节能环保与综合利用

烧结机低漏风综合密封技术及其在宝钢湛江的应用

刘 波[1]，叶恒棣[2]，卢兴福[2]，刘相佩[2]，周胜良[2]，刘克俭[2]
（1. 宝钢湛江钢铁有限公司，广东 湛江 524072；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205）

摘 要： 针对烧结机的漏风问题，分析了其漏风原因，找出了相应的漏风环节，在此基础上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、气动双层卸灰阀技术等。并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实施低漏风综合密封技术的湛江烧结机进行了漏风检测，烧结机本体漏风率为17.59%，与普通烧结机相比，漏风率下降比例近50%，符合国家节能减排、降本增效的产业化政策。

关键词： 烧结机；综合密封；漏风率；检测方法
中图分类号： X701 **文献标识码：** B **文章编号：** 1000－8764(2018)02－0048－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2018.02.027

Integrated low air leakage sealing technology of sintering machine and its application in Baosteel Zhanjiang

Liu Bo[1], Ye Hengdi[2], Lu Xingfu[2], Liu Xiangpei[2], Zhou Shengliang[2], Liu Kejian[2]
(1. *Baosteel Zhanjiang Iron and Steel Co., Ltd., Zhanjiang* 524072, *Guangdong*;
2. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan*)

Abstract In view of air leakage problem of the sintering machine, the causes of air leakage were analyzed, and the corresponding air leakage parts were found, and based on this, the integrated low leakage sealing technologies developed by *Zhongye Changtian* were introduced, including the negative pressure adsorption end sealing technology, the new type slide sealing technology, the pallet sealing technology of sinter machine and the pneumatic double-act dust dump valve technology etc. The method of detecting the air leakage rate of the sintering machine in combination with the static load test of the sintering machine pallet and the dynamic test of the rated load of the sintering machine pallet was used to test the air leakage rate of the Zhanjiang sinter machine, and the air leakage rate of the sinter machine was 17.59%. Compared with the conventional sinter machine, the air leakage rate of sintering machine has dropped by nearly 50%, which is in line with the national industrial policy of energy conservation, emission reduction and cost reduction.

Key words sinter machine; integrated sealing; air leakage rate; testing method

1 前 言

烧结工艺是我国高炉冶炼的主要原料加工工艺，75%以上的高炉炉料来源于烧结[1]。烧结机是烧结工艺过程的主体设备之一，烧结机系统漏风对烧结生产的能耗、物耗和环境影响很大。一方面使抽风系统工作负压降低，烧结机单位面积的有效风量减少，烧结机利用系数下降，烧结矿质

收稿日期：2018－03－12
基金项目：国家重点研发计划专项资助(2017YFB0304300&2017YFB0304301)
作者简介：刘波(1960－)，男，宝钢湛江钢铁有限公司副总经理，主要从事炼铁工艺与装备技术及管理工作。
通讯作者：卢兴福(1986－)，男，博士，主要从事烧结球团装备以及大型机械设备力学行为分析方面的研究。

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

量变差，风机电耗增高，设备磨损加剧；另一方面大量空气漏入，增加了除尘系统的负荷、除尘设备的工作环境与除尘效果恶化[2-3]。

目前，采用国际先进技术的新建烧结机漏风率已下降到 20% 以下，相比之下，国内大部分企业新建烧结机的漏风率仍在 30% ~35% 之间，部分先进的达到 25%。湛江钢铁作为新时期的钢铁企业，其致力于打造“全球排放最少、资源利用效率最高、企业与社会资源循环共享”的绿色梦工厂，针对烧结机漏风率偏高的共性技术难题，中冶长天与宝钢湛江联合攻关严格控制烧结机漏风率，以提高烧结系统综合技术指标。本文剖析了引起烧结机系统漏风的系列因素，找出了相应的漏风环节，在此基础上介绍了中冶长天开发的低漏风综合密封技术，并将其成功应用于湛江烧结机。同时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的检测方法对烧结机漏风率进行了检测。

