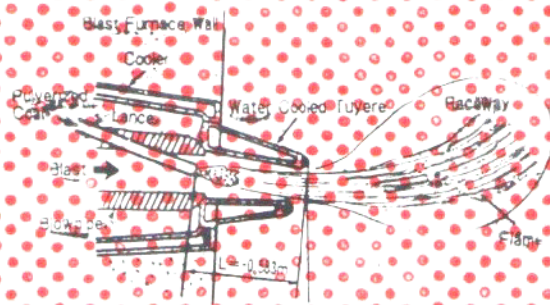


钢铁专题技术译文集第四十集

高炉喷煤技术研究



武钢钢铁研究所

前 言

高炉氧煤强化炼铁新工艺已列为国家“八五”技术攻关项目，为了配合此项攻关，我们选译了国外近年来高炉喷煤技术研究方面的力作，以献给高炉喷煤技术工作人员和炼铁工作者参考。

八十年代，世界各国高炉喷煤技术发展很快。1986年德国汉博恩4号高炉喷煤最好的二个星期，平均喷煤 171kg/t 铁，焦比 295kg/t 。1988年蒂森钢铁公司施韦尔格厂高炉曾达到月平均喷煤量 164kg/t 铁，焦比 319kg/t 铁。1991年6月日本神户钢铁公司3号高炉平均喷煤量 182kg/t 铁。我国鞍钢2号高炉喷煤量也曾达到 170kg/t 铁。九十年代，世界各国正朝着喷煤量超过 200kg/t 铁努力。

大量资料表明，高炉喷煤技术是一项发展中的技术，这项技术能否成功地达到 200kg/t 铁以上大喷煤的生产目标，尚需要对生产中存在的问题进行系统深入的试验研究，特别是大喷煤时，煤的强化燃烧问题是关键。

采用大喷煤量时，煤的强化燃烧可以参考本集中介绍的下列技术内容：

1. 富氧鼓风喷吹煤粉技术；

2. 在煤粉输送过程中，施加外电场，使煤粉表面吸附氧分子，此法可使煤粉燃烧效率提高30~40%；

3. 关于煤粉细度：多数高炉工作者认为煤粉粒度80%应小于 $74\mu\text{m}$ 。而苏联 В. Н. Андронов 等人研究认为煤粉最佳细度以50~100 μm 占60~80%（重量）为宜。这一论点与英国钢铁公司的看法相近。

4. 等离子预热鼓风技术：比利时冶金研究中心和法国钢铁研究院在联合试验中，用此项技术取得喷煤量超过 200kg/t 铁的良好效果。

5. 氧煤燃烧器强化燃烧技术: 比利时开发了此项技术, 蒂森钢公司施韦尔格高炉在一个风口上进行了试验, 喷煤量达 230 kg/t 铁操作仍保持稳定。

6. 复合喷煤技术(CHAR-DIN): 采用富氧鼓风与炉腰/身气体喷吹相结合, 可以大大提高高炉生产率。

煤粉在高炉风口端部前适宜的喷煤位置(L)是强化煤粉燃烧的一项重要技术参数。本集介绍了日本的研究成果。神户钢铁公司认为一般情况下, $L = -0.583\text{ m}$, 新日铁田村键二等认为 L 应依喷煤量而变化。喷煤量 60 kg/t 时, $L = -0.46\text{ m}$, 喷煤量 132 kg/t 时, $L = -0.14\text{ m}$, 喷煤量 180 kg/t 条件下, 保证 100% 燃烧率时, L 为 -0.03 m 。在实际生产上, L 与鼓风温度和煤粉粒度等因素均有关。

本集还介绍了日本、比利时、苏联等国高炉喷煤研究试验方法及其研究成果, 可供借鉴。诸如: 千叶厂使用斜向风口探头测量煤的可燃性方法; 神户钢公司煤粉燃烧试验装置, 比利时研究中心空室试验装置及其方法等。

本集包括11篇译文, 其中收入1990年国际炼铁会议五篇论文。

通过本集, 希望能够给从事喷煤技术工作的同志以启迪, 有助于高炉喷煤科研工作地开展。

本集出版之际, 正值我所专题技术译文集翻译出版工作二十周年, 本集也正好是我室同仁贡献给钢铁界的第40集专题技术译文集。

本集在编译过程中, 经宋木森高工审校, 并提供了宝贵意见, 在此致谢。

由于时间仓促, 错误在所难免, 敬请批评指正。

编 者

武钢钢研所《钢铁专题技术译文集》目录

(1973—1992)

序号	专 集 名 称	出版时间	备 注
1	破断韧性译文集	1973	《钢铁研究情报》 No 1
2	含 AIN 和控制轧制译文集	1974	同 上 No 1
3	钢中气体测定方法译文集	1974	同 上 No 2
4	金属腐蚀译文集	1974	同 上 No 3
5	铸锭技术译文集	1975	同 上 No 1
6	汽车薄板生产技术译文集	1975	同 上 No 4
7	焊接技术译文集	1975	同 上
8	含铜硅钢译文集	1976	同 上 No 1
9	热连轧数学模型译文集	1976	同 上 No 2
10	电镀锡板译文集	1976	同 上 No 3—4
11	低合金钢译文集	1977	同 上 No 3—4
12	X 射线衍射技术译文集	1978.10	同 上
13	破断韧性译文集	1979	同 上 No 1—2
14	沸腾钢译文集	1979	同 上 No 3—4
15	轧辊技术译文集	1982.5	同 上
16	镀锌板技术译文集	1983	《钢铁情报》 No 1
17	汽车用钢译文集	1983	同 上 No 2
18	高强度钢译文集	1983	同 上 No 3
19	硅钢译文集	1983	同 上 No 4
20	薄板成形性及测试方法译文集	1983	同 上 No 5
21	薄板译文集	1983	同 上 No 6
22	轧钢译文集	1983	同 上 No 7
23	焊接译文集	1983	同 上 No 8
24	连铸译文集	1983	《钢铁研究情报》 增刊
25	改善连铸坯质量译文集	1984	《钢铁研究》
26	转炉复合吹炼译文集	1984.11	同 上 No 1
27	炼钢译文集	1985	同 上 No 4
28	热轧双相钢译文集	1985.12	
29	改善连铸坯质量译文集(续一)	1986	
30	现代汽车板(需求与对策)译文集	1986	钢研所情报网
31	TN 钢水脱硫技术译文集	1986.5	
32	彩色涂层钢板译文集	1987.7	
33	钢水夹杂过滤技术译文集	1987.12	
34	80kgf/mm ² 高强度钢译文集	1988	
35	荫罩钢带译文集	1990	
36	IF 钢译文集	1990	
37	模铸连铸保护渣译文集	1991	
38	炼钢出钢挡渣技术译文集	1991	
39	提高烧结矿低温强度技术译文集	1992.1	
40	高炉喷煤技术译文集	1992	

本集编辑: 张定基
李学仁

打字: 杨文

《高炉喷煤技术研究》

目 录

前 言

「喷煤研究」

1. 高喷煤率的潜力和问题 张定基 译 (1)

