·综合评述·

KR法：发展和应用

何　其　松

（攀枝花钢铁研究院）

现代高炉炼铁法虽然在技术上已臻于完善，但同时还存在许多缺点，例如需要使用价格昂贵的优质焦炭和高质量的烧结矿或球团矿；工艺流程复杂，能耗高，基建投资高；适应经济形势变化的灵活性差；环境污染严重等。为了缓和焦煤的短缺和废钢供应的紧张，七十年代各种直接还原法曾得到迅速的发展，其中以天然气为能源的直接还原法（以Midrex法为代表）已实现大工业生产，并成为高炉法的第一个竞争对手。但是由于能源资源条件的限制（尤其是天然气地区分布的局限及其价格的不断上涨，高品位铁矿石供应的困难），致使直接还原法的发展受到阻碍，没有达到预计的发展速度和规模，海绵铁的实际产量也始终未能达到设备生产能力的一半，在许多地区已不再具有竞争能力。

钢铁工业面临的挑战，促使许多冶金学家竞相研究以非焦煤和(或)电能为能源直接生产铁水的炼铁新工艺—熔融还原法。特别是近年来，熔融还原法的试验研究在许多国家（如瑞典、联帮德国、奥地利、日本、美国等）进展十分迅速，各种工艺方法层出不穷，它们体现了现代炼铁技术发展的最新潮流，因而引起了国际钢铁界的普遍重视。本文介绍的KR法就是其中发展较快、并在技术上有所突破的一种熔融还原法。

（一）KR法的开发概况

KR法（德文"煤还原法"Das Kohle-reduktionsverfahren）是由联帮德国科夫钢公司（Korf Stahl AG）和奥地利阿尔卑斯联合钢铁公司（Voest—Alpine AG）共同开发研究的一种以非焦煤（包括劣质煤）为能源生产铁水的新炼铁方法。

从发展看，KR法是竖炉气体还原法的合符逻辑的发展结果。自从七十年代两次石油危机以来，由于石油和天然气不断涨价，使得以天然气为能源的竖炉直接还原法难以进行经济生产，于是许多研究者转而从非焦煤炼铁的试验研究中去寻找出路。在这种背景下，科夫集团的首脑Willy Korf博士在1976年提出了把成功的Midrex竖炉和熔融气化炉形式的高温煤—流化床发生器结合起来的设想，这个设想的目标是用便宜的、世界上大多数地方都能实际利用的煤进行钢铁生产。

1977年开始进行KR法的前期试验工作。为了建设中间试验装置，首先在德国南部莱茵河畔克尔（Kehl）的巴底什钢公司的钢厂用经过改造的钢水罐进行了预备

试验。试验证明用该法可以生产出铁水。1978年研究如何在中间放大试验装置上应用这种工艺，中试装置应能体现工业生产装置的全部特点。从这时起Korf钢公司和奥地利Voest-Alpine公司联合进行试验。1979年两公司组成联合设计组，着手设计和建设年生产能力为60000吨的中间试验装置（小时产量为5—8吨）。中试装置建在克尔，建设时间不到一年，于1981年6月投入运转。

1982年8月27日，Korf钢公司和Voest-Alpine公司在克尔举行了KR法的公开展示仪式，来自世界各地的280位来宾参加了展示仪式，这标志着KR法在技术上达到了一定的成熟阶段。

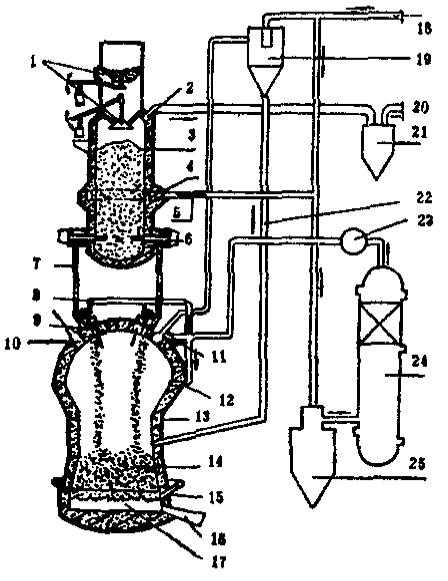
迄至1982年底，KR中试装置包括试验费在内共耗资3000万马克（合1200万美元），该项目得到联帮德国和奥地利两国政府的财政资助。