2　烧结机低漏风综合密封技术

2.1　烧结机漏风分析

烧结机漏风是指抽风烧结工艺中外界空气未经物料层而直接被抽入风箱，即无效风。烧结机作为大平面非连续接触密封运动设备，其漏风量的大小取决于烧结生产的压差 Δp 及设备运动件与运动件、运动件与非运动件之间的间隙 δ。其中压差 Δp 主要跟烧结原料的料层阻力相关，而间隙 δ 则跟烧结机本体结构相关。因此，在烧结生产工艺确定的条件下降低漏风率的最佳途径是消除或减小间隙 δ。

根据烧结机结构特点、运动特性、力学特性发现，烧结机存在间隙的部位即烧结机漏风的部位主要有：台车与台车之间的漏风、台车与风箱结合面侧部的漏风、台车与风箱结合面端部（头、尾部）的漏风、联接风箱与大烟道的风箱支管漏风、大烟道灰箱排灰时的漏风等[6-7]。图 1 为烧结机主要漏风部位密封示意图。其中，由于烧结台车宽度方向跨距较大，上部还要承受数吨的混合料重与抽风压力，且长期工作在高温环境下，在端部（烧结机头、尾部）台车底部与密封板之间很难实现良好贴合，致使烧结机正常运转时，台车和密封板出现较大缝隙，最大时达到 30 mm 以上，从而造成此处大面积漏风，其也是烧结机的主要漏风部位。

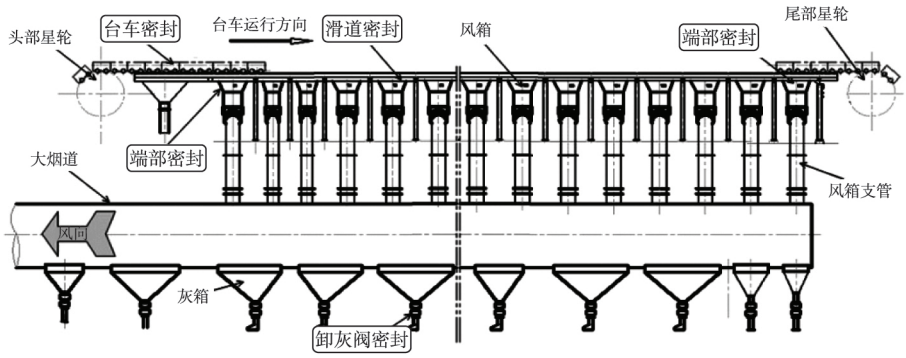


图 1　烧结机主要漏风部位密封示意图

2.2　烧结机低漏风综合密封技术

为确保烧结机有效风量，尽量减少漏风，降低工序能耗，本文从消除或减小间隙 δ 角度介绍烧结机低漏风综合密封技术，包括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、气动双层卸灰阀技术等，并将其成功应用于湛江烧结机。

（1）端部密封主要解决烧结机头、尾部漏风问题，传统烧结机端部密封装置示意如图 2 所示，其采用带灰斗的分块式刚性密封体结构，漏风量计算式如式（1）所示，从式中可知，传统烧结机端部密封漏风量均与压差成正比，即负压越大，烧结机漏风越严重。

$$Q = 0.083\ \frac{B}{L}\frac{b^3\Delta p}{\mu} + 0.01\ \frac{B}{L}\frac{a^3\Delta p}{\mu} + (n-1)\ 0.005\ \frac{B}{L}\frac{c^3\Delta p}{\mu} \tag{1}$$

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

式中：B 为台车宽度，mm；L 为密封体长度，mm；a 为侧部间隙，mm；b 为顶部间隙，mm；c 为分块密封体之间间隙，mm；Δp 为烧结生产的压差，Pa；μ 为流体粘度，Pa·s。

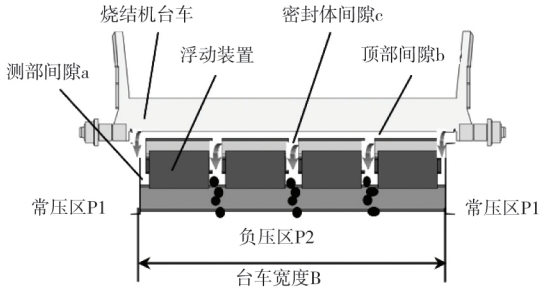


图2 传统烧结机端部密封装置示意图

负压吸附式端部密封技术巧妙地利用烧结机供风系统的负压，迫使风箱密封板与烧结机台车底板贴合，以负压作为密封动力，负压越大，贴合越严，密封效果越好，从而克服了负压越大漏风越多的问题。负压吸附式端部密封技术原理如图3所示，其漏风量计算式为：

$$Q=0.083\frac{B}{L}\frac{b^3\Delta p}{\mu}+0.01\frac{B}{L}\frac{\left(a-0.06\frac{BL\Delta p}{k}\right)^3\Delta p}{\mu} \quad (2)$$

