，从事资源综合利用、铁矿烧结球团、直接还原与熔融还原等方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

原行为，发现还原剂的气化是碳铁矿复合材料还原过程中的决定性因素，确定生物质焦相较焦炭而言拥有更快的气化速率。VLAIMIR 等[8]对生物质木材废料还原铁矿石的基本机理进行了相应研究，通过不同的生物质配比，确定当松木质添加量为30%时，还原反应的起止温度分别为670 ℃和1 200 ℃。罗思义等[9]针对生物质复合球团机理以及还原过程的限制性因素进行了研究，通过不同组分生物质复合球团的还原速率、还原度、表面微观结构等变化规律，查明了添加生物质的复合球团有利于界面化学反应的发生，从而降低了其还原表观活化能。韩宏亮等[10]针对生物质还原剂用于生产金属化铁的可行性进行了分析，从金属化率、抗压强度以及体积收缩率等3个方面进行验证，得出转底炉工艺可以采用生物质作还原剂的结论。唐惠庆等[11]对鲕状高磷铁矿的除磷提铁技术进行了研究，采用直接还原－高温熔分的方法，成功地完成了该复杂铁矿的铁磷分离。易凌云等[12]针对球团黏结影响竖炉顺行现象进行研究，通过阐述生物质碳抑制球团黏结机理，提供了一种抑制铁精矿球团黏结，保证竖炉运行的新思路。本文以生物质作为铁精矿的还原剂，分析生物质的热解特性及其低温快速还原对铁精矿的影响，以期为工程实际应用提供理论依据。

1 实验原料与方法

1.1 原料性能

实验所用生物质为松木质，其工业分析、元素分析、灰分分析、粒度组成分别如表1～4所示。由表1～4可知：生物质具有高挥发分、低固定碳的特点，作为还原剂，可以在较低的温度下与铁氧化物产生还原反应，其中挥发分占比高达73.27%，而固定碳占比为12.7%，灰分占比较低，以SiO_2和CaO为主，仅为6.03%，还含有少量的K_2O和Na_2O；生物质元素组成主要以C、H、O为主，N、S占比较低，分别仅为0.32%和0.08%，因此，燃烧过程基本不产生SO_2和NO_x，是一种绿色、环保的可再生资源；破碎后用于铁精矿还原的生物质粒度较粗，+0.074 mm的颗粒占比高达72.22%，−0.045 mm的颗粒占比低至2.01%。

表1 生物质的工业分析(质量分数)

Table 1 Industrial analysis results of the biomass %

挥发分	固定碳	灰分	水分
73.27	12.70	6.03	8.00

表2 生物质主要元素成分(质量分数)

Table 2 Main element component of biomass %

C	H	N	S	O
43.00	4.48	0.32	0.08	39.72

表3 生物质灰分分析(质量分数)

Table 3 Biomass ash analysis %

TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O
1.64	43.26	29.25	6.23	7.30	2.98	2.47

表4 生物质粒度组成(质量分数)

Table 4 Biomass particle size composition %

−0.300～+0.074 mm	−0.074～+0.045 mm	−0.045～+0.038 mm	−0.038 mm
72.22	25.77	1.96	0.05

实验所用铁精矿的化学成分和粒度组成及XRD分析分别如表5、6和图1所示。由表5可以看出：铁精矿TFe质量分数较高，为66.88%；含有较低占比的脉石矿物，SiO_2、CaO、MgO占比分别为5.76%、0.15%和0.27%，有害元素S质量分数较低，仅为0.052%。由表6可以看出，选用的铁精矿粒度较细，大于0.147 mm只占0.11%，而粒度小于0.045 mm的铁精矿质量分数高达69.74%。由图1可以看出：该矿为磁铁矿，主要物相为Fe_3O_4，含有少量的SiO_2。

表5 铁精矿的主要化学成分(质量分数)

