生物质铁矿球团研究现状与展望

魏汝飞[1]，朱玉龙[1]，龙红明[1,2]，徐春保[3]

（1. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243002；2. 安徽工业大学 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室，安徽 马鞍山 243002；3. 西安大略大学 ICFAR，安大略 伦敦 N6A3K7）

摘要：寻找替代能源是减少钢铁工业 CO_2 排放的重要方式，而生物质能是 CO_2 零排放的可替代能源。本文在阐述生物质燃料在炼铁工艺中应用的基础上，重点叙述了其在铁矿球团方面上的应用，并就其还原原理以及目前的研究现状进行了概述。结论表明：天然生物质、生物炭、木质素对铁矿都具有较好的还原性，其中木质素的还原性最强，其还原能力高于煤粉与 CO；生物质中提取的纤维素可通过改性制备成球团黏结剂或者黏结相，可用于提高生物质铁矿球团的自身强度。最后，文中指出天然生物质铁矿球团、生物炭铁矿球团、生物质中间体铁矿球团是生物质铁矿球团未来发展的 3 个方向，开发高强度高反应性生物质铁矿球团是未来发展的重要趋势。

关键词：生物质；球团；低碳炼铁；还原；生物炭；生物质中间体

中图分类号：TF046.6；F426.2；TK6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0029－09

doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.005

Research status and prospect of biomass iron ore pellets

WEI Rufei[1], **ZHU Yulong**[1], **LONG Hongming**[1,2], **XU Chunbao**[3]

(1. *School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan* 243002, *Anhui, China*; 2. *Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction & Resources Recycling, Ministry of Education, Ma'anshan* 243002, *Anhui, China*; 3. *Institute for Chemicals and Fuels from Alternative Resources (ICFAR), The University of Western Ontario, London N6A3K7, Ontario, Canada*)

Abstract: Whereas, the search for alternative energy sources is an important way to reduce CO_2 emissions in the iron and steel industry, and biomass energy is an alternative energy source with CO_2 zero-emissions. On the basis of expounding the application of biomass fuel in iron-making process, its application in terms of iron ore pellets is highlighted and its reduction principles and current research are outlined. The conclusion shows that: natural biomass, biochar, and lignin all have a good reducibility to iron ore, among them, lignin has the strongest reducibility, and its reducing capacity is higher than that of pulverized coal and CO; the cellulose extracted from biomass can be modified into a pellet binder or a binder phase, which can be used to improve the strength of biomass iron ore pellets. At last, natural biomass iron ore pellets, biochar iron ore pellets and biomass intermediate iron ore pellets are pointed out to be the three directions of the future development direction of biomass iron ore pellets, and the development of high-strength and high-reactivity biomass iron ore pellets is taken as an important trend of future development.

Key words: biomass; pellet; low carbon iron-making; reduction; biochar; biomass intermediate

钢铁工业是国家的支柱性产业，随着社会的不断发展，全球粗钢年产量不断上升，2021 年达到 1.898×10^9 t[1]。钢铁生产工艺主要包括长流程（高炉炼铁－转炉炼钢）与短流程（电炉

收稿日期：2021－12－13；**修回日期**：2022－01－12

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52174290)

作者简介：魏汝飞(1985—)，男，博士，副教授，从事低碳炼铁与固废资源利用方面的研究。

通讯作者：龙红明(1979—)，男，博士，教授，从事低碳炼铁与冶金环保方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

炼钢)两种工艺，以长流程为主。长流程工艺 CO_2 排放较高，吨钢排放达 3.102 t[2]，而其主要来源于炼铁环节。因此，低碳炼铁是钢铁工业减少 CO_2 排放的关键。

低碳炼铁可分为低碳高炉炼铁与非高炉低碳炼铁两个方向，目前国内外学者对低碳高炉的研究主要集中在富氢、顶煤气碳循环和喷吹低碳燃料上。日本 COURSE50 项目[3]以氢还原降低 CO_2 排放 10%，并从高炉煤气中分离回收 CO_2 以减碳 20%。安徽工业大学[4]提出一种高效低 CO_2 排放富氢燃气纯氧高炉炼铁工艺，以富氢燃气替代焦炭，减少 CO_2 排放。韩国 COOLSTAR 项目通过对钢厂副产煤气改质制备“灰氢”喷入高炉作还原剂，减少 CO_2 排放 15%[5]。德国蒂森克虏伯集团在“以氢代煤”高炉炼铁上取得突破，目前已实现 CO_2 减排 16%[6]。金鹏等[7]对炉顶煤气循环氧气高炉碳排放进行了理论研究，炉顶煤气循环氧气高炉 CO_2 净排放可降低 32.9%~40.4%。巴西以木炭粉部分替代煤粉用于高炉喷吹，实现碳减排 30%，欧洲与中国也在这方面进行了大量研究[8-9]。

在非高炉炼铁方向的研究主要是以可替代能源为基础，如氢基竖炉[10]、闪速炼铁[11]等。瑞典 HYBRIT 目前正在开发突破性氢能竖炉炼铁技术，预计 2035 年实现商业化，届时瑞典及芬兰 CO_2 排放总量可分别下降 10% 和 7%[12]。奥钢联发起以可再生能源电力电解水制氢，然后通过竖炉还原生产铁，预计 2035 年实现氢冶炼并于 2050 年减少 80% 的 CO_2 排放[13]。我国宝钢湛江和中晋太行也在氢基竖炉方面进行了工业化应用。此外，美国犹他大学 FIT 闪速炼铁工艺以高温还原气体对悬浮铁精矿粉进行还原制铁，避免了焦炭的消耗及烧结球团等工艺，显著降低了 CO_2 的排放[11]。

