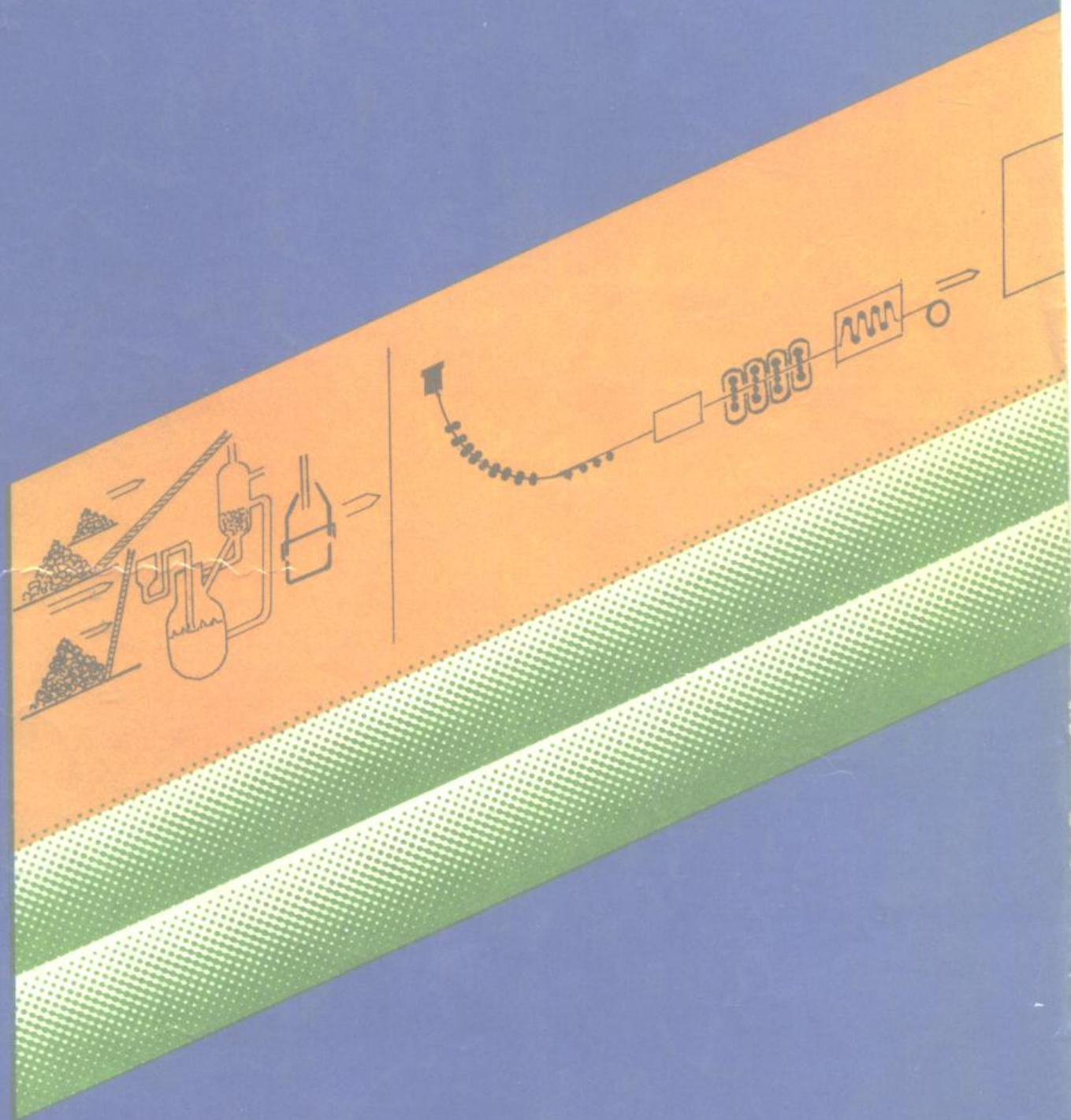


钢铁冶炼新工艺

杜挺 邓开文 等著



北京大学出版社

76.2083
264

钢铁冶炼新工艺

杜挺 邓开文 等著

26417/30

北京大学出版社

新登字(京)159号

图书在版编目(CIP)数据

钢铁冶炼新工艺/杜挺 邓开文等著. 北京:北京大学出版社,1993.12

ISBN 7-301-02380-4

I. 钢…

II. 杜…

III. ①炼钢-工艺学-论文-汇编 ②炼铁-工艺学-论文-汇编

IV. TF4-53

书名: 钢铁冶炼新工艺

著作责任者: 杜挺 邓开文 等

出版者: 北京大学出版社

(北京大学校内, 邮政编码 100871)

排印者: 北京海淀农科区划印刷厂

发行者: 北京大学出版社

经销者: 新华书店

版本记录: 787×1092毫米 16开本 14.125印张 350千字

1994年1月第一版 1994年1月第一次印刷

印数: 0001—3000册

定价: 20.00元

前 言

本书主要内容是国家自然科学基金会与冶金部钢铁研究总院联合资助的“含碳球团——铁浴熔融还原法的应用基础研究”重大项目研究成果的有关论文以及铁水预处理、转炉复吹炼钢、炉外精炼、薄板坯连铸、保护渣等钢铁工业新工艺的研究成果和国内外钢铁冶炼方面进展情况的论文集。

国际钢铁冶金界认为：以熔融还原炼铁与近形连铸为核心的工艺技术，中间加转炉复吹炼钢或炉外精炼等工艺将是钢铁工业采用高新技术生产钢材的跨世纪的新一代短流程，与现有钢铁工业传统流程相比，具有以煤代焦、流程短、节能、改善环保、节省人力、增加生产灵活性、降低基建投资和降低生产成本等优点，它将是钢铁工业自从发明氧气转炉后又一次更大的技术革新。

