

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.01.018

农作物废弃物含碳球团还原行为研究

刘竹林¹, 王发龙², 王建丽¹, 高泽平¹, 刘汉辉¹

(1. 湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南华菱湘潭钢铁有限公司 技术中心, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 将农作物废弃物炭化产品与铁精矿粉制成含碳球团, 进行直接还原试验研究。试验结果表明, 含碳球团在 1 200~1 300 °C 范围内, 铁氧化物能在 15~20 min 内迅速被还原, 高温保持时间以 15~20 min 为宜; 随温度的升高球团的还原度逐渐增大, 球团还原适宜温度为 1 200 °C; 球团的失重率和还原度随球团配炭比的增加呈上升趋势, 较合理的球团碳氧比为 0.9; 生物炭较高的含碳量和适当的挥发分含量均有利于球团的还原; 含碳球团在空气中能快速还原, 但存在部分再氧化现象。

关键词: 农作物废弃物; 含碳球团; 失重率; 还原度

中图分类号: TF559

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)01-0087-06

Study on the Reduction Process of Carbon-Bearing Pellets from Agricultural Waste

Liu Zhulin¹, Wang Falong², Wang Jianli¹, Gao Zeping¹, Liu Hanhui¹

(1. School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Technology Center, Hunan Valin Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd., Xiangtan Hunan 411101, China)

Abstract: Researched the reduction examination of carbon-bearing pellets, which was prepared from carbonization products of agricultural and forest wastes and iron concentrate powder. The result showed that the carbon-bearing pellets could be reduced rapidly at 1 200~1 300 °C in 15~20 min and the proper holding time at high temperature was 15~20 min; and the reduction of pellet increased with the rise of temperature and the better reduction temperature was 1 200 °C; the weight loss rate and reduction degree of pellet increased with the rise of carbon proportion and the proper carbon oxygen ratio was 0.9; the higher carbon content and appropriate volatile content in biological carbon were benefit to the pellet reduction; carbon bearing pellets could be quickly reduced in the air, but there was some re-oxidization phenomenon.

Keywords: agricultural waste; carbon-bearing pellet; weight loss rate; reduction

0 引言

近年来, 含碳球团性能的研究受到冶金工作者的极大关注。含碳球团是指由含铁粉料配以固体还原剂(煤粉、碳粉和焦粉等)和适当的黏结剂, 经充分混合后经造球机造球或压球机压制而成的一种

含碳含铁的小球或冷压块^[1]。

生物炭原料来源广泛, 稻壳、花生壳、棉壳、锯末、木屑等皆可用作原料生产棒炭。这些原料中含碳量均较高, 小麦、玉米等秸秆中碳的质量分数约为 40%, 谷壳中碳的质量分数达 43% 以上^[2]; 而且这些生物炭灰分少, 硫、磷等杂质含量也很低, 用于

收稿日期: 2013-11-20

基金项目: 湖南省科技计划基金资助项目(2012FJ3037)

作者简介: 刘竹林(1965-), 男, 湖南茶陵人, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为烧结球团与高炉炼铁,

E-mail: zhulinliu65@163.com

钢铁冶炼可提高产品质量。农、林废弃物靠吸收大气中的 CO_2 和利用光能生长,属于可再生的洁净燃料,而且不会额外增加大气中的 CO_2 ,是一种 CO_2 中性物质,即具有 CO_2 零排放的特点^[3]。农作物废弃物在炼铁中的利用可解决由于农村焚烧农、林废弃物产生大量气体及气溶胶组分而带来雾霾天气的问题。另外,由于生物质燃烧所生成的灰呈碱性,有益于抑制 SO_2 、 NO_x 等污染物的生成^[4]。

快速还原含碳球团时,温度、配碳量、黏结剂、反应时间等均对其还原度、金属化率有一定影响^[5-11]。21世纪初,日本在使用雪松碎屑、木炭、竹炭等生物质替代部分煤粉还原铁矿石方面做了大量工作^[12-14],但国内的研究多以煤粉含碳球团为主。本文用生物炭代替煤粉来制作含碳球团,并通过试验探讨球团的还原行为,为实现农、林废弃物直接还原铁矿石提供理论依据。

