

# Applications and Prospects of Bio-energy in Ironmaking Process

Zhengwen Hu<sup>1</sup>, Jianliang Zhang<sup>1</sup>, Haibin Zuo<sup>1</sup>, Zhengjian Liu<sup>1</sup>, Tianjun Yang<sup>1</sup>

1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, 100083, Beijing, China

1. huzhengwen1986@163.com

**Abstract:** Bio-energy is renewable and carbon neutral. Bio-char, obtained from carbonization of biomass, is a kind of solid fuel with high quality. Utilization of biomass in ironmaking process as reducing agent can contribute to energy conservation and emission reduction, and can partially substitute for coal and coke. Research status of the application of biomass in ironmaking process is presented. Application prospects of biomass energy in ironmaking process are analyzed, and a novel bio-energy auxiliary ironmaking process is suggested, which is meaningful for the effective use of biomass energy and for decreasing the consumption of fossil fuels, namely coal and metallurgical coke.

**Keywords:** biomass; bio-char; ironmaking; substitution for coal and coke; low carbon

## 生物质能在炼铁过程中的应用及展望

胡正文<sup>1</sup>, 张建良<sup>1</sup>, 左海滨<sup>1</sup>, 刘征建<sup>1</sup>, 杨天钧<sup>1</sup>

1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京, 中国, 100083

1. huzhengwen1986@163.com

**摘要:** 生物质能是一种碳中性的可再生能源, 生物质经炭化预处理得到的生物质焦是一种优质的固体碳源, 可用作炼铁工艺的还原剂以替煤代焦和节能减排。对生物质能在炼铁过程中应用的研究状况进行了论述, 分析了生物质能在炼铁过程中的应用前景, 并提出了一种新型的生物质能辅助炼铁工艺, 对生物质能的有效利用及炼铁过程的节煤降焦具有一定的参考意义。

**关键词:** 生物质; 生物质焦; 炼铁; 替煤代焦; 低碳

### 1 引言

随着世界气候的逐渐异常, 环保形势日益严峻, “低碳”正成为社会关注的焦点。钢铁生产是传统的高碳耗过程, 其中, 炼铁过程的能源资源消耗量巨大, 环境污染问题突出。此外, 作为高炉炼铁过程必备原料的冶金焦炭日益短缺, 且炼焦过程污染严重。如何实现炼铁过程的低碳、节能、减排及低成本, 对于钢铁企业及社会经济都具有重要意义。

生物质能是唯一一种可再生碳源, 与传统的化石能源相比具有极大的经济、环保优势和社会效益<sup>[1]</sup>。若将其合理应用于炼铁过程, 或能带来钢铁生产的技术革新及成本优化。

国内外研究人员对生物质能的转化利用进行了大量研究, 而对其在炼铁过程中的应用则研究较少。本文对生物质能的概念、特性及其在炼铁过程中的应用

的研究状况进行了论述, 分析指出了生物质能在炼铁过程中应用的未来发展趋势, 对于生物质能的有效利用和炼铁过程的技术进步具有一定的参考价值。

### 2 生物质能基础理论

#### 2.1 生物质能基本概念

生物质可指地球上一切有生命的物质, 是对直接或间接从植物(包括藻类、树木、作物等)所获得有机物质的统称。生物质通常可定义为所有碳氢化合物材料, 主要由C、H、O、N等化学元素组成。生物质资源种类繁多, 主要包括农作物及农业有机剩余物、林木及林业有机剩余物、工业及社会生活有机废弃物等。生物质资源分布广泛, 储量丰富, 据统计, 世界上生物质资源的年产量约为1460亿吨(干重)<sup>[2]</sup>。

生物质能本质上是太阳能的一种表现形式, 它直

接或间接来源于绿色植物的光合作用，并以化学能的形式存储在生物质中。生物质能一直是人类利用的主要能源形势，约占世界能源供应的 10~14%。对于所有植物类生物质，其能量含量十分相近，都在 17~21 MJ/kg（干燥无灰基）的范围内。据估算，每年可从森林及农业剩余物获得的潜在生物质能约为 30EJ，而每年世界范围的能量需求约为 400EJ<sup>[3]</sup>。

