

高炉喷吹煤粉 技术文集

首钢钢铁研究所编印

1994 年 10 月

编 者 的 话

目前,公司领导和炼铁工作者正在大力开展提高高炉产量、降低焦比工作。为了促进这一工作的开展,钢研所科技情报工作者通过广泛收集,精心整理,编印出《高炉喷吹煤粉技术文集》。

该文集共收集了国内外有关高炉喷吹煤粉技术文献资料 57 篇,其内容包括:高炉粉煤喷吹技术的发展;高炉喷吹烟煤技术;高炉喷煤技术操作和经验;煤粉在高炉回旋区最佳燃烧量的研究和生产实践;高炉高喷煤比的技术问题;高炉氧煤喷吹技术和高炉喷吹粒煤技术等。

我们收集、整理并编印出首钢公司以外的高炉喷煤降焦文集,其主要目的是供公司各有关领导、科研人员和炼铁生产工作者深入了解目前国内外高炉喷煤的现状、发展方向以及存在的主要问题,这无疑对我公司发展高炉喷煤技术大有裨益。

编 者

1994 年 10 月 12 日

目 录

一、高炉粉煤喷吹技术的发展

高炉喷吹煤粉技术的现状.....	(1)
国外高炉喷煤技术	(11)
高炉喷煤的发展	(17)
高炉粉煤喷吹技术	(24)
国外高炉高喷煤的特点	(32)
世界高炉喷煤技术新发展	(37)

二、高炉喷吹烟煤技术

浅谈高炉喷吹烟煤	(45)
浅谈高炉喷吹烟煤技术	(50)
我国高炉喷吹烟煤的现状 & 几点改进意见	(55)
高炉喷吹烟煤的发展状况 & 安全措施	(59)
谈高炉喷吹烟煤的安全问题	(64)
高炉喷吹用烟煤煤尘爆炸行为的研究	(67)
兖州烟煤爆炸性试验研究	(72)
鞍钢高炉喷吹烟煤安全技术改造	(75)
八一钢厂高炉喷吹烟煤的安全技术问题	(81)
杭钢一号高炉喷煤浓相输送工业试验	(85)
用于蒸气做载体向高炉内喷吹烟煤的设想	(89)
浅谈高炉喷吹煤种的选择	(92)

三、高炉喷煤技术操作和经验

神户厂三号高炉高喷煤比操作	(99)
煤粉喷吹史上的一个里程碑.....	(103)
高炉喷煤十年经验.....	(107)
高炉大量喷吹煤粉的操作技术.....	(114)

梅山高炉喷煤工艺的改造与实践·····	(119)
包钢二号高炉喷煤效果分析·····	(123)
八一钢厂高炉喷煤工程及情况预测·····	(130)
宝钢二号高炉实现喷煤·····	(135)
宝钢二号高炉喷吹煤粉装置·····	(138)
酒钢高炉喷吹煤粉装置介绍·····	(142)
小仓厂二号高炉在低强度焦炭条件下强化喷煤粉操作·····	(145)
四、煤粉在高炉回旋区最佳燃烧量的研究和生产实践	
煤粉在高炉回旋区的极限燃烧量和最佳喷入位置·····	(153)
煤粉和矿粉复合喷吹时高炉风口回旋区数学模型·····	(162)
未燃炭粒风口喷煤的最大喷煤量·····	(168)
高炉回旋区煤粉的燃烧行为和大量喷吹技术·····	(177)
高炉循环区和风口内的粉煤燃烧行为·····	(185)
高炉喷煤中粉煤的燃烧特性·····	(191)
高炉喷吹煤粉的试验研究·····	(198)
高炉喷煤的一种优化法·····	(204)
高炉内煤粉燃烧的强化·····	(212)
高炉中未燃粉煤气化速度的分析·····	(215)
喷煤时高炉内炉料的行为·····	(221)
控制风口理论燃烧温度的生产实践·····	(227)
煤粉燃烧实验指标的评定·····	(231)
五、高炉高喷煤比的技术问题	
高喷煤比高炉对焦炭性能的要求·····	(235)
高炉喷煤趋于极限·····	(246)
煤粉喷吹的极限·····	(256)
高喷煤比的潜力及问题·····	(263)
六、高炉氧煤喷吹技术	
高炉氧煤喷吹技术讲座·····	(273)
高炉氧煤炼铁工艺·····	(293)
高炉氧煤喷吹效率的改善·····	(299)
克里夫兰铁厂氧煤喷吹·····	(302)

富氧喷吹燃料在高炉增产中的作用.....	(310)
高炉大量喷煤的若干思考.....	(318)
七、高炉喷吹粒煤技术	
高炉粒煤喷吹技术的探讨.....	(323)
高炉喷吹粒煤技术优势显著.....	(327)
高炉喷吹粒煤.....	(331)
粒煤在高炉内燃烧行为分析.....	(336)
高炉超量喷吹粒状半焦的设想.....	(341)

高炉喷吹煤粉技术的现状

稻葉晋一 八木顺一郎

术现状的同时,展望了将来。

一、序 言

高炉喷吹煤粉始于 1840 年 S. M. Banks 喷吹焦炭和无烟煤的设想。世界最早的工业应用是根据这一设想在 1840~1845 年间于法国博洛涅附近的上马恩省炼铁厂实现的。该项技术在 1881 年获得专利权,现在,已经成为谁都可以使用的技术。

本世纪六十年代在美国的喷煤技术,包括喷吹设备的研制颇为流行。但在当时因为供给煤粉设备是螺旋式给料机,所以不能达到今天这样大的喷吹量。后来开发了气动方式,煤粉可以大量输送了,但还是被容易喷吹的重油取代了。

在日本,喷吹技术是从喷吹 COM(煤-油混合物)开始的。经过多年后也改为喷油了。

1973 年和 1979 年由于石油危机,油价高涨,延缓焦炉老化的对策越发重要了。其中,降低焦炉产量,对于延长焦炉寿命是有效的办法。将煤作为焦炭的一部分直接喷入高炉的技术,八十年代中期再次被人们认识。