Table 5 The chemical composition of iron concentrates %

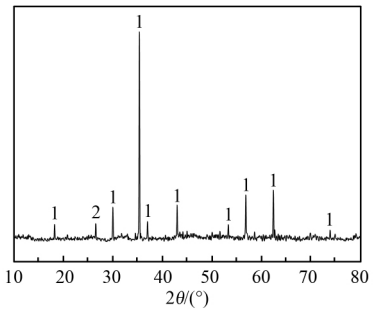
TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	P	S	LOI
66.88	28.59	5.76	0.15	0.27	0.46	0.012	0.052	0.66

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 6　铁精矿粒度组成(质量分数)

Table 6　Iron concentrate size composition　%

+0.147 mm	−0.147 ~ +0.074 mm	−0.074 ~ 0.045 mm	−0.045 mm
0.11	11.35	18.80	69.74



1—Fe_3O_4；2—SiO_2。

图 1　铁精矿的 XRD 物相分析

Fig. 1　The XRD phase analysis of iron concentrate

1.2　研究方法

铁精矿配加生物质进行还原焙烧时，生物质随着还原温度的升高，将发生一系列热解挥发过程，生物质在不同温度区间所产生的热解反应将对铁精矿还原起着不同的作用，本次试验对生物质热解特性和铁精矿生物质还原过程进行了研究。

(1) 不同温度下生物质焙烧挥发特性。将一定质量的生物质装入石墨坩埚内，在外部缺氧的气氛环境下放入箱式炉内进行焙烧，取出冷却后进行称量，并用型号 SDTGA-5000 的工业分析仪进行样品挥发分、灰分、固定碳的分析。

(2) 采用美国型号 DSC8500 的差热同步热分析仪分析生物质在 Ar 气氛非等温条件下的热稳定性。具体方法：将 20 mg 的生物质放入热天平支架的 Al_2O_3 坩埚内，以 10 ℃/min 的升温速率将设备从室温升至 1 200 ℃，测试过程中控制通入 Ar 气流速为 100 mL/min，得出生物质随热解温度的提高其 TG、DTG、DSC 曲线的变化规律。

(3) 采用型号为 TCW-32A 的卧式管炉和外径为 45 mm，长度为 700 mm 的石英管作为焙烧装置。将装有适量生物质的小瓷舟在 N_2 气氛下推入石英管内，通入的 N_2 流速为 0.6 L/min，产生的气体用集气包进行收集，之后用美国型号 ISQ7000 的气相色谱 - 质谱联用仪(GC-MS)检测不同温度热解产生的气相组成。

(4) 将干燥后的生物质与铁精矿混匀后装入石墨坩埚内，坩埚上部装入定量的生物质以保证还原气氛，防止还原过程中还原试样被氧化，还原焙烧结束后迅速将石墨坩埚自炉内取出放入煤堆里盖煤冷却至室温后进行取样，采用重铬酸钾标准溶液滴定法进行金属化率的测定。

2　实验结果及讨论

2.1　生物质热解特性及其挥发

2.1.1　生物质热解特性

在隔绝空气的条件下将生物质放入马弗炉内，并在不同的温度(200 ~ 400 ℃)条件下低温热解 40 min，得到生物质热解产物，其失重率如图 2 所示。由图 2 可以看出：当热解温度小于 250 ℃时，生物质失重率较小，250 ℃时失重率仅为 4.28%；随着热解温度的继续提高，生物质的失重率呈快速上升趋势，当热解温度升高到 350 ℃时，失重率达 57.40%，失重率的快速增加表明在 250 ~ 350 ℃的热解温度区间，生物质快速热解并产生大量的挥发，这一阶段生物质热稳定性较差；当热解温度超过 350 ℃后，生物质失重率开始趋于平缓。对热解产物进行工业分析，结果如表 7 所示。由表 7 可以看出：随着热解温度的提高，热解产物挥发分占比呈下降趋势，未热解时挥发分占比为 73.27%，而 400 ℃时热解产物的挥发分仅为 26.5%，

