

熔 融 还 原 技 术

RONGRONG
HUANYUAN JISHU

杨天钧 刘述临 编著

冶金工业出版社

前 言

近年来熔融还原技术取得了很大进展，并受到钢铁冶金、能源开发和化工等行业的普遍关注。

结合作者近年来从事研究生教学和科学研究的体会，本书介绍了熔融还原的技术经济特点、基本原理和典型工艺。由于熔融还原的理论和实践尚在迅速发展之中，基本原理部分尽量避开了所涉及的严密数学推导，较多地介绍了实验结果和物理意义；典型流程则侧重介绍已经进行工业试验的较为成熟的流程。本书可作为研究熔融还原的入门读物，供冶金、能源、化工等专业研究生和高年级大学生教学参考，也可供上述专业的工程技术人员参考。

本书由杨天钧、刘述临编著。秦民生撰写了2.3.1，2.3.2及4.5小节，校阅全文并提出了不少宝贵意见；周渝生博士及研究生吴铿、左广庆、赵民革、张开旗、尹建威参加了资料收集工作，在此表示诚挚的谢意。

由于水平有限，经验不足，书中存在的缺点和错误，希望读者批评指正。

杨天钧 刘述临

1989年8月于北京科技大学

42152

目 录

绪言.....	1
1 熔融还原的现状与发展	5
1.1 由高炉法、直接还原法到熔融还原法.....	5
1.2 熔融还原的技术经济分析.....	18
1.2.1 不同钢铁生产流程的技术经济分析.....	18
1.2.2 不同因素对各种工艺经济指标的影响.....	30
1.3 熔融还原的发展与前景.....	38
2 熔融还原的基本原理	50
2.1 气体还原法、固体还原法与熔融还原法	50
2.1.1 炼铁反应装置的特点.....	50
2.1.2 铁氧化物还原的不同方法	52
2.1.3 熔融还原动力学分析.....	61
2.1.4 铁矿石熔融还原动力学模型.....	68
2.2 熔融还原的热平衡与物料平衡	71
2.2.1 热平衡与物料平衡的一般分析.....	71
2.2.2 各种因素对熔融还原能耗的影响.....	77
2.2.3 二步法熔融还原的里斯特图解.....	85
2.3 熔融还原常用的单元技术	94
2.3.1 煤气循环利用.....	94
2.3.2 煤气脱除 CO_2 及 H_2O	96
2.3.3 高温煤气除尘.....	97
3. 由转炉技术派生的熔融还原方法	101

3.1 铁水熔池造气技术的发展与特点	101
3.2 CIG法	105
3.2.1 CIG法煤粉造气原理	106
3.2.2 CIG法工业试验结果	108
3.2.3 CIG法熔融还原流程	111
3.3 CGS法	120
3.3.1 CGS法工艺原理	121
3.3.2 CGS法工业试验结果	122
3.3.3 CGS法熔融还原流程	127
3.4 COIN法	133
3.4.1 COIN法的工艺特点	134
3.4.2 COIN法熔融还原流程	135
3.4.3 COIN法的熔化过程	137
3.4.4 COIN法硫的分配与煤气粉尘	140
3.5 MIP法	142
4 由竖炉技术派生的熔融还原方法	145
4.1 成都钢铁厂5m ³ 竖炉直接还原	145
4.1.1 竖炉及设备特点	146
4.1.2 竖炉工业试验	148
4.2 KR (COREX) 法	149
4.2.1 KR法工艺原理	149
4.2.2 KR法工业试验结果	151
4.2.3 KR法的经济分析及前景	153
4.3 SC法	155
4.3.1 SC法工艺特点	155
4.3.2 SC法工业试验	157
4.3.3 SC法的应用前景	161
4.4 川崎法	166
4.5 高炉全氧(无氮)炼铁	171
4.5.1 四种高炉全氧炼铁方案的评述	172
4.5.2 日本钢管公司3.9m ³ 高炉全氧炼铁工业试验	176

