

TIEKUANG
YUANLIAO
JINSHUHUA
GONGYI
LILUN

铁矿原料金属化 工艺理论

〔苏〕 IO. C. 尤斯芬等 著
侯希伦 译

冶金工业出版社

76.2/2
51

铁矿原料金属化 工 艺 理 论

〔苏〕Ю.С.尤斯芬 等著

侯希伦 译

36553/08

冶金工业出版社

(京)新登字036号

内 容 简 介

本书论述了铁矿原料的非高炉法还原过程的理论基础,探讨了氧化物固相反应的物理化学规律和固相热结理论,对使用固体和气体还原剂的氧化物还原以及反应床的还原规律作了热力学和动力学分析,阐述了金属增碳以及反应床的气体动力学和热交换理论,探讨了金属再氧化问题,提出了反应床还原过程的计算方法,分析了非高炉法生产钢铁的经济问题。

本书译自苏联冶金出版社1982年出版的Ю.С.Юсф-пин等编著的ТЕОРИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗО-РУДНОГО СЫРЬЯ一书。

铁矿原料金属化工艺理论

〔苏〕Ю.С.尤斯芬 等著

侯希伦 译

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街铁厂北巷33号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 8 1/2 字数222千字

1991年9月第一版 1991年9月第一次印刷

印数00,001~1,200册

ISBN 7-5024-0509-7

TF·112 定价7.40元

译 者 的 话

中国古代最早发明的冶铁技术，是以固体燃料作为还原剂实行固相还原的工艺。这就是原始的铁矿直接还原法。

现代，我国从1974年开始研究新的铁矿直接还原技术以来，经过半工业和工业规模的试验研究，正走向工业生产阶段。

国外目前的铁矿直接还原装置，单炉生产能力已经达到年产30~60万t，并且继续向大型化方向发展。

译者推荐本书是为了向我国钢铁、综合利用、粉末冶金、化工、国防工业等各领域的广大读者，提供参考资料和教学参考书。国外已出版的铁矿直接还原著作和国内译本，多为各种直接还原法和生产工艺过程的一般介绍。本书则主要是阐述直接还原理论。本书对铁矿固相还原的物理化学过程、固相还原的热结理论以及直接还原工艺科学的经济评价方法等方面的论述比较详细和全面。象这样的直接还原的系统理论书籍还未见出版过。此外，本书还介绍了评价直接还原工艺经济效益和经济分析的方法。这对于建厂选点、工艺方案选择都有参考价值。

译者多年来一直从事铁矿直接还原工作，衷心希望本书对我国的直接还原技术的发展有所帮助。本书承蒙董学经同志校对，借此机会深表谢意。

翻译错误之处，希望读者批评指正。

目 录

前 言	1
第一章 非高炉炼铁的前景	4
第一节 金属化原料在高炉炼铁中的应用	6
第二节 金属化原料在炼钢中的应用	19
第三节 复合矿中铁氧化物的金属化处理法	21
第二章 铁矿原料金属化过程	23
第一节 脱水、水化物及碳酸盐分解	23
第二节 固相中的化学反应	27
第三节 颗粒的固相热结过程	53
第三章 氧化物还原过程	69
第一节 固相的结构与性质	69
第二节 铁氧化物的结构与性质	77
第三节 铁氧化物的还原热力学	81
第四节 其它元素的还原热力学	93
第五节 有溶液的固体氧化物的还原特性	97
第六节 氧化物的还原动力学	99
第七节 各种因素对还原速度的影响	126
第八节 还原过程的各项指标	145
第九节 工业装置固定碳还原铁氧化物的特点	149
第四章 金属增碳	155
第五章 金属化过程的气体动力学和热交换特性	158
第一节 块状料床中的气体运动	158
第二节 金属化过程的热交换特性	164
第六章 金属化过程中有害杂质的行为	178
第七章 金属化工艺使用的铁矿原料和还原剂	181

