**焦炭水分对1280m³高炉的影响及对策**

陈那港 李志刚

（芜湖新兴铸管有限责任公司炼铁部 安徽 芜湖 241000）

摘 要：芜湖新兴焦化部干熄焦系统年度计划检修10天，1280m³高炉生产燃料结构也从干焦逐步转化为水焦，高炉顶温降低，炉况开始发生变化，顺行度变差，最后难行逐步形成管道，操作困难。后通过采取系列措施上下部调剂加以精心操作，每炉渣铁出尽，活跃炉缸，炉况转顺，走出困境。

关键词： 水焦；顶温；措施；炉况顺行

Discussion on treatment method of top temperature disorder of large amount digested water coke in blast furnace

Chen nagang，Li zhigang

（Ｗｕｈｕ　Ｘｉｎｘｉｎｇ　Ｄｕｃｔｉｌｅ　Ｉｒｏｎ　Ｐｉｐｅｓ　Ｃｏ．，Ｌｔｄ．）

**Abstract：**The annual plan of the dry quenching system of the new coking part of Wuhu is 10 days, and the production fuel structure of the 1280 m³blast furnace is gradually converted from the dry coke to the water coke, the temperature of the high furnace top is reduced, the condition of the furnace is changed, the grade of the antegrade is poor, and finally, the pipeline is gradually formed, and the operation is difficult. After a series of measures are taken, the lower part of the slag is carefully operated, and the iron out of each slag is exhausted. The active hearth and the furnace condition are smooth and out of the predicament.

**Keywords**: Water coke; top temperature; measures; furnace condition

**0 前言**

芜湖新兴铸管有限责任公司炼铁部两座1280m³高炉以焦化部生产的本厂干熄焦炭为主，随着高炉的产量逐步提高两座炉子的产量稳定在8100-8200吨，随着1280m³高炉提高富氧、喷煤的强化冶炼措施后，高炉的冶炼发生了恒大变化，一个突出的问题表现为对焦炭骨架作用及水分、含粉量要求更高，随着煤比不断提高，焦炭负荷越来越大，焦炭的冶金性能及质量越来越重要。日前焦化干熄焦系统及一座高炉同时年度计划检修，另一高炉需要逐步从干熄焦转变为水熄焦生产。高炉炉料包括铁矿石（球团矿、烧结矿和天然块矿）、焦炭和熔剂（白云石或石灰石）。在冶炼过程中，炉料分批从炉顶依次装入炉内，高温空气或者富氧空气从风口鼓入，使焦炭在风口前的回旋区内激烈燃烧。燃烧后产生的CO作为高炉冶炼过程的主要还原剂，产生的热能是高炉冶炼的主要热源。

高炉炉型结构可分为炉喉、炉身、炉腰、炉腹和炉缸五段，根据高炉中物料状态和温度的不同可分为块状带、软熔带、滴落带的活动焦炭层和呆滞焦炭层、风口回旋区。这几个部位的CO浓度和CO2含量都不相同，焦炭的状态和行为也都不一样。现场观察及取样化验得出：焦炭水分越大带入炉的粉末，对炉况及煤气流的影响也非常大。

**1 焦炭对高炉冶炼的影响**

**1.1 焦炭水分对高炉冶炼的影响**

焦炭水分的波动不均势必引起称量不准及工长核料及带入粉末而影响高炉炉况的稳定，并导致铁水中硅、硫含量的变化。水分过高，焦粉黏附在焦炭表面上，影响焦炭粉末筛分并随焦炭带入炉内，如果焦粉不能全部随煤气吹出，将影响高炉透气性和透液性，轻者造成高炉上下部悬料挂料，重则造成炉缸堆积，渣铁出不尽，影响炉缸蓄热性及降低风口理论燃烧温度等一系列恶果。风口回旋区周围的焦炭来源不同，块度不一，这部分焦炭对整个高炉的冶炼操作影响很大。热空气由风口鼓入后，形成一个略向上翘起的袋状空腔，即为回旋区。焦炭在此承受2000℃以上的高温，被鼓入的热风带动进行强烈的旋转，焦炭之间互相撞击，并发生剧烈的燃烧，从而为高炉提供冶炼所需热量和还原气体CO。残留在焦炭中的灰分在此时也迅速分解。因此，焦炭进入到此区域迅速粉化。空腔的外围因鼓风动能和炉料移动，焦炭以不同状态分布在整个风口区域。