（二）KR法的原理和工艺流程

KR法的工艺流程见图1。

KR装置主要由两个重迭布置的反应器组成，即上部的还原竖炉和下部的熔融气化炉。熔融气化炉有两个作用：一是使从还原竖炉排出的热海绵铁熔化成铁水，二是使加入的煤气化，产生还原气。

KR装置的装料系统由四个称量漏斗组成，其中两个用于装煤，一个装矿，一个装熔剂。石灰或硅砂等造渣材料既可跟煤一起装入，也可跟矿一起装入。煤不需经过任何预处理（如破碎和干燥）直接入炉，粒度最大可达30mm。煤由中间煤仓用两个螺旋给料器经流槽加到熔融气化炉，在气化炉上部与1200℃左右的热气流接触，迅速干燥、脱气，大部分煤发生爆裂，变成焦炭。在熔融气化炉下部圆筒部分沿圆周安装有12个氧气风口，喷入氧气



1.双钟装料设备；2.炉顶煤气导出管；3.还原竖炉；4.还原气环管；5.还原气管道；6.海绵铁螺旋排料器；7.海绵铁溜槽；8.溜槽冷却气环管；9.加煤器；10.熔融气化炉煤气出口；11.调温用冷却气进口；12.熔融气化炉拱顶冷却气进口；13.熔融气化炉；14.焦炭流化床及熔融海绵铁；15.吹氧风口；16.出铁和出渣口；17.铁水熔池；18.过剩热煤气；19热煤气旋风除尘器；20.经洗涤的竖炉炉顶气；21.炉顶气洗涤器；22.炉尘返回熔融气化炉；23.冷却气风机；24冷却气洗涤塔；25.文氏管洗涤器。

图1 KR法的基本工艺流程

使焦炭发生气化反应：

$$C + 1/2O_2 = CO(+110KJ/mol\ co)$$

在炉中形成温度为1600℃的焦炭流化床。每吨煤产生2000Nm³煤气，其典型成分如下：

	CO	H_2	N_2	CO_2	H_2/CO
%	67	28	4	1	0.3

还原气中H_2：CO=0.3～0.4，这是不同于一般竖炉还原气的一个特点。

煤气在离开气化炉前的温度为1000～1200℃，由两个导出管导出后，首先用经过预先冷却的还原气调温到850—900℃，然后通过两个并联的热旋风除尘器进行粗除尘，除尘器中的炉尘返回熔融气化炉。除尘后的煤气大部分送入还原竖炉还原铁矿石，一部分经过进一步净化、冷却，并

经压缩后用作冷却气，其余的过剩煤气用作输出煤气。

KR还原竖炉与Midrex竖炉上部相似，没有任何内部结构。新设计的特点是通过安置在竖炉四周的六个螺旋排料器使海绵铁在850—900℃的热状态下出料，经过下料管直接加到熔融气化炉，海绵铁的显热可以全部得到回收。排料速度是可控的。海绵铁的金属化率为95—97%。海绵铁在熔融气化炉顶部停留时间很短，但它在焦炭流化床中的速度大大变慢。在那里大量吸热，最后在氧气风口前熔化成铁水，并进行渗碳，形成生铁。出炉铁水温度可达1350—1500℃。铁水平均成分为：3.7% C,0.1% Si,0.1% Mn,0.2% S。除含Si、Mn低,含 S高外，其质量可与高炉铁水相比。正在研究进一步降低铁水的含硫量。铁水经炉外脱硫后，可用氧气炼钢方法精炼（如LD法、OBM法、BOF法，以及采用较高废钢比的EAF法）。在某些情况下也可将部分铁水铸锭，供化铁炉或电弧炉作原料。KR法的铁水加工流程见图 2。