5 基于电炉和等离子体技术的熔融还原法.....	181
5.1 PIROGAS法.....	184
5.1.1 PIROGAS法工艺原理.....	184
5.1.2 PIROGAS法工业试验结果.....	186
5.2 ELRED 法	190
5.2.1 ELRED法的基本原理	190
5.2.2 ELRED法工业试验结果	192
5.2.3 ELRED法熔融还原工艺及经济分析	197
5.3 INRED 法	201
5.3.1 INRED法工艺原理.....	201
5.3.2 INRED法工业试验结果.....	203
5.4 PLASMARED 法	204
5.5 其它等离子熔融还原方法	208
5.5.1 PLASMASMELT法.....	208
5.5.2 PLASMADUST法	210
5.5.3 PLASMACHROME法.....	212

绪 言

现代冶金技术正在迅速发展。人们从直接还原—电炉工艺得到启发，例如由直接还原生产的海绵铁（直接还原铁），在电弧炉中熔化、调整成分而炼成钢，设想把这两个工艺合为一体，获得能耗更低、过程更简单的将还原与熔化合于一体的工艺；又如在炼钢过程中加入少量氧化物，建立局部还原条件，使Mn、Cr、V、Ni等元素还原进而使钢液直接合金化，据此人们也在寻求满足局部还原和热量供给的综合流程。因此，熔融还原（Smelting Reduction）将是矿石变为金属的冶金生产流程的全面革新，将全面改革常规的以高炉为基础的钢铁生产流程。

熔融还原的开发研究今天成为世界潮流的技术经济背景在于：

（1）炼钢技术的发展：19世纪中叶以来，人们一直寻求新的方法以提高冶炼温度，空气炼钢在热量供应、获得高温方面不甚理想，马丁炉采用蓄热室技术达到了高温，但仍嫌炼钢的反应过程缓慢。第二次世界大战以后，氧气转炉迅速发展，不但获得了高温，而且由于流体运动的搅拌条件改善了动力学过程；不但有熔池顶上的射流搅拌，而且还有底吹搅拌。这种成功的搅拌使人们对炼钢过程化学动力学条件有了新的认识，完全改变了在“一潭死水”（熔池）中扩散的概念，炼钢过程突破了扩散的限制而大大加速，数百吨钢水在以分钟计的短时间内完成反应，而且反应终点与热力学平衡条件又十分接近。与此同时，燃烧与传热技术也在迅速提高，例如顶底复吹转炉渣中FeO已经降低到5~8%以下，转炉煤气的化学能通过后期燃烧再直接向转炉熔池供热，转炉熔池还能接受固体碳作为热源，西德开发的KS法、

KMS法、美国开发的EOF法采用氧气转炉像电弧炉那样冶炼废钢，主要在于解决以工业规模向转炉熔池供给热量的问题。炼钢技术的飞跃发展启迪人们考虑采用氧气和电能（等离子体技术）强化整个钢铁生产流程，而能源的考虑又在于煤的直接应用，这样熔融还原方法应运而生。

（2）制氧技术与高效制氧机的发展：二次大战前，冶金工业使用富氧空气已经感到是奢侈的行为，更谈不到全氧冶炼。战后直至今天低压制氧技术不断完善，大型制氧机不断更新，制氧电耗由每立方米氧几千瓦·时下降到 $0.5\sim 0.7\text{kW}\cdot\text{h}$ 或者更低。人们用氧燃烧煤粉不但获得高温而且加速了燃烧过程，从而有可能开发以煤粉为主要燃料的新冶金流程；实际上，高炉的大型化和高压操作，今天高炉鼓风机的电耗与全低压制氧流程的电耗相差无几，开发新的熔融还原流程已经成为现实的需要。

（3）电能转换技术的发展：煤粉燃烧要用氧或电来强化，目前高温电热技术主要采用电弧，70年代以来，不断更新的等离子体电弧已进入工业领域，等离子体发生器已达兆瓦级，平均寿命数百小时。80年代中期瑞典马尔摩（Malmö）已有装机能力为8台6MW的非转移弧生产铬铁的等离子体电炉投入工业生产，这种能量高度集中的等离子体电弧不但有较高的传热效率，而且电热转换效率和用电效率较高，为开发电煤法熔融还原流程奠定了基础。