1 试验原料与试验方法

1.1 试验原料

制备含碳球团的原料^[15]是:铁精矿粉由湖南华菱湘潭钢铁有限公司提供,化学成分见表1;还原剂为稻壳、花生壳及木屑等原料通过破碎、压制成型、低温(300~350℃)干馏而成的生物炭,包括炭粉A和炭粉B,炭粉A的成分见表2;黏结剂为膨润土,其成分见表3。

表1 铁精矿粉化学成分

Table 1 Chemical components of iron concentrate powder %

成分	TFe	S	P	FeO	SiO ₂
质量分数	63.55	0.05	0.01	27.02	5.47
成分	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	H ₂ O
质量分数	2.86	0.93	1.00	0.33	10.20

表2 炭粉A化学成分

Table 2 Chemical components of carbon powder A %

成分	FC _d	V _{daf}	A _d	S _{t,d}	M _{ad}
质量分数	61.82	32.10	3.48	0.05	2.60

注:FC_d为空气干基固定碳;V_{daf}为干燥无灰基挥发分;A_d为空气干基灰分;S_{t,d}为干基全硫;M_{ad}为内部含水。

表3 膨润土化学成分

Table 3 Chemical components of bentonite %

成分	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	K ₂ O ₃	Na ₂ O	烧损
质量分数	12.65	1.02	4.19	53.25	0.43	0.3	14.39

由表1可知,铁精矿粉中FeO的质量分数为27.02%,由此可推算出Fe₂O₃的质量分数约为60.76%,总氧量为24.23%。铁精矿粉的品位63.55%, $w(\text{TFe})/w(\text{FeO})=2.35$,属于纯磁铁矿。

由表2可知,生物炭A中灰分和硫含量较低,灰分低有利于高炉减少熔剂用量和低硅生铁冶炼^[16];生物炭中固定碳较低,挥发分较高,主要是因为自制过程中选择较低炭化温度,炭化不彻底所致。挥发分在还原过程中有一定的还原作用,因为当温度达到700℃时挥发分开始裂解产生H₂和C。挥发分的裂解与加热速度有关,若加热速度慢,含碳球团内的挥发分在没有达到碳氢化合物的裂解温度时就开始析出,起不到还原作用^[17]。

1.2 配炭计算与造球

制备含碳球团首先需进行配炭计算。假设配置质量为 m 的铁精矿粉所需还原剂生物炭的质量为 m_c ,则

$$n(\text{O})=n(\text{Fe}^{2+})+1.5n(\text{Fe}^{3+});$$

$$\text{设 } n(\text{C}):n(\text{O})=a, \text{ 则 } m_c = \frac{12n(\text{O}) \cdot a}{w(\text{C})};$$

$$\text{还原剂占总量的质量分数 } f = \frac{m_c}{m_c + m}。$$

式中: $n(\text{O})$ 是质量为 m 的铁精矿粉中与铁结合的氧的量, mol;

$n(\text{Fe}^{2+})$ 是质量为 m 的铁精矿粉中Fe²⁺的量, mol;

$n(\text{Fe}^{3+})$ 是质量为 m 的铁精矿粉中Fe³⁺的量, mol;

$n(\text{C})$ 是所需还原剂含碳的量, mol;

$w(\text{O})$ 是生物炭中固定碳的质量分数;

a 是碳氧的量比,考虑到生物炭中有较高挥发分,而挥发分中有大量C和H₂等还原性物质,故取 $a=0.8, 0.9, 1.0$ 。

碳氧比 a 取不同值时,按以上计算方法计算配制1 kg铁精矿粉所需的生物炭粉质量,结果如表4所示。

表4 不同碳氧比时所需生物炭量

Table 4 Biological carbon amount needed at different carbon oxygen ratio

还原剂	a	m_c/kg	$f/\%$
生物炭	0.8	0.24	19.35
	0.9	0.27	21.26
	1.0	0.29	22.48

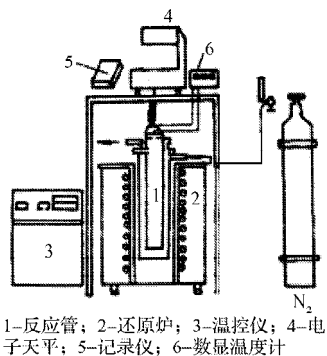
将称量好的铁精矿粉、生物炭粉和膨润土(外配6%)进行混料,在圆盘造球机上进行混料造球。从造好的球中筛选出直径为8~12 mm的球团。为了使球团在还原过程中能够承受预热阶段的热应力,保证球团不破裂,并尽可能减少因球团失水对还原试验结果的影响,球团须进行干燥,干燥温度为105℃,时间保持2 h。