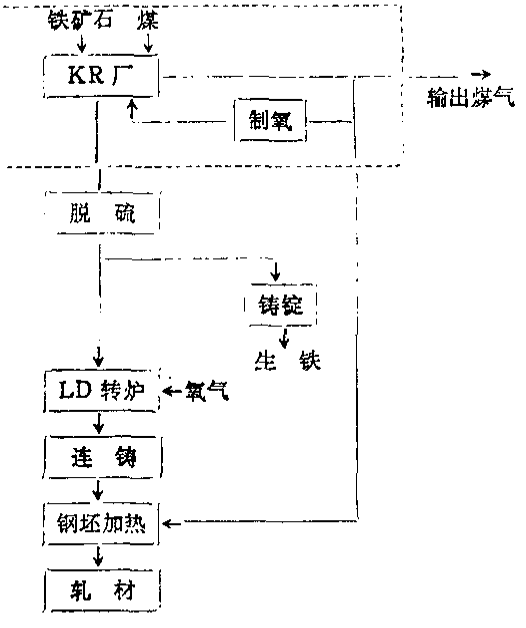


图 2　KR法铁水加工流程图

竖炉炉顶气经过除尘、冷却后作为输出煤气。根据所用煤种的不同，熔融气化炉可以产生一定数量的过剩煤气，这些过剩煤气与冷却气一道处理后与炉顶气汇合，作为输出煤气，其气量约为2000 Nm^3/t，发热值约2000kcal/Nm^3，其成分大致为（其中的N_2系由密封气带入）：

	CO	CO_2	H_2	N_2
%	47	24	23	6

由于熔融气化炉中不存在象高炉那样的炉料支撑作用，因此必须通过机械调节装置使还原竖炉和熔融气化炉分开。在KR法中，煤的气化和海绵铁的产量是由流化床中的能量平衡来加以调节的。

（三）迄今进行的试验情况

克尔的KR中试装置在1981年 6 月进行了第一次试验，由于设备和工艺本身的一些问题，第一次试验未能生产出铁水。经过一些改造之后，同年11月进行第二次试验，连续运转36小时，验证了KR法的基本原理的正确性。

1982年 3 月进行了第三次试验，运转124小时。同年 5 月的第四次试验运转了350小时。两次试验共产铁水1000吨，日产生铁达到100吨，气化炉压力为0.5表压。这次试验还成功地解决了热煤气除尘器中炉尘的回收问题。同年 8 、 9 月的第五次试验运转了600多小时，总作业率接近90%。1982年底进行了三星期试验，气化炉压力提高到 2 表压。提高气化炉和竖炉的压力，并采取氧气预热等措施，有利于增加产量，降低消耗。据报道，1983年 9 月进行第七次试验。试验期中，每吨铁水的煤耗为1000kg（系非标准煤，折合标准煤857kg），氧气消耗为700Nm^3，但这并不能代表未来工业生产的消耗数字。

在各次试验中使用了不同的煤种（例

如无烟煤、烟煤、次烟煤、褐煤等），其中无烟煤和萨尔烟煤的粒度为0～10mm，美国和南非气煤的粒度为0～30mm。此外，用经过高温碳化的褐煤作了十分成功的试验。所用的煤中有灰分达15%、挥发分达35%和发热值低于5900kcal/kg的煤，还没有用过含硫量超过1.5%的煤。

单位生铁的煤耗主要取决于煤的含水量、含灰量、灰分成分、挥发分含量、含硫量及生铁的最终含硫量。用不同的煤做试验的目的是确定不同煤种的气化性能及其对铁水成分的影响。煤的灰分熔点和结焦性对KR法无关重要。

KR法对原料有很强的适应性。试验用过的原料有巴西产的高炉球团矿，及球团矿与50%澳大利亚纽曼山块矿或与50%南非赛森块矿组成的混合料。此外，还打算在以后试验中使用烧结矿。KR法对炉料物理性能的要求是粒度均匀、还原性好、有一定的热强度（这些因素决定还原的效率）。对炉料化学性质的要求比直接还原法要低得多。与气体直接还原法相比，KR法不要求炉料有非常高的含铁量，但脉石中的酸性组分最好要低。如果脉石和煤灰可以形成适当的碱度，则KR法用低品位铁矿石也可以进行经济生产。为了脱硫的需要，KR法操作中的炉渣碱度要求达到1，如果脉石和煤灰形成酸渣，则需加入石灰石或白云石把碱度调整到1。

