

# 铁矿石的直接还原

； 杰克·罗伯特·米勒

生产钢铁的铁矿石是一种氧化物，即是铁(Fe)和氧(O)的化学化合物。一般的矿石是赤铁矿( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )和磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )。要把矿石炼成铁，必须用熟知的还原方法使氧原子和铁原子分离。通常是使氧同碳、氢或一氧化碳反应而达到分离，剩下金属铁。最普通的炼钢方法是熔炼矿石获得(含有被还原元素的)生铁和(含有所有被氧化的以及未还原的物质的)渣；然后在炼钢炉中熔化和精炼生铁。在这一方法中，铁矿石的还原被看作一种附带的中间手段，因而通常把这种还原方法叫做间接还原。但是，近几年来，不使矿石熔化而使氧和铁分离这一古老的直接还原方法正在好转，并且认为对于炼钢工业是一个重要的技术，特别是在发展中国家。

最早知道的，从铁矿石提取铁的方法中就有直接还原法。在1556年出版的《De re metallica》一书中，乔治乌·阿格里科拉(Georgius Agricola)叙述了三种炼铁法，其中第一种是从矿石直接还原出可锻铁，这是一种主要的方法，加热使矿石产生一种糊状物质。大约2500年以前，人们就可以将上述的糊状海绵铁通过锻打制成铁制件。之所以叫海绵铁，是因为铁不经熔化而除去了矿石中的氧，剩下一种与海绵相似的蜂窝状结构。海绵铁是在一个浅底炉中添加木炭和铁矿石制成的。向炉子中燃烧木炭通入空气增加热量。所给的温度，不足以熔化铁(铁的熔化温度是 $1538^\circ\text{C}$ )，可是能熔化矿石中的杂质，剩下被还原了的热块铁，这种热块铁可以从火中取出再进行加工处理。

通过很长的时间，这种浅底炉发展成了

一种较高的炉身，并且加深了炉中木炭层(近来是焦炭)和矿石层的深度，增加了鼓风的强度。带来的一个结果是，获得了较高的铁生产率和较低的燃料消耗。因为，气体从热区域向上移动经过预热，也使矿石预热。随着温度增加，铁吸收了更多的碳，结果使铁的熔点降低，致使铁熔化。这一发展及时地导致了现代高炉，它是今天还原铁矿石的主要方法。

从高炉得到的铁水是较为不纯的，因为它从木炭或焦炭吸收了碳和硫，并且从矿石杂质中吸收了硅。要使生铁炼成钢(规定要把铁水碳含量精确地控制在1.7%以下)，必须除去硫、硅和过剩的碳。炼钢是在熟悉的酸性转炉、平炉、电弧炉和碱性氧气转炉等装置中进行。

常规的炼钢方法包括高炉和吹氧转炉，它们足以适应大规模生产。一个单体高炉可能具有日产7000—10000吨生铁的生产能力。上述这样的设备投资在7000万美元以上，再加上几乎相当投资的焦炉及其他设备。然而，具有生产海绵铁的直接还原装置和电炉的小型钢铁厂，可以用电炉将海绵铁炼成钢。这种小型钢铁厂的年生产能力在10万吨以下，这种小型厂的投资较低，所以，直接还原特别引起了许多发展中国家的兴趣。

## 一百年来的进展

直接还原作为代替常规的生产钢铁的方法，甚至在发展中国家也不是新的设想。

1856年威廉·西门斯(William Siemens)开始试验直接从铁矿石炼钢。(在此12年前

西门斯设计了第一个平炉，10年以后他又介绍了电弧熔炼)。他在回转窑中对粉矿和燃料的凝合料进行了还原。由回转窑生产的海绵铁通过下面的耐火材料导管投入炼钢炉膛上的铁水熔池。1873年在美国钢铁学会报告了实验结果。西门斯希望，由于有关燃料经济性、节约劳动力和生产材料的质量方面有巨大的实际利益，直接炼钢方法是可实现的。

在发表这一结果后的四年间，西门斯建设和操作了三个水平式直接还原回转窑。然而，在1877年他放弃了这一工程，因为生产出的棒铁的成本太高，并且成分的变化很大。西门斯使用的原料是从北安普敦州（英国）买来的，来自原料中的硫和磷，带来了严重的质量问题（西门斯的炉子就建在这儿）。西门斯认为，在装置中只使用富矿和纯净的燃料就可以避免质量问题。

西门斯试图借助炉子中铁矿石的氧和碳含量随着温度增高的变化图，对直接还原的物理特征作了解释。在常规的钢铁冶炼方法中，矿石是进到高炉炉身中被加热和熔化。在约1050℃，氧化物约被解吸出原始氧含量30%的氧。温度达到1550℃时，原来加入高炉中的原料完全在炉膛中熔化。熔体分为两层，在铁水的上面是液体渣，而在铁水中被还原的元素有碳、锰、硅、硫和磷，氧化物（如氧化钙、二氧化硅、三氧化二铝、硫、锰及某些铁的氧化物）被溶解在渣中。从炉子中放出的铁水含铁90—95%，含碳3.5—4.3%。铁水准备在炼钢炉中进行精炼，在熔炼中除了除去十分之几吸收碳外，并把从矿石和燃料中转移来的杂质降低到容许的含量。

西门斯希望，使铁矿石一直处在固体状态，而能完全除去氧。认识到生成的海绵铁将含有原有物料中的所有脉石（矿石中的岩石成分）和杂质，他计划使用极高品位的铁矿石。在把得到的直接还原产物进行加工处理成棒铁时，西门斯大概有意在直接还原后

的物料中加入少量的碳和其他物质，然后以简单的方法炼成钢。

可惜，世界上质量完全合乎19世纪70年代西门斯提出的目标的矿石资源不多。大约50年后在瑞典才知道有最富的矿石存在，加上与廉价的电力相结合，对于直接还原重新出现的兴趣，提供了有利的条件。在20世纪20年代发明了威伯格法（Wiberg）和赫加内斯（Hoganas）法两种方法，现在仍然适合于生产少量的铁粉，铁粉在高压下可以成形为复杂形状的小零件。然而，瑞典的经验表明，要实现工业规模的炼钢，必须熔炼直接还原得到的海绵铁，以便在精炼中除去脉石。由于这一熔炼阶段所带来的附加成本，一直影响了对直接还原的更广泛的兴趣，从那时起大约有25年之久。

在1950年左右，由于确立了电炉作为一种主要的炼钢方法，使直接还原的地位有了突破。电炉法不同于酸性转炉法、平炉法和顶吹氧气转炉法。酸性转炉法是1870—1910年期间的主要炼钢法；在1910年后，平炉炼钢法一直保持了50年的领先地位；而现在，在工业中主要的炼钢方法是顶吹氧气转炉法。这后两种方法的作业最好，可以用大容量炉子的铁水，分两步把铁矿石炼成钢；但是，电炉在应用少量固体废钢加料方面，是理想的。

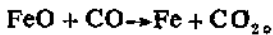
在1950年，世界范围内钢的需要量比预期的有显著增加，钢铁工业正在寻找新的更好的原料来源，并探索改善技术方法。钢产量确实在增加；1950年世界的钢产量是19000万吨，最近几年达到65000万吨。直接还原和电炉熔炼相结合显示出了达到上述两个目标的可能性。从1950年至1975年间，钢铁工业研究了大约100种直接还原方案。其中大约有12种方法经过大力研究，并且在半工业试验阶段进行了试运转。现在有些方法也得到工业应用，而有几个工厂按照另外的设计，正在建设中。

在任何一个直接还原方法中，铁矿石转

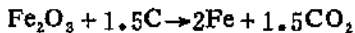
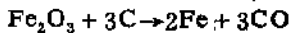
变为海绵铁，都是由下述除去矿石中氧化铁的氧的反应来实现的，在这一反应中是使氧与气体（氢或一氧化碳）或与固态碳化合。按照使用的还原剂的不同，可以叫做气体直接还原法或者固体直接还原法。