因此，低碳炼铁是炼铁技术发展的重要方向，而能源结构的改变是炼铁工艺低碳发展的重要手段，寻求可替代能源为炼铁工艺服务是减少炼铁 CO_2 排放的必然路径，其中生物质能是可替代化石能源的重要一次能源，在炼铁中的应用具有广阔的前景。本文重点阐述了其在铁矿球团中的应用，同时结合相关研究，表明了其发展的主要方向。

1 生物质在炼铁工艺中的应用

生物质来源广、易获取，是继煤炭、天然气、石油后的第 4 大能源[14-15]。生物质中的碳在生产消费过程中自成循环(图 1)，是唯一一种含碳可再生并具有高附加值的“零碳排”清洁资源[16]。近年来，生物质在钢铁冶金中的应用得到了广泛关注，尤其是在炼铁工艺中的应用[17]。

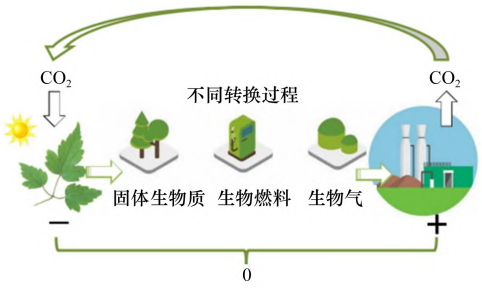


图 1 生物质零碳排

Fig. 1 Biomass has zero carbon emission

1.1 生物质作燃料

现代高炉多采用喷煤以降低焦比，降低生产成本。除喷吹煤粉外，研究者也尝试低碳燃料，如木炭[17]、废塑料[18]、生物质[19]等，以替代煤粉减少化石能源的消耗。不同燃料的工业分析和元素分析如表 1 所示。生物质具有自身能量密度低、水分多等特点，因此生物质往往先经过热处理制备成生物炭后加以使用。同种生物质以不同热处理方式所制得产品在用于高炉喷吹时，对高炉炉况也会产生不同影响。与热解炭相比，水热炭的含硫量和灰分都更低，且水热炭避免了灰分、碱金属在生物炭中富集带来的煤粉燃烧时结渣、结垢问题，对高炉炉况影响更小[1,20-21]。生物炭与煤粉的燃烧性能有所差异：刘竹林[22]等对玉米秸秆生物炭、花生壳生物炭与煤粉共混燃烧进行了研究，结果表明当生物炭与煤粉比例为 3∶7时，燃烧效果优良；郑伟成等[1]研究发现不同生物炭的燃烧特征温度不相同，但都低于喷吹煤的燃烧特征

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

温度，这说明生物炭的燃烧反应性优于喷吹煤；徐润生[23]、李冲[9]、WIJAVANTA[24]等分别对生物炭的可磨性、基础特性等方面进行了研究，得出生物炭可部分替代煤粉用于高炉喷吹燃料。

表 1　不同燃料的元素分析和工业分析[25-27]

Table 1　Elemental analysis and industrial analysis of different fuels

燃料种类	元素分析(质量分数)/%					热值/(MJ·kg^{-1})	工业分析(质量分数)/%		
	C	H	O	N	S		固定碳	挥发分	灰分
生物质	49.3	6.0	40.5	0.8	0.20	18.0	18.2	77.0	4.8
生物炭	74.7	5.0	1.4	1.0	17.90	32.1	38.7	61.3	15.7
焦炭	88.0	0.4	0.5	0.4	0.60	30.3	—	1.26	11.7
喷煤	80.6	4.4	5.4	1.7	0.50	32.6	81.5	18.5	10.3
重油	87.0	10.5	—	—	2.01	~40.0	—	—	—

注：热值为估算值，热值 =0.338 3C +1.422(H − O/8)(C 为燃料中碳元素质量分数，%；H 为燃料中氢元素质量分数，%；O 为燃料中氧元素质量分数，%)。

除了高炉直接喷吹生物炭外，利用生物质生产制备生物焦是生物质做燃料的另一种途径。将生物质或热解后的生物质添加到焦煤中，经过炼焦生产得到含有生物质的焦炭，这种焦炭常被称为生物焦。其中生物质炭用于炼焦的研究最为常见。在焦炭配煤中加入生物炭，可以降低焦煤的流动度，增加焦煤的黏性，提高焦炭的质量，提升其反应性，但会对焦炭反应后的强度产生不利影响，并且生物质的添加比例不高，一般在 2%~5%。在不降低焦炭各项性能的基础上，通过采取一定手段提高生物质的添加比例是未来研究的一个方向，比如生物质水热处理。

此外，生物质在铁矿烧结中使用是生物质作燃料的第三种途径。生物质的燃烧速度比煤粉和焦粉的燃烧速度都要快，用生物质替代焦粉或者煤粉后，烧结过程燃烧前沿会发生改变，替代比例越高，燃烧前沿速度加快越多，烧结料层达到最高温度的时间缩短，料层最高温度降低，烧结温度区间变宽。使用生物质后烧结矿的成品率和转鼓强度都会出现不同程度的下降，当替代比例超过一定值后，烧结矿产、质量指标将大幅恶化，天然生物质对烧结矿的破坏性大于木炭。改变烧结参数，可以控制使用生物质时的烧结矿的质量。

