

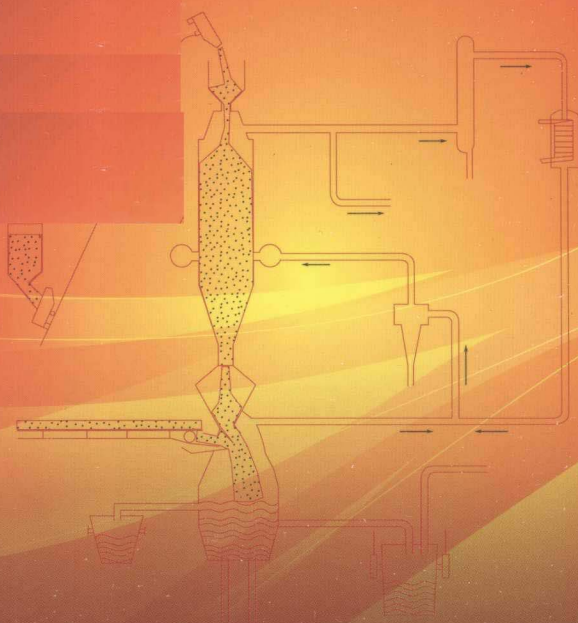
高等学校冶金工程专业“十二五”规划教材

# 非高炉炼铁

FEIGAOLU LIANTIE

陈 津 主 编

林万明 副主编



化学工业出版社

高等学校冶金工程专业“十二五”规划教材

# 非高炉炼铁

陈 津 主 编

林万明 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以理论基础和实际应用为主线,系统地介绍了非高炉炼铁冶金热力学与动力学基础、非高炉炼铁原料及燃料、直接还原、熔融还原、其他非高炉冶金方法、微波冶金、非高炉炼铁技术经济评价等内容。本书可作为高等本科院校、大专、高职高专、成人高校、广播电视大学的冶金工程技术类专业教材或自学用书,也适于作为中等职业技术学院相关专业的教学用书以及工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

非高炉炼铁/陈津主编. —北京:化学工业出版社, 2014. 5  
高等学校冶金工程专业“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-122-20087-7

I. ①非… II. ①陈… III. ①直接炼铁-高等学校-教材  
IV. ①TF53

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第050519号

---

责任编辑:陶艳玲

文安编辑:闫敏

责任校对:吴静

装帧设计:张辉

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张20 字数502千字 2014年10月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:45.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

---

随着焦煤资源的日益减少，钢铁生产能源结构的改变，高炉炼铁技术发展受到了一定条件的限制，非高炉炼铁技术成为了日益关注的冶炼前沿技术。非高炉炼铁技术是指除高炉炼铁技术之外不用焦炭的炼铁方法，包括直接还原炼铁技术和熔融还原炼铁技术两大类。

当前，我国钢铁行业面临严峻的形势：高炉原燃料质量劣化，技术经济指标下滑，生产利润大幅度下降。作为传统高炉炼铁工艺的补充，非高炉炼铁工艺适应了我国钢铁工业发展的需要，是钢铁工业今后发展的重要方向。

本书作为高等学校冶金工程系列教材之一，根据教学大纲要求，结合非高炉炼铁生产实际及其新技术、新工艺，系统阐述了非高炉炼铁的生产原理及生产工艺。本书共分8章，主要内容包括：非高炉炼铁的现状与发展趋势；直接还原和熔融还原的基本原理和工艺方法；其他非高炉炼铁技术及非高炉炼铁技术经济评价等内容。

本书由太原理工大学陈津主编，林万明副主编。本书共分8章，其中第1、2、7章由陈津编写；第4、6、8章由林万明编写；第3、5章由赵晶编写。

本书在编写过程中参考了大量的文献资料，在此谨对相关资料的作者及单位表示衷心的感谢。本书在编写过程中也得到了同行及同事们的大力帮助，在此对他们表示感谢。

本书可作为高等学校本科、大专、高职高专、成人高校、广播电视大学冶金工程专业的教材，也可作为工程技术人员和研究生的参考书。

由于时间和条件所限，书中不当和疏漏在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2014年1月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 钢铁工业的起源、发展现状和未来	1
1.2 非高炉炼铁技术的产生与发展	8
1.3 冶金与循环经济	32
主要参考文献	38
<b>第 2 章 非高炉炼铁冶金热力学与动力学基础</b>	<b>40</b>
2.1 氧化物还原热力学条件	40
2.2 氧化物的间接还原反应	42
2.3 氧化物的直接还原反应	60
2.4 金属热还原反应	69
2.5 铁的渗碳及含碳量	72
2.6 熔渣中氧化物的还原反应	80
2.7 冶炼中的脱硫反应	90
2.8 铁浴熔融还原反应	94
主要参考文献	97
<b>第 3 章 非高炉炼铁原料及燃料</b>	<b>98</b>
3.1 非高炉炼铁原料	98
3.2 燃料与还原剂	101
主要参考文献	112
<b>第 4 章 直接还原</b>	<b>113</b>
4.1 竖炉直接还原法	114
4.2 流化床直接还原法	137
4.3 罐式直接还原法	151
4.4 回转窑直接还原法	157
4.5 其他直接还原法	181
主要参考文献	190
<b>第 5 章 熔融还原</b>	<b>191</b>
5.1 熔融还原法分类及特点	191
5.2 熔融还原法基本原理	193

5.3 熔融还原法工艺介绍 .....	196
主要参考文献 .....	225
<b>第 6 章 其他非高炉冶金方法</b> .....	<b>226</b>
6.1 电炉法 .....	226
6.2 ITmk3 .....	232
6.3 Iron Carb 工艺 .....	235
6.4 粒铁法 .....	236
6.5 生铁水泥法 .....	240
6.6 转鼓炉法 .....	241
6.7 等离子冶金 .....	243
6.8 其他能源炼铁法 .....	244
主要参考文献 .....	247
<b>第 7 章 微波冶金</b> .....	<b>248</b>
7.1 微波加热原理和特点 .....	248
7.2 冶金物料介电性能 .....	256
7.3 微波冶金动力学 .....	257
7.4 微波加热碳热还原反应 .....	261
7.5 微波加热还原-电炉直接炼钢工艺 .....	269
主要参考文献 .....	277
<b>第 8 章 非高炉炼铁技术经济评价</b> .....	<b>280</b>
8.1 技术经济指标 .....	280
8.2 钢铁生产工艺流程的基本参数及其比较 .....	282
8.3 直接还原技术经济评价 .....	286
8.4 熔融还原的技术经济评价 .....	301
8.5 我国非高炉炼铁的技术经济评价 .....	309
主要参考文献 .....	313

