

首钢长钢 9 号高炉喷煤相关分析

曹 锋 张 纲 丁英杰 袁苗苗

(首钢长冶钢铁公司)

摘 要 提高煤比的目的是降低焦炭消耗,保持煤焦置换比在一定范围,可实现降低吨铁燃料消耗的目标,但在一定生产条件下,当煤比达到一定水平时,已起不到降低燃料消耗的目的。本文结合首钢长钢 9 号高炉的生产实践,对喷煤情况进行了分析,为今后生产提供依据。

关键词 煤粉燃烧率 除尘灰岩相分析

1 引言

首钢长钢 9 号高炉于 2009 年 6 月 28 日开炉,随后开始逐步强化冶炼,曾连续数月保持 $3.5t/(d \cdot m^3)$ 利用系数冶炼,有着长钢“功臣炉”的称号。其设备基本实现国产化,拥有 SS-1200 槽式无料钟炉顶、碳砖-刚玉陶瓷杯复合炉底、全干法布袋除尘、煤气空气双预热、PLC 自动上料系统等技术。

长钢高炉喷煤比处于国内同类高炉领先地位,但是随着煤比的增加,煤粉燃烧率等就受到一定的限制,煤焦置换比下降,焦比在一定程度上也偏高,迫切需要分析提高煤粉利用率的限制因素,从而采取相应措施,提高利用率,达到降低燃料消耗的目的。

煤粉在风口带的燃烧率与风温、富氧率等因素有关,而高炉是否能接受高煤比又与下部送风制度、上部装料制度以及原燃料理化性能等有关。煤比控制在合理水平是降低燃料消耗的关键。本文重点是通过生产实践进行分析,得出关于合理喷煤比的相关数据,为今后的生产提供依据。

2 经济技术指标

表 1 9 号高炉经济技术指标

日产 t	焦比 kg/t	煤比 kg/t	焦丁 kg/t	焦炭 负荷	综合品位 %	吨铁矿耗 t	炉顶压力 MPa	炉顶温度 ℃	η_{∞} %	炉渣四元 碱度
3538	331.9	170.4	20.4	5.0	54.92	1.742	0.185	165	47	1.0
送风参数										
风量 Nm^3/min	风温 ℃	热风压力 MPa	富氧量 Nm^3/h	风速 m/s	动能 kg.m/s					
3177	1176	0.342	5000	222	12492					
铁水参数, %										
[Si]	[S]	[Mn]	[P]	[Ti]	$T_{\text{铁水}}/℃$					
0.37	0.03	0.44	0.12	0.04	1478					
炉渣参数, %										
CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	S	TiO ₂				
39.88	32.81	7.89	15.14	0.33	0.79	0.90				

3 近年 9 号高炉煤比及燃料消耗分析

9 号高炉开炉以来,逐步强化冶炼,并不断提高煤比。2011 年开始煤比基本都维持在 180~195kg/t 左右,在外界条件相对稳定的生产状态下,达到了很好的生产效果,燃料比最低曾实现 510kg/t,但没能长期保持这一水平。在生产中发现煤比过高时对炉温影响程度变小,用煤量调剂炉温效果差,而且高炉料柱透气性变差,压差升高,甚至导致煤气流分布紊乱,伴随着煤焦置换比下降,煤比增加焦炭负荷未按预想量增加,燃料比升高。与此同时,炉渣凝固后表面颜色黑而粗糙,断面石头边发蓝,吨铁高炉除尘

灰绝对碳素含量增加。为了进一步分析煤比与燃料消耗的关系，对 9 号高炉近两年的煤比、焦比、燃料比情况进行统计分析，其中排除休风和炉况异常的数据。

3.1 煤比与焦比、燃料比的定性分析

从图 1 可以看出，煤比从 160kg/t 提高到 185kg/t 的过程中，虽然燃料比基本不变，但焦比是小幅下降趋势，利用系数和燃料比也基本保持恒定，但是当煤比由 185kg/t 继续升高时，焦比、燃料比都明显升高，利用系数明显下降，说明煤比已经过剩。国内钢铁企业煤比 190kg/t 不是瓶颈，但是也反应目前我厂的原燃料情况、高炉操作等已不能满足太高煤比的操作。2012 年以来 9 号高炉炉况走势一般，风压、透气性等不是很乐观，燃料方面煤粉质量波动大，喷煤效果差，焦炭热强度不稳定，S 高、水分高且波动大，原料方面烧结品位低，导致综合入炉品位低，渣量大，且富氧率低，这些因素的变化对煤比的继续提高产生限制影响。