（4）气力输送技术的发展：灵活而无污染的粉料运输长期以来仅用作仓储、装卸的手段，60年代以来引入冶金工业并得到飞速发展，这种输送速度、分配比和混合比可调可控的气力输送方法，由于载气的作用可以形成过程的搅拌与混合，例如化工行业中有效的桨叶搅拌在高温下也只有用气力搅拌来代替，今天冶金工业广泛采用的喷射冶金、煤粉喷吹，煤氧枪助燃技术等已经取得成功，气力输送设备的迅速发展使得熔融还原取消造块工艺后粉料的输送变得简单而且易行。

（5）煤粉燃烧和煤气改质技术的发展：用氧和电来强化燃

烧，燃烧煤粉和气体燃料已无太大的差别，例如用全氧燃烧煤粉或将煤粉通过等离子体射流，燃烧速率都会成倍增长，甚至可在毫秒级短时间内使煤粉燃尽。在此基础上煤气改质技术（Gas Reforming）近年来也得到很快的发展，这样就有可能在冶金过程中为不同目的把常见的碳氢化合物及其氧化物改质成为气体还原剂（主要是CO和H₂）。本质上说来，煤气改质过程实质上是能量和产品的自由兑换，其结果使排出的炉顶煤气可以循环使用并且避免被氮稀释。这一技术可以使熔融还原流程减少污染，节约能量。

（6）流态化和粉尘回收技术的发展：粉状原料的还原依赖于流态化技术的进步，早期的流态化技术微观反应速度很快但宏观工业生产又面临许多问题（失流、粘结等），目前在典型的筛板床基础上又开发出各种各样的快速床，有可能在不久的将来在工业生产中得到广泛的应用。与此相关的粉尘回收技术的关键是高温煤气中粉尘的回收，或者采用耐高温的过滤装置，或者用煤气改质的方法换热，同时回收粉尘和热量。高温除尘技术的发展为熔融还原提供了广阔的前景。

综上所述，在这样技术经济背景下开发的熔融还原工艺将具有以下特征：

（1）一切竖炉的要求，诸如前期造块工艺、高炉中软熔带的影响，在新的熔融还原流程中将部分或全部取消，煤的直接应用将取代焦炉，粉矿的直接应用将取代烧结和球团。就此而言，钢铁企业的投资就会下降15~20%，颗粒流、颗粒反应代替了常规的气相、液相反应，钢铁企业在外观上与管道纵横的化工厂没有大的区别，相应的环境污染也将部分或全部改善。

（2）这一新的熔融还原过程将高度自动化，产品质量可以调整而命中率较高。

（3）在经济的原则下，冶金工业采用熔融还原工艺将能建成不同规模的流程，而不仅仅是投资者不敢问津的庞然大物。

（4）从采矿、选矿开始，采用熔融还原的冶金工厂不光生

产冶金产品，还是新型的能源基地（外供煤气或煤气发电等）。

因此，熔融还原作为一种全面革新冶金生产流程的新工艺将会得到迅速发展。

1 熔融还原的现状与发展

熔融还原是指非高炉炼铁方法中那些冶炼液态生铁的工艺过程。早在20年代，随着直接还原的发展就出现了一些熔融还原方法，如生铁电炉法（Tysland-Hole 法）等，而且在某些方面达到了实用水平。60年代，瑞典冶金学家埃克托普（S. Eketorp）把这些生产液态铁的非高炉炼铁方法从直接还原中独立出来称之为熔融还原，其初期的技术思想是希望发展一种既无需铁矿石造块又不使用昂贵冶金焦炭，既能生产高质量生铁产品又无环境污染的理想冶炼工艺。但经过多年研究开发，实践证明这种理想的技术思想是不切实际的，因此当前一般认为即使应用烧结、球团作为原料，甚至使用少量焦炭，只要不以焦炭为主要能源的生产液态铁的非高炉炼铁方法均为熔融还原。

