● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.06.001

温度条件对焦炭热强度的影响规律研究

程 欢[1],张洪波[2],梁英华[1],尤新东[2],张文强[2],谢全安[1],王杰平[1]
(1.华北理工大学 化学工程学院,河北 唐山 063210;2.河钢集团唐钢公司,河北 唐山 063016)

摘 要:采用自主研发的焦炭热强度检测方法,考察了1 050、1 100、1 150、1 200、1 250和1 300 ℃条件下的焦炭热强度变化。结果表明,不同温度条件下测得的等溶损反应后强度CSR_{25}值与CSR指标存在显著差异,且两者之间没有明显的正相关性。反应温度T不同,焦炭的溶损反应模式不一样,导致不同焦炭的CSR_{25}-T曲线的形状有差异。根据凹口位置,可以大致分为三类:凹口处于低温区域的I型,凹口处于中温区域的II型和凹口处于高温区域的III型。温度条件对焦炭测得的热强度值具有重要影响,国标CSR方法只检测1 100 ℃一个温度点是不够的,应根据温度条件变化,提出更具模拟性的焦炭热强度表征指标。

关键词:温度条件;焦炭;热强度;高炉

中图分类号:TF526.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)06-0519-05

Study on the Influence of Temperature Conditions on the Thermal Strength of Coke

CHENG Huan[1], ZHANG Hongbo[2], LIANG Yinghua[1], YOU Xindong[2], ZHANG Wenqiang[2], XIE Quan'an[1], WANG Jieping[1]
(1. School of Chemical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. HBIS Group Tangsteel Company, Tangshan 063016, China)

Abstract: The variation of coke thermal strength values under the conditions of 1 050, 1 100, 1 150, 1 200, 1 250 and 1 300 ℃ was investigated by the self-developed coke thermal strength detection method. The results show that there is a significant difference between CSR_{25} value and CSR index under different temperature conditions, and there is no significant positive correlation between them. With different reaction temperature T, the dissolution loss reaction mode of coke is different, resulting in different shapes of CSR_{25}-T curves of different coke. According to the location of the notches, they can be roughly divided into three types: type I where the notches are in the low-temperature region, type II where the notches are in the medium-temperature region, and type III where the notches are in the high-temperature region. Temperature conditions on the hot strength of coke measured value has the important influence of national standard method of CSR only test 1 100 ℃ temperature of a point is not enough, should according to temperature changes, the intensity of coke thermal characterization of index of more simulation.

Key words: temperature conditions; coke; thermal strength; blast furnace

焦炭作为高炉的主要炉料之一,在高炉内起到供热、还原、料柱骨架和渗碳等一系列作用[1]。由于高炉下部温度较高,焦炭作为高炉内唯一以固态形式存在的炉料,料柱骨架的作用凸显。因此,炼铁工作者普遍比较关注焦炭在高温状态下的强度,尤其是在软熔带与CO_2发生溶损反应之后的强度,即热强度。目前,检测焦炭热强度的方法主要参考的均是日本新日铁公司提出的反应性CRI及反应后强度CSR检测方法[2]。其中,焦炭的热强度CSR指标在我国经过多年发展,已是炼铁工作者最为重视的技术指标,作为指导高炉炼铁与焦炭贸易定价的主要参考依据[3]。

虽然CSR指标经过多年发展,但是近期一些企业的生产实践证实,该指标也存在不足,例如我国八一钢铁厂,CSR指标只有30%~50%,但仍可以用于大高炉炼铁[4]。国内外部分学者也对该指标的适用性提出了质疑。关注的点主要在,CSR指标是在1 100 ℃条件下检测得到的,而焦炭在高炉中与CO_2发生溶损反应是在软熔带附近,温度区间为900~1 300 ℃左右。汪琦等[5]认为不同温度条件下焦炭的溶损反应模式可能不同,因此只检测1 100 ℃一个温度点是不够的,对焦炭在高炉中的劣化行为

收稿日期:2019-02-19
基金项目:国家自然科学基金资助重点支持项目(U1361212);唐山市科技计划应用基础研究项目(18130209a)
作者简介:程 欢(1989-),辽宁阜新人,博士,讲师.研究方向:高炉炼铁与配煤炼焦.电话:15100539106,E-mail:chenghuanfuxin@163.com