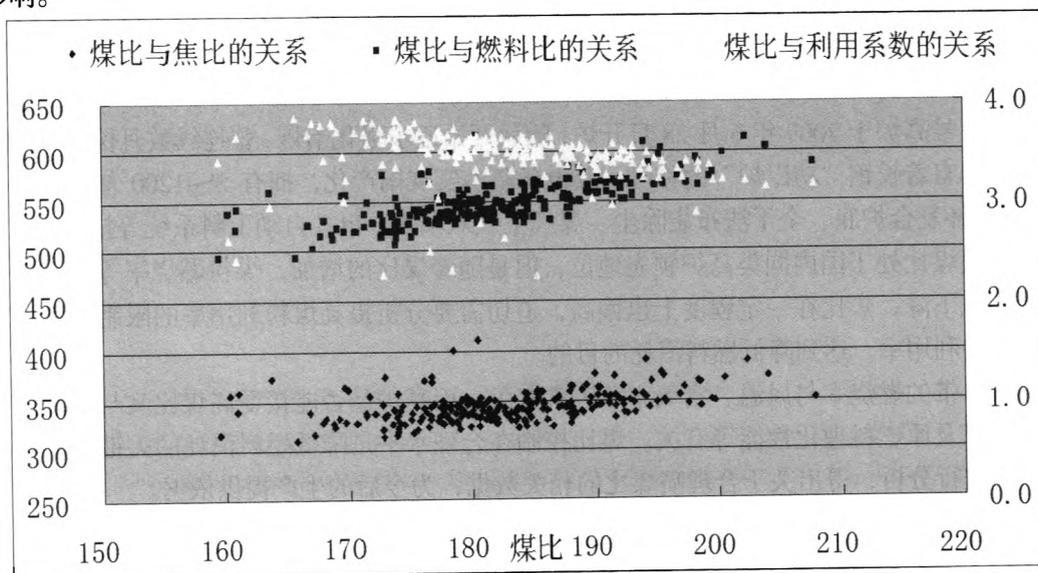


图 1 煤比、焦比、燃料比的统计情况

3.2 煤比与焦比、燃料比的定量分析

为了得出一个基本的定量关系，我们对煤比超过 180kg/t 的生产数据进行了统计分析，回归出煤比与焦比、燃料比的线性关系，表 1 所示。

表 2 煤比与焦比、燃料比的线性回归

项目	关系式	线性系数
燃料比	$1.932x+189.6$	0.92
焦比	$1.013x+142.63$	0.89
利用系数	$-0.0045x+4.29$	0.65

从表 2 我们可以看出，燃料比、焦比与煤比的关系呈正相关，利用系数与煤比呈负相关，回归方程结果与上述定性分析结果相吻合，但是利用系数和煤比的线性关系不是很强，线性系数不是太接近 1，焦比和燃料比与煤比呈强线性关系。为了进一步确定煤比变化 1kg/t 对焦比、燃料比、利用系数的量值影响，进行了量值分析，煤比升高 1kg/t，焦比升高 1kg/t，燃料比升高 2kg/t，利用系数下降 0.009t/(m³·d)。

3.3 问题分析

上述分析得出，煤比升高至 185kg/t，焦比、燃料比升高，利用系数下降，已经达不到“提高煤比降低成本”的目的，因此必须分析影响因素，进而采取相应措施。结合九高炉的生产状况，从热量、原燃料状况等几个方面进行分析。

3.3.1 煤粉燃烧率

煤粉在炉内燃烧率降低,导致炉内未燃煤粉增加,未燃煤粉被高速的煤气流带出高炉,致使除尘灰中碳含量升高。煤粉燃烧率受限因素也较多,具体如下:

(1) 风温水平:理论上煤比 180~200kg/t 要求风温达到 1200℃。9 号高炉风温不稳定,如不使用焦炉煤气富化,煤气利用率在 46%~48%左右,热风温度远达不到这一水平,正常只能保持平均风温在 1150℃,2012 年使用转炉煤气富化后,风温水平提高至 1175℃左右。

(2) 鼓风富氧量:理论上富氧率提高 1%,燃烧率提高 1.51%,要求空气过剩系数 1.15 左右,煤比 180~200kg/t 要求富氧率达到 3%,但是九高炉仅为 2.4 左右,近日只能维持在 2.0%,难以满足氧过剩量。

