工艺条件对含碳球团还原熔分的影响

郭 江，李 荣
（济源职业技术学院 冶金化工系，河南 济源 454650）

摘 要：通过高温电阻炉对含碳球团还原熔分的行为进行热态模拟研究，考察焙烧温度、焙烧时间、配碳量（按照 C/O 计算）和炉渣碱度对含碳球团还原熔分的影响。实验结果表明：渣铁分离的最低熔分温度是 1 360 ℃，最短焙烧时间是 24.5 min，最低配碳量是 1.0，最佳炉渣二元碱度 R 为 1.2。

关键词：工艺条件；含碳球团；还原；熔分；影响因素；高温电阻炉；热态模拟
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2018）02－0037－04
doi：10.13403/j.sjqt.2018.02.024

Effect of technological conditions on reduction and melting of carbon-bearing pellets

Guo Jiang，Li Rong
（*Department of Metallurgical and Chemical Engineering，Jiyuan Vocational and Technical College，Jiyuan* 454900，*Henan*）

Abstract The thermal simulation research on behavior of reduction and melting of carbon-bearing pellets was carried out by using the high temperature electric resistance furnace，and the influences of roasting temperature，roasting time，carbon content（carbon/oxygen ratio）and slag basicity etc. on reduction and melting of carbon-bearing pellets were investigated. The experimental results show that，the lowest melting temperature of iron and slag separation is 1360 ℃，the shortest reduction time is 24.5min，the lowest carbon content（calculated by C/O）is 1.0，and the optimal binary basicity of slag is 1.2.

Key words technological condition；carbon-bearing pellet；reduction；melting；influencing factor；high temperature resistance furnace；thermal simulation

1 前 言

珠铁是由含碳球团还原出来的一种新产品，在美国和日本称之为铁块，我国叫粒铁或珠铁。珠铁经电炉熔化精炼后，可直接炼得各种高品质钢。珠铁的生产过程不仅能量消耗和 CO_2 排放量都比高炉炼铁工艺要低，而且节省了炼焦、烧结、球团等铁前流程，实现了以煤代焦，随着国家对资源和环境保护的严格要求，珠铁倍受国内外冶金工作者的关注。

Wang 等[1]对利用含碳球团直接还原工艺分离硼和铁进行了研究，结果表明含碳球团在 1 400 ℃下可以实现渣铁分离；Birol 等[2]深入研究了配碳量对含碳球团熔分的影响，研究发现 C/O 为 1.0 到 1.4 范围内均可实现渣铁分离；李俊翰等[3]研究了配碳量、还原时间、还原温度等工艺条件对金属化率的影响，结果表明还原时间为 35 min、还原温度 1 350 ℃、C/O 为 1.25 时金属化率达 91.7%；宁晓宇等[4]研究了温度、还原时间、配碳量、还原剂种类等条件对球团还原熔分行为的影响，结果表明还原温度为 1 400 ℃、C/O 为 1.2 时可以实现渣铁分离；其它研究者[5～10]通过正交实验对含碳球团直接还原规律进行了研究。

收稿日期：2017－11－17
基金项目：河南省自然科学基金资助项目（17B450002）
作者简介：郭江（1979－），男，副教授，硕士，主要从事冶金新技术与新工艺方面的研究。

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

上述研究中有的以纯物质为原料对含碳球团熔分过程进行研究，有的只研究了部分工艺条件对含碳球团还原熔分行为的影响。为了能够充分理解珠铁还原熔分的形成过程，本文以实际的矿石为原料，对温度、C/O、时间、碱度等多种因素全面考察，通过在实验室内完成对环形加热炉直接还原生产珠铁工序的基础性研究，得到相应的工艺参数，为后续工业试验的开展提供详实的基础数据。

2 试验原料及方案

2.1 试验原料

以铁精矿粉、煤粉、石灰石为原料制备本试验所需含碳球团，原料成分详见表1。

表1 试验原料的化学成分(%)

原料	TFe	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S
铁精粉	67.22	21.91	71.68	2.96	0.91	0.86	0.24	0.1	0.004
石灰石				1.67	0.89	51.32	1.90	0.01	0.096
煤粉			5.21	49.2	31	4.29	0.68		1.97