# 第1章

## 绪论

非高炉炼铁是指除高炉炼铁以外的其他还原铁矿石的方法，非高炉炼铁可归纳为两大类——直接还原技术和熔融还原技术，是钢铁工业发展的前沿技术。

### 1.1 钢铁工业的起源、发展现状和未来

#### 1.1.1 钢铁工业的起源和发展现状

钢铁工业是国民经济的重要基础产业，包括地质、探矿、采矿、选矿、造块（烧结、球团）、焦化、炼铁、炼钢、轧钢、金属制品及辅料、废弃物处理等生产工序。

钢材消费量主要受经济总量和经济结构、发展阶段、固定资产投资规模等因素的影响，我国“十二五”期间，工业化、城镇化不断深入，保障性安居工程、水利设施、交通设施等大规模建设拉动着钢材的消费；同时，我国将加快转变发展方式，推动工业转型升级，培育发展战略性新兴产业，钢材“减量化”和材料替代等因素会对钢材消费量和消费结构产生重大的影响。综合考虑，预测 2015 年我国粗钢导向性消费量约为 7.5 亿吨<sup>[1]</sup>。

回顾工业发展的历史，机器的发明和使用开创了以机器代替手工劳动的第一次工业革命。珍妮纺纱机（1765 年）的出现是一项具有深远影响的发明，它使纺织效益提高了 40 倍以上；此后以蒸汽机为代表的诸多机器的发明和使用，大大促进了冶金、采煤等行业机器的发明和使用，伴随着“机器时代”而来的是“钢铁时代”。

新的技术革命推动了古老工业部门的发展，最突出的是钢铁工业。19 世纪上半叶，由于房屋结构和铁路的需要，熟铁和铸铁的产量增长很快，而钢的产量裹足不前。英国是当时世界上钢产量最多的国家，1850 年其产量为 6 万吨，而同年的铁产量却达到 250 万吨。由于冶炼技术的滞后，钢产量不高，且价格昂贵，用途仅局限于工具和仪表。19 世纪下半叶，由于西门子、托马斯等人在钢铁冶炼技术方面的贡献，钢得以大量生产且质量大幅度提高，因而逐渐代替熟铁，成为机械制造、铁路建设、房屋桥梁建筑等领域的新材料并风靡全球。此后，钢铁工业的发展如日中天，导致重工业在工业中的比重直线上升，史称“钢铁时代”。

第二次工业革命的特点就是电力的应用，电动生产资料和生活用具雨后春笋般地涌现，迅速改变着社会生产和生活面貌。由于电力的使用，促使工业快速发展，特别是钢铁工业的发展，它使人类在材料领域告别了棉花时代，进入到钢铁时代。凯利（W. Kelly, 1811~1888，美国转炉炼钢发明人之一）、贝塞麦（H. Bessemer, 1813~1898，英国冶金学家，发明空气底吹酸性转炉炼钢法）、托马斯（英国冶金学家，1850~1885，发明空气底吹碱性转炉炼钢法）、马丁和西门子（P. Martin，法国人；K. W. Siemens，德国人；发明平炉炼钢法）等炼钢法以及后来发明的电炉炼钢法，使得钢产量迅速增加。钢产量的剧增，导致价格

急剧下降，便宜的价格又导致钢迅速在很多部门和领域代替了铁，应用范围随之扩大。钢铁技术的进步，不但促进了原有重工业（如采煤业、机器制造业、铁路运输业等）的飞跃发展，而且还促进了其他以钢铁为原料的新兴工业的发展，如电力工业、电器制造、化学工业、石油工业、汽车工业和飞机制造业等。重工业很快地成为世界各国经济的非常重要的部分，19世纪末到20世纪初，重工业已经在世界工业中占据了主导地位。

钢铁工业是重要的材料生产工业，从一百多年前形成钢铁大工业以来，钢铁工业得到了飞跃式的发展，世界钢产量从1880年的440万吨<sup>[2]</sup>，发展到1989年的7.8亿吨。根据国际钢铁协会的统计数据，2012年世界粗钢产量为15.48亿吨，达到了世界钢铁产量的顶峰，比2003年世界钢铁产量9.68亿吨增加了59.92%。2012年世界各国粗钢产量及生产份额见表1-1。

表 1-1 2012 年世界各国粗钢产量及生产份额

国家、组织及地区	中国	欧盟	日本	美国	印度	俄罗斯	韩国	巴西	乌克兰	其他地区
粗钢产量/亿吨	7.16	1.69	1.07	0.88	0.77	0.71	0.70	0.34	0.32	1.81
占世界份额/%	46.3	10.9	6.9	5.7	5.0	4.6	4.5	2.2	2.1	11.7

自1949年以来，我国粗钢产量逐年增加，1949年我国粗钢产量仅为15.8万吨，而世界粗钢总产量为16000万吨，我国粗钢产量仅占世界粗钢总产量的0.10%。1996年我国粗钢产量首次突破亿吨大关，达到1.01亿吨，世界粗钢总产量为7.504亿吨，我国粗钢产量占世界总产量的13.46%，成为世界第一钢铁生产大国，到2012年我国粗钢产量达到了7.16亿吨（见图1-1<sup>[3]</sup>）。根据中国钢铁工业协会统计数字，2013年我国的大中型钢铁企业共计有80余家，其中大型钢铁联合企业有15家，2013年我国粗钢产量达到了7.79亿吨（见图1-1<sup>[3]</sup>）。根据预测分析，2014年我国粗钢产量将达到8亿吨。

