

高炉冶炼锰铁大喷煤量探讨

熊小星 侯兴

(新余钢铁有限责任公司 新余 338001)

摘要 为了早日实现高炉冶炼锰铁喷煤,借鉴国内外高炉喷煤的先进经验,分析了我国锰铁高炉大喷煤量的技术难点,对锰铁高炉大喷煤的可行性及相应措施进行了探讨。

关键词 锰铁高炉 喷煤 综合分析

中图分类号 TF642.3 TF673.2 文献标识码 B 文章编号 1001-1943(2001)01-0025-06

PROBE INTO LARGE INJECTION VALUE OF PULVERIZED COAL FOR SMELTING BLAST FURNACE FeMn

Xiong Xiaoxing Hou Xing

(Xinyu I & S Co., Ltd., Xinyu 338001)

Abstract To realize pulverized coal injection for smelting blast furnace FeMn, the technical difficulties are analysed on Chinese large injection value of pulverized coal for blast furnace FeMn using advanced experiences in all over the world, the feasibility and appropriate measures are also probed into.

Keywords ferromanganese blast furnace, pulverized coal injection, comprehensive analysis

1 前言

目前,世界上90%的生铁是在采用综合喷吹技术的高炉上生产的,其中喷煤高炉占80%以上。部分高炉最高月平均喷煤比已突破250 kg/t,喷煤率达到35%~40%,焦比降到270~300 kg/t。中国是高炉喷煤创始国之一,也是目前世界上高炉喷煤数量最多、应用最普遍和喷煤技术水平先进的国家之一。1999年中国原重点企业高炉平均喷煤比为114 kg/t,平均喷煤率21%,50%厂家喷煤比 ≥ 100 kg/t。原骨干企业高炉平均喷煤比为88 kg/t,平均喷煤率15%,24%厂家喷煤比 ≥ 100 kg/t。原重点企业和原骨干企业高炉喷煤比例分别达到92%和80%,全国喷煤最好指标为宝钢高炉,年平均喷煤比为

70 kg/t,平均喷煤率41%,全国高炉年喷煤总量接近1000万吨。

然而,喷煤技术在锰铁高炉未得到相应发展。据了解,国内外至今尚无锰铁高炉喷煤,法国SFPO锰铁厂3座860 m³锰铁高炉采用了等离子炼铁技术,等离子枪功率为1500 kW,使用等离子枪的风口风温可达到1700~1800℃,同时适当富氧,理论燃烧温度 $T_{理}$ 值控制在2600~2700℃,实物焦比1100~1200 kg/t。但该厂未建喷煤设施。据1998年不完全统计,中国现有锰铁高炉46座,总容积约4304 m³,总产能约90万t/a。这些锰铁高炉均无喷煤设施。阳泉钢铁厂和新钢铁合金厂曾做过一些探索,终因煤质差、风温低、富氧量不稳定、热补偿不足、操作经验缺乏等原因而未能取得预期效果。

2 锰铁高炉大喷煤的技术难点

2.1 $T_{理}$ 限制

高炉锰铁冶炼因焦比高、煤气量大、炉顶温度高、高炉上部热量过剩、 $< 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度区域小，间接还原的发展受到极大限制，有专家根据中国 10 个厂家 16 座锰铁高炉碳平衡计算数据分析，锰铁高炉内铁氧化物还原都是以直接还原方式进行的。锰氧化物除 MnO 是全部直接还原外，尚有一部分 Mn_3O_4 是直接还原的^[1]。 MnO 在炉渣中大部分以硅酸锰形态存在，因此更难还原，要求还原温度在 $1\ 400\sim 1\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。所以，高温是保证高炉内锰充分还原的首要条件。

从改善锰还原条件考虑，锰铁高炉能够接受比生铁高炉更高的 $T_{理}$ 值。法国 SFPO 锰铁厂高炉在风温 $1\ 200\sim 1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、适当富氧条件下， $T_{理}$ 值控制在 $2\ 600\sim 2\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，锰金属回收率达到 $85\%\sim 88\%$ 。日本水岛铁合金厂 398 m^3 锰铁高炉在风温 $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、富氧率 4.6% 、湿度 13 g/m^3 时， $T_{理}$ 值约 $2\ 440\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。中国新钢锰铁高炉不富氧时， $T_{理}$ 控制在 $2\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。在风温 $1\ 000\sim 1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $17\sim 23\text{ g/m}^3$ 、富氧 $2.6\%\sim 3.2\%$ 条件下， $T_{理}$ 值达到 $2\ 428\sim 2\ 460\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，高炉稳定顺行，生产指标改善。喷煤将使 $T_{理}$ 降低，从而影响锰的还原及指标的改善，故锰铁高炉喷煤将受到 $T_{理}$ 的限制。