(4) 煤粉的粒度和挥发份:长钢煤粉粒度-200 目比例可达 80%以上,粒度不是限制因素;挥发份是保证煤粉燃烧率的又一因素,长钢煤粉挥发分基本保持在 17%,能满足这一要求。

(5) 炉顶压力,高顶压减小煤气流速,延长煤粉在炉内的燃烧时间和降低煤气压差。部分研究表明煤粉在炉缸的燃烧时间 0.01~0.04s 内,其加热速度 103~106k/s。9 号高炉结合炉顶设备及生产状况,炉顶压力在 170~205kPa 之间,现阶段受设备影响长期保持 175kPa 左右,降低煤气流速效果差,导致除尘灰未燃煤粉量增加。

3.3.2 原燃料条件

炼铁进行高煤比冶炼的关键是较好的原燃料条件,要求炉料的成分和理化性能稳定,波动范围窄,例如烧结品位波动 $\pm 0.5\%$,碱度 ± 0.08 倍,但是长钢烧结矿难以达到这一水平。此外,由于焦炭骨架作用的不可替代性,焦炭质量水平成为高煤比的限制环节。煤粉在炉缸内的燃烧产生大量煤气,其上升过程中,参与化学反应的同时,也受料柱及下降渣铁的很大阻力。

因此高煤比冶炼对原燃料质量有一定的要求。

(1) 入炉料品位因素

理论认为炉内煤气阻力最大地方为软熔带,该部位存在大量未分离的渣铁,渣量大小直接影响煤气运动的阻力,进而制约煤比的进一步提高。2010 年至今,受外界条件影响,烧结矿品位基本呈下降趋势。2010 年平均值为 54.81%,最高达到 56.82%,最低为 53.13%,波动较大;2011 年平均值为 55.06%,最高达到 55.57%,最低为 54.46%,全年波动较小;2012 年烧结矿品位下降明显,平均值为 53.1%,最高达到 54.86%,最低为 51.6%,全年波动较大,呈明显下降趋势,下降幅度 3%左右。烧结矿品位的下降导致入炉品位不断下降,廉价低品位块矿的使用加剧了下降趋势。2010 年入炉综合品位由 59%降至 56%左右,全年平均在 57%左右,2011 年和 2012 年基本稳定,全年波动不大,2011 年平均为 56.77%,波动幅度控制在 1%以内,2012 年平均为 55.45%,2013 年前期基本在 55%左右,综合入炉品位较 2010 年下降约 2%,理论渣量达到 380kg/t 以上,增加煤气上升阻力,炉内透气性变差,风压升高,不能接受大煤量操作。

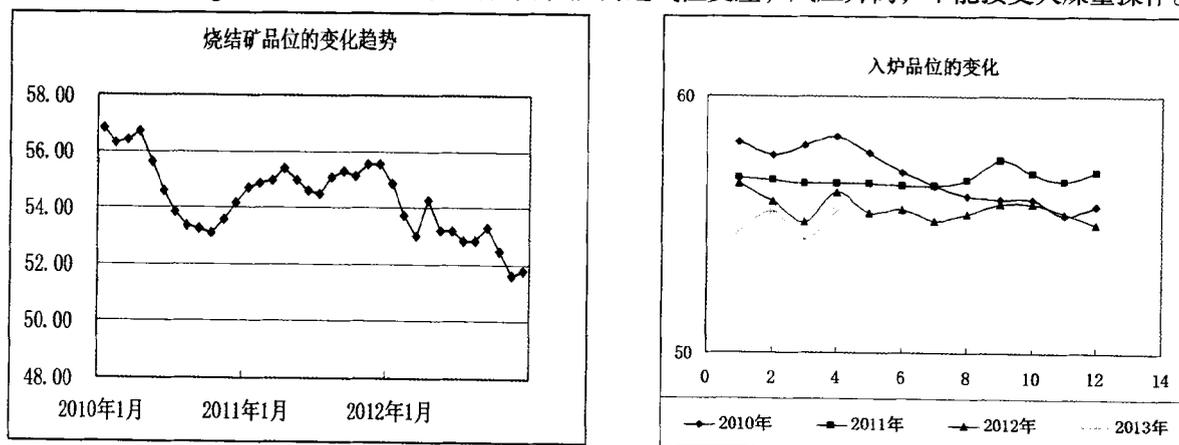
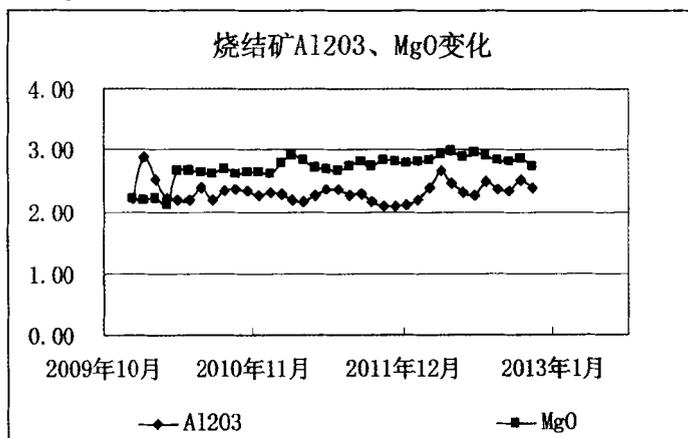