因此，生物质在炼铁中作燃料包括 3 个方面：① 作为高炉喷吹的燃料；② 炼制生物焦；③ 作为燃料在烧结中进行利用，如图 2 所示。

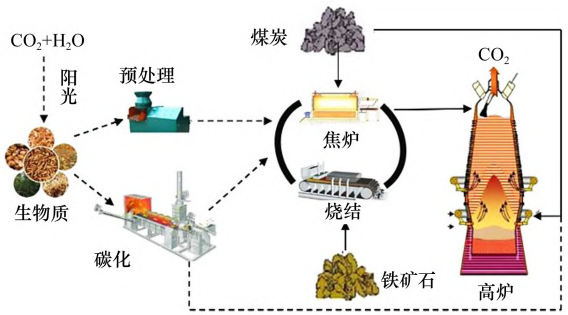


图 2　生物质在高炉炼铁过程中的利用[28]

Fig. 2　Utilization of biomass in blast furnace ironmaking process[28]

1.2　生物质作还原剂

生物质在炼铁中除作燃料外，还可以作还原剂[29-32]。燃料在高炉风口燃烧属于不完全燃烧，燃烧产物为 H_2、CO，因此生物质(或生物炭)在高炉风口燃烧后转变为 H_2 和 CO，随着煤气上升至高炉中上部对铁矿石进行还原，因此，生物质(或生物炭)在高炉中即充当燃料又充当还原剂[33-35]。

生物质在非高炉中的应用，基本上都是发挥还原剂作用。非高炉炼铁包括熔融还原和直接还原两种工艺。生物质在熔融还原中的应用主要聚焦于 HIsarna 熔融还原炼铁工艺，该工艺可以将生物质替代煤作还原剂，其还原过程发生于熔炼容器内部，通过挥发性物质热分解产生气态产物直接与含氧化铁渣和注入的铁矿石反应。KHASRAW 等[36-37]研究了 HIsarna 替代炼铁过程中不同碳源和快速脱挥生成焦炭的气

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

化行为，得出木炭在快速热处理前后气化反应最快，且巴纳草炭生料比热煤生料反应更剧烈；在 1500 ℃时，巴纳草炭和热煤气化行为十分相似；各组快速热解炭的反应活性与原料相比有所下降，其中巴纳草炭受快速脱挥影响最严重，原因在于其内含灰分较高，高灰分含量在热处理过程中熔化造成了气孔堵塞。

生物质在直接还原工艺中的应用见图 3。

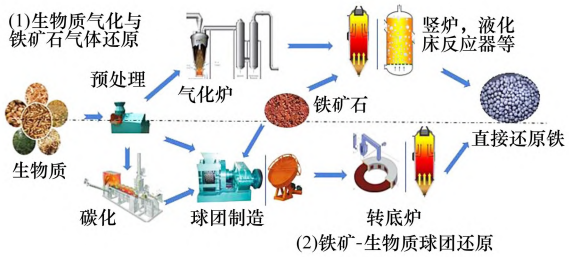


图 3 两种利用生物质还原铁矿石的直接还原工艺[28]

Fig. 3 Two direct reduction processes using biomass to reduce iron ore[28]

由图 3 可知：一种工艺路线是先将生物质转化为还原气(富含 CO、H_2)，然后将还原气通入反应器中对铁矿进行还原，最终得到直接还原铁，此路线与传统的气基直接还原路线相似，除了还原气的生产方式不同外，因此反应器可以是竖炉或者流化床等；另一种工艺路线是将预处理后的生物质或者生物质炭与铁矿粉混合，造成满足生产所需强度的球团，然后输送到反应器中进行还原焙烧，最终得到直接还原铁。相比生物质制气 - 气基还原工艺而言，生物质铁矿球团工艺不需要单独生产还原气，避免了产气过程中的能源转化损失，因此后者在能源利用率上更具优势，具有较为广阔的前景。

2 生物质铁矿球团研究现状

生物质铁矿球团是指将具有一定粒度的生物质粉和铁精矿粉按照一定比例混合在一起，然后添加少量的黏结剂，经过造球或者压球而制成的球状炼铁原料。球团所用的生物质可以是天然生物质，也可以是生物质转化所产生的生物炭，以及分级提取的中间体，如图 4 所示。在高温环境中，生物质铁矿球团中的生物质与铁矿粉发生还原反应，最终得到金属铁，其工艺流程如图 3 所示。目前生物质铁矿球团研究的关注点主要在于其还原特性和球团强度。

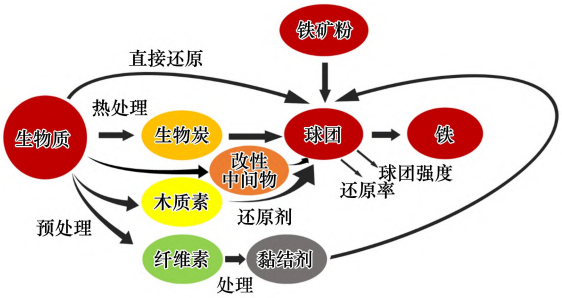


图 4 生物质铁矿球团的发展路线

Fig. 4 Development route of biomass iron ore pellets

2.1 生物质还原铁氧化物研究

生物质铁矿球团的还原原理是在高温条件下利用球团内部的天然生物质(或生物炭、生物质中间体等)对铁矿进行还原，最终生成金属铁。关于生物质还原铁氧化物的研究很多，主要集中在天然生物质还原铁氧化物、生物炭还原铁氧化物、生物质中间体还原铁氧化物 3 个方面[38-40]。