模拟性存在不足。另外,Barnaba[6]的研究结果表明,焦炭在高炉内与 CO_2 反应导致的焦炭溶蚀量在25%左右。

本文针对国内某重点钢铁企业的高炉焦进行研究,主要考察焦炭在不同温度与 CO_2 发生溶损反应后的热强度变化规律,为完善焦炭质量评价体系提供参考。

1 试验材料与方法

本文选取了国内某重点钢铁公司高炉现行采用的 5 种高炉焦,分别为 J1、J2、J3、J4 和 J5。将焦炭破碎并制成 23～25 mm 的球形待测试样,缩分成 7 组,每组焦炭的质量为 200±0.5 g。

焦炭的热强度采用两种方法检测:一种是利用国标 GB/T4000—2008 方法检测焦炭的反应后强度 CSR 指标;另一种方法是考察焦炭在不同温度点检测得到的热强度指标,选取的温度点有 6 个,分别为 1 050、1 100、1 150、1 200、1 250 和 1 300 ℃。将焦炭在惰性气体 N_2 气氛保护下进行升温,N_2 流量为 5 L/min,当温度达到以上目标温度,将 N_2 切换成 CO_2 气体进行溶损反应,CO_2 气体的流量为 5 L/min。当溶损率达到焦炭质量的 25%时,结束反应,将 CO_2 气体重新切换为 N_2 保护,并降温。当温度降为室温时,取出焦炭,采用与国标相同的 I 型转鼓方法进行焦炭的等溶损反应后强度 CSR_{25} 的测试。

CSR 指标采用 KF-2008H 型焦炭反应性及反应后强度分析仪测得,CSR_{25} 指标的检测装置见参考文献[5]。

2 试验结果及讨论

2.1 焦炭 CSR 与 6 个温度条件下测得的 CSR_{25} 强度指标

采用国标方法测得的 CSR 指标和考察 6 个不同温度点(1 050、1 100、1 150、1 200、1 250、1 300 ℃)热强度变化测得的 CSR_{25} 指标数据见表 1。

表1 焦炭的热强度指标数据
Tab.1 The data of thermal strength indexes of cokes

焦样名称	CSR (%)	CSR_{25}(%)					
		1 050 ℃	1 100 ℃	1 150 ℃	1 200 ℃	1 250 ℃	1 300 ℃
J1	68.50	66.56	66.46	60.49	61.21	59.54	63.54
J2	66.30	67.46	62.25	59.66	60.37	61.05	63.61
J3	64.02	65.43	62.68	59.02	58.44	60.03	62.57
J4	63.50	68.66	66.95	61.92	60.10	60.30	68.97
J5	62.40	67.07	61.27	61.19	61.99	63.96	67.42

如表 1 所示,采用国标方法检测 5 种高炉焦的热强度 CSR 指标,J1 至 J5 强度逐渐降低,为62.40%～68.50%,最大差距为 6.10%。由 1 050～1 300 ℃ 6 个温度点条件下测得的热强度 CSR_{25} 指标结果可知:1 050 ℃条件下测得的强度值为 65.43%～68.66%,最大差距为 3.23%;1 100 ℃条件下测得的强度值为 61.27%～66.95%,最大差距为 5.68%;1 150 ℃条件下测得的强度值为 59.02%～61.92%,最大差距为 2.90%;1 200 ℃条件下测得的强度值为 58.44%～61.99%,最大差距为 3.55%;1250℃条件下测得的强度值为 59.54%～63.96%,最大差距为 4.42%;1 300 ℃条件下测得的强度值为62.57%～68.97%,最大差距为 6.40%。由以上可知,采用国标方法评价 5 种焦炭强度值差距较大。6 个温度点检测的热强度结果显示,低温和高温检测的强度值差距较大,中间温度检测的强度值差距小。

2.2 不同温度条件下检测的 CSR_{25} 与 CSR 指标的关系

不同温度条件下检测得到的热强度 CSR_{25} 指标与 CSR 指标的关系从两个角度进行分析:一是针对单个焦炭来讲,二是针对 5 种焦炭来谈。首先针对单种焦炭来说,以 CSR 指标为基准,6 个温度点测得的等溶损反应后强度 CSR_{25} 值与 CSR 的差距见表 2。

表 2 不同温度测得的 CSR_{25} 值与 CSR 指标的差距
Tab.2 The difference between the CSR_{25} values measured at different temperatures and the CSR index