熔融还原是直接还原的逻辑发展，但发展的现实是二者具有不同的开发价值。开发直接还原在于提供废钢的代用品，是一种生产特殊生铁产品的炼铁工艺；而熔融还原的开发在于寻求一种代替常规高炉炼铁的新工艺，以摆脱焦炭短缺造成的障碍。在目前直接还原面临天然气昂贵和回转窑技术尚待改进的情况下，熔融还原自然成为非高炉炼铁的新兴技术路线。但熔融还原目前大都处于实验研究阶段，其技术上的困难更多，在理论和工艺上都需作出巨大努力方能取得技术的突破。

1.1 由高炉法、直接还原法到熔融还原法

全世界每年生产7亿多吨钢，因而铁是一种非常重要的金属。然而今天从矿石中得到的大量铁，约有98%是通过高炉生产的。高炉工艺的主要原理在中世纪就已经知道，但在近100年来它才

有很大发展，尤其最近几十年发展更快。现代化高炉是一种效率极高的冶炼设备^[1,2]。

确保大型高炉顺行、无故障操作的一个重要条件是，原料和燃料应具有竖炉所要求的良好冶金性能。为确保良好的透气性和煤气在高炉中的分布，矿石必须有较大的粒度。然而，今天所生产的大部分矿石是精矿粉，它在竖炉使用之前必须造块——烧结或造球，煤不能直接用作高炉的主要燃料，除非转变成高级的冶金焦炭。

精矿粉的造块和煤的焦化是昂贵的过程，相当于生铁生产成本的15%至20%，烧结厂和焦化厂还严重地污染环境。因此，如果能研究出一种不需要造块和焦化工艺的方法将是技术上的重大突破。况且，矿石的还原工序所消耗的能量要占钢铁生产总能耗的65%左右。

高炉炼铁目前已达到十分完善的程度。例如，现代高炉的容积不断大型化，出现4000m³以上的超大型高炉，年产量可达300~500万t。近年来广泛采用的精料、高风温、高压、富氧、喷吹、计算机控制等先进技术，已使高炉成为在热工和反应动力学方面很有成效的生产装置。现代高炉的作业率确实令人惊叹，焦比（全焦操作）低于450kg/t，生产率可达2.5t/m³·d。如果回收高炉煤气的能量（低热值高炉煤气的热损失为30%）则高炉的能量利用率是很高的。在过去的25年中，高炉所取得的进步主要是更好地了解了炉内发生的各种过程的原理。

然而，不难指出高炉过程所固有的一些缺点^[1,2,10,11]：

（1）煤气和炉料逆流运动的高炉过程需要高质量的人造炉料，即铁精矿要被加工成烧结矿或球团矿，煤要炼成焦炭；而含CO20%的低热值炉顶煤气是由优质焦炭产生的。

（2）由于加热空气和除尘，需要建设大量辅助设备。因此，由烧结、炼焦、热风炉、高炉等组成的炼铁系统是一个复杂、庞大的生产系统，需要巨额投资；况且工艺流程长，原料、燃料必须经过反复加热、冷却和加工，能耗和生产成本比较高。

(3) 高炉流程进行经济生产要求的规模较大, 生产的灵活性较差。

而高炉本身作为一个反应器的缺点是:

(1) 冶炼过程是在单个反应器中进行。逆流热交换、煤气还原、焦炭燃烧、煤气的产生和渣铁分离等。所有这些过程都发生在这个反应器中, 除了加料和放出渣铁外, 缺少调节和控制手段。