本书的目的是：

1. 提供熔融还原炼铁的最新的一些科研开发成果，为我们倡导的有特色的含碳球团-铁浴熔融还原法炼铁、炼钢、铁合金提供理论基础、技术依据与应用前景；

2. 提供钢铁冶炼目前与未来的基本新工艺、新技术、发展趋势与关键技术，为我国钢铁企业技术改造提供可以选择的途径与新技术；

3. 为未来钢铁工业生产优质钢材的高新技术短流程提供可以选择的关键工序与新工艺技术；

本书能够出版，首先感谢国家自然科学基金会、冶金工业部和钢铁研究总院对有关科研项目在经费上的资助与支持；对论文作者提供多年来辛勤劳动的创新成果论文；杜昆博士为本书论文的加工整理做了不少工作，北京大学出版社特邀编审、孟广政高级工程师和北京大学出版社编审、孙德中教授为本书的编辑出版都付出了辛勤劳动，在此一并表示感谢。

本书可供从事钢铁冶金生产、科研工程技术人员及管理干部和高等院校有关专业的师生参考。

本书虽经几次修改，可能还有不当或差错之处，欢迎读者指正。

杜 挺
一九九三年七月 一
于北京

3 42714

一、熔融还原新工艺的理论基础 与 关键技术研究成果

目 录

一、熔融还原新工艺的理论基础与关键技术研究成果

无焦炭冶金——熔融还原技术的发展	杜 挺(1)
我国熔融还原技术研究开发情况	杜 挺(16)
冷固结高含碳铁矿球团配比优化与室温强度研究	杜 昆 杜 挺 牛正刚(20)
冷固结高含碳铁矿球团高温强度及还原性能研究	杜 昆 杜 挺 王来久 李万珍(29)
含碳球团还原和再氧化的矿相结构分析	杜 昆 杜 挺(35)
含碳球团的自还原特性与规律	杜 昆 杜 挺 杨祖磐(40)
含碳球团自还原机理与动力学模型	杜 昆 杜 挺 杨祖磐(46)
含碳球团还原动力学和抗氧化研究	杜 昆 杜 挺 杨祖磐(52)
铁浴中含碳球团熔化还原规律研究	杜 挺 牛正刚 杜 昆 蒋国昌 郭曙强(58)
铁浴中控制炉渣(FeO)含量的研究	杜 挺 牛正刚 郑丛杰(70)
铁浴中控制碳含量及脱硫的研究	杜 挺 牛正刚 郑丛杰(76)
含碳球团竖炉-铁浴流程的软科学研究	有晓民 杜 挺 杜 昆(84)
冷固结含碳铬矿球团实验研究	杜 挺 牛正刚 杜 昆 有晓民 王来之 李万珍(88)
熔渣中铬氧化物与铁液中饱和碳的还原动力学	有晓民 杜 挺(96)
预还原球团在铁碳熔体中熔融还原传质规律的研究	何 平 邓开文 张荣生(100)
搅动熔池中沉浸球体表面流动及传热过程的研究	谢计卫 邓开文(108)
熔融还原炉中二次燃烧传热的研究	张荣生 程向明 邓开文 何 平(115)
炉内二次燃烧流动、传热、传质过程的研究	刘 浏 邓开文 姚锡仁 孙 仁 陈耀松(121)
炉内氧气湍流气相燃烧的三维数学模拟	刘 浏 邓开文 孙 仁 陈耀松(131)
煤粉含碳球团炼铁半工业试验	周渝生 李文采 杜 挺 邓开文 刘 扬(141)
日本熔融还原技术考察报告	杜 挺 张玉清 邓开文 张柏汀(147)

二、炼钢工业新工艺

铁水预处理技术的发展和应 用	杜 挺(161)
铁水预处理技术的发展	刘 浏 邓开文 杜 挺(171)
氧气转炉顶底复合吹炼技术的进展	邓开文(181)
炉外精炼	知 水(189)
中宽度薄板坯连铸工艺特性研究	干 勇 张柏汀 倪满森 张 慧 卢 震 姬秀琴 张兴中 葛文秀(194)
连铸薄板坯质量研究	卢 震 张柏汀 干 勇 吴智文 葛文秀(201)
连铸保护渣的作用机理和理化性能	吴夜明 黄 梅(206)

无焦炭冶金——熔融还原技术的发展

杜 挺*

冶金工业部钢铁研究总院

摘 要 本文扼要地叙述了“无焦炭冶金——熔融还原技术”的定义、国际动态、意义、理论基础、历史发展过程、方法和分类、工艺特点、技术关键、能耗、生产率、技术经济指标、国内研究开发现状等。对其中的技术关键：二次燃烧率、热传递和热效率、炉衬寿命、防止再氧化、竖炉预还原、流态化预还原、气体的除尘洗涤回收利用、预还原与终还原的合理配合等作了简要说明。限于篇幅，只对多数关键问题简略地指出了解决的技术措施。

定义

广义：在熔态下的矿、精矿粉被还原剂（固态、液态或气态）还原生成纯金属、合金或金属化合物的冶金过程都称为“熔融还原”。

狭义：在熔态下的某种矿、精矿粉被还原剂（固态、液态或气态）还原生成某种纯金属、合金或金属化合物的冶金过程，它包括一步法液态还原和两步法（固态预还原加液态终还原）还原工艺。