2.2 试验方案

将铁精粉、煤粉、石灰石粉、粘结剂按比例称量混合均匀，然后加入适量的水，再混合均匀，经对辊压球机压制成球并烘干。干燥的含碳球团置于焦粉垫底的石墨盒中，送入高温电阻炉模拟环形加热炉对干燥后的生球进行还原实验，采用石墨盒盛装生球，每次实验放置4个生球。根据含碳球团还原熔分正交实验要求的还原温度及还原时间，将高温电阻炉预先升温至指定温度，并将石墨盒放入高温电阻炉的恒温区进行还原。

3 试验结果及分析

3.1 焙烧温度对球团还原熔分的影响

图1为配碳量C/O=1.2、碱度R=1.0的条件下，不同焙烧温度(1 340～1 460 ℃)下的含碳球团还原熔分的渣铁形貌。

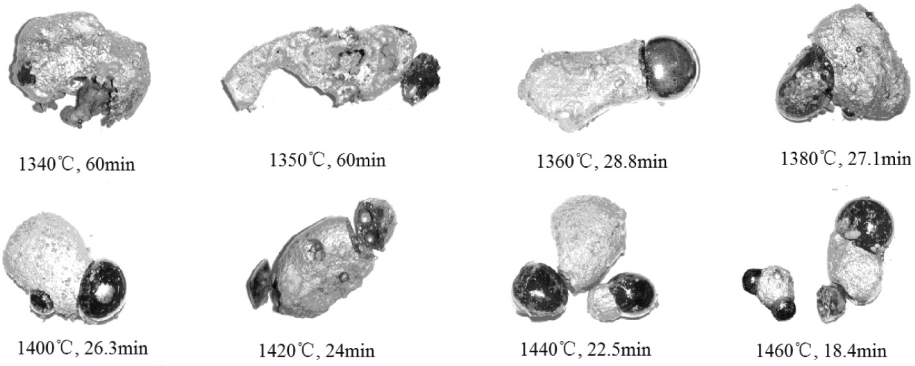


图1 不同温度下球团渣铁分离后形貌

从图1可以看出，当焙烧温度在1 340 ℃和1 350 ℃时，焙烧时间达到60 min时，仍没有熔分形成珠铁。实际上球团中铁的还原已经基本完成，但由于熔分温度较低，铁的渗碳过程较慢，铁熔化温度的降低需要一个比较长的时间，即使铁已经呈液态，但由于温度低，渣的粘度相对较大，因此液态铁突破熔渣的包围聚集合并到一起所受的阻力大。当焙烧温度升高到1 360 ℃时，含碳球团在28.8 min时完成渣铁熔分过程，但铁的凝聚程度并不是很好，由此可以看出，1 360 ℃是渣铁能够分离的最低熔分温度。

继续提高焙烧温度至1 380 ℃时，渣铁熔分时间有所减少，仅为27.1 min，当焙烧温度提高至1 460 ℃时，仅需18.4 min即可实现渣铁分离，相比1 360 ℃条件下，熔分温度每提高100 ℃，熔分时间缩短近10 min。

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

3.2　焙烧时间对球团还原熔分的影响

图 2 为焙烧温度为 1 400 ℃时含碳球团在还原熔分过程中宏观形态随时间的变化情况。

由图 2 可知，焙烧时间为 24.5 min 时，球团铁壳熔化，小铁滴依靠重力作用穿过底面的熔渣层聚集在原球团的中心位置，铁滴表面张力很大，很快聚集收缩成一个粒状的铁珠，排出的熔渣大面积的覆盖在铁珠的上表面，铁珠中仍有少量的熔渣不断溢出并熔入上表面的熔渣，随着熔分过程的结束，炉温的下降进入冷却阶段，熔渣迅速收缩凝集，分成多个小颗粒粘附在铁珠的周围，完成了渣铁分离的全过程。