（四）KR法的经济性

所有的计算和试验都表明：在投资和操作费用方面，KR法即使用较小的装置也能很好地跟大高炉和气体直接还原装置进行竞争。

KR法以廉价煤为能源，输入的能量为100%的煤，总能量的42%用于生产铁水，58%进入输出煤气。当KR法作为一个自给自足的生产单位，需要在厂内制氧时，则输出煤气中有12%的能量用于制氧，这时有效的输出煤气能量减少到46%（见图3）。

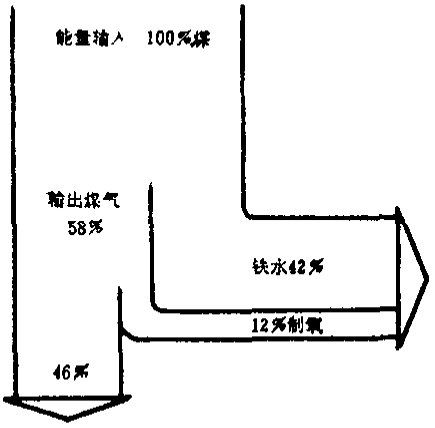


图3 KR法的能流图

即使扣除制氧所用的煤气，KR法的输出煤气量也超过高炉炉顶煤气量。

Korf钢公司和Voest—Alpine公司宣称：KR法的技术经济可行性已在中试装置上得到证实。目前正规划设计年产30万吨铁的工业规模的KR工厂。其生产数字为：

铁水 40t/h

输出煤气400GJ/h

有关的消耗数字如下：

铁矿石 60t/h

煤 40t/h

氧气 22,000Nm³/h

补给水 60m³/h

电力 1000kw

吨铁的单耗为：

铁矿 1.5t

煤 420kg(+580kg用于产生输出煤气)

氧 321Nm³

补给水 0.6m³

电能　　10.5kwh

每吨铁水的单位能耗为2.52×10^6 kcal/t（$+3.48\times10^6$kcal/t输出煤气）。这些数据是根据无烟煤和萨尔烟煤的混合煤计算的，混合煤的发热值平均为6000kcal/kg。

必须指出，KR法在生产铁水的同时，所产生的输出煤气是一种重要的副产品，既可用于厂内，也可外售。输出煤气的用途有：

（1）用于制氧；

（2）输送给钢铁企业或邻近工业作燃料煤气；

（3）用于发电；

（4）用于附设的海绵铁生产或石油化工生产。

因此，KR工厂的厂址选择应考虑输出煤气的应用，以获得由煤气带来的经济收益。根据工厂位置和市场形势的变化，其工艺方案可以变更，例如输出煤气可以完全用于发电，其电力可用于制氧和外供。图4表示煤价和输出煤气价格对铁水成本的影响。

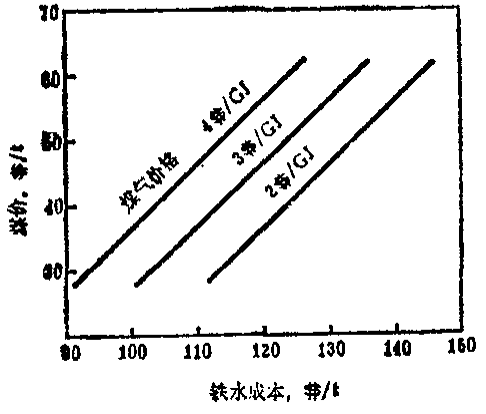


图4　铁水成本与煤价和输出煤气价格的关系
（铁矿石价格39$/t）

根据已有的试验结果，对铁水成本可作如下的估算。

按使用50%块矿和50%球团矿计算，每吨铁矿价格估计为39美元。

煤的价格作为一个可变因素考虑。用价格为50$/t的煤生产时，煤气价格约为3.9$/GJ。这样得出的生铁价格为115$/t。与联帮德国鲁尔区的实际生铁价格150$/t相比，则KR法显示出明显的经济优越性。