本文叙述的“熔融还原法”是狭义的，主要生产液态铁基合金，包括铁水、半钢水、铁合金水。副产品是煤气。时髦提法可叫“无焦炭冶金”。

一、国际动态

第二次世界大战后的四十多年中，钢铁工业科学技术获得了重大发展。钢产量从1950年的1.9亿吨增长到1992年的7.2亿吨；在钢的质量品种方面，向洁净钢和增加合金钢比例的方向发展，不断满足了现代国民经济各部门和军工、尖端技术不断提出的更高质量要求和多用途的需要；同时在钢铁工业工艺技术与装备方面也向自动化、连续化、高生产率、计算机控制方向发展。但也带来大问题：(1)钢铁生产工艺流程存在“二头重”现象，一头是大焦炉-大烧结机-大高炉的炼铁流程；另一头是轧制工艺，需要多道大型轧机；(2)建设资金巨大，大钢铁厂需要几百亿投资，如宝钢的炼铁系统就占总投资的60%；(3)灵活性差，因为大批量生产不易灵活适应现代化建设越来越频繁的多品种、小批量、高质量的需要。为了逐步解决上述矛盾，国际钢铁冶金界有识之士多年来正在掀起一场缩短流程、降低投资、节能、高效、改善环境污染为特征的技术革命。以煤代焦熔融还原炼铁新工艺和接近最终产品形状的连铸(近形连铸)就是当前钢铁工业前沿带革命性质的两项重大新工艺。这二大新工艺为主的结合，中间加二次冶炼被认为是下世纪钢铁工业的新流程(见图A)。新流程的特点是大大简化和缩短了工艺流程，因而很大程度上节省了基建费用，减少人员，节省能源，降低成本，改善环境。

* 冶金部熔融还原技术开发专家组组长

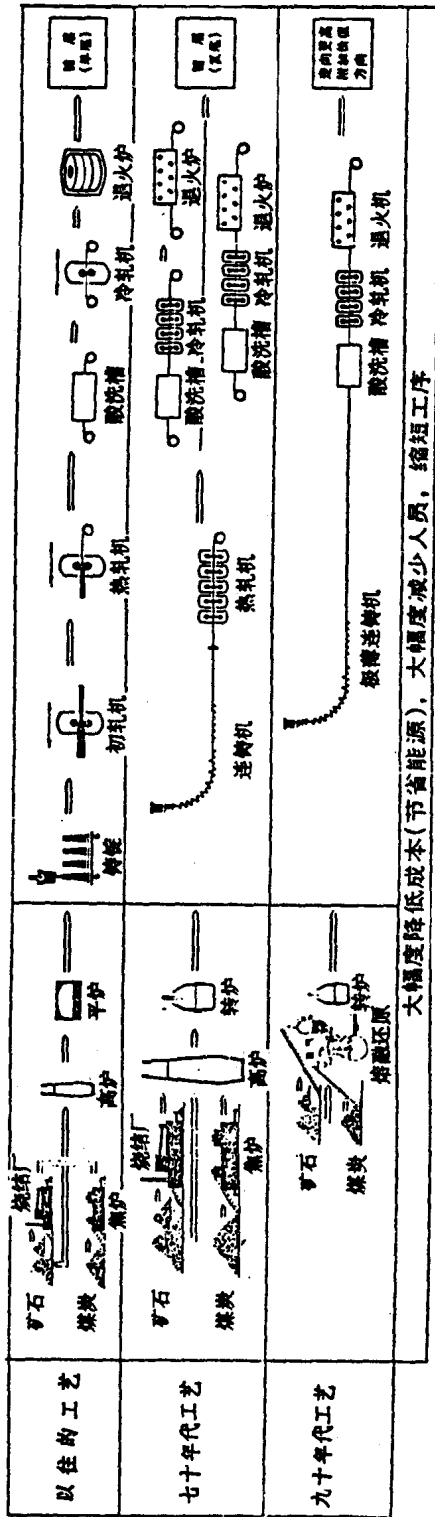


图 A 钢铁工业新流程与现流程、以往流程比较示意图

近十年来日本、德国、苏联、美国、澳大利亚、瑞典等国已投入大量资金和人力加速开发上述新工艺流程。奥钢联 1982 年建成熔融还原煤氧炼铁试验厂，年产 6 万吨（Corex 法）；1988 年秋在南非建设了年产 30 万吨工厂，1990 年 3 月报道：已于 1989 年 12 月交付生产，利用南非的非焦煤和矿，生铁成本比高炉降低 25%。现已扩大设计为 70 万吨年产，并与韩国签订了转让合同。日本，在 1988 年春，由通产省组织八大钢铁公司联合组织国家试验厂进行工业试验，由国家出资三分之二，总投资约 130 亿日元（约 1.18 亿美元），简称 DIOS 法，计划到 1994 年要完成每天 500 吨（年 15 万吨）规模的工业试验。澳大利亚 CRA 公司与美国 Midrex 公司（已由日本神户制钢公司购买）合作，采用 HISMELT 法，计划投资 1 亿澳元建设日产 336 吨（年产 10 万吨）的工业试验厂。计划到 1994 年底左右达到商业化水平。苏联由国家投资开发的每天 1000 吨（年 30 万吨）的铁浴法炼铁，已进行 5 年多工业试验，国内计划建新厂。美国能源部已经于 1987 年组织了调查组，决定由能源部投资 5000 万美元建一每天 120 吨的试验厂，生产半钢再炼成钢，拟通过此项实验，改造技术上已经落后的钢铁工业。值得注意的动向是国际上工业化试验多由国家出面组织，并已进入保密阶段。从目前发展趋势看，在九十年代内，熔融还原新流程将陆续实现工业化。

