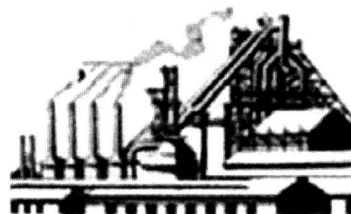


研究报告

铁矿粉

熔态还原冶炼的 新流程



许志宏¹, 王立新¹, 杨章远¹, 谢裕生¹, 胥昌第², 招冀²

(1. 中国科学院化工冶金研究所, 100080 北京; 2. 原冶金工业部, 100711 北京)

[摘要] 提出了一种直接用粉矿和煤的熔态还原炼铁新流程, 其最大特点是消除污染产生源。为解决过去流化床铁矿粉还原技术中的粘结问题, 提出了非等温渗碳的流化移动床的新方法。建议放弃一些工业化国家在熔态还原中发展二次燃烧率的指导思想, 代之以系统的能量最佳利用原理。提出直接采用粉矿、综合利用尾气和利用高炉下部还原机制的具体建议, 用以实现冶金与化工系统的集成, 保证系统在技术和经济上成功。为了适应经济全球化的形势发展, 建议以自力更生和引进国外技术与资金相结合的方式, 促进熔态还原和其他冶金新技术在我国早日成功。

[关键词] 熔态还原; 粉末; 流化移动床; 环境保护; 技术改造

1 引言

生态环境保护和市场竞争等因素是新的技术产生和发展的推动力。同时, 已有的工业技术必然要受到社会环境要求不断提高的制约, 这是我们发展新技术时首要考虑的问题。最近, 美国将 GNP 指数中加入了环境代价, 计算了较 GNP 更为科学的 NEW 指数^[1]。

传统钢铁生产的主要污染物是来自烧结、炼焦、热风炉等工序, 包括二氧化硫、氮的氧化物和

温室气体, 炼焦过程的污水以及烧结粉尘等影响环境质量的物质, 而仅仅通过现有工艺的技术改造, 对于很多中小型企业, 很难彻底解决问题。最好的方法乃是采用新的工艺流程, 在过程内消除污染, 降低能耗, 提高系统的总体效率。

奥钢联开发的熔态还原法 COREX 工业装置, 省去了炼焦、热风等工序, 大大减少了污染物的排放。据德国技术监查协会 1990 年发表的数据^[2], COREX 方法较高炉可以减少 90% 左右的污染排放 (表 1)。

表 1 COREX 工艺与高炉流程吨铁污染排放量比较

Table 1 Comparison of exhaust between COREX and blast furnace

	废气/g			CO ₂ 排放量/kg	废水/g			
	SO ₂	NO _x	烟尘		酚	硫化物	氰	氨
现有高炉指标	1410	1220	1090	1900	100	180	20	900
90年代高炉流程目标	1000	310	810	1700	60	120	15	600
COREX 工艺	53	130	114	1450	0.04	0.01	1	60
COREX 工艺比现有高炉减少污染/%	96.2	89.3	89.5	23.7	99.9	99.99	95	93

在充分考察了世界各国的研究经验和成果的基础上, 有人提出了一种能直接处理粉矿的熔态还原工艺^[2,3], 可以很好地解决上述问题。新设计的多级流化移动床预还原反应器, 在床内有温差梯度,

可以解决精矿粉在预还原过程中的粘结问题, 筛去粉末的煤可直接加入熔态还原炉内, 在炉内依次进行气化和铁熔化还原过程。概括而言, 该过程有如下特点^[3]:

[收稿日期] 1999-07-19

[作者简介] 许志宏 (1930-), 辽宁铁岭市人, 中国科学院化工冶金研究所研究员

可直接加入粉矿，省去了烧结单元；

由于可直接利用块煤，不但省去了炼焦过程，还省去了煤粉磨制单元和运输单元；

向熔炼炉内吹入氧气，而不是空气，使尾气直接成为化工原料。

因为没有了烧结、炼焦和热风炉，使得洁净炼铁有了可能，也可节省大量的投资和运行费用，提高经济效益。

2 流程概要

COREX 工艺采用了近似于高炉的原理，唯一的不同在于它利用了两个反应器来代替高炉，用煤代替了焦炭；同时采用了低二次燃烧率和高预还原率，所以获得了成功。

表 2 高炉 COREX 和 DIOS 等技术的生铁质量^[5]

Table 2 The quality of pig iron of blast furnace, COREX and DIOS

技术	高炉	COREX	DIOS
还原剂	焦炭	块煤	块煤
矿石	块矿	块矿	粉矿
出炉温度/℃	1450~1550	1450~1550	1500
C/%	4.0~5.0	4.0~5.0	4.0
Si/%	0.2~0.8	0.2~0.8	0.05
S/%	0.01~0.05	0.01~0.05	0.15~0.25
N/ 10^{-6}	60	20	<150

COREX 以外的很多流程，多采用了炉内二次燃烧的路线。例如日本的 DIOS 方法，澳大利亚的 Hismelt 方法等；DIOS 已经达到 300 t/炉的规模，采用了高二次燃烧率和低预还原率。表 2 比较了 DIOS 与高炉和 COREX 工艺在生铁质量方面的不同。

DIOS、Hismelt 流程的主要缺点在于炉内二次燃烧，初始目的是在炉内充分利用炭的热量，大幅度降低煤耗，但是实际上未能做到，渣中悬浮有未燃尽的煤粉。二次燃烧导致渣氧化铁浓度较高炉增加数倍，从而造成渣的脱硫能力下降，侵蚀炉衬速度加快。它的最大优点是完全使用粉矿，从而可以降低成本，并且 DIOS 已经做到 300 t/炉的规模。

COREX 则有两个问题亟待解决，一是如何处理铁矿粉与铁精矿，另一个是如何最大限度地利用高浓度 CO+H₂ 的尾气。

基于以上原因，我们建议的流程（图 1）采用了：粉矿的路线，放弃了在熔炼炉内二次燃烧利用能量的原则，因为二次燃烧导致渣中氧化铁增高数倍，造成脱硫能力下降，炉衬侵蚀加快，所以我们用整个过程能量最佳利用原则来重新考虑问题；在熔化还原炉内，遵循高炉炼铁原理，实现稳定的生产。