式中：k 为负压吸附式密封装置中柔性件的刚度，N/mm。

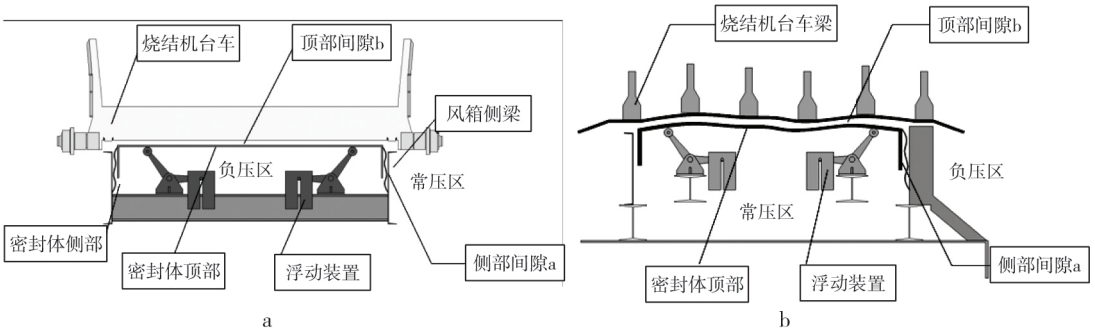


图3 负压吸附式端部密封原理图

a—密封装置横向断面图 b—密封装置纵向断面图

从式(2)中可知：①负压吸附式端部密封技术采用整体结构，消除了分体式密封体之间的间隙 c 导致的漏风；②侧部间隙 a 导致的漏风量与烧结压差成负指数关系，即负压越大，漏风越少，当 $\Delta p>\frac{ak}{0.06BL}$ 可消除侧部间隙 a 的漏风；③为解决顶部间隙 b 的问题，其顶部密封体采用柔性结构，使顶部间隙 b 趋于0时也不会影响烧结机的正常运行，从而降低了顶部间隙 b 的漏风。因此，负压吸附式密封装置能够有效地解决烧结机端部(头、尾部)的漏风，降低烧结机端部密封的漏风量。

(2)新型滑道密封技术利用板弹簧的弹性部件直接作用在滑板上，使滑板受力均匀，消除其在滑板和游板槽之间的间隙，从而解决台车与风箱结合面侧部的漏风，其技术原理如图4所示。该密封装置密封效果好，运行可靠。

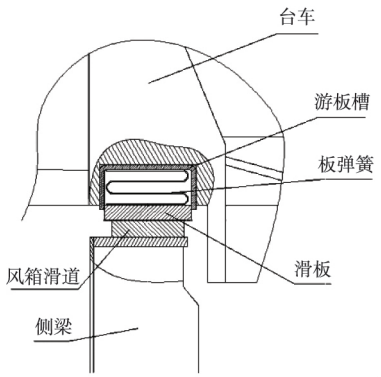


图4 新型滑道密封技术原理图

(3)烧结机台车密封技术主要解决台车与台车之间的漏风问题，其中台车栏板的密封结构如图5所示。该结构利用重力因素，在烧结机工作行程中，活动密封板在重力作用下自行下滑，封堵两台车栏板的间隙，在台车栏板间形成密封。同时台车卸料后进入空车回程时，由于台车翻转了180°，车底朝下，活动密封板在重力作用下从栏板间隙里脱