## 2.2 生物质能的特点及利用

生物质能具有分布广、产量大、可再生、碳中性等优点。但是，若将其作为一种碳源在炼铁过程等工业生产中广泛应用，仍有一些问题需要解决。

生物质资源通常体积密度小、可磨性差，这使得生物质的存储和运输成本较高，工业加工难度较大；生物质资源的能量密度低、水分含量高，这使得生物质的燃烧不够稳定，燃烧率波动较大。这些因素限制了生物质资源在工业中的直接利用，因此，通常需要对其进行转化处理。生物质资源的化学转化形式包括生物化学转化和热化学转化等，通过转化处理可获得各种燃料或化学物质，图 1 为生物质能化学转化及产物示意图。

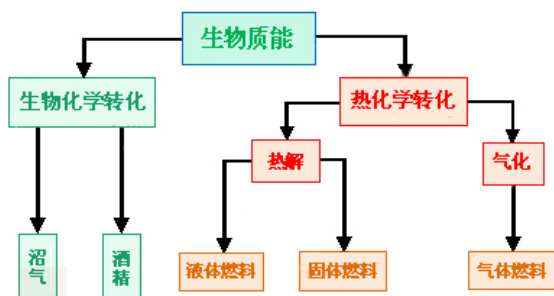


Figure 1. Chemical conversion of biomass energy

图 1. 生物质能的化学转化

其中，生物质经热解处理所得固体产物——生物质焦在炼铁过程中具有较大的应用前景。生物质焦可定义为：生物质在一定温度的缺氧环境下热解，脱除大部分挥发分后所得的高碳固体残余物。与煤焦类似，生物质焦除含有固定碳外，还含有部分挥发分和较少的灰分等物质。热解条件（热解温度、升温速率和保温时间等）直接影响生物质焦的产率、成分组成及特性。一般情况下，随生物质热解温度的提高和保温时间的延长，生物质焦的产率降低、挥发分含量减少、反应性增高。经过热解炭化处理，生物质转变为生物

质焦，其可磨性和能量密度等均得到大幅提高<sup>[4]</sup>。木炭是一种最常见的典型生物质焦，图 2(a)和图 2(b)分别为利用松木制得生物质焦破碎前的侧面和截面 SEM 照片。

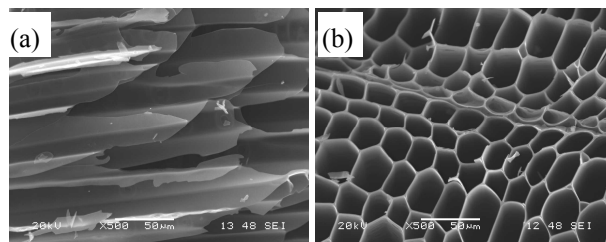


Figure 2. SEM pictures of biomass char before grinding

图 2. 生物质焦破碎前的 SEM 照片

研究人员对各种生物质焦的制备及其特性进行了比较广泛的研究，认为生物质焦是一种高碳、高热值、低污染的优质固体燃料，可代替部分化石燃料<sup>[5-8]</sup>，这为生物质焦在炼铁过程中的应用奠定了理论基础。

一般而言，与煤等化石燃料相比，生物质焦普遍具有以下优点：

(1) 环保优势。与生物质一样，生物质焦也具有可再生、碳中性、低硫、低氮等特点，这有助于缓解化石能源消耗危机和减少 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的排放。

(2) 成分组成优势。生物质焦一般碳含量较高，灰分含量很低，氮、硫、钾、钠等杂质元素含量很少，即成分纯净度较高。

(3) 特性优势。生物质焦一般是多孔结构，其孔隙率、孔容积及比表面积都较高；生物质焦的燃烧性、反应性等特性明显好于煤炭。

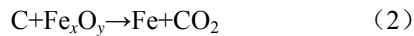
就炼铁过程而言，恰当地利用生物质焦或能起到节能、减排、降成本的积极作用，并能够保证较高的铁水质量，为后续的炼钢工艺创造良好条件。