1.3 试验方法

采用热天平减重法,在自制硅钼棒电炉中加热

还原含碳球团。将干燥过的含碳球团分别在 1 000, 1 100, 1 200, 1 300 °C 恒温条件下进行还原试验; 还原时间分别设定为 5, 10, 15, 20 min; 试验分别在 N_2 和空气气氛下进行, N_2 流量设定为 15 L/min。

试验时将 10 个含碳球团放入吊篮中, 当炉温升至设定还原温度恒温 5 min 后, 将吊篮快速置于竖式电炉内, 吊篮上端与电子天平相连。还原结束后迅速将试样从还原炉取出, 放入通有 N_2 的管式炉中冷却至室温。还原试验装置剖面图如图 1 所示。



1-反应管; 2-还原炉; 3-温控仪; 4-电子天平; 5-记录仪; 6-数显温度计

图1 还原炉剖面图

Fig. 1 The section of reducing furnace

1.4 试验参数计算

对于普通铁矿石, 还原度的计算可用减重法进行测量。对于含碳球团, 用减重法测量还原度极为困难, 因为含碳球团的失重量除了失氧量外, 还有失碳量, 析出的挥发分量, 被蒸发的残留水量, 因此, 需采用相应的辅助测量方法。大多数研究者采用化学分析法, 分析其中的全铁、金属铁、FeO 含量; 但化学分析只能显示出还原过程中的宏观结果, 不能完全描述出还原过程。因此, 本次试验采用含碳球团还原度修正失重法, 即以相同质量的含碳氧化铝球团来间接测定球团的水分与挥发分析出的质量分数 f_{A-P} 。还原度计算式^[17]由

$$R = \frac{4}{7m_O} (\Delta m_{\Sigma} - f_{A-P}m)$$

可变化为

$$R = \frac{4}{7m_O} (f_{\Sigma} - f_{A-P})m \times 100\%, \quad (1)$$

以上式中: m_O 为铁氧化物中的含氧量, g;

Δm_{Σ} 为总失重量, g;

f_{A-P} 为含碳氧化铝球团的水分与挥发分析出的质量分数 (除碳以外的失重分数), %;

m 为含碳球团 (或含碳氧化铝球团) 的质量, g;

f_{Σ} 为总失重率, %。

在不同温度、不同碳氧比条件下, 对含碳氧化铝球团的水分与挥发分析出的质量分数进行试验测定,

结果如表 5 所示。根据表 5 的数据和式 (1) 分别计算出各组含碳球团不同失重率所对应的还原度。

表5 不同条件下含碳氧化铝球团的 f_{A-P}

Table 5 f_{A-P} of carbon-bearing alumina pellet under different conditions

温度 / °C	碳氧摩尔数比	f_{A-P} / %
1 000	0.8	5.76
	0.9	6.17
	1.0	6.74
1 100	0.8	6.30
	0.9	6.64
	1.0	7.35
1 200	0.8	6.32
	0.9	6.65
	1.0	7.49
1 300	0.8	6.33
	0.9	6.66
	1.0	7.49

2 试验结果及分析

2.1 含碳球团的配碳比

将不同碳氧摩尔比的含碳球团在 1 200 °C 条件下恒温 20 min, 其失重率和还原度结果如表 6 所示。在 1 200 °C 恒温时, 不同碳氧摩尔比的含碳球团的还原度随时间变化的曲线如图 2 所示。

表6 不同碳氧比含碳球团的失重率和还原度

Table 6 Weight loss rate and reduction degree of carbon-bearing pellets at different carbon oxygen ratios