图 2 烧结矿品位和入炉品位的变化情况

(2) 烧结矿 Al_2O_3 和 MgO 的变化图 3 烧结矿 Al_2O_3 和 MgO 变化趋势

烧结矿 Al_2O_3 和 MgO 含量，主要影响高炉的造渣制度，同时还影响烧结矿的强度和低温还原粉化性能和软熔性能，炉渣的 Al_2O_3 和 MgO 含量决定炉渣的粘度和流动性，最终反映在炉内料柱的透气性上。 Al_2O_3 方面：2010 年平均值为 2.34%，最高达到 2.89%，最低为 2.18%，全年呈下降趋势；2011 年平均值为 2.23%，最高达到 2.36%，最低为 2.08%；2012 年平均值为 2.37%，最高达到 2.67%，最低为 2.10%，呈小幅上升趋势，2013 年上升趋势，最高达到 3.3%，导致炉渣 Al_2O_3 最高达 18.5%。 MgO 方面：2010 年平均值为 2.49%，最高达到 2.69%，最低为 2.11%，2010 年 5 月起为满足高炉炉渣镁铝比不低于 0.55 这一要求，烧结开始提高 MgO 含量，由 2.2% 提高至 2.65%；2011 年平均值为 2.76%，最高达到 2.9%，最低为 2.61%；2012 年平均值为 2.86%，最高达到 2.97%，最低为 2.72%。生产经验表明，在目前的原燃料情况下，高炉炉渣 Al_2O_3 在 14%~16%，炉渣 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比维持在 0.5~0.6，可控制炉渣粘度在一定范围，保证炉渣在炉内的正常流动，不会较大影响炉内的透气性，可为提高煤比创造条件。

(3) 焦炭质量

焦炭在高炉内有五大作用，即还原剂、发热剂、骨架作用、铁水渗碳和填充炉缸，其中骨架作用具有不可替代性，尤其是高煤比操作时，焦比低，焦炭骨架作用更加突出。在高炉特殊气氛下，焦炭的热破坏和碳熔损是焦炭强度变低的主要原因，因此热态强度（CRI 和 CSR）更能反映焦炭的实际状态，也是保证炉内料柱透气性的关键。九高炉煤比正常水平在 180kg/t，对焦炭质量要求较高，各项指标不仅要好，而且要稳定。

瑞达焦炭的热态性能近年来不断提高，CRI 指标 2010 年为 29.14%，2011 年为 28.48%，2012 年开始呈不断下降趋势，全年平均 23.63%；CSR 指标 2010 年为 62.7%，2011 年为 66.81%，2012 年为 69.93%，从数据来看，瑞达焦炭热态性能总体提高，其中 CRI 下降 5% 左右，CSR 提高 7% 左右。几种常用焦炭相比，永鑫焦炭热态性能最好，CRI 最低 20%，CSR 达到 70%，劲牛焦炭热态性能最差，CRI 为 26%，CSR 为 65.5%。在 9 高炉的实际生产过程中，劲牛焦搭配 20%~30% 使用，一定程度上对指标有影响，使用比例在 50% 时，为满足正常生产焦炭负荷水平偏低。