国际上开发的熔融还原法的示意图见附图 1—12。

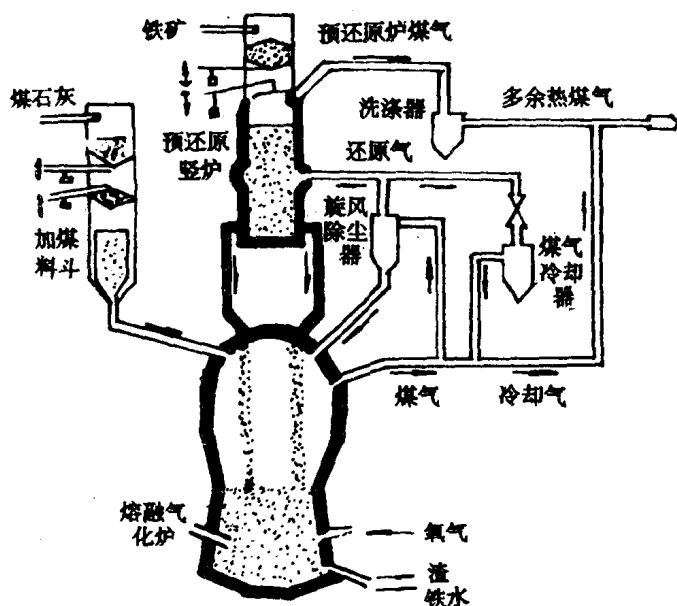


图 1 煤炭还原法 (Corex 法) 流程示意图

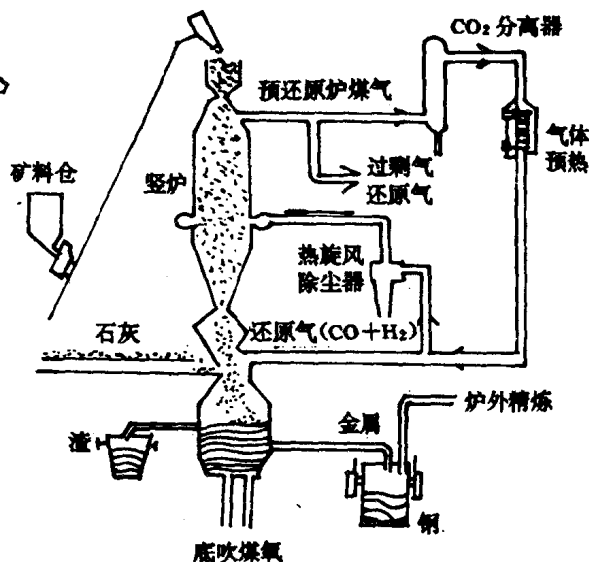


图 2 科因法 (Coin 法) 流程示意图

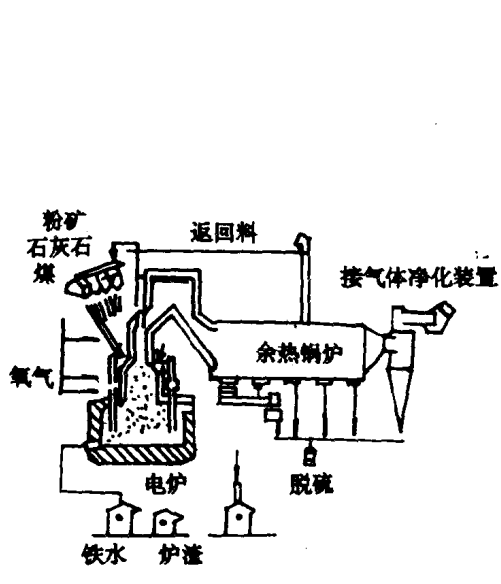


图3 强化还原法 (Inred 法) 流程示意图

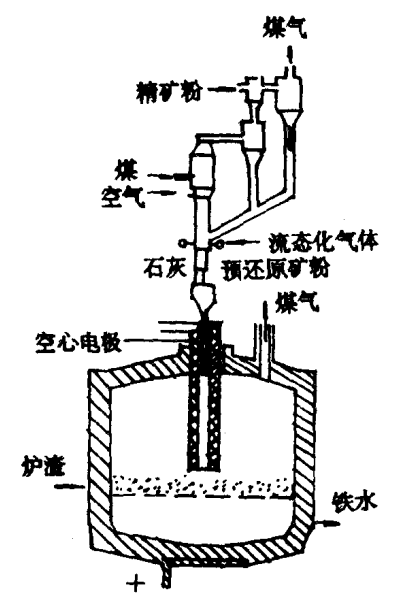


图4 电还原法 (Elred) 流程示意图

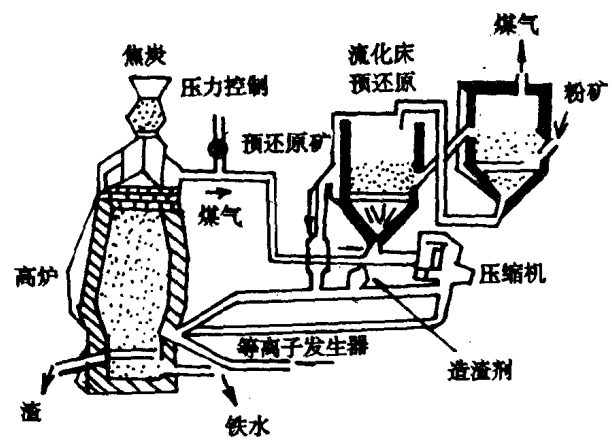


图5 等离子熔炼法流程示意图

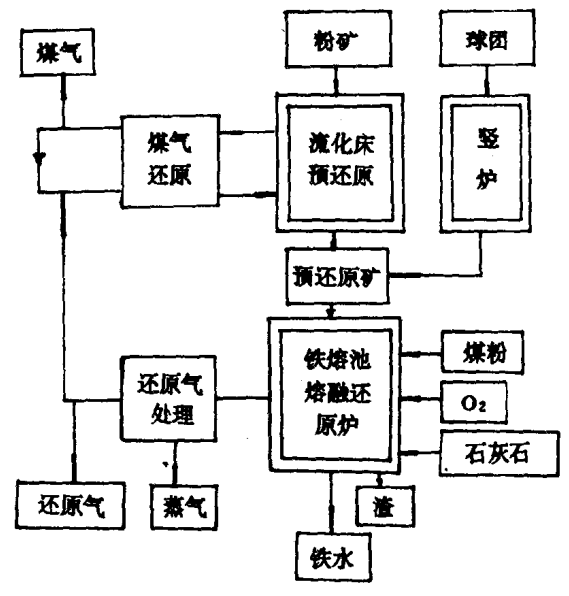


图6 铁熔池熔融还原法流程示意图
(预还原采用二个方法：粉矿用流化床，球团用竖炉)

