

• 中国金属学会 •



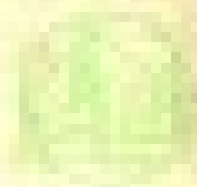
冶金继续工程教育丛书

# 非高炉炼铁

秦民生 编著

1988年12月

中国冶金工业



# 非高炉炼铁

1982. 12

1

冶金工业出版社

《冶金继续工程教育丛书》

# 非高炉炼铁

秦民生 编著

中国金属学会

## 序

中国金属学会组织编写了《冶金继续工程教育丛书》，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展，具有重要意义。希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职学习提供方便；同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化，振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事  
冶金工业部副部长

徐大铨

一九八八年十二月

# 目 录

序

1 概 论	(1)
2 直接还原	(6)
2.1 直接还原的能源、原料与生产指标	(6)
2.2 气基直接还原法	(11)
2.2.1 煤气还原铁氧化物分析	(11)
2.2.2 气基直接还原工艺	(23)
2.3 煤基直接还原法	(34)
2.3.1 回转窑炼铁原理	(34)
2.3.2 煤基直接还原法工艺	(44)
2.4 直接还原铁的性质与应用	(50)
2.4.1 直接还原铁的性质	(50)
2.4.2 直接还原铁的处理与贮运	(51)
2.4.3 直接还原铁的使用	(53)
3 粒铁法	(59)
4 熔融还原法	(65)
4.1 一步熔融还原法	(65)
4.1.1 回转炉法	(65)
4.1.2 悬浮态法	(66)
4.1.3 电炉法	(68)
4.2 二步熔融还原法	(71)
5 钢铁生产新工艺流程评价	(81)
参考文献	(89)

# 1 概 论

非高炉炼铁法主要分直接还原法和熔融还原法两大类。

直接还原 (Direct Reduction) 法是指不用高炉而用铁矿石炼制海绵铁的工业生产过程, 直接还原铁是一种在低温下固态还原的金属铁。这种产品未经熔化仍保持矿石外形, 但由于还原失氧形成大量气孔在显微镜下观察形似海绵, 因而也称为海绵铁, 直接还原铁的特点是含碳低 ( $< 1\%$ ) 及不含硅锰等元素, 还保存了矿石中的脉石。这些特性使其不宜大规模用于转炉炼钢, 而只适于代替废钢作为电炉炼钢的原料。

熔融还原 (Smelting Reduction) 法是指在熔融状态下把铁矿石还原到融态铁水的非高炉炼铁法。熔融还原法的产品是一种与高炉铁水相同的高碳生铁, 适合于作氧气转炉炼钢原料。

典型的钢铁生产流程本来是高炉  $\rightarrow$  氧气转炉。

由于直接还原法与熔融还原法的重大进展目前已出现了有别于典型钢铁生产流程的新的钢铁生产流程 (图 1)

在钢铁冶炼技术的发展历史上, 最先出现的是原始的直接还原法 (块炼铁法), 高炉取代原始的直接还原法是钢铁冶金技术上的重大进步。但是随着钢铁工业的巨大发展, 供应高炉合格焦炭的问题就日益紧张。18 世纪末, 为了摆脱冶金焦的羁绊, 直接还原炼铁的设计又重新被提出来了。

1770 年英国就有人提出了第一个直接还原法——Che-not 法。但是直到本世纪 60 年代, 直接还原法才取得较大成果, 其原因如下:

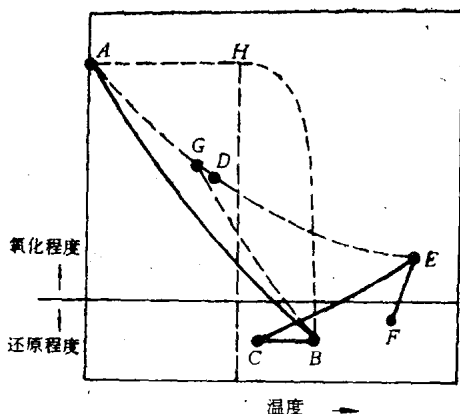


图1 高炉法与非高炉法  
钢铁冶炼过程比较

A—铁矿石；B—出炉高炉生铁；C—高炉生铁装炉；D—直接还原铁；E—出炉钢水；F—成品钢；G—预还原铁矿石；  
A-B—高炉炼铁过程；C-E—氧气炼钢过程；A-G—铁矿石还原过程；A-H-B—一步熔融还原法；G-B—终还原；  
A-G-B—二步熔融还原法