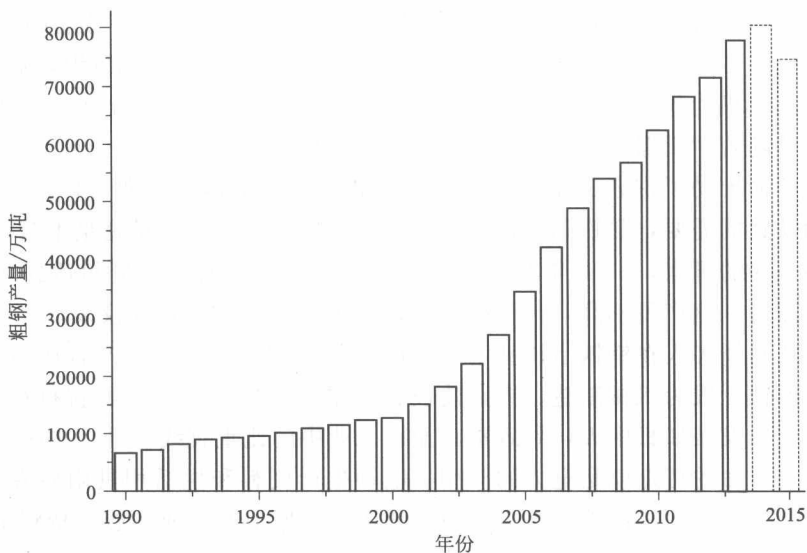


图 1-1 1990 年以来中国粗钢产量统计

我国钢铁工业从20世纪90年代以来得到了快速发展，在全球占有重要位置。1990年至2012年间钢产量增加了11.8倍；连续17年保持钢产量世界第一；2012年中国的钢产量达到了529kg/人·年，已超过世界发达国家的水平。



虽然国际上现在已不把钢产量作为衡量一个国家经济实力最重要的指标之一，但是一个国家科学技术进步的水平，在很大程度上依然取决于冶金工业的现状和发展水平。冶金工业不仅决定一个国家的经济独立性，而且决定其政治独立性，因此，世界各国的冶金工业在金融、信贷和税收优惠诸方面都得到政府相当大的支持。

随着科学技术的不断进步和发展，新型结构材料不断出现，如铝合金、钛合金和镁合金、结构件用塑料、陶瓷材料、非晶材料和微晶材料等，在工业发达国家中这些新型结构材料的消费量占有所有结构材料的比例已达到 14%~18%。但是，由于钢铁材料经济性能优越（强度高、塑性好、价格低），生产和消费都比较经济，在大多数应用领域中，尤其在建筑、路桥、汽车等行业中尚无可与其匹敌的材料。

在 21 世纪，钢铁材料仍将是重要的结构材料，工业发达国家钢材用量占结构材料总用量的比例为 70%~75%，而发展中国家的这一比例将高达 80%~90%。因此，在可预见的未来，钢铁材料在结构材料中的地位仍将是稳固的。冶金工业在传统生产技术继续改进和提高的同时，各种新技术、新工艺及新流程必将得到加速开发和推广应用。

铁是炼钢的主要原材料，1996 年世界生铁年产量为 5 亿吨，其中 90% 是由高炉生产的，其余 10% 是由非高炉炼铁工艺——直接还原法和熔融还原法生产的。据统计，2008 年世界直接还原铁产量为 6700 万吨，占世界铁总产量的 6%~7%；2009 年世界直接还原铁产量为 6440 万吨，占世界高炉生铁产量 9.52 亿吨的 6.76%<sup>[4]</sup>。2012 年世界生铁年产量达到了 11 亿吨，其中，中国的生铁产量为 6.543 亿吨，占世界生铁总产量的 59.48%；而同年世界直接还原铁产量约为 0.54 亿吨，占世界生铁总产量的 4.9%。预计在今后 50~100 年内，只要还有焦炭供应，高炉仍将是主要的炼铁设备（见图 1-2）。但是，高炉必须使用资源较少的焦煤（炼制焦炭），经选矿得到的铁精矿粉也需先进行造块才能使用。国际冶金界认为，研究直接使用非焦煤和铁矿粉炼铁生产工艺对人类社会和资源环境具有重大意义。目前，世界上几种直接还原技术和熔融还原工艺已投入工业化生产，用非高炉炼铁工艺生产的铁源比例在今后将会大幅度提高。

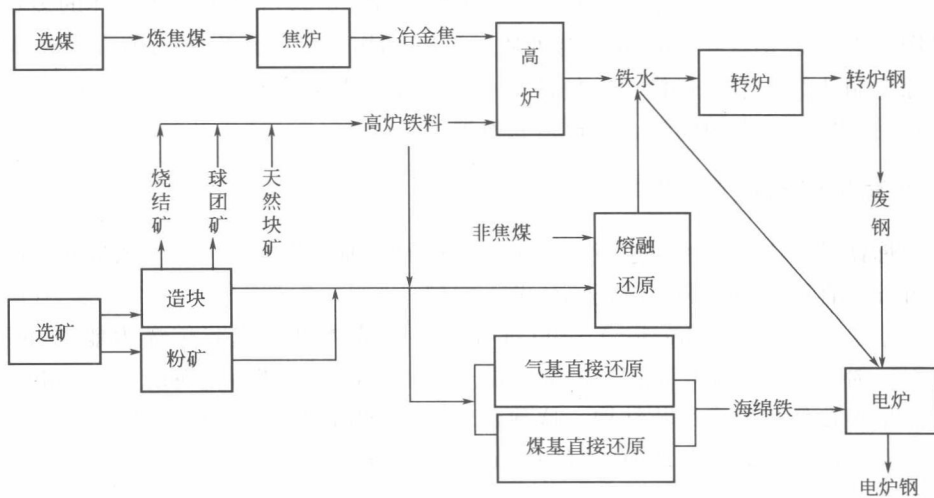


图 1-2 现代钢铁生产全流程解析图

据统计，世界燃料总储量约为 9000G 吨标准煤，其中天然气占 2.3%，石油约占 4.3%，煤炭占 92%，其余为油页岩<sup>[5]</sup>。我国是一个能源生产和消费大国，能源资源分布格