一般，直接还原铁不是最后的产品。它是一种高级的铁矿石，可以把它看做预还原产品，可以进一步冶炼成铁或钢。其预还原度可用金属铁产品的含量与产品的总铁量之比来度量；这一比值用百分数表示，称之为金属化率。

气体还原的机理可以用小球团加以说明，球团的核心是赤铁矿，周围是磁铁矿，更外一层是维氏体壳（FeO），最后的多孔外表面是铁。很容易使还原气穿过外层达到粒子的赤铁矿核心，然后又从核心向外扩散。在这三个界面间产生反应的最终结果是，直接向外连锁排出氧，除去水蒸气或二氧化碳，而最后的产品是还原铁。每一个界面的化学交换过程都相似；就维氏体与一氧化碳的反应而言，其反应是：



氧化铁用固体碳还原的过程包括两个反应：

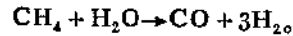


一般两个反应同时进行。两个反应都是吸热反应，即反应时都要吸收热量。与生成二氧化碳的反应相比，生成一氧化碳的那个反应需要二倍的煤（3C与1.5C相比较）。因而，这后一反应对用固体还原剂的直接还原是有利的。因为，平衡状态限制了二氧化碳和一氧化碳混合气中的一氧化碳的量，所以，从以二氧化碳和一氧化碳含量不同的煤为基础的直接还原过程中得到的气体产物以及相应的能量消耗量是不相同的。

## 气 体 还 原

在气体还原中，通常还原剂是一氧化碳

和氢的混合物。目前，这种混合气主要是在催化剂存在下，把天然气进行裂化而得的。天然气的主要成分是甲烷（CH<sub>4</sub>）。制造一氧化碳和氢的普通方法是蒸气转化法，该法的反应是：



另一个制造还原气的方法是煤和蒸气间进行的水气反应法（水煤气法）： $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ 。近几年来，许多研究者进行了以气化石油作直接还原还原气的研究。在使用从焦炉、高炉和生产生铁的电热炉中的废气方面，也有很大的注意，上述各种气体都具有很高的发热值，在还原铁中是十分好的。

获得高还原度所需的时间随着混合还原气中氢的浓度下降而减少。在现行的直接还原操作中，就经济性的原因而言，最好选择含一氧化碳75—85%的裂化气。理论上用上述的混合还原气，1小时左右可以达到95%的还原率，可是实际上在现有操作的装置中都需要3—4小时。看来存在着改进现行方法的可能性。

直接还原用的理想的铁矿石，应该具有高的含铁量（大于60%），低的杂质含量及小量的脉石（4%以下）。这种铁矿石应该是易于用气体和固体还原剂进行还原的，有适当的自粘结性，无膨胀，从而易于制成球团。作为原矿或球团，矿石都应有一个多孔的外表面，足以使气体具有良好的渗透性，并有足够的耐磨损强度；其内部结构应该是开放的，足以使气体易于在里面扩散，而且应该有一定的强度，足以经受得住预热的、加压和磨损过程中机械的和热负荷的冲击，而这些冲击在大批处理时，都必然会碰到。

上述这样理想的铁矿石无疑几乎是不存在的。虽然如此，具有大部分这样的优点的相当数量的矿石是可以利用的，其中有些是应用它们的天然原矿，而大多数要经选矿后才能应用。与直接还原会得到更普遍应用的设想相反，直接还原不是对任何矿石都能处理的。

在直接还原中，不是任何一种煤都可作为固体还原剂。在一定温度下，碳的种类不同，反应速度大不相同。在使用固体还原剂的直接还原过程中，含碳物料还原氧化铁的速率，即反应能力，通常比铁矿石的还原性更重要。也要考虑煤中硫、磷和挥发物质的量。一个特别麻烦的污染是灰份，不仅要考虑它的数量，而且要考虑它的成分以及它的熔化温度。在这一方面，煤质低劣的话，有形成糊块的趋向，更经常的是在回转窑的内壁上形成透明状的窑环。这样一来势必降低生产率，甚至完全停止操作，通常每隔几周就要把窑环去除一次。

## 主要的直接还原方法

1976年底前，在操作中或处在各个不同投产操作阶段中的直接还原装置有41个。这些装置分别采用12种不同的设计方案。大部分（25座）装置是气体还原，而其中21座装置只是依尔法（HyL）和米德雷克斯（Midrex）法两种方法。依尔法是墨西哥的镀锡板和薄板公司（Hojalata y Lamina）发明的方法；米德雷克斯法是美国米德兰-罗斯公司提出的方法。在16座固体还原装置中包括15座回转窑装置；这些回转窑装置中有11座是SL/RN装置（是取参加发明这一方法的四个公司名字的第一个字母而命名）或者是有关这一方法的改进装置。现有的设备大部分是由几家钢铁公司和设备制造厂家设计的。

依尔法和米德雷克斯法由于得到十分普遍的承认，因而有了很大的增长，主要因为这些装置（至少有两个有代表性的装置）投产后在三至六个月内，便可达到工业操作水平。上述方法都使用气体还原剂，由裂化天然气制得的还原气，在一个圆柱反应罐中逆流通过铁矿石。根据同一原理，阿姆科钢公司（Armco Steel Corporation）和奥古斯特·蒂森冶金公司（August Thyssen-

Hutte A. G.）也发明了一种方法。第一个依尔法装置是1957年在墨西哥实现工业生产的；第一个米德雷克斯装置是1969年在美国俄勒冈的波特兰（Portland, Ore.）开始投产的；阿姆科公司1973年在休斯敦（Houston）开工一个厂；而蒂森普罗费尔（Thyssen Purofer）装置是在1976年初投产的。

依尔法是在四个反应罐中完成铁矿石的直接还原，每个罐中以固定层方式盛装铁矿石。反应罐单个进行操作，每一个罐的一个处理周期分为四个阶段：预热，还原，冷却和卸料。四个反应罐共用一个闭路循环的公用气流。

在第一阶段，原料用回流废气进行预热。然后用来自冷却阶段的新鲜气体将矿石还原成海绵铁。接着，用裂化工段来的新鲜气体冷却海绵铁；在这一阶段完成还原过程，最后，从反应罐的底部卸下还原产物，再从顶部加入新矿料。每一个阶段大约需要3个小时，因而，完成整个还原周期约需12个小时。在任一给定时间，每个反应罐都处在一个生产周期的四个阶段中的某一个阶段上，因此，物料实际上是连续流经整个装置的。

依尔法系统得到的还原产品，其金属化率为83—90%，含碳量为1.5—2.2%，这一含碳量是由仔细控制冷却保持下来的。冷却也是为了稳定铁，以便当它从反应罐卸出曝露在空气中时，防止发生迅速再氧化。

## 其他的气体还原方法

米德雷克斯法产品的金属化率为92—95%，是把铁矿石和球团混合加入竖炉中。裂化气从导管通入竖炉半高炉身，它通过从上向下加料的矿石和球团向上运动，在约760℃下，在炉子上部进行还原，被还原的海绵铁在下部进行冷却。

还原气用天然气及部分从金属化炉顶回收的使用过的废气这两者的混合气进行裂化

转化制得。进入炉子的块矿和球团含铁65—69%，比较理想的粒度是9—16毫米。粒度范围应尽可能小，并要避免细粉和球团破裂，这才合乎需要。

还原产品的碳含量为0.7—2%。瑞典球团的脉石含量很低，只有1.7%，而加拿大的矿石，脉石含量高达7%。米德雷克斯法达到95%的金属化率的时间约为6小时。用钝化处理来限制还原产品的再氧化，钝化处理是使之在海绵铁的表面形成一薄层氧化物复层。然后将处于保护状态的还原铁在海上运输9656公里（6000英里）以上的距离，而再氧化的损失小于5%，在容许范围之内。