2.2 煤质限制

从安全考虑，中国高炉喷煤大多选择无烟煤，但中国无烟煤大多灰分高，不适宜锰铁高炉喷吹，而且中国锰矿资源贫杂，平均含 Mn 仅 23.67% ，含 $\text{Mn}> 30\%$ 富锰矿仅占总储量的 6.14% ，虽然配加部分进口富锰矿（含 $\text{Mn}> 40\%$ ）后入炉品位有所提高，但因进口锰矿价格昂贵，只能少量配用，因此入炉品位仍然偏低（1999 年我国锰铁高炉平均入炉品位仅 30.78% ），导致焦炭和熔剂消耗高，渣量大（平均渣量为 $2\ 000\sim 2\ 500\text{ kg/t}$ ），炉渣带走锰损失严重，通常占入炉总锰量的 $15\%\sim 30\%$ ，中国锰铁高炉通常锰金属回收率为 $70\%\sim 85\%$ ，大大低于生铁高炉铁金属回收率（ $\geq 96\%$ ）。为了在中国特有的贫锰矿冶炼条件下采用高炉喷煤技术，必

须选择低灰分优质煤种，以减少渣量和炉渣锰损失，保持较高的锰金属回收率和高炉稳定顺行。

2.3 高炉内气体力学条件限制

从热力学、热平衡和物料平衡的观点分析，生铁高炉理论上可能达到的煤比 $\geq 450\text{ kg/t}$ 、焦比 $\leq 120\text{ kg/t}$ 、最大喷煤率可达 $70\%\sim 80\%$ ^[2]。若按现有高炉正常作业所能达到的矿焦比考虑，则最大煤比预计可达 250 kg/t ，对应焦比约 250 kg/t ，喷煤率约为 50% 。1999 年 9 月中国宝钢 1 号高炉（ $4\ 063\text{ m}^3$ ）创造了月均煤比 260.6 kg/t ，焦比 249.7 kg/t ，富氧率 3.19% ，喷煤率 51% 的最新世界记录，标志着中国高炉喷煤总体技术水平已居世界前列。由于高炉生产情况复杂，目前对于生铁高炉喷煤的极限量尚无统一和明确的认识，锰铁高炉则更缺乏喷煤的实践。根据计算，高炉冶炼锰铁在富氧率 $8\%\sim 10\%$ 、风温 $\geq 1\ 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下，煤比可达 $500\sim 700\text{ kg/t}$ ，喷煤率将达到 $40\%\sim 50\%$ ，实物焦比可降低到 $1\ 000\text{ kg/t}$ 以下，此时作为料柱骨架的焦炭体积占炉料体积比将 $\leq 40\%$ ，约相当于生铁高炉矿焦比 ≥ 5 ，喷煤率 $\geq 45\%$ 的水平，预计届时气体力学条件将成为锰铁高炉维持大喷煤量操作的最大障碍或主要限制环节。

3 锰铁高炉大喷煤量的措施

3.1 大喷煤量的热补偿

高炉喷煤后， $T_{理}$ 值将降低，一般喷煤量每增加 10 kg/t ， $T_{理}$ 降低 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。生铁高炉 $T_{理}$ 一般要求控制在 $2\ 050\sim 2\ 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。如日本高炉煤比为 $170\sim 180\text{ kg/t}$ 、法国高炉煤比为 $185\sim 195\text{ kg/t}$ 和中国宝钢高炉煤比为 $200\sim 210\text{ kg/t}$ 时， $T_{理}$ 分别控制在 $2\ 110\sim 2\ 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2\ 080\sim 2\ 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2\ 000\sim 2\ 030\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。法国 SFPO 锰铁厂将 $T_{理}$ 控制在 $2\ 600\sim 2\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。中国新钢锰铁高炉不喷煤时合理 $T_{理}$ 为 $2\ 400\sim 2\ 460\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。高炉大喷煤时，为了保持较高的煤焦置换比和炉缸传热的需要，必须对 $T_{理}$ 的降低进行热补偿。经常采用的热补偿方法是高风温和富氧。