局具有富煤、缺油、少气的特点。2009 年底已探明可采的石油、天然气、煤炭储量分别为 20 亿吨、2.46 万亿立方米和 1145 亿吨，储采比分别为 10.7、28.8 和 38<sup>[6]</sup>。仅以煤炭资源而论，虽然我国的煤炭远景储量已超过 1 万亿吨，但制焦的焦煤资源还是相对较少，炼焦煤储量仅占我国煤炭总储量的 26.25%（见表 1-2）<sup>[7]</sup>。

表 1-2 2000 年我国炼焦煤种储量分配表

储量	炼焦煤储量	其中				
		气煤、1/3 焦煤	肥煤、气肥煤	焦煤	贫瘦煤	未分类
占总储量/%	26.25	12.00	3.37	6.20	4.17	0.51
占炼焦煤储量/%	100.00	45.72	12.81	23.61	15.90	1.96

注：1/3 焦煤是介于焦煤、肥煤和气煤之间的过渡煤种，中等煤化程度，是一种中等或较高挥发分的较强粘结性煤。

近年来，随着我国钢铁产量逐年攀升，2000 年焦煤开采量为 47425 万吨（见表 1-3），到 2012 年焦煤开采量为 54000 万吨。按煤炭详查资源总量估算，2070 年以后我国的焦煤资源将面临枯竭，传统的高炉炼铁工艺将无法进行正常生产。与此相反，大量的非焦煤资源在炼铁工艺中却无法得到充分利用，因此开发和采用非高炉炼铁工艺流程迫在眉睫。

表 1-3 2000 年我国不同品种炼焦煤产量表

品种	气煤	1/3 焦煤	焦煤	肥煤	气肥煤	瘦煤	贫瘦煤	未分类	合计
产量/万吨	11148	9190	8204	5841	4911	3846	2607	2038	47425
占炼焦煤产量/%	23.50	19.38	17.30	12.32	10.35	7.35	5.50	4.30	100

## 1.1.2 未来钢铁联合企业发展方向

从钢铁企业的社会、经济角度来分析，未来钢铁企业生产流程应该主要有三种功能：①钢铁产品制造功能；②能源转换功能；③社会大宗废弃物处理-消化功能。未来钢铁企业不仅仅是生产钢铁产品的单一企业，它还是集发电、化工、废弃物处理为一体的多功能联合企业（见图 1-3<sup>[2]</sup>）。钢铁生产应以综合回收、循环利用、可持续发展为前提，逐步实施清洁生产、绿色制造等技术进步措施，解决好钢铁企业与环境-资源-生态的和谐发展的关系，即在获得良好市场竞争力的同时，实现多元发展。

## 1.1.3 非高炉炼铁研究内容

非高炉炼铁是指不使用焦炭进行冶金生产过程的各种工艺方法，按工艺特征、产品类型及用途，可分为直接还原法和熔融还原法两大类。

直接还原法（Direct Reduction）是以气体燃料、液体燃料或非焦煤为能源和还原剂，在天然矿石（粉）或人造团块呈固态的软化温度以下进行还原获得金属的方法。由于还原温度低，产品呈多孔低密度海绵状结构，这种含碳低、未排除脉石杂质的金属产品，叫做直接还原（某金属）产品，如直接还原铁（Direct Reduction Iron，简称 DRI），直接还原铁一般也称为海绵铁。

从含碳低的特点看，直接还原铁具有钢的性质，而且在使用上也多作为废钢的代用品。然而，由于直接还原铁含有较多的脉石杂质又不具有成品钢的作用。但从氧化-还原基本冶金原理来分析，直接还原法具有直接把铁矿石炼成钢的一步法特征，这就是“直接还原”一

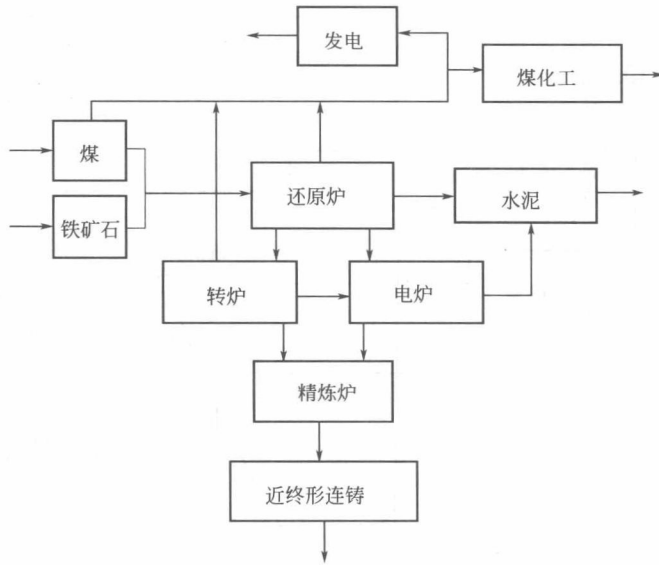


图 1-3 未来钢铁企业生产流程图

词的由来。一步法（直接还原）是相对于传统钢铁生产二步法流程（高炉还原-转炉氧化）而言，传统钢铁生产流程是先把铁矿石过度还原（渗碳）生成铁水，然后再把铁水中的碳通过氧化方法脱除精炼成钢。直接还原（法）一词是一个工艺概念，与高炉用碳还原氧化铁的“直接还原反应”，是两个完全不同的冶金专业术语。