这次喷吹煤粉,由于煤和油的差价很大,为了降低生铁成本,在新崛起的欧洲和日本都投入了大量精力,展开喷吹量的激烈竞争。

喷吹煤粉有许多优点,煤粉和氧气同时使用,可提高高炉生产率,由于排出的 CO_2 减少,还可降低环境污染等。

本文对大量喷吹煤粉时,高炉的炉内状况和操作状况进行整理,在介绍煤粉喷吹技

二、高炉内煤粉的行为

1. 回旋区内的燃烧

一般认为尽可能使煤粉在回旋区内充分燃烧是大量喷吹煤粉的有效方法。通过许多基础试验研究了提高煤粉燃烧性的方法。在实验室研究中,发现高挥发分、低流动性的煤粉的燃烧性极佳;而随着煤粉喷吹量的增加,燃烧率下降。在实际高炉中这些现象也被斜行传感器的检测所确认。

回旋区内煤粉的燃烧性取决于鼓风温度,鼓风温度高($1305\sim 1320^\circ\text{C}$),燃烧率也高。鼓风温度低时($1200\sim 1260^\circ\text{C}$),通过加入水蒸气可将燃烧性提高到和高风温时同样的程度。

另外,往煤粉里添加 CaCO_3 或 $2\sim 10\%$ 的褐煤也可提高煤粉的燃烧性。据此验算后的结果,添加 10% 低 C 的褐煤,煤粉喷吹量可以从 155kg/t 提高到 196kg/t 。

表 1 国际火焰研究基金会(IFRF)的试验结果,油和煤的气化(%)

	与风口的距离		
	1m	2m	3m
油	70	85	90
煤 SE,挥发分 38%	65	70	80
煤 EC,挥发分 33%	50	70	80
煤 NP,挥发分 18%	45	55	75
煤 PR,挥发分 4%	20	25	45

表 1 是高炉风口回旋区内不同特性煤粉气化状况的研究结果。高挥发分煤基本和重油一样燃烧,回旋区边界部位的燃烧率为 20~65%。并弄清了喷枪直径和位置对燃烧速度没有影响。

如图 1 所示,大量喷吹煤粉时,因为焦炭在高温区暴露时间长,粉化量增大。

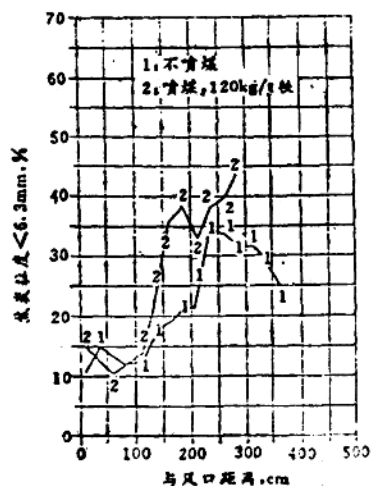


图 1 喷煤和不喷煤时 <6.3mm 的焦炭的径向分布情况

2. 适宜的喷吹位置

高炉喷吹煤粉初期,一般认为喷枪前端位于直吹管内较合适。理由是和喷枪在风口前端比较,煤粉与热风接触时间长容易迅速燃烧。

但是,大量喷吹煤粉时,喷枪前端位于直吹管内,会在风口前端上部生成附着物。为了防止这一点,如果将喷吹位置靠近风口前端,可以降低随喷吹量的增大而增加的送风压力和直吹管内的微压震动。而且,将喷吹位置靠近风口前端时,因直吹管内煤粉的燃烧量下降,使炉壁侧焦炭消耗量和下降速度增加,炉壁热负荷降低。

该喷吹的位置和煤粉粒径之间的关系见图 2。图中数据为在风口前端温度 1600℃ 的

条件下求出的。如果煤粉粒度适宜,喷吹位置即使靠近风口前端,也能确保煤粉充分燃烧。

3. 煤粉粒度粗化的界限

为了使煤粉在炉内完全燃烧,并减少气流输送管路磨损,一直将其粉碎成数 $10\mu\text{m}$,但是在 10ms 以内,数 mm 粒度的煤粉也能被加热燃烧。

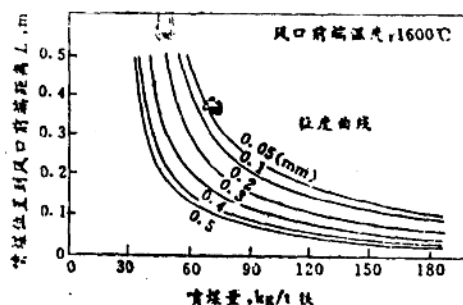


图 2 最佳喷煤位置,喷煤量和煤粉粒度之间的关系

实际应用这种方法的是斯肯索普厂的高炉,喷吹最大粒度 2mm 的煤粉最高达到 117kg/t 铁,并保持稳定操作。如果校正风口前端温度,这时的焦炭置换比大致为 1。

4. 未燃烧煤粉的反应性

喷入风口的煤粉迅速被加热燃烧,特别是高挥发分的煤,因为煤粉的流态化和挥发分的挥发,形成如照片 1 所示的(略)多气状球状半焦。

(1) 与 CO_2 气体的反应

1) 在风口和回旋区内的反应

图 3 是风口和回旋区内煤颗粒燃烧状况的试验调查结果。开始约 10ms,挥发分蒸发,然后 80ms 半焦不均匀燃烧。这种初期燃烧生成的半焦,热风温度越高燃烧越快,比焦炭容易反应。