## 3 生物质能在炼铁过程中的应用研究

炼铁过程需要大量焦炭和煤粉提供热量和还原剂，之前的研究工作普遍集中于焦炭及煤粉的高效利用，而忽视了生物质碳源对于煤、焦的替代作用。

生物质能是碳中性的高碳能源，目前主要用于直接燃烧或与煤混燃以获得热、电。这两种利用方式都需要额外供氧，碳的还原剂功能未得到有效利用，且能量利用率较低。若将生物质应用于炼铁过程，则生物质碳源参与铁矿的还原过程，夺取炉料中的氧，碳的化学功能得到充分利用。

式(1)为生物质直接燃烧的主要化学反应,式(2)为生物质应用于炼铁过程的主要化学反应。



鉴于温室效应加剧、世界气候异常和资源短缺,研究人员对生物质能在炼铁过程中的应用及可行性进行了研究。以下对国内外炼铁过程中生物质能的应用研究进行论述。

### 3.1 中国应用研究状况

中国是农业大国,生物质资源丰富。但我国对于生物质能应用的研究主要集中于直接燃烧发电、与煤混燃发电、气化发电以及制取燃料等,几乎未见有在炼铁过程中应用的研究。

汪永斌等人<sup>[9]</sup>对生物质还原磁化褐铁矿进行了实验研究,发现与用褐煤还原磁化褐铁矿相比,生物质的还原磁化效果较好,且还原温度可降低 100℃以上(降至 650℃左右)。

### 3.2 国外应用研究状况

对生物质在炼铁过程中的应用进行研究的国家,一般以农林业为其经济基础,或是本国化石能源匮乏、能源生产及消耗依赖进口燃料,如巴西、日本、澳大利亚等。欧洲钢铁工业正在开发利用木炭作为高炉用可再生能源的技术,以减少 CO<sub>2</sub> 的排放量。

#### 3.2.1 巴西

巴西是世界上最大的木炭生产国,木炭平均年产量超过 230 万吨,同时,巴西是炼铁过程中生物质能——木炭应用最多的国家。2005 年巴西仅高炉喷吹用的木炭粉就超过 19 万吨,木炭喷吹比达到 100~150 kg/tHM。2007 年,巴西约 35%的铁水是由内部容积小于 300m<sup>3</sup>的小型木炭高炉(使用木炭作为还原剂)生产的,每座平均年产量约 10 万吨<sup>[10]</sup>。

F.G. Emmerich 等人通过实验研究发现,巴巴苏(巴西的一种棕榈树)的完整坚果经 1000℃炭化后得到的生物质焦,可以作为还原剂直接替代高炉所用焦炭<sup>[11]</sup>。实验所得巴巴苏生物质焦的 S、P 含量远低于参考的冶金焦炭,反应性远好于传统焦炭,抗碎强度指标 M<sub>40</sub> 大于 80%,耐磨强度指标 M<sub>10</sub> 小于 8%,抗压强度大于 40MPa(参考冶金焦炭的抗压强度为 15MPa),它是少数能直接替代大容积高炉内焦炭而不用造块的生物质原料之一。将这种高强度生物质焦与传统冶金焦炭混合后用于高炉炼铁,或能减少 SO<sub>2</sub>

等的排放及改善铁水的质量<sup>[12]</sup>。

由于巴西煤的硫和灰分含量高,其高炉喷吹煤粉依赖进口,J.G.M.S. Machado 等人对高炉喷吹煤粉、木炭粉及煤粉与木炭粉混喷进行了研究,以合理利用当地资源并减少对进口煤的依赖<sup>[13]</sup>。他们利用 TGA 方法对巴西煤粉、木炭粉及混料的 CO<sub>2</sub> 反应性进行了分析,并利用德国亚琛工业大学的实验设备,模拟了这些碳粉喷入高炉回旋区内的行为,对其燃烧行为进行了评价。实验结果表明,在所研究的条件下向高炉喷吹木炭粉是切实可行的;巴西煤粉因高灰分而不适合单独喷吹,配加木炭粉后其灰分大大降低;木炭的整体转化率比煤高,即喷吹木炭产生的未燃碳较少,与煤粉喷吹相比,高炉可以接受更大的木炭喷吹量。