(4) 块矿的使用

为降低炼铁炉料成本，各钢铁企业不断提高块矿的使用比例。9 号高炉使用比例最高达到 20%，现阶段也保持在 12%。由于多方面原因，先后使用多种块矿，像麦克块、吉布森块、罗布河块、马来块、印度块、墨西哥块等，这些块矿与烧结、球团熟料性能差异较大，成分波动大，水分高，粉末大，尤其是软熔性能，对高炉生产造成一定的不利影响，导致炉况波动大，压差高，炉缸活跃程度不够，这些均不利于提高煤比。

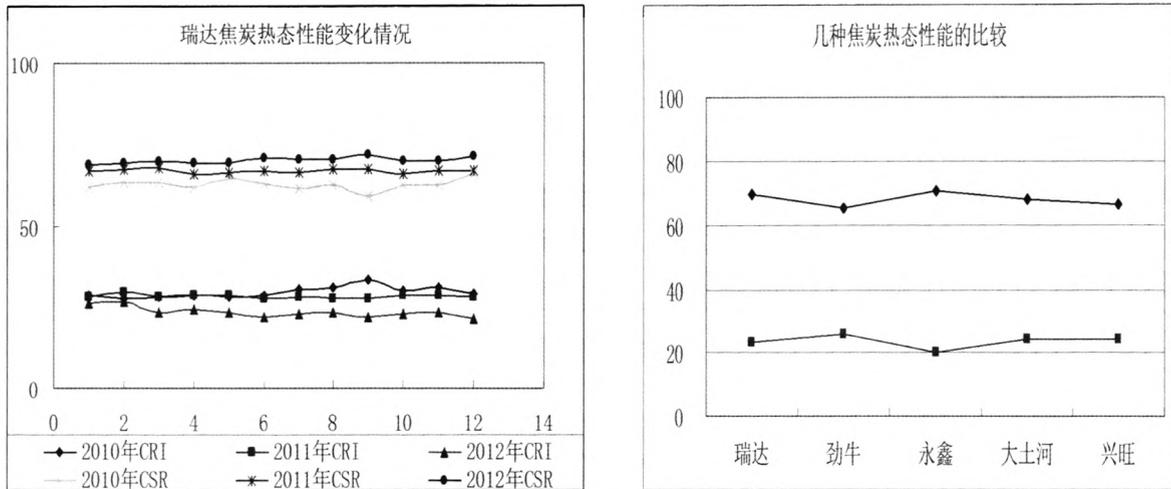


图4 瑞达焦炭热态性能的变化情况及几种焦炭热态性能的比较

表3 长钢高炉使用块矿性能比较

品名	代号	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S	烧损
烧结矿	SJ	51.69	6.79	12.78	2.85	2.45	0.04	
自产球	ZQ	63.89	6.61	0.91	0.47	1.05	0.017	-
秘鲁球	BQ	65.61	4.17	0.61	0.85	0.5	0.013	-
罗布河块	LB	56.25	4.83	0.16	0.09	2.14	0.01	10.8
PB块	PB	62.69	2.28	0.06	0.08	1.34	0.03	5.8
南非块	NF	64.2	5.49	0.04	0.08	1.41	0.09	-
印度块	YD	53.38	3.98	0.14	0.10	4.5	0.038	-
吉布森块	JBS	62.84	2.18	0.04	0.05	1.3	0.03	2.36
麦克块	MK	63.23	2.24	0.06	0.04	1.33	0.02	6.14
马来块	ML	53.44	4.1	0.07	0.05	2.21	0.059	
简化	还原度指数	低温还原粉化指数, %			软化开始	软化终了	软化温度	熔融开始
编号	RI(%)	RDI _{4.3}	RDI _{3.15}	RDI _{0.5}	温度, °C	温度, °C	区间, °C	温度, °C
烧结矿	85.47	48.02	74.31	12.29	1110	1268	158	1319
秘鲁球	69.8	75.2	90.6	5.7	1060	1325	265	-
球团	71.64	-	-	-	1125	1258	133	1174
印度	57.22	-	84.3	-	997	1267	270	1447
澳块	73	-	76.2	-	1107	1318	211	1455
南非	53.06	81.71	88.31	6.44	1026	1144	118	1197