计算还表明，在联帮德国的克尔和汉堡用KR法生产时，吨铁成本比鲁尔区的高炉生铁分别降低35和55马克。

如果把KR工厂的现代设计和包括烧结厂、炼焦厂、热风炉和高炉本体在内的高炉工厂进行比较，那么KR工厂的单位投资（即使把制氧厂包括在内）显然比高炉工厂低。在欧洲地区，根据厂址的具体条件，年生产能力为30万吨的KR工厂的基建投资波动在120～150$/t·y。

通过比较还表明：年生产能力为30万吨的KR厂和年生产能力为1.5～2百万吨的高炉所生产的铁水一样经济。

（五）KR法的优点和应用的前景

综上所述，可以概括KR法的最重要的技术经济优点有：

1.由于以储量最丰富的非焦煤为唯一能源，单位生铁的能耗又低，因此生铁成本低。

2.由于不需要烧结、炼焦和其他辅助设施，因此工艺流程短，基建投资低。

3.KR法用于年生产能力为10万吨的小厂和用于年生产能力为几百万吨的大厂几乎一样经济。

4.KR工艺具有很大的灵活性。根据不同需要，既可单独设厂，也可建在现有钢铁企业内。在完整的钢厂内，KR装置不仅可以满足厂内的煤气需要，而且在不需要铁水的情况下，也可当作煤气发生

炉，只生产煤气。

5.容易开动，工艺过程的可控性好。

6.环境污染小。

“由于克尔的中间试验厂已经证明了KR法的强大的生命力，因此KR法不仅对新厂的建设，而且对于现有钢厂的合理改造都提供了全新的特点。工业国和发展中国家在建立钢铁工业的过程中都可以从采用KR法得到好处。”“KR法与常规的高炉炼铁法相比具有很大的竞争能力。”“KR法可以很好地变革整个世界的钢铁工业。”“如果KR法初步试验结果站得住脚的话，那么这项技术的发展预示着将发生一个重大的变化，它对现代钢铁工业具有难于预料的影响。”

必须指出，KR法上部还原竖炉的装置和操作是比较成熟的，在下部熔融气化炉中引入了煤的气化技术，代替了一般直接还原竖炉的造气系统，使流程大大简化。总的说涉及的新技术比其他方法少，容易实现工业化。事实上克尔的KR中试装置已相当于我国一些地方小铁厂的规模。因此，KR法开拓了一条直接使用非焦煤生产铁水的现实可行的道路。可以预料，KR法在技术上取得的突破将使它比目前正处于试验研究阶段的其他熔融还原法更早实现工业化。人们正期待着第一座30万吨级KR工厂的建设。

还要说及的是，KR法的产品为铁水，可以采用高效率的氧气转炉精炼，不需要象直接还原铁那样必须用电炉精炼，因而可以避免使用昂贵的电能。同时液体铁水便于排放和转运，不会出现象直接还原海绵铁在冷却、卸料、储存和运输中所遇到的那些麻烦。

从反应器原理上考察，KR法属于二段式熔融还原法，它相当于把高炉分解成还原竖炉和熔融气化炉两部分。在高炉中，还原气的产生、铁矿石的还原和渣铁的熔化与分离是在一个反应器中同时进行，而KR法则是用两个反应器分开完成这些功能。这在技术上是一个重要的改进，因为这不仅可以避免高炉那样必须用优质焦炭操作的缺点，使KR法可以直接利用各种不同质量的原煤进行炼铁生产；而且可以避免高炉中软熔带的存在给操作和强化冶炼带来的不利影响。因此，KR装置的原理和以氧气操作决定了它必然是一个有利于强化冶炼过程的反应器。