P.S. Assis 等人利用模拟装置研究了木炭粉喷入高炉风口的行为,得出在一定的数值范围内,木炭粉的物理参数(孔隙度、粒度、比表面积等)不是更高木炭喷吹比的限制因素,并推论出木炭粒径可以增至 0.162mm 而不会影响其燃烧<sup>[14]</sup>。

R.N.B. Braga 等人对 Acesita 2 号高炉喷吹木炭粉进行了研究,分析了木炭粉喷吹对高炉操作参数的影响,并研究了与木炭粉喷吹相关的经济问题<sup>[15]</sup>。

Ferroeste 集团 Gusa Nordeste 炼铁厂对其三座高炉(1 号高炉 155m<sup>3</sup>, 2、3 号高炉 163m<sup>3</sup>)进行了为期 18 个月的木炭粉喷吹,在无富氧鼓风的条件下,实现了木炭粉喷吹比 50~60 kg/tHM 和木炭置换比 1:1<sup>[16]</sup>。

#### 3.2.2 日本

钢铁强国日本对生物质能在炼铁过程中的应用进行了较深入的研究。Takehiro Matsumura 等人对炼焦过程中配加木质生物质制备冶金焦炭进行了研究,并对所得焦炭的特性进行了分析<sup>[17]</sup>。结果表明,将生物质在室温条件下压制成小于 10mm 的颗粒后,可以将炼焦原料中生物质的配比增至 1.5%,并可防止焦炭产量的降低;200℃压制成型生物质的密度比室温压制的高 60%,这可以进一步提高焦炉中生物质的配比,并防止焦炭强度的降低;将压制成型的木质生物质与煤混合后制备冶金焦炭是可行的。

Hirokazu Konishi 等研究了生物质焦中残余挥发分对含生物质焦复合球团中铁矿还原的影响<sup>[18]</sup>。他们将日本柏树木材从室温分别加热至不同温度(550℃、800℃和 1000℃)进行炭化,从而获得残余挥发分含量不同的生物质焦,将其破碎筛分成一定的粒度后与试剂级 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合并加入粘结剂造球,最后,在 N<sub>2</sub> 气氛下将所得复合球团分别加热至 800℃、900℃和



1000℃进行自还原。实验得出, 550℃炭化生物质焦的残余挥发分很多, 主要为 H<sub>2</sub>, 用该生物质焦制成的球团在 800℃和 900℃条件下保温 60min 的还原率分别为 19%和 40%, 高于其他的含生物质焦复合球团; 在 1000℃和保温 60min 的自还原条件下, 三种含不同生物质焦球团的还原率均超过 90%, 即在 1000℃时, 含生物质焦复合球团的还原性不受残余挥发分的影响。

Shigeru Ueda 和 Kentaro Watanabe 等人对配加生物质焦的含碳铁矿压块进行了反应性和还原行为研究, 以实现高炉的低还原剂操作<sup>[19]</sup>。研究结果表明, 在惰性气氛下, 配加生物质焦铁矿压块的反应性较好, 开始还原温度约为 550℃, 远低于配加焦炭的铁矿压块。含生物质焦铁矿压块的反应模型分析表明, 生物质焦能改善含碳铁矿压块的还原行为, 尤其是在较低温度区域。随后, 他们经过进一步研究提出了新型的含碳铁矿压块炉料, 即向含生物质焦铁矿压块中添加亚微米级铁氧化物粉末(通过钢铁厂钢板酸洗液的流化焙烧而获得)<sup>[20]</sup>。压块中的生物质焦包裹了活跃的铁氧化物粉末, 这些粉末可作为碳气化反应的催化剂, 从而提高了含生物质焦压块的反应性, 高炉使用这种新型炉料可以降低还原剂用量。