低挥发分的煤着火慢,在回旋区内的燃烧也慢,但是在回旋区内侧和风口上方 700mm 部位,燃烧变快,煤种间的差异很小(图 4)。

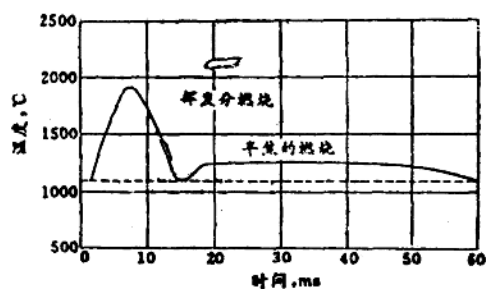


图3 煤粉燃烧过程

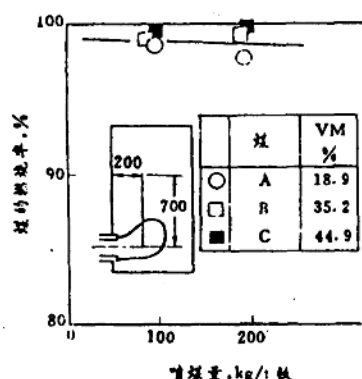


图4 风口上方700mm处,煤种对煤的燃烧率的影响

2) 在炉身部的反应

到达炉身部仍未燃烧煤粉见图5,在1000~1200°C区域的反应速度比焦炭的反应速度大得多,所以先行消耗。而且在1300°C不同煤种没有表现出差异。

将灰分不同(挥发分一定)的未燃烧煤粉的气化速度作为单元反应速度,可用下式求得:

$$R = \frac{K_1(P_{CO_2} - P^e_{CO_2})}{1 + P_{CO}/K_2}$$

式中 R —— 反应速度(1/s);

K_1, K_2 —— 速度常数, $1/(\text{atm} \cdot \text{s}), \text{atm}$;

$P_{CO_2}, P^e_{CO_2}$ —— CO_2 分压、平衡分压;

P_{CO} —— CO 分压。

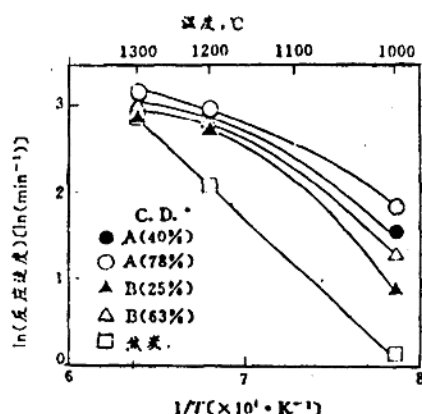


图5 反应速度和未燃烧煤粉温度之间的关系

*C.D. — 燃烧程度

其结果见图6,与未燃烧煤粉气化反应速度成正比的参数 K_1 ,不因未燃烧煤粉的种类和灰分不同而变化,是个常数。决定气化反应速度的是 CO 气体反应参数 K_2 。

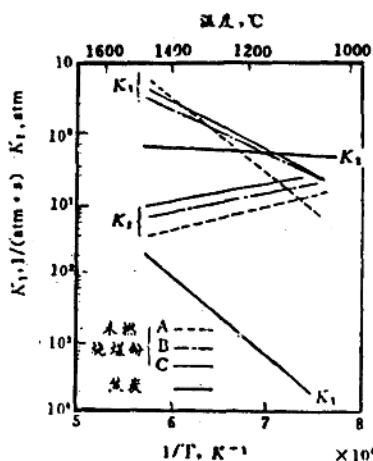


图6 速度常数和温度关系

1000°C时不同挥发分的未燃烧煤粉与 CO_2 反应见图7,挥发分高的气体反应速度快。

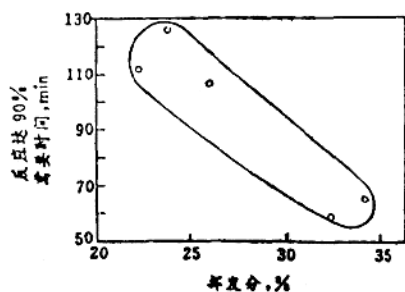


图7 挥发分和半焦与 CO_2 反应
达90%所需时间的关系

(2) 未燃烧煤粉与熔渣、铁水的反应

未燃烧煤粉向铁水的渗碳速度见图8。比石墨慢得多。随着喷吹量(1.4g/min 相当于实际高炉的煤粉喷吹量 200kg/t 铁)的增加渗碳速度加快,但是C 浓度3%以上时,其速度变慢。该渗碳速度可以看作是未燃烧煤粉的供给限制速度。在煤比 200kg/t 铁时,渗碳消耗的未燃烧煤粉量非常少。另外,未燃烧煤粉的灰分很容易被炉渣吸收同化(图9)。

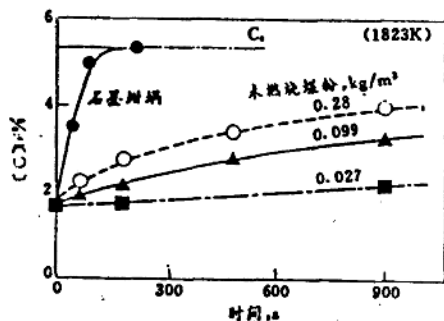


图8 铁水渗碳速度和未燃烧
煤粉的关系

为了调查煤粉在高炉滴下带的积蓄和滞留情况,堀尾等人进行了将液体-煤粉-充填层组合在一起的冷态模型试验。试验结果,由于煤粉-液态的润湿性使滞留液的状况有很大差异,有时高炉内的压损可能变大,但是与实际高炉的关系还有待今后研究。

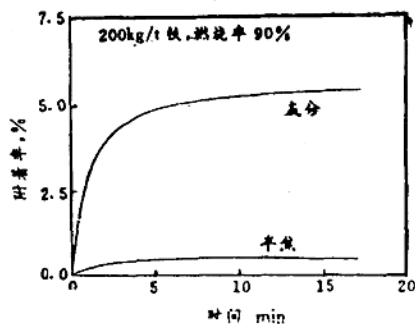


图9 未燃烧的煤粉附在渣上的比率

三、喷吹煤粉时高炉 内状况变化

增加喷煤量时,炉内状况变化见图10。增加喷煤量后,一般认为在操作中出现以下问题:(1)随着煤粉的增加,风口和炉内的压损上升;(2)随着煤气流边缘发展和热流比降低,炉身等热损增加;(3)由于燃烧率下降,产生未燃烧煤粉。如果准确地把握了炉内这些情况,采取有效措施,可进一步加大煤粉喷吹量。