碳氧摩尔比	失重率 / %	还原度 / %
0.8	34.16	86.29
0.9	35.68	92.17
1.0	36.08	92.20

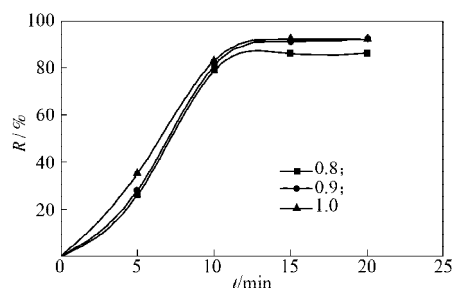


图2 不同碳氧比含碳球团的还原度与还原时间的关系

Fig. 2 Relationship between reduction and time of pellets at different carbon oxygen ratios

由表 6 可知, 碳氧比为 1.0 的含碳球团的还原度为 92.20%, 比碳氧比为 0.9 的含碳球团的还原度仅高 0.03%, 较碳氧比为 0.8 的含碳球团的还原度高 5.91%。

由图 2 可知, 3 组含碳球团前 10 min 还原较快, 20 min 时还原度达到高点, 15 min 时还原度达到次高点。生物质含碳球团比普通煤粉球团 (一般需还原 25~30

min) 还原快的主要原因是, 生物炭具有更高的比表面积和良好的反应性。碳氧比高的球团还原度均比碳氧比低的球团要高, 碳氧比为 1.0 的球团的还原速率比其他两种球团要快。造成此现象的原因是, 当球团内的碳氧比增加后, 铁氧化物与碳的接触面积增大, 而过剩的碳也会加速碳的气化反应; 同时, 配碳量的增加导致挥发分含量也增加, 挥发分裂解出的 H_2 含量也发挥了其在高温下还原能力较强的优势。

考虑到碳氧比为 1.0 与 0.9 的含碳球团的还原度相差甚微, 且随着配碳量的增加球团的成球性能及高温强度会明显减弱, 故球团碳氧比选 0.9 为宜。

2.2 含碳球团的还原温度

为研究温度对含碳球团还原性能的影响, 将碳氧比为 0.9 的含碳球团分别在不同温度下进行恒温反应, 得到试样在还原 20 min 时的失重率和还原度, 结果如表 7 所示; 含碳球团还原度随时间变化的曲线如图 3 所示。

表 7 不同还原温度下含碳球团的还原结果

Table 7 Reduction result of carbon-bearing pellet at different temperature

温度 / °C	最大失重率 / %	还原度 / %
1 000	27.38	67.34
1 100	33.35	84.80
1 200	35.68	92.17
1 300	35.78	92.45

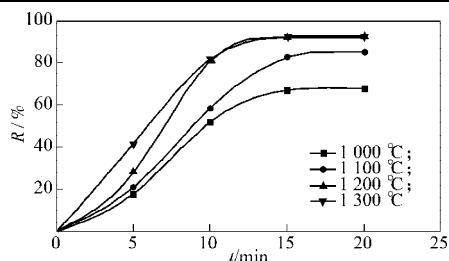


图 3 不同温度下含碳球团还原度与还原时间的关系

Fig. 3 Relationship between reduction and time of pellets at different temperatures

由表 7 可知, 当温度为 1 200 °C 时, 球团的还原度为 92.17%, 比 1 100 °C 时高 7.37%, 比 1 000 °C 时高 24.83%; 但 1 300 °C 时球团的还原度与 1 200 °C 时相差甚微。含碳球团在相同的碳氧摩尔比下, 还原温度越高, 失重越快。这是因为较高温度条件下, 碳的气化反应达到平衡时的 CO 浓度较高, 铁氧化物的直接还原反应较快、较充分; 反之, 较低温度下, 碳气化反应平衡时 CO 浓度处于较低水平, 难以推动铁氧化物的快速还原, 比较明显的是 1 000 °C 时还原度最高点不到 70%。