阿姆科和普罗费尔装置，在设计和操作原理上十分类似于米德雷克斯法。两种方法都要求矿石和裂化气在竖炉中进行对流接触。矿石的进料都差不多，金属化率一样，为95%，能量的需要量相同，还原温度相差不大，阿姆科法为900℃，而普罗费尔法为1000℃。阿姆科海绵铁与依尔法和米德雷克斯法的产品相同，海绵铁是12.7毫米（1/2英寸）粒度的块料；而普罗费尔法的产品是团块，因为团块的表面积小，不容易发生再氧化。

使用流态化床技术的其他两种气体还原法是，美国钢公司（United State Steel Corporation）发明的希伯（HIB，即high-iron briquette）法，亦叫高铁团块法，和埃克森公司（Exxon Company）发明的、由阿瑟·G·麦基公司（Arthur G. McKee & Company）设计和发起的非奥尔（FIOR，即fluidized iron ore reduction）法，亦叫流态化铁矿石还原法。在控制一定温度和速度的条件下，气体向上流动使固态细矿粉象液体一样流动，而铁矿石和裂化天然气之间就发生还原反应〔见《Scientific American》，1968，Jaly, H. William Flood和Bernard S. Lee：“流态化”一文〕。在委内瑞拉建立了两套装置，把本地的矿粉处理成还原铁团块。非奥尔法产品的金属化率

为88—93%。希伯法团块主要是作为高炉炼铁时的炉料，而不是作电炉炼钢的炉料，其金属化率为70—75%。还原产品的含碳量，非奥尔法产品在2%以下，希伯法团块约为1%。

在流化层中，细矿粒与还原气紧密接触。紧密接触可增进良好的传热率及化学反应率，可是与其他气体还原法需要能量少的特点相较，所需的能量较多。

在气体还原装置中，通过精心地设计气体的密闭系统，可以使由应用气体带来的空气污染保持在容许的最低水平。由于在反应炉和料仓加料卸料处的水系统和灰尘控制系统充分使用过滤器，所及减少了颗粒的飞散。采用普罗费尔法的工程师们断言，铁矿石直接还原与电炉炼钢相结合可以减少大气污染，与一般高炉和碱性氧气转炉相结合的设备的污染相比，空气污染减少一半，噪音只有后者的五分之一。

虽然，100多年以前西门斯就利用回转窑进行了直接还原试验，可是现行的回转窑设备（以煤作为还原剂）是从1925年和1935年之间德国发明的方法发展起来的。本文叙述了SL/RN法；另外还有几乎与SL/RN系统相同的克虏伯（Krupp）法，还有几种应用相似原理的改进装置。在所有固体还原剂方法中，SL/RN法得到了十分广泛的重视。

## 固体还原剂法

SL/RN系统结合了大约20年前介绍过的两个设计方案的设想。一个设计是原有的SL法，有一个与水平位置稍分倾斜的回转圆筒，以便从一端加入的矿石和还原煤，借重力通过几个加热区，然后从另一端卸出。另一个是RN精炼装置，它沿着圆筒的长度，增加一排燃烧器系统，由于可以调节燃烧器中输入的燃料，因而在窑内可以维持任意的温度分布。SL/RN系统的有代表性的窑，长约100米，直径3—4米。

矿石以小颗粒原矿或小团矿加入回转窑中。还原剂来自含碳范围较广的固体物料，最好使用含硫量低而灰份熔点温度高的物料。为了降低硫的含量，加料中可能包括石灰石和白云石。通常使用的辅助加热燃料，有天然气、炉顶气（废气）和燃油等。

铁矿石和粉煤的混合物在通过回转窑时，被加热到1100℃左右。整个过程需要3到5小时。为了减少热损失，通常在窑中使来自矿石层的一氧化碳进行燃烧。然后从窑中卸出混合产品并进行冷却，经过筛分使含铁产品与煤炭等物料分离。由于将煤炭循环使用，因而回转窑中总是含有过剩的还原剂。得到的海绵铁的金属化率为92—95%。

直接还原用的、以煤为主的回转窑法，发展相当缓慢。由于难于解决它所碰到的机械问题和操作问题，若干设备推迟了达到工业生产操作的水平。然而，由于创立回转窑系统的人们百折不挠的努力，近年来，新西兰、南非、日本和巴西的回转窑装置都有改善结果的报导。1975年有两个SL/RN装置开始投产；一个是在加拿大的一个铁矿已经建立的用煤作直接还原的最大装置，年产海绵铁40万吨，另一个是在美国亚利桑那州，年产海绵铁6万吨。

1976年正在提出两种新方法的工业装置。在加拿大的萨德伯里（Sudbury）的艾利斯·查默斯（Allis-Chalmers）回转窑，使燃料喷射系统穿过回转窑底上的加料层进行燃烧。该装置可以使用轻、重油以及油、煤的混合燃料进行还原。另一个装置应用了金洛-米托（KM，即Kinglor-Metor）法，该装置是一个单一的固体碳系统，不包括回转窑。铁矿石、煤和溶剂料向下通过竖炉的预热带和还原带，竖炉是外热式。海绵铁的金属化率85—95%，用一个圆柱状装置生产，年生产能力为2万吨海绵铁。1976年在意大利米兰附近，一个具有两个圆柱形竖炉的装置预定要投入生产。

1970年，炼钢用直接还原铁的产量和消

费量只是100多万吨。预定到1980年前投产的直接还原装置的生产能力将是3000多万吨。过去10年，直接还原的发展特别快。1965年，工业规模的直接还原仅有墨西哥的两个装置，每年只有35万吨海绵铁的生产能力；1975年末，在9个国家内出现了25套装置，具有总数600万吨的年生产能力。对于这一发展趋势的重要影响，是1973年表明的依尔法和米德雷克斯法的技术可以转换，即从现有设备得到的经验可以迅速地运用于新设备，因而使新设备开工后几个月就可达到良好的操作水平。

## 直接还原和世界的钢铁工业

1969年，作者曾作过预言，世界海绵铁的产量，在1980年将达到6000万吨左右，1985年可能达到12000万吨以上。若工业可以达到曾预言过的增长速度的话，上述估计数字是可以出现的。在1985年，世界钢的年生产量和消费量预计为10亿吨/年。若要达到这样的数字，就需要以直接还原作为已经建立的炼钢技术的补充。

作者预言的世界的原钢的生产量和消费量，1980年为91500万吨，1985年为102500万吨。作者预见到1980年海绵铁的需要量6400万吨，其中炼钢需要4200万吨，铁生产需要2200万吨。到1985年，海绵铁总量将达12400万吨，其中炼钢的8800万吨，炼铁的3600万吨。若直接还原达到了这一生产水平的話，那末，高炉生产的生铁产量以及焦炭的相应需要量，在1980年将减少13.5%，而1985年几乎减少22%。并且直接应用还原铁还将缓和世界上废钢供应的紧张状态，而这种废钢供应的紧张状态，在1980年后，大概将变为长期性的。

已经预定1980年操作的3000多万吨的直接还原生产能力，几乎仅仅是根据作为加到电炉中进行炼钢的原料产量估计的。然而，以块矿和球团大小进行预还原的铁，在

碱性氧气转炉中用它代替废钢也是很适合的，再说，随着更大量的海绵铁可以利用，而废钢供应量更为有限时，增加的直接还原物料将被消耗在上述那样的炼钢炉中。

随着建造高炉投资的增加以及可利用的炼焦煤的减少，在常规炼铁中也将增加海绵铁的用量。许多试验已经确定，把预还原铁加入高炉炉料中可以改进炼钢操作。随着高炉中物料的金属化率增加1%，则高炉的出铁量可提高7%，而焦比可降低5%。