2.1.1 天然生物质还原铁氧化物

天然生物质还原铁氧化物主要由气体及固定碳还原共同决定，气基还原特征温度在806 ~ 822 K，碳还原特征温度在 1 116 ~ 1 132 K，气基还原主要由挥发份中的 CO 和 H_2 进行，碳还原主要由碳直接还原和 CO 间接还原进行。魏汝飞等[41]研究了 4 种生物质，其氢还原能力由大到小的顺序为玉米秸秆 > 咖啡废渣 > 木屑 > 水解木质素，碳还原能力由大到小顺序为木屑 > 水解木质素 > 咖啡废渣 > 玉米秸秆。生物质中碳还原铁氧化物分为两个阶段，分别是挥发性碳还原与非挥发性碳再还原，两阶段的还原时间均随温度的升高而缩减，且在 1 523 K 时，第一阶段比第二阶段时间短的多，前者受气体扩散控制，后者以碳的气化反应为主，如图 5 所示[42-43]。

罗思义等[44]通过松木屑、铁矿石粉、添加剂进行混合生球团制备，研究预热、还原温度及球团粒径对生物质直接还原炼铁的影响。结果表明，球团粒径的缩减及预热、还原温度的上升，均可提高产品中全铁的质量分数及金属化率[45]。生物质铁矿球团能优化后续还原过程

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

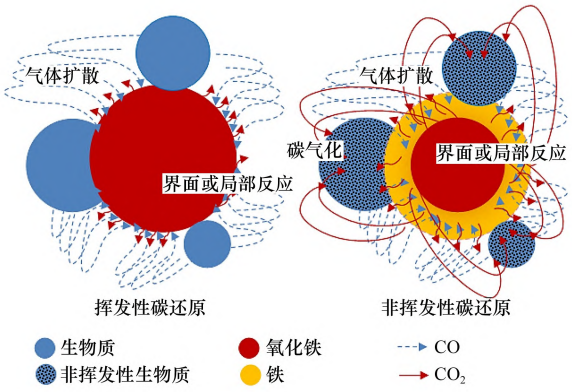


图 5　生物质中碳还原铁矿石机制[42]

Fig. 5　Mechanism of carbon reduction of iron ore in biomass[42]

的热值传递，且球团以收缩核的方式进行还原，在 1 123 ~ 1 323 K 时，界面化学反应是还原过程的主要控速环节，生物质能促进界面化学反应的进行并使球团还原表观活化能降低 28.62%。汪永斌等[46]通过对生物质与褐煤焙烧还原褐铁矿的对比实验，研究了温度、时间、原料配比等条件对矿物磁性的影响，确定了生物质还原的最佳焙烧温度、焙烧时间及生物质用量，并指出生物质还原铁氧化物的性能优于煤粉。

2.1.2　生物炭还原铁氧化物

生物炭根据制备工艺的不同可分为热解炭与水热炭两种，目前热解炭还原氧化铁方面的研究较多。一般将生物炭与铁矿粉混合后制备成生物质铁矿球团，然后通过生物炭直接还原铁氧化物制备金属铁。唐惠庆等[47]使用干馏木炭完全替代煤粉或焦粉制备成生物质铁矿球团，研究表明温度在 1 373 K，木炭加入比例满足碳氧摩尔比即 $n(C)/n(O)=0.9$，还原气氛 $p(CO_2)/p(CO)=1.0$，还原时间为 15 ~ 25 min 时，可获得低残碳高金属化率球团，其金属化率达 75% ~ 80%，残碳质量分数为 0.69% ~ 0.11%。马玉升等[48]以木炭、无烟煤分别进行含碳球团的制备，研究表明，在不同温度下木炭与无烟煤的还原效果相差不大，在不同 C/O 比下，以木炭作还原剂时，含碳球团在 1 000、1 200 ℃还原温度下，金属化率与配碳比成正比，当 C/O 比大于 0.7 时，金属化率变化不明显。韩宏亮等[49]通过竹炭、木炭、秸秆纤维、煤粉分别进行含碳球团制备，研究了生物炭对含碳球团金属化率、抗压强度、体积收缩率的影响。结果表明，生物炭可用于转底炉直接还原工艺，与传统还原剂煤粉相比，生物炭含碳球团的金属化率、抗压强度、体积收缩率不仅未受到负面影响，还存在优于煤粉的情况，这可能是由于同粒度条件下生物炭比煤粉的比表面积更大，反应速度更快导致的[50-54]。