另外, 在还原过程中, 挥发分存在一个还原作用开始温度和一个还原作用开始激烈进行温度^[18]。只

有达到一定的温度后, 挥发分基本析出, 挥发分的还原作用才开始激烈进行。温度提高到 1 100 °C 时, 挥发分的还原作用明显提高, 还原的速率也明显加快。

对比表 7 和图 3 中含碳球团在 1 200 °C 和 1 300 °C 条件下的还原结果可知, 2 种温度下还原后的还原度及最大失重率均相差不大, 因为生物炭含有大量微气孔, 比表面积比煤粉大 60~350 倍^[18], 拥有巨大的反应面积和较高的 CO_2 反应率, 1 200 °C 时就能快速进行, 挥发分的作用也已经发挥充分, 因此过度提高温度意义不大。

由于直接还原的吸热作用, 球团的还原度能随温度升高而增大, 但 1 200 °C 后效应明显减弱, 考虑能耗与成本, 该球团的适宜还原温度为 1 200 °C。

2.3 炭粉含碳量

由于含碳球团中的挥发分对球团的还原有促进的作用, 本次试验也采用 2 种不同碳含量和不同挥发分含量的生物炭粉制成含碳球团, 由此分析不同含碳量和挥发分对球团还原性能的影响。表 8 为加入了少量皂土的自制炭粉 B 的化学组成。

表 8 炭粉 B 化学成分

Table 8 Chemical components of carbon powder B %

成分	FC_d	V_{daf}	A_d	$S_{t,d}$	M_{ad}
质量分数	59.79	25.88	14.20	0.05	5.13

由表 8 可知, 由于在生产过程中加入了少量皂土, 炭粉 B 中灰分比炭粉 A 中灰分高 10.72%。灰分的主要成分是 SiO_2 和 Al_2O_3 , 造球时能增强球团的黏结性, 有助于生球强度的提高。计算表明: 配制 1 kg 铁精矿粉所需该碳粉量为 0.275 kg, 还原剂占总质量的 21.57%。

用炭粉 A 和炭粉 B 制成的 2 种不同含碳量的含碳球团, 在 1 200 °C 的温度下恒温进行还原反应, 还原度随时间的变化规律如图 4 所示。

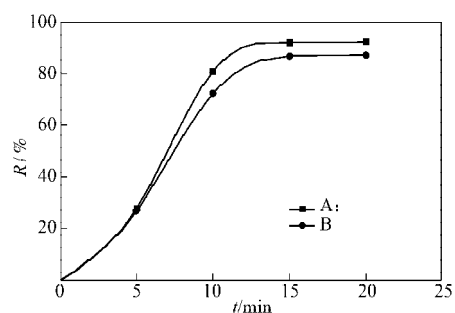


图 4 不同含碳量球团还原度与还原时间的关系

Fig. 4 Relationship between reduction and time of different pellets

由图 4 可知, 2 种不同含碳量的炭粉制成的球团在相同碳氧比、相同还原温度下进行还原, 炭粉 B 在

还原20 min时的还原度为87.35%，比炭粉A低4.82%。其原因是，炭粉B含碳量比炭粉A低，挥发分也低6.22%。因为含碳量低，灰分高，灰分中主要成分SiO₂容易和铁氧化物中的FeO结合，增加了还原的难度；同时由于挥发分含量低，裂解析出的H₂、CO等还原性气体量也相应减少。反之，高挥发分的炭粉随着挥发分的逸出在球团内会产生空位，这些空位有利于CO在球团内的快速扩散，促进球团的还原过程^[19]。但是挥发分过高可能会导致球团中的铁的连晶变差，从而会使球团的强度降低，综合考虑还原剂的还原性、挥发分的含量，应选择含碳量高的炭粉为球团的还原剂。

2.4 还原气氛条件

为研究还原气氛对球团还原的影响，将球团分别在空气和N₂保护的情况下进行试验。

当还原温度为1 200℃时，碳氧比为0.9的含碳球团分别在2种气氛下的还原度曲线如图5所示。

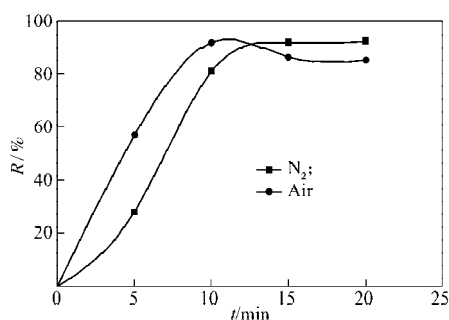


图5 不同气氛下含碳球团还原度与还原时间的关系

Fig. 5 Relationship between reduction and time of pellets under different atmosphere

