# 稳定炼焦煤热态性能检测准确性的分析

江 鑫[1], 芦建文[2], 李晓炅[1], 付利俊[1]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 包头钢铁(集团)有限责任公司信息服务中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要**: 文章分析了炼焦煤在热态性能检测过程的影响因素, 主要体现在炼焦煤冶炼焦炭的过程、焦炭制样方式和焦炭热态性能检测过程。炼焦煤冶炼焦炭过程对焦炭热性能的影响主要体现在试验焦炉炉型、温度控制程序、装煤量及装煤密度和熄焦方式等。冶炼后的焦炭热态性能检测中制样是极其关键的一个操作过程, 对检测数值的影响十分显著。在其他条件一致的情况下, 纯手工制样焦炭热态性能检测数值稳定性最好, 但数值偏高。检测过程对焦炭热性能的影响主要体现在检测试样的块数、炉膛恒温区、控温热电偶、反应气体和标准筛等。

**关键词**: 炼焦煤; 热态性能; 制样; 误差; 准确性

**中图分类号**: TF526.1 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009-5438(2020)04-0012-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.04.004

## Analysis on Accuracy of Hot Performance Test for Stable Coking Coal

*Jiang Xin*[1], *Lu Jian-wen*[2], *Li Xiao-jiong*[1], *Fu Li-jun*[1]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Information Service Center of Baotou Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

**Abstract**: In this paper, the influencing factors of coking coal in hot performance test are analyzed and they are mainly reflected in the process of smelting coke with coking coal, sample preparation method of coke and the hot performance test process of coke. The effects of the process of smelting coke with coking coal on hot performance of coke are mainly reflected in type of test coke oven, temperature control program, coal capacity, density of coal charge and mode of quenching coke. Sample preparation is a key operation in the hot performance test for smelted coke and its influence on test values is significantly. With other conditions the same, the stability of test values for hot performance test of coke with pure handmade sample is the best, but the values are higher. The effects of test process on hot performance of coke are mainly reflected in the number of sample, flat-temperature zone of oven, thermocouple of temperature control, reactant gas and standard screen.

**Key words**: coking coal; hot performance; sample preparation; error; accuracy

炼焦煤的性能在冶金焦炭质量管控中具有决定性作用, 特别是近年来高炉对焦炭热态性能要求愈

**收稿日期**: 2020-03-09

**作者简介**: 江 鑫(1975-)男, 河北省博野县人, 主要从事焦化炼焦配煤及检验技术研究工作。

中国知网 https://www.cnki.net

来愈重视，炼焦单种煤的热态性能得到炼焦工作者的高度关注。

冶金焦炭是高炉冶炼中最重要的原料，作为高炉内的料柱骨架，保证炉内透气、透液。焦炭的热态性能（反应性 *CRI* 及反应后强度 *CSR*）指标对现代高炉冶炼过程有着极大的影响，成为制约高炉稳定、均衡、优质、高效生产的关键因素，炼铁和炼焦行业对其重要性的认识及参数指标依赖达到前所未有的高度。

## 1　炼焦煤冶炼焦炭过程的分析

炼焦单种煤在检测热态性能中，首先需要将其破碎混匀，细度控制在 75% ~85%，水分控制在 10%，调整试验焦炉温度控制系统，依照操作规程装入试验焦炉，冶炼成焦炭，在这个过程中，分析对焦炭热态性能检测准确性的影响因素。

### 1.1　试验焦炉炉型

国内试验焦炉一般以装入煤量来划分，目前煤炭行业及焦化行业使用的试验焦炉有 20 kg、40 kg、200 kg、300 kg 等炉型，其中 40 kg 是现代配煤炼焦试验新发展的试验焦炉，其主要优势是装煤量适中、数据相关性较好，成为配煤炼焦试验应用最广泛的炉型，得到炼焦行业一致认可。不同的炉型由于装煤量的差异而使炼焦煤密度、烟囱吸力、冶炼过程等不同，造成焦炭热态性能差异很大，总体的趋势是在其他条件一致的情况下，随着装煤量的增大，焦炭反应后强度（*CSR*）虽然提高，但不与装煤量呈线性关系。20 kg、40 kg 试验焦炉炼焦煤的机械强度（$M_{40}$、$M_{10}$）和热态性能（*CRI*、*CSR*）的对比试验见表 1。