1. 炉料分布

有人根据敦刻尔克厂2号高炉降低焦比过程中,即使焦比变化很大透气性也不变的事实,推测出装料方法对透气性有很大影响的结论。

从高炉热态模型的调查结果得知,矿焦比和炉内软熔带的关系见图11,高矿焦比时炉内压损降到最低的炉料分布情况C,见图12。即高煤比操作时,加大边缘的矿焦层厚之比是有效的。加古川厂2号高炉采用该方法,同时使用中心加焦和活动炉喉控制,喷吹煤粉和重油,月平均焦比达到了298kg/t 铁(校正煤比220kg/t 铁)。操作中,用中心加焦控制中心部的焦炭量,以确保中心气流;用活动炉喉控制边缘部的矿焦比,都是有效的。

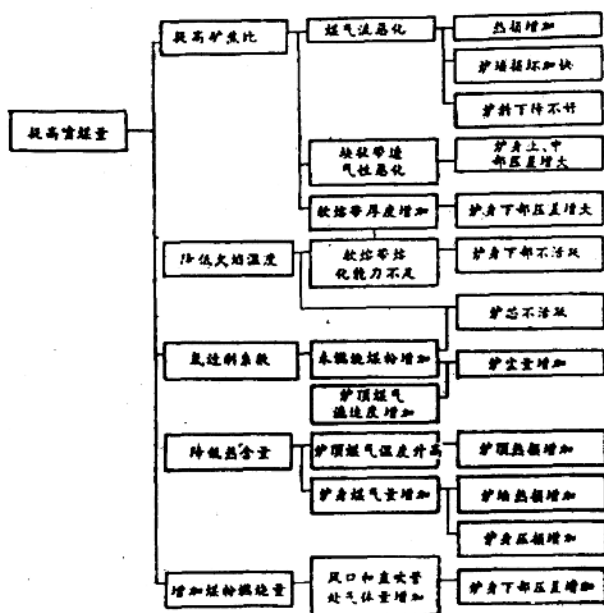


图 10 增加煤比带来的技术问题

蒂森钢公司施韦尔根厂也有过 1 号高炉增加煤比提高边缘部矿焦比的报道。水岛厂 4 号高炉从全焦转向喷煤 70kg/t 铁的操作过程中,也用此方法。

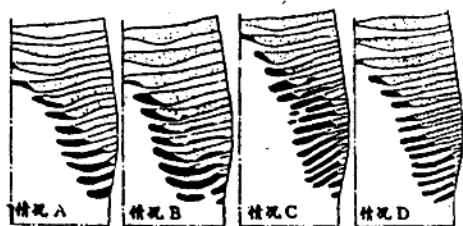


图 11 随着矿焦比的增加软熔带形状的变化

2. 压力变动

索拉克公司敦刻尔克厂 4 号高炉(内容积 3648m³),1990 年 7 月创造了月平均煤比 180kg/t 铁(利用系数 2.42t/m³·d)的世界纪录,当时操作上的问题是:炉内压损增加;炉顶煤气温度上升。

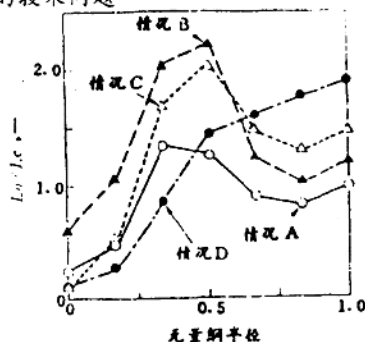


图 12 随着焦比的增加炉料分布的变化

大铃等人利用神户厂 3 号高炉高喷煤量的操作结果,解析了炉内压损增加的原因。煤比从 100kg/t 铁增加到 160kg/t 铁时,总压损约增加 0.15kg/cm²(图 13),其原因有:矿焦比增大使透气阻力增加;煤粉的燃烧量增加使风口内压损上升;炉内煤气温度上升使实际煤气量增大。

而炉内压损上升估计主要是由于炉内煤气温度上升。大铃等人在报告中指出,随着矿

焦比的增大,压损增加量是0.03。但是此值比中岛等人的解析结果值小,中岛等人比较了全焦和喷煤70~100kg/t铁的操作结果,压损增加量是0.05kg/cm²。

人们还认为回旋区未燃烧煤粉积蓄在炉内,也是压损增大的原因之一。但是,从全焦操作向喷煤操作变化过程中,当喷煤量一定时,即使压损增加得急剧,其变化也不大。所以一般认为未燃烧煤粉在炉内积蓄对压损的影响不大。也认为喷煤操作的透气性恶化与软熔带根部位置降低有关。

3. 置换比

一般地说,煤灰分和挥发分越低,被置换的焦炭灰分越高,煤粉和焦炭的置换比(用1kg包括残留水分的煤粉置换干焦炭的量)值越大。另外,高炉操作状况对置换比也有很大影响。高炉操作状况由于喷煤得到改善时,实际置换比高于理论值,所以当置换比高于1时,充分研究其原因是很重要的。

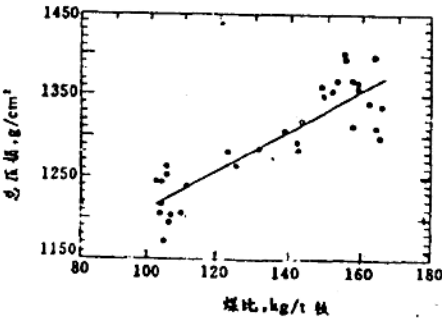


图13 煤比与总压损的关系

W. P. Hutng 等人根据52座不同高炉的操作结果,对煤比(CR; kg/t 铁)、鼓风温度(BT; °C)、煤的灰分(ASH; %)、煤/空气(kg/m³)和焦炭置换比(RR)的关系进行了回归分析,导出了下式:(公式中系数的有效位数有问题,为尊重原著照用未动)。