3.1.1 高风温

一般每 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 风温可提高 $T_{理}$ $60\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。国内外大喷煤量高炉风温大都保持在 $1\ 150\sim$

1 250 ℃。如中国宝钢高炉 1999 年平均风温为 1 241 ℃。和富氧相比, 高温又是大喷煤最经济便捷的热补偿方法和主要手段。对中国大多数无富氧条件的高炉而言, 要大喷煤首先要抓提高风温的措施。近十多年来, 中国在高风温热风炉的设计、设备制造和热风炉耐火材料制造等方面均取得了长足进步, 热风炉煤气和空气双预热、热风炉自身预热或外置燃烧器、冷热风均匀分配、新型陶瓷燃烧器等引进或中国自行开发的热风炉先进技术得到推广普及并已取得显著效果。中国已能够在仅利用低热值高炉煤气条件下使风温达到 1 200 ℃ 以上。现在, 中国已基本掌握了高风温技术, 完全有能力满足大、中、小各种

高炉大喷煤对高温的要求。1999 年中国锰铁高炉平均风温仅 1 023 ℃, 应尽快在技术改造中应用高温技术, 使入炉风温达到 1 250 ℃ 以上。

3.1.2 富氧

富氧也是大喷煤的重要热补偿手段, 每富氧 1%, 可提高 $T_{理}$ 40 ~ 50 ℃, 可增加喷煤比 12 ~ 14 kg/t。荷兰艾莫伊登厂提出, 当喷煤率达到 50% 时, 富氧率应 > 10%, 只有炉顶煤气温度 < 100 ℃, $T_{理}$ > 2 350 ℃ 时, 富氧率才受到限制。从经济效益考虑, 生铁高炉目前趋势是以较低的富氧率达到 200 kg/t 以上的喷煤量, 见表 1。

表 1 1999 年 1 ~ 10 月中国宝钢 1 号高炉低富氧大喷煤生产指标

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
利用系数 (t/m ³ d)	2.328	2.289	2.212	2.265	2.302	2.169	2.133	2.336	2.201	2.334
喷煤比 (kg/t)	233.8	230.3	223.9	252.4	238.8	235.2	228.3	235.2	260.6	240.7
焦比 (kg/t)	269.7	270.4	271.7	260.2	269.6	266.3	273.4	262.2	249.7	260.2
燃料比 (kg/t)	503.5	500.7	500.7	512.5	508.3	501.5	501.6	497.4	510.3	500.9
风温/℃	1 236	1 244	1 235	1 245	1 248	1 248	1 242	1 245	1 251	1 254
富氧率/%	2.32	2.46	2.24	2.43	2.37	2.46	2.57	2.70	3.19	2.79

高炉富氧能降低炉顶温度, 加速高炉下部热交换, 使热量集中于炉缸, 改变锰铁高炉极不合理的上部热量过剩、下部热量不足的热量分布状况, 从而保证锰还原所需的温度和热量, 富氧鼓风冶炼高炉锰铁已被证明卓有成效。国外发达国家锰铁高炉都采用了富氧鼓风技术。1982 年和 1987 年, 中国新钢 255 m³ 锰铁高炉和马钢三铁厂 80 m³ 锰铁高炉先后利用炼钢余氧 (富氧率分别为 2% ~ 5% 和 1% ~ 4%) 冶炼锰铁获得成功。新钢锰铁高炉在不喷煤、富氧率达 5% 时, 尽管不采取任何热补偿措施, 高炉仍稳定顺行, 操作上未发生任何困难。大喷煤时, 为补偿 $T_{理}$ 所需的富氧率可按维持 $T_{理}$ 在 2 500 ~ 2 700 ℃ 计算出来。以中国新钢锰铁高炉为例, 根据风口前 $T_{理}$ 计算公式^[3]:

$$T_{理} = 1 570 + 0.808 T_{风} - 5.85 W_{湿} - 4.4 W_{油}$$

$$+ 4.37 V_{氧} - 2.5 W_{煤}$$

式中:

$T_{风}$ ——热风温度, ℃

$W_{湿}$ ——鼓风湿度 g/m³

$W_{油}$ 、 $W_{煤}$ ——1 000 m³ 风中喷油、喷煤量, kg/km³

$V_{氧}$ ——1 000 m³ 风中富氧量 m³/km³

设定煤比 7 000 kg/t, 焦比 700 kg/t, $T_{理}$ 2 500 ~ 2 700 ℃, 风温 1 250 ℃, 新余地区平均大气湿度 14 g/m³。计算表明, 所需富氧率为 7.83% ~ 11.43%, 见表 2, 这与中国首钢高炉风温、富氧率、喷煤率和 $T_{理}$ 之间的关系比较接近, 见图 1。

中国是煤炭资源大国, 近几年电力已开始出现富余, 预计电价将有较大下调空间。采用富氧大喷煤技术以煤代焦, 以电换焦无疑既符合中国国情, 可改善能源消费结构和净化环境, 又能带

表 2 中国新钢锰铁高炉煤比 700kg/t, 喷煤率 50% 所需富氧率计算

$T_{\text{风}}$ /°C	$T_{\text{风}}$ /°C	$W_{\text{煤}}$ /(g/m ³)	$V_{\text{煤}}$ /(m ³ /km ³)	$O_{\text{煤}}$ /(m ³ /kgc)	$V_{\text{煤}}$ /(m ³ /T)	$W_{\text{煤}}$ /(kg/km ³)	煤氧比 /(kg/m ³)	富氧 /%
2 500	1 250	14.0	110.78	3.24	2 722	192.89	1.74	7.83
2 600	1 250	14.0	140.93	3.04	2 554	205.58	1.46	9.70
2 700	1 250	14.0	170.34	2.88	2 420	216.99	1.27	11.43

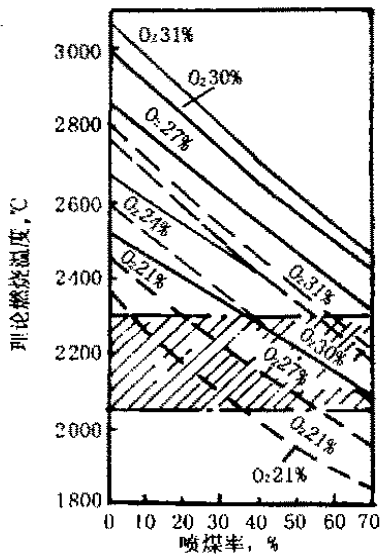


图 1 理论燃烧温度与喷煤率、富氧率及风温关系
(注:实线——风温 1 200 °C;虚线——风温 1 026 °C)

来巨大的社会效益和经济效益。据推算若煤焦差价为 250 元/t, 每吨锰铁喷煤 500~700 kg/t, 则可降低成本 120~150 元/t, 3~5 年即可收回富氧喷煤设施投资。

3.2 关于喷吹煤种和煤质的选择

大喷煤首先要根据厂情力争喷低灰分煤, 无烟煤或烟煤和无烟煤的混合煤, 这是实现大喷煤的基本保证。无论生铁高炉或锰铁高炉都是如此。中国高炉长期喷吹无烟煤, 其优点是含碳高, 挥发分低, 可达到较高置换比, 安全问题易解决。缺点是不易燃烧和气化, 燃烧率较低, 煤质较硬, 制粉能耗高。中国优质无烟煤资源和产量均有限, 产地少而集中, 运输困难, 大多数资源灰分高, 不利于推广应用高炉喷煤。国外高炉大都喷烟煤。其优点是挥发分高, 燃点低, 燃烧率高, 比一般无烟煤质软易磨, 制粉能耗低。烟煤气化分解产生的 H₂ 多, 有利于改善高炉还原和提高煤气热值。中国烟煤储量和产量占煤炭资源总量的