(1) 随着冶金焦价格的提高，石油和天然气被大量开发利用，全世界能源的结构发生重大的变化。特别是高效率天然气转化法的采用，提供了适用的冶金还原煤气，使直接还原法有了来源丰富、价格便宜的新能源。

(2) 电炉炼钢迅速发展，加上超高功率（UHP）新技术的应用，大大扩展了直接还原铁的需求。

(3) 选矿技术提高，大量提供了高品位铁精矿，矿石中的脉石量可以降低到还原冶炼过程中不需要再加以脱除的程

度，从而简化了直接还原技术。

在50年代以前，全世界非高炉炼铁法的产品不到高炉产量的0.5%；而直接还原铁的产量又仅占全部非高炉炼铁法产量的5%；到1964年前一比值已达到1.0%，后一比值已达到10%；到1967年前一比值上升到0.5%，后一比值达到17%；1972年前一比值就达到了2%，后一比值为43%；到1980年非高炉炼铁的全世界设备能力达2000万吨，占高炉产量的3.4%，而其中80%以上是由直接还原法炼出的海绵铁，但实际产量只有约800万吨，图2示出直接还原法的发展及其在钢铁生产中所占地位的变化。

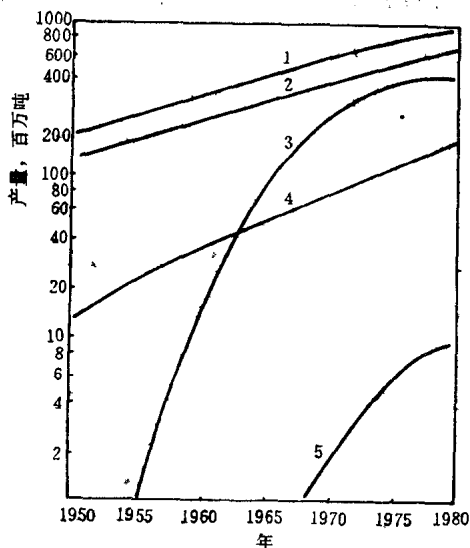


图2 全世界钢铁生产发展状况

1—钢产量；2—生铁产量；3—氧气转炉炼钢产量；4—电炉钢产量；5—直接还原铁产量



直接还原方法种类繁多,仅见之于文献的就达400余种,但大多数未经试验就夭折了,还有不少方法在试验过程中被淘汰。

同时直接还原法的发展还受到下列条件的限制:

(1) 最成熟的直接还原法(竖炉及反应罐)都是使用天然气作一次能源的,但两次石油危机后天然气也普遍短缺,近年来更为突出,而应用煤炭为能源的各种方式生产成本高,或对海绵铁产生污染,或生产效率低,仍有若干技术有待完善。因此直接还原法的能源供应并未完满解决。

(2) 应用直接还原-电炉流程生产一吨成品钢总计需要600~1000kWh的电耗,而电能是较贵的能源,并且不是在任何地区都可方便提供的。

(3) 直接还原法需要使用高品位精矿,这也不是普遍地都能方便地获得的。对于某些嵌布细微的难选铁矿,直接还原法更难于处理。

因此直接还原炼铁法还需要解决一些技术难题才能大规模发展,目前直接还原法只能在某些特殊地区,作为典型钢铁生产方式的一种补充形式而存在。

在直接还原发展受到阻碍的情况下,另一种非高炉炼铁法——熔融还原法在60年代以来也逐渐兴起,熔融还原是指非高炉炼铁中冶炼液态铁水的那类方法,最初发展熔融还原的设想是企图开发一种理想的炼铁方法,即无需造块(直接使用矿粉),不用焦炭,不造成污染又能生产出合格成份生铁的炼铁方法。但是后来研究试验的实践使人们的技术思想逐步更为现实了。当前认为凡是使用煤为主要能源(不排除部分使用焦炭)冶炼出液态铁水的一切非高炉炼铁法都属于