Hiroshi Nogami 等人对木炭高炉炼铁系统的火用进行了分析, 并与传统高炉炼铁系统进行对比, 结果表明, 木炭炼铁系统需要更多的焓和火用输入, 然而在其他工艺中却可生产出更多可用能量, 因此, 木炭炼铁系统的火用损失与传统炼铁系统类似。此外, 有效利用生物质资源可以降低大气中 CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的排放, 与传统炼铁工艺相比, 喷吹木炭粉能减少 30%以上的净 CO<sub>2</sub> 排放量; 木炭高炉产生的渣量不到现代传统高炉的一半, 且铁水质量有望得到提高<sup>[21]</sup>。

### 3.2.3 澳大利亚

澳大利亚研究人员 Vladimir Strezov 对松木锯末还原纽曼铁矿进行了实验研究, 并进行了相应的动力学分析<sup>[23]</sup>。结果表明, 纽曼铁矿中加入质量分数为 10% 的锯末, 便可将赤铁矿 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 完全还原成磁铁矿 (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), 并将部分磁铁矿还原成浮氏体 (FeO); 加入质量分数为 30% 的锯末, 便足以将纽曼铁矿还原成金属铁, 还原反应开始于 670℃, 至 1200℃几乎反应完全。因此, 生物质在铁矿预还原和直接还原炼铁方面具有很大的开发潜力。

### 3.2.4 其他国家

德国亚琛工业大学的 A. Babich 等人在高炉模拟条件下, 对木炭粉喷吹及木炭粉和煤粉混和喷吹进行

了研究<sup>[22]</sup>。他们对高炉风口回旋区和炉身部位的状况进行了模拟, 并利用数学模型估算了喷吹各种木炭粉对高炉整体行为及热平衡的影响。回旋区模拟条件下的同步热分析及喷吹试验表明, 木炭粉燃烧的比煤粉稍快, 即木炭粉的燃烧行为好于煤粉; 炉身模拟条件下的同步热分析及塔曼炉试验表明, 木炭粉的碳素熔损反应快于煤粉, 随着温度的升高 (900~1300℃), 两者反应速率之间的差距减小; 当木炭颗粒附在焦炭表面时, 焦炭的 CO<sub>2</sub> 反应性降低约 20%。

此外, 他们还对生物质焦的制备及其特性进行了研究, 认为生物质焦的化学组成取决于炭化条件, 而不是生物质种类; 生物质焦的比表面积比煤粉大 60~350 倍, 是一种高反应性碳料。考虑到生物质焦粉的碳中性, 利用数学模型计算得出, 用生物质焦粉完全取代煤粉时高炉操作的 CO<sub>2</sub> 输入量减少 40%左右。

芬兰的 Jarmo Södermana 等人利用热力学模型对高炉炼铁过程中喷吹生物质的可能性进行了研究<sup>[24]</sup>, 结果表明, 尽管高炉喷吹生物质的焦炭置换比很低(约 25%), 但是综合考虑将来的焦炭价格和污染物排放, 使用生物质作为高炉的辅助还原剂会是一个经济可行的方法。

综上所述, 目前生物质能在炼铁过程中的应用研究较少, 且仅仅限于木质生物质及木炭, 而对于其他生物质能(秸秆类生物质等)的利用研究则少有涉及。

## 4 生物质能炼铁前景及生物质辅助炼铁工艺

### 4.1 生物质能炼铁存在的问题

生物质能具有化石能源所不可比拟的优势, 但是若将其广泛应用于炼铁, 仍存在一些需要解决的问题。

首先, 生物质能虽然储量丰富, 但是集中程度不高, 成分差异较大, 水分含量普遍较高, 体积密度和能量密度较低, 可磨性较差。这就需要对各种生物质资源进行采收、集中、分类、干燥, 然后进行必要的破碎、压制成型或预处理(炭化等), 以获得较适合工业运输、加工和应用的生物质能形式。