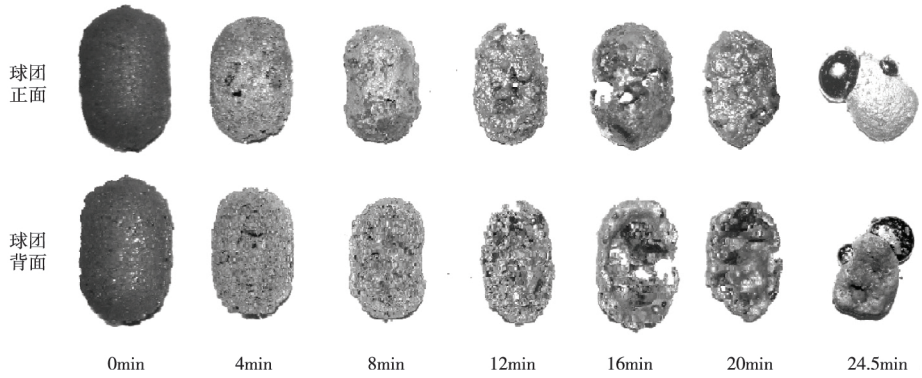


图 2　含碳球团还原熔分过程不同时间阶段的形貌变化

3.3　C/O 对球团还原熔分的影响

实验考察了 C/O 分别为 0.8，1.0，1.2，1.4，1.6 的球团在 R = 1.0、还原温度为 1 400 ℃、还原 30 min 条件下进行还原熔分实验，研究 C/O 对含碳球团还原熔分过程的影响，实验结果见图 3。

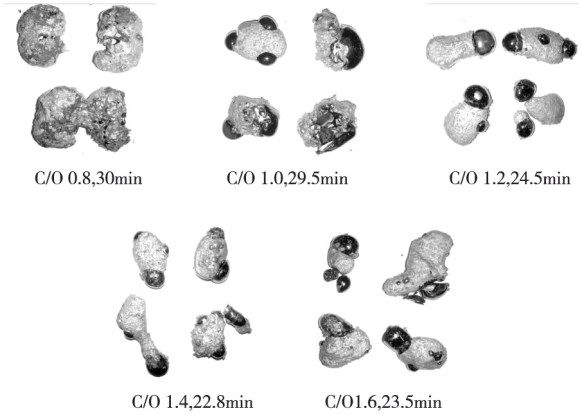


图 3　不同 C/O 的含碳球团在 1 400 ℃条件下还原熔分实验结果

不同 C/O 的含碳球团在 1 400 ℃条件下还原熔分 30 min 的实验结果表明，C/O 的变化对球团还原熔分具有显著影响。C/O 为 0.8 时，还原 30 min，实验结束时含碳球团仍未完全熔分，球团形成空壳状，分离出的熔渣聚集在球壳内，且渣量约为理论计算渣量的一半，可见其渣铁分离程度不好；当 C/O 提高至 1.0 时，球团在 29.5 min 时渣铁发生分离形成珠铁，珠铁形状扁平，分离的熔渣粘附在珠铁的边缘，渣铁分离程度较好；在 C/O 为 1.2 时，球团在 24.5 min 时渣铁分离形成珠铁，随着 C/O 继续提高至 1.4 时，球团在 22.8 min 完成渣铁分离；但当 C/O 提高至 1.6 时，球团完成渣铁分离的时间为 23.5 min，有所延长。由此可以看出，随着球团 C/O 的增加，球团能在更短的时间内形成珠铁，球团配碳量不足时，渣铁不能完全分离。

对实验得到的珠铁和熔渣进行元素化学分析，其结果如表 2 所示。其中珠铁中的碳为铁的渗碳，熔渣的碳为残余碳。

表 2　不同 C/O 条件下得到的珠铁和熔渣化学成分分析结果

C/O	珠铁成分/%		熔渣成分/%	
	MFe	C	其他	C
0.8	87.34	0.56	12.10	0.32
1.0	90.42	1.07	8.51	0.69
1.2	95.76	2.34	1.90	1.78
1.4	94.26	2.51	3.23	2.93
1.6	94.17	2.65	3.18	5.42

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

从表2珠铁的碳含量变化可以看出，随着C/O的增加，铁的渗碳量逐渐增加。在C/O为0.8时，铁中的渗碳量仅为0.56%；在C/O为1.0时，珠铁的碳含量为1.07%；而在C/O为1.2～1.6时，铁中的碳含量均在2%以上，且变化不大，均具备完全熔分的条件；当C/O为1.2时，珠铁金属铁品位最高，是此次实验的最佳配碳量。