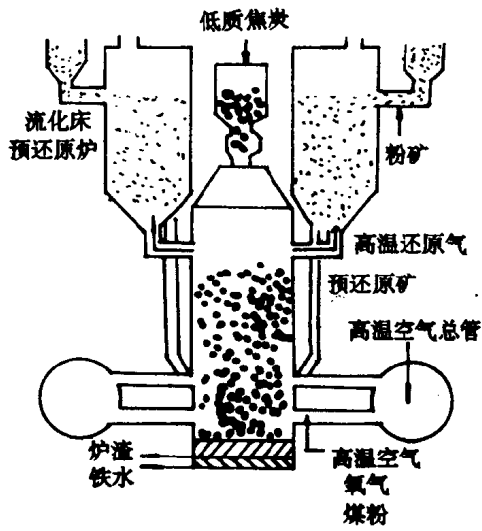


图 7 粉矿熔融还原法流程示意图

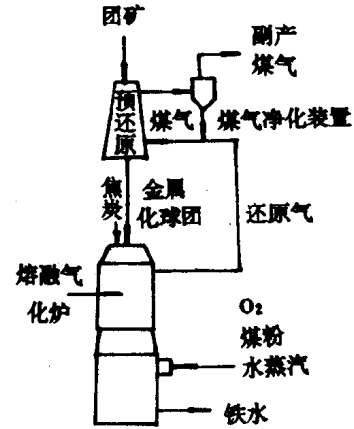


图 8 煤粉氧气熔融还原流程示意图

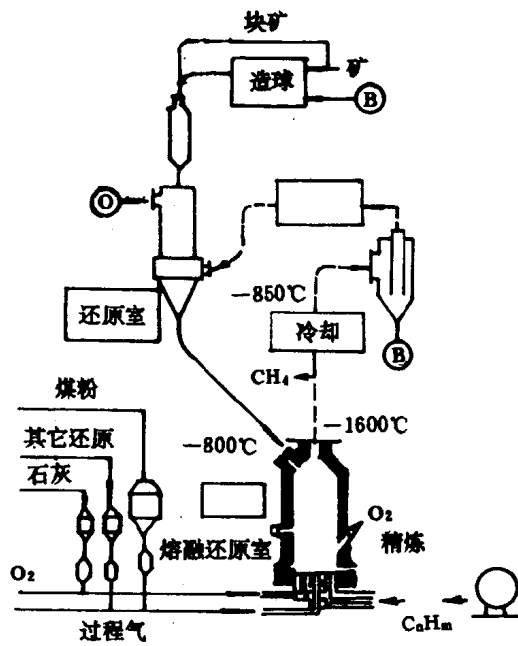


图 9 神户熔融还原法

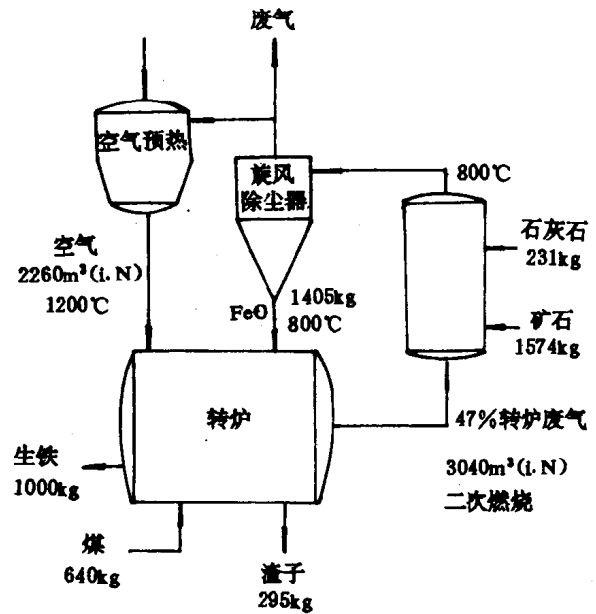


图 10 CRA 方法

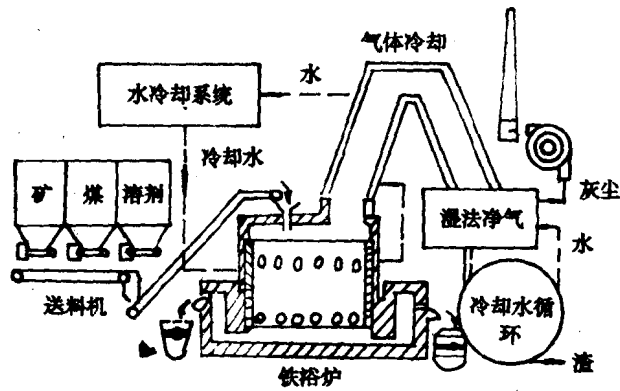


图 11 苏联铁浴法

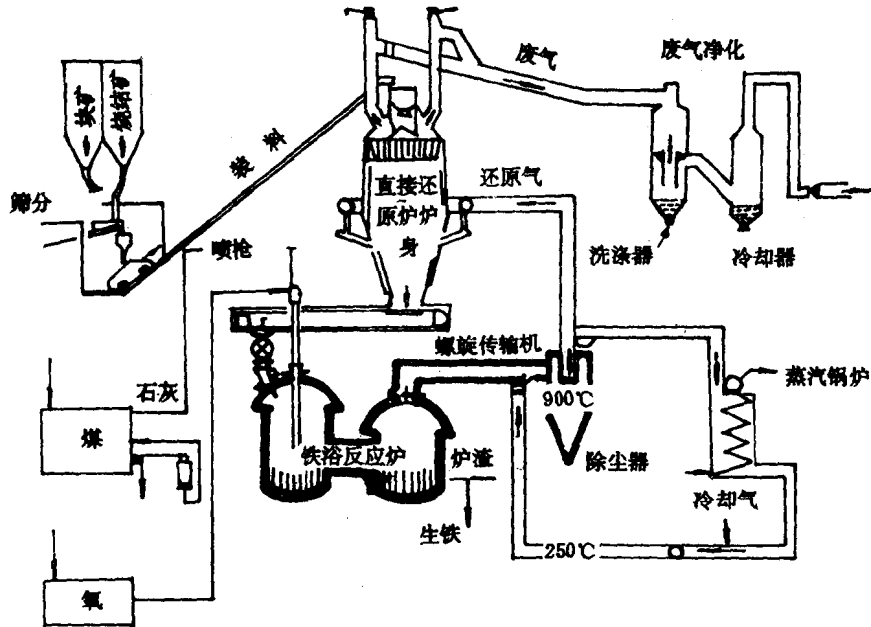


图 12 CBF 方法

二、意义

熔融还原炼铁主要特点是用煤代焦炭炼铁，它的重要意义与特点可归纳为：

(1) 以煤代焦：新工艺应用非焦煤代替焦炭炼铁。国际市场焦煤价每吨约 80 美元，比非焦煤高一倍多。我国焦煤分布大部分在山西和华北，低硫、低灰分炼焦煤的供应问题经常困

扰我国宝钢、武钢、鞍钢等大钢铁企业。但我国的非焦煤分布却很广，各地区都有，因此采用这种新工艺，能因地制宜就近利用煤和矿资源。

用非焦煤代替焦炭炼铁是发展钢铁工业和煤的有效综合利用带战略性的重大问题。用非焦煤代焦炭，两者差价每吨达 200 多元。

虽然高炉也可用喷煤粉和富氧来降低焦比，但焦炭的需要量每吨铁 300~400 公斤，而熔融还原新工艺却能把焦炭全部代掉，取消了炼焦过程。不用焦炭不用高炉的熔融还原法炼铁，目前世界上已有多种方案，通过扩大试验说明都是可行的。南非 30 万吨厂是其中的一种方案，而且已经正式生产，正在计划建 70 万吨。

苏联 30 万吨厂是铁浴法方案；日本、澳大利亚、美国工业试验方案是铁浴还原为主加适当预还原的方案等。

(2) 缩短流程：它与现代化、大型化的传统炼铁法——焦炉+烧结+高炉流程相比，可以取消炼焦厂，也可能取消烧结厂。

缩短流程使基建投资大幅度降低：按保守估计节省四分之一投资。不建这两厂，将大大降低钢铁企业的环境污染，改善生态保护，有利于人民和国家的根本利益，并大大降低环保投资。

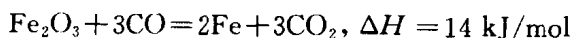
(3) 灵活性大：新工艺对年产 20~30 万吨钢铁厂也能达到经济规模，有利于发挥地区和省因地制宜建厂的积极性；适宜于依据用户要求，生产中、小批量的钢铁品种，较易变更产品结构；扩大规模也有利，日本也在进行 150~300 万吨的可行性研究；灵活性是今后国民经济和新技术不断发展最重要条件之一，这就大大增强竞争力。