「喷煤工艺」

2. 高炉喷吹煤粉和天然气的操作制度最佳化 李学仁 译 (10)
3. 煤粉在高炉风口回旋区的燃烧量极限与理想喷入位置 王向成 译 (16)
4. 强化高炉内煤粉燃烧 李学仁 译 (25)

「喷吹用煤」

5. 高炉用煤粉的颗粒组成 李学仁 译 (28)
6. 煤的性质对高炉喷煤可燃性的影响 张定基 译 (32)

「煤粉燃烧」

7. 关于高炉喷吹煤粉燃烧的研究 张定基 译 (41)
8. 高炉喷吹煤粉的燃烧特性 张定基 译 (49)
9. 富氧鼓风时高炉炉缸内煤粉燃烧的研究 王德仓 译 (56)

「喷煤新工艺」

10. 高炉操作方法(日本钢管工业公司专利) 张定基 译 (60)
11. 矿物燃料喷吹的经济性 欧阳德刚 译 (65)

高喷煤率的潜力和问题

A. POOS N. Ponghis
(比利时 冶金研究中心)

虽然高炉喷煤大约在150年前就已经发明了,但是,它只是在60年代才成功地运用于生产实践⁽¹⁾。高炉喷煤技术在停滞和发展受阻了许多年之后,在过去10年间,终于得到迅猛发展,这种趋势仍在继续。不仅建立喷煤的高炉数目增加(图1)⁽²⁾,而且喷煤量也不断增加,焦比降低到295kg/t铁⁽³⁾。

八十年代初人们对喷煤技术突然重新燃起热情是因为能源危机造成石油短缺、成本高昂、以及由此而产生的必须重新回到“全焦”作业的要求,但是,现在执行“全焦”作业,高炉的操作就不可能达到过去采用风口喷吹那样良好的生产水平。首先,煤粉喷吹的目标是:在喷煤量达到60-100kg/t铁的情况下,实现高炉稳定地生产。然而,模型计算结果表明:从热力学观点和从热平衡以及物料平衡观点来看,铁水喷煤量大于450kg/t铁、焦比低于120kg/t都是可能的。因为一套喷煤设备的投资远低于相等生产能力的焦炉。另外,它的环境污染问题也没有焦炉那么严重,所以人们对高喷煤量的兴趣在迅速增长,现在世界各地都在开展高喷煤量的研究,并终将会使之与其它先进技术结合起来。

本文概要地从理论上回顾了用高喷煤量的各种技术以及用它们代替大块冶金焦炭技术。讨论了各项技术的优点,以及他们可能存在的问题与局限性。

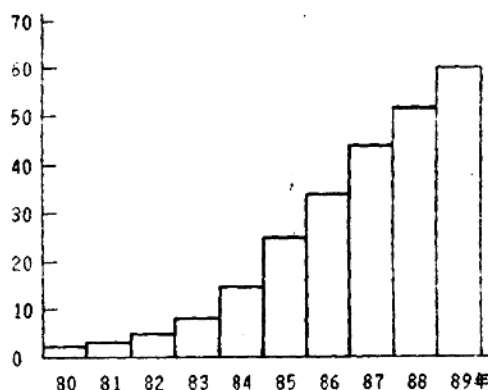
2 喷煤的潜力

2.1 传统的喷煤技术(PCI)

很久以来,一般高炉允许其喷煤率限制在约全部燃料的15%。直到现在还有一些炉

子尚未采用高喷煤率。过去,仅有北京首都钢铁公司的高炉从1966年始^(4, 5),喷煤率一直约为全部燃料消耗的25%。

采用喷煤的高炉 不包括中央计划经济国家



采用喷煤的高炉

图1 采用喷煤的高炉

霍戈文斯钢铁公司艾莫伊登厂于1983年7月1日,开始6号高炉喷煤量迅速达到80~85kg/t铁。7个月后该厂喷煤量增加到130kg/t铁⁽⁶⁾。最近试验喷煤量约180kg/t铁,业已实现焦比略高于300kg/t的水平,敦克尔克钢铁公司2号高炉于1983年6月开始喷煤,1985年6月该炉平均喷煤量为143kg/t铁,焦比为333kg/t,把20公斤小块焦混入矿石予以装料,这是当时高炉取得的最低焦比。

1986年5月德国汉博恩4号高炉开始喷煤,7个月之后,取得了焦比338kg(干焦)/t,喷煤量136kg/t铁;最好的两个星期平均喷煤量177kg/t铁,焦比295kg/t^(3, 8)。1988年6月蒂森钢铁公司施韦尔格厂高炉达到一个月平均喷煤量164kg/t铁,焦比为319kg/t^(3, 8)。

在高水平生产期间, 喷煤范围很广, 从用无烟煤的首都钢铁公司($V_{\text{挥}}=8.5\%$)、敦刻尔克公司($V_{\text{挥}}=11.5$), 用中等挥发分煤的施韦尔格厂($V_{\text{挥}}$ 混合为 21%)到用高挥发分煤的德国汉博恩钢铁公司($V_{\text{挥}}32\%$)。无论何种情况, 通过喷煤都改进了高炉操作, 高炉产量也比以往高的多。

上述显著效果的取得不仅和适中的鼓风富氧率($21\sim 24\%$)有关, 而且和约 1150°C 风温有关。无疑, 人们仍然希望继续加大喷煤量。然而即使是目前已喷煤的一些炉子也经常受到喷煤设备能力的限制。而且, 人们普遍认为采用传统的喷煤技术, 目前所取得的喷煤率已达到了极限, 要突破此极限, 最后必须采用新的工艺技术。

目前的极限大约是原子比 $\text{O}/\text{C}=\pm 2$, 即碳完全燃烧成为二氧化碳的理论空燃比, 这一事实表明, 燃烧动力学可能是限定性因素。

人们对煤在试验室设备上^[12, 13]和在空容器内燃烧的情况^[9, 10]作了大量研究工作, 并得到如下结论: 为了保证煤粒^[9]充分燃烧, 喷煤枪与风口端部间应保持一定的距离, 另外, 为了保证热风 and 煤^[9, 12]均匀混合, 喷煤枪必须定位于一个最佳角度。这些典型的试验似乎都证明了煤的燃烧比碳氢化合物的燃烧慢得多, 甚至高挥发分煤也比油的燃烧效率低; 它们还证明了煤粉粒度是一个重要影响因素, 并得出结论: 煤粉粒度应为 $0\sim 35\mu\text{m}$, 特别是无烟煤^[9]。

2.2 目前发展状况

为了进一步提高已经十分具有吸引力的喷煤量, 在世界各地已经开始进行了大规模的喷煤课题研究。为了取得较高的煤粉燃烧率, 这里应用了不同形式的“助燃手段”, 如等离子过热、大量用氧或特殊结构的燃烧器。英国钢铁公司的SWITHORPE厂在26个风口的高炉上结合富氧鼓风对12个风口进行喷煤试验, 喷煤量达到 $220\text{kg}/\text{t}$ 铁, 另一家英