**表 1　20 kg、40 kg 试验焦炉炼焦煤的性能对比**（质量分数）　%

| 试验焦炉 | $M_{40}$ | | $M_{10}$ | | *CRI* | | *CSR* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 炼焦煤 1 | 炼焦煤 2 | 炼焦煤 1 | 炼焦煤 2 | 炼焦煤 1 | 炼焦煤 2 | 炼焦煤 1 | 炼焦煤 2 |
| 20 kg | 83.45 | 75.68 | 8.60 | 13.78 | 30.0 | 44.2 | 55.4 | 30.0 |
| 40 kg | 84.13 | 77.65 | 7.13 | 11.27 | 27.6 | 38.1 | 60.2 | 40.2 |

从表 1 可以看出，40 kg 试验焦炉冶炼焦炭的机械强度及热态性能明显优于 20 kg 试验焦炉冶炼焦炭，但机械强度（$M_{40}$、$M_{10}$）差距不是十分显著，热态强度的差距较为显著。

### 1.2　温度控制程序

温度控制程序在炼焦单种煤的焦炭热态性能检测中具有关键性作用。炼焦单种煤在试验焦炉内是高温干馏的过程，温度对焦炭成熟以及自身性能具有决定性作用，1 050 ℃的恒温时间和加热总时间对其有着重要影响。1 050 ℃的恒温时间即行业上常说的“焖炉时间”，目前1 050 ℃的恒温时间有 80 min、120 min 和200 min 等几种；总加热时间一般有 15.5 h、16.5 h、17.5 h 等几种。目前煤炭及炼焦行业常使用的40 kg 试验焦炉不同温度控制程序在其他检测条件一致情况下焦炭热态性的影响，分别见表 2 和表 3。

**表 2　40 kg 试验焦炉两种温度控制程序关键控制点**

| 关键控制点 | 焖炉时间/min | 总加热时间/h |
|---|---|---|
| 温度控制程序 1 | 80 | 15.5 |
| 温度控制程序 2 | 200 | 17.5 |

**表 3　40 kg 试验焦炉不同温度控制程序焦炭质量**（质量分数）　%

| 项目 | | $V_{daf}$ | *CRI* | *CSR* |
|---|---|---|---|---|
| 温度控制程序 1 | 焦炭 1 | 1.27 | 24.6 | 60.2 |
| | 焦炭 2 | 1.31 | 25.7 | 61.8 |
| | 焦炭 3 | 1.22 | 26.1 | 60.4 |
| 温度控制程序 2 | 焦炭 1 | 1.01 | 20.2 | 67.5 |
| | 焦炭 2 | 0.98 | 21.2 | 66.4 |
| | 焦炭 3 | 1.08 | 22.1 | 64.9 |

从表 3 中数据可以看到两种关键控制点不同的温度控制程序，当其他检测条件一致的情况下，焦炭热态性能特别是反应后强度差异很大，最大值相差 7.3 个百分点，最小值也相差 3.1 个百分点，充分说明了温度控制程序关键控制点对焦炭热态性具有重要影响。

### 1.3　装煤量及装煤堆密度

装煤量对试验焦炉的冶金焦炭热态性能有着重要的影响，是试验焦炉温度控制程序参数设定的关键指标。当试验焦炉温度控制程序参数已设定好后，装煤量就成为冶金焦炭热态性能的重要影响因

中国知网　https://www.cnki.net

素,当装煤量少于核定装煤量时,焦炭成熟速度加快,焦炭块度减小,焦炭热态强度会变好; 当装煤量大于核定装煤量时,焦炭成熟度降低,焦炭挥发份增高,焦炭热态强度变差。

目前市场上常用非捣固型40 kg试验焦炉装炉的堆密度在745~760 kg/m$^3$之间,堆密度增加,炼焦煤胶质体熔融性变好,中间相生成增加,胶质体压力增加,焦炭致密性增加,焦炭热态性能变好。随着装炉的堆密度的增加,焦炭热态性会随之改善。捣固型40 kg试验焦炉所冶炼焦炭热态性能好于非捣固型40 kg试验焦炉。同一种炼焦煤不同堆密度冶炼焦炭热态性能检测见表4。