熔融还原法（Smelting Reduction）则以非焦煤为能源和还原剂，在高温熔融状态下进行金属氧化物的还原，渣和铁能完全分离，得到含碳的液态金属。最初开发熔融还原是期望寻求一种理想的全新冶炼方法，既不使用昂贵短缺的焦煤以省去制焦工艺的庞大生产建设费用，又不需要对矿粉进行造块而免除烧结和球团工序，并且没有环境污染。但在发展过程中，人们用更为实际的考虑逐步代替了理想的愿望，现在认为即使使用烧结矿和球团矿，但不以焦炭为主要能源而以煤炭为主要能源，在液态条件下的冶炼方法都属于熔融还原的范畴。与直接还原不同之点是，熔融还原的发展目标只是为了探索和推广用煤炭代替焦炭的冶炼方法，其产品还是与传统冶炼工艺一样的液态产品（如铁水）。

虽然现今采用焦炭的冶炼方法（如高炉）已经取得巨大进步，达到了空前完善的程度，提供的金属材料品种齐全、质量优良、数量巨大，为人类物质文明和社会进步做出了巨大的贡献。然而与此同时，人们并没有放弃对非高炉炼铁方法的追求和探索，其主要原因如下<sup>[8]</sup>。

① 传统冶炼工艺（如高炉）均依赖于焦煤。从已查明的世界煤炭储量来看，焦煤仅占煤总储量的5%~10%，其中以现行技术可以经济开发的只占其中30%~40%。由于冶金长期巨大的消耗以及焦炭资源在地理上分布的不均匀，传统冶炼将面临焦煤资源匮乏而无法生产的局面。

② 传统冶炼工艺存在冶金反应重复进行的过程（见图 1-4）。例如，在高炉炼铁的还原过程中，在把铁矿石中铁和氧分离的同时，还会使相当数量的 Si、Mn、C 等元素进入铁水，因此铁水必须进行氧化精炼，去除多余的元素和杂质元素，精炼后的钢水还要进行脱氧。因此，使得冶炼工艺复杂化，造成不必要的能源和原料的消耗。铁矿石直接还原法虽然没能实现矿石一步炼成钢的过程，但它具有一步法的特征，没有传统冶金反应反复进行所带

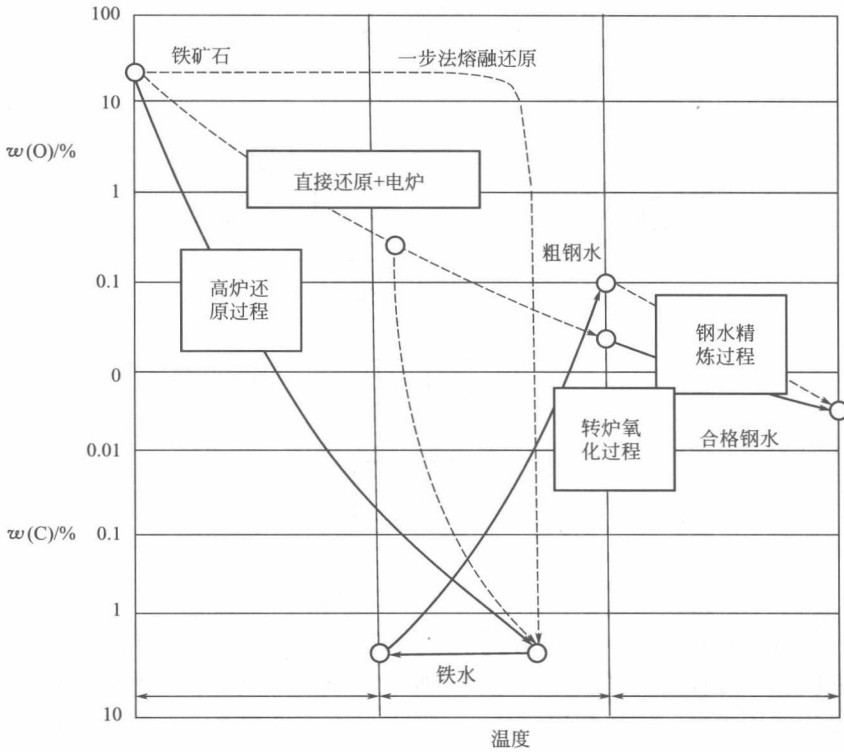


图 1-4 钢铁生产过程产品中氧量、碳量的变化示意图

来的矛盾现象。

③ 自然界中 useful 矿物并不都是单独存在的，常有多种金属元素共生和伴生的情况，传统冶炼工艺对复杂的多金属矿处理显得无能为力。此外，冶炼厂和化工厂的粉尘和含金属的渣滓也都是重要的资源，应根据资源特点选择冶炼方法实现综合利用。例如，南非的海维尔德钢钒铁公司、新西兰钢铁公司采用回转窑-电炉炼铁联合流程成功地处理了含钒钛磁铁矿，回收铁和钒；澳大利亚西部钛公司处理钛铁矿生产人造金红石和铁红；希腊处理贫镍铁矿，同时回收铁和镍；日本开发了处理硫酸渣的新日铁（KOH）法，回收铁和其他有价金属元素。许多国家成功地解决了含铁粉尘的利用问题，我国也研究出综合利用攀枝花钒钛磁铁矿的工艺，实现了铁、钒、钛的回收，而这些含铁原料都是高炉炼铁无法处理的。例如，攀钢的高炉-转炉流程，因含钛炉渣受焦炭灰分和熔剂“污染”的缘故，只能回收矿石中的铁和钒，钛则未被利用。若采用竖炉-电炉新流程，天然气代替了焦炭，且不向含钒钛熔渣中加熔剂，避开了高炉工艺不能分步还原的缺陷，实现了铁、钒、钛综合利用的目的。钒钛磁铁矿竖炉直接还原-熔化分离铁与钒、钛工艺主要由四部分组成：a. 氧化球团的制备；b. 竖炉还原生产金属化球团；c. 金属化球团用电炉熔化，使铁水与钒钛渣分离以及铁水炼钢；d. 熔渣中提取  $V_2O_5$  及  $TiO_2$  制品<sup>[9]</sup>。