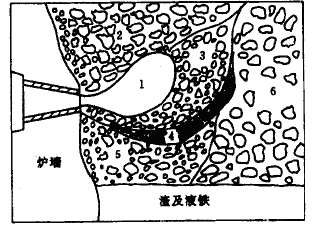


图1-1 风口回旋区周围的焦炭

**1.2 高炉中焦炭的碳损失**

焦炭中碳含量由于灰分的不同大约在85％~90％之间，除了不到1％的碳随高炉煤气以及细焦粉形式逸出高炉外，其余的碳全部消耗在高炉中。在风口前燃烧的碳含量占55％~65％，生铁渗碳占7％~10％，料线风口间发生碳溶反应占25％~35％，其他元素还原反应及损失占2％~3％[6]。高炉为了降低焦比，节约成本和强化冶炼的需要，高炉都在风口喷吹煤粉，随着喷吹量的增大，焦炭在风口前燃烧的比例相对减小。在高炉中，焦炭通过碳溶反应生成的CO是冶炼过程的重要还原剂。焦炭入炉后，灰分的含量逐渐增大，其主要原因是碳素因与CO2反应而减少，灰分相对增高；另外的原因就是熔剂、烧结矿的粉末粘附在焦炭表面。焦炭中的钾、钠是高炉气体中钾钠雾滴凝聚产生的，焦炭中的钙、镁等除原来存在于灰分中外，也受熔剂和矿石的夹杂影响而略有升高。焦炭灰分中的P2O5在炉腰以下开始还原，到炉缸时含量减少一半左右；焦炭灰分中SiO2在炉腹以下高温区域开始发生还原反应，直到炉缸附近减少约一半左右；焦炭灰分中的Al2O3一直比较稳定[28,45,49-50]。

高炉冶炼1t生铁消耗焦炭（kg）：

CR＝（C直接还原铁＋C还原非铁元素＋C溶于液铁＋C风口燃烧）

冶炼过程中发生的碳溶反应式：

C＋2H2=CH4 (1-1)

C＋CO2=2CO (1-2)

一般在483℃即热解。但是此反应只损失焦炭中碳的0.5％左右，即使是煤气中的H2含量很高，这部分损失也不会超过1％，所以对焦炭强度没有太大的影响[9]。

在高炉t<570℃的部位：

Fe3O4 ＋4CO ＝ 3Fe ＋ 4CO2 (1-3)

在高炉t=500℃~800℃的部位：Fe2O3→Fe3O4→FeO→Fe依次顺序进行反应，即：

3Fe2O3 ＋CO ＝2 Fe3O4 ＋CO2 (1-4)

Fe3O4 ＋CO ＝3FeO ＋CO2 (1-5)

FeO ＋CO ＝Fe ＋CO2 (1-6)

以上与CO 反应最终生成Fe的反应为间接还原反应。

当高炉高温区t>1100℃时，碳溶反应需要有氧源并达到一定的温度。在高炉的上部，CO2的浓度高但是温度不够高；高炉的下部温度高但没有CO2，故都不会有此反应发生。

焦炭进入滴落带1450℃以上区域时，CO2已经消失，氧的载体转入液相中，主要为FeO和SiO2，此时发生以下反应：

FeO + CO = Fe + CO2 (1-7)

CO2 + C = 2CO (1-8)

可以看做是：

FeO + C = Fe + CO (1-9)

因为CO2 + C = 2CO反应速度很快，所以可看做是C直接还原液相中的FeO：

FeO＋C＝Fe + CO (1-10)

此反应随温度升高而加强。初渣氧化亚铁的含量很高，CO分压很低，所以氧化亚铁可以直接与碳发生反应。此反应消耗入炉焦炭大约占到7％~9％。反应强度与反应温度成正比，但不是反应温度越高，反应越剧烈，因系统中的FeO在不断的减少[9]。

向风口富氧喷吹煤粉，煤粉在风口区燃烧，代替部分焦炭向高炉供热的功能，使整个料柱下行的速度减缓，延长了焦炭在高炉中的停留时间，使焦炭与CO2接触的机会增多，碳溶反应加强，影响焦炭块度和表层结构[53-54]。同时喷吹煤粉提供固态碳和气体还原剂(CO，H2)，从而导致焦比降低。喷吹煤粉导致焦比降低，这就意味着焦炭单位体积的各方面负荷加大，如单位体积的焦炭承受的液渣、液铁冲刷增强；单位质量的渣/焦比增加，使还原Fe、Si、Mn、P所需的碳相对量增加。焦炭的反应程度增加，熔渣侵蚀与铁水侵蚀的时间增长，溶蚀量就增大；强度降低的程度增加，焦炭粉化率和细颗粒焦炭也增加。特别是炉缸中心“死料柱”粉焦增加后，使焦炭的透气性和透液性大幅度下降，导致骨架区焦炭的工作条件恶化。