### 1.4 熄焦方式

试验焦炉熄焦方式主要有湿法熄焦和干法熄焦两种。两种不同的熄焦方式对焦炭热态性影响较大。一般来说,干法熄焦的焦炭其热态性能要好于湿法熄焦的焦炭。熄焦方式对焦炭的气孔结构具有明显的影响。湿熄焦过程中,熄焦水喷洒在炽热的红焦上,由于急剧降温,焦块聚然冷却收缩使焦炭的内应力聚增,产生大量的裂纹,形成较多的气孔; 另外,部分水蒸汽和红焦发生化学反应,也生成较多气孔。干熄焦工艺则是通过惰性气体与红焦热交换来熄灭焦炭,焦炭的降温速度缓慢,因此焦炭热应力较小,产生的裂纹和气孔较少,不发生水煤气反应,这是干熄焦提高焦炭质量的原因。两种不同熄焦方式焦炭气孔对比及焦炭热态性能,见表5、表6。

**表4 不同堆密度冶炼焦炭热态性能**

| 装炉密度/(kg·m$^{-3}$) | *CRI*/% | *CSR*/% |
|---|---|---|
| 0.74 | 30.2 | 55.7 |
| 0.75 | 28.4 | 57.4 |
| 0.80 | 25.1 | 59.8 |
| 0.85 | 21.6 | 62.9 |
| 0.90 | 19.8 | 65.2 |

**表5 干熄焦和湿熄焦气孔对比分析**

| 试样名称 | 不同范围气孔率/% | | | | | | | 平均气孔直径/μm | 气孔率/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | <60 μm | 60~120 μm | 120~240 μm | 240~360 μm | 360~480 μm | 480~600 μm | >600 μm | | |
| 1#湿焦 | 71.88 | 6.50 | 8.27 | 5.76 | 3.39 | 1.75 | 2.44 | 87.95 | 36.1 |
| 1#干焦 | 73.08 | 7.44 | 9.59 | 4.82 | 2.15 | 1.38 | 1.43 | 81.00 | 32.6 |
| 2#湿焦 | 71.12 | 6.69 | 8.91 | 5.53 | 3.52 | 1.72 | 2.51 | 88.53 | 37.9 |
| 2#干焦 | 72.98 | 7.23 | 9.16 | 5.27 | 2.34 | 1.49 | 1.52 | 82.37 | 33.8 |

**表6 干熄焦和湿熄焦热性能**(质量分数) %

| 试样编号 | 熄焦方式 | *CRI* | *CSR* |
|---|---|---|---|
| 1# | 干熄焦 | 20.5 | 70.1 |
| | 湿熄焦 | 24.9 | 64.0 |
| 2# | 干熄焦 | 22.5 | 68.4 |
| | 湿熄焦 | 24.0 | 64.6 |

## 2 焦炭制样过程的分析

焦炭热态性能检测中制样是极其关键的一个操作,对检测数值的影响显著。国家标准中规定: 将焦炭制成23~25 mm的近似球形颗粒。国家标准中规定取Φ23 mm筛上物,去掉薄片状焦和细条状焦,保留较厚片状焦和较粗条状焦用手工修整颗粒状焦块,用Φ23 mm圆孔筛筛分后与未经过修整的颗粒状焦块混匀。国家标准中规定取Φ21 mm筛上物,去掉片状焦和条状焦,缩分后得到焦块2 kg[1]。目前有4种制样方式,即纯手工砸制修球制样法、机械制样法、颚式破碎机制样法、颚式破碎机破碎修球制样法。同一种焦炭不同的制样方法,在其他条件均一致的情况下,焦炭热态性能检测过程中的反应性和反应后强度的重复性差值很大。以上4种方法中,纯手工砸制修球制样法的重复性最好,但焦炭热态性能趋好,数值高于其他几种制样方法,在煤炭供应行业与炼焦生产行业存在一定的分歧。目前较为常用的方法为颚式破碎机破碎修球制样法和机械制样。同一种焦炭不同制样方法热态性能,见表7。

**表7 不同制样方法热态性能**(质量分数) %

| 制样方式 | *CRI* | *CSR* |
|---|---|---|
| 纯手工砸制修球制样法 | 20.7 | 67.4 |
| 机械制样法 | 22.8 | 65.5 |
| 颚式破碎机制样法 | 25.1 | 60.4 |
| 颚式破碎机破碎修球制样法 | 23.7 | 62.1 |
| 极差值 | 4.4 | 7.0 |