其次, 生物质能的预处理工序会产生较多的副产物(如对生物质进行炭化生产生物质焦时会产生大量可燃气体、生物油等化学物质), 如何在保证生物质焦产量和质量的前提下合理采集利用各种副产物, 仍需进行大量的研究和实践。

再次, 生物质能工业利用体系不够完善, 缺乏稳定的生物质资源供应渠道, 这限制了生物质能的广泛应用; 此外, 且生物质炼铁的研究开发不足, 技术产

业化基础薄弱。

尽管存在以上问题，生物质能仍旧是未来炼铁工业的重要替代能源，深入研究生物质能的利用将极大促进炼铁过程的技术进步和可持续发展。

#### 4.2 生物质能在炼铁过程中应用的前景

生物质能在炼铁过程中主要是用于替代部分煤粉或焦炭等化石能源，即替煤代焦。生物质能在炼铁工艺中可起到重要的辅助作用，具体应用方式（见图3）如下：

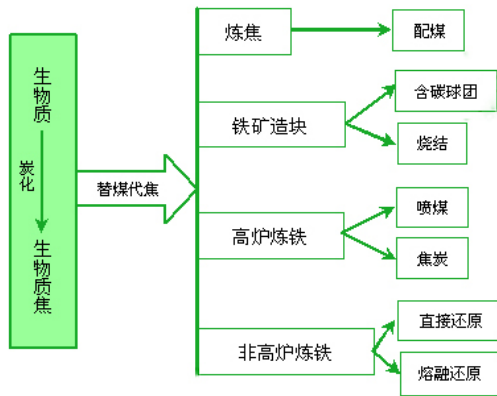


Figure 3. Application means of biomass energy  
图 3. 生物质能的应用方式

(1) 用于焦炉炼焦。生物质或生物质焦能够代替炼焦配煤中的部分煤炭，将生物质或生物质焦按一定比例与炼焦煤混合后生产高炉焦炭，可以降低焦炉炼焦过程的污染。

(2) 用于铁矿造块。利用生物质能可以生产新型的含碳球团等炉料，将这些高反应性炉料应用于高炉，可实现高炉低还原剂操作或低碳炼铁。将生物质能用于铁矿石烧结配料，或能代替部分焦粉，从而可降低烧结过程中  $SO_2$ 、 $NO_x$  等污染物的排放。

(3) 用于高炉炼铁。生物质或生物质焦可以部分或完全代替高炉喷吹用煤粉而通过高炉风口喷入，这已经在工业生产中得到了实践。某些高强度生物质焦可以与焦炭混合直接加入高炉，从而可以代替部分冶金焦炭。

(4) 用于非高炉炼铁。生物质或生物质焦或可代替煤基直接还原工艺和煤基熔融还原工艺中的煤粉，起到发热剂和还原剂的作用，从而可较清洁地生产高质量直接还原铁（DRI）和铁水。

此外，生物质（焦）还可用于铁矿的还原磁化、

球团矿的焙烧及热风炉的加热等。尽管生物质能在炼铁过程中的应用较少，且大多处于起步阶段，但是其开发潜力巨大。

#### 4.3 新型生物质能辅助炼铁工艺

世界气候异常，资源、环境形势日益严峻，这使得一些钢铁企业开始考虑低成本、环境友好型生物质能的合理应用。以下提出一种新型的环境、资源友好型的生物质能辅助炼铁工艺，见图4。