熔融还原法。

熔融还原生产的铁水除含有较高的物理热量（温度高）外，还含有较高的碳（2~4%）、硅、锰等元素，它们所贮存的能量便于传统氧气转炉炼钢法使用。此外液态生铁生产过程中可以把脉石成份排除，因此冶炼生铁的熔融还原法历来受到重视。但是目前熔融还原法仍处于开发研究阶段，并没有达到工业生产的水平。

## 2 直接还原

### 2.1 直接还原的能源、原料与生产指标

直接还原法可分为两大类加以分析

(1) 使用气体还原剂的气基直接还原法。在这种方法中煤气兼作还原剂与热载体，但需要另外补加能源加热煤气。

(2) 使用固体还原剂的煤基直接还原法。先用碳作还原剂，产生的CO燃烧可提供反应过程需要的部分热量。过程需要的热量不足部分则另外补充。

在直接还原反应过程中，能源消耗于两个方面，一是夺取矿石氧量，一是提供热量。气基还原法中，煤气兼有两者的作用，对还原煤气有一定的要求。用天然气、石油气、石油及煤炭都可以制造这种冶金还原煤气，但以天然气转化法最方便最容易。因此转化后的天然气就成为直接还原法最重要的一次能源。但由于石油及天然气日益匮乏，用煤炭制造还原煤气供竖炉使用，也已成为当前国内外研究的重要课题。

对于用固体还原剂的煤基直接还原法，还原剂与供热燃料是分开的，对它们也有一定要求。能否提供合乎要求而且价廉的能源是直接还原能否被采用的关键。

对于铁矿原料，最重要的质量要求是含铁品位。因为矿石中的脉石在直接还原法中不能脱除而全部保留在直接还原铁中。这样当直接还原铁用于电炉炼钢时，脉石就造成严重危害，如电耗剧增，生产率降低及炉衬寿命缩短。一般要求铁矿石酸性脉石含量小于3%，最高不超过5%，对铁矿石中硫、磷等杂质的要求并不十分严格，因为各种直接还原法都

有一定的脱硫能力，而硫、磷在电炉炼钢中也不难脱除。对于那些在高炉冶炼中能造成麻烦的元素，如钾、钠、锌、铅、砷等，直接还原法可以部分或大部脱除，或能适应其有害作用。具体要求视各种方法而定。但总的说来不比高炉严格。

对于矿石强度要求，一般低于高炉，但良好的强度仍是保证竖炉及回转窑顺利操作的重要因素。对于矿石粒度要求不一，图3示出各类直接还原法使用的矿石粒度。

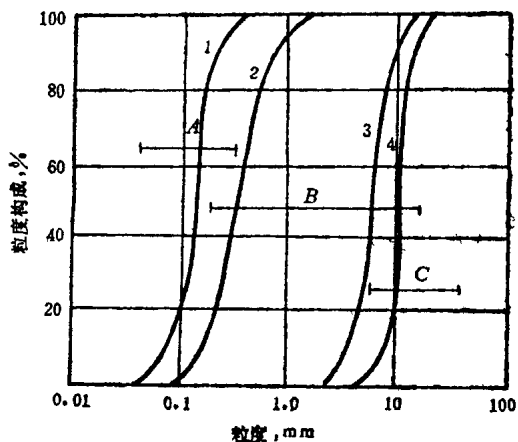


图3 各种直接还原法使用的  
铁矿石粒度范围

1—细粒赤铁矿； 2—分级铁矿石； 3—球团矿； 4—块铁矿  
A—流态化法； B—回转窑法； C—竖炉法

直接还原法常用的技术指标有下列几种：

(1) 评价生产率指标最常用利用系数 ( $\eta_v$ ), 其定义与高炉有效容积利用系数相同, 即

$$\eta_v = \text{单位反应器容积每24小时的产量, t/m}^3 \cdot \text{d}$$

各类直接还原法的  $\eta_v$  在 0.5~10 之间。

(2) 由于各类方法使用的能源种类很多, 故用直接还原法系统内消耗的一次能源的总热值来表示燃料消耗, 称之为单位热耗  $Q_R$  (cal/t)。理论最低热耗据  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  生成热为:

$$[196910 / (2 \times 56)] 1000 = 1.76 \times 10^6 \text{ cal/t}$$

$$\text{或 } 1.76 \times 10^6 \times 4.1819 \text{ J} = 7.36 \times 10^6 \text{ J/t}$$

各种直接还原法的热耗则在  $(2.2 \sim 6) \times 10^6$  cal/t 或  $(9.2 \sim 25.1) \times 10^6$  J 的范围内。

(3) 评价产品质量的指标有两个, 一个是产品还原度  $R$ ,

$$R = 1 - \frac{1.5\text{Fe}^{+++} + \text{Fe}^{++}}{1.5\text{TFe}} \%$$

另一个叫金属化率  $M$

$$M = \frac{\text{Fe}^\circ + \text{Fe}_{\text{Fe}_3\text{C}}}{\text{TFe}} \%$$

式中  $\text{Fe}^{+++}$  —— 三价铁 %;

$\text{Fe}^{++}$  —— 二价铁 %

$\text{Fe}^\circ$  —— 金属铁 %

$\text{Fe}_{\text{Fe}_3\text{C}}$  ——  $\text{Fe}_3\text{C}$  中的铁 %。

金属化率与还原度的关系如图 4 所示。

(4) 此外还常用氧化度  $\eta_o$  表示煤气质量

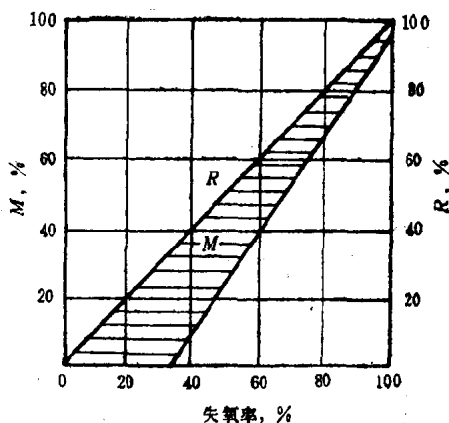


图4 铁矿石还原失氧率与还原度  
及金属化率的关系

R—直接还原铁的还原度，%；M（阴影部份）—金属化率的可能值，%

$$\eta_0 = \frac{\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2}{\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{CO}}$$