$$RR = 0.677 + 0.000943CR + 0.000311BT - 0.010905ASH - 0.014862 \text{ 煤/空气}$$

从此式可见,提高置换比要求:(1)低挥

发分煤(高C/H)(图14);(2)高空气比(氧比)(图15);(3)高送风温度。

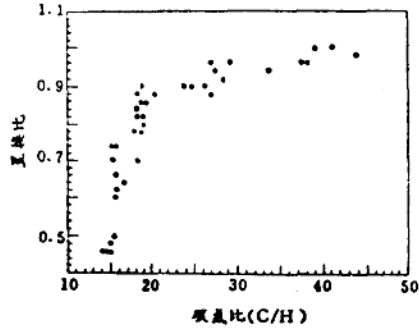


图14 焦炭置换比与煤C/H的函数关系

在加古川厂2号高炉喷煤128kg/t铁加重油,进行低焦比操作时,以发热量为基础,

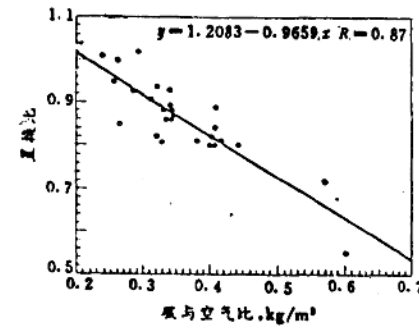


图15 置换比与碳/空气的关系

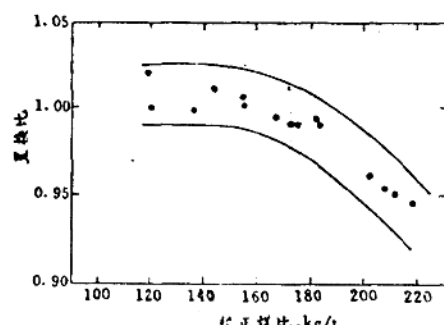


图16 置换比与校正煤比的关系

对煤粉加重油的置换比进行了研究。如图16所示,将重油换算成发热量(煤粉:7400kcal/kg,重油:10400kcal/kg)的校正煤比160kg/t

铁的置换比基本为1。高于160kg/t铁时,置换比基本是直线下降,校正煤比为200kg/t铁时,置换比为0.94。解析其原因是:虽然用活动炉喉和中心加焦方法可以将高炉下部炉墙的热损失抑制在低水平,但是由于炉顶温度上升,从高炉带走的热量增大。

四、大量喷煤的典型 高炉操作状况

如图17(略)所示,1990年的统计,全世界有84座高炉实施喷煤操作,还有20多座正在准备建设喷煤设备。

到1991年5月日本有31座高炉生产,其中约80%有喷煤装置,欧洲也大量喷吹煤粉,敦刻尔克厂、阿尔贝德公司的贝尔瓦尔厂、霍戈文公司艾默伊登厂、于康热联合高炉公司于康热厂、蒂森公司汉博恩厂和施韦尔根厂都特别积极地向大喷煤量挑战。在英国钢铁公司斯肯索普厂,不是喷吹煤粉,而是大量喷吹<2mm粒度占98%的粉状煤。为扩大煤种阿尔贝德公司贝尔瓦尔厂积极进行低灰分、高挥发分褐煤、高灰分、中挥发分煤、低挥发分、中灰分褐煤,焦炭等喷吹试验。

下面介绍其中典型高炉持续维持大喷吹量和较高利用系数的操作概要。

1. 敦刻尔克厂4号高炉

1983年以来敦刻尔克厂一直在开发喷煤技术,1985年已经实现了煤比143kg/t铁、焦比313kg/t的当时最高水平。最近和法国钢铁研究院(IRSID)又积极进行技术开发,1990年7月,炉缸直径14m的4号高炉喷煤达到180kg/t铁,焦比295kg/t铁(大块焦比270kg/t铁+小块焦比25kg/t铁)(表2)。这一水平持续了几个月。

这时的热风含氧量为25%,风口前温度保持在2050℃以上,小块焦25kg/t铁和烧结矿混合装入,炉况非常稳定, $Si=0.208, \sigma_{Si}$

$=0.065$,还原率也好。

表2 敦刻尔克厂工业试验结果

	5月	6月	7月	8月	9月
产量(t/d)	8716	8569	8814	8476	8683
利用系数 t/(d·m³)	1.9	1.9	2	1.9	1.9
燃料比(kg/t)					
焦比	294	286	270	272	274
小块 10~25mm 焦比	23	24	26	26	26
煤比	156	167	180	170	178
总燃料比	447	449	445	449	447
热风					
风量(m³/h)	356350	355223	356785	346931	351239
温度(℃)	1188	1187	1193	1190	1194
压力(bar)	3.21	3.23	3.28	3.24	3.32
湿度(g/m³)	9.67	11.14	11.57	15.29	11.42
O₂(%)	21.97	22.42	22.48	22.41	22.61
火焰温度(℃)	2090	2061	2071	2098	2073
炉顶煤气					
温度(℃)	168	180	185	197	184
η_{CO}	0.515	0.513	0.51	0.506	0.509
$w(O/Fe)$	-5	-3	-3	1	1
压力(bar·°)	1.98	1.99	2	1.96	1.96

* 1bar=10⁵Pa。

2. 阿尔贝德-贝尔瓦尔厂A高炉

如表3所示,阿尔贝德-贝尔瓦尔厂A高炉不富氧,喷吹了各种煤。无论喷哪种煤,操作中炉料下降状况都没有变化,没有发现全焦操作看到的滑料和悬料现象。而且还指出,煤粉带入的S量虽然比全焦操作时多,但是,铁水中S却有所降低。置换比褐煤为0.54,一般煤为0.7~0.8,褐煤-焦炭为0.84。

3. 神户厂3号高炉

神户厂3号高炉(内容积1843m³)喷煤100kg/t铁持续了42个月,1990年4月增大了喷煤设备能力,1990年11月达到了162kg/t铁。

图17为1990年1~11月的操作变化情况。增加煤比时:(1)为了抑制压损上升,喷枪位置向炉内侧移动;(2)采用低压损型并且可以降低炉体散热的炉料分布;(3)富氧率一定。