由图5可以看出，当还原温度为1 200℃时，含碳球团在2种气氛下均能快速还原，且2种气氛下的最大失重率相差不大。这表明球团在空气气氛下能够还原，且还原度较高。在空气气氛下，前10 min含碳球团的还原速度较快，这是因为还原过程中，球团内部通过直接还原后逸出的CO气体，与空气中的O₂发生燃烧生成CO₂并放出热量，加速了球团的升温及铁氧化物的还原，而生成的CO₂又阻碍了球团的再氧化。但在还原反应的末期，球团的还原度开始下降，这是由于CO₂保护作用在减弱，出现了低价氧化物的再氧化。

2.5 还原时间

由图2~5可知，生物炭含碳球团只需15~20 min就能基本还原完毕。与煤粉相比，生物炭含碳球团还原时间更短，主要因为生物炭结构疏松，比表面积大，且具有良好的反应性，有利于球团直接还原反应的快速进行。

3 结论

本次试验通过控制含碳球团的还原剂种类（炭粉A、B）、碳氧比、直接还原温度等因素，研究其在不同条件下对球团还原度的影响规律，可得以下结论：

1) 生物炭比表面积大，结构疏松，反应时与铁矿粉接触面更大，且具有良好的反应性，有利于直接还原。因此，生物炭含碳球团比煤粉含碳球团所需还原时间短，生物炭含碳球团的适宜还原时间为15~20 min，煤粉含碳球团还原时间需25~30 min。

2) 含碳球团中的还原剂除了炭粉中的固定碳外，其中挥发分在高温下裂解出C、H₂等还原性物质，可以直接与铁氧化物反应；同时挥发分的逸出增加了球团的气孔率，有利于CO等还原性气体在球团内扩散，加速球团的还原。

3) 在相同炭种、相同碳氧比的条件下，球团的还原度随温度的升高而增大，含碳球团在1 200℃时具有良好的还原性。

4) 含碳球团的碳氧比越大，球团的还原度越高；但配碳氧比过大会影响球团的造球性能与球团的强度。由于自制生物炭挥发分含量较高，因此适宜的碳氧比可取0.9。

5) 农作物废弃物炭化产品含碳量高，有利于固体碳与铁氧化物的直接还原；同时因具有一定的挥发分含量也会促进球团还原过程的进行。

6) 含碳球团在空气条件下也能快速还原，且具有较高的还原度，还原速率甚至高于在N₂保护条件下的还原速率，但还原之后存在被空气二次氧化的现象。

参考文献：

- [1] 汪琦. 含碳球团还原反应及其技术[J]. 鞍钢技术, 2009(4): 1-10.
Wang Qi. Reduction Reaction of Carbon-Containing Pellet and Its Reduction Process[J]. Angang Technology, 2009(4): 1-10.
- [2] 侯凤慈, 王春雷. 浅谈农作物秸秆综合利用在建设新农村中的作用[J]. 河南农业, 2008(12): 33.
Hou Fengci, Wang Chunlei. Discussion of Comprehensive Utilization of Crop Straw in Building a New Socialist Countryside[J]. Henan Agriculture, 2008(12): 33.
- [3] 刘延坤, 孙清芳, 李冬梅, 等. 生物质废弃物资源化技术的研究现状与展望[J]. 化学工程师, 2011(3): 28-30.
Liu Yankun, Sun Qingfang, Li Dongmei, et al. Current Status and Prospect of the Utilization of Biomass Wastes