高炉冶炼过程中富氧喷吹的煤粉在风口回旋区完全燃烧是不可能的，尤其是在高喷吹水平下，未燃尽的残碳量会随喷煤水平的增加而增加。未燃尽的残碳随煤气上升必然会影响高炉的透气性[55-57]。未燃煤粉主要积聚在风口回旋区气流流动缓慢和气流发生转折的区域，即回旋区的前方及软熔带的根部和软熔块内侧拐角处。在该区域进入到料柱空隙或黏结在滴落的渣铁上进入到炉缸中，或者随上升的煤气流进入到软熔带并且吸附在软化或是熔融的矿石层上或在焦炭和矿石的空隙中沉积下来。在块状带，主要滞留在矿石层中。还有少量的未燃煤粉进入到炉尘中。

如果未燃煤粉超过直接还原所要求的数量，以悬浮状态存在于炉渣中，就会增加炉渣的粘度，原因在于进入高炉的未燃煤粉主要聚集在气流流动缓慢和气流发生转折的区域，即回旋区的下部、前方及软熔带燃煤粉在随煤气流上升过程中，会与滴落下降过程中的炉渣和生铁接触而粘附在生铁和炉渣表面，在与生铁接触过程中由于良好的热力学和动力学条件会导致生铁渗碳反应的进行；与此同时，未燃煤粉在与炉渣接触过程中也会导致炉渣中铁的直接还原反应、非铁元素的直接还原反应和在炉渣中沉积反应的进行，从而影响炉渣的粘度和流动性。严重时会造成滴落带炉渣下降不顺利，更严重时会导致炉缸堆积[20-22]。

**2 水焦影响高炉反应原理**

**2.1 焦炭还原氧化物原理**

1. **氧化还原反应的热力学原理**：

焦炭是冶金过程中的主要还原剂，冶炼过程中许多难以被气体还原剂还原的氧化物，例如SiO2、MnO等，都能被碳所还原，只是氧化物越稳定，其还原开始的温度就越高。

氧化物与焦炭中的碳发生还原反应，一般可以用下列反应式表示：

MO＋C＝M＋CO  (2-1)

2MO＋C=2M+CO2  (2-2)

当固体碳存在时，在较高温度（900～1000℃）下，CO2在实际冶炼过程中存在较少，反应（2-2）仅能出现在较低温度下。

直接还原反应的热力学条件可以通过两种方式得出。

1. 碳的不完全燃烧反应与氧化物的生成反应的组合

2C+O2=2CO  (2-3)

2M+O2=2MO  (2-4)

上面两式可以和写成：

MO+C=M+CO 

 (2-5)

通过查询热力学表可以知道直接还原反应是强吸热反应。从氧势图中的CO和MO氧势线交点可以知道标准状态下氧化物还原的开始温度。

对于反应：

(MO) + [C] = [M] + CO (2-6)

反应的平衡常数为：

 (2-7)

由于铁水中的碳基本饱和，或是焦炭中的碳参与反应所以=1，则可以知道还原元素在金属熔体和炉渣间的分配系数为：

 (2-8)

这是由平衡常数导出的炉渣－金属液间的分配系数是还原反应的重要热力学公式。分配系数越大，炉渣中氧化物还原进入到金属液中的浓度越大。

影响分配系数的因素有：

(1) 温度。反应是吸热反应，提高温度利于反应正向进行。

(2) 炉渣组成。对于酸性氧化物的还原降低碱度、碱性氧化物的还原提高碱度都有利于分配系数的提高。

(3) CO的分压降低能提高分配系数。

* 1. **氧化还原反应的动力学原理**

氧化物的还原反应由下列反应组成：

MO+CO=M(s)+CO2 (I) (2-9)

CO2+C=2CO (II) (2-10)

由(2-9)和(2-10)可以得到反应式：

MO+C=M+CO (III) (2-11)

从反应可以看出氧化还原反应是通过中间产物CO2进行直接还原的。固体碳的作用在于把间接还原反应形成的CO2转变为间接还原的还原剂CO。当MO能在被CO间接还原、反应（II）能正向进行的温度（700~800℃）以上时，这一还原反应的机理可以实现。

由于反应（III）的Ea=140~400kJ/mol比较接近反应（II）的Ea=170~200kJ/mol，远高于反应（I）的Ea=60~80kJ/mol，且气相组分的CO2浓度比较接近反应（I）的平衡气相成分，而高于反应（II）的气相平衡成分，但是CO2出现的速率却比反应（II）的CO2消失速率快，因此，可以认为反应（II）是限制性环节[42]。反应（II）成为限制性环节时的反应速率可以表示为：