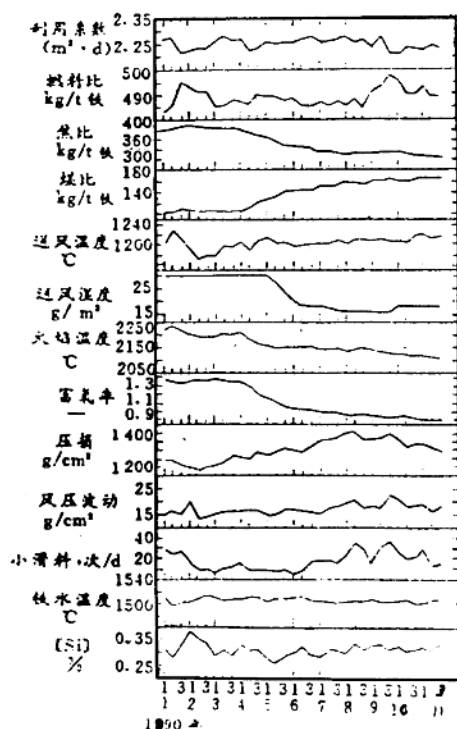


图 17 神户厂 3 号高炉操作结果
增加煤比初期,虽然压损增大,但仍可维

持炉况稳定,1990 年 6 月平均煤比达到了 140kg/t 铁。但是之后小滑料次数增加,压损和鼓风压力波动也显著增加,并发生悬料,炉况一时有所恶化。通过调整炉料分布,抑制边缘气流,改善了炉况,其结果 11 月煤比增到 162kg/t 铁。1991 年 6 月以后既确保利用系数在 $2.2 \sim 2.3 \text{ t/m}^3 \cdot \text{d}$,又确保煤比 180kg/t 铁以上稳定喷吹。在煤比增加过程中,从 1990 年 12 月开始将富氧率从 1.8% 分步增加到 3.1%。这样,炉内压损大体保持在煤比 160kg/t 铁的水平。

4. 蒂森公司施韦尔根厂 1 号高炉

1985 年以来,蒂森公司在汉博恩厂 4 号高炉、施韦尔根厂 1 号高炉和鲁尔区厂 6 号高炉上开始精心进行喷煤操作。表 4 为施韦尔根厂高炉操作情况。在喷煤操作中,随着煤粉的燃烧而煤气量增多,风口前煤气速度加快,为了尽量抑制这一点,将风口直径由 125mm 改为 140mm,这座高炉到 1990 年末喷煤比达到 170kg/t 铁,装入时的焦炭层厚度不变为 70cm。

表 3 阿尔贝德-贝尔瓦尔厂 A 高炉喷吹不同煤种的操作结果

	褐 煤	无烟煤 I	无烟煤 II	无烟煤 III	褐煤焦炭
焦比(kg/t)	500	515	516	495	467
辅助燃料(kg/t)	83	69	62	82	84
置换比(kg 干焦/kg 煤粉)	0.54	0.31	0.70	0.70	0.84
鼓风湿度(g/m³)	10	8	9	5	
鼓风温度(°C)	1078	1054	1054	1044	1041
炉顶煤气温度(°C)					
产量(t/d)	87.8×24	82.3×24	80.2×24	77.5×24	85.2×24
铁水含 Si(%)	0.54	0.74	0.62	0.65	0.60
铁水温度(°C)	1459	1472	1471	1474	1476
炉料中烧结矿(%)	69	96	88	89	88
炉料中球团矿(%)	9				
渣量(kg/t)	563	662	629	613	574
焦炭灰分(%)	8.8	8.6	8.6	89	8.9
煤灰分(%)	4.5	13	16.8~17.4	18.2	8.9

表4 施韦尔根厂高炉操作数据

	不喷煤 1986	试验期间 1987.5~8	高煤比 1988.6~11	超高煤比 1990.2
煤比(kg/t)		106	149	173
焦比(kg/t)	482	376	334	305
燃料比(kg/t)	482	482	483	478
炉量(t/d·m³)	59.4	59.2	61.1	58.8
鼓风温度(°C)	1129	1141	1159	1177
鼓风湿度(g/m³)	30	16	10	6
氧量(%)	21.0	21.0	22.4	22.4
煤(利用率)(%)	49.2	50.6	51.0	48.2
铁水温度(°C)	1487	1475	1478	1482
铁水 Si 含量(%)	0.24	0.27	0.28	0.33

5. 英国钢铁公司斯肯索普厂高炉

1982年通过 Simon-Macawber 开始的喷吹装置试验,确立了喷煤技术。斯肯索普厂高炉喷吹的粉煤粒度为 $<2\text{mm}98\%$ ($<63\mu\text{m}20\%$ 以下)。喷吹粉粒煤的最大优点是可节省干燥水分的费用,实际喷入煤的水分 $1\sim6\%$ 。并且认为粗颗粒煤在风口回旋区滞留 $5\sim10\text{ms}$ 内迅速分解。操作结果见表5。迄今为止的最大喷吹量是 117kg/t 铁。各高炉的整体透气性基本保持一致,但是喷吹量大时炉身部的透气性略有降低,炉腹部的透气性稍有提高。

表5 斯肯索普厂高炉操作结果

	维多利亚号 1985.5	安妮号 1986.3
焦比(kg/t)	459	411
辅助燃料(kg/t)	粒煤 49	粒煤 97
CO 利用率(%)	50.3	49.1
鼓风中氧量(%)	22.81	24.16
鼓风湿度(g/m³)	27.1	12.3
鼓风温度(°C)	980	942
炉顶煤(温度(°C)	131	184
产量(t/d)	3200	3430
铁水含 Si(%)	0.54	0.77
炉料中烧结矿(%)	65	45
炉料中环团矿(%)	35	51
焦炭灰分(%)	11.3	10.2
煤灰分(%)	6.5	6.2