④ 社会发展和科学技术进步，对钢材质量要求越来越高。电炉炼钢技术迅速发展为优质钢生产提供了有效手段，然而日益增加的合金钢生产和应用，使得多次重复回收废钢中的杂质元素得以富集，严重影响了废钢的质量。例如，美国在 25 年内，碳素钢废钢的 Cu 含量增加了 20%，Ni 增加了 1.2 倍，Sn 增加了 2 倍。由此可见，用洁净的直接还原铁（DRI）

代替被污染的废钢，稀释和改善冶炼钢水的化学成分，生产优质钢材已势在必行。

⑤ 传统冶金工厂生产规模大，工艺环节多，需要巨额投资。例如，2012年湛江港建设一座1000万吨级的钢铁厂，计划总投资为635亿元人民币，每吨钢的投资为6350元。同时，还必须有足够的原料供应和产品销售市场保证。而非高炉钢铁厂可小型化，投资相对少，建设周期短，可因地制宜地利用当地复杂原料、多种能源和确定机动的产品方向，工艺灵活性大、适应性强。

时至今日，随着全球焦煤资源匮乏，供求矛盾日益突出，造成焦炭价格翻番，这不得不让人们更加关注非高炉炼铁的新工艺和新技术。

从2002年开始，我国焦炭价格突然猛涨。究其原因，除了从2000年开始国际上煤炭价格随着石油价格上涨而涨价、国内钢铁产量快速上升造成焦炭供不应求的原因外，还有一个原因就是我国加入世贸组织以前煤炭价格长期没有与国际接轨，遗留下的差价引起与国际接轨后的较大涨幅。2008年焦炭的桥形价格变动态势，也真实反映了当时国内和国际焦炭市场供求状况和国内国际现出经济泡沫带来的经济过热现象。在2008年金融危机爆发之前，国内实际焦炭供应量远远大于需求量。不过当时过剩的产能供应量大部分用来出口了，欧美50%以上的焦炭需求量来自中国。虽然国家已出台了关停小焦炉的政策，但出于特殊时期社会稳定工作的需要，关停小焦炉的措施迟迟未有效实施。这也在一定程度上加大了产能过剩的程度，使供应量进一步增大。当时焦炭单价最高突破3000元人民币/t（含税），接近钢材价格。另一方面，2008年初国家已意识到产能过剩这一点，出台限制出口措施，严格限制焦炭这一非再生性能源过量出口，从而进行产业结构调整。出人意料的是，这一结构调整措施遭遇了2008年金融危机，一夜之间，国际需求量急剧下滑，焦炭出口几乎接近零，国内需求量随着钢铁产能的压产限产也急剧下降。2008年8月份，焦炭价格从2458元人民币/t，经过9月和10月两个月一泻而下，直线降到1521元人民币/t；到12月份焦炭的价格为1244元人民币/t，下降了1214元/t，下降幅度高达49.39%<sup>[10]</sup>。

焦炭价格翻番以后，改变了铁水成本结构。焦炭的原料是焦煤，生产1t冶金焦要消耗1.4t洗精焦煤，还要加上其他分摊成本，焦煤和焦炭的涨价是不等量的。另外，非焦煤和焦煤的涨价也是不等量的。因此，非高炉炼铁工艺的炼铁成本与高炉-造块-制焦传统工艺的炼铁成本比较，会随焦炭价格的猛涨而出现显著的价格差。

COREX是由奥钢联开发的一种使用块矿或球团矿作原料、使用非焦煤作还原剂和燃料的熔融还原炼铁工艺。COREX这个名字的前两个字母CO代表Coal，是煤的意思；中间两个字母RE代表Reduction，是还原的意思（炼铁就是还原过程）；最后两个字母EX是Extreme，是终极目标的意思。所以COREX完整的意思是直接用煤来炼铁作为它的终极目标。应当说，这是炼铁工作者梦寐以求的目标。高炉炼铁是用粉矿和粉煤，但粉矿必须通过烧结厂烧成烧结矿，粉煤必须通过炼焦厂将其结焦成焦炭，然后供高炉炼铁。因此流程长、工序多、污染较重，而且焦煤资源稀缺。COREX工艺是直接使用天然块矿或人造块矿以及块煤，取消了烧结厂和炼焦厂，因而流程短、工序少、污染轻、可以不用资源稀缺的炼焦煤。COREX工艺是1977年开始研究，1989年才开始应用的熔融还原技术，是一项非常“年轻”的炼铁技术。

奥钢联的COREX工艺过去受到我国冶金界的关注，该工艺用球团矿（富块矿、烧结矿）作为原料，用非焦煤代替焦炭作为还原剂和燃料，每吨铁水耗用1~1.1t高挥发分烟煤，580Nm<sup>3</sup>氧气产出1700Nm<sup>3</sup>煤气（发热值7500kJ/Nm<sup>3</sup>）。但该工艺存在的问题是：

①虽然不建焦炉，但要建投资昂贵的氧气厂；②耗煤量很大且还产出大量较难处理的煤气，如建发电厂又要增加投资。因此在投资上与高炉-造块-制焦相比无多大优势。在铁水成本上，也比传统工艺高。韩国的 COREX 工艺 C-2000（年产 70 万吨）铁水成本比 3800m<sup>3</sup> 高炉（年产 300 万吨）高 18%，在我国焦炭低价的情况下难过经济关。若焦炭价格翻番，进口铁矿的海运费、陆运费猛涨，地处中西部地区、用电条件较好、附近有合适煤种，并且可以买到国内铁精矿粉（或球团）的中小炼铁企业，仍可研讨这一工艺的经济性和合理性。除了 COREX 工艺外，还可以因地制宜考虑其他的非焦炼铁工艺，例如德国的 INMETCO 工艺、比利时的 SIDMAR 工艺等。需要注意的还有 FASTMELT 工艺，该工艺是日本神户制钢和美国 MIDREX 公司共同开发的非焦炼铁专利技术，目前在日本已有两套商业化机组用以处理钢铁厂内的含铁粉尘，一套在新日铁广畑钢铁厂，能力为 19 万吨/年，2004 年 4 月投产；另一套在加古川钢铁厂，能力 1.4 万吨/年，2001 年 4 月投产。2002 年神户已与尼日利亚签订协议，用 FASTMELT 工艺建设一个 50 万吨/年直接还原铁厂。