尤其有意义的是，KR法的工作原理和操作对冶炼攀枝花地区的钒钛磁铁矿可能是很有利的，因为：（1）上部还原，下部熔化，这是一种典型的“先还原、后熔化”的作业方式；（2）纯氧操作，不存在载氮体，因而排除了冶炼过程中生成TiN的可能性；（3）不存在软熔带，加上熔融气化炉中渣—铁、渣—焦反应时间短，可以有效地抑制低价钛的生成；（4）铁水的硅、锰等元素含量低，但实际的铁水温度可达1350—1500℃，这意味着KR法容易做到“化学凉、物理热”；（5）KR竖炉可以灵活调节海绵铁的金属化率，即可根据需要灵活调节熔融炉中终还原阶段的氧位，以利于控制钒、钛在渣铁相中的走向和分配。这几条正是冶炼钒钛磁铁矿的试验和生产实践所证明的行之有效的技术方针。因此可以认为，用KR法冶炼钒钛磁铁矿应能有效地抑制和排除TiO_2对冶炼过程的干挠，克服或减轻现行高炉生产中例如钛渣变稠、泡沫渣、粘罐严重、铁损高、强化困难等特殊问题。KR法及与它相似的二段熔融还原法很可能是更好地解决钒钛磁铁矿冶炼的一条途径。

另一方面，用KR法处理钒钛磁铁矿，实质上也可看成是一种新型的预还原—熔化分离流程。在这种情况下，由于KR竖

炉用的是高质量的还原气(氧化度<2%)，还原气温度可以调节到1000℃左右，因此有把握把钒钛矿球团还原到金属化率高于90%。在这里不存在象直接还原竖炉造气那样的技术难题，也不需要建设单独的造气系统。而熔融气化炉将起熔化分离的作用（无须用电炉）。因此，从理论上讲，KR法处理钒钛磁铁矿也会比竖炉（或回转窑）还原—电炉熔化分离流程的技术经济效果优越。

当然，由于钒钛矿冶炼必须解决钒的有效提取问题，因此，当采用KR法处理钒钛磁铁矿时，可能在工艺上要作一定的改进。主要问题是在熔融气化炉内创造使钒充分还原进入铁水的条件，而同时抑制TiO_2对冶炼过程的干扰。这在原理上是可行的，在技术上是可以实现的。同时这也是一个必须通过试验研究加以解决的问题。

综上所述可以看出，KR法是一种发展比较成熟、技术比较先进的经济适用的熔融还原炼铁法，它特别适用于在焦煤短缺而具有一定的非焦煤资源的地区（例如我国南方诸省）发展钢铁工业，对于我国现有中小型钢铁企业的技术改造和长远发展以及中小型新钢铁厂(年产30—50万吨)的建设都会带来好处。

在当前新的产业革命潮流的推动下，结合我国的具体条件，开展适合我国情况的熔融还原炼铁新方法（尤其是KR法)的试验研究，是很有意义的。这种新方法对于更有效地解决攀枝花地区钒钛磁铁矿的冶炼和综合利用问题，具有特殊的意义。

参 考 文 献

〔1〕Stahl und Eisen, 100 (1980), Nr.20, 1207—1208.

〔2〕D.N.Skilling Jr., Skillings' Mining Review, Sept.25, 1982, 6—8.

〔3〕B.H.Le Cerf, Iron Age, 225 (1982), №28, Mp23—24.

〔4〕Stahl und Eisen, 102 (1982), Nr.19, 927—928.

〔5〕Rolf Steffen, Stahl und Eisen, 103 (1983), Nr.13, 39—42.

〔6〕Gero Past, Metallurgical Plant and Technology, 1983, No.5, 22—24.

〔7〕Iron and Steel Engineer, 1983, №.10, 71.

〔8〕Korf Engineering GmbH, The KR Process, Korf Technology for Production of Hot Metal and Reducing Gas on the Basis of Coal, June 1983.

〔9〕Erich Ottenschläger, Report on the KR—Process, May 1983.

〔10〕Heinrich Rellermeyer, Stahl und Eisen, 103 (1983), Nr.9, 415—420.

〔11〕J.O.Edström, Smelting Reduction Processes: Economic Viability, May 1983.