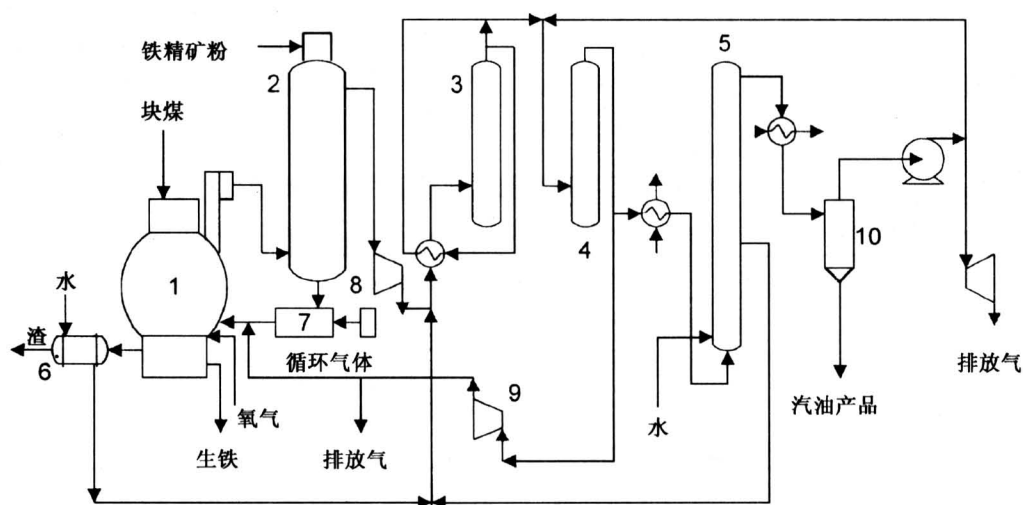


图 1 氧煤制铁和制油的联合流程示意图

Fig.1 Schematic drawing of integrated pig iron and gasoline process

1—熔态还原炉；2—流化移动床预还原反应器；3—水煤气转化器；4—脱 CO₂ 塔；5—汽油二段合成塔；6—炉渣换热器；7—螺旋送料器；8—压缩机；9—膨胀机；10—油气分离器

2.1 粉矿预还原

采用非等温多级流化移动床反应器 (MFM-BR, 如图2所示), 对铁矿粉进行预还原, 粉矿从反应器上部加入, 并以可控速度, 从倾斜的多孔塔板上依次流下。从塔板开孔上升的还原气体可以帮助矿粉从上一级塔板流向下一级。在该反应器中将进行三个反应:

在反应器的上部进行气固相热交换, 将煤气的显热传递给冷矿粉;

在反应器中部温度位于 $500 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 的区间内发生 CO 和 SiO 的歧化分解反应, 将超细炭颗粒沉积在铁矿粉的表面, 从而可避免在后续还原过程中的粘结问题;

在反应器的下部主要进行间接还原过程。

每个颗粒在经过 MFMBR 反应器后, 大概有五个层次: 由外至内分别为炭、 Fe_3C 、铁、 FeO 和 Fe_2O_3 层。预还原率达到 $80\% \sim 85\%$ 左右时, 即可认为是完成了预还原过程。

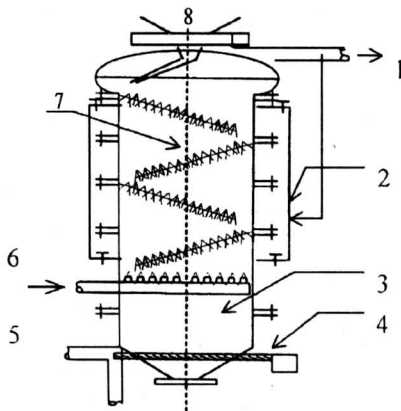


图2 多级流化移动床预还原反应器示意图

ig.2 Schematic drawing of multi-layer fluidized moving bed pre-reduction reactor

1—气体出口; 2—冷却系统; 3—储料仓; 4—螺旋出料口;
5—载气; 6—高温煤气入口; 7—倾斜塔板; 8—精矿粉加料口

2.2 熔化还原

利用一个螺旋推料器将经过预热和预还原的矿粉推入熔炼气化炉。在上部入口处, 使用循环气将物料吹入炉内, 与之同时喷入少量氧, 表面有炭粉覆盖的还原矿粉喷入炉后, 与氧反应发生闪速熔化。

在其下部炭层, 喷入氧气的主流。为了调整火焰温度, 延长氧的吹入深度并扩大反应区域, 使用了两个偏心对吹的氧气喷枪。必要时可以喷入部分

煤粉、返回气和粉状渣料。

块煤可以直接加入熔炼气化炉内, 并在炉内形成了炭固定床, 喷入的矿粉熔化后的液滴从赤热的炭层中滴落并进行终还原, 在穿过静渣层的过程中进行脱硫反应。炉内所产生的过热 $\text{CO} + \text{CO}_2$ 气体上升穿过煤层, 其中的大部分 CO_2 被还原。出口气体的温度控制在 1000°C 以上以使从煤中逸出的挥发分得以全部分解。

最后, 利用在出口气体中喷入少量焦粉或矿粉, 进入旋风器, 将预还原炉进口气体的温度控制在 $850 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 范围内, 以便预还原反应器能够使用并顺行。