中国知网 https://www.cnki.net

## 3　焦炭检测过程的分析

### 3.1　检测试样的块数

同一样品，入反应炉的颗粒数不同，对试验数据具有一定的影响。一般情况下，入反应炉的焦炭颗粒数越多，其热态性能越差，反之，则越好。其原因在于，热态性能检测入反应炉焦炭质量要求200 g，相同质量的焦炭颗粒数越多，说明焦炭基质越轻，焦炭的气孔就会越多，在热态性能检测时与 $CO_2$ 反应过程中熔损就会越大，焦炭反应后强度就会越低。国家标准中规定焦炭相差不超过 1 粒[1]。

### 3.2　炉膛恒温区

焦炭热态性能检测是焦炭在特定反应器内、规定温度下的与 $CO_2$ 反应过程中熔损状况所表征的一种试验检测过程。焦炭与 $CO_2$ 反应温度至关重要，是影响焦炭热态性能的核心参数之一，其核心控制点就在于反应仪炉膛恒温区的控制，要保证焦炭热态性能检测仪的反应器处在 1 100 ℃的恒温区之内，温度控制变化在 ±3 ℃之内。反应器深度为 500 mm，200 g 试样的高度约为 100 mm，因此，炉膛的恒温区的长度必须大约 150 mm，在日常检测中要定期校准炉膛的恒温区，确保试验过程试样的位置在炉膛的恒温区之内。

### 3.3　控温热电偶

焦炭热态性能检测仪的温度显示是由控温热电偶完成的，控温热电偶的质量以及使用过程的操作对焦炭热态性能检测的影响是巨大的。为保证检测试验过程反应温度的精准控制，对于热电偶要关注以下几个方面。

(1) 热电偶的选型。热电偶必须选择 Φ0.5 mm 的 S 型热电偶[2]。

(2) 热电偶的尺寸要求。热电偶的结点为圆球状(测温点)，且必须位于刚玉套管的顶端，以确保测量位置的准确性。同时一定要注意内丝距离套管顶端距离，防止距离过大，影响温度的采集。因为在焦炭热态性能检测过程中，热电偶穿插于焦炭层内中心，此处为恒温区，能够反映出真实反应温度，如果偶丝过短，而外套管长度恒定，距离顶端距离偏大会造成恒温区失真，导致检测焦炭层显示温度不能反映真实温度。

(3) 热电偶的标定。通常正常使用的热电偶，每年必须送往具有资质的检测单位校验一次，出具鉴定合格证书后方可继续使用。鉴定结果一般根据检定规程要求 600 ~ 1 600 ℃检测点温度偏差不超过检测点温度 25% 来确定是否满足要求。

(4) 补偿导线。补偿导线在一定温度范围内具有与所匹配热电偶的热电动势标值相同的一对带有绝缘层的导线，用它连接热电偶与测温仪表，可以补偿二次仪表与热电偶连接处温度变化所产生的误差，补偿导线要根据所使用的热电偶种类和所使用的场合进行正确选择。S 型热电偶要选择 S 型补偿导线，K 型热电偶要选择 K 型补偿导线。补偿导线选择不正确将导致显示温度与实际温度不符。

### 3.4　反应气体

焦炭热态性能检测过程中使用两种气体，分别是 $N_2$ 和 $CO_2$ 气体。$N_2$ 作为反应前的保护气体，其目的是防止焦炭在 1 100 ℃前及反应后冷却时与空气发生氧化反应；$CO_2$ 气体作为反应气体，在 1 100 ℃焦炭与之反应 2 h。$N_2$ 的纯度对测定结果有一定的影响，尤其是对 *CRI* 影响较为显著，纯度越低，测得的 *CRI* 越大，因此，对于纯度达不到 99.99% 的 $N_2$ 应当进行净化，脱除氧气和水分。$CO_2$ 气体的流量要稳定准确，纯度按要求不低于 99.99%。$CO_2$ 气体流量不足，反应性偏低，反应后强度偏高，过量则相反。$CO_2$ 气体通气前应当使用电加热减压阀提前预热 $CO_2$ 气瓶出口处，以保证气体流量的稳定。$CO_2$ 气体的纯度越高，测得的焦炭热态性能越准确。检测时要保证 $CO_2$ 气体的纯度达到技术要求。