国钢铁公司、霍戈文斯厂和ITALSTDER厂以 $400\text{kg}/\text{t}$ 铁喷煤量为目标进行试验, 在英国钢铁公司一座生产铸造铁的高炉上进行了一项联合喷煤试验计划^[2]。

在C、R、M中间试验车间的试验炉上作了如下试验, 即把等离子加热的过热(2000°C)还原煤气喷入风口, 使焦比降低到 $105\text{kg}/\text{t}$ 铁^[14, 15]之后C、R、M(比利时冶金研究中心)和IRSIP(法国冶金研究院)及它的子公司LORFONTE公司又在Hckange的高炉上共同进行了一项试验, 它们用等离子加热来提高喷煤的燃烧效率, 使风温从 1180°C 提高到 1750°C , 6个风口(总共14个风口)装备了等离子加热器, 喷煤量超过了 $200\text{kg}/\text{t}$ 铁。

比利时也积极地开展了氧煤新工艺研究。在早期氧—燃料烧咀^[16, 17]研究成果基础上, 他们又研究开发了一系列适用于不同条件的工艺流程, 诸如: 炉腰喷吹煤气, DIN工艺(复合喷吹)^[18, 20], 或富氧鼓风(富氧率达 47.3%)结合喷油等。它们各自的价值取决于成本的变化以及这些不同形式的能源的可获量。这种形式的工艺流程的数量是无限的, 而实际可采用的工艺则应视当地条件, 高炉的生产情况, 以及成本预算和生产目标等因素而确定。

完成了基础研究之后, 在多次“空室”燃烧试验的基础上, 我们又在装有焦炭的中间试验炉上进行了一些试验, 这类试验仍在进行。在这些中试设备上, 设计了各种不同的氧—煤烧咀和喷枪配置并做了试验。阿尔贝德公司目前已改造了一座高炉的风口, 对这最有效的设备进行了大规模试验。我们的最后目标是把焦比降到低于 $200\text{kg}/\text{t}$ 。然而, 目前尚未能确定将来高炉实际上可能达到何种极限。这里面有许多因素, 特别是与煤气流和炉料流相关的因素会强烈地影响喷煤率; 但是定量化的信息因素仍然得不到, 而且在许多情况下, 甚至出现完全矛盾的结果。

2.3 将来的目标和喷煤技术发展的趋势

为了用图说明将来喷煤技术的最后潜力, 我们已作了模型计算, 设定高炉生产状况非常好, 它使用100%烧结矿和低湿度焦炭, 炉内煤气分布接近理想状态, 因此, 煤气利用率非常好。热风温度已确定为975℃, 不考虑此处具体情况, 这是与热交换模型相适应的最高的热风温度, 平均炉顶煤气温度(125℃), 在全焦操作情况下, 焦比为 467 kg干焦/t (图2)。

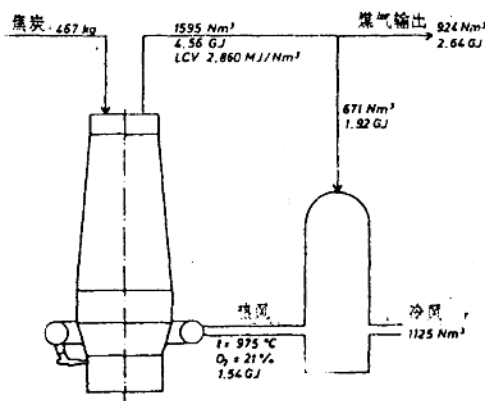


图2 全焦操作(1吨铁水)

如果打算采用与目前的生产工艺相适应的喷煤技术(占全部焦炭的30%), 并要保持在以前(炉顶温度125℃)同样的热效率的话, 热风温度则应升到1200℃, 鼓风中富氧率应为25%, 在此条件下, 焦比可以达到334kg/t (图3)。喷吹用煤为中等挥发分煤(V挥25.8%灰分11%), 我们之所以选择了这种类型煤是因为无论从那个角度看, 它都代表了一般平均)的状况。修正之后的置换比为±0.85。由于挥发分和灰分较低, 导致置换比明显地比较高, 反之挥发分和灰分较高, 则置换比较低。

如果我们的目标是将焦比减到低于 200 kg/t, 就要求喷煤量约250-400kg/t铁。在如此高的喷煤量条件下, 为了维持正常的回

旋区, 就必须向鼓风中大量加氧或把风温过热到高于正常的热风炉的风温之上, 如借用等离子加热器[14, 15]。富氧和等离子炬加热能促进煤的燃烧。图4a和4b示出了这些可能性。图4a介绍用富氧热风 and 氧煤燃烧器操作, 而图4b则表示用等离子加热和喷煤操作。看来, 前者的总燃料比(0.85×煤+焦)436kg大大地高于“全焦”操作的467kg, 而后者101kg则明显地减少了(低于全焦操作)。这主要是由于在鼓风中输入热量有很大不同所致, 其热量为全焦操作1.54GJ, 氧煤操作0.80GJ, 等离子加热操作为1.32+0.94=2.26GJ。

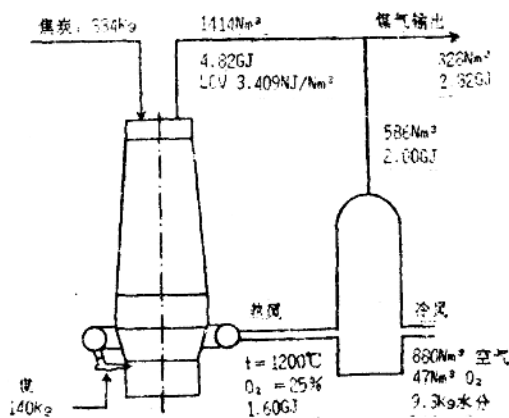


图3 喷煤技术现状(1吨铁水)

研究图4 我们可以看出, 每吨铁水的热风量很小, 但是与全焦操作取得的值相比, 炉顶煤气的发热值明显高(图4a)。

这样就可以大大地简化高炉, 并可以废除热风炉, 各种热风管和阀, 实行高炉冷风操作, 这就是说, 炉顶煤气可以作其他用, 而不用来加热风温。图5概要显示出这种变形。由293Nm³ 冷风和285Nm³ 纯氧合成为含60%氧的风。因此, 与图4a相比, 氧耗增加82 Nm³ /t铁, 焦比增加了20kg/t。如果我们希望生产的炉顶煤气具有更高的发热值, 还可以采取进一步的措施, 即向高炉输送无氮的

风,这种工艺过去曾有人提出过,最近已有多
种改造方案[22-25]。这种操作工艺见图6。
应当指出,这里产生的炉顶煤气与目前最好的
煤气化工艺生产的初生煤气的成分相同,
但是,它是不含硫和灰分的冷风。

得的结果[15]