 (2-12)

式中：,是反应速率常数；

为气相CO2的平衡分压；

为反应级数，0.5～1。

可以从反应（I）的平衡常数得出:

  (2-13)

式中P为总压力。

所以可以得到：

 (2-14)

反应（I）可以看作是两个反应的组合：

MO(s)=M(s)+O2   (2-15)

CO+O2=CO2   (2-16)

将(2-15)和(2-16)相减可以得到：

MO(s)+CO=M(s)＋CO2   (2-17)

== (2-18)

由 (2-14)和(2-18)可以得到：

 (2-19)

对上式进行讨论：

(1) MO稳定性较大，此时《1，此时：

 (2-20)

 (2-21)

有：

 (2-22)

或：  (2-23)

其中：

 (2-24)

对于稳定性较大的氧化物，其〉0，稳定性大的氧化物还原的活化能比稳定性小的氧化物还原的活化能大，则稳定性大的氧化物的还原速率较低。

(2) MO稳定性较小，此时》1，此时：

 (2-25)

由》1、可得：

 (2-26)

从上式可知直接还原反应的等于反应（II）的，且反应（II）是限制性环节。

**3 焦炭水分及高炉产量指标对比分析**

**3.1 焦炭水分及高炉产量指标情况**

**表 1 焦碳水分及产量指标**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 名称 | H2O | H2OMax | H2OMin | 高炉产量 | 燃比，kg/t | 煤比，kg/t | 全焦负荷 | 燃料负荷 | 日期 |
| 混焦 | 8.09 | 15.6 | 3.4 | 3725.72 | 595 | 169 | 4.01 | 3.05 | 2019-11-21 |
| 混焦 | 10.21 | 15.4 | 5.4 | 4155.7 | 541 | 150 | 4.20 | 3.21 | 2019-11-22 |
| 水焦 | 8.85 | 15.8 | 3 | 3743.2 | 520 | 136 | 4.39 | 3.42 | 2019-11-23 |
| 水焦 | 8..7 | 14.4 | 3.4 | 3968.69 | 558 | 160 | 4.24 | 3.21 | 2019-11-24 |
| 水焦 | 10.99 | 19.4 | 4.3 | 3479.04 | 542 | 132 | 4.07 | 3.23 | 2019-11-25 |
| 水焦 | 9.9 | 17.6 | 3.9 | 3576.2 | 544 | 106 | 3.89 | 3.25 | 2019-11-26 |
| 水焦 | 9.3 | 15.48 | 3.2 | 3399.65 | 582 | 124 | 3.89 | 3.19 | 2019-11-27 |
| 水焦 | 10.04 | 16.9 | 4.1 | 3628.29 | 566 | 123 | 3.77 | 3.08 | 2019-11-28 |
| 水焦 | 7.47 | 14.3 | 3.3 | 3621.14 | 546 | 121 | 3.94 | 3.21 | 2019-11-29 |
| 水焦 | 10.26 | 14.3 | 4.5 | 3623.24 | 547 | 119 | 3.91 | 3.20 | 2019-11-30 |
| 水焦 | 9.35 | 13.9 | 6.2 | 3621.58 | 544 | 113 | 3.87 | 3.19 | 2019-12-1 |
| 水焦 | 7.7 | 12.1 | 4.4 | 3398.8 | 579 | 115 | 3.66 | 3.05 | 2019-12-2 |
| 混焦 | 8.46 | 13.5 | 0.7 | 3699.06 | 519 | 109 | 4.10 | 3.37 | 2019-12-3 |
| 混焦 | 3.51 | 11.9 | 0.2 | 3923.71 | 522 | 130 | 4.23 | 3.34 | 2019-12-4 |
| 干焦 | 0.23 | 0.5 | 0.1 | 3983.55 | 524 | 151 | 4.51 | 3.40 | 2019-12-5 |
| 干焦 | 0.18 | 0.3 | 0.1 | 3409.87 | 533 | 152 | 4.55 | 3.44 | 2019-12-6 |
| 干焦 | 0.21 | 0.3 | 0.2 | 4205.66 | 504 | 149 | 4.68 | 3.50 | 2019-12-7 |
| 干焦 | 0.35 | 1 | 0.2 | 4183.73 | 509 | 150 | 4.61 | 3.45 | 2019-12-8 |
| 干焦 | 0.76 | 1.7 | 0.1 | 4100.9 | 514 | 151 | 4.60 | 3.45 | 2019-12-9 |

芜湖新兴焦化部干熄焦系统于12月20日开始计划检修，1280m³高炉提前开始腾仓及场地存干焦逐步置换水焦（水焦及干焦生产煤种及工况条件一致），21日、22日炉况开始发生变化，炉子顺行度开始是受到影响。