(2) 物料的向下运动是不规则的, 煤气在通过浆糊状的软熔带时尤其困难。

(3) 改变工艺参数后若干小时才会反响, 即高炉过程的滞后性, 使这一过程难于控制。

尽管高炉工艺具有巨大的优越性, 然而正如由于前面所叙述的原因, 人们还是在致力于开发另外的生产工艺来代替它。

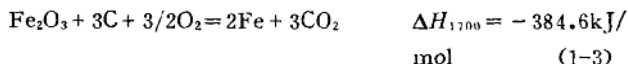
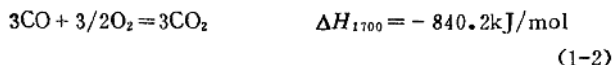
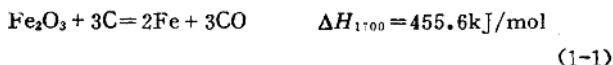
在直接还原(海绵铁生产工艺)中, 铁矿石是在比较低的温度下还原, 并且由于低温化学过程和技术上的原因, 其能耗低是可能的。缺点是未能熔化脱除脉石杂质, 因而要求使用品质优良的原料, 而且生产率低。但是, 在那些可以得到廉价的天然气的地区则可以采用这种生产工艺, 因为其每吨产品的投资有竞争力。如果仅有煤可作廉价的能源, 则还原气体制备困难, 而且气体还原工艺的投资成本高。以煤为基础已发展为生产规模的直接还原工艺是大家熟悉的回转窑工艺, 然而由于这种工艺生产率低而投资高因而受到阻碍。在缺乏天然气的情况下, 如果有廉价的电能再加上有造气用的煤, 那么就可以找到一个合理的解决措施, 瑞典的等离子法似乎是按照这个方向提出的一个重要设想。

尤其是70年代出现两次石油危机以来, 由于世界经济增长速度减慢, 对资源有限性的认识加深, 使人们越来越看到了直接还原的普遍应用所存在的困难。特别是石油和天然气价格猛涨, 使得作为直接还原主流的气体还原法在绝大多数工业国难以进行经济生产^[14,15]。为了保持竞争能力, 钢铁工业将再也不能依赖于石油和天然气。大多数欧洲国家认为, 直接还原不再具有大量经

济地生产钢的广阔前景。预计未来10年，北美直接还原铁的成本将高于废钢。因此，直接还原法只能有限地小规模应用于某些国家和地区。世界上直接还原生产能力的70%分布在具有丰富的能源及铁矿资源或二者兼有的发展中国家，预计1990年中东和拉美地区将占直接还原总能力的三分之二。由于直接还原—电炉流程受到许多条件的限制，迄今直接还原远未达到预计的发展速度和规模，海绵铁的实际产量始终没有达到生产能力的一半。例如，1983年世界海绵铁总产量为780万 t，仅占设备总能力1905.4万 t 的41%，其中Midrex法和HYL法占91.1%，回转窑法占4.3%。

熔融还原法作为一种炼铁方法是在本世纪20年代提出的。1924年霍施（Hoesch）钢铁公司提出的在转炉中使用碳和氧还原铁矿石，至今仍有现实意义^[6]。1939年丹麦提出Basset法，在两座总能力为100 t/d 的回转炉中，用煤和油对黄铁矿渣和矿粉进行还原和熔炼。

熔融还原法的积极倡导者埃克托普教授在60年代提出了熔融还原的理论，它是基于以下原理：



反应（1-2）放出的热量足以补偿反应（1-1）所需要的热量。它的优点是碳最终可以完全转变为CO₂，煤气的利用率在理论上可以达到100%。

最原始的“熔融还原”的概念就是从这里产生的，即在熔融状态下，铁氧化物的全部还原都依靠C→CO来完成，且生成的CO燃烧成CO₂，产生的大量热量满足系统热平衡的需要。这样，可以达到理论最低碳耗321kg/t铁，在这个系统中碳是唯一的能源。

从50年代后期开始，欧美各国先期研究开发的熔融还原法大多遵循这一原理。由于这些方法是在一个反应器中一步完成全部熔炼过程，故被称为“一步法”，例如Dored法、Retored法、CIP法、Ekatorp-Vallak法等。

然而在实际应用中，这些方法都归于失败。主要是存在以下问题：

第一是如何将熔融还原过程中产生的CO在同一反应器中用氧燃烧，并把燃烧产生的热量有效地传递给还原区，同时反应(1-1)和(1-2)在空间上必须彼此分开，以避免还原区被氧化。但传热和传质是难于分开的。