2.1.3　生物质中间体还原铁氧化物

生物质中间体是指通过化学改性和化学分离的方式对生物质进行加工，使其具有更好的还原性。生物质一般由木质素、纤维素和半纤维素构成，可通过化学分离的方式，提取其中的木质素和纤维素[55]。WEI 等[56]研究了木质素、纤维素、半纤维素对铁氧化物的还原特性，研究发现木质素对铁氧化物还原作用最强，其主要通过固定碳还原铁氧化物，而纤维素还原能力较弱，其主要通过挥发性成分所产生的气体来实现铁氧化物还原。三种组分的碳基还原能力由强到弱的顺序为木质素 > 半纤维素 > 纤维素。木质素还原铁氧化物的能力取决于木质素残渣的形态和质量，木质素中的固定碳在还原反应中起主要作用，木质素中含碳量较高的薄膜结构加速了还原反应。在生物质组分还原氧化铁中，除碳还原铁氧化物外，氢还原铁氧化物也占较大比重。纤维素、半纤维素还原铁氧化物的氢来源于其自身的热解，而木质素还原的氢来自碳和 CO 与水的反应。与常规还原剂相比，木质素可同时提供 H_2 和碳的还原，其对铁氧化物还原速率大于煤粉和 CO 的还原速率(图 6)。因此对生物质进行改性、提取和分离制备高还原性的生物质中间体是生物质铁矿球团快速还原技术发展的重要方向。

此外，魏汝飞等[57]还提出了生物质气化与铁矿还原联产新方法，并通过对温度为 1 093 ~ 1 333 K 下的铁矿 - 木质素球团的热解与气化实验，研究了生物质气化与铁矿石还原的耦合作用，得出在铁矿 - 木质素球团的焙烧过程中，木质素的热解为铁氧化物的还原提供了还原剂，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

而铁氧化物与金属铁则为生物质的气化与热解提供了氧化剂和催化剂。

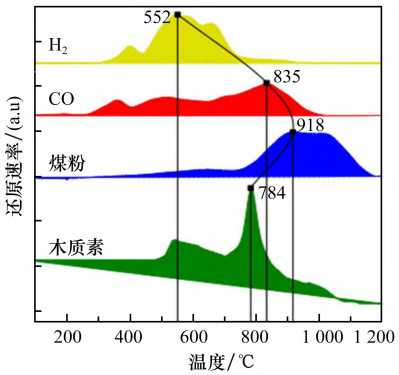


图 6 不同还原剂对铁氧化物还原速率的比较

Fig. 6 Comparison of reduction rates of iron oxides with different reducing agents

综上，生物质(含生物炭、生物质中间体)还原铁氧化物的优越性已被证明，而对生物质还原铁矿的反应特性研究还有待进一步深入探究及完善。生物质与炼铁工艺相结合，可为铁矿还原提供清洁环保、高品质热源与低成本的还原剂，对实现低碳炼铁、绿色钢铁、低耗冶金具有重要战略意义。

2.2 生物质铁矿球团强度研究

生物质铁矿球团的研究除内部铁氧化物的还原外，其自身的强度也不容忽视。生物质铁矿球团强度的提升有两种途径，一种是对生物质进行改性，制备生物质基黏结载体。魏汝飞等[58]以改性溶液对生物质进行改性处理，将改性生物质、含铁原料、添加剂混合加压制块。这一过程中改性生物质充当了黏结载体(占比为50%~60%)，并作为铁氧化物的还原剂，为可燃气体提供了 C 源、H 源，铁氧化物充当铁源、氧源；在不添加黏结剂条件下提高了铁团块的强度、生物质气化产率及直接还原铁的金属化率，并降低了焦油的含量。该技术的局限性主要在于改性废液的处理。球团强度的提高是因为未改性的生物质中纤维素具有一定韧性，压实易回弹进而降低球团强度，改性后的生物质在球团内产生交联与熔化，使颗粒紧密联系在一起进而提高了球团强度(球团抗压强度由 110 N/P 提升至 560 ~870 N/P)[59-61]。

另一种提高生物质铁矿球团强度的方式是添加黏结剂。生物质表面属于有机界面，而铁矿石表面属于无机界面，提高球团强度的关键在于添加黏结剂使有机界面和无机界面发生黏结。因此选择或开发合适的黏结剂种类相当关键。羧甲基纤维素钠(CMC)黏结剂具有较好的黏结效果，可大幅度提升球团的强度，但此类黏结剂价格一般比较昂贵。因此，亟需开发低成本黏结剂，而使用生物质秸秆为原料可降低黏结剂开发的成本。首先用较低的成本将秸秆的纤维素分离，然后制备 CMC 黏结剂(占比为10%~20%)，使其吨价格控制在 5 000 元人民币以下；除此之外，与常规黏结剂相比，生物质的可循环及“零碳排”特性使其更具优势，这些对于降低球团制备成本以及节能减排都有重要意义。

3 结论与展望

生物质能是唯一一种含碳可再生的“零碳排放”清洁能源，其在炼铁工艺中的应用可大幅度降低炼铁过程 CO_2 的排放，在炼铁中作燃料和还原剂具有较大潜力，而其中生物质铁矿球团是炼铁工艺使用生物质能的重要方式之一。与煤粉相比，天然生物质、生物炭、生物质中间体(木质素等)还原氧化铁都具有一定优越性，其中木质素的还原性最强，其还原温度低于煤粉与 CO，因此生物质铁矿球团在还原性和低碳排放方面具有较大的优势。

生物质铁矿球团的强度是未来研究的重点，通过外加黏结剂、生物质改性或者开发生物质基黏结剂是制备高强度生物质铁矿球团的重要方式。生物质中的纤维素组分可制备成球团黏结剂或黏结相，用于提高生物质铁矿球团强度，这对于高强度生物质铁矿球团的制备具有重要意义。

在天然生物质铁矿球团、生物炭铁矿球团、生物质中间体铁矿球团三种球团中，生物质中间体铁矿球团具备生物质化工与钢铁冶金专业相结合的特点，需引起科研人员的重视，可联合开发高强度高还原性生物质铁矿球团。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 郑伟成,徐春保,魏汝飞,等. 高炉喷吹生物炭研究进展[J]. 钢铁研究学报,2021,33(1):1-8.
ZHENG Weicheng,XU Chunbao,WEI Rufei,et al. Injection of biochar into blast furnace:Progress and prospects[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(1):1-8.