3.4 碱度对球团还原熔分的影响

C/O为1.2，还原温度为1 400 ℃，球团碱度分别取0.2、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4（文中碱度均指二元碱度，即$R = CaO/SiO_2$），通过高温管式电炉即时观察球团渣铁熔分过程，研究了碱度对渣铁分离的影响。实验分别记录了不同碱度球团还原熔分过程球团开始熔化时间和渣铁分离时间，表3为记录数据的统计结果。

表3 不同碱度球团开始熔化时间和渣铁分离时间(min)

项目	0.2	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
开始熔化时间	14.4	15.3	17.6	18.4	18.9	20.5
渣铁分离时间	28.5	27.8	25.9	24.5	26.2	30.4
时间差	14.1	12.5	8.3	6.1	7.3	9.9

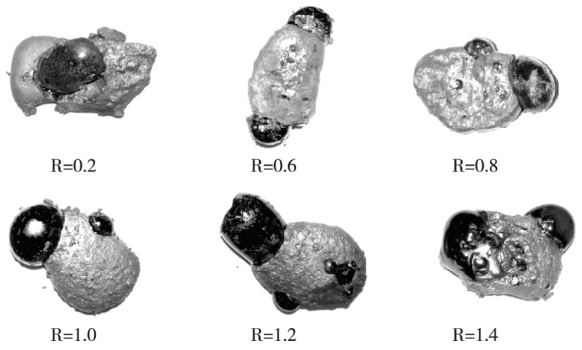


图4 1 400 ℃条件下不同碱度球团渣铁分离后形貌

实验所得到的还原产物渣铁形貌如图4所示。由实验过程观察和渣铁分离的形貌可以看出，球团碱度为0.2时，球团在14.4 min开始发生熔化，28.5 min完成渣铁分离过程，但渣铁分离程度不好；碱度为0.8～1.2的球团，随着碱度的提高，渣铁分离程度变好，铁相凝聚程度增高，尤其是碱度为1.0时不仅开始熔化时间和渣铁分离差时间最短，分离时间也最短，分离效果最好；随着球团碱度进一步提高至1.4时，表观观察熔分后的渣铁，分离出的渣量较少，熔渣从球团表面析出，覆盖在金属铁的上面，渣铁的分离程度较差，球团开始熔化时间延长，说明初渣的熔点升高，30.4 min完成渣铁分离过程，渣铁分离时间也相应延长。

4 结 论

通过研究焙烧温度、焙烧时间、配碳量和炉渣碱度对含碳球团还原熔分的影响，得到如下结果：

（1）在C/O=1.2和碱度=1.0条件下，只有温度升高到1 360 ℃才能实现渣铁分离，随着温度继续上升，不仅渣铁分离效果更好，而且分离时间缩短，试验结果表明熔分温度每提高100 ℃，熔分时间缩短近10 min。

（2）在还原温度为1 400 ℃，还原时间为30 min和碱度为1.0条件下，当C/O=1.0时，渣铁可以实现分离；C/O=1.2～1.4随着配碳量的增加，渣铁分离时间不断减少，但当C/O=1.6渣铁分离时间反而增加；C/O为1.2～1.6时，铁中的碳含量均在2%以上，且变化不大，均具备完全熔分的条件，C/O=1.2时，珠铁金属铁品位最高，为最佳配碳量。

（3）在配碳比为1.2，还原温度为1 400 ℃，随着碱度的增加，渣铁分离程度变好，铁相凝聚程度增高；球团碱度为1.0时，熔化时间和渣铁分离均最短，渣铁分离效果最好；随着球团碱度提高至1.4时，渣铁的分离程度变差。

参考文献

[1] Wang G，Wang J S，Ding Y G，et al. New separation method of boron and iron from ludwigite based on carbon bearing pellet reduction and melting technology [J]. ISIJ Int，2012，52(1)：45.