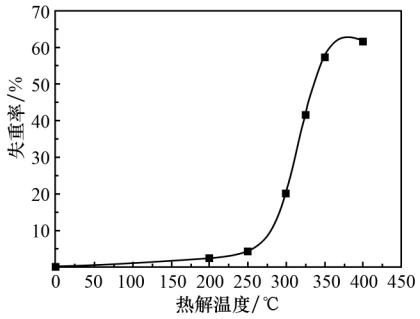


图 2　热解温度对生物质热解失重率的影响

Fig. 2　Effect of pyrolysis temperature on weight loss rate of biomass pyrolysis

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 7 不同焙烧温度下所得生物质焦粉工业分析（质量分数）

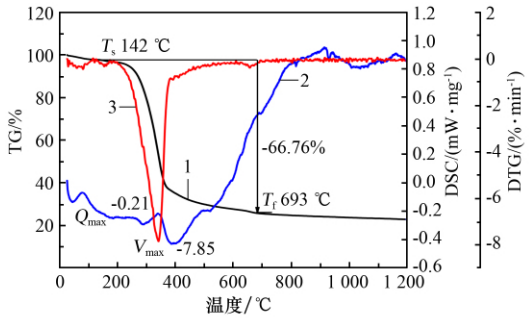
Table 7 Industrial analysis of biomass coke powder obtained at different roasting temperatures %

热解温度/℃	挥发分	固定碳	灰分
未热解	73.27	12.70	6.03
300	67.82	25.27	6.91
325	52.89	37.88	9.23
400	26.50	59.92	13.58

说明提高热解温度，挥发分快速脱除，导致失重率快速增加。而当铁精矿配加生物质还原时，快速热解挥发将对铁氧化物还原过程产生重要的影响。

2.1.2 生物质热稳定性

图 3 为生物质在 Ar 气氛条件下以 10 ℃/min 的升温速率所得的 TG-DSC 曲线。由图 3 可以看出：当热解温度低于 142 ℃时，生物质处于脱水阶段，因生物质为干基状态，此阶段可脱除内部的结合水。当热解温度高于 142 ℃时，生物质热解速度加快，挥发分裂解产生的气体和液体焦油挥发带来失重率的增加，最后热解结束剩余热解产物为木炭和灰分[13]。250～350 ℃温度区域内 TG 跟 DTG 曲线快速下降，且在 350 ℃时 DSC 峰值为放热峰，此时，失重速率达到 7.85 %/min。继续升温至 693 ℃时，失重率趋于平缓，此时热解基本完成。

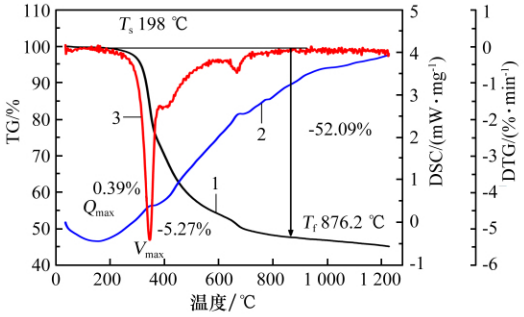


1—Tg/%；2—DSG/(mW·mg^{-1})；3—DTG/(%·min^{-1})。

图 3 生物质热稳定性分析

Fig. 3 Thermal stability analysis of biomass

图 4 为 325 ℃生物质热解产物在 Ar 气氛条件下以 10 ℃/min 的升温速率所得的 TG-DSC 曲线。由图 4 可以看出：当热解温度低于 198 ℃时，因热解产物已完成结合水的脱除从而导致其失重率保持稳定。当热解温度高于 198 ℃时，热解产物的热解速度加快，剩余挥发分脱除产生气体和液体焦油挥发带来失重率的增加。250～350 ℃温度区域内 TG 跟 DTG 曲线快速下降，但 350 ℃时 DSC 峰值为吸热峰，此时，失重速率为 5.27 %/min。继续升温至 876.2 ℃时，失重率趋于平缓，此时热解基本完成。