1975年前，对大部分直接还原铁在上述这些广阔范围内的需要量已经作了预测，不过由于那一年在委内瑞拉的发展，直接还原又有了不可估量的进展。在委内瑞拉工程师们计划大大扩大钢铁生产的奥里诺科河畔的马坦萨斯 (Matanzas)，那里一方面有藏量丰富的高级铁矿石、天然气和廉价的电力和水资源，另一方面，那里缺乏焦煤和废钢。在上述这样的一些条件下，直接还原与电炉炼钢相结合，认为比常规的高炉和碱性氧气转炉相结合的炼钢法好。在1975年12月的合同中提出了三个依尔法和三个米德雷克斯装置，总计具有年产320万吨海绵铁的生产能力。

## 比较分析

作者作为与委内瑞拉计划组一同工作的世界银行代表团的一员，在1975年初参与的一个分析中发现，用直接还原和电炉相结合炼得的钢，在质量上是比得上高炉和碱性氧气转炉相结合炼得的钢的；与常规方法相比较，直接还原电炉法的投资成本约低40%，生产成本约低20%；而且直接还原法的投资平均利润率显然也较高。以后，在对一个年产100万吨钢坯的工厂作更全面的评价时，作者发现，直接还原和电炉炼钢相结合的工厂的估算投资，约比高炉碱性氧气转炉法相结合厂的投资低32%，比使用废钢的电炉炼钢厂的投资低28%。用直接还原和电炉炼钢

相结合的方法生产钢坯的费用，估计分别比高炉碱性氧气转炉法低8%，比废钢电炉法低23%，并且，直接还原与电炉炼钢相结合有可能获得最高的利润。

综合的分析表明，每个方法的经济可能性严格地决定于该方法所用原料的供给情况及价格。高炉碱性氧气转炉法主要决定于焦炭或炼焦煤，废钢法主要决定于废钢的供应，直接还原电炉法主要决定于还原剂燃料。就上述的头两种方法说，可以选择直接还原铁作为重要的代用品；在高炉碱性氧气转炉联合法中，直接还原铁可作为高炉炉料的适量添加料以及碱性氧气转炉的适量的冷却剂，在废钢炼钢法中，直接还原铁可大量作为废钢的代用品。

综合的研究指出，直接还原电炉联合法的产品，在质量上和污染环境以及适于工厂应用的适应性等方面，都相当于或胜于常规的高炉碱性氧气转炉联合法的产品，另一个发现是，燃料费用的变化对直接还原电炉联合法的影响要比对高炉碱性氧气转炉联合法的小。就直接还原电炉法而言，燃料费用，电力和电极，总计相当于生产钢坯成本的四分之一，但是，在常规炼钢作业中，焦炭、氧气和电力的费用约占钢坯成本的三分之一。

综合研究还发现，在每吨钢水的能量总消耗方面，直接还原电炉联合法也可以比得上高炉碱性氧气转炉法，每吨钢水的能耗分别为21,000兆焦耳和22,000兆焦耳。就全部废钢法而言，能耗是13,300兆焦耳/吨钢水。当副产物的能量和炉气（废气）能够被回收时，则高炉碱性氧气转炉法联合法工厂的净能耗可以被降低到约14,000兆焦耳/吨钢水。回收的气体考虑只为转换量的70%。回收能量的这一潜力在于研究高炉和直接还原的联合作业，从而可应用从高炉以及焦炉和电热炉来的副产气作为直接还原装置的还原剂。

利用原子反应堆作为热源以制造裂化天然气用的过饱和蒸气，对大部分直接还原方

法将降低约三分之一的能量。美国、英国和日本等国正在研究利用原子能作热源的可能性。但是，直到原子能反应堆的设计问题完全得到解决之前，这些研究未必会有结果，从现在起，也许还要20年吧。到那时，可能

把直接还原的原理与连续炼钢法结合起来，在一端加入矿石，而从另一端自动地得到钢坯、扁坯等材料。

[丁一译自《Scientific American》，1976, 235, №1, 68—71, 74—80]

## 直接还原法和海绵铁在电炉炼钢中的应用

尤德·K·辛奥

使炼钢不经过炼焦炉、高炉和炼钢炉这样长的过程，是冶金学家长期的愿望。铁矿石直接还原成海绵铁部分地实现了这一愿望。除此之外，近几年来还有下述因素，对发展这一方法起着主要的作用：

1. 废钢的价格波动很大并有上升的趋势。六十年代，废钢价格在25—60美元/吨范围内变动，但是，1974年废钢的价格开始上涨并达到140美元/吨的最高记录，废钢价格高，并且短缺，导致以海绵铁形式代替废钢来源的发展。

2. 世界上正在建设大量的小型钢厂，这就大大增加了废钢的需要量。

3. 一般采用炼焦炉、高炉的炼钢路线，由于单个高炉的容量和尺寸，要涉及到大量的投资。但是，小型钢厂采用电炉熔炼设备并用海绵铁作为主要原料，建设投资非常小。

4. 这一方法的发展，有助于环境控制。这一方法取消了炼焦炉，也不需要成本高的排放气体控制辅助设备。

5. 废钢和固体废料的再循环产生了大量的有害杂质的污染。海绵铁的纯度高，很适合作为污染废钢的稀释剂。

### 直接还原的理论

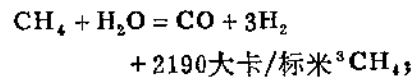
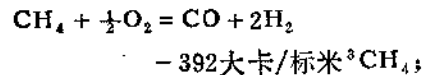
铁矿石的直接还原包括应用CO、H<sub>2</sub>气

或碳直接还原矿石中氧化铁和脉石废料，还原在低于每一种氧化物的熔点的温度下进行。

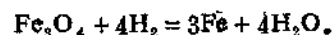
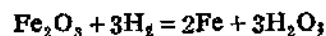
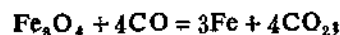
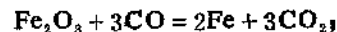
铁就是在比较低的温度（低于871℃），即每种组分都不熔化的温度下，由矿石制得的。根据还原剂的类型（气体或固体煤）有两种方法：

#### 应用天然气的方法

天然气用催化转化（蒸气或氧）法转化成为裂化气或还原气<sup>1)</sup>。



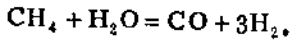
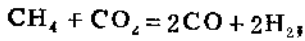
在温度超过800℃时，于正常压力下平衡完全朝向右方<sup>2)</sup>，反应易于发生。但是，由于生成烟尘，裂化反应困难。不过，在高温和高H<sub>2</sub>/CO比下烟尘的生成可限制到最小限度。裂化气中的CO和H<sub>2</sub>按下列反应还原氧化铁：



大部分直接还原方法的排出气体可循环使用，部分的排出气体再用于转化炉的加热。



剩余物被清除其一半的蒸气，被压缩再和新鲜的天然气一起返回进入气体转化炉，剩余的排出气体中的CO<sub>2</sub>和水起裂化剂的作用，产生下列反应：

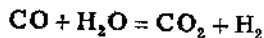


### 应用煤的方法

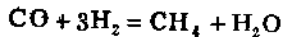
有几个使用煤作还原剂的方法。在过量还原物料（煤）存在和温度为950—1000℃的情况下，干而纯的氧化铁被还原成金属铁，还原铁的烧结和熔化随温度而定。氧化物直接同碳和过程中碳燃烧生成的CO气体反应进行还原。一些用固体燃料直接还原的方法列入下节。

### 应用煤气化技术的方法

一些直接还原的方法，应用煤转化为气体的工艺和使用合成气体<sup>3)</sup>。合成气体是采用碳与蒸气和氧反应生成的。这种气体含有数量不等的CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和象CO<sub>2</sub>和硫化物这样的杂质。合成气体通过加热的催化剂时，部分地发生以下反应：



对于以后的甲烷形成过程来说，H<sub>2</sub>/CO比值要采用3:1。



气体要经过净化和除去二氧化硫。由此而生成的甲烷以后用于生产裂化气和还原气，这种方法仍然具有工业和经济上的发展

价值。天然气的大量需要和在世界大多数国家的短缺，无疑，对于煤气化生产甲烷是一个推动。

## 直接还原方法的分类

有许多采用不同形式的设备和还原剂的直接还原方法。各种各样的方法，根据其应用设备的类型和操作方法，可分为四个主要的类型（示于表1）。对某些较普通的方法的基本特征，概要地叙述如下。