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

出，确保了台车栏板不因相互挤压而破坏。

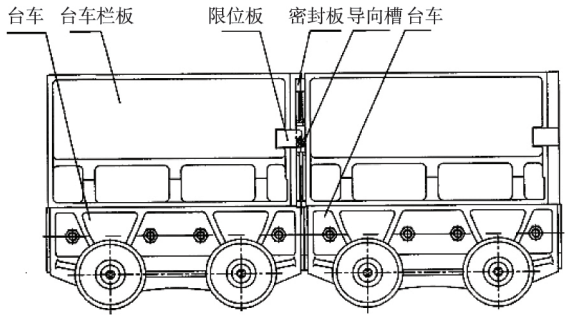


图 5　台车栏板密封结构示意图

(4) 气动双层卸灰阀技术减少了大烟道卸灰口的密封问题，其上下阀芯通过气缸作用交替进行排灰，一方面可将风管中的积灰排出，另外一方面不使风管内部与大气短路，引起漏风。气动双层卸灰阀结构如图 6 所示。大烟道的卸灰点多，采用气动双层卸灰阀后可大大提高大烟道的密封性。

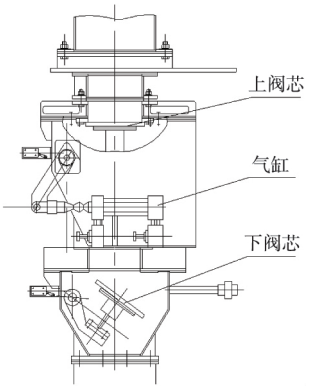


图 6　气动双层卸灰阀结构示意图

3　烧结机漏风检测

3.1　烧结机漏风检测方法

烧结机漏风率检测方法主要包括密封法、料面风速法、边缘漏风法、烟气分析法[8~11]。密封法检测时台车静止不动，与正在运行时的台车漏风有一定误差；料面风速法将烧结过程产生烟气也纳入漏风，导致检测数据偏大；边缘漏风法仅能够检测台车与滑道之间的漏风；烟气分析法无法分析已经燃烧完成的台车的漏风量。为提高烧结机漏风率检测方法的准确度，本文根据烧结机结构和烧结工艺原理，在密封法的基础上提出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的方法检测烧结机漏风率。此检测方法在攀成钢烧结机、日本和歌山烧结机上进行了漏风测试，测试数据和检测方法得到业主和行业专家的一致认可，证明了该方法的可行性与可靠性。其具体分两步进行：

第一步：烧结机台车空载静态密封测试，求得烧结机本体绝对漏风量。在烧结机空载不运转的情况下，用塑料布或橡胶布将全部台车密封，但局部敞开 2 ~ 4 个风箱上台车，并将风箱隔板梁与台车下梁之间的间隙用型钢密封。此时启动主抽风机，从小到大方向调整风门开度，直到主抽风机达到额定负压，通过烟气分析仪测量主排烟道和敞开风箱支管的气态参数(静压、动压、当地大气压、温度)，在此基础上将主排烟道风量减去支管风量即得到烧结机额定负载运行下的绝对漏风量 $\Delta Q_{烧结机}$。

第二步：烧结机台车额定负载动态测试，测得烧结机本体总排出烟气量 $Q_{烧结机}$ 和主抽风机总抽出烟气量 $Q_{主抽风机}$。

烧结机系统漏风主要包括烧结机本体漏风和电除尘器漏风两个部分。烧结机本体漏风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的方式求得；电除尘器漏风采用台车额定负载动态测试求得。完成测试后，可由以下计算公式分别求烧结机漏风率 $\alpha_{烧结机}$、电除尘器漏风率 $\alpha_{电除尘}$ 和系统漏风率 $\alpha_{系统}$。

$$\alpha_{烧结机}=\frac{\Delta Q_{烧结机}}{Q_{主排烟道}}\times 100\% \tag{3}$$

$$\alpha_{电除尘}=\frac{Q_{主抽风机}-Q_{主排烟道}}{Q_{主抽风机}}\times 100\% \tag{4}$$

$$\alpha_{系统}=\frac{\Delta Q_{烧结机}+\Delta Q_{电除尘}}{Q_{主抽风机}}\times 100\% \tag{5}$$

3.2　湛江烧结机漏风检测与计算

湛江 550 m^2 烧结机共有 28 组风箱，两个排气管分别配置一台主抽风机，风箱支管上部同风箱相接，下部插入主排气管道，烧结机系统烟气管道结构及测点布局如图 7 所示。主抽风机 1#、2#入口管道设置检测孔，编号 1#、2#；在每根主排烟气气管上设置测孔，编号 3#、4#；在 W16 ~ W19 四个风箱支管上设置检测孔，每个风箱对应左支