第一节	对铁矿原料的要求	181
第二节	金属化工艺使用的还原剂	185
第八章	对金属化产品的要求	189
第一节	金属化产品的性质	189
第二节	金属化产品的氧化性	190
第九章	工业装置的还原及其计算	198
第一节	金属化原料的现代化生产方法	198
第二节	反应罐法的还原过程计算	207
第三节	竖炉法的还原过程计算	219
第十章	铁矿原料金属化工艺的经济评价	237
第一节	铁矿金属化工艺及其炼钢效益的评价方法	237
第二节	回转炉法生产金属化球团的技术 经济指标分析	242
第三节	金属化原料对炼钢效益的影响	252
参考文献		262

前 言

几个世纪以来，钢铁生产一直是按照两步法进行的：1) 将铁氧化物还原成铁，同时把脉石全部分离出来。还有些元素(碳、硅、锰、硫、磷及其他)从脉石或者从这些元素的氧化物中还原出一部分并进入铁相；2) 铁进一步精炼以获得指定成分的钢。第一步主要使用高炉，第二步主要使用转炉、平炉或炼钢电弧炉。表面上看两步法是复杂的，但是它与矿石直接炼钢的一步法相比却有很大的优越性。

第一，两步法能够得到指定牌号的钢种，可以使用任何铁矿原料，而不拘其脉石和有害杂质含量多少(铁矿原料的这些特性不影响两步法本身的可行性，只是影响其技术经济指标)。这就是说，所有含铁矿物都可以用两步法处理。

第二，两步法使用的设备(主要是高炉和氧气转炉)具有很大的单炉生产能力。现代大型高炉的日产量为1.0~1.2万t生铁。

第三，生铁中含有的某些元素在一定程度上对炼钢有利：铁水脱碳时，可以强化熔池的“沸腾”，使钢的质量得到很大的改善；铁水中的碳和硅发生氧化，使炼钢过程获得必需的大部分热能；降低金属的熔化温度等等。这些有利条件促使炼钢原料和动力消耗下降，还可以降低生产成本。在钢铁工业已经发展成为巨大规模的生产，而且世界产量仍然持续增长的情况下，更显现出它的优越性：

年	1964	1969	1974	1977	1978
产量, Mt					
生铁	308	408	512	483	509.9
钢	434	574	708	673	712.5
金属化炉料	0.7	2.7	6.7	8.8	15.0

人们对两步法一直在进行很大的改进，同时寻找利用铁矿原料直接生产钢铁的有效生产方法。全世界有上百种利用铁矿原料生产钢和铁的专利，其中有的专利于近15~20年间，在工业上获得了一定的推广应用。许多科学技术和科学普及性刊物，特别是外国出版社的刊物，对非高炉炼铁法产生浓厚的兴趣（外国出版刊物经常误将非高炉法与矿石的“直接”炼钢一步法混淆。关于类似概念上的错误和技术术语的不准确问题，见后述）。

世界各大洲金属化原料的产量都在增长。有些国家（例如近东地区）生产金属化原料是有利的。对某些地区金属化原料的生产意味着“两步法”的“完结”，可以说到21世纪时，这些地区采取非高炉法生产钢铁是唯一正确的途径。为了对总的工业发展和钢铁发展进行预测，必须对一个地区发展的各种途径和工艺流程进行严格的科学技术和经济分析。著者提出了这方面的分析方法。

建设世界最大的奥斯科尔电冶金公司（Оскольский Электрометаллургический комбинат），并且采用非高炉炼铁新工艺，这使研究金属化原料的生产过程成为极迫切的任务。可是，到现在国内外还没有一部阐述金属化原料生产及理论的书籍问世。铁矿原料的金属化过程有许多内在的特点。要想掌握这些特点，读者仅仅阅读一般的生铁冶金教科书和读物是不能满足的。值得提出的是本书对非高炉冶炼新工艺的一些看法是首次提出的（例如对金属化原料的要求，对制取还原剂过程的想法以及金属化原料防止再氧化问题等）。