(4) 符合国情：与钢铁工业有关的国情 (1) 我国社会主义现代化建设需要钢铁长期持续稳定发展；(2) 非焦煤很丰富，分布也广，电紧张，石油还不多；(3) 矿种复杂，贫矿多，分布较散，共生矿不少；(4) 中小钢铁厂多，需要不断进行技术改造；(5) 交通运输紧张；(6) 钢铁工业的科技干部多，素质好，比发达国家的总和还多；(7) 建设资金不足。这些国情有利于我国发展熔融还原新工艺。巴黎统筹会及日本只允许输出 10 年前的技术。我们要提倡自力更生为主，外援为辅，依靠本国强大的技术队伍，积极开发和采用新技术，就可能争取做到多、快、好、省地创造出一条发展我国钢铁工业的新途径，成功后的应用前景是以千万吨计算的。在发展中国家也有广阔市场。

三、理论基础

1. 热力学

用 C 还原 Fe_2O_3 时，按反应式

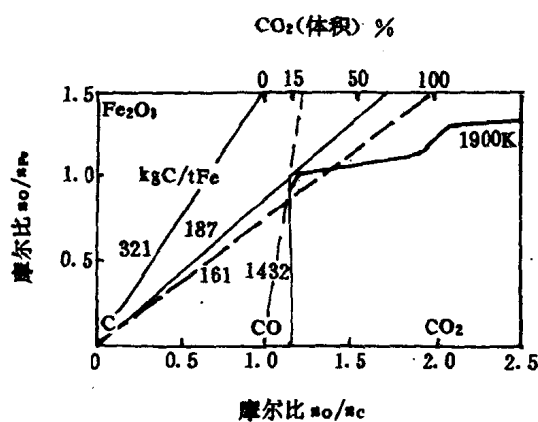


按化学计量的 C 耗为 161 kg C/tFe。但在高温下，按反应 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 2\text{Fe} + 3\text{CO}$, $\Delta H = 487 \text{ kJ/mol}$ 。其理论 C 耗为 321 kg C/t Fe。

Steinmet. E 等借反应的热力学平衡，将 Fe-O、C-O 和 H-O 系的氧分压联系起来，可以得出液态还原时的 Rist 图解⁽¹⁾，它表示了 1900K 时的 Fe-C-O 系的平衡，说明了互相对应的平衡浓度和不同碳量时，碳向 CO-CO₂-废气转化的反应过程，反应以逆流为前提。1900K 时的 FeO-Fe 还原阶段的还原气中 CO 占 15%，CO₂ 占 85%，算出最低碳需要量为 187 kg C/t Fe。这个碳量刚经过 FeO-Fe 的临界点。从能量平衡计算得出：在碳被百分之百地氧化成 CO

情况下, C 的理论量为 274 kg C/t Fe, 这时, 除矿石中氧外, 还需要额外输入氧气。要使单独用碳进行的还原反应在反应各阶段都能得到能量平衡, 则 FeO 阶段得出碳的需要量为 518 kg C/t Fe, 对 O₂ 量需要 357m³/t Fe, 而预还原后的废气含 CO₂ 为 37%。