(5) 高炉操作

煤比提高必然导致炉缸煤气量的增加, 边缘气流减少, 中心气流发展, 必须通过调整上下部制度进行控制。上部装料制度必须依靠扩大矿批来控制中心气流, 但也要兼顾边缘。9号高炉多采用大矿批, 由35t增加到42t, 但由于料罐容积的限制, 矿批加大后严重损坏上密圈, 因此现阶段矿批维持在36.5~37.5t, 大高炉冶炼要求炉内一定的焦炭层厚度, 以保证煤气流运动的正常路径, 但变料调整时高炉一贯坚持“变焦不变矿”的原则, 一定程度上影响煤气运动阻力的分布。另外下部送风制度必须控制合理的鼓风动能, 来实现煤气流均匀分布, 同时活跃炉缸, 为喷煤提供条件, 9高炉积极探索下部制度的调剂规律, 控制圆周方向风口的合理布置, 维持相对合理的鼓风动能和炉缸煤气流的初始分布。通过对上下部制度的调整控制适宜的中心气流, 保证炉缸的活跃状态, 为煤比的提高创造条件。

4 提高煤粉燃烧率

提高煤比的目的是降低焦炭消耗, 保持煤焦置换比在一定范围, 可实现降低吨铁燃料消耗成本的目的

标。但是当煤比达到一定水平时，随着煤比的增加，焦比变化不大，或者有小幅升高，导致燃料比升高，这时说明煤粉已经过剩，高炉车间必须采取相应措施来提高煤粉的燃烧率和煤焦置换比。

4.1 优化配煤结构

喷吹煤粉质量要求挥发分适宜，灰分低，含碳量高，发热值高，可磨性好等。9号高炉喷煤为烟煤和无烟煤混合喷吹，通过对配比的不断调整，摸索性能变化规律。刚开始烟煤比例高，喷吹煤粉的挥发性较高，固定碳低，燃烧性改善，但是发热值低，后期经过多次调整，得出在我厂目前的生产环境下煤粉挥发分控制在15%左右，热值31.54mJ/kg ($Q_{gr, d}$)，其热值和燃烧效果可达到较为理想的状态。

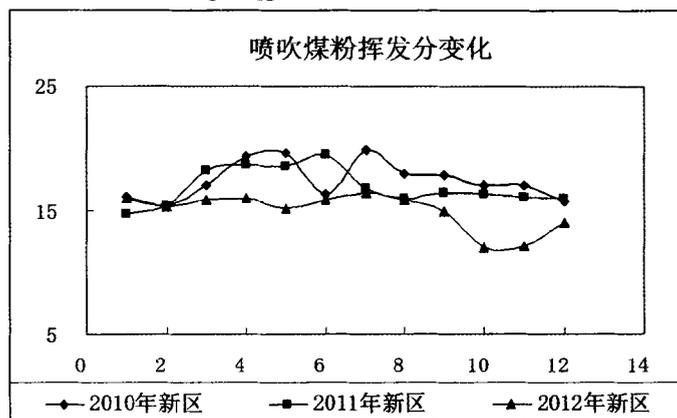


图5 喷吹煤粉挥发分的变化情况

4.2 提高喷吹均匀度

提高煤粉喷吹的均匀度一定程度上可改善煤粉的燃烧效果。9号高炉采用双枪喷煤，并制定了严格的工艺检查确认制度，从喷吹 N_2 压力及流量控制、喷枪工作状态、喷枪插入角度及长度等方面均进行摸索研究，并制定标准化考核制度，确保了高炉上各个风口喷枪状态的均匀稳定，从而促进炉缸圆周上喷煤均匀化。

4.3 寻找合理的煤比范围

由于外围生产的限制，高炉风温和富氧水平均没有大幅提高的条件，所以应对这一现状，除了对配煤结构进行优化和提高喷吹均匀度外，9号高炉适当对煤比进行合理控制，以适应现有生产条件，从而提高其燃烧率和煤焦置换比，起到降低燃料消耗的作用。2012年后开始煤比基本维持在 $170 \pm 5\text{kg/t}$ 左右，生产数据分析这时煤粉燃烧效果较好，炉况顺行度好，压差范围合理，焦比和综合燃料消耗均处于较为理想水平。

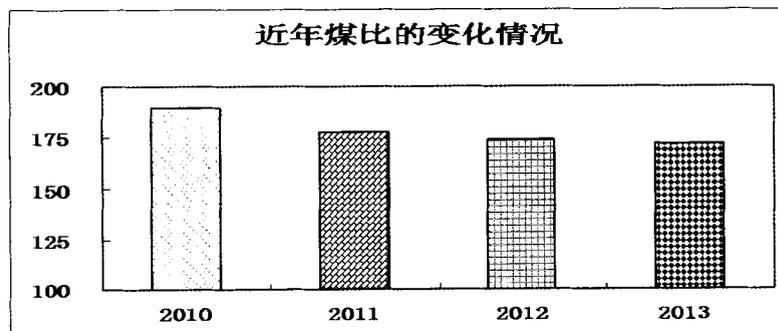


图6 近年煤比的变化情况

4.4 措施效果分析

采取上述措施后，高炉运行状态较好，为了进一步分析煤粉的实际利用效果，为今后的操作积累相应经验和得到相应数据，我们对2012年7月至2013年3月的除尘灰数据进行研究分析，从数据分析结果