第二是熔融还原产生的高FeO渣对炉衬的严重侵蚀作用^[10,16]。为了把炉内产生的CO的燃烧热更好地传递给熔池，在初期曾研究过所谓的低速旋转炉法，例如Basset法、Stürzelberg法、Consett-Iron-CO法、Bouchet法、Dored法等^[17]。由于炉墙受到热循环的剧烈冲击，粘在炉墙上的FeO暴露在高温下，耐火材料消耗大、生产率低、燃料费用高，因此这些方法早已停止研究。为了解决高FeO渣的侵蚀问题，从60年代到70年代中期，出现了沿水平或垂直轴旋转的高速回转炉法，例如英国的CIP法、意大利的Rotored法、美国共和钢铁公司的旋转反应炉等。这些方法依靠离心力的作用，使铁水覆盖在耐火材料表面，隔绝了高FeO渣与内衬的接触。但这些方法也由于高速旋转产生的振动和机械问题不能解决而无法生产。Ekatorp-Vallak法是使加入的矿粉形成所谓“矿幕”来遮隔炉墙的方法。此外，布如勒(Brunner)曾建议回转炉的内衬由CaO和为CaO饱和的渣组成，以防止内衬的侵蚀，但这种方法从未达到中间试验阶段。

第三个问题是高温煤气排出反应器使热能利用降低，并且不能直接依靠CO的燃烧将能量反馈给吸热反应。能量的传递不得不间接进行，或者用炉墙把氧化燃烧区与还原区分开，或者是通过电能的形式传递能量，这意味着必须把煤气的能量转换成电能。至少到现在为止，这种通过CO直接燃烧来加热反应系统的

方式是不现实的。此后，还有Arbed法采用顶底吹的技术，将煤粉吹入熔池，并从炉底喷入 N_2/CO_2 进行搅拌；Uddacon法采用感应圈通电加热，电耗约 $2300kW \cdot h/t$ ，现在多用于有色冶金工业，只有在电价低廉的地区才有前途。

为了解决一步法出现的难题，70年代以来国外研究开发的熔还原基本上是“二步法”，目前二步法已成为普遍的发展趋势。所谓二步法就是将还原过程分解为固体状态的预还原和熔融状态的终还原两个阶段，并分别在两个反应器中进行。预还原装置多为流化床和竖炉。竖炉的优点是工艺成熟、还原率高、操作简单，缺点是必须用块矿或球团矿。流化床可以直接使用精矿、矿粉或炉尘，反应速度快。预还原阶段所用的还原气来自终还原阶段产生的煤气（主要成分为 CO 和部分 H_2 ），但是铁氧化物的脱氧率较低，一般为 $60 \sim 70\%$ ，而竖炉可达 90% 以上。预还原后的物料紧接着送到终还原反应器，在高温熔融状态下进行终还原、渗碳、渣铁分离，最终熔炼出与高炉生铁类似的铁水。终还原炉有转炉型、竖炉型、电炉型等几种基本形式。

图1-1示出了二步法的一般原理。整个系统一般由预还原、终还原和能量转换等工艺单元组成。矿石加入预还原单元，煤可以加入预还原或高温熔融还原单元，氧气通入这两单元中任意一个，用来使煤燃烧。从这两个单元出来的煤气（预还原放出 $CO- CO_2$ 的混合煤气，终还原放出含 CO 很高的煤气）被送去发电，而将过剩煤气用作其他用途（例如作为燃料煤气、化工原料等）。