[2] 那洪明,高成康,郭玉华,等. “中国式”电炉炼钢流程碳排放特点及其源解析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(2):212-217.
NA Hongming, GAO Chengkang, GUO Yuhua, et al. CO_2 emissions characteristics and source analysis of “Chinese style” electric arc furnace steelmaking route[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(2): 212-217.

[3] 刘文权. 低碳炼铁技术研究[J]. 中国环保产业,2011(1):20-25.
LIU Wenquan. Study on low carbon ironmaking technology[J]. China Environmental Protection Industry, 2011(1): 20-25.

[4] 刘振林,刘崇亭,贾勇,等. 近几年国内外炼铁技术发展趋势及建议[J]. 山东冶金,2012,34(5):1-4.
LIU Zhenglin, LIU Chongting, JIA Yong, et al. Development trend and suggestion of ironmaking technology in recent years[J]. Shandong Metallurgy,2012,34(5):1-4.

[5] 冶金信息网. 日韩钢铁界推进氢还原炼铁工艺技术开发[N]. 世界金属导报,2020-02-04(F01).
Metalinfo. cn. Japan and South Korea iron and steel industry to promote the development of hydrogen reduction ironmaking technology[N]. World Metals,2020-02-04(F01).

[6] 王定武. “氢冶金”发展现状及未来前景[J]. 冶金管理,2021(14):3-6.
WANG Dingwu. Development status and future prospect of hydrogen metallurgy[J]. Steel & Management,2021(14):3-6.

[7] 金鹏,姜泽毅,包成,等. 炉顶煤气循环氧气高炉的能耗和碳排放[J]. 冶金能源,2015,34(5):11-18.
JIN Peng,JIANG Zeyi,BAO Cheng,et al. Energy consumption and carbon emission of oxygen blast furnace with top gas recycling[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2015, 34(5): 11-18.

[8] MACHADO J G M S,OSÓRIO E,VILELA C F,et al. Reactivity and conversion behaviour of brazilian and imported coals, charcoal and blends in view of their injection into blast furnaces[J]. Steel Research International,2010,81(1):9-16.

[9] 李冲. 花生壳生物炭用作高炉喷吹燃料的实验研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2018.
LI Chong. Experimental study on peanut shell biochar used as blast furnace injection fuel[D]. Wuhan:Wuhan University of Science and Technology,2018.

[10] 刘臣,叶恒棣,魏进超,等. 钢铁工业炼铁工序绿色低碳技术浅析[J]. 烧结球团,2021,46(6):1-7;26.
LIU Chen, YE Hengli, WEI Jinchao, et al. Analysis on green and low-carbon technology of ironmaking process in iron and steel industry[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(6):1-7;26.

[11] 王新东,郝良元. 现代炼铁工艺及低碳发展方向分析[J]. 中国冶金,2021,31(5):1-5;18.
WANG Xindong, HAO Liangyuan. Analysis of modern ironmaking technology and low-carbon development direction[J]. China Metallurgy,2021,31(5):1-5;18.

[12] 唐珏,储满生,李峰,等. 我国氢冶金发展现状及未来趋势[J]. 河北冶金,2020(8):1-6;51.
TANG Jue,CHU Mansheng,LI Feng,et al. Development status and future trend of hydrogen metallurgy in china[J]. Hebei Metallurgy,2020(8):1-6;51.

[13] 胡俊鸽,郭艳玲,周文涛,等. 美国低碳炼铁新技术的进展及应用前景分析[J]. 冶金管理,2011(2):51-53.
HU Junge,GUO Yanling,ZHOU Wentao,et al. Analysis of development and application prospects of american new ironmaking technology for low CO_2 emission[J]. Steel & Management, 2011(2):51-53.

[14] 舟丹. 可再生能源已成全球能源投资热点领域[J]. 中外能源,2015,20(3):98.
ZHOU Dan. Renewable energy has become a hot area of global energy investment[J]. Sino-Global Energy,2015,20(3):98.

[15] BACH Q V,TRINH T N,TRAN K Q,et al. Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass torrefied in various atmospheres[J]. Energy Conversion & Management, 2017, 141:72-78.

[16] WEI Rufei, LI Haiming, CHEN Yulong, et al. Environmental Issues Related to Bioenergy[M]. 2020.

[17] LIU Yiran, SHEN Yansong. Three-dimensional modelling of charcoal combustion in an industrial scale blast furnace[J]. Fuel,2019,258(6):116088.

[18] TRINKEL V,KIEBERGER N,BUERGLER T,et al. Influence of waste plastic utilisation in blast furnace on heavy metal emissions[J]. Journal of Cleaner Production,2015,94:312-320.

[19] ZHOU Di, WEI Rufei, LONG Hongming, et al. Combustion characteristics and kinetics of different food solid wastes treatment by blast furnace[J]. Renewable energy, 2020, 145:

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

530 – 541.