从理论上对熔融还原冶金原理的论证分析, 就碳或氢的需要量来说可以归纳成表 1。



1900K 的 Rist 图解

表 1 在 Fe₂O₃ 用碳或氢熔融还原时, 还原剂和燃料的需要量以及额外需要的氧气量

判断标准	用碳还原				用氢还原			
	kgC/t Fe	m ³ O ₂ /t Fe	FeO/Fe 阶段%CO ₂	废气 %CO ₂	m ³ H ₂ /t Fe	m ³ O ₂ /t Fe	FeO/Fe 阶段%H ₂ O	废气 %H ₂ O
按化学计算的总量	161	0	—	100	602	0	—	100
FeO-Fe 平衡	187	49	15	100	891	25	45	73
总的热平衡	274	211	15	100	839	120	45	100
FeO-Fe 热平衡	518	357	15	37	1803	137	45	(49)*

* 按化学计算这个数值对于预还原 Fe₂O₃/FeO 是不足的, 为此产生一种含 H₂O 56% 的废气和过剩能量。

表 1 中关于 C 的需要量可归纳为:

①为了使铁氧化物在煤气一次通过时被还原, 需要 518 kg C/t Fe, 废气从系统中输出含有相当可观能量。

②将煤气中含有的能量部分或全部返回过程中, 碳的最低需要量为 274 kg C/t Fe。

③如引入外部能量(电能等)来满足部分的能量平衡要求, 那么 FeO→Fe 还原阶段平衡可移至下限 187 kg C/t Fe。

④如用外部能量时, 再附带将 CO₂ 洗涤并将 CO 引回, 整个工艺过程按化学计量最低值为 161 kg C/t Fe, 尽管在 FeO-Fe 阶段配碳与循环煤气已提供 187 kg C/t Fe。

根据煤的状况, 考虑到脉石和损失, 工业系统中煤的实际需要量可能比上述数据高 20~50%。

对于用氢还原可进行类似论证分析, 相应的消耗值列于上表。如主要用 C, 也用些 H₂ 作还原剂, 相应消耗值介于二者之间的各自消耗值之和。

2. 动力学

文献上已有大量液态氧化物还原的试验结果, 由于试验条件不同, 得出的反应机理和控速步骤不一样, 这时必须区别是纯氧化物, 还是渣中稀释的氧化物或是混合氧化物; 还要区别还原剂的种类是固体碳、还是金属液或渣液中溶解的碳或气相中的 CO; 同时要考虑还原期间的浓度变化也常常出现控速步骤的变更和反应速度的相应变化; 有时还要考虑催化剂的

作用。

作者对铁氧化物-还原反应的动力学研究进行了文献的综合对比,见表2,说明升温100—200 C和机械搅拌只能使熔融还原速度提高几倍,而熔态氧化铁与碳饱和铁水间的反应速度最快。在相同条件下,铁水中溶解碳还原熔融 FeO 的速度要比固体碳或 CO 还原快 10~100 倍,比 900°C 的 CO 还原优质铁矿石速度快 100~1000 倍。因此用煤、氧喷入铁水或用其它能源在熔体内部产生热以及将经过预热、预还原的铁矿粉和碳粉喷入铁水是加速熔融还原最有效的手段,也说明铁浴熔融还原比固态、气态还原快得多的优越性。

表 2 不同体系熔融氧化铁还原速度汇总表⁽²⁾

试验体系	熔融 FeO-固体碳								
编 号	2	3	6	7	8	10	11	12	14
反应比速度/ $10^3 \cdot \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$	50	18	13	24	16	24	40	2.4	9.7
反应速度快慢次序	5	11	13	8	12	9	6	18	16
对编号 24 速度的倍数	20	7.2	5.2	9.6	6.4	9.6	16	0.96	3.9
反应温度/C	1570	1450	1450	1480	1450	1650	1450	1480	1575
FeO, wt%	96	90	60	90	80	50	70	10	5
表观反应级数	0	0	1	1	1	1.77	1-3	2	2
参考文献 2 中的文献	6	7	7	4	10	12	13	14	16

试验体系	熔融 FeO-铁水中碳					熔融 FeO-CO			固 Fe ₂ O ₃ -CO
编 号	15	16	17	19	20	21	22	23	24
反应比速度/ $10^3 \cdot \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$	2500	217	3540	2570	11.6	35	10.8	20	2.5
反应速度快慢次序	3	4	1	2	14	7	15	10	17
对编号 24 速度的倍数	1000	86.8	1416	1028	4.6	14	4.3	8.0	1.0
反应温度/C	1600	1450	1600	1520	1520	1600	1450	1600	900
FeO, wt%	100	100	100	60	20	100	95	100	90
表观反应级数	1	1			2				
参考文献 2 中的文献	23	24	19	26	27	32	33	34	31

四、历史发展过程

熔融还原的研究的开发经历了三代:

第一代工艺 从 20 世纪 20 年代开始,主要是 60 年代坚持试验,当时在一个反应器内(转炉、回转窑)使用精矿和煤,叫一步法。曾进行几种方法的试验:如还原时由铁熔体排出的煤气在熔池上方二次燃烧,该方法由于过程控制困难,二次燃烧时的高温 and 强腐蚀性 FeO 熔体对炉衬的严重侵蚀,使炉衬耐火材料消耗大,缺少经济性而宣告失败;另一种试验是强烈转动反应器,铁水直接装入耐火装置内,并在造渣前进行保护(旋转法和 CIP 法)试验,由于铁层和渣层之间只有少量的原料与热交换而被取消;另一试验是精矿由对着反应器墙的转