（下转第53页）

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

电除尘器漏风率为

$$\alpha_{电除尘}=\frac{Q_{主抽风机}-Q_{主排烟道}}{Q_{主抽风机}}\times 100\%=\frac{680\ 135.35+704\ 573.85-1\ 343\ 704}{680\ 135.35+704\ 573.85}\times 100\%=2.96\% \quad (9)$$

烧结系统漏风率为

$$\alpha_{烧结机}=\frac{\Delta Q_{烧结机}+\Delta Q_{电除尘}}{Q_{主抽风机}}\times 100\%=20.03\% \quad (10)$$

漏风检测表明，采用中冶长天开发的低漏风综合密封技术，湛江烧结机本体漏风率为 17.59%，远低于普通烧结机漏风率 30% ~35% 的平均水平，漏风率下降比例近 50%，节能减排效果显著，设备运行成本下降，全面落实了国家节能减排的产业化政策，可为同行业提供借鉴与参考。

4　结　论

(1) 剖析了烧结机漏风产生的原因，找出了相应的漏风环节，并介绍了中冶长天开发的低漏风综合密封技术—负压吸附式端部密封技术、新型滑道密封技术、烧结机台车密封技术和气动双层卸灰阀技术等，并将其成功应用于宝钢湛江烧结机。

(2) 采用烧结机台车空载静态密封测试与烧结机台车额定负载动态测试相结合检测烧结机漏风率的方法对湛江烧结机进行了漏风检测。其检测结果表明，低漏风综合密封技术可显著减少烧结机漏风率，实现国家节能减排的产业化政策，对未来烧结技术的发展具有重要的指导意义。

参考文献

[1] 姜曦，裴元东，韩宏亮. 铁矿粉烧结技术进展 [J]. 科技导报，2011，29(15)：70 -74.

[2] 王素平. 铁矿石烧结节能与环保的研究 [D]. 武汉：武汉科技大学，2013.

[3] 何志军，李金莲，张立国，等. 烧结机系统漏风综合治理技术 [J]. 鞍钢技术，2016，(5)：1 -7.

[4] 何云华，白明华，梁宏志. 降低烧结机漏风率技术与应用研究 [J]. 物理测试，2008，26(1)：6 -10.

[5] 高彦，么占坤，孙长征，等. 烧结机漏风治理技术方案 [J]. 烧结球团，2004，29(1)：38 -42.

[6] 纪荣胜，王西庆，蔡润明. 烧结机系统密封性改造 [J]. 中国设备工程，2014，(9)：67 -68.

[7] 张建春. 烧结机头尾及中间密封装置的改进 [J]. 冶金设备，2006，(2)：73 -74.

[8] 金永龙，徐南平，邬士英，等. 烧结机漏风测定新技术的研究和应用 [J]. 钢铁研究学报，2009，11(3)：67 -70.

[9] 黄天正，姜涛. 带式烧结系统漏风率的测定 [J]. 烧结球团，1986，10(2)：33 -42.

[10] 宋新义，李文辉. 烧结机系统漏风率测定技术的探究 [J]. 能源与节能，2013，(8)：51 -53.

[11] 程翠花，范兰涛，甄常亮，等 唐钢烧结机漏风率的测定与漏风治理 [J]. 河北冶金，2017，(6)：36 -38.

(上接第 40 页)

[2] Birol B，Saridede M N. The effect of reduction parameters on iron nugget production from composite pellets [J]. Miner Process Extr Metall Rev，2013，34(4)：195.

[3] 李俊翰，邱克辉，杨绍利. 钒钛铁精矿含碳球团直接还原试验 [J]. 有色金属(冶炼部分)，2014，(3)：5 -8.

[4] 宁晓宇，薛庆国，王广，等. 含碳球团直接还原熔分机理 [J]. 北京科技大学学报，2014，36(9)：1166 -1173.

[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.

[6] 张颖异，赵杰，齐渊洪，等. 渣系碱度对含碳球团渣相组成和渣铁分离的影响 [J]. 钢铁研究学报，2015，27(7)：15 -19.

[7] 李林，郭汉杰，孟祥龙，等. 钛磁铁矿球团预还原与熔分关系试验研究 [J]. 矿冶工程，2015，35(3)：106 -110.

[8] 刘功国，秦洁，何绍刚. 钒钛磁铁矿金属化球团生产工艺参数试验研究 [J]. 矿冶，2015，24(5)：41 -44.

[9] 李荣，郭江. 含碳球团还原熔分试验研究 [J]. 钢铁钒钛，2015，36(4)：84 -87.

[10] 潘刚，王子杰，李义科，等. 白云鄂博矿含碳球团直接还原过程工艺参数优化的数值模拟 [J]. 科学技术与工程，2016，16(22)：41 -45.

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