本书与已经出版的В.Ф.克尼亚泽夫（Князев），А.И.吉梅利法尔伯（Гиммельфарб），А.М.涅苗诺夫（Немцов）以及И.Ю.科热夫尼科夫（Кожевников）的著作不同。本书的重点不是介绍非高炉炼铁的各种方法，而是论述金属化原料生产工艺理论。由于缺少解释金属化工艺理论的实践资料，本书的部分准备工作变得复杂了。

著者将非常感谢读者对本书的内容和一些观点提出批评和建

议。

读者会注意到书中没有利用金属化原料炼钢和关于钢的性能方面的介绍。这是因为著者考虑到上述有关内容，另外有人撰写专著。

本书的第一至第四章、第六章、第七章由Ю.С.尤斯芬(Юсфин)著；第五章、第八章由Ю.С.尤斯芬及В.В.丹申(Даншин)著；第九章第二节、第三节由Ю.С.尤斯芬及Н.Ф.帕什科夫(Пашков)著；第九章第一节和第十章由В.А.皮塔捷列夫(Питателев)著。

装置或连续的联串装置，使矿石一步直接炼成钢，而只不过是传统的两步法生产钢铁的方案之一。当考察使用现代化方式生产金属化原料的可能性时，应当预先注意下面一些情况。

非高炉还原过程有各种目的：文献中（特别是外国文献）经常把这个还原过程叫作预还原，而把经过还原的矿石叫作部分还原料或者预还原料。这个技术术语不准确。对于进一步加工这些原料（在高炉、炼钢炉或其它冶金炉冶炼），预还原的主要意义在于有多少金属从氧化物中被还原出来。一般采用的还原率表示方法不能明确还原过程中生成的金属铁数量。所以把这种原料叫作金属化原料或者部分金属化原料比较准确，而对它们的质量，用专门的数值——金属化率来评价比较合适。金属化率是指金属化原料中的金属铁与全铁（即氧化亚铁的铁与金属铁的总和）含量之比：

$$\eta_{\text{金}} = (\text{Fe}_{\text{金}} / \text{Fe}_{\text{全}}) 100, \% \quad (1)$$

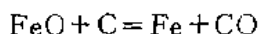
已知全铁含量和金属化率即能算出加入冶金炉的金属铁量（以质量计）。

最近也有使用有效金属化率这个概念的：

$$\eta_{\text{金}}^{\text{有效}} = \eta_{\text{金}} + 6[\text{C}] \quad (2)$$

式中 $[\text{C}]$ ——金属化原料中的含碳量，%。

式（2）为经验公式，其含义是清楚的。金属化原料中的碳在进一步熔炼过程中可以还原铁的氧化物，如



1mol铁需要 $12/56 = 0.214\text{kgC}$ 。若是把全铁量算为近似100%，则每5mol的碳可以增加1%金属化率。

目前非高炉还原法可在四个方面应用于工业生产：

- 1) 生产部分金属化原料用于高炉炼铁；
- 2) 生产金属化原料用于电炉炼钢和其他炼钢；
- 3) 铁氧化物的金属化工艺用于处理复合多金属矿；
- 4) 用铁氧化物的金属化工艺生产铁粉。

最后一个方面是特殊的领域，有专著论述，因此不在本书中

介绍。其余三个方面根据它们的发展前途进行简要论述。

第一节 金属化原料在高炉炼铁中的应用

高炉使用金属化原料（主要是球团，很少用烧结矿或块矿）明显的目的是降低直接还原反应所消耗的那一部分碳量，从而减少还原过程热量消耗。众所周知，焦炭除了满足冶炼所需的热量（在此情况下称焦炭为碳载热体源）外，还起另一个重要作用——参与生铁的形成，即还原难还原（实际上是不能被气体还原剂还原）的二氧化硅、氧化锰和铁氧化物（在此情况下称焦炭为碳还原剂）。虽然还原气也可以还原铁氧化物，但是在高温区还原气并不能使铁氧化物完全还原为金属铁，即仍有一部分铁以铁氧化物（主要是 FeO ）形态存在，只有依靠氧化亚铁的直接还原反应（超过 $900\sim 1000^\circ\text{C}$ 时反应活跃）才能还原为金属铁。从现代高炉冶炼水平看（焦比较低，焦炭中的固体碳燃烧产物即还原气量较少）这样的状况可能是有规律性的。可以证明这一点的是在 $800\sim 1000^\circ\text{C}$ 的温度区域，对应的 FeO 接近于气体的平衡成分。