- [J]. *Chemical Engineer*, 2011(3): 28-30.
- [4] Loo S V, Koppejan J. *Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*[M]. Netherlands: Twente University Press, 2002: 33-35.
- [5] 李娜. 高含碳金属化球团的制备及理化性质研究[D]. 河北: 河北理工大学, 2009.
Li Na. Study on Preparation and Physical and Chemical Properties of High Carbon Containing Pellets[D]. Hebei: Hebei Polytechnic University, 2009.
- [6] 郭兴忠. 锌铅分离的理论及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
Guo Xingzhong. Studies on Theoretical Principle and Application of Separation of Zn-Pb[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [7] 朱炳秀, 魏国, 姜鑫, 等. 低配碳比含碳球团直接还原的实验研究[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2012, 33(2): 247-250.
Zhu Bingxiu, Wei Guo, Jiang Xin, et al. Direct Reduction of Ore-Coal Composite Pellets Bearing Low Carbon Content [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2012, 33(2): 247-250.
- [8] 张海峰, 薛正良, 周继程, 等. 内配煤团块直接还原法制备铁粒技术研究[J]. *武汉科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 30(2): 125-127.
Zhang Haifeng, Xue Zhengliang, Zhou Jicheng, et al. Producing Iron Nuggets with Direct Reduction from Coal Mixed Pellets[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2007, 30(2): 125-127.
- [9] 吴斌, 龙世刚, 曹枫. 含碳球团强度及金属化率的影响因素[J]. *安徽工业大学学报*, 2007, 24(2): 127-129.
Wu Bin, Long Shigang, Cao Feng. Effect Factors of the Carbon-Bearing Pellet Strengths and Metallization Rate[J]. *Journal of Anhui University of Technology*, 2007, 24(2): 127-129.
- [10] 李福民, 薛漪, 王成立, 等. 煤中氢对含碳球团还原的影响[J]. *钢铁*, 2005, 40(9): 21-24.
Li Fumin, Xue Yi, Wang Chengli, et al. Effect of Hydrogen in Coal Volatile on Reduction of Carbon Containing Iron Ore Pellet[J]. *Iron and Steel*, 2005, 40(9): 21-24.
- [11] 蒋武峰, 李运刚, 赵利国, 等. 粘结剂对含碳球团还原的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2000, 12(4): 1-4.
Jiang Wufeng, Li Yungang, Zhao Ligu, et al. Effect of Binder on the Reduction of Pellet Containing Coal Char[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2000, 12(4): 1-4.
- [12] Hayashi S, Iguchi Y. Reaction Behavior of Wood Flour Added Coal Composite Iron Ore Hot Briquettes at High Temperatures[C]//Asia Steel International Conference 2006. Fukuoka: [s. n.], 2006: 372-377.
- [13] 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 CO₂[J]. *ISIJ International*, 2005, 45(7): 1027-1034.
- [14] Konishi H, Ichikawa K, Usui T. Effect of Residual Volatile Matter on Reduction of Iron Oxide in Semi-Charcoal Composite Pellets[J]. *ISIJ International*, 2010, 50(3): 386-389.
- [15] 刘竹林, 王建丽, 黄艳贵, 等. 农作物废弃物-铁精矿球团性能研究[J]. *湖南工业大学学报*, 2013, 27(6): 73-77.
Liu Zhulin, Wang Jianli, Huang Yangui, et al. Research on the Properties of Agricultural Residuals-Iron Concentrate Pellets[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2013, 27(6): 73-77.
- [16] 刘竹林, 王建丽, 苏振江, 等. 萍钢降低高炉燃料比措施分析[J]. *湖南工业大学学报*, 2012, 26(1): 96-100.
Liu Zhulin, Wang Jianli, Su Zhenjiang, et al. Analysis of the Measurement on Reducing the Fuel Rate of Blast Furnace in Pingxiang Iron and Steel Co.[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2012, 26(1): 96-100.
- [17] 汪琦. 铁矿含碳球团技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 1-2.
Wang Qi. *Technology of Carbon-Bearing Iron Pellets*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 1-2.
- [18] Babich A, Senk Di, Fernandez M. Charcoal Behaviour by Its Injection Into the Modern Blast Furnace[J]. *ISIJ International*, 2010, 50(1): 81-88.
- [19] 张旭, 张建良, 郭豪, 等. 铁碳复合球团直接还原试验研究[J]. *矿冶工程*, 2009, 29(2): 55-58.
Zhang Xu, Zhang Jianliang, Guo Hao, et al. Experimental Investigation of Direct Reduction of Iron-Carbon Composite Pellet[J]. *Mining and Metallurgical Engineer*, 2009, 29(2): 55-58.

(责任编辑 邓光辉)