2.3 尾气综合利用

由预还原反应器排出的气体质量分数约为 CO 65%, H_2 10%, $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 25%。对于某些化工和水煤气变换反应过程是很有价值的原料, 如合成汽油、合成二甲醚、羰基化合成醋酸及合成甲醇等, 也可以用来生产海绵铁, 或者作为联合循环发电的清洁燃料。在什么地方采用什么流程取决于经济上的权衡。

在此, 我们在概念设计中, 以合成汽油作为一个示例。进入汽油合成单元以前, 首先需要将气体压缩至 2.53MPa , 然后和水煤气进行变换反应及气体清洗, 将混合气中的 H_2/CO 比调至 2 左右。最后, 气体在两级汽油合成反应器中反应生成高辛烷值 ($90 \sim 93$) 汽油。少量循环气有三个用途: 一部分用于将还原铁矿粉吹入熔炼炉; 一部分用作预还原炉入口气体的调温; 有一小部分气体用作扫气, 作为冶金工厂加热使用。 2.53MPa 的气体在降低压力的过程中应通过膨胀机回收能量。

汽油合成技术已经开发成功, 在南非 SASOL 流程已运转多年, 我国山西煤化所也已进行了 3000h 的原型炉实验, 取得了可以工业化的数据。

在水煤气变换反应阶段, 需要大量的水蒸气, 其中大部分可以从汽油合成反应器获得, 而另一少部分可从高温过程中获得。

3 经济评估

一个流程要能成立, 它必须满足三个条件: 即环保好, 成本低, 市场需要。熔态还原流程从环保角度来看, 可以说是过关的。生铁、钢材和汽油从我国的建设看, 市场也是很大的, 特别是中西部的开发, 更为我们提供众多的机会。目前, 在我国最

大的问题是成本能否过关。在这里, 根据我国的实际情况, 对熔态还原技术在我国的工业化问题, 提出如下的具体评估。

对建议的新流程和 COREX 工艺, 以在上海和

山西建厂为例, 进行了经济粗略评估, 结果见表 3。其中, 除了煤炭、电和氧气的价格, 山西与上海不同外, 其他价格数据相同。新流程的各项工艺参数采用了 COREX 工艺的相应数据。

表 3 粉矿熔态还原炼铁技术的成本 (元/吨铁) 粗估*

Table 3 The cost estimation for smelting reduction of iron ore powder

项 目	单 价		新 流 程			COREX	
	上 海	山 西	单 耗	上 海	山 西	单 耗	上 海
原燃料							
球团/t	430.0	430.0				0.76	326.8
块矿/t	320.0	320.0				0.76	243.2
粉矿/t	250.0	250.0	1.50	375.0	375.0		
煤/t	330.0	140.0	1.04	343.2	145.6	1.04	343.2
石灰/kg	0.20	0.20	200	40.0	40.0	200	40.0
白云石/kg	0.10	0.10	110	11.0	11.0	110	11.0
石英/kg	0.25	0.25	10	2.5	2.5	10	2.5
其他							
外购燃料及动力							
电/kWh	0.52	0.30	60	31.2	18.0	60	31.2
氧气/m ³	0.55	0.33	565	310.8	186.45	565	310.8
氮气/m ³	0.40	0.40	85	34.0	34.0	85	34.0
压缩空气/m ³	0.20		20	4.0	4.0	20	4.0
蒸气/kg	0.05		50	2.5	2.5	50	2.5
循环气/m ³	0.20		50	10.0	10.0	50	10.0
新水/m ³	0.50		1.75	0.9	0.9	1.75	0.9
减去回收							
煤气/Gj	22		-11.3	-248.6	-248.6	-11.3	-246.6
水渣				-20	-20		-20
工资				4.0	4.0		4.0
制造费							
折旧				116.7	116.7		116.7
修理				58.3	58.3		58.3
其他				54.0	54.0		54.0
制造成本				1054.5	719.35		1324.5
财务费用				157.4	157.4		157.4
合计				1286.9	951.75		1481.9