[20] WANG Guangwei, ZHANG Jianliang, LEE Juiyuan, et al. Hydrothermal carbonization of maize straw for hydrochar production and its injection for blast furnace[J]. Applied Energy, 2020, 266(5): 114818.

[21] LU Xiaoluan, MA Xiaoqian, CHEN Xinfei, et al. Co-hydrothermal carbonization of polyvinyl chloride and corncob for clean solid fuel production-ScienceDirect[J]. Bioresource Technology, 2020, 301(C): 1 – 8.

[22] 刘竹林,蒋友源,郑林,等. 生物质炭添加比例对煤粉燃烧性能的影响[J]. 湖南工业大学学报,2020,34(1):85 – 91.
LIU Zhulin, JIANG Youyuan, ZHENG Lin, et al. Effect of biochar addition ratio on combustion performance of pulverized coal[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2020, 34(1): 85 – 91.

[23] 徐润生,郑恒,王炜,等. 炭化温度对高炉喷吹用竹炭微观结构的影响[J]. 钢铁研究学报,2018,30(7):515 – 522.
XU Runsheng, ZHENG Heng, WANG Wei, et al. Effect of carbonization temperature on microstructure characters of bamboo char used for blast furnace injection[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018, 30(7): 515 – 522.

[24] WIJAVANTA A T, ALAM M S, NAKASO K, et al. Combustibility of biochar injected into the raceway of a blast furnace [J]. Fuel Processing Technology, 2014, 117: 53 – 59.

[25] BABICH A, SENK D, FERNANDEZ M. Charcoal behaviour by its injection into the modern blast furnace[J]. ISIJ International, 2010, 50(1): 81 – 88.

[26] 崔平,张磊,杨敏,等. 焦炭溶损反应动力学及其模型研究[J]. 燃料化学学报,2006,34(3):280 – 284.
CUI Ping, ZHANG Lei, YANG Min, et al. Study on kinetics and model of coke loss reaction with CO_2 in blast furnace[J]. Journal of Fuel Chemistry And Technology, 2006, 34(3): 280 – 284.

[27] ANDAHAZY D, SLABY S, LOFFLER G, et al. Governing processes of gas and oil injection into the blast furnace[J]. Transactions of the Iron & Steel Institute of Japan, 2006, 46(4): 496 – 502.

[28] WEI Rufei, ZHANG Lingling, CANG Daqiang, et al. Current status and potential of biomass utilization in ferrous metallurgical industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 68: 511 – 524.

[29] MAYYAS M, NEKOUEI R K, SAHAJWALLA V. Valorization of lignin biomass as a carbon feedstock in steel industry: Iron oxide reduction, steel carburizing and slag foaming[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 219: 971 – 980.

[30] LU Liming, ADAM M, KILBURN M, et al. Substitution of charcoal for coke breeze in iron ore sintering[J]. ISIJ International, 2013, 53(9): 1607 – 1616.

[31] KUMAR U, MAROUFI S, RAJARAO R, et al. Cleaner production of iron by using waste macadamia biomass as a carbon resource[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 158: 218 – 224.

[32] 黄柱成,金芸芸,易凌云,等. 生物质热解特性及其还原铁精矿研究[J]. 烧结球团,2021,46(3):65 – 71.
HUANG Zhucheng, JIN Yunyun, YI Lingyun, et al. Research on biomass pyrolysis characteristics and iron concentrate reduction[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(3): 65 – 71.

[33] BILBA K, ALEX O. Fourier transform infrared spectroscopic study of thermal degradation of sugar cane bagasse[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1996, 38: 61 – 73.

[34] YANG Haiping, YAN Rong, CHEN Hanping, et al. Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis[J]. Fuel, 2007, 86(12 – 13): 1781 – 1788.

[35] LUO Siyi, BO Xiao, HU Zhiquan, et al. Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of biomass in a fixed bed reactor: Influence of temperature and steam on gasification performance[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(5): 2191 – 2194.

[36] KHASRAW D, SPOONER S, HAGE H, et al. Devolatilisation characteristics of coal and biomass with respect to temperature and heating rate for HIsarna alternative ironmaking process[J]. Fuel, 2020, 284: 1 – 11.

[37] KHASRAW D. Gasification and structural behaviour of different carbon sources and resultant chars from rapid devolatilization for HIsarna alternative ironmaking process[J]. Fuel, 2022, 309: 1 – 11.

[38] WEI Rufei, FENG Shanghuan, LONG Hongming, et al. Coupled biomass(lignin) gasification and iron ore reduction: A novel approach for biomass conversion and application[J]. Energy, 2017, 140: 406 – 414.

[39] GUO Dabin, LI Yubiao, CUI Baihui, et al. Direct reduction of iron ore/biomass composite pellets using simulated biomass-derived syngas: Experimental analysis and kinetic modelling [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 327: 822 – 830.

[40] YE Lei, PENG Zhiwei, WANG Liancheng, et al. Preparation of core-shell iron ore-biochar composite pellets for microwave reduction[J]. Powder Technology, 2018, 338: 365 – 375.

[41] 魏汝飞,周笛,徐春保,等. 不同生物质还原氧化铁的特性[J]. 钢铁研究学报,2020,32(3):186 – 194.
WEI Rufei, ZHOU Di, XU Chunbao, et al. Reduction characteristics of iron oxide by different biomass[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(3): 186 – 194.