焦样名称	$\Delta(CSR_{25}\text{-}CSR)$(%)					
	1 050 ℃	1 100 ℃	1 150 ℃	1 200 ℃	1 250 ℃	1 300 ℃
J1	-1.94	-2.04	-8.01	-7.29	-8.96	-4.96
J2	+1.16	-4.05	-6.64	-5.93	-5.25	-2.69
J3	+1.41	-1.34	-5.00	-5.58	-3.99	-1.45
J4	+5.16	+3.45	-1.58	-3.40	-3.20	+5.47
J5	+4.67	-1.13	-1.21	-0.41	+1.56	+5.02

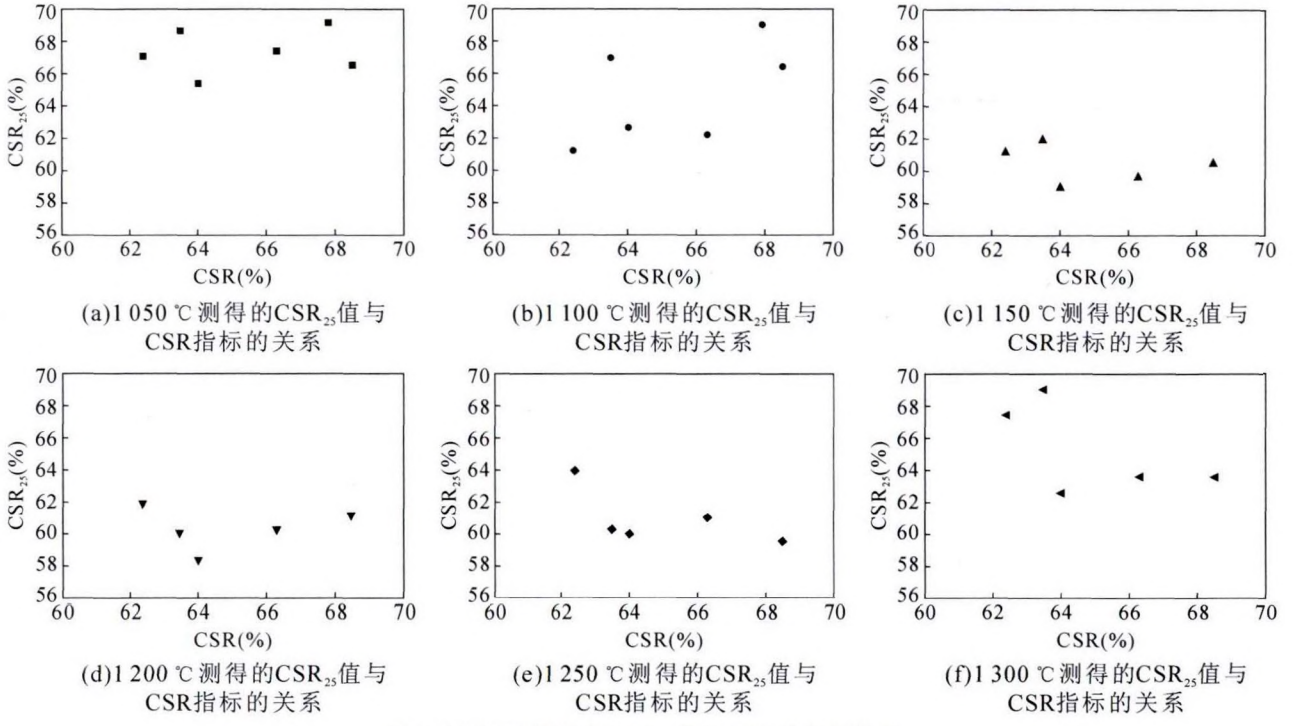
由表 2 可知,对于 J1,不同温度下测得的 CSR_{25} 值均低于 CSR 指标。其中 1 150、1 200 和 1 250 ℃与 CSR 指标的差距最大,达到了 7%～8%左右;对于 J2,1 050 ℃测得的 CSR_{25} 值高出 CSR 指标 1.16%,其余 5 个温度点测得的 CSR_{25} 值均低于 CSR 指标,其中 1 150 ℃低出最多,为 -6.64%;对于不同温度下测得的 CSR_{25} 与 CSR 的差距,J3 与 J2 趋势类似;对于 J4,1 050、1 100 ℃低温条件和 1 300 ℃高温条件测得的 CSR_{25} 均高于 CSR 指标,其它 3 个温度低于 CSR 指标;对于 J5,低温 1 050 ℃和高温 1 250、1 300 ℃测得的 CSR_{25} 指标高于 CSR 指标,其它 3 个温度低于 CSR 指标。对于单个焦炭来讲,通过对 5 种焦炭的结果分析可知,不同温度条件下测得的 CSR_{25} 值与 CSR 指标有差距,有的是正偏差,有的是负偏差,有的温度点偏差值还较大,且不