盘进行给料，在二次燃烧时，辐射前截断“精矿屏幕”以保护炉衬（EV法），此法虽未成功，但精矿同时传递熔池中由于二次燃烧产生的部分热量，在今天也是有意义的。

第二代工艺 有代表性的是瑞典在20世纪70年代开发的用电作热源的熔融还原法，它克服了由二次燃烧空间到还原空间传递热量的困难。一些方法是用终还原产生的废气进行二步法的矿石预还原。由于FeO炉渣的侵蚀和热需求，使终还原阶段取消了。已进行半工业试验的方法是Elred法、Inred法和等离子熔炼法。今天在瑞典有一个用等离子枪工艺加工生产每年7万吨不锈钢（含Ni和Cr）的粉末冶炼厂。电在瑞典是富裕的，但使用电能还原铁矿石，多数情况下是不经济的，因而第二代工艺未能推广。

第三代工艺 特点是放弃电能，立足于煤和氧气的“无焦炭工艺”，而第二代工艺原有的预还原和熔态终还原二步法在大多数情况下仍然保留。

五、方法和分类

第三代工艺在国际上有代表性的熔融还原法工艺研究开发情况综合见表3。

表3 国际上第三代熔融还原工艺的开发情况

原理/方法	矿石添加	还原剂	预还原	终还原	开发近况
1. 熔融气化炉:					
Corex法 (KR法)	块矿	块煤	竖炉 (>90%)	竖炉沸腾床	工业生产厂 1000 t/天
住友SC法	块矿	焦炭 (30%) +煤粉	竖炉 (<60%)	冲天炉	8t/天已完成
川崎XR法	粉矿	块煤+煤粉	循环沸腾床 (40~80%)	竖炉沸腾床	10t/天已完成
2. 铁浴反应炉:					
1) 有二次燃烧					
Hismelt法 (CRA)	粉矿	煤粉	循环沸腾床 (30%)	卧筒式转炉	10t, 已完成 已建工业试验厂 336t/天
MIP+热旋分离器 (KHD)	粉矿	煤粉	加热+熔化旋 分离器 (30%)	卧筒式转炉 (C-喷吹)	20t
日本钢管法和DIOS法	粉矿	煤粉	复合床 (DIOS法) 沸腾床 (15%)	转炉 (C-顶吹)	已建成日产500t工业 试验厂 (5t已完成)
新日铁NSC法	粉矿	煤粉	循环沸腾床 (30%)	转炉 (C-喷吹)	5t已完成
川崎钢厂	粉矿	煤粉		转炉 (C-顶吹)	5t已完成
神户钢厂	块矿	煤粉/CH ₄	竖炉	转炉 (C-喷吹)	0.5t已完成
美国能源部“直接炼钢法”	球团	煤粉		转炉铁浴	10t已完成, 已建成 日产120t的中间试验厂
苏联铁浴法 (PJV法)	粉矿	煤粉		平炉式铁浴炉	工业试验 200-1000t/天
2) 没有二次燃烧					
COIN (克虏伯)	粉矿	煤粉	循环沸腾床 (>90%)	转炉 (C-喷吹)	3t已完成
CBF (美国钢公司/荷兰)	块矿	煤粉	竖炉 (>90%)	双室反应炉 (C-顶吹)	改造高炉方法

因是新工艺，还没有统一的分类方法，过去人们习惯用“有无预还原”分为一步法（只熔态还原）和二步法（预还原加终还原）。这种分类较宏观。适宜采用“主要反应炉的功能”和“有无二次燃烧”来分类，则众多的开发工艺可分为二类不同的工艺：

(1) 熔融气化炉为特点，用该炉的还原气供预还原用，无二次燃烧，见表3中的前3种方法。

(2) 铁浴反应炉为特点，一般有二次燃烧，也有无二次燃烧的，见表3中的后10种方法。

六、工艺特点

(1) 是二步法，还是一步法；

(2) 主要反应炉的功能是熔融气化炉，还是铁浴反应炉（分立式转炉型和卧筒式转炉型）；

(3) 有无二次燃烧；

(4) 供热方式是煤+氧，电+煤；煤、氧加入地点是顶、底、侧或二者结合；

(5) 还原剂种类和状态：煤（煤粉或块煤）、煤+碎焦、煤粉+H₂、煤粉加天然气（主要是CH₄）、H₂等（将来）；

(6) 矿石状态是粉矿还是块矿、球团等；

(7) 预还原炉型和方法，是流化床（鼓泡流态化床、快速流化床）还是竖炉（球团或块矿）。

七、技术关键

1. 二次燃烧率

定义是 $(CO_2 + H_2O) / (CO + H_2 + CO_2 + H_2O)$ 。当熔融还原生成的CO+H₂的一部分在熔池上方二次燃烧成CO₂和H₂O时，能有效地使用高挥发性煤，同时，每公斤煤附加的热量传递到熔池内能降低燃料消耗，改善煤气的利用率，提高了最大的单位体积气体通过能力，具有较高的生产率。需要解决的问题是CO₂和H₂O降低了还原能力和防止铁的再氧化；为了提高还原能力，措施是清洗掉CO₂和H₂O，或煤气改质，并回收预还原的剩余煤气，获得自热的操作方法。

表4是熔融还原工艺条件（二次燃烧率、预还原度等因素）对燃耗与能耗的影响（摘自F. Oeters计算^[3]）。

表4 熔融还原工艺条件对燃耗与能耗的影响

	用电能 输 热	没有气体洗 涤和回收	没有气体洗 涤和回收	有气体洗 涤和回收	有气体洗 涤和回收	没有气体洗 涤和回收	没有气体洗 涤和回收
燃料	碳	碳	煤*	煤*	煤*	煤*	煤*
二次燃烧率	0	0	0	10	20	10	50
熔融还原阶段气体量 m ³ (标准态) / t. Fe	320	842	1120	711	711	1122	733
预还原度%	47	75	90.5	91	81	81	30
气体利用率%	88	53	49	100	100	48	83
燃料消耗 / (kg/t. Fe)	213	493	531	351	351	532	361
总能量消耗 / (GJ/t. Fe)	10.4	16.2	17.6	11.6**	11.6**	17.6	12.0

* 成分：82.8%C、6.2%H₂、8.0%O₂、2.0%N₂、1.0%S

** 没有考虑气体洗涤能。