**3.2 湿法与干法焦炭水分波动情况**

**图 1 年检期间焦炭水分波动**

芜湖新兴焦化部生产水焦水分波动较大，最大值19.4%和最小值4.3%，差值最大超过15.1%，每天平均水分最大值10.99%和最小值7.47%，差值最大超过3.52%。12月4日夜里干焦系统检修结束，高炉进少部分干焦及厂内留存干焦入炉后炉况明显好转。

**3.3 湿法与干法焦炭对指标影响**

**图 2 干湿法焦炭对高炉产量影响**

**图 3 干湿法焦炭对高炉指标影响**

干熄焦检修前期，1280高炉混焦较比全水焦生产的焦比、燃比、煤比指标好，而全干焦则优于混焦。采用混焦生产时最高达焦比404 kg/tfe、燃比595 kg/tfe，采用全水焦生产时最高达焦比441 kg/tfe、燃比579 kg/tfe，采用全干焦生产时最高达焦比357 kg/tfe、燃比533 kg/tfe。

**3.4 焦炭水分对焦炭及燃料负荷的影响**

**图 4 焦炭的水分对料柱负荷的影响**

实际操作表明：为了保证炉况顺行度不崩塌料，1280高炉使用全水焦生产时最低仅仅能维持正常上料焦炭负荷为3.77、燃料负荷为3.08；混焦生产时焦炭负荷稍微提高4.01及燃料负荷为3.05；而后期全干焦时焦炭负荷最低可提到4.51及燃料负荷为3.4。

**4 结语**

1、高炉大量消化水熄焦时，则需提高入炉原燃料的温度及抓好原燃料筛分降低含粉量，确保炉前及外围环境的保驾护航。

2、炉况难行时要保证炉前渣铁出尽，确保火车头在15-20分钟对罐，高炉30分钟打开铁口。

3、顶温低炉况难行时炉前需采取延长出铁时间的办法来保证出净渣铁。炉前严格按照开铁口程序精细化操作，防止钻漏和铁口浅。炮泥不能满足要求及时反映，调整更换。

4、炉前和工长在出铁过程，不仅要保证理论铁量出够，还要保证渣量出够（通过出渣时间、流量和来风情况综合判断），保证每炉渣铁出尽。

5、每次出铁前和出铁中认真检查冲渣水的情况，防止渣沟堵塞事故。

6、保证铁口部位泥套完好，高炉新加的铁口挡板通过改进保持好，两座高炉泥套要经常检查和维护。

7、高炉做沟和处理撇渣器时间严格控制，防止做沟和处理撇渣器时间过长造成高炉憋风或减风，建立奖惩制度。

8、料柱透气性进一步变差的情况下，更要保证入炉原燃料质量。

（1）两座高炉进一步调整槽下筛分时间。

（2）不合格原燃料坚决落地。

（3）监督生矿筛分质量。落地料尽可能过筛眼大的筛子，降低入仓含粉。

（4）加强原燃料质量监督，上到工序的变化及时反映到高炉、调度室及事业部专业主管。

（5）减少烧结性能差的料生产烧结矿，进一步与采购部协调，增加一些烧结性能好的料搭配使用，稳定烧结矿质量。

（6）烧结按照事业部提出的质量要求组织生产。品位：57.5%，R2：1.95±0.05，SiO2：6.5%，Al2O3≤1.9%，高炉综合入炉品位≥58%。

参考文献

[1] 胡源申．影响焦炭高温性能的主要因素．炼铁，1994，6：33～37．

[2] 龙晓阳．焦炭质量的改善及其对高炉冶炼过程的影响．鞍钢技术，1994，2：13~17．

[3] 傅永宁．高炉中焦炭性质变化规律的研究．炼焦化学，1982(1)：10～19．

[4] 傅永宁．高炉焦炭．北京：冶金工业出版社，1995：196～202．

[5] 董亚存，马号明，张书科．焦炭质量变化与高炉生产操作的探讨．河北冶金，2005，2：19．

作者简介 陈那港，男，1983年8月生于广东湛江，研究生学历，工学硕士，中共党员，2010年3月硕士毕业于辽宁科技大学（鞍山钢铁学院）研究生院钢铁冶金专业。工程师，现从事炼铁生产管理及工艺技术研究工作 现场经验9年多，联系电话18010771997，邮箱：chennagang@126.com，QQ：156100044，微信号：18010771997

**邮寄地址：241002 安徽省芜湖市三山区经济开发区春洲路2号芜湖新兴铸管有限责任公司炼铁部 陈那港 （18010771997）**