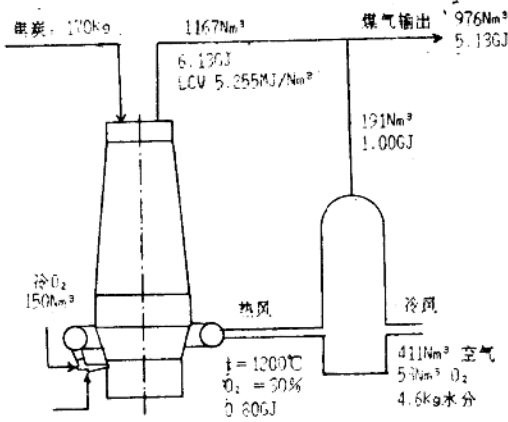


图4a 热风-氧煤燃烧器工艺 (1吨铁水)

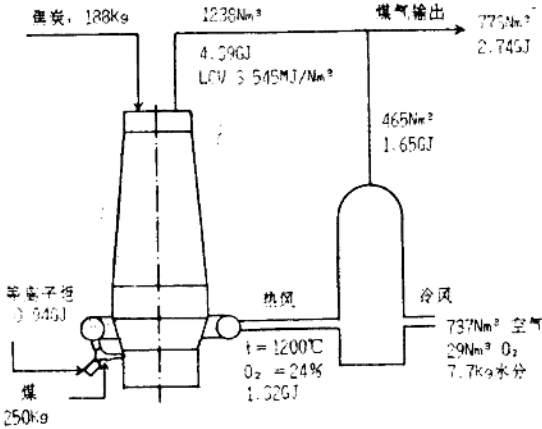


图4b 等离子加热气体-煤工艺 (1吨铁水)

在无氮操作情况下,风口处喷煤量很大,因此需要加入水蒸气,循环CO₂或炉顶煤气等冷却剂作为缓解剂,以便有效地控制燃烧火焰的温度,如果选择第一种改革方案,喷煤量将上升到525kg/t铁,而焦比将降低到102kg/t铁。这一操作非常类似于C、R、M在中国试验高炉上用等离子加热工艺试验取

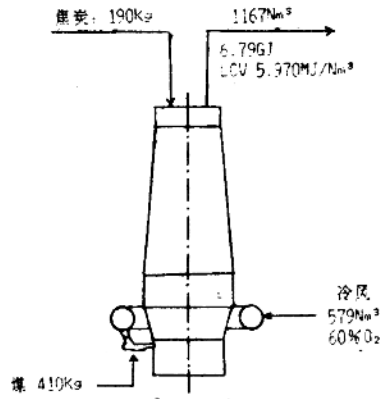


图5 冷风操作 (60% O₂) (1吨铁水)

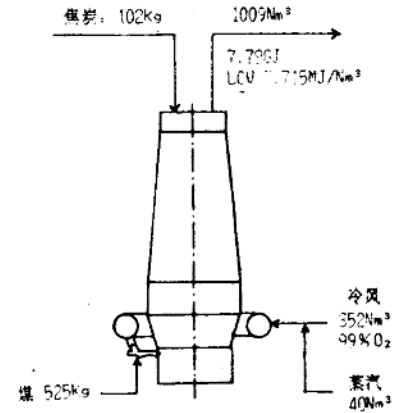


图6 无氮鼓风 (99% O₂) (1吨铁水)

如果高炉煤气除自用外,没有外部需求限制的话,炉顶煤气可再循环用于高炉生产,如减少它的CO₂含量在气体冷凝器中把水冷凝、压缩和加热之后,再用于炉腰喷吹,降低煤气中CO₂含量可以通过Benfield工艺的MEA法或在压力下水洗。然而,在钢铁联合企业,仍然有一部焦炉煤气(COG)可以利用,炉顶煤气和焦炉煤气以适当比例混合并在有耐火衬的加热炉内加热,得到适用的还原性煤气(上述加热器相当于加热风温的热风炉)。

图7(冷风用60%O₂)和图8(冷风用99%O₂，如果考虑加入蒸汽以88%计算)示出了各种煤氧高炉工艺。固体燃料比分别为煤:275kg/t铁和375kg/t铁，焦碳为216kg/t铁和131kg/t铁。为了便于比较上述各种不同工艺方法的优越性，已将其主要消耗制图于表1。我们

从热力学观点可以看出，获得非常高的喷煤量以及非常低的焦比是可能的。值得注意的是：在任何情况下，喷煤工艺需要的一次能源煤(炼焦加喷煤)和氧消耗量比到目前为止提出的所有其他重大的炼铁新工艺所预期的能源消耗都低得多。

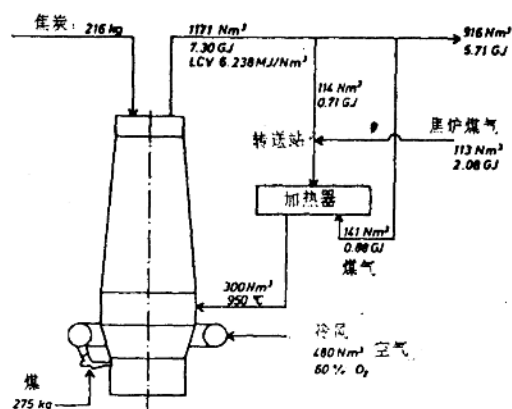


图7 复合喷吹/冷风(60% O₂)(1吨铁水)

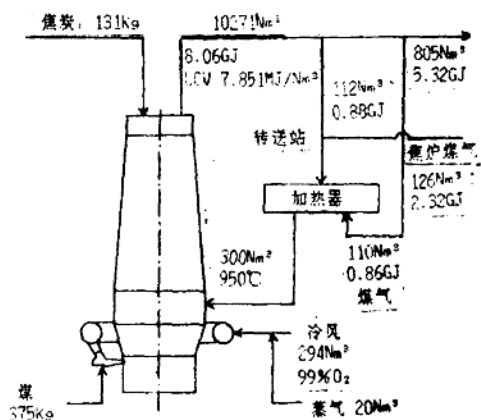


图8 复合喷吹/无氮鼓风(1吨铁水)

表1 每吨铁水[模型计算]的消耗数字比较

项 目	单位	全焦 操作 2	喷煤现状 3	煤氧燃烧 器/热风 4. a	等离子加 热/煤 4. b	冷风 60% O ₂ 5	无氮 鼓风 6	复合喷吹/冷风 60% O ₂ 7	复合喷吹/ 无氮鼓风 8
干 焦	kg	467	334	170	188	190	102	216	131
风口燃烧焦炭量	kg	294	171	43	21	80	16	121	58
干煤(喷煤)	kg	0	140	375	250	410	525	275	375
综合焦比 (0.85喷煤+煤)		467	453	489	401	539	540	450	450
总煤耗量 (1.25煤+喷煤)	kg	584	558	588	485	640	653	545	539
加热需要的电力	kwh	-	-	-	308	-	-	-	-
鼓 风									
总风量	Nm³	1125	927	464	766	578	392	480	314
风 温	°C	975	1200	1200	1950	25	25	25	25
富氧率	%	21.0	25.0	30.0	24.0	60.0	89.8	60.0	93.6
加入冷风中O ₂ 量	Nm³	0	47	53	29	285	352	237	294
氧燃烧器用氧	Nm³	0	0	150	0	0	0	0	0
蒸 汽	Nm³	0	0	0	0	0	40	0	20
再循环煤气	GJ	0	0	0	0	0	0	3.67	4.06
对应的生产率	%	91	100	112	114	109	117	136	150