喷吹天然气（重油及其它喷吹物质）主要增加了氢气，使气体还原剂量剧增，并明显降低了铁的直接还原度 r_d 。有人提出过几个天然气喷吹量与直接还原度变化的关系式。这些公式有的是根据实验数据处理，有的是根据理论作了些假定而建立的。然而，即使现代化高炉采取喷吹高配比的天然气的操作制度，占炉料中总铁量 $20\sim 35\%$ 及以下的铁，仍然要依靠固定碳进行直接还原。依靠增加天然气的办法进一步降低 r_d 的潜力几乎挖掘殆尽。因为大量增加天然气，会严重破坏冶炼的气体动力学和热制度。

可见，进一步降低铁的直接还原度的唯一重大措施是高炉使用金属化原料。60年代有些研究单位，如苏联黑色冶金研究总院（ЦНИИЧМ），列宁格勒工业学院（Ленинградский политехнический институт），莫斯科钢铁学院（Московский инст-

ИТУТ стали и сплавов)^[1~3], 法国钢铁研究院^[4] (ИРСИД) 等单位做过金属化原料高炉冶炼效果的计算。下面列举简易计算方法 (以1t生铁为基准进行计算)。

计算用原始数据 (高炉炉尘忽略不计):

生铁成分, %

[C]	[Si]	[Mn]	[P]
4.0	1.0	1.0	0.1

原始焦比 500kg/t; 焦炭含碳量85%; 焦炭含灰分10%;

炉渣碱度 $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1.2$;

风口燃烧碳 C_d 与直接还原碳 C_d 的比例为3:1。

固体碳消耗量为 $500 \times 0.85 = 425\text{kg/t}$ 。

进入气体的碳量即减掉进入生铁的碳量为

$$425 - 40 = 385\text{kg/t}。$$

直接还原消耗的碳量为 $385 \times 0.25 = 96\text{kg/t}$;

从这些碳中求出难还原氧化物 (Si, Mn, P) 的还原消耗碳量为:

$$\begin{aligned} & \{[\text{Si}] \cdot 24/28 + [\text{Mn}] \cdot 12/55 + [\text{P}] \cdot 60/62\} \times 10^{\text{①}} \\ & = (0.857 + 0.218 + 0.1) \times 10 = 11.75 \approx 12\text{kg/t}。 \end{aligned}$$

铁氧化物的直接还原消耗的碳量为:

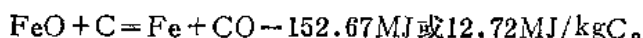
$$96 - 12 = 84\text{kg/t}。$$

当高炉炉料的金属化率 $\eta_{\text{金}} = 40\%$ 时, 假定铁直接还原碳的消耗降低的数量与炉料金属化率成正比关系 (误差不大), 则碳耗量可以降低:

$$84 \times 0.4 = 33.6\text{kg/t}。$$

可以节省焦炭 $(33.6/425) \times 100 = 7.9\%$ 。

此外, 碳还原铁氧化物为吸热反应, 此项可以节省热量为 (假定还原游离的铁氧化物):