80%, 矿点遍布全国大多数省区, 有利于企业就近取煤。缺点是含碳低, 影响煤焦置换比, 安全措施要求严格。经过国家“八五”攻关, 中国高炉喷吹烟煤技术已顺利过关。目前, 中国鞍钢、宝钢、酒钢、石钢、苏钢、马钢、新疆八钢等厂高炉都能喷吹烟煤。1999 年, 新疆八钢高炉喷吹烟煤达到 136 kg/t, 喷煤比居全国第二, 创全国 300 m³ 高炉喷煤的先进水平, 已于今年年初通过了国内冶金专家的技术鉴定, 中国已有了大、中、小高炉安全喷吹烟煤的一整套成功经验, 喷吹烟煤成功使煤种选择余地扩大, 长期制约中国高炉喷煤技术发展的煤炭供应和煤质问题有望彻底解决。根据中国锰铁高炉入炉品位低、渣量大的特殊情况, 富氧喷煤时, 应按喷煤置换焦炭后渣量比全焦作业时不增加的原则考虑。因此, 喷吹用煤灰分最大值要求应比本企业焦炭灰分降低 2~3 个百分点^[1]。

3.3 关于大喷煤后的高炉操作

高炉实现大喷煤主要取决于两个条件: ①喷煤设备的制粉能力和喷吹能力; ②高炉接受能力。通常后者是制约综合喷煤能力的限制环节。要保证高炉冶炼锰铁大喷煤量条件下的稳定运行, 必须解决好如下问题:

3.3.1 精料

精料是高炉大喷煤的基础。国内外喷煤率高、喷煤效果好的高炉无一例外都是在精料条件下实现的。中国锰铁高炉主要原料是国内贫锰矿。矿石处理设施简陋, 入炉品位低, 质量不稳定。要合理利用进口富锰矿来弥补国内锰矿数量的不足, 稳定矿石供应, 提高入炉品位。要优先考虑上混匀料场并充分发挥现有料场和混匀手段的作用。要改进烧结矿质量, 加强烧结矿筛分, 减少粉末, 提高烧结矿强度, 改善烧结矿还原性和高温性能。要减少入炉矿种和变料次数, 大力提高熟料比。要格外重视提高焦炭质量, 通过

优质优价采购优质炼焦煤,改进配煤和炼焦工艺等办法千方百计改善焦炭质量,提高焦炭高温强度,减少大喷煤后炉内焦炭的破碎率。

3.3.2 控制适宜的 $T_{理}$ 主要是控制氧和煤粉的合理比例。德国高炉每个风口 O/C 原子数比要求 > 2.1 , 荷兰艾莫伊登高炉则要求该值 $> 1.54^{[5]}$ 。中国有专家认为适宜的煤氧比约为 $0.8 \sim 1.0 \text{ kg/m}^3^{[6]}$ 。锰铁高炉适宜的煤氧比可能更高。有条件的高炉锰铁厂家可为高炉配备专用制氧机,并应用已开发成功的氧煤燃烧系统提高富氧效果,同时要在热风炉技术改造中积极应用高温技术,新建锰铁高炉要考虑建造 1250°C 以上的高温热风炉。

3.3.3 提高喷煤设备的可靠性 喷煤率达到 30% 甚至更高水平后,喷煤量的波动或中断必然引起炉况的波动甚至失常。选择可靠性高、能力充足的喷煤设备或进行技术改造,提高喷煤系统自动化水平,完善计算和监测仪表是十分必要的。

3.3.4 保持炉内合理的煤气流分布 大喷煤使高炉中心煤气流增强,在对炉料分布和操作制度进行适当调整后,有利于形成中心发展型煤气流分布(即中国锰铁高炉所追求的双峰漏斗型煤气流分布),可改善高炉内锰还原条件和煤气能量利用,维持高炉顺利,延长高炉寿命。

3.4 中国新钢锰铁高炉富氧大喷煤后生产指标预测

据报道,日本水岛铁合金厂 398 m^3 锰铁高炉以 RiSt 线图为基础,将操作线图移植到锰铁高炉,对其操作进行分析获得成功^[7]。受其启发,我们将中国新钢 331 m^3 锰铁高炉近期生产数据整理绘成锰铁高炉操作线图,据此分析新钢锰铁高炉富氧大喷煤后可能达到的生产指标,见图 2。

图中,基准条件:风温 979°C ,焦比 1785 kg/t ,炉顶温度 450°C ,煤气量 $6919 \text{ m}^3/\text{t}$,日产量 150 t/d 。

设定条件:风温 1250°C ,富氧率 10%,喷煤比 650 kg/t ,煤焦置换比 0.8。

根据操作线图分析和新钢富氧生产实践经验进行指标估算:

富氧 10% 可增产:

$$10\% \text{ O}_2 \times 6.32\% / \% \text{ O}_2 = 63.2\%$$

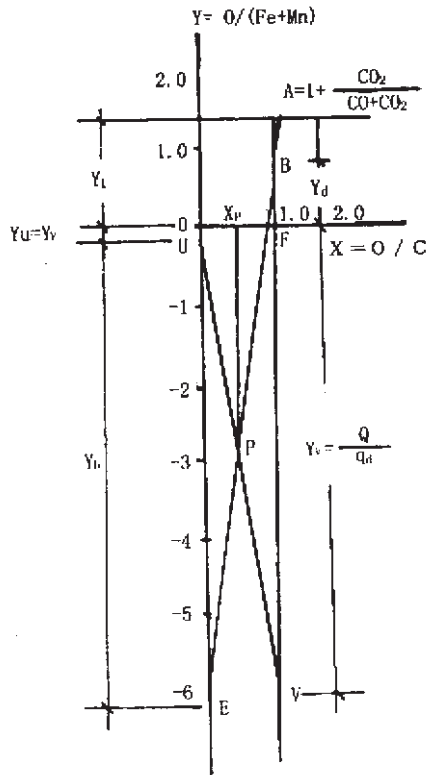


图 2 2 号锰铁高炉操作线图

富氧 10%, 风温增加 271°C 可节焦:

$$10\% \text{ O}_2 \times 2.2\% / \% \text{ O}_2 + 271 / 100 \times 3.6\% = 31.76\%$$

富氧后顶温降低:

$$10\% \text{ O}_2 \times 16^\circ\text{C} / \% \text{ O}_2 = 31.76^\circ\text{C}$$

即预计产量可达到 244.8 t/d , 焦比降低到 700 kg/t , 顶温降低到 290°C , 煤气量减少到 $3670 \text{ m}^3/\text{t}$, 约减少 47%, 煤气能量利用显著改善,对改善锰还原有利。富氧喷煤还使煤气中气体还原剂 $\text{CO} + \text{H}_2$ 浓度大大增加, $<700^\circ\text{C}$ 温度区域扩大,间接还原发展, FeO 直接还原度降低到 $0.8 \sim 0.9$ (据中国首钢数据,每增加 10% 喷煤率,直接还原度约降低 2%), 部分 Fe_2O_3 也开始进行间接还原,导致焦比大幅度降低、冶炼强度迅速提高、产量大大增加。

4 结 语

4.1 锰铁高炉大喷煤不但经济上有利,而且技术上可行。锰铁高炉积极运用这一成功技术,必将进一步丰富高炉冶炼铁合金的理论和实践,达

到合理利用资源、改善技术经济指标和经济效益的目的。

4.2 目前条件下, 锰铁高炉实现风温 $1\ 250\ ^\circ\text{C}$, 富氧 $8\% \sim 10\%$, 喷煤 $500 \sim 700\ \text{kg/t}$, 其工艺是可行的, 经济上也是合理的。

4.3 锰铁高炉大喷煤后, 操作难度加大。但通过采取精料、控制适当 $T_{\text{理}}$ 、提高喷煤设备的可靠性、保持合理煤气流分布、提高员工素质等措施, 这一问题是能够解决的。

4.4 煤质的选择和焦炭质量是锰铁高炉大喷煤能否取得成效的关键, 必须予以高度重视。

参 考 文 献

- 1 邓守强. 改善锰铁高炉能量利用的途径. 炼铁, 1993 (6): 21 ~ 25
 - 2 曲惠敏等. 关于宝钢 1 号高炉喷煤设计的几点意见. 炼铁, 1995(3): 9 ~ 12
 - 3 叶才彦. 高炉喷吹煤粉的适宜操作范围. 钢铁, 1982 (4): 6 ~ 10
 - 4 顾飞等. 高炉喷吹用煤的评价指标. 炼铁, 1999(5): 50 ~ 52
 - 5 杜鹤桂. 德国、荷兰高炉喷煤技术的发展. 炼铁, 1993 (4): 44 ~ 49
 - 6 邓守强. 高炉炼铁技术. 冶金工业出版社, 1990. 280 页
 - 7 刘传鑫译. RiST 线图在锰铁竖炉上的应用(日). 铁合金, 1988(3)
- 1 邓守强. 改善锰铁高炉能量利用的途径. 炼铁, 1993