关于高炉生产率问题,即使在风口鼓风量恒定条件下,与全焦操作相比,一般喷煤会使高炉生产率增加(参见表1);这还没有考虑由于喷煤与全焦操作相比,高炉操作更稳定,而会给生产带来一定效益。在无氮高炉生产状况下,其增加的效益将更大。但是后者,并不能象某些文献所预期的那样,使高炉的产量翻一番。事实上,如果我们从炉料平衡和高炉生产最佳化出发,全焦操作和目前采用的煤粉喷吹工艺所取得的生产率上的效益分别为 $(117-91):91=29\%$ 和 $(117-100):117=15\%$ 。其原因是我们必须对火焰温度作一定的调整,平衡炉身与炉腰之间的热输入,即产生最小量的煤气以满足炉身供热要求并保持足够高的炉顶煤气温度以避免冷凝问题。富氧鼓风与炉腰气体喷吹(图7和图8的CHAR-DIN操作)相结合,可以大大地提高高炉生产率。这里可以采用较小的特定的风口煤气速度,因为由此产生的炉身热与还原能力的不足可以从在软熔带上方喷吹的高温还原煤气中得到补偿,在此处煤气速度的增加没有问题。

应当指出在上面给出的例子中,我们不要把本报告的喷煤量作为最佳值,为了证明高炉工艺的灵活性及其对各种技术与经济约束条件的适应性,我们有意识地任选了上述一些事例。然而,为了成功地运用此工艺技术,有必要更加深入地理解限制喷煤的诸因素。

3. 限制喷煤的因素

对于喷煤量的限制因素不仅存在着极其相反的意见,而且,最近所得到的试验数据和实践经验也有很大分歧。下面,我们将简要地讨论我们确信对取得高喷煤量很重要的主要因素。

3.1 喷煤的煤质

一般认为煤在离开回旋区前,必须充分地烧尽,但对于达到这个方法却有很大分歧。

从喷吹用煤的化学成分,特别是煤的等级研究,“空室”燃烧试验结果得出的结论是高挥发分煤比无烟煤燃烧快(图9)。但是直到现在还无法解释为什么用无烟煤得到的喷煤率(用C/O表示)与用高挥发分煤[4, 5, 7]所得到的喷煤率同样高。

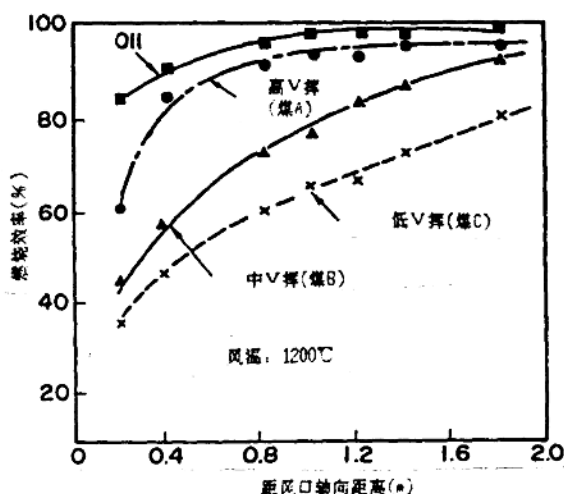


图9 某些燃料燃烧效率的比较(文献11)

根据某些高炉专家的另外一些理论,由于高挥发分煤在第一阶段大量产生碳氢化合物,此后,易发生高温热解并形成煤烟,所以高挥发分煤限制了喷煤量,实际上,专项试验室试验已表明,迅速升温的高挥发分煤能够形成的烟量比按化学成分分析预料应产生的烟量高的多[26]。然而,如上所述,实际上,除了高挥发分煤,特别是那些含氧量高的高挥发分煤(如褐煤)对RAFT(绝热火焰温度)有很大“冷却效果”和较低的置换比外,不能证明无烟煤和高挥发分煤二者之间有什么显著不同。

最后,“空室”燃烧试验表明:煤的粒度对它的可燃性具有非常重要的影响[2, 27, 28]。

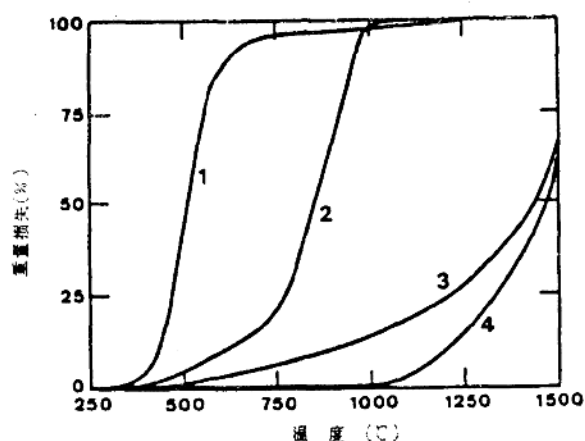
为了用比“空室”更实际的方法模拟高炉回旋区条件,最近在装满焦炭的试验装置

上进行了喷煤燃烧试验。试验出现了惊人的结果^[29]。原来预计在回旋区因为温度极高的焦炭的“竞争”，以及氧的潜能较低，所以煤的燃烧效率会大大地低于“空室”内煤的燃烧效率（见上述），但是结果表明正相反，煤燃烧比在“空室”试验装置中快得多，能够取得非常高的燃烧效率，喷煤量相当于200kg/t铁，而且煤粉的粒度的影响明显地与根据空室燃烧试验结果估计的情形很不相同^[30]。试验室专项实验^[31]表明此项没有预计到的特性可以通过非常详细地分析在回旋区条件下煤燃烧的不同阶段来解释，即煤粉吹入其内的中间介质的温度越高，它的脱去挥发分比率和残余碳的活性也较高（图10），通过观察发现，只要将喷枪头伸到风口端部更近处，煤粉的燃尽率就可以提高，这就进一步证实了上述分析。但是，Armco公司的经验则与此相反，Armco公司认为，将喷枪后置使燃烧时间延长一倍更有利于煤粉的燃尽率。

同样，对煤中灰分影响也存在着相反的意见^[5, 29]

3.2 焦炭质量和炉料分布

当喷煤率为全部燃料比的30—35%时，对焦炭质量并无特殊要求。但是对高喷煤率来说，情况就不同了。事实上，如果我们查看



1, 2, 3—在 N_2 下，制对应1500, 1400和1200°C制备的焦炭
4—冶金焦

图10 气化试验结果(参考13)