$\eta_0$  愈大则煤气质量愈差，但也可用此指标表示直接还原炉中煤气被利用的程度，则此时  $\eta_0$  愈大表示煤气利用率愈高。

当前最重要的直接还原法如下：

(1) 使用气体还原剂的方法：占总产量90%

a. 竖炉法；占直接还原总产量的55%，其中尤以Mid-rex法最重要，其产量约占直接还原总产量的48%。

b. 反应罐法（HYLI法）占总量30%。

c. 流态化法；占总量4%。

(2) 使用固体还原剂的方法：以SL-RN法及Krupp两法为主，约占总产量的8%。

表1示出直接还原全世界发展概况。

表 1 世界直接还原方法(工业生产)概况

燃料种类	生产方法	分 布 国 家	建 设 年 份	生产能力和,万吨/年			备注
				生产	停产	准备建	
气 基	ARMCO	美国	1972		33		33
	FIOR	委内瑞拉	1976	40			40
	HIB	委内瑞拉	1973		65		65
	HYL(I)	墨西哥、委内瑞拉、伊朗、印尼、巴西	1957~1982	695	147.5		生产172.5
	HYL(II)	墨西哥、阿根廷	1980~1984	27			拟建200
	MIDREX	美国、西德、加拿大、阿根廷、委内瑞拉、英国、伊朗、苏联、沙特阿拉伯、利比亚	1969~1984	596.5	230	475	生产127.5
	NSC	日本、马来西亚	1977~1984		15	60	拟建167
	PUROFER	西德、巴西、伊朗	1970~1984	83			60
	WIBERG	瑞典、日本	1952~1964	1			
	ACCAR	美国、加拿大、印度	1973~1982	18.5	24		
煤 基	DRC	美国、南非	1978~1983	14			
	川崎	美国、瑞典	1954~1963	23			
	KRUPP	日本	1973~1982	2	56.2	2	
	回转炉	意大利、缅甸	1973	12			
	SL-RN	南非	1957		2.4		
		日本	1969~1984	38.9	97.8	162	
		南朝鲜、澳大利亚、新西兰、巴西、美国、日本、加拿大、秘鲁、印度、南非、新西兰					

## 2.2 气基直接还原法

### 2.2.1 煤气还原铁氧化物分析

#### 2.2.1.1 气体还原铁矿石的物理化学

铁矿石气体直接还原过程与高炉炉身冶炼过程相似，但没有熔化及造渣过程，只是铁矿不用还原气体把铁还原出来。因此在气基直接还原过程中，主要问题是铁的氧化物被还原的状况。

Fe-O共形成三种氧化物，含氧由低到高的顺序为：

浮氏体—— $\text{Fe}_{1-y}\text{O}$ 或 $\text{Fe}_2\text{O}$

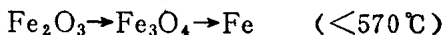
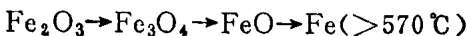
磁铁矿—— $\text{Fe}_3\text{O}_4$

赤铁矿—— $\text{Fe}_2\text{O}_3$

浮氏体是食盐型（NaCl）立方晶系的缺位晶体。随温度不同铁氧化比有所变化。最大可变范围为23.1~26.6%，所以其分子式常写成 $\text{Fe}_{1-y}\text{O}$ 或 $\text{Fe}_x\text{O}$ ，其中 $y$ 表示铁离子缺位的比率，由Fe-O相图还可以看出低于570℃时FeO不能稳定存在，将分解为 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 与 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。在较低温度下是成份固定化合物。

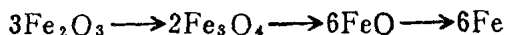
直接还原冶炼过程中使用的气体还原剂是CO和 $\text{H}_2$ ，表2列出各种铁的氧化物被CO及 $\text{H}_2$ 分别还原时的反应式及有关热力学数据。

铁氧化物的还原按下列顺序进行：



从 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 还原到Fe各阶段失氧率为：





各氧化物的氧原子数    9                      8                      6                      0  
 各还原阶段除氧率        1/9                    3/9                    6/9

由以上分析可看出由 FeO 还原到 Fe 的阶段，除氧量占总量的 2/3，是还原过程中的关键步骤。

各氧化铁的还原反应是可逆的，因而各个铁的氧化物当被不同的气体还原剂还原时在不同的温度下都有相应的平衡气相成分。

表 2 CO及H<sub>2</sub>还原铁氧化物的反应式

反应式	$\Delta H^\circ$ $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right)$ $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{kg}\cdot\text{Fe}}\right)$	$\lg K_p = f(T)$
$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO}$ $= 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	-52,963 -157,42	$\lg K_p = \frac{2726}{T} + 2.144$
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$	22,399 133,2	$\lg K_p = -\frac{1373}{T} - 0.341 \lg T$ $+ 0.41 \times 10^{-3} T$
$-\frac{1}{4}\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} =$ $\frac{3}{4}\text{Fe} + \text{CO}_2$	-25,28833 -602,1	$\lg K_p = \frac{2462}{T} - 0.99T$
$\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$	-13,60711 -242,9	$\lg K_p = \frac{688}{T} - 0.9$