1—Tg/%；2—DSG/(mW·mg^{-1})；3—DTG/(%·min^{-1})。

图 4 325 ℃热解产物热稳定性分析

Fig. 4 Thermal stability analysis of pyrolysis products at 325 ℃

生物质和 325 ℃生物质热解产物的热解特征参数具体如表 8 所示。由表 8 可知：生物质和 325 ℃生物质热解产物热稳定性存在较大差异。生物质热解开始温度(T_s)和热解结束温度(T_f)均低于热解产物的起止温度；生物质的失重率为 66.76%，高于其热解产物的 52.07%。其具体原因由生物质挥发分占比高于其热解产物以及两者在热解过程中吸热和放热状态不同所导致。生物质热解过程伴随着放热反应，起到促进热解的作用，而热解产物热解过程全程吸热，需提高热解温度以保证其热解过程的进行。当生物质失重速率(V_{max})最大为 7.85%/min时，生物质处于放热状态，且最大放热量(Q_{max})为 0.21 mW/mg；当热解产物失重

表 8 生物质和 325 ℃生物质热解产物非等温热解特征参数

Table 8 Non-isothermal pyrolysis characteristic parameters of biomass and pyrdysis products at 325 ℃

热解样品	T_s/℃	T_f/℃	V_{max}/(%·min^{-1})	Q_{max}/(mW·mg^{-1})
生物质	142	693.0	7.85	-0.21
325 ℃热解产物	198	876.2	5.27	0.39

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

速率最大为 5.27% 时，热解产物处于吸热状态，最大吸热量为 0.39 mW/mg。

2.1.3　生物质热解气相产物及其铁氧化物还原

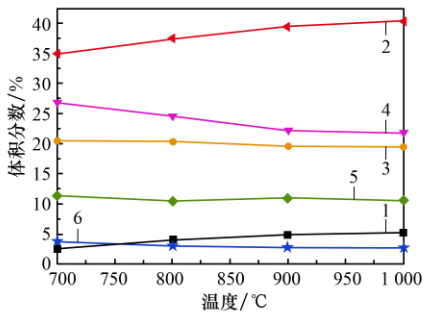
在 N_2 气氛下，将装有生物质的瓷舟推入卧式管炉内焙烧 40 min，探究生物质在不同温度下热解所引起的气相产物组分的变化，结果如图 5 所示。由图 5 可知：生物质热解生成的气相产物主要包括 CO、CO_2、CH_4、C_2H_4、H_2 等，且随着热解温度的提高，生物质快速热解并释放出大量气体。当热解温度为 700 ℃ 时，气相产物中的 CO 和 H_2 还原性气体占比分别为 34.87% 和 2.63%；当热解温度为 1 000 ℃ 时，气相产物中的还原性气体体积占比均有所上升，CO 和 H_2 占比分别为 40.43% 和 5.20%。产生此现象的原因是由于热解温度的提高引起了挥发分热解产生的大分子有机烃 C_xH_y 以及液体焦油的进一步热解，说明热解温度的提高有利于还原性气体的生成。还原性气体的增加有利于营造良好的还原性气氛，促进还原反应(1)～(4)的进行，从而起到促进铁氧化物还原的作用。

$$Fe_3O_4 + CO \rightarrow FeO + CO_2 \quad (1)$$

$$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2 \quad (2)$$

$$Fe_3O_4 + H_2 \rightarrow FeO + H_2O \quad (3)$$

$$FeO + H_2 \rightarrow Fe + H_2O \quad (4)$$



1—H_2；2—CO；3—CH_4；4—CO_2；5—C_2H_4；6—C_xH_y。

图 5　温度对生物质热解气相产物成分的影响

Fig. 5　Effect of temperature on composition of pyrolysis gas phase products of biomass

2.2　铁精矿生物质还原

2.2.1　配碳比的影响

当还原温度为 1 050 ℃，还原时间为 40 min 时，探究碳铁摩尔比对还原产物金属化率的影响，试验结果如图 6 所示。由图 6 可知：随着碳铁摩尔比的增加，还原产物的金属化率整体呈上升趋势。由于在较低温度下，生物质作为还原剂在还原过程中产生了大量的 CO、H_2 等还原气体，迅速进行铁氧化物的还原，而生物质用量的增加进一步加快了还原进程。当碳铁比逐步提高到 0.4 时，还原产物的金属化率呈急剧上升的趋势，还原产物的金属化率迅速提高到 82.97%，碳铁摩尔比的提高不仅增加了固定碳用量，还使得生物质热解释放出更多的 CO 和 H_2 等还原性气体，从而使得铁氧化物的还原程度得到较大提高；当碳铁比进一步提高到 0.6 时，还原产物的金属化率达到 90.31%，还原产物的金属化率增长趋势开始放缓。