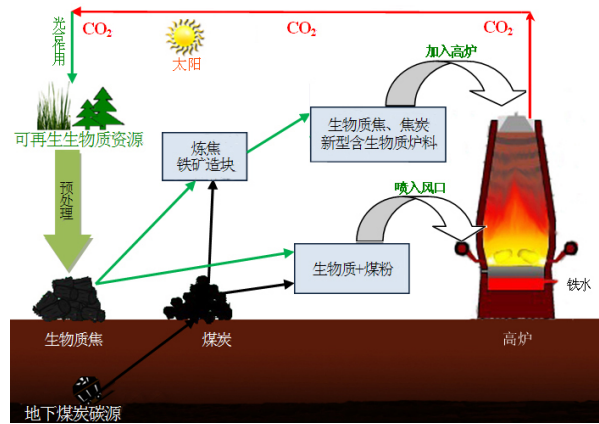


Figure 4. Scheme of bio-energy auxiliary ironmaking process  
图 4. 生物质能辅助炼铁工艺图

该工艺将生物质能作为炼铁过程的重要辅助碳源，大大减少了地下煤炭资源在铁水生产中的消耗。由图中可以看出，绿色植物在其生长过程中，经过光和作用将大气中的  $CO_2$  固定成生物质碳源，将这些生物质碳源经过适当的预处理即可用于焦炉炼焦、铁矿造块等，所制得的新型含生物质炉料可以单独或与传统炉料混合后从炉顶加入高炉进行炼铁，而制得的生物质（焦）粉则可以部分或全部代替煤粉通过高炉下部风口喷入，从而可以大幅减少化石碳源的使用和污染物的排放；同时，高炉生产消耗碳源后排放到大气中的  $CO_2$  气体可以再次被绿色植物固定，从而部分实现了炼铁过程的闭合碳循环，即碳中性循环。

生物质富含 C、H 等元素，可以作为炼铁过程的发热剂和还原剂而代替煤粉或焦炭。理论上，炼铁过程中所有碳源和能源都可以用生物质能代替。尽管完全利用生物质能进行铁水生产在一段时间内不切实际，但是，有效利用生物质能将极大促进炼铁过程的节能减排和技术进步。

#### 5 结论

生物质能是可更新清洁能源,工业应用潜力巨大。本文对生物质能炼铁的研究状况、应用前景等进行了研究,得出如下结论:

(1) 生物质能储量大、分布广, 是唯一的可再生碳源, 其热解产物——生物质焦的灰分、硫等杂质含量较低, 反应性较高, 是一种优质的碳中性固体燃料。

(2) 生物质(焦)具有较好的冶金性能, 可代替部分煤粉或焦炭而用作炼铁过程的热源或还原剂, 从而起到节能减排、降低化石燃料使用比例的效果。

(3) 生物质能在炼铁过程中有着广阔的应用前景, 可用于焦炉炼焦、铁矿造块、高炉炼铁、非高炉炼铁等过程, 理论上可以替代全部煤炭或焦炭, 具有重要的社会效益和经济效益。

(4) 新型生物质能辅助炼铁工艺充分发挥了生物质的替煤代焦作用, 大大降低了炼铁生产过程对地下煤炭资源的消耗, 从而可以大大降低  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等污染物的排放, 部分实现炼铁过程的碳中性循环, 有利于炼铁过程的技术进步和可持续发展。