### 固定床法

固定床法包含高品位铁矿石在垂直的反应器内被裂化气分批还原。曾经在不只一个反应器连续操作中，使铁矿石间断地被还原。

依尔法（HyL）：依尔法是同时应用四个垂直反应器的四段固定床法，即是排料、冷却、第二个和第一个反应器<sup>4,5)</sup>。还原气体是用脱硫甲烷（或液化石油气，或石脑油，这取决于燃料的存在情况）与过热的蒸气在转化炉内经催化转化而形成的。

裂化气和还原气体的化学组成如下：

组成	体积 (%)
CH <sub>4</sub>	5
CO	13
CO <sub>2</sub>	8
H <sub>2</sub>	74

在这一方法中，铁矿石在四个垂直的反应器中同时被还原气体还原。还原气送入装

表1 直接还原方法的分类

固定床	竖炉	回转窑	流态化床
依尔 (Hojalatay Lamine, 简称HyL)	米德雷克斯 (Midrex) 阿姆科 (Armco) 普罗费尔 (Purofer) 金洛-米托 (Kinglor-Metor)	SL/RN 艾克姆(Elkem) 日本钢管 海威尔德(Highveld) 克虏伯-雷恩(Krupp-Renn) 川崎 斯特拉特吉克-尤迪 (Strategic Udy)	高铁团块(HIB) 菲奥尔(FIOR)

有还原铁矿石的冷却反应器内，在通过反应器时，气体加热至高温，而海绵铁被冷却，还原气体也完成了最后的还原过程。

由冷却反应器排出的气体用水喷雾以除去水蒸气，气体预热后送入第一个具有热的反应器内并部分地还原铁矿石，这时刚刚完成了第二阶段的反应。

大部分的还原是在第一阶段进行的。由第一个反应器排出的气体再用水处理除去水蒸气。气体加热后再送入加有新鲜炉料的第二个反应器内。

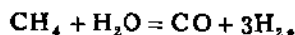
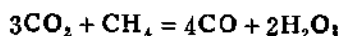
铁矿石在第二个反应器内加热并部分地还原。由第二个反应器放出的气体用水处理，并同为提高其发热量而添加的新鲜天然气一同再使用。可以推断，四个反应器中的每一个反应器，都要经过第二，第一，冷却和排料等四个阶段。每一阶段大约需要3小时，总的还原时间是12小时。

## 竖 炉

竖炉很类似于高炉。铁矿石或团块由炉顶加入。炉料向下移动并与向上移动的还原气体相遇。应用立式竖炉还原的一些方法叙述于下：

米德雷克斯法：铁矿石在垂直的圆柱状的竖炉内进行还原，炉子的内径约4.65米，除去上部加料结构以外，高度约37.5米。炉料是通过上部几个布料器管道装入的。这可减少颗粒的分散<sup>9)</sup>和气体沟流。与矿石中氧化物起反应的气体向上流动。

炉子下部是圆锥状，并由还原矿石用冷却室组成，有独立的风口系统，用于输送冷却还原矿石和完成还原作用的还原气体。由炉顶排出的气体大约含20%CO<sub>2</sub>，而水分与天然气混合并送入转化炉，还原气体按下述反应进行再生：



但是，该系统没有其它方法需要的外部蒸气或氧系统。

米德雷克斯法在世界上获得了广泛的应用。米德雷克斯公司也声称，已研制出一种令人满意的铁的钝化技术<sup>7)</sup>，这可帮助还原团块输送很远的距离而不发生再氧化现象。

阿姆科法：阿姆科和米德雷克斯法的设计是非常类似的。两种方法都采用和高炉相似的立式竖炉，炉料由炉顶加入，并被向上移动的热还原气体还原。但是，在阿姆科的方法中，冷却气体由底部输入，向上移动，并和全部的还原气体一道由炉顶排出。

在此方法中，冷却气体向上移动时，约有60%的气体变成裂化气体，其余部分进一步冷却和压缩，再用作冷却气体并和新鲜的还原气体混合，使反应温度达到约771℃。阿姆科方法的流程图示于图1。

普罗费尔法：普罗费尔法也与同类的米德雷克斯和阿姆科的方法相类似，所不同的是仅仅没有装设冷却部分<sup>1)</sup>，因此，还原的海绵铁是在约800℃的条件下卸出的。这一方法的设想是保留还原矿石的显热并输送到电弧炉内，以减少电耗。

这一方法的特点是有两个气体转化器交替工作，其中一个是把天然气转化成还原气体（由CO和H<sub>2</sub>组成的），而另一个是将其加热；系统的交替操作的。

金洛—米托法（KM法）：KM系统是直接还原方法中一种新出现的方法<sup>1)</sup>。该法系由铁矿石或团矿和固体还原剂（各种类型的煤）混合组成，如果需要，还可加入熔剂，借以起到中和煤中的含硫量的作用。混合炉料由立式竖炉炉顶加入。炉子用气体或液体燃料由外部加热。

炉料预热后到达炉子的还原区。还原后，还原物料由炉子底部排出。还原的矿石经破碎和过筛、磁选后分离出海绵铁、灰尘和废弃的还原剂。KM法的中间试验工艺流程图示于表2。

## 回转窑法

回转窑法在设计上是很类似白云石矿的

回转窑，用固体还原剂进行直接还原很早就报导过。该法关于矿石的粒度的要求不严格。矿石和燃料可以按对流或并行的方式加入加热的回转窑内。该类两个较重要的方法，SL/RN和克虏伯法介绍如下：

#### SL/RN法：

由铁矿石、循环使用的碳、煤和褐煤组成的炉料加入稍微倾斜回转窑的较高端。回转窑依靠由窑卸料端吹入的固体碳燃烧。为了获得上述反应所需要的良好的还原性气氛，空气量要少。还要准备沿着窑的全长补充加入空气，以便控制窑内的燃烧和温度。

铁矿石与碳和气体的直接还原约在1050℃发生，还原的矿石和由煤产生的碳，在卸入大气以前，要经过装有水雾的冷却器。还原矿石的团块要经过破碎、筛分和磁选，以回收海绵铁和碳，剩余的碳可循环使用。

已经发展了几种SL/RN法基本设计的改进方法，用以处理不同的炉料，如团矿、氧化球团等。

在使用球团炉料的情况下，窑是跟随使氧化球团变硬和预热的移动炉篦而移动，由窑内排出的气体用于制团炉篦的预热。窑的长度取决于每种铁矿石的还原性和还原剂的反应性，现有的工业用窑的长度为46米到68米（包括预热和冷却段），内径为3.5米到4.6米。

SL/RN法的最重要的特点，是它对使用不同质量煤的适应性。可以预料，该法在将来对于缺少天然气的国家，将越来越受到欢迎。

最近新西兰安装的SL/RN设备是值得加以说明的。这套装置的操作方法已有显著变化，最大的变化是它的操作是顺流的形式，而不是最初设计的逆流的方式。

克虏伯法：这种方法很类似于SL/RN法，由矿石、煤或褐煤和熔剂组成的炉料加入窑的一端，在还原的条件下，窑靠装入卸料端的碳或燃料或者是两者的混合料进行燃烧。依靠还原气体和固体还原剂二者的作用实现还原，喷嘴沿着窑的整个长度安装，以

便控制温度分布。

被还原矿石卸入一个旋转冷却器内冷却，然后象SL/RN法那样将其破碎、筛分和磁选。克虏伯法的流程图示于图3。

目前一个年产15万吨的克虏伯直接还原设备正在南非的邓斯沃特（Dunswart）钢铁公司运行。

#### 流态化床法

这种方法应用的原理是，很细粒的矿石，在适当的粒度和流速条件下，于热的还原性气流中，可以保持悬浮状态。气体流速的变化范围与矿粉的粒度、形状和密度有关。该法的优点是方法简单，可以应用矿粉。但是，流态化床法的缺点是不能应用较高的还原温度。