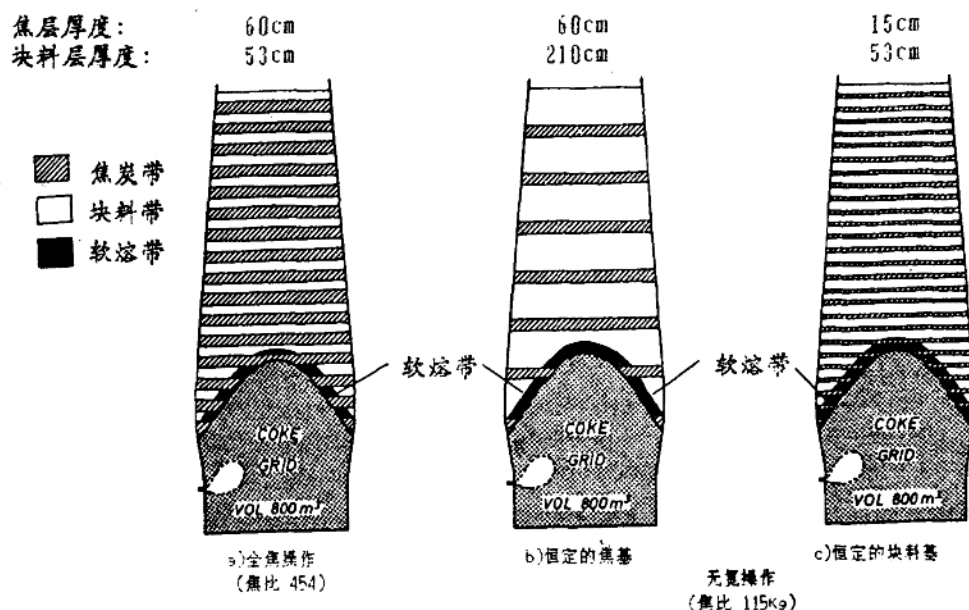


图11 高炉喷煤量的燃烧分布模型

一下, 就可以看出在无氮高炉操作时其焦比可由全焦操作的 467kg/t 铁, 降到 102kg/t 铁, 高炉焦炭装料少将会降低其透气性。但是, 在炉身并不存在透气性问题, 因为所有装入炉身的料都是固体料, 并经过制备和筛分了的。即使用不含焦炭的炉料, 以气体作为基础的直接还原炉的经验表明, 直接还原炉的煤气流速度大大地高于高炉的煤气流速也是允许的。

在软熔带以下(炉料软化和熔化带)的炉缸和炉腹区内的焦炭骨架和体积不取决于焦比, 软熔带形状取决于风口流速和布料, 其体积仅取决于温度分布(通过火焰温度控制)和炉料的熔化特点。图11中, 我们已经简要地介绍了炉缸直径为10米的炉子每小时生产200吨铁的状况。有时, 实行全焦操作, 有时又实行大量喷煤的无氮高炉操作, 在各种情况下, 焦炭骨架体积均是 800m^3 。如果我们现在研究表1中的线2, 可以看出全焦操作风口处煤的燃烧为 291kg/t 铁或每小时 $0.294 \times 200 = 58.8\text{t}$ 焦炭, 当焦炭密度为 0.46t/m^3 时, 每小时 127.8m^3 焦炭。此外, 骨架中焦炭平均滞留时间为6.3小时, 在无氮高喷煤操作条件下, 风口处焦炭燃烧量仅 16kg/t 铁或 3.2t/小时 (相当于 $7\text{m}^3/\text{小时}$), 平均滞留时间上升到114小时, 这大约是以以前滞留时间的18倍。在这么长的时间里, 焦炭受到机械应力的作用以及铁和渣浸蚀。在此, 我们需要什么质量的焦炭才能保持足够的空隙率和保证顺利地由炉腹和炉缸出铁和出渣呢? 事实上, 虽然因为我们忽略了考虑焦炭化铁水和直接还原合金元素的作用而使此问题似乎简单化了, 但是它并不能改变高炉生产的实际结果, 所以我们仍然必须将这一点考虑进去。最后, 我们在选择表1内所列的各种不同方案时, 我们的选择会受到取得极低焦比时, 焦炭骨架滞留时间的影响。例如图4a、4b和7具有同样的焦比, 但是风口处焦炭燃

烧的变化范围从 21kg/t 铁到 121kg/t 铁。

取得非常低的焦比可能出现另一个问题, 即布料问题。当从全焦操作转变为高喷煤操作时, 径向上的矿石/焦炭分布比必须逐步地调正^[15, 29]。就料层厚度而言, 一些操作人员认为应保持恒定的焦(基)层高度, 相反, 另一些操作者则认为保持矿石块料层恒定, 需变化焦炭层厚度^[17, 29]。在目前达到的焦比范围内, 这显然不是主要问题, 但是, 如果我们能够达到图11所示的那样低的焦比的话, 这一点也许会起变化。恒定的焦炭(基)层厚度可以保持目前同样高度的软熔带上的焦炭窗口的透气性, 但是“焦窗”数会大大地减少, 其结果是含铁炉料层平均厚度可能高达2米(图11b)。

保持目前的块料层的厚度也就意味着“焦炭窗口”的数量比“全焦”操作条件下的“焦窗”数多(图11c)。遗憾的是这样焦炭层的厚度会降低到15cm。如果考虑到由于烧结球团和矿石的渗透, 在焦炭层上会形成一层混料层的话, 我们知道其结果就会形成一个带焦炭窗口的软熔带, 它的透气性比块料层还差。即使只从这方面考虑, 我们也应当选择极端的情况。在目前喷吹煤粉条件下, 除非按照我们现在所采取的生产方案不会发生煤气气流穿过软熔带, 否则, 这种趋势是不可避免的。在首都钢铁公司, 他们采用全焦生产, 焦比为 587kg/t 时, 高炉的透气性与采用高喷煤量生产焦比仅 328kg/t 时高炉透气性是完全相同的。

3.3 鼓风条件和回旋区现象

为了在鼓风中能尽量均匀地分布煤粉, 不致引起风口过量磨损, 首要的条件是必须选定正确的喷煤工艺(如喷煤枪的位置, 鼓风速度以及煤等)。除了上述混料问题外, 还有一个喷煤枪枪头与风口端部之间最佳距离的选择问题。如前所述, 关于后一个问题, 我们所看到的答案的十分相互矛盾的^[29, 30]。

如果我们对有关问题能够有更深入的理解的话, 我们就能够设计出一套适合于煤粉完全气化的(也就是0℃比接近1)烧咀配置方案或设备来。

表2 不同高炉操作的最佳火焰温度

操作类型	全焦型	喷煤	冷风	无氮
		现状	60% O ₂	鼓风
绝热火焰温度 (RAFT)℃	2202	2238	2072	1943

现在为了防止一种瞬时状态转变为另一种瞬时状态, 稳定高炉生产和铁水质量, 而努力保持回旋区绝热火焰温度(RAFT)不变已是一种很普通的工艺了。不过, 如果我们改变了高炉操作的某个重要参数, 例如由全焦操作变为高喷煤率操作的话, RAFT就必须调正, 使之成为一个最优化的值, 它可能与表2所例的第1不等值完全不同。实践表明: “全焦”生产和高喷煤率作业的最佳火焰温度则分别大约为2202℃和2238℃, 而采用冷风操作或无氮操作最佳火焰温度则分别下降到2072和1943℃。高炉在最佳的RAFT温度上作业意味着高炉炉身与高炉炉腰内的高温区之间的热分配能够平衡, 这样就能保证有足够高的炉顶温度可供炉身的热交换, 但又不致浪费热能。当生产中使用的炉顶煤气含水分较高时, 为了防止水冷凝和腐蚀煤气主管道和集尘器, 需要保持一定的最低炉顶温度。