五、喷吹煤粉的发展

1. 喷吹量的增加

现在对增大煤粉喷吹量最热心的是日本和欧洲,当前的喷吹量目标是 250kg/t 铁。达到这一目标第一关是喷吹量超过 200kg/t 铁。为此,在实验室研究基础上,进行了现场试验,但是没有长时间稳定喷吹的报告。

K. H. Peters 等人将喷吹量增大到 200kg/t 铁以上时的高炉内问题概括如图18。办法是:(1)进一步提高煤粉的燃烧率,为此,在增加每个煤粉颗粒的氧供给量的同时,将助燃添加剂(例如 CaCO_3 和褐煤)混到煤粉中;(2)为确保焦炭层厚度减少时软熔带的透气性,要提高矿石的还原性,使其在高温下再开始软化,从而使软化-熔融区域变窄;(3)用高强度焦炭以确保高炉下部透气、透液性。



图18 喷煤的限制

法国的高炉通过同时喷吹煤粉和焦炉煤气,进一步增大煤粉喷吹量。也有过能将焦比降到 270kg/t 铁的消息,但是详细操作结果未公开。

我们认为混入焦炉煤气可以改善煤粉燃烧性,其原因:(1)焦炉煤气能迅速达到燃烧温度并急剧燃烧;(2)焦炉煤气能促进煤粉的

分解和燃烧。

2. 活用喷吹煤粉的新炼铁技术

从根本上解决大量喷吹煤粉的方法之一是提高煤粉的反应温度。现有的热风炉很难稳定地供给 1250℃ 以上的热风,为此,对富氧和等离子技术进行了研究。特别是对等离子方法,以法国为首的一些电力成本便宜的国家都很热心。

(1) 使用氧气增大煤粉喷吹量 前苏联进行了将热风中的氧浓度提高到 35% 的操作,理论解析的结果,氧为 $334\text{m}^3/\text{t}$ 铁时,喷煤量可达 $486\text{kg}/\text{t}$ 铁,这时的焦比为 $109\text{kg}/\text{t}$ 铁。

英国钢铁公司在蒂赛德厂的试验炉(装入量为 $20\text{kg}/\text{h}$)中同时喷入煤粉和氧气,尝试把焦比降至 $150\text{kg}/\text{t}$ 铁进行操作。日本钢管公司将自己开发的氧气高炉用的氧-煤同时喷吹喷嘴,用于扇岛厂 2 号高炉的一个风口,使用了 2.5 月。操作中,煤粉喷吹量达 $3500\text{kg}/\text{h}$,氧浓度逐步提高到 85%。操作结果也证实该喷嘴的磨损极少,寿命为 5 个月。

英国钢铁公司斯肯索普厂高炉(炉缸直径 8.9m)在一个风口吹氧的同时喷入相当于 $300\text{kg}/\text{t}$ 铁的煤粉,试验之后,在 26 个风口中的 12 个喷入相当于 $220\text{kg}/\text{t}$ 铁的煤粉。

另外,英国钢铁公司、霍戈文公司、意大利冶金公司共同计划开发同时喷吹 50% 氧和 400kg 煤/ t 铁、产量为 $1000\text{t}/\text{d}$ 铸造铁的高炉。

(2) 利用等离子大量喷吹 比利时的国立冶金研究中心(CRM)开发了利用等离子体的 PIROGAS 工艺,在炉缸直径 0.5m 的小型试验高炉上进行了试验。试验结果,焦比达到 $105\text{kg}/\text{t}$ 铁。另外,国立冶金研究中心还和法国钢铁研究院共同在于康热厂的铸造铁高炉 14 个风口中的 6 个风口上,分别安装了如图 19 所示的 1.6Mw 的等离子喷嘴,计划将煤粉喷吹量从 $80\sim 100\text{kg}/\text{t}$ 铁提高到

$200\text{kg}/\text{t}$ 铁。此操作能把送风温度从 1180°C 提高到 1750°C ,在等离子风口喷煤 $160\text{kg}/\text{t}$ 铁。

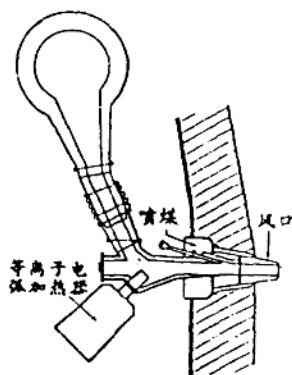


图 19 等离子促进喷煤

六、结 语

高炉喷吹煤粉技术从最初的设想经过 150 年,终于迎来了世界性的全盛时期。喷煤量达到 100kg 煤/ t 左右时,对以往的高炉操作技术并没有太大改变。在成功地研究以炉料分布为主的高级技术之后,有些高炉可以达到 $180\sim 200\text{kg}/\text{t}$ 铁。然而 $250\sim 300\text{kg}/\text{t}$ 铁的目标,没有最新的技术突破是不可能达到的。这时必须改变高炉技术人员迄今还不十分清楚的高炉下部的状况。

本文把重点放在高炉喷吹煤粉技术开发现状上,没有提及不需要焦炭的熔融还原等炼铁新技术。作为从事高炉工作的技术人员,我们确信在下个世纪,不借助熔融还原,将最大限度地开发出高炉的新技术,高炉炼铁仍将是主要炼铁方法。

张 引 译自《铁与钢》,1992, No7,
P. 233~243.