① 换算为1t生铁。

碳消耗量降低33.6kg, 可节省热量

$$12.72 \times 33.6 \times 0.001 = 428 \text{ kJ/kg生铁}$$

一般高炉冶炼的热平衡(按冶炼过程实际热耗计算)为5.5~6.7MJ/kg。

取热耗为6.3MJ/kg, 则可节省热量

$$(428/6300) \times 100 = 6.8\%$$

还有一项节焦, 即入炉焦炭灰分减少, 使渣量也减少。

总节焦量尚为未知数。假定节焦量约为15%, 则灰分的减少量为

$$500 \times 0.15 \times 0.1 = 7.5 \text{ kg/t}$$

这些灰分不需要加熔剂和造渣, 则可减少渣量为

$$7.5 \times 1.2 = 9 \text{ kg}$$

总计减少渣量16.5kg。

根据文献[5]的数据, 每1kg渣必须消耗0.2kg焦炭。降低渣量节焦 $16.5 \times 0.2 = 3.3 \text{ kg焦炭}$ 或者 $(3.3/500) \times 100 = 0.7\%$ 。

总节焦量为 $7.9 + 6.8 + 0.7 = 15.4(\%)$ 或者按习惯说法, 高炉炉料中每增加10%金属化率, 可以节省焦炭3.85%。

本例为近似计算, 只能得到所求数据的数量级。文献[1~3]的计算是按A.H.拉姆(Памм)的综合法进行的, 也是不能得出准确的结果。这是因为把间接还原度 R_i 、气体化学能利用率和热损失的假定数值作为原始数据了。所以, 综合法与本计算例的结果大致相同。

苏联、美国、加拿大、日本所做的冶炼试验表明, 高炉炉料金属化率在0~50%范围内, 炉料金属化率每增加10%, 可提高产量4~7%, 降低焦比5~7%[6]。

高炉使用金属化原料的主要问题, 是寻找金属化原料的合理生产方法。

根据以上计算结果得出两条结论:

- 1) 大多数情况是预计节焦量比实际达到的值低;
- 2) 金属化率升高(特别是超过30~50%), 单位节焦量(即

炉料金属化率每增加10%对应的节焦量)总是下降的。

从上例的节焦计算看根本不能解释结论(2)。因为新生成的金属和炉料原有金属化率无关,而是由于依靠继续降低直接还原度(节约和以前相同的碳量和热量)的结果。

如果运用奥克曼—巴甫洛夫(Оксерман-Павлов)原理,金属化率增加时,节焦“比率”不是减少而是增加,因为改善高炉冶炼和增加冶炼过程的热量有效作用系数,将会节省更多的热量。

对增加高炉炉料金属化率引起节焦“比率”降低的问题,迄今还没有找到真正的解释。但是,如果意识到高炉冶炼金属化炉料时发生的其它现象就可以解释了。让我们详细考察一下这个问题吧。

原料经过金属化还原处理后,使原料的“冷”强度(即贮存和运输强度),特别是“热强度”(即还原时的热态强度)显著提高。铁矿原料的还原主要在赤铁矿—磁铁矿相变时发生破裂。 FeO 还原到金属铁时较少发生破裂,生成金属铁后会明显降低矿石的破裂性,因而在炉内生成的粉末量大减,以致促进高炉产量明显增加。对于各种冶炼条件来说,每减少1%的粉末入炉,可增加产量0.5%^[7]至1%^[8]。因此,当炉料配用金属化原料时,提高产量的效果是同炉料中减少粉末量有关的,而且难于预先估计。金属化原料的强度不仅同其金属化率相关,也同其生产工艺相关,下面讨论一下这个问题。

除了上述因素以外,其他因素也影响产量的增加。冶炼金属化原料时,可以改善和强化炉料与气体之间的传热和炉料的预热。应当提醒的是还可能改变原料的堆比重以及增加焦炭负荷。从铁矿的金属化工艺、使用的还原剂种类和达到的金属化率情况看,金属化原料颗粒的密度可能增加,也可能减少或者不变。第二章将对此问题加以详细论述。使用气体还原铁矿原料时,其金属化率愈高则其密度愈大,使用固体碳还原时也保持这样的趋势,但是一般来说,其密度的绝对值是低的,甚至比还原前的氧