最后, 人们很少注意以下情况, 即: 高喷煤率和部分燃烧在鼓风管道进行可能导致风口速度过高, 引起高炉生产不稳定。在采用高挥发分煤和高鼓风温度时, 情况更是如此, 因为脱去挥发分和随后挥发分煤的燃烧

可能同时大量提高风口煤气量及其温度, 与某些测试值相比其结果是大大地加快了风口煤气速度和回旋区的深度(参见文献4, 图1)。如果在喷煤粉前回旋区的渗透不严重的话, 高炉生产就会改善; 相反, 如果风口风速已经很高的话, 再增高风口风速则会由于冲击应力过大而破坏回旋区的焦炭, 从而极大地影响高炉的稳定生产, 这种现象可以解释为何在一些十分适度的喷煤率的条件下许多炉子会遇到一些生产问题。如果这种现象出现, 只要加大风口表面面积(即全部风口断面积之和), 此问题就可以迎刃而解^[3]。

在结束此段前, 我们希望再次强调煤的高燃烧效率的重要性, 为此, 需要研究开发合适的喷吹设备和喷煤技术, 同时, 要求喷煤设备保持高的生产率以保证实现高的喷煤率, 最后, 还要保持稳定的高炉生产和铁水质量。

结 论

在不久的将来, 可望达到高的喷煤率 and 比现在低的多的焦比。这就需要深入系统地分析由于高喷煤率而变化了的所有高炉操作因素, 如果不能正确处理这些变化因素的话, 则会限制煤粉的喷吹量虽然这些限制因素今天尚难精确地预测出, 但是, 大致上估计焦比可以达到250kg/t铁, 最终甚至可达到200kg/t铁, 也并非毫无根据的。大量喷煤的同时, 采用更大的富氧率可能实现无氮高炉操作工艺。它所需的投资成本低, 而在工业上采用炉腰喷吹煤气工艺则在很大程度上取决于炉顶煤气的状况。

〔参考文献〕略

张定基 译自《Ironmaking Conference Proceedings》Vol.49, 1990

李克厚 校

高炉喷吹煤粉和天然气的 操作制度最佳化

С. Л. Ярошевский, В. В. Степанов 等

顿涅茨克工学院

顿涅茨克钢铁厂

顿涅茨克黑色冶金科学研究所

欧洲第一套煤粉制配和高炉喷吹煤粉的工业装置于1980年在顿涅茨克试车,目的是为了部分置换焦炭。试验装置的设计能力及应用其它措施可使焦比从1979年的592降到1988年462kg/t铁,或下降了21.7%,也就是说,焦比下降率超过了顿涅茨钢铁厂平均值2~3倍。

1987年,国外已有54座高炉喷吹煤粉50~150kg/t,使焦比下降了10~30%,而且高炉生产率获得了提高。

早已指出,在煤粉焦炭综合置换比(ΣK_3) >1.0 kg/kg,理论燃烧温度保持原有水平或有所提高的情况下,扩大喷煤粉量,保持和改善工艺制度的主要指标,即综合热补偿是能够得到保证的。

在苏联高炉操作条件下,往高炉喷吹含灰分4~10%的T和A煤的低灰分煤粉,并通过降低天然气喷入量保持或提高理论燃烧温度,这些条件是能得到保证的。

保持 $\Sigma K_3 > 1.0$ 的合理性还可以下列道理予以证明。由Рамм-Лейбович计算线图得出,只有通过提高气体还原剂的产出量、改善其利用率(图1,点2),就和通过降低碳载热体的需要量一样(点3)使焦比成比例地降低情况下,才有可能保证 γ_d 的原有水平,从而得到可能低的焦比(点1)。第一

或第二种过程占优势都将引起标准燃料用量增大(点2)或 γ_b 增大(点3),就我们的看法,这对于最佳工艺制度来说是不可取的。

为了评价不同的工艺措施的效果,在现有方法基础上,开发了用电子计算机EC-1033计算高炉冶炼主要技术经济指标的计算方法。

根据物料组成和物料热平衡对基准期进行计算得到原始数据。

对已知方法拟补充渣碱度的计算,碱度计算是根据铁水保持在原有含S量质量水平,并考虑到炉料带入硫而发生的变化。

$$\begin{aligned} (\text{CaO}) &= 50 - (\text{MgO}) - 0.25(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) \\ &\quad - 0.5(\text{MnO} + \text{FeO}) \\ &= \frac{30[\text{Si}] + 1500[\text{S}]}{V_m} + 2.75(\text{S}); \quad (1) \end{aligned}$$

$$(\text{S}) = \frac{K S_k + \Pi S_{\Pi} + S_m - 10[\text{S}]}{10V_m} \quad (2)$$

式中(CaO), (MgO), (Al_2O_3), (TiO_2), (MnO), (FeO), (S) — 渣中氧化物和元素含量(%); [Si], [S] — 铁水中元素含量(%); V_m — 基准期间渣量, t/t铁; K, Π — 分别为焦炭和煤粉用量, kg/t铁; S_k , S_{Π} — 分别为焦炭和煤粉中的含硫量(份数); S_m — 炉料中铁矿石部分的硫量(不包括炉顶尘中的硫), t/t铁。

考虑炉料透气性变化来确定炉子的生产率变化:

$$P' = P^{\circ} \cdot \frac{V_r^{\circ}}{V_r'} \cdot \left(\frac{\theta^{\circ} \cdot \gamma^{\circ} \cdot d^{\circ}}{\theta' \cdot \gamma' \cdot d'} \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中 P —炉子的生产率, %; V_r —湿炉顶煤气量, m^3/kg 铁; γ —平均气体密度, kg/m^3 ; θ —气体平均温度, K; d —炉料透气性(指数 $^{\circ}$)指基准工况, $(')$ 指试验工况)。

以采用新技术措施为特征因素的吨铁折算费用由下式确定:

$$\begin{aligned} \Pi_3 = & \Pi_k K + \Pi_{nr} V_{nr} + \Pi_n V_n \\ & + \Pi_{O_2} V_{O_2} + \Pi_a V_a - \Pi_r V_r \\ & + 100 Y \Pi / p + \phi, \end{aligned}$$