在某些降低还原效率还原相存在的条件下，较高的温度会增加矿粉的自粘结倾向。因此，流态化床在相当低的温度（700—750℃）和3—5个大气压下进行操作。两种著名的流态化床法叙述如下：

菲奥尔法：铁矿粉的还原是在四个流态化床反应器系列中进行的，反应器是相互依次接排的。每个流态化床反应器的反应室约高16.2米，直径6.1米或更大，其结果是菲奥尔设备高约84米。

经过适当破碎和筛分的矿粉，通过特殊的给料装置加入最上面的一个反应室内。该反应室为使矿粉处于悬浮状态要保持高压。矿粉部分地还原和预热，预热的矿粉靠重力流依次地下降至另外三个反应室内；金属化率随着从一个反应器至另一个反应器逐步提高。

还原的矿粉通过降压装置排卸，并进入一个隔热的缓冲槽内，再在650℃直接排入到一个双辊式制团机内。

还原气体是蒸气转化裂化的天然气。裂化气的H<sub>2</sub>含量超过75%，又是主要的还原剂。还原气体从下面进入，并从最上面的反应器上部排出，应用的还原气体可循环使用。

高铁团块法(HIB): 该法是美国钢铁公司研制的, 第一套装置安装在委内瑞拉。矿石是在三个独立平行的装置中进行还原<sup>10)</sup>, 每个装置有两个流态化床反应器, 设计生产的金属化率约为70%。每个还原装置每年的生产能力约33万吨, 三个装置总计约为100万吨/年。

这种装置是为高炉提供金属化率低的炉料而设计的。延长矿粉在反应器中的停留时间, 可以提高金属化率, 不过要以降低每年的生产能力为代价。

## 各种直接还原法的比较

对于所有方法来说, 铁矿石还原的基本原理仍然是相同的。主要的区别在于: 还原时应用的气体或固体燃料、采用设备的类型和炉料与还原剂顺流或对流装入等等。

流态化法是不连续的方法, 而竖炉是一种连续的并非非常类似于高炉的方法。这两种方法都需要很好地控制炉料粒度, 又有可能应用铁矿球团, 以减少操作中的气体沟流、柱料和悬料的形成。这两种方法比其他方法好, 而且两项占目前总的安装能力的90%以上<sup>11)</sup>。

根据米勒的估计<sup>12)</sup>, 一个具有能还原一千三百万吨矿石能力的装置, 在三年或四年内就可生产。除去这一能力以外, 依尔法和米德雷克斯法分别约占(已大量应用的)这两种方法的44%和36%。

依尔法和竖炉法需要大量的天然气作还原剂, 因此, 这些方法在有大量天然气储量的国家或地区, 如中东、苏联、南美和非州等, 将更多地被采用。

回转窑法用煤作为主要的燃料和还原剂。世界上大部分煤是非焦煤, 适宜于SL/RN设备, 但不适宜于炼焦炉。因此, 回转窑法对于一部分缺乏天然气的国家将是具有吸引力的。北美有丰富的煤储量, 对于固体还原剂法来说, 燃料资源表明有很大潜力。可

以预料, 由于天然气的不足, 可加速回转窑法的发展和应

用。目前世界上正在操作的7个SL/RN法的生产能力约在6.5—80万吨/年<sup>13)</sup>。

流态化床的稳定性, 完全取决于颗粒流动的给定速度, 因此, 该法需要特别均匀的颗粒并要严格控制粒度。为了防止矿粉的烧结, 只能在较低的温度下还原, 因而使流态化床法受到限制。还原温度较低, 导致金属化率较低。

各种方法的比较示于表2。由此表可以看出, 依尔法、米德雷克斯和SL/RL这三种方法, 受到世界的广泛注意。在目前的报告中<sup>9)</sup>, 已经提到的回转窑法, 特别是SL/RN法, 由于天然气供应短缺, 在北美有较大的建厂潜力。

## 冶金学评价

直接还原球团, 越来越多地用作电炉的炉料。但是, 必须研究它在钢的质量、生产量、电极、石灰石和耐火材料消耗等方面的应用效果, 以便了解经济学和冶金学的优点。

### 钢的质量

海绵铁中的硫、磷以及杂质元素(铜、钼、锡、铅等)一般都低。典型的米德雷克斯海绵铁含有0.002—0.01% S和0.007—0.04% P<sup>11)</sup>。炉料中的硫和磷的含量低, 使精炼过程比较容易进行。海绵铁中微量的杂质元素, 也可使其适应于符合技术要求(残余元素较少)的钢的生产。

由于海绵铁化学组成几乎是固定的, 控制较好质量的炉料也是可能的, 这就导致非分解热能消耗的减少, 还可以广泛地应用海绵铁和便宜的低级废钢, 生产质量符合要求的钢。

### 生产量

金属化海绵铁由炉顶连续地装入炉内,

因此减少了反复加入废钢而引起的时间损失。熔池按照瞬间加热，熔炼和精炼系统进行操作，海绵铁连续装料可能调整装料速度和功率。与炉料中低硫、磷含量导致减少精炼时间的一些有关因素，可促使生产量的提高。Post和Ameling的报告指出<sup>11)</sup>，应用70%海绵铁的炉料与用100%废钢炉料相比，生产量约提高20%。

根据南非伯诺尼的邓斯沃特钢铁公司的Schermer的报导<sup>15)</sup>，对连续地装入海绵铁、固体燃料（煤、无烟煤）和石灰石，燃烧CO、H<sub>2</sub>和氧，以及控制燃烧用的质谱仪等技术都进行了研究。采用这种技术，在单位产量、功率，电极使用和耐火材料消耗方面，都获得好的结果。

### 电 极 消 耗

已经发现，应用金属化球团使电极消耗减少的原因如下：

(1) 减少废钢的装料数量，就减少了电极由炉内取出和暴露在空气中的时间。

(2) 由于是球团炉料，炉内仍然保持高浓度的CO气氛，因而，这就减少了电极的固-溶反应。

(3) 由于减少了废钢炉料，从而大大减少了电极的机械耗损。

在实际的电炉操作中<sup>14)</sup>，已有报告指出，在金属化炉料为40—50%时，电极消耗约减少31%。

### 石 灰 消 耗

考虑到同海绵铁结合的脉石量，似乎用海绵铁炉料会增加石灰的消耗，但是，炉料中的低硫、磷含量，使之可能用比通常用的全废钢炉料低的CaO/SiO<sub>2</sub>比完成精炼过程，加之海绵铁是连续给料，石灰的利用会更好些。

Post和Ameling<sup>14)</sup>已经发现，汉堡钢铁厂的设备，用100%废钢和炉料中有70%海绵铁时，则石灰的消耗由49.9公斤/吨减少

至27.2公斤/吨。

### 耐火材料的消耗

关于耐火材料消耗的数据差别很大。当然，由于渣量较大，电能消耗大以及防护侧墙（由于废钢炉料较少的结果）等，应用海绵铁将增加耐火材料的消耗，这是预料到的。

根据Schermer得到的结果，列于表3<sup>15)</sup>。

测得的结果表明，侧墙寿命和每吨钢的耐火材料消耗，实际上是固定不变的。但是，炉顶寿命显著减少。Schermer指出<sup>15)</sup>，炉顶使用寿命的缩短是由于采用了海绵铁粉（-3毫米）之故。细粉到炉顶后，由于纯粹的化学作用，损坏了炉顶。

可以预料，应用海绵铁团块代替细粉，炉顶寿命将会延长。

### 能 量 消 耗

为了还原金属化球团中残余氧化物和球团中脉石产生的额外渣的加热和熔化等的需要，增加了能量消耗<sup>16)</sup>。报告指出：用70%金属球团炉料，要比全废钢炉料的电能消耗大约增加8.1%。