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

管、右支管，风箱 W16 测点编号：5#、6#，风箱 W17 箱 W19 测点编号：11#、12#。
测点编号：7#、8#；风箱 W18 测点编号：9#、10#，风

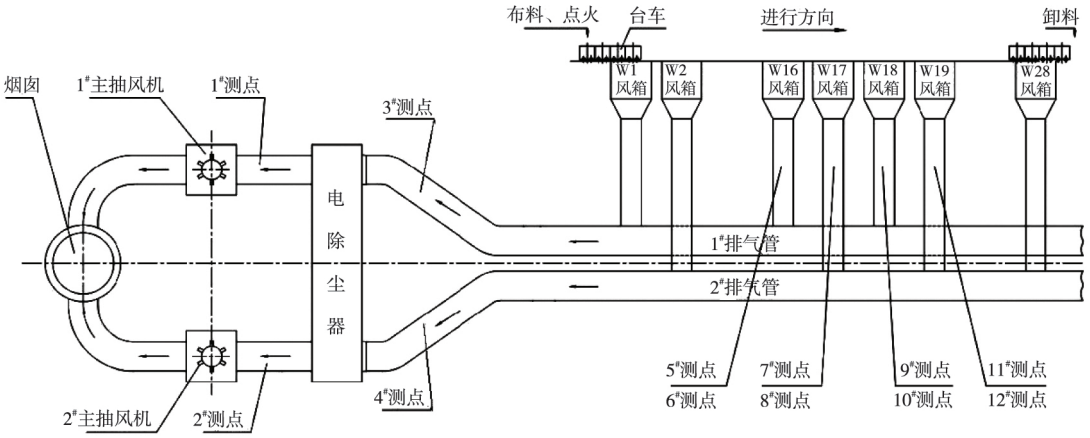


图7 烟气管道结构及测点布局

空载静态密封测试下获得 W16～W19 风箱 应状态下管道的标况风量，如表1所示。
支管以及主排烟道 1#、2#的气态参数，并求得相

表1 烧结机空载静态密封状态测量管道风量

项目	1#主排烟道 3#测点	2#主排烟道 4#测点	16W 风箱支管 5#测点	16W 风箱支管 6#测点	17W 风箱支管 7#测点
标况流量/$m^3 \cdot h^{-1}$	570 978.27	590 333.21	114 386.88	118 410.71	114 855.76

续表1

项目	17W 主排烟道 8#测点	18W 主排烟道 9#测点	18W 风箱支管 10#测点	19W 风箱支管 11#测点	19W 风箱支管 12#测点
标况流量/$m^3 \cdot h^{-1}$	119 284.76	112 834.71	116 927.63	111 702.39	116 541.61

此时，烧结机额定负载运行下的绝对漏风量为

$$\Delta Q_{烧结机} = Q_{1\#主排烟道} + Q_{2\#主排烟道} - (Q_{16\#风箱} + Q_{17\#风箱} + Q_{18\#风箱} + Q_{19\#风箱}) = 2\ 363\ 67\ m^3/h \quad (6)$$

负载运行测试获得电除尘设备输入管道与输出管道，即 1#、2#主抽风机管道（电除尘输出管道）以及烧结机 1#、2#主排烟道（电除尘输入管道）的气态参数，并求得相应状态下管道的标况风量，如表2所示。

表2 烧结机负载运行测量管道风量

项目	1#主抽风机 1#测点	2#主抽风机 2#测点	1#主排烟道 3#测点	2#主排烟道 4#测点
标况流量/$m^3 \cdot h^{-1}$	680 135.345 8	704 573.851 1	663 169.321 9	680 534.844

此时，主排烟道的标况风量为

$$Q_{主排烟道} = Q_{1\#主排烟道} + Q_{2\#主排烟道} = 1\ 343\ 704\ m^3/h \quad (7)$$

烧结机本体漏风率为

$$\alpha_{烧结机} = \frac{\Delta Q_{烧结机}}{Q_{主排烟道}} \times 100\% = \frac{236\ 367}{1\ 343\ 704} \times 100\% = 17.59\% \quad (8)$$

(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