杜续恩 校

国外高炉喷煤技术

北京钢铁设计研究总院 唐文权(执笔)

提 要 西欧和日本因石油危机和焦炉老化,高炉喷煤技术发展迅速,喷煤高炉增多,一批高炉最高月均喷煤量达190~200kg/t铁。喷煤率35~40%(近期目标为50%),文章详细介绍了国外高炉喷煤工艺流程分类、特点及流程实例,分析了具体经验及大喷煤量操作的基本条件,对发展我国高炉喷煤技术提出了建议。

就是当前国外高炉喷煤率的先进水平。

一、国外高炉喷煤水平

据不完全统计,目前国外喷煤高炉已达100座以上。有一批高炉的最高月平均喷煤量达到了190~200kg/t铁,喷煤率为35~40%。例如德国Schwelgern1号,英国Scunthorpe No Victoria,荷兰艾莫依登6号,法国Dunkirk 4号,日本神户3号高炉等。月平均喷煤量200kg/t铁,喷煤率40%的高炉都在制定下一步继续提高喷煤率到50%的计划。例如德国Thyssen公司正在解决制粉能力不足问题,预计在两年内实现喷煤率50%。英国钢铁公司Scunthorpe厂原定于1993年7月开始进行喷煤率50%的试验,计划前4~5周用氧煤喷枪,后4~5周试一般富氧方法同时调整炉子的顺行。由英国钢铁公司、荷兰霍戈文公司、意大利ILVA公司联合在英国克里夫兰厂600m³高炉上进行的大喷煤量试验已经达到喷煤率50%(焦炭300kg/t铁,煤粉300kg/t铁),试验的最终目标是达到煤粉400kg/t铁、焦炭200kg/t铁。

概括来说,年平均喷煤率35%,月平均喷煤率40%,下一步目标是喷煤率50%,这

二、喷煤工艺流程

喷煤工艺流程主要有两类。

第一类是多管直吹方式,其特点是:(1)喷吹罐为串联方式,一个系列或二个系列;(2)喷吹罐直接与风口数(或1/2风口数)相等的支管联接,一根喷吹管接一个风口或两个风口;(3)每根支管上装有煤粉流量计(也有不装的)和调节装置,用以自动测量和调节每个风口的喷煤量;(4)由于要装流量计数目多,仪表和控制系统的投资比较高;(5)管道阻损较大,因此喷吹距离相对要短一些,一般不超过200~300m。

第二类是总管加分配器方式。其特点是:(1)喷吹罐一般为并罐方式(两个或三个罐),也可以用串罐方式;(2)从喷吹罐接出一根总管经设在高炉附近的分配器分成若干根支管,每根支管分别接到每个风口;(3)在总管上和分配器后的支管上一般不装流量计。由于支管上不设流量计,无法在生产过程中实行自动调节。这种系统虽不如多管直吹自动调节每个风口喷煤量那样精确,但通过一次

或几次检查调整也能获得较好的分配均匀度。由于不装流量计,投资比较低;(4)由于总管加分配器方式的管道阻损相对比较小,喷吹距离可以达到600多米。

下面简要介绍一下主要工艺流程:

1. Kuttner 流程

德国 Kuttner 公司是一家有名的搞喷粉技术的公司,世界上约有20多座高炉使用它的技术,典型的流程是多管直接喷吹方式。例如, Thyssen 公司的 Ruhrort 6号, Ham-born 4号, 6号, 9号, Schwegern 1号, 2号, Krupp 公司的 Rheinhausen 1号, 2号等高炉。该流程为三罐串联式,每个系列由储煤罐、中间罐和喷吹罐组成。喷吹罐下部带有与风口数相等的流化小罐,这些小罐沿圆周方向均布,每个流化小罐中装有流化板,流化载气从罐的底部进入,小罐上部的煤粉经流化后向上送入喷吹支管。喷吹浓度40~50kg/kg,载送气及煤粉在支管内的起始流速约2~3m/s,每根支管上装有流量计(Granueer 测量装置)和二次风入口,流量计的安装位置靠近喷吹罐出口,二次风调节入口位置靠近高炉。Thyssen 公司使用这套装置已5年多,情况良好。

Kuttner 公司也有总管加分配器的流程,例如用于: Hoesch 公司(德)、Dortmund 4号, 7号(德)、巴西 Pains 公司 Divinopolis 1号, 2号, 3号等高炉。

2. Armco 流程

该流程系美国 Armco 公司与巴布科克-威尔科克斯公司共同开发,六、七十年代首先在美国 Armco 公司的阿什兰厂两座高炉上使用(Bellefonte 和 Amandan),1981年日本大分1号高炉,以后新日铁公司的10座喷煤高炉都用此技术,1983年用于荷兰艾莫伊登厂4号, 6号, 7号高炉,以后又用于韩国的浦项厂、光阳厂、台湾中钢公司高炉。

这是一种总管加分配器的主要流程,一

般设有3个并列喷吹罐。为了达到分配器后各支管喷煤量的均匀分配,将喷吹罐设在炉顶平台上,各支管都从高处往下接至风口并调整长度,使各支管的阻损基本相等。该流程靠喷吹罐上的电子秤发信号,用调节罐压的方法来调节喷煤总量。

3. Klöckner 流程

Klöckner 的 KCT 公司是德国另一家擅长喷吹工艺的公司。与 Armco 相似也是总管加分配器方式。分配器设在高炉中下部一侧,在支管上安装不同的固定压损管用以调整各支管的阻损,使之基本相等。喷吹罐出口的总管上装有液控调节阀,用调节阀门开度的方法与电子秤配合调节喷煤总量。

目前意大利、瑞典、印度、比利时等国已有10座高炉采用 Klöckner 公司的技术。

该公司最近给意大利 ILVA 公司 Taranto 厂设计的喷煤设施很有特色,由集中制粉和喷吹合在一起的车间分别向4座高炉直接喷吹煤粉,制粉喷吹车间离最近的4号高炉420m,距最远的1号高炉630m。喷吹罐设在煤粉仓下面,每套系统双罐并列(5号为4000m³级高炉,用两套系统),喷吹罐内充压约1.3MPa,喷吹浓度可达60kg/kg,1992年4座高炉喷煤量都已超过了150kg/t铁。每台磨机制得的煤粉可以通过充N₂的刮板输送机送到任意一座高炉用的煤粉仓内。

4. P. W. 流程

卢森堡 P. W. 公司有多管直接喷吹流程,例如用于法国 Usinor 公司 Dunkirk 2号, 4号高炉,德国 Dillingern 厂4号, 5号高炉,各支管靠调节旋转给料器的转速来调整各支管的喷煤量。

该公司也有总管加分配器流程。例如用于比利时 Sidmar 厂 A、B 高炉,采用三罐并列方式,一个装煤,一个加压准备,一个喷吹。