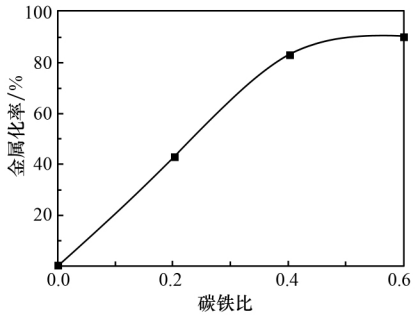


图 6　碳铁摩尔比对还原产物金属化率影响

Fig. 6　Effect of C to Fe molar ratio on metallization rate of reduction products

2.2.2　还原温度的影响

在还原时间为 40 min，不同碳铁摩尔比条件下探究还原温度对还原产物金属化率的影响，结果如图 7 所示。由图 7 可知：温度提高可以显著提高铁精矿的还原速度。当碳铁摩尔比为 0.4，还原温度从 950 ℃ 提高到 1 050 ℃ 时，还原产物金属化率从 45.52% 提高到 82.97%。虽然生物质在较低温度下快速热解生成 CO、H_2、CO_2、CH_4、C_2H_4 等气体，其中 CO 和 H_2 可以与铁氧化物发生直接还原反应，但由于低温热解生成的还原性气体 H_2、CO 较少，如果生物质配比不足，在碳铁比为 0.2 和 1 050 ℃ 的温度条件下，还原产物的金属化率仅为 42.92%。Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 能够快速还原成 FeO，而 FeO 进一步还原成金属铁则需要更强的还原性气氛，当还原料层中存在足够多的固定碳时，将产生

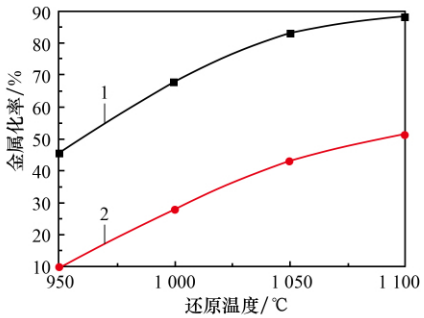
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

固定碳气化反应(见式(5)、(6)),从而加快铁精矿还原进程。因此还原温度和适当的碳铁比是铁精矿还原的根本保证。

固定碳气化反应:

$$C + CO_2 = 2CO \quad (5)$$

$$C + H_2O = CO + H_2 \quad (6)$$



C/Fe: 1—0.4; 2—0.2。

图 7 温度对还原产物金属化率影响

Fig. 7 Effect of temperature on the metallization rate of reduction products

2.2.3 还原时间的影响

当还原温度为 1 050 ℃,碳铁摩尔比为 0.4 时,探究还原时间对还原产物金属化率的影响,结果如图 8 所示。由图 8 可知:还原产物的金属化率随着还原时间的延长整体呈上升趋势。当还原时间为 20 min 时,金属化率较低,仅为 19.80%,这主要是因为生物质此时热解程度较低,产生的还原性气体较少,还原能力较弱引起的;当还原时间为 20 ~ 40 min 时,还原产物金属化率增速较快,这主要是由于生物质持续热解生成大量的 H_2 和 CO 等还原性气体,还原性气氛加强,从而带来还原效果的提升;当还原时间为60 ~ 70 min时,还原产物的金属化率趋于稳定,金属化率分别为 85.0% 和 86.04%,说明生物质在较低温度下快速热解并与铁氧化物进行还原反应,绝大部分挥发分在还原反应前期参与反应,而残留的固定碳占比较少,难以维持进一步的还原反应。