能量消耗也与海绵铁金属化率有关，金属化率低于93%的海绵铁能量消耗较高，但是，电耗的少量增加可由产量的增加以及缩短冶炼时间来弥补。

### 结 论

铁矿石直接还原技术有相当大的改进，并已超过了中间试验的阶段。毫无疑问，随着钢需要量的增加，新的直接还原和电炉结合的小型钢厂将在全世界建设，由于投资大大减少，对于这样的小型钢厂，发展中国家特别感兴趣。

工业发达国家采用海绵铁和废钢的混合炉料，能够很好地控制炉料中的杂质元素和钢中的残存元素。应用海绵铁将大大地减少对废钢的依赖，从而可稳定或降低废钢的价格。

表 2

直接还原法及其全世界的生产能力的比较

方 法	还原温度 (°C)	金属化率 (%)	能量消耗 (百万 Btu/短 吨)	1975年全世界生产量 调 查 <sup>(1)</sup>		计划中的生产量 <sup>(1)</sup>	
				吨	%	吨	%
固 定 床 法							
依 尔	870/1040	82/87	15.0	1,280,000	16.0	6,060,000	36.2
其 他	—	—	—	197,000	2.5	—	—
竖 炉							
米 德 雷 克 斯	850	92	12.0	1,600,000	20.0	9,990,000	59.8
阿 姆 本	900	88/90	11.8	330,000	4.1	—	—
普 罗 费 尔	950	95	—	165,000	2.0	660,000	3.9
其 他	—	—	—	60,000	0.75	—	—
回 转 窑							
SL/LN	1050	95	—	1,830,000	22.9	—	—
克 虏 伯	950/1050	92	—	150,000	1.9	—	—
川 崎	—	—	—	315,000	3.9	—	—
其 他	—	—	—	650,000	8.1	—	—
流 态 化 床							
菲 奥 尔	700/705	91	—	400,000	5.0	—	—
高 铁 团 块	—	70/71	—	1,000,000	12.5	—	—
其 他	—	—	—	18,000	0.22	—	—

表 3

耐火材料消耗的结果 (Schermer的数据)

	侧 墙 寿 命	公 斤 / 吨	炉 顶 寿 命	公 斤 / 吨	
全废钢连铸	181—195	3.8—5.4	59—81	2.6—3.4	二氧化硅炉顶
海绵铁	177—199	3.8—5.3	37—44	4.8—5.6	”
连 铸	177—199	3.8—5.3	102—160	1.0—2.4	85% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 炉顶

## 参 考 文 献

1. H. D. Pentke, *J. Metals*, 1965, No.1, 40
2. S. W. Montgomery, E.B. Weinberger, D. S. Hoffman, *Ind. Engrg Chem.*, 1948, 601—607
3. K. P. Shaver, S. B. Lasday, *Ind. Heating*, Jan. 1975, 10
4. H. E. Gearhart, K. A. Jackson, *Iron and Steel Engineer*, March 1971
5. Report—“North American Iron Ore, Part I”, *Engineering Mining J.*, Dec. 1974, 65
6. Direct from Midrex, Charlotte,

*Nc*, Vol. 12, No.2, Dec. 1975

7. Report—“Georgetown e Ferreduction Formulates a Pellet Passivation Process”, *33 Magazine*, Feb. 1975
8. R. Ferrari, F. Colautti, *Iron and Steel Engineer*, May 1975, 57
9. Technology Report, *Iron Age*, Oct. 13, 1975, 9
10. Report—*33 Magazine*, Oct. 1973
11. B. Rollinger, *Iron and Steelmaker*, Jan. 1975, 10
12. J. R. Miller, *33 Magazine*, Feb. 1975, 51
13. E. Kalla, R. Steffen, *Stahl Eisen*, Nov. 1974, 23

- 14 G. Post, D. Ameling, *Iron and Steelmaker*, April 1975, 43  
 15. K. Schermer, *Ironmaking and Steelmaking Quarterly*, March 1975, 188  
 16. R. M. Smailer, H. B. Jensen,

W. W. Scott, Jr, 32nd Electric Furnace Conference, Ingot Reprints, 1975, 73

[魏明康译自《Steel times》, 1977, 205, No. 4, 337—338, 340—342, 344]

## 国外回转窑直接还原法发展动向

### 一、概 况

国外直接还原炼铁法近五年来发展很快, 其速度超过了人们的预料。据报道<sup>[1]</sup>,

截至1976年8月底为止已投产的和正在设计中的设备能力约为2500万吨/年。米勒等对未来十年间直接还原铁的生产能力发展估计如下<sup>[1, 2]</sup>。

	1970	1975	1980	1985
世界粗钢产量(百万吨/年)	500	700	900	1000
世界直接还原铁产量(百万吨/年)	1	6	{ 30 <sup>[8]</sup> 80 <sup>[1]</sup>	{ 80 <sup>[8]</sup> 120 <sup>[1]</sup>
还原铁/粗钢产量(%)	0.2	0.9	{ 3.3 9	{ 8 12

由此可见, 近五年是直接还原炼铁法发展的重要转折点, 它已经登上了钢铁工业生产的历史舞台并正在逐步成为一个组成部分。从近年直接还原的发展, 可以看出下列一些特点, 即:

(1) 改变了70年代初期只在发展中国家建设的局面, 超级大英美、苏和先进工业国家加拿大、日本都在近几年中建成了或正在建设直接还原厂。例如, 美国已建了3个40万吨/年的直接还原厂(其中乔治敦厂和波特兰厂采用米德兰法, 休士顿厂采用阿姆科法), 苏联正在库尔斯克建设250万吨/年米德兰法的大厂。最近三年间日本、加拿大相继建了三大回转窑均已投产。

(2) 各种方法获得广泛的工业性实践和研究, 正在竞赛和发展之中。已经在工业上站住脚的是竖炉、回转窑和罐式法, 它们的生产能力(包括建设中的, 至76年底为止)各为1500万吨/年, 260万吨/年和757万吨/年。据另外资料, 至1976年止, 气体还原法

约占90%, 固体还原剂为10%; 55%为竖炉, 33%为罐式法, 8.5%为回转窑, 3.5%为流态化法<sup>[8]</sup>。预计在相当长的一个时期内竖炉仍然可能居于主导地位, 这与某些国家和地区有较丰富的石油和天然气资源以及竖炉的一些优点有关, 但是, 从长远看, 从广大缺乏石油、天然气资源的地区或者从不想用石油或天然气作冶金燃料用(它们是重要的化工原料)的国家或地区来看, 无疑回转窑法也会得到一定的发展。此外, 罐式法和流态化法也都存在着或是显而易见的或是潜在的优点, 也将有一定发展。

(3) 向大型化发展是工业上取得成功的决定性条件。竖炉、回转窑都向大型化发展, 两种方法单个炉子生产能力都已达到40万吨/年; 要做到在工业上进一步发展, 还必需增加单个设备的生产能力或向设备进一步大型化发展。

(4) 新的直接还原炼铁法和与直接还原有关的技术不断出现和突破。如1975年公布

的KM (Kinglor Meteor) 法是一种间接加热使用固体还原剂的竖炉法。它的实质是将精矿球团或矿石加煤混合装入炉内,用气体或液体燃料在炉壁外间接加热,出炉后用磁选分离海绵铁、灰分和剩余还原剂。它的技术经济指标尚未公布。此外,由于预见到石油和天然气资源的短缺问题,煤的气化方法也正在广泛的研究中,用气体或多种还原剂或联合使用的回转窑也在进行工业试验性生产等等。

(5) 直接还原—电炉法向传统的高炉—氧气顶吹转炉法的挑战越来越受到人们认真地对待,它的技术经济指标正在受到严密的检验,由于废钢和高质量冶金焦的世界性短缺、价格昂贵和电力价格上涨,因而后者出现了发展较慢的趋势,而直接还原—电炉法不论在投资上或在成本上都较高炉—氧气顶吹转炉法优势<sup>[8]</sup>。