### 3.5　标准筛

焦炭热态性能检测在试样过程中使用 Φ23 mm 和 Φ25 mm 的标准筛，在反应后的焦炭经Ⅰ型转鼓后，使用 Φ10 mm 的标准筛分后计算反应后强度。标准筛要定期检查筛孔直径的尺寸，标准筛要经过有资质的计量单位校准后方可使用，对于频繁使用的标准筛要制定合理的期间核查，以保证标准筛孔径达到标准要求。制样过程中标准筛使用时间较长，其孔径变大，试样的块度随之将变大，会造成焦炭热态性能趋好，其原因在于焦炭块度增加，焦炭的致密性增加，焦炭抗熔损性增加；同时焦炭在反应过程中由于块度增加，比表面积减少，焦炭反应后强度向好。反应后焦炭经过Ⅰ型转鼓后，使用 Φ10 mm 的标准筛筛分后计算反应后强度，由于孔径增大，筛上物减少，会导致反应后强度降低。

(下转第 31 页)

中国知网　https://www.cnki.net

器，还要方便高压清洗。

(4) 掺烧焦炉煤气会使锅炉水冷壁、过热器、省煤器结垢。要定期检查各受热面结垢情况，如果发现受热面结垢严重，应请专业的团队对锅炉受热面进行高压水冲洗。有些受热面垢质坚硬，高压水难以清理，可以使用钢丝刷对灰垢进行打磨处理。

(5) 为防止低温腐蚀，在锅炉运行过程中要适当提高排烟温度，使尾部受热面烟气温度大于 160 ℃。

(6) 掺烧焦炉煤气后由于烟气容积变小，尾部受热面烟气温度往往会低于设计温度[3]。如果烟气温度低于露点，则尾部受热面会发生低温腐蚀。定期检查空气预热器、煤气预热器，发现有堵塞情况应及时用高压水清洗。如果预热器有较大面积漏风或堵塞严重难以清理时需考虑更换。

针对 8#、9#锅炉出现的问题，对水冷壁、各级过热器进行打磨清理，对两级省煤器、两级空气预热器、煤气预热器进行高压水清洗。但由于发现问题较晚，低温段空气预热器下半部分及煤气预热器低温腐蚀已经相当严重，高压水枪清理效果不佳。于是将 8#、9#锅炉煤气预热器整体拆除，将低温段空气预热器下半部分整体更换。经过处理后 8#、9#锅炉最大负荷可以达到约 200 t/h，基本上解决了锅炉达不到额定负荷的问题。

## 5　结论

(1) 焦炉煤气具有一定的危害性，会造成输送管道腐蚀、堵塞。会造成锅炉尾部烟道低温腐蚀和堵塞，严重时会降低锅炉负荷。

(2) 通过高压水清洗、堵塞清理、控制烟气温度等措施可以将焦炉煤气带来的不利影响降低至最小。

### 参　考　文　献

[1] 薛晓敏. 燃焦炉煤气锅炉尾部受热面和烟道的腐蚀及对策 [J]. 中氮肥，2010，32 (3)：48 – 49.

[2] 李国华. 锅炉尾部受热面腐蚀和积灰的危害及预防 [J]. 有色冶金节能，2000，19 (4)：35 – 37.

[3] 余欣迪，袁振峰，余奂迪，等. 燃气锅炉尾部受热面腐蚀的机理分析及改造 [J]. 煤气与热力，2002，22(3)：230 – 231.

(上接第 15 页)

## 4　结论

(1) 炼焦煤冶炼焦炭过程对焦炭热性能的影响主要体现在试验焦炉炉型、温度控制程序、装煤量及装煤密度和熄焦方式等方面。

(2) 焦炭热态性能检测中制样是极其关键的一个操作过程，对检测数值的影响十分显著。在其他条件均一致的情况下，纯手工制样焦炭热态性能检测数值稳定性最好，但检测数值偏高。

(3) 检测过程对焦炭热性能的影响主要体现在检测试样的块数、炉膛恒温区、控温热电偶、反应气体和标准筛等几方面。

### 参　考　文　献

[1] GB/T 4000—2017，焦炭反应性及反应后强度 [S].

[2] YB/T 4526，炼焦试验用小焦炉技术规范 [S].

中国知网　https://www.cnki.net