## References (参考文献)

- [1] Ayhan Demirbaş. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals[J], *Energy Conversion and Management*, 2001, 42, P1357-1378.
- [2] Serdar Yaman. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45, P651-671.
- [3] Peter McKendry. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 83, P37-46.
- [4] Hanisom Abdullah, Hongwei Wu. Biochar as a Fuel: 1. Properties and Grindability of Biochars Produced from the Pyrolysis of Mallee Wood under Slow-Heating Conditions[J], *Energy & Fuels*, 2009, 23, P4174-4181.
- [5] Didem Özçimen, Ayşegül Ersoy-Meriçboyu. Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35, P1319-1324.
- [6] Filiz Karaosmanoğlu, Aslı Işığögür-Ergüdenler, Aydın Sever. Biochar from the Straw-Stalk of Rapeseed Plant[J]. *Energy & Fuels*, 2000, 14, P336-339.
- [7] Jeng-Chyan Muti Lin. Development of a high yield and low cycle time biomass char production system[J]. *Fuel Processing Technology*. 2006, 87, P487-495.
- [8] Lúcio Álvaro, Sampaio Ronaldo Santos. Turning biomass into metallurgical charcoal through a new clean carbonization process[C]. *Proceedings of 2nd International Meeting on Ironmaking and 1st International Symposium on Iron Ore*, ABM Publishers, São Luís City-Maranhão State-Brazil, 2004, 2, p1133-1146.
- [9] 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), P508-513.
- [10] 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), P508-513.
- [10] J.G.M.S. Machado, E. Osório, A.C.F. Vilela, et al. Consumption Of Coals And Charcoal By Secondary Reactions At Their Injection Into Blast Furnaces[C]. *Proceedings of 3rd International Meeting on Ironmaking and the 2nd International Symposium on Iron Ore*. ABM Publishers, São Luís City-Maranhão State-Brazil, 2008, 3, P802-809.
- [11] F.G. Emmerich, C.A. Luengo. Babassu charcoal: a sulfurless renewable thermo-reducing feedstock for steelmaking[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1996, 10(1), P41-44.
- [12] F.G. Emmerich, C.A. Luengo. Reduction of emissions from blast furnaces by using blends of coke and babassu charcoal[J]. *Fuel*, 1994, 73(7), P1235-1236.
- [13] J.G.M.S. Machado, E. Osório, A.C.F. Vilela, 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), P9-15.
- [14] P.S. Assis, C.F.C. De Assis, H.L. Mendes. Effect of charcoal physical parameters on the blast furnace powder injection. *AIS-Tech 2009-Proceedings of the Iron and Steel Technology Conference*, AISTECH, St. Louis- Mo.-USA, 2009, 1, P345-353.
- [15] R.N.B Braga, H.T. Goncalves, R. Santiago, et al. Injection of Pulverized Charcoal into NO.2 Blast Furnace of Acesita[J]. *Metallurgia ABM*, 1986, 42(343), P389-394.
- [16] R. Nascimento, A. Almeida, E. Oliveira, et al. 18 months of charcoal fines' injection into Gusa Nordeste's blast furnaces[C]. *Proceedings of 3rd International Meeting on Ironmaking and the 2nd International Symposium on Iron Ore*. ABM Publishers, São Luís City-Maranhão State-Brazil, 2008, 3, P845-856.
- [17] Takehiro Matsumura, Morimasa Ichida, Tetsuya Nagasaka, et al. Carbonization Behaviour of Woody Biomass and Resulting Metallurgical Coke Properties[J]. *ISIJ International*, 2008, 48(5), P572-577.
- [18] Hirokazu Konishi, Kazuhira Ichikawa, Tateo Usui. Effect of Residual Volatile Matter on Reduction of Iron Oxide in Semi-charcoal Composite Pellets[J]. *ISIJ International*, 2010, 50(3), P386-389.
- [19] Shigeru Ueda, Kentaro Watanabe, Kazunari Yanagiya, et al. Improvement of Reactivity of Carbon Iron Ore Composite with Biomass Char for Blast Furnace[J], *ISIJ International*, 2009, 49(10), P 1505-1512.
- [20] Kentaro Watanabe, Shigeru Ueda, Ryo Inoue, et al. Enhancement of Reactivity of Carbon Iron Ore Composite Using Redox Reaction of Iron Oxide Powder[J], *ISIJ International*, 2010, 50(4), P524-530.
- [21] Hiroshi Nogami, Jun-ichiro Yagi, Ronaldo Santos Sampaio. Exergy Analysis of Charcoal Charging Operation of Blast Furnace[J]. *ISIJ International*, 2004, 44(10), P1646-1652.
- [22] Vladimir Strezov. Iron ore reduction using sawdust: Experimental analysis and kinetic modeling[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31, 1892-1905.
- [23] Alexander Babich, Dieter Senk, Miguel Fernandez. Charcoal Behavior by Its Injection into the Modern Blast Furnace [J]. *ISIJ International*, 2010, 50(1), P81-88.
- [24] Jarmo Söderman, Henrik Saxén and Frank Pettersson. Future potential for biomass use in blast furnace ironmaking[J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2009, 26, P567-5