[42] WEI R, CANG D, Bai Y, et al. Reduction characteristics and

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

kinetics of iron oxide by carbon in biomass[J]. Ironmaking & Steelmaking,2016,43(2):144 – 152.

[43] SEKI I, NAGATA K. Reduction kinetics of hematite powder mechanically milled with graphite [J]. ISIJ International, 2006,46(1):1 – 7.

[44] 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 Siyi,ZHOU Yangmin,YI Chuijie,et al. Direct reduction of iron ore by biomass syngas-iron smelting by biomass composite pellets[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2013,35(7):856 – 861.

[45] 罗思义,马晨,孙鹏鹏. 铁矿 – 生物质复合球团还原行为及还原动力学[J]. 工程科学学报,2015,37(2):150 – 156.
LUO Siyi,MA Chen,SUN Pengpeng. Reduction behavior and reaction kinetics of iron ore-biomass composite pellets[J]. Chinese Journal of Engineering,2015,37(2):150 – 156.

[46] 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 Yongbin,ZHU Guocai,CHI Ruan,et al. An investigation on reduction and magnetization of limonite using biomass [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(3):508 – 513.

[47] 唐惠庆,范立强,马龙,等. 生物质木炭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 Huiqing,FAN Liqiang,MA Long,et al. Phosphorus removal of oolitic high-phosphorus iron ore using biomass char [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014,36(7):867 – 874.

[48] 马玉升,洪陆阔,周朝刚,等. 生物质用于直接还原工艺研究[J]. 钢铁钒钛,2019,40(4):106 – 109;115.
MA Yusheng,HONG Lukuo,ZHOU Chaogang,et al. Application of biomass to the direct reduction process[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2019,40(4):106 – 109;115.

[49] 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 Hongliang,YUAN Peng,DUAN Dongping,et al. Application of biomass to the RHF direct reduction process[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2015,38(5):164 – 170.

[50] KAWAKAMI M,KARATO T,TAKENAKA T,et al. Structure analysis of coke,wood charcoal and bamboo charcoal by raman spectroscopy and their reaction rate with CO_2[J]. ISIJ International,2005,45(7):1027 – 1034.

[51] KAWAKAMI M,TAGA H,TAKENAKA T,et al. Micro pore structure and reaction rate of coke,wood charcoal and graphite with CO_2[J]. ISIJ International,2004,44(12):2018 – 2022.

[52] MANI T,MAHINPEY N,MURUGAN P. Reaction kinetics and mass transfer studies of biomass char gasification with CO_2[J]. Chemical Engineering Science,2010,66(1):36 – 41.

[53] KHALIL R,VARHEGYI G,JAESCHKE S,et al. CO_2 gasification of biomass chars:a kinetic study[J]. Energy & Fuels, 2009,23(1)94 – 100.

[54] HUANG Yanqin,YIN Xiuli,WU Chuangzhi,et al. Effects of metal catalysts on CO_2 gasification reactivity of biomass char [J]. Biotechnology Advances,2009,27(5):568 – 572.

[55] WEI Rufei,LI Haiming,LIN Yifeng,et al. Reduction characteristics of iron oxide by the hemicellulose,cellulose,and lignin components of biomass [J]. Energy & Fuels, 2020, 34(7):8332 – 8339.

[56] WEI Rufei,XIANG Dongwen,LONG Hongming,et al. Reduction of iron oxide by lignin:characteristics,kinetics and superiority[J]. Energy,2020,197:1 – 10.

[57] 魏汝飞,龙红明,李家新,等. 一种用于生产可燃气和 DRI 的生物质含铁团块及其制备方法:中国,CN108570525B[P]. 2020 – 07 – 03.
WEI Rufei,LONG Hongming,LI Jiaxin,et al. A biomass iron-bearing lump used for producing combustible gas and DRI and a preparation method thereof: China, CN108570525B[P]. 2020 – 07 – 03.

[58] 魏汝飞,龙红明,李家新,等. 一种用生物质作为粘接载体制备高强度含铁团块及气铁联产方法:中国,CN107177732B[P]. 2019 – 05 – 17.
WEI Rufei,LONG Hongming,LI Jiaxin,et al. A method for preparing high strength iron-bearing mass and gas-iron co-production using biomass as bonding carrier: China, CN107177732B[P]. 2019 – 05 – 17.

[59] 龙红明,魏汝飞,李家新,等. 一种生物质含铁团块短流程炼钢及生产不锈钢的方法:中国,CN107119166B[P]. 2019 – 05 – 07.
LONG Hongming,WEI Rufei,LI Jiaxin,et al. A method for making steel and producing stainless steel in a short process of biomass iron-bearing lump: China, CN107119166B[P]. 2019 – 05 – 07.

[60] 魏汝飞,龙红明,李家新,等. 一种生物质气化与直接还原铁联产用添加剂及其应用:中国,CN108384579B[P]. 2020 – 07 – 03.
WEI Rufei,LONG Hongming,LI Jiaxin,et al. An additive for biomass gasification and direct reduced iron co-production and its application:China,CN108384579B[P]. 2020 – 07 – 03.

[61] 魏汝飞,龙红明,李家新,等. 一种可燃性气体和直接还原铁的联产方法:中国,CN108374065B[P]. 2020 – 07 – 03.
WEI Rufei,LONG Hongming,LI Jiaxin,et al. A method of co-production of combustible gas and direct reduced iron:China, CN108374065B[P]. 2020 – 07 – 03.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net