同焦炭产生大偏差的温度点也不尽相同。

综合对比分析 5 种焦炭，从国标方法检测得到的 CSR 指标来看，J1 到 J5 的强度值逐渐降低，即 J1＞J2＞J3＞J4＞J5。然而，考察不同温度点测得的 CSR_{25} 值与 CSR 指标有一定差异，不同温度点测得的 CSR_{25} 值与 CSR 指标的关系如图 1 所示。

由图 1 可知，6 个温度点条件下测得的 CSR_{25} 值均没有体现出与 CSR 指标明显的正相关性，且从 1 050 ℃到 1 300 ℃各个温度点测得的 CSR_{25} 值随着 CSR 指标增高的发展趋势也是迥异的。因此，采用不同方法评价焦炭热强度，得到的结论可能有较大差别，根据不同温度点测得的热强度值评价 5 种焦炭，结论也有显著差异。具体的每个温度点条件下测得的 CSR_{25} 与 CSR 之间的偏差 Δ (CSR_{25}-CSR)与 CSR 的关系如图 2 所示。

由图 2 可知，1 050 ℃条件下，只有 J1 是负偏

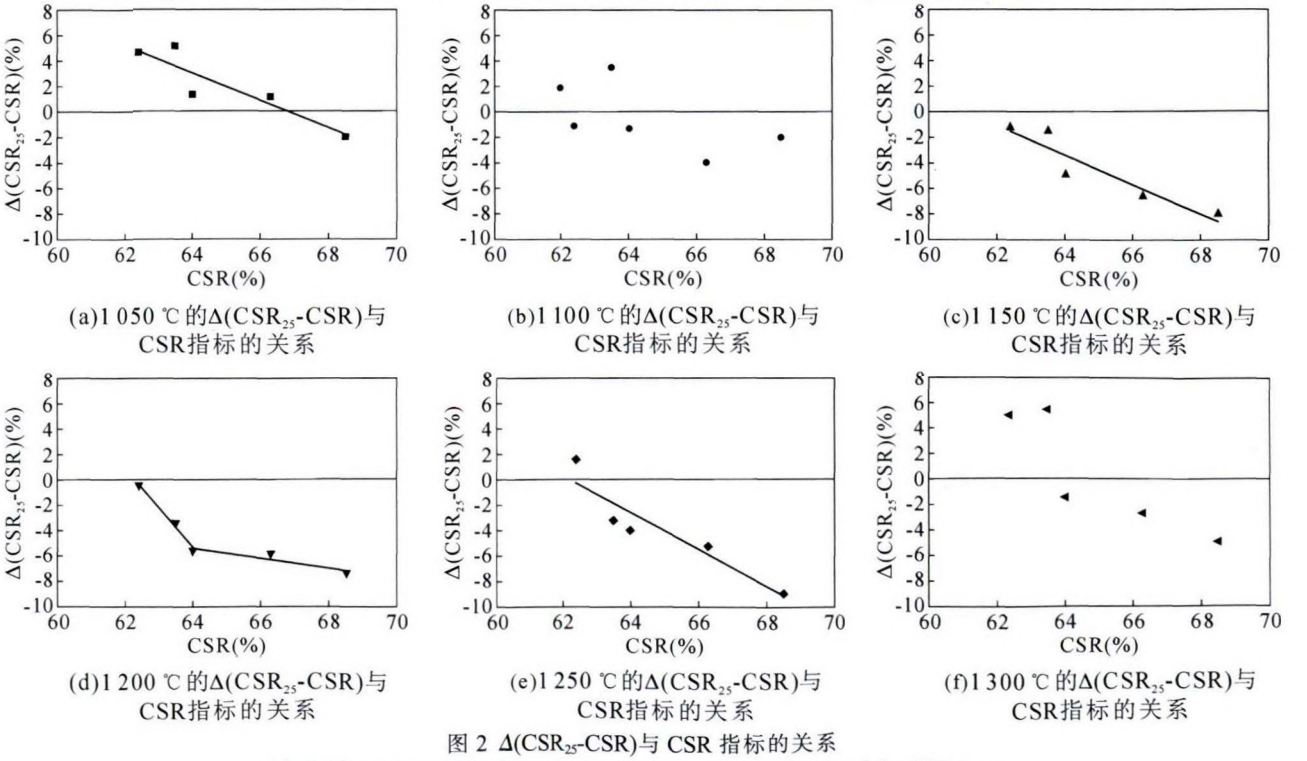


(a)1 050 ℃测得的CSR_{25}值与CSR指标的关系　(b)1 100 ℃测得的CSR_{25}值与CSR指标的关系　(c)1 150 ℃测得的CSR_{25}值与CSR指标的关系

(d)1 200 ℃测得的CSR_{25}值与CSR指标的关系　(e)1 250 ℃测得的CSR_{25}值与CSR指标的关系　(f)1 300 ℃测得的CSR_{25}值与CSR指标的关系

图 1 不同温度测得的 CSR_{25} 值与 CSR 指标的关系

Fig.1 The relationships between the CSR_{25} values measured at different temperatures and the CSR index