化铁矿原料更低。一般情况下，金属化球团的密度和堆比重比金属化烧结矿大。从这个观点讲，金属化球团比金属化烧结矿对产量的影响要大些。

有时把炉料含铁量的增长，作为评价影响高炉冶炼指标的独立因素，并且把金属化原料冶炼的作用和金属附加物冶炼的作用两者等同对待。这是错误的。因为金属附加物和金属化原料有区别。前者几乎不带有造渣物质，而金属化原料虽然含铁高，但脉石量也很高。

应当指出，炉料中粉末量的锐减以及靠节焦增加矿石负荷，可以提高高炉产量。前面在评价高炉冶炼金属化原料的效果时，使用了生产数据，以便计算产量的增长。

根据以上数据，炉料金属化率为20~40%时，高炉产量增加15~25%。

提高炉料的还原热强度造成的产量增加，只能在炉料低金属化率时体现。因为进一步提高金属化率原料的还原热强度变化小了。以后的产量增长，纯粹是由于冶炼中节约了固体燃料的结果。这样才能解释随炉料金属化率上升，产量的增长率有所降低的现象。

采取降低热损失的措施，可以体现增加产量对焦比的影响。取热损失为20%（按真实热平衡算法所得值）和产量增长为25%。则降低热耗的最大值为（所以，也是节省焦炭消耗）：炉料的金属化率每增加10%降低热耗5%或1.25%。另外，冶炼金属化原料可使炉顶煤气温度降低一些（30~40℃），从而节焦1%。那么冶炼金属化率 $\eta_{\text{金}}=40\%$ 的金属化炉料的总节焦量为：炉料的金属化率每增加10%，可以节焦5.0~5.5%。看来，这已接近节焦的极限值。重要的是炉料金属化率超过30~40%以后，节焦“比率”下降，这同高炉产量的增长有关系。图2表明了这一点。图中示出节焦变化曲线和构成节焦的各种因素。

曲线1表示减少直接还原度对降低焦比的影响。根据上面的讨论和计算说明，节焦与炉料的金属化率成正比。曲线2表示，

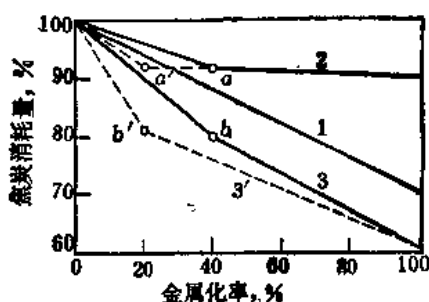


图 2 高炉炉料金属化率对焦比的影响

由于减少炉墙和炉顶热损失而降低焦比的情况。实践表明，只是在炉料的金属化率低的阶段，炉顶煤气温度才有降低的趋势，达到相当低的数值，以后的阶段则几乎不变。这可以把因炉顶和炉壁热损失减少造成的节焦，总和为一个指标，尽管它们的原因有所不同。即第一种情况是由于炉料水当量增长的结果；第二种情况是由于炉子产量增长的结果。曲线 2 有两个线段：第一线段焦比的降低是明显的；第二线段节焦不大。曲线 3 为曲线 1、2 的总和。显而易见，曲线中的转折点 $3b(b')$ 相当于曲线 2 的对应点 a ， a 点的位置可视高炉冶炼的工艺条件而变化，主要与炉料的热强度及其堆比重有关。可以看出，炉料的金属化率为零时（例如，生产浮氏体球团）， a 点在纵坐标上位移也能得到热强度高的原料。在严重短缺燃料时，生产还原强度好的浮氏体球团，使金属化用的燃料消耗降到最低值，又使高炉获得节焦效果，这可能是有利的。

图 2 表示的是简化曲线。随炉料金属化率的增长，高炉冶炼的技术经济结果按照比较复杂的规律变化。直线变曲线，但总趋势不变。从图 2 得出最重要的结论是存在表示金属化原料冶炼效果的两个线段，其初始线段具有比较好的冶炼指标，这个情况在任何冶炼条件下都是有效的。根据以前的讨论，转折点或者更准确地，转折区域可能会移动，但经常位于金属化率为 30~40%