FASTMELT 工艺流程是在经干燥后的铁精矿粉（也可以用富矿粉）中混入煤粉，加粘结剂冷压造球，然后加入底盘旋转的环形快速还原炉中（还原时间 < 12min）制成直接还原铁，然后再热装进入熔融电炉，造渣生产出铁水。如果使用满足直接还原铁要求的矿粉，也可以不经电炉熔化而生产直接还原铁。这种工艺的特点是，可以生产铁水，也可以生产直接还原铁，更适合用精矿粉作为原料。用非焦煤和电置换焦煤，每吨铁水的燃料、动力消耗为 430kg 非焦煤粉、1.7MJ 燃气、620kW·h 电力。以 50 万吨/年铁水生产规模与高炉-烧结-制焦传统工艺相比，投资较低（见表 1-4<sup>[8]</sup>）。

表 1-4 高炉-烧结-制焦工艺与 FASTMELT 工艺投资对比

高炉-烧结-制焦工艺		FASTMELT 工艺	
项目	投资/亿元	项目	投资/亿元
高炉 1×450m <sup>3</sup>	1.5	生产铁水的 FASTMELT 工艺	2.6~3.0 (初步估计)
烧结 1×75m <sup>2</sup>	0.6		
焦化 24 万吨/a	2.0		
合计	4.1		

研究非高炉炼铁工艺技术具有以下意义：

- ① 非高炉炼铁是我国钢铁工业改善能源结构，减少对焦煤能源的依赖的重要途径；
- ② 非高炉炼铁是发展短流程钢铁生产的重要途径，发展直接还原铁生产可解决废钢短缺问题，另外直接还原铁（DRI）在电炉炼钢中仍然是不可短缺的稀释剂原料；
- ③ 非高炉冶炼是复合矿综合利用、难选矿开发利用的有效方法。我国高品位铁矿资源短缺，复合矿占有相当大的比例，另外，部分钢铁厂内部有含铁物料，还有其他冶金业的含铁废料（如赤泥等），这些含铁资源通过传统的选矿难以将其他元素剥离、回收其有价值的金属。

## 1.2 非高炉炼铁技术的产生与发展

### 1.2.1 非高炉炼铁技术的起源

据新华网 2013 年 8 月 20 日报道，英国考古人员发现了一件距今 5000 多年前的埃及铁

珠饰品，是迄今发现的最早铁制品，这些铁珠的原材料来自陨石，在当时被视为珍宝。英国《考古学杂志》刊登的这份研究报告说，这件饰品 1911 年出土于埃及开罗南部格萨地区一处墓穴，现藏于伦敦大学学院专门收藏埃及文物的皮特里博物馆。研究人员对这件饰品上 9 颗已被严重腐蚀的黑色珠子进行成分分析后发现，除铁镍合金外，还含有钴和磷等成分，足以证实它们取材于陨石。

这些铁珠与黄金、宝石等串在一起被制成饰品，可见当时人们十分珍视陨石这种“从天而降”的不明物体。研究人员还通过中子束和伽马射线照射等技术分析发现，这些铁珠的加工工艺与饰品上的黄金和宝石都不同，说明古埃及人已经有意识地用特殊工艺加工陨石这种特殊材料。

历史学界一般认为，人类社会于公元前 1400 年左右才进入铁器时代。新研究则表明，在人类开始主动冶铁之前，古埃及人就已经会将陨石中的铁加工成饰品等器物。参与这项研究的伦敦大学学院教授蒂洛·雷伦说，这些铁珠应该是由原材料经过锻造、轧制而成，不同于对石器采用的雕刻等手法。古埃及人对铁材料的深入理解及其工艺的先进性让人印象深刻。

铁元素是地壳的主要成分之一，铁在自然界中分布极为广泛，地壳丰度为 5.6%，居于 O、Si、Al 之后占第四位。但是人类发现铁和利用铁，却比金和铜的历史要晚<sup>[11]</sup>，其主要原因是天然的纯铁在地球表面上几乎找不到，不像自然金和自然铜那样容易被人发现。而且铁容易氧化生锈，只有和铬镍金属混合的铁才能持久不锈，但是含铬镍的自然铁又极其稀少。

因为地球上极难找到自然铁，人类最早所发现的铁，是从天空中落下来的铁陨石。铁陨石是铁和镍、铬等金属的混合物，含铁很高。无论是在埃及还是在美索不达米亚（Mesopotamia，希腊语的意思是两河之间的土地，在伊拉克境内）最古老的文明国家中，所发现最早的铁器都是由陨石加工制成的。考古学家曾在美索不达米亚苏美尔人所建的古乌尔城的古墓中，发现过一把陨铁所制成的小斧，而在古苏美尔语中，铁叫做“安巴尔”（Al-Anbar），意思是“天降之火”。很明显，古苏美尔人最初用的铁是从“天降之火”中来的，所谓“天降之火”就是陨石。当然，从天空中落下来的陨石为数是不多的，因此在用陨石制作铁器时，铁是非常珍贵的。在埃及第五~第六王朝（公元前 2400 年前）的金字塔所藏的宗教经文中，曾记述当时太阳神等重要神像的宝座是用铁制成的。这种制作神像宝座用的铁，显然也是来自铁陨石，铁在当时是被认为带有神秘性的最珍贵的金属。人类开始用陨石制成铁器的时间是很早的，但由于陨石来源稀少，铁在当时成为稀有的贵金属，因此不可能对生产起什么重要作用。但这时对铁陨石的利用，毕竟使人类初次认识了铁，这对后来铁矿石冶炼技术的发明是有帮助的。

铁矿石冶炼技术的发明，是冶金史上的新阶段。因为铁矿在世界上分布广泛，铁又远比青铜坚牢锐利，到铁器开始为人类服务，生产工具得到很大改进，生产力水平得到进一步提高。在冶铁技术发明的初期，炼铁炉是很小的，构造也十分简单。炉身一般是用石头和泥砌成的，形状为圆锥形，炉子下身的侧部有一个小孔，用来送进空气（见图 1-5<sup>[10]</sup>）。