(a)1 050 ℃的Δ(CSR_{25}-CSR)与CSR指标的关系　(b)1 100 ℃的Δ(CSR_{25}-CSR)与CSR指标的关系　(c)1 150 ℃的Δ(CSR_{25}-CSR)与CSR指标的关系

(d)1 200 ℃的Δ(CSR_{25}-CSR)与CSR指标的关系　(e)1 250 ℃的Δ(CSR_{25}-CSR)与CSR指标的关系　(f)1 300 ℃的Δ(CSR_{25}-CSR)与CSR指标的关系

图 2 Δ(CSR_{25}-CSR)与 CSR 指标的关系

Fig.2 The relationships between the Δ(CSR_{25}-CSR) values and the CSR index

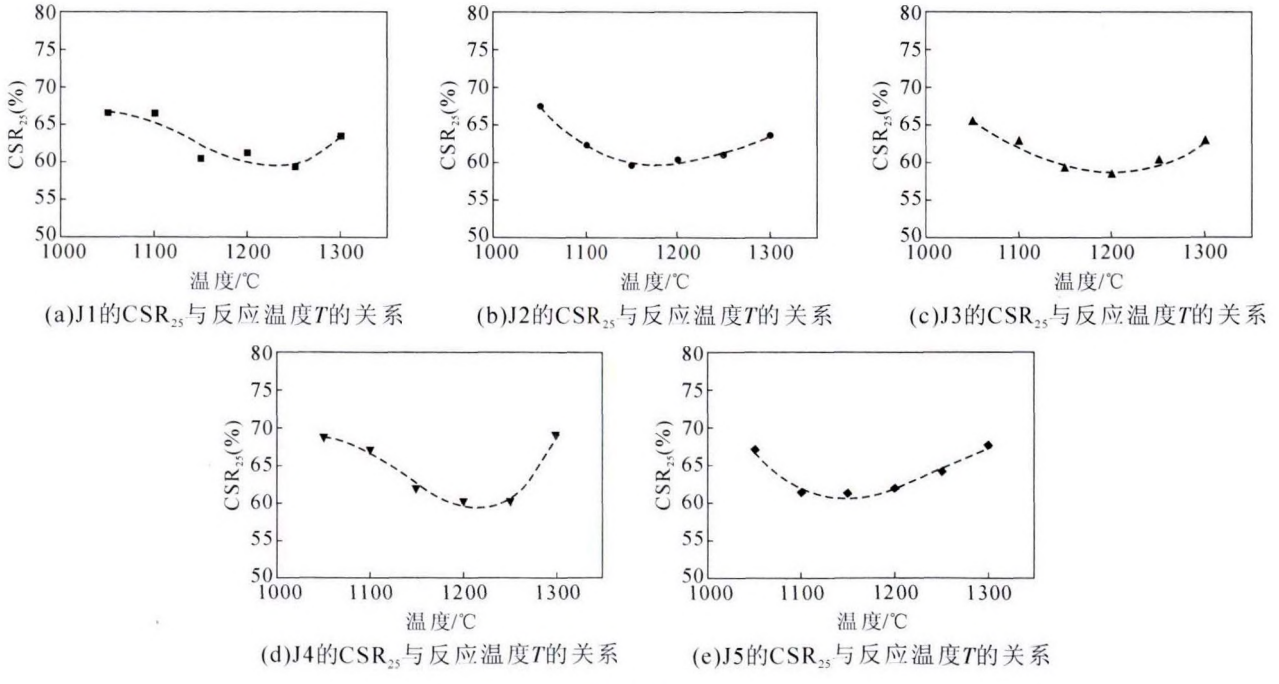
差，其它几种焦炭均是正偏差，且偏差随着 CSR 指标的增高逐渐减小；1 100 ℃条件下，只有 J4 是正偏差，其它几种焦炭均是负偏差，且总体来讲和 CSR 指标偏差不大，可能与 CSR 指标也是在 1 100 ℃条件下检测的有关；1 150 ℃条件下所有焦炭均是负偏差，且随着焦炭 CSR 指标的升高，负偏差的幅度逐渐增大；1 200 ℃条件下，5 种焦炭同样也是负偏差，且偏差的幅度逐渐增大，然而与 1 150 ℃不同的是，偏差的幅度明显分成两个阶段，以 J3 为分界点。J1 至 J3 的 CSR 指标较高，负偏差幅度大，但幅度变化量较小。J3 至 J5 的 CSR 指标较低，负偏差幅度小，但幅度变化量较大；1 250 ℃条件下，只有 J5 是正偏差，其它几种焦炭均是负偏差，且负偏差幅度随着 CSR 指标的升高而增大；1 300 ℃条件下，J1、J2、J3 是负偏差，J4、J5 是正偏差。总体来讲，可以总结出如下规律：CSR 指标高的焦炭，各个温度点检测得到的 CSR_{25} 指标一般低于 CSR 指标，从而更容易产生负偏差，相反，CSR 指标低的焦炭，更容易产生正偏差；低温区和高温区更容易产生正偏差，而中温区更容易产生负偏差，也就是说，温度对焦炭的热强度值具有非常重要的影响。