## 二、回转窑直接炼铁法的发展动向

大体说来,五年间回转窑直接炼铁法(以下简称回转窑法)发展很大,已经改变了五年前仅有五个小厂(其中南朝鲜仁川厂和加拿大鹰桥厂又因操作不正常而先后倒闭)的局面,已经在工业上站稳了脚步,发展为能生产几百万吨的大工业生产了。根据这几年的实际情况,可以看出有下列一些特点:

①向大型化发展:日本钢管公司福山厂74年投产一台直径6米、长70米带有250米<sup>2</sup>链篦机的大窑,年产量为35万吨金属化球团,其后加拿大于75年又投产一台6米直径×125米长的大回转窑,年产能力为40万吨金属化球团,经试车已达到83%设计能力;②日本由于处理大钢铁厂粉尘的需要而将回转窑法成功地应用于大高炉的预还原,使回转窑法和高炉—氧气顶吹炼钢体系挂上钩,成为高炉辅助生产手段;③回转窑法还在不断改进,美国阿里斯—查尔默斯公司经多年研究,试制了一种用气体还原剂或固液气还原剂联合使用的回转窑;④处理钛磁铁矿的回转窑正

在研究改进中。兹分别简要介绍如下:

(1) 向大型化发展:这里只谈谈加拿大钢公司安大略省格里费斯矿山大回转窑投产和开工情况<sup>[3]</sup>。

1975年5月,位于加拿大安大略省北部的格里费斯矿,设计能力为40万吨/年SL/RN金属化球团厂投产。(从施工到投产约20个月)该厂属加拿大钢公司管辖,其产品主要供应设在爱德芒吞的电炉和希尔顿的高炉。

该厂年处理55万吨氧化矿球团,大致相当于矿山总产量的 $\frac{1}{3}$ 。球团经过充分预硬化,其含铁量约为67%。使用高反应性的阿尔他褐煤(距厂1440公里),运前筛去10厘米的大块。经过干燥后煤成分和重要特性如下:固定碳49.6%,挥发分41.5%,灰分8.9%,硫0.48%,发热量11950英热单位/磅,灰分软化点1140℃。由于含硫低还原时不需要另加脱硫剂。

还原窑直径为6米,长为123米,斜度3%,由4对托轮支承,两个同步可变速450千瓦直流马达驱动。设计转数为0.4转/分,最大转数为1转/分。用9英寸含~45%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和~72%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的高铝砖内衬。按窑长有15个不锈钢燃烧管通入反应需要的空气,必要时也可通入天然气补充热量。

操作温度为980℃。密封的回转冷却器直径为3.5米,长64米,内部装叶片,外部用水喷淋。从冷却器排出的产品经过筛分;大于3/16英寸的海绵铁球团送至贮料仓,大于10目的单独贮存,小于10目的是碳、煤灰和细铁粉作为非磁性物料送矿山尾矿坝丢弃。

回转窑出来的废气,经后燃烧室引入空气使其充分燃烧并使较大颗粒的铁和灰分沉降弃却。燃烧后气体再经冷却塔用高压水喷淋冷却至285℃后由电收尘除尘再放空。

炉子在1975年5月投产后,经过四个炉期开炉生产试车已达到83%设计能力。球团金属化率达到90%。现存的主要问题是海绵铁球团消耗的空气和煤量大约比半工业试验



高30%，因此，当产量达到83%设计能力时排风机能力已达到饱和，目前正在研究降低消耗的办法。

(2) 1969—1975年7年间日本连续兴建了4座回转窑，处理钢铁厂内的粉尘，年产量在1百万吨以上，指明了回转窑成为大高炉辅助生产手段的可能性<sup>(4)(5)</sup>。

四个厂设备规格如下：

表1 日本四个直接还原厂设备尺寸表

川崎制铁公司	千叶厂	$\phi 3.2 \times 40 + 47.3$ 米 <sup>2</sup> 链篦机	年产	6万吨
"	水岛厂	$\phi 5.0 \times 50 + 128$ 米 <sup>2</sup> 链篦机	"	24万吨
日本钢管公司	福山厂	$\phi 6.0 \times 70 + 250$ 米 <sup>2</sup> 链篦机	"	35万吨
日本钢公司	广畑厂		"	40万吨

日本川崎公司水岛和千叶两厂的窑分别是1969年和1973年建成的。次年日本钢管公司福山厂建了更大的窑。它们的目的完全是一样的，就是处理日益增多的钢铁厂粉尘（包括高炉灰，烧结机粉尘和顶吹转炉粉尘）。这个问题，乍一看似乎是个末端小事，但实质并非如此。据统计现代大钢铁厂每吨粗钢大约会产出40—60公斤粉尘，1000万吨/年的大厂每年就要有40—60万吨的粉尘。这样大的数量怎样处理就是个很重要的问题了。用烧结机再次烧结会产生二次粉尘污染，用粉尘作成氧化球团又不能除去Pb、Zn、Sn等有害杂质，造成在高炉中锌等的积累。总之，经日本各厂的研究，认为回转窑法最符合环境保护、除去杂质以及改进铁资源质量等三个目标。经过这几个窑特别是福山厂窑的开动，除证明了以上三点外，还解决了细粉状物料的生球在干燥时爆裂问题（方法是加精矿粉以调整其粒度组成并加皂土粘结剂）以及防止生成渣圈或铁圈的问题（方法是严密控制链篦机的温度和气流速度以增加预热球的强度）。由于福山窑是当时世界上最大的窑，它的成功改变了回转窑法在初期发展阶段的不景气状态，扭转了世界上对回转窑的某些不正确评价。还应当指出的是由于这几

个大窑不但在处理粉尘时加入适量的精矿粉，而且在粉尘不足时也曾全部以精矿粉为原料进行还原后直接供给高炉作炉料，使高炉增加产量，降低焦比（千叶厂的数据是每增加10%金属化球团增加8.2%热金属产量，焦比下降51公斤/吨铁水），这就为直接还原铁的用途在工业上开辟了新路，说明了不但直接还原—电炉法越来越向传统的高炉—氧气顶吹法提出了挑战，而且回转窑直接炼铁法已作为高炉的一个成功的辅助手段，挤进现代传统的高炉—氧气顶吹炼钢的钢生产体系中去了。这个动向是值得注意的。

(3) 阿里斯-查尔默斯公司的气体回转窑<sup>(4)(8)</sup>

美国阿里斯-查尔默斯公司经过多年研制，发展了一种用气体还原剂或联合使用多种还原剂的回转窑，1976年由加拿大金属公司对原鹰桥镍公司回转窑（该窑于1972年停产）进行改造后，试生产年产约为235000吨。据报道，它的关键是用一种特别设计的耐热钢制成的通气管代替现行的安装在窑上的二次空气管。当窑身转动，通气管在窑的下部，管口被料层所复盖时，由此管通入气体还原剂或天然气，天然气和炉料中金属铁接触发生裂化反应所产出的 $H_2 + CO$ 作为还原剂使料中氧化铁进一步还原并通过料层在床面上燃烧以加热炉料；当窑身转动，通气管在窑的上部时，通气管又向窑内引入空气而维持过剩煤气燃烧的需要。这个发明之所以具有意义，不只是可以联合使用多种还原剂，很可能由于还可以随意控制高温，而大大缩短窑的长度，并大大增长单位容积的处理量，而后者对回转窑的发展乃是至关重要的。

(4) 新西兰厂的变化<sup>(9)</sup>

新西兰厂的变化，应该说并不是典型的，一些情况还不十分清楚。但由于它是处理钒钛磁铁矿的，特简述如下：

7年前，新西兰钢公司在北岛奥克兰格林布洛克地方建了一座 $4 \times 75$ 米回转窑。根据半工业试验，原设计流程是采用生球直接