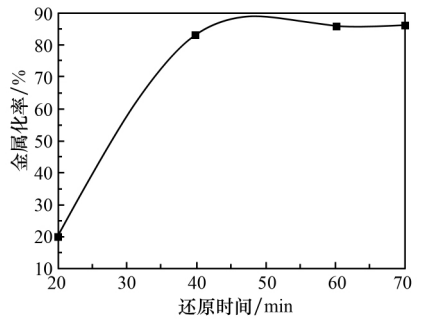


图 8 时间对还原产物金属化率影响

Fig. 8 Effect of time on the metallization rate of reduction products

3 结 论

(1) 生物质在较低温度下进行热解时,当热解温度为 693 ℃时,失重率达 66.76%,最大失重速率为 7.85%/min。

(2) 生物质低温热解产生的气相产物主要包括 CO、H_2、CO_2、CH_4、C_2H_4、C_xH_y 等,且随着热解温度的提高,还原铁氧化物的 CO 和 H_2 占比显著提高,在足够多的固定碳存在时,可以实现生物质铁精矿的低温快速还原。

参考文献:

[1] 习静,王静,梁斌,等. 生物质能源的研究综述[J]. 山东化工,2019,48(2):52 - 53.
XI J,WANG J,LIANG B,et al. A review of biomass energy research[J]. Shandong chemical industry,2019,48(2):52 - 53.

[2] 赵思语,耿利敏. 我国生物质能源的空间分布及利用潜力分析[J]. 中国林业经济,2019,158(5):75 - 79.
ZHAO S Y,GENG L M. Spatial distribution and utilization potential of biomass energy in China[J]. Forestry Economics in China,2019,158(5):75 - 79.

[3] 叶丹,杨佳耀,马铭欣,等. 生物质热解技术研究现状[J]. 能源与节能,2017,147(12):70 - 72.
YE D,YANG J Y,MA M X,et al. Research status of biomass pyrolysis technology[J]. Energy and Conservation,2017,147(12):70 - 72.

[4] 李海滨,袁振宏,马晓茜,等. 现代生物质能利用技术[M]. 化学工业出版社,2012.
LI H B,YUAN Z H,MA X X X,et al. Modern biomass energy utilization technology[M]. Chemical Industry Press,2012.

[5] 胡俊鸽,周文涛,郭艳玲,等. 日本含碳球团技术研究进展[J]. 烧结球团,2014,39(2):27 - 31;46.
HU J G,ZHOU W T,GUO Y L,et al. Research progress of carbonaceous pellets in Japan[J]. Sintered pellets,2014,39(2):27 - 31;46.

[6] THOMAS Griessacher, JURGEN Antrekowitsch, STEFAN Steinlechner,et al. Charcoal from agricultural residues as alternative reducing agent in metal recycling[J]. Biomass and-Bioenergy,2012(39:139 - 146.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[7] UEDA Shigeru，YANAGIVA Kazunari，WATANBE Kentaro，et al. Reaction Model and Reduction Behavior of Carbon Iron Ore Composite in Blast Furnace [J]. ISIJ International，2009，49(6)：827－836.

[8] VLADIMIR Strezov. Iron ore reduction using sawdust: Experimental analysis and kinetic modelling [J]. Renewable Energy，2005，31(12)：1892－1905.

[9] 罗思义，周扬民，仪垂杰，等. 生物质合成气直接还原铁矿－生物质复合球团炼铁 [J]. 北京科技大学学报，2013，35(7)：856－861.
LUO S Y，ZHOU Y M，YI C J et al. Direct reduction of iron ore and biomass pellets by biomass syngas [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2013，35(7)：856－861.

[10] 韩宏亮，苑鹏，段东平，等. 生物质用于转底炉直接还原工艺研究 [J]. 重庆大学学报，2015，38(5)：164－170.
HAN H L，YUAN P，DUAN D P et al. Study on direct reduction process of biomass in rotary bottom furnace [J]. Journal of Chongqing University，2015，38(5)：164－170.

[11] 唐惠庆，范立强，马龙，等. 生物质用于鲕状高磷铁矿除磷 [J]. 北京科技大学学报，2014，36(7)：867－874.
TANG H Q，FAN L Q，MA L et al. Biomass for dephosphorization of oolitic high phosphorus iron ore [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing，2014，36(7)：867－874.