2.3 焦炭热强度 CSR_{25} 指标与反应温度 T 的关系

5 种焦炭各个温度点条件下检测得到的 CSR_{25} 值与反应温度 T 的关系如图 3 所示。

由图 3 可知，总体来讲，5 种焦炭不同温度条件下测得 CSR_{25} 值均随着反应温度 T 的升高而呈现先降低后增高的趋势。这与不同温度下焦炭的溶损反应模式有关。低温条件下，焦炭溶损反应速率较慢，化学反应是控制性环节，呈整体破损，因此强度值较高。而随着反应温度 T 升高，溶损反应逐渐从由化学反应控制转变为化学反应和内扩散两者混合控制，焦炭呈现局部大幅度劣化，因此强度值较低。当温度进一步升高，化学反应速率进一步加快，溶损反应逐渐由混合控制转变为内扩散控制，劣化局限在焦炭表面，因此焦炭的强度值又增高了。

针对单个焦炭进行分析，虽然 5 种焦炭的 CSR_{25} 随反应温度 T 升高呈现的大体变化趋势是一致的，但是 CSR_{25}-T 曲线的形状存在明显不同。根据凹口位置不同可以把 CSR_{25}-T 曲线大致分成 3 类：Ⅰ型，如 J5，凹口处于低温区域，即焦炭在较低温度就达到了最佳劣化温度；Ⅱ型，如 J2 和 J3，凹口处于中间温度区域，即焦炭在中间温度段达到最佳劣化温度；Ⅲ型，如 J1 和 J4，凹口处于高温区域，即焦炭在较高温度才达到最佳劣化温度。不同焦炭，凹口的位置不同，说明焦炭达到最佳劣化时的温度不同，即最佳劣化温度有差异，这主要是由于不同焦炭的溶损反应模式变化是在不同温度条件下进行的而导致的。因此，以上结果进一步证明了，溶损反应温度 T 对焦炭的热强度值具有重要影响，类似国标只检测 1 100 ℃一个温度点是不够的，应该发展出对焦炭在高炉中劣化行为更具模拟性的热强度表征指标。