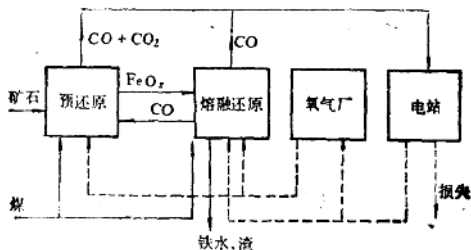


图 1-1 熔融还原单元过程的配置

图1-1所示的系统可以用不同的方式操作，从而构成各种不同的二步法的变型。系统中两个步骤可以独立调节，以达到整个过程的优化操作。在高炉中，预还原、终还原和还原气的产生是在一个反应器中同时进行的，无法单独控制。二步法对高炉法的这一变革，不仅使它摆脱了对优质焦炭的依赖，开辟了任何能源（尤其是低质煤）都能炼铁的途径；而且使它摆脱了软熔带的不利影响，加之使用氧气操作（以致于实现无氮炼铁），以及终还原过程能量密度高等有利因素，为提高生产率创造了有利的条件。可以说，熔融还原的目的之一，从技术观点看就在于从束缚高炉炼铁法的透气性问题中解放出来，同时解决直接还原中的脉石分离问题。

氧气炼钢的成功，对人们探索氧气炼铁具有很大的吸引力。除了历史的原因外，炼铁工艺没有理由一定要建立在复杂的原料（如烧结矿和焦炭）基础上；没有理由只用空气而不用氧气；没有理由花费以小时计而不是以秒计的还原时间。高的反应速度需要良好的动力学条件，这方面的措施有：①增大反应面（粉末、液滴、乳化）；②强烈的搅拌；③在熔池或散料床中产生热量；④高温。所有这些措施都能导致高的能量密度。

由表1-1可以看出，高炉法是一个“低速方法”，各种氧气冶炼方法的能量密度高一个数量级，而等离子法具有至今尚未完全了解的强度来传递能量的能力^[18, (9)]。

概括地说，熔融还原法与传统的炼铁方法相比具有以下优点：

（1）以便宜的、储量最丰富的非焦煤为主要能源，使炼铁摆脱了对昂贵的焦炭和石油、天然气的依赖，有可能直接使用粉矿，不需造块（烧结或球团），减少环境污染。

（2）由于可以取消烧结、炼焦和其他一些辅助设备（如热风炉），因此可以减少基建投资，缩短工艺流程、降低生产成本，并实现节能型的连续工艺。

（3）工艺过程的可控性好，对原燃料的适应性强；并可以

表 1-1 各种冶炼方法的能量密度

方 法	MW/m ³ 熔池体积	MW/m ³ 炉容	MW/m ² 熔池面积
平炉	0.5	0.1	0.3
高炉	—	0.4	—
电弧炉 (一般)	2	0.4	1
电弧炉 (超高功率)	2~5	0.5~1	2~5
高频炉 (一般)	2	1.5	3.5
卡尔多转炉	3~6	0.7~1.5	6~10
LD转炉	7~14	1~2	10~20
托马斯转炉	20	1	20
熔融还原	12	3	15
高频炉 (将来)	7	5	12
等离子还原	2400	200	7

做到小规模的经济生产，有利于建设中小型工厂。

(4) 产品为铁水，可以用高效率的氧气转炉精炼 (不用电能)，并在炼铁过程中解决了渣铁分离问题。

(5) 熔融还原法的能量密度高，传热传质条件好，反应速度快，没有软熔带，有利于冶炼的强化，生产率高，甚至达到高炉的5~10倍。某些熔融还原法可以做到直接炼钢。许多方法还可以用于冶炼铁合金 (如铬铁、锰铁等)，做到以煤代电。

在熔融还原法的发展过程中，广泛采用了近年来发展起来的许多新技术和边缘技术，例如喷射冶金、复合吹炼、等离子冶金、快速流化床、煤的气化技术、直流电弧炉、高温氧气喷嘴等。这些新技术的应用使熔融还原法能在很大程度上改变传统的冶炼工艺。然而从总体上看，熔融还原正处在发展之中，为了达到工业化，新工艺必须确保回收率和产品质量，确立降低单耗和稳定操作的可行技术。必须研究向预还原炉和终还原炉供给矿石、还原剂、氧气等的最佳化操作问题，研究预还原和终还原炉的同步配合问题。同时还需要进一步研究高温除尘装置、高压装置、高温热交换器、高转换效率的发电系统。熔融还原炉本身及其耐火材料的侵蚀问题、连续出渣出铁系统及降低制气成本等，