[12] 易凌云，黄柱成，姜涛，等. 生物质炭用于铁精矿球团还原过程中黏结的抑制 [J]. 中南大学学报，2017，48(12)：3141－3146.
YI L Y，HUANG Z C，JIANG T，et al. Biochar is used to inhibit the bonding of iron concentrate pellets in the process of reduction [J]. Journal of Central South University，2017，48(12)：3141－3146.

[13] 郭万军，张海峰，葛晖骏，等. 基于铁矿石载氧体的生物质化学链气化机理研究 [J]. 热科学与技术，2016，15(3)：249－258.
GUO W J，ZHANG H F，GE H J，et al. Mechanism of chemical chain gasification of biomass based on iron ore oxygen carrier [J]. Thermal Science and Technology，2016，15(3)：249－258.

(上接第 27 页)

[3] 谢运强，张中中，莫龙桂，等. 铁矿粉烧结基础性能与转鼓指数关系研究 [J]. 烧结球团，2017，42(6)：34－38.
XIE Yunqiang，ZHANG Zhongzhong，MO Longgui，et al. Study on the relationship between basic sintering properties of iron ore powder and drum index [J]. Sintering and Pelletizing，2017，42(6)：34－38.

[4] 王峰，向家发，郭宇峰，等. 基于铁矿粉基础工艺性能的烧结优化配矿方法研究进展 [J]. 钢铁研究学报，2020，32(2)：89－95.
WANG Feng，XIANG Jiafa，GUO Yufeng，et al. Research progress of sintering optimization method based on basic process properties of iron ore powder [J]. Journal of iron and steel research，2020，32(2)：89－95.

[5] 贺真. 基于铁矿粉烧结基础特性的优化配矿研究 [D]. 长沙：中南大学，2014.
HE Zhen. Research on optimal ore blending based on basic sintering characteristics of iron ore powder [D]. Changshang：Central South University，2014.

[6] 王子宏，潘晶，唐志宏. 柳钢铁矿石采购和生产评价体系的研发和应用 [J]. 炼铁，2015，34(6)：51－55.
WANG Zihong，PAN Jing，TANG Zhihong. R & D and application of iron ore procurement and production evaluation system in Liugang [J]. Ironmaking，2015，34(6)：51－55.

[7] 许满兴. 优化高炉炼铁原料采购与烧结高炉配矿一体化的思路和方法 [J]. 烧结球团，2016，41(5)：1－7.
XU Manxing. Ideas and methods for optimizing the integration of raw material procurement for blast furnace ironmaking and ore blending for sintering blast furnace [J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(5)：1－7.

[8] 邵慧君. 基于组合模型的烧结矿质量预测系统研究与应用 [D]. 武汉：武汉科技大学，2019.
SHAO Huijun. Research and application of sinter quality prediction system based on combination model [D]. Wuhan：Wuhan University of science and technology，2019.

[9] 李勇波，陈令坤，肖志新，等. 鄂州球团矿的冶金性能及炉料结构研究 [J]. 烧结球团，2012，37(5)：45－47；50.
LI Yongbo，CHEN Lingkun，XIAO Zhixin，et al. Study on metallurgical properties and burden structure of Ezhou pellets [J]. Sintering pellets，2012，37(5)：45－47；50.

[10] 路要通，陈振旺，许世强. 信钢高炉低成本炉料结构的实践 [J]. 烧结球团，2010，35(1)：52－55.
LU Yaotong，CHEN Zhenwang，XU Shiqiang. Practice of low cost burden structure of blast furnace in Xingang [J]. Sintering pellet，2010，35(1)：52－55.

[11] 龙红明，夏序河，王平，等. 单种铁矿性能评价体系的设计与开发 [J]. 钢铁研究学报，2015，27(8)：7－10.
LONG Hongming，XIA Xuhe，WANG Ping，et al. Design and development of performance evaluation system for single iron ore [J]. Journal of iron and steel research，2015，27(8)：7－10.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net