看, 采取措施后重力灰和布袋灰中碳素占燃料总耗的比例一定程度上均有下降, 除尘灰总碳量占燃料总耗比例由 1.55% 降至 1.18%, 降幅明显。

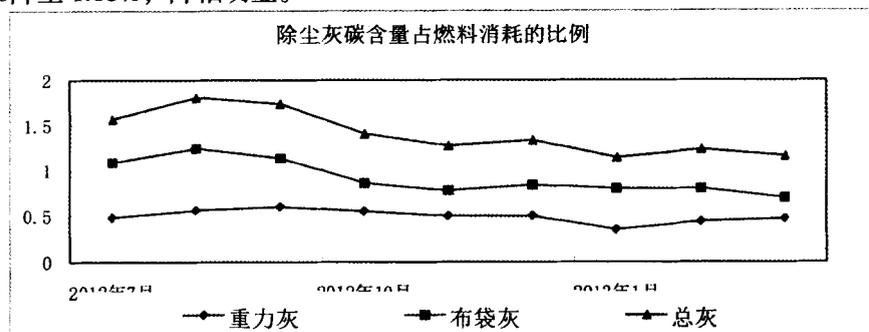


图 7 除尘灰碳含量占燃料消耗的比例

同时, 对除尘灰进行了显微岩相分析, 定量地确定高炉除尘灰中含碳物质的来源。重力灰和布袋灰中含碳物质的颗粒可以近似看作大小相等球状颗粒, 且除尘灰中含碳物质的比重相差不大, 其面积比可近似为质量比, 再由化学分析得到炉尘中的碳含量后, 进而能够给出重力灰和布袋灰中未消耗焦炭和煤粉的质量分数。从除尘灰岩相分析结果看, 无论是重力灰还是布袋灰, 原煤含量均较低, 煤残含量在 2% 左右, 相反焦末含量偏高, 重力灰中焦末比例高达 37.3%; 从固定碳来源看, 除尘灰中碳来至煤粉的比例仅在 7% 左右, 93% 来至焦炭, 这两方面均说明煤粉在炉内的利用效果较好, 燃烧充分。

表 4 除尘灰岩相分析结果

种类	焦炭		煤粉				含铁原料			灰渣	
	焦碳	焦残	原煤	热变	煤残	块矿	球团矿	烧结矿	金属	半	灰渣
9 炉重力灰	37.3	5.9	0.5	0.9	1.8	24.8	7.7	8.0	3.2	3.0	7.0
9 炉布袋灰	23.6	21.9	1.0	0.7	1.7	5.9	1.7	3.8	0.0	1.4	38.2

表 5 除尘灰固定碳及来源

日期	来源	9 炉重力灰	9 炉布袋灰
2013.3.21	固定碳	16.97	27.89
2013.3.21	来源于焦炭比例, %	93.10	93.05
2013.3.21	来源于煤粉比例, %	6.90	6.95

5 总结

(1) 对近年的生产数据进行了分析, 认为就长钢目前生产条件而言, 煤比有一定的控制范围, 超过 185kg/t, 随着煤比的提高, 燃料消耗小幅升高, 已起不到降低燃料消耗的目的。

(2) 综合 9 号高炉的外围条件, 从富氧率、风温、煤粉质量、原燃料条件以及高炉操作等方面阐述了限制煤比提高和降低煤焦置换比的原因。

(3) 结合 9 号高炉的现有生产条件和实际生产实践, 提出几条提高煤粉燃烧率的措施, 并取得较好生产效果。

(4) 从除尘灰的岩相分析结果看, 除尘灰中的碳素主要来自焦炭, 因此, 在今后的工作中, 将研究对焦炭质量的评价制度, 怎样提高其利用率。

参考文献:

- [1] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册. 冶金工业出版社.
- [2] 王筱留. 炼铁学. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [3] 罗吉敦. 炼铁学. 北京: 冶金工业出版社, 1992.