* 本表大部分参考了北京钢铁设计研究总院的数据

4 几个关键问题的分析

到了 21 世纪, 我们会面临来自先进工业国家的竞争, 例如采用熔态还原代替部分高炉; 采用近终型连铸方法代替常规的连铸; 采用计算机控制和管理一体化的高效率生产方式, 代替落后的生产和管理方式等。

解决环保问题, 将是 21 世纪冶金工业面临的

重大课题。熔态还原方法, 大大简化了生产流程, 可以消除现有系统污染的 90% 以上。所以预期在下个世纪, 它必将克服当前存在的各种困难, 逐步走向成熟, 走向工业化生产。

当前在我国的具体条件下, 熔态还原受到很多冶金界朋友的关注。主要的问题是在有些地方它的生产成本偏高。为什么在南非生产成本比高炉法低 25%, 而在我国上海, 计算成本比高炉要高 20%

~30%?

关于成本的构成有5个方面的因素在起作用：使用粉矿和使用烧结矿与团矿，每吨生铁成本大约要相差170~270元；如果所产生的煤气能用于化工或采用高技术发电，大约可以降低成本150~250元；如果采用最先进的制氧机和合适的氧价格（实为电价，例如每 $\text{kw}\cdot\text{h}$ 0.3元左右），则每吨生铁的氧成本可较在上海低130~150元左右；焦炭的价格目前在我国较世界要低很多（300~500元/吨焦炭），主要是我国炼焦生产能力大于实际需要，所以价格较低，随着全球经济一体化的进展，以及污染严重炼焦厂的关闭，焦炭价格将比煤炭价格提高得快些；熔态还原的设备重量要比高炉、烧结和炼焦小得多，但它是新技术，技术开发费用很高，也就是所有开发过程的费用都需要由生产装置来分担，而高炉是现有的老设备，分担的投资利息的份额要少些。

要突破上述成本问题的制约，需要首先突破几个思想上的认识问题：熔态还原必须突破粉矿关，这样成本至少能下降170~270元/吨生铁；要合理利用尾气，这样至少可以回收150~250元/吨生铁；要采用最新的制氧机，争取合理的电价；要从过程的开发作起，争取能拿到全部或部分的知识产权。

在上述一般的计算和分析中，都未考虑到高炉系统要使环保完全达到现代化标准所需要的附加投资。如果做到上述几点，再考虑到高炉系统必须增加环保投资，熔态还原流程到21世纪可能是有生命力的。

5 合理利用外资的问题

经济全球化将是21世纪的一个发展主流。为了加快我国熔态还原流程开发的速度和节省国家投资，建议充分利用我国的优势，积极开展与国外的合作。国际合作的主要方针应该是：

(1) 明确采用粉矿进行熔态还原的方针，可以对话的国家有奥钢联的COREX法，日本的DIOS法，澳大利亚的Hismelt法；

(2) 要求对方进行技术风险投资，在我国首先进行工业化，除了对方的技术外，我们也应积极开发和试用我们自己的新技术，实际上是我们让出部分生铁市场，学到和加快发展我国自己技术的方法；

(3) 我们在“十五”计划中，一方面制定自己的科研方案，稳定自己的科研队伍，一方面积极与国外洽谈合资改造或建设第一个以铁矿粉为原料的生产工厂；

(4) 在合作开发设计中，也要同时考虑尾气利用的问题，最好能与选定的合作伙伴共同组成专家组，在合作中，各自的知识产权都应加以保护。

我国钢铁工业要在技术上完全改观，任务是非常艰巨的。国家无力投入，钢厂本身难于有很大的举措，也就是说用旧模式改造已不可能。我们认为应该利用经济全球化的趋势，利用我国市场的巨大潜力，吸收外国的先进技术，到我国来投资，实现工业化。在需要改造的一些厂中，选出一两个典型试点。熔态还原是如此，近终型连铸也是如此。充分利用国外的开发新技术风险投资和科学的技术评估机制，引进新技术，对改造可以起到示范的推动作用。