(a)J1的CSR_{25}与反应温度T的关系　(b)J2的CSR_{25}与反应温度T的关系　(c)J3的CSR_{25}与反应温度T的关系

(d)J4的CSR_{25}与反应温度T的关系　(e)J5的CSR_{25}与反应温度T的关系

图 3 CSR_{25} 与反应温度 T 的关系

Fig.3 The relationship between CSR_{25} and the reaction temperature T

3　结论

(1)对于单种焦炭来讲，不同温度点条件下检测得到的 CSR_{25} 值与 CSR 指标差距较大。对于多种焦炭来讲，CSR_{25} 值与 CSR 指标不存在明显的正相关性，且低温和高温条件下更容易产生正偏差，中温区域更容易产生负偏差，CSR 指标低的焦炭更容易产生正偏差，CSR 指标高的焦炭更容易产生负偏差。

(2)CSR_{25} 值随着反应温度 T 升高呈现先降低后增高的趋势，是由焦炭溶损反应模式决定的。低温和高温条件下热强度值较高是因为反应模式分别为整体反应和表面反应，中温条件下热强度值较低是因为化学反应和内扩散混合控制导致了焦炭局部大幅度破损。

(3)虽然 5 种焦炭的热强度随反应温度 T 升高而呈现出的发展趋势总体来讲是一致的，但焦炭达到最佳劣化对应的温度点是不同的，根据 CSR_{25}-T 曲线的凹口位置可以分为 3 种类型，凹口处于低温区域的Ⅰ型，凹口处于中温区域的Ⅱ型和凹口处于高温区域的Ⅲ型。

(4)溶损反应温度 T 对热强度具有重要影响，国标方法 CSR 指标只检测 1 100 ℃一个温度点是不够的，应根据反应温度变化开发出更具模拟性的焦炭热强度指标。

参考文献：

[1] 王筱留. 钢铁冶金学. 炼铁部分(第三版)[M]. 北京：冶金工业出版社，2013.

[2] 姚昭章，郑明东. 炼焦学[M]. 北京：冶金工业出版社，2012.

[3] 周师庸，赵俊国. 炼焦煤性质与高炉焦炭质量[M]. 北京：冶金工业出版社，2005.

[4] 刘文壮. 八钢 2 500 m³ 高炉使用高 CRI、低 CSR 焦炭炼铁实践[D]. 鞍山：辽宁科技大学，2015.

[5] Wang Q, Guo R, Zhao X F, et al. A new testing and evaluating method of cokes with greatly varied CRI and CSR [J]. Fuel, 2016 (182): 879-885.

[6] Barnaba P. A new way for evaluating the high temperature properties of coke[J]. Cokemaking International, 1993(5): 47-54.

出售信息

山西华恩实业有限公司有一条“30 t/h 呋喃树脂砂铸造生产线”设备(保定维尔工程设计有限公司设计制造)，全新未用。因工艺改变，现低价出售，价格面议！

联系电话:18835932061 杨　13935914377 张

保定维尔工程设计有限公司 30 t/h 呋喃树脂生产线(2012 年 8 月)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
代号	L1210	OC-600-7	RCDC-6	PL350	Y4735	S5616IB	S5216B	S528	S528II	S5216IVE	S528	S524	S5216VA
名称	落砂机	OC 输送机	电磁吊挂磁选机	1# 斗提机	振动给料机	砂块破碎机	沸腾冷却分离机	2# 斗提机	磁选机	再生机	3# 斗提机	振动筛	砂调
数量	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
备注	台面 2.4*3M	L=7.5M								两级再生			

序号	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
代号	S528	S524	Y9110	S225F	Z292		S25030F	Z296		GF1714			
名称	4# 斗提机	5# 斗提机	气力输送装置	混砂机	振实台	手动辊道 L=4M	混砂机	振实台	机动辊道	翻转起模机	机动辊道转运车	密辊皮带转运车	密辊皮带机
数量	1	1	1	1	1	1	1	1	16	1	1	1	1
备注									L=1.8M		L=2M	L=2M	L=5.4M

序号	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
代号												X227S5216QK	X227S5216DK
名称	在线倾转流途	板链输送机	板链输送机	密辊皮带机	下芯小开车	密辊皮带机	合箱小天车	合箱机械手	机动辊道	浇注冷却转运车	无动力辊道	气控系统	电控系统
数量	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	18	1	1
备注		L=10.8M	L=5.4M	L=3.6M		L=3.6M			L=2.5M		L=3.6M		