式中 Π_k , Π_n —分别为焦炭和煤粉价格, 卢布/kg; Π_{nr} , Π_a , Π_{O_2} , Π_r —分别为天然气, 鼓风, 氧气, 高炉煤气价格, 卢布/ m^3 ; K , Π —分别为吨铁焦炭和煤粉用量, kg/t 铁; V_{nr} , V_a , V_{O_2} , V_r —分别为天然气, 鼓风, 氧起, 高炉煤气用量, m^3/t 铁; $Y \Pi$ —固定常数, 卢布/t铁; P —高炉的生产率, %; ϕ —吨铁基金占用率, 卢布/t。

为了评定新工艺规范的效果, 根据上述方法进行了工艺方案计算, 考虑了工艺变量是把煤粉用量由0变化到240kg/t铁, 天然气由0变化到200 m^3/t 铁。对鼓风温度和湿度以及鼓风氧含量的变化对煤粉补偿方案未予考虑, 因为在高炉冶炼现实条件下, 这些参数值通常已接近极限值。取顿涅茨克钢铁厂施1高炉, 马格尼托哥尔斯克钢铁公司(下称马钢)施9高炉操作工艺条件作为计算的

基数。所研究的工艺条件范围能十分可靠地表征苏联炼钢生铁年产量90~93%的冶炼条件。完成对作为扩大喷煤的煤矿基地的顿巴斯楚马克夫中央选矿厂T(A^{daf}-7.5%)号精煤和库兹巴斯巴察特露天矿厂CC号原煤的计算(图1)。

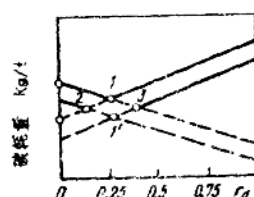


图1 燃料耗量和直接还原的关系曲线
(γ_d —直接还原度)

在通过热补偿性改变天然气耗量, 使理论燃烧温度保持在相当于高炉操作通常条件下的1950~2150 $^{\circ}C$ 范围内时, 喷吹煤粉至200kg/t铁, 焦比下降31.5~36.8%, 标准燃料比下降1.0~7.1%, 和在高炉生产率变化很小($\pm 2-5\%$)时为生铁成本(下降3.1~3.4卢布/t)大幅度下降提供了先决条件, 同时也为选择符合市场行情、炉况和必须解决现存的问题的工艺制度提供了前题(图2)。

为了说明所研究的工艺制度效果, 近期内可用在大生产条件下高炉操作实践中能够达到吨铁喷煤粉量(100kg), 而下一步远景计划则可采用由喷吹天然气热补偿的可能性所决定的极限可能煤粉喷量(表2)。

在考虑高炉生产率保持原有的水平上进

表1

用不同产地的煤粉性能

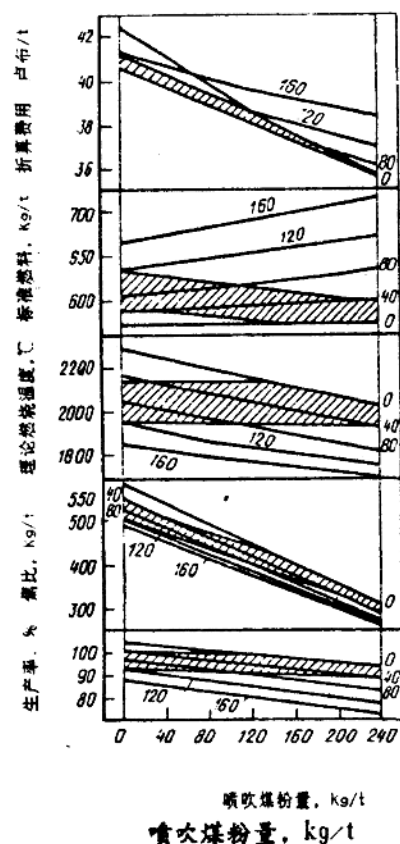
煤的牌号和产地	元素成分, %							灰分化学组分, %										煤粉价格 卢布/t
	C ^{daf}	H ^{daf}	O ^{daf}	N ^{daf}	S ^{daf}	W ^{daf}	A ^{daf}	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O			
丁(精煤) 楚马科夫中央选矿厂	84.9	3.4	0.2	1.46	1.82	0.7	7.5	21.0	26.2	42.1	2.3	1.3	1.9	1.45	2.25			43.3
CC 巴察特	30.6	4.1	6.1	1.9	0.4	1.0	5.9	3.7	37.5	51.5	1.4	0.6	0.93	0.3	2.2			34.56

※ — 可燃基

表2

喷吹煤粉的高炉操作的计算指标

指 标		顿涅茨克厂№1高炉			马钢№9高炉		
		基准期 1985年 (不喷煤)	喷煤, kg/t铁		基准期 1985年 (不喷煤)	喷煤, kg/t铁	
			100	240		100	200
焦 比	, kg/t铁	506.6	423	310.7	436	364	300
烧结矿用量	, kg/t铁	816.9	816.9	816.9	944	944	944
球团矿用量	, kg/t铁	699.5	699.5	699.5	808	808	808
标准燃料比	, kg/t铁	611.7	599.1	573.9	538.4	524	507
鼓风温度	, °C	1101	1101	1101	1185	1185	1185
鼓风中氧含量	, %	22.5	22.5	22.5	25.9	25.9	25.9
天然气用量	, m ³ /t铁	95.0	60	0	95.0	50	0
渣 量	, kg/t铁	439.0	440.7	444.2	331.0	333.5	336.6
炉缸煤气产出量	, m ³ /t铁	2148	2073	1924	1642	1562	1463
CO利用率	, η _{co}	0.346	0.361	0.388	0.458	0.483	0.516
H ₂ 利用率	, η _{H₂}	0.313	0.325	0.349	0.517	0.546	0.583
理论燃烧温度	, °C	2039	2046	2085	2069	2090	2134
煤粉的天然气补偿系数	, m ³ /kg	0	0.35	0.396	0	0.45	0.475
直接还原度	, γ _d	0.320	0.324	0.343	0.25	0.261	0.278
折算费用(喷煤粉时, 成本计算项目有变化), 卢布/t		40.7	38.7	35.8	26.9	26.2	25.3



行了计算。这里进行计算的条件是足以使其主要工艺指标保持原有水平或有所改善, 即要消除喷煤粉对工艺过程的负作用, 而且要使炉料中的焦比有相应的下降, 例如使吨铁炉缸煤气产出量减少, 还能使高炉生产率保持在原有水平上。在这种情况下, 由于还原气体和炉料的接触时间延长, 气体还原能力的利用率, 在氧化亚铁直接还原度增大不多的情况下有所提高; 标准燃料比和折算费用分别下降12.6—37.8kg/t和0.7—4.9卢布/t。尤其是把天然气用量明显降下来, 上述变化曾得到保证。煤粉的天然气补偿系数为0.35—0.475m³/kg, 这就确定了理论燃烧温度有一定的升高(吨铁喷吹100kg煤粉, 上升7—33°C)。而不考虑天然气用量下降的(直接的)计算, 煤粉焦炭置换率为0.68—0.83kg/kg。

图2. 高炉冶炼主要指标和煤粉用量的关系曲线(实线旁的数字—天然气用量, m³/t铁; 斜线区是表示理论燃烧温度最大可能值)