很明显，在21世纪，国际上钢铁工业两头缩短的趋势非常明显，即前头的炼焦、烧结、炼铁三合一，解决了污染和能耗高的大问题；后面近终型连铸切去钢材成材的漫长的过程。这样，钢铁厂的严重污染、高能耗、重投资等问题都将会有根本地变化。我们要想在21世纪变为世界上的钢铁强国，必须探索自强之路。

6 结语

进入21世纪，中国的许多高炉正面临着环境保护的压力，有些中小高炉需要停产；有些需要加大环保的投入；有些应改建为熔态还原流程，直接使用粉矿，采用冶金流程与化工流程相联合。

可以预见，随着流化床预还原反应器技术的突破，以及熔态还原炉技术的改进，直接基于粉矿和煤的熔态还原炼铁技术将会很快进入实用化阶段，并且有着广阔的应用前景，这对环境保护和资源的有效利用都非常重要。

经济全球化将带给我们很多压力和挑战，但同时也会带给我们机遇。我们可以利用我国的市场优势，吸引国外风险投资和先进技术，在我国开发最具有竞争能力的新技术，用以改造我国的钢铁工业，使之成为世界上最先进的工业。

参考文献

- [1] 保罗·萨缪尔森，威廉·诺德豪斯. 经济学（上册），

- 中国发展出版社, 第 12 版. 5
- [2] 李业民. 计算机辅助熔态还原流程开发研究 [D], 中国科学院化工冶金研究所, 1997
- [3] Li Yemin, Xu Zhihong. Smelting reduction process for iron and chemicals, IUPAC CHEMRAWN IX proceeding [C], 295~301, September, 1996, International Union of Pure and Applied Chemistry, The Korean Chemical Society
- [4] 王立新, 许志宏, 谢裕生, 等. 洁净炼铁新技术的探讨 [J], 科技导报, 1999, (4): 30~32
- [5] Schenk J L, Keplinger W L, Wallner F, et al. FINEX - Ein neues verfahren zur herstellung von roheisen aus kohle und feinerz, Berg. - Huetttenmaenn. Monatsh., 1998, 143 (5): 158~165

A New Process for Fine Iron Ore Direct Reduction

Discussion on the technical improvement of iron making industry in China

Xu Zhihong¹, Wang Lixin¹, Yang Zhangyuan¹, Xie Yusheng¹, Xu Changdi², Zhao Ji²

(1. *Institute of Chemical Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, 100080 Beijing;*

2. *Former Chinese National Ministry of Metallurgy, 100711 Beijing*)

[Abstract] In this paper a new smelting process using fine iron ore powder and coal is proposed. The peculiarity is to eliminate the pollution in process improvement. In order to solve the sticking problem in conventional fluidized bed reactor, here we proposed a new technic by using non-isothermal fluidized moving bed prereduction reactor. Further, we are using the maximum utilization of energy principle instead of the second combustion principle. Three measures in our proposed process are: using fine iron ore as input; using the waste gas as chemical synthesis; using the reduction mechanism of lower part of blast furnace. With the progress of globalization of economy and technics, we proposed to try the possibility of using the venture capital to help the reformation of iron industry in china.

[Key words] smelting reduction; powder; fluidized moving bed; environment protection; technical reformation

中国工程院副院长王淀佐院士任 国家科学技术奖励委员会副主任委员

[本刊讯] 经国务院批准, 国家科学技术奖励委员会正式组成。中国工程院副院长王淀佐院士任该委员会副主任委员。

国家科学技术奖励委员会共由 19 人组成。朱丽兰任主任委员, 陈宜瑜、王淀佐任副主任委员,

惠永正任秘书长, 委员有 (按姓氏笔画为序): 王万宾、韦钰、吕新奎、孙枢、师昌绪、陈达植、杨乐、张佑才、范云六、陆燕荪、周干峙、赵忠贤、栾恩杰、侯云德、梁应辰。

(笛)