在冶铁时，把铁矿石和木炭一层一层地从炉子上面加进去，生起火，用一个或两个皮制的风囊鼓风，把空气从炉侧的小孔中不断压送到炉子中去。有的甚至不用人工鼓风，让其慢慢燃烧。这种初期的炼铁炉，因为炉子小，风囊不大，用人力产生的风压较小，因此炭火温度不高，还原出来的铁沉到炉底不能保持液态流到炉外。每次炼成铁后，要等炉子冷却才能

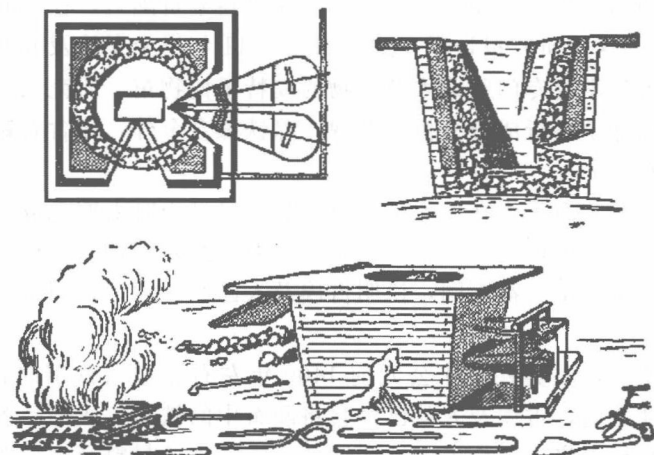


图 1-5 欧洲中世纪冶炼熟铁块的冶炼炉

将铁块取出来。这样从炉中炼出来的铁块，不是方方正正的，而是软的、海绵似的熟铁块。这种熟铁块表面不但很粗糙，中间还夹有脉石杂质熔成的渣滓，需要烧红经过一定时间的锻打，即所谓“百炼成钢”的过程，才可能得到较纯的软铁块（钢）。到这一步，冶铁过程才算完成。所炼的软铁块可以切成小块，作为制造铁器的原料。

早期冶铁技术是依靠木炭除去铁矿石中的氧来还原铁。现以赤铁矿为例说明冶炼过程中的化学反应。赤铁矿的成分是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，在温度  $250\sim 800^\circ\text{C}$  范围内，可以被  $\text{CO}$  所还原。还原过程由三个连续的化学反应来完成。

①  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  首先还原成四氧化三铁 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ):



②  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  再还原成氧化亚铁 ( $\text{FeO}$ ):



③  $\text{FeO}$  最后还原成海绵铁 ( $\text{Fe}$ ):



总体来说，铁矿石在炼铁炉中用木炭燃烧加热，利用木炭燃烧产生的热量和  $\text{CO}$ ，使铁矿石还原成海绵铁。总的化学反应如下：



这样的冶铁技术，在今天看来当然是很幼稚的。但这在冶铁术刚发明时却是人类杰出的创造。所有产铁的国家，早期的冶铁术都是如此，而且还沿用了很长时间。早期用这种冶铁术制成的铁器是不够坚韧的，起初比青铜（铜锡合金）还要软些，只有在冶铁术进步后，才能提高铁的硬度和强度，使铁的力学性能超过青铜。

冶铁技术究竟最初发明于何时何地，曾是人们注意和争论的问题。许多学者基于考古学的新发现，把发明的时间和地点一再变更。根据目前已掌握的资料来看，世界各地铁器的应用是有先后的，小亚细亚（土耳其的亚洲部分）东部的赫梯人在公元前 1400 年左右就已发明冶铁术，两河流域（两河是指亚洲西南部的幼发拉底河和底格里斯河）北部的亚述人在公元前 1300 年后也已进入铁器时代，而欧洲进入铁器时代要在公元前 1000 年左右，我国在春秋时代（公元前 770 年～公元前 476 年）就进入铁器时代。一般来说，冶铁术发明于原始社



会末期。凡是一个地方具备了发明某种冶金术的地理条件和历史条件时，就完全有可能创造出某种冶金术。事实也正是如此，铁在远古时代，是在相距遥远的各个地区，在不同时间出现的。中国冶铁术的发明，同亚洲西南部、欧洲、非洲所有文明国家的冶铁术是毫无关联的。许多原始部落在个别地区，在不同的时间都已有各自冶铁术的发明。

以上所说的冶铁术，并不是冶炼纯铁的技术。纯铁是很难提炼的，就是用电解方法制出来的铁，也含有少量的碳，而且纯铁很软。自古以来冶铁工业所冶炼的铁，主要是熟铁、生铁和钢铁。这些铁实质上是“铁碳合金”，它们之间的区别主要在于含碳量。含碳量在0.5%以下且含有杂质和渣滓的是熟铁，也称软铁，或称锻铁；如果含碳量很低而没有渣滓的，就称为纯铁；含碳量在0.5%~1.7%而没有渣滓的是钢铁，也称为钢；含碳量在2.5%~5%的是生铁，也称铸铁，或称铸铁。

熟铁比生铁、钢铁软得多，有延展性，烧红后可锻打成各种器物。早期冶铁术所炼出来的铁，也就是熟铁块，因为含碳量少，熔点较高，约为1500℃。早期的炼铁炉由于炉子小，鼓风设备差，冶炼温度不高，很难把熟铁熔化。

生铁硬度比熟铁高，但比较脆，不适于焊接和锻接，只适于“铸造”成各种器物。熔化的铁很容易溶解碳，温度越高溶解的碳越多。铁中的碳含量多了，就变成生铁。生铁的熔点较低，约为1150℃左右。在早期用炼铁炉炼熟铁的时候，如果炉子高大些，通进去的空气多些，炉子温度较高，偶尔也能使铁矿石充分熔化，得到碳含量较多的生铁。在最初人们把它当做熔渣抛弃掉，后来才开始用它来做铸锭。因为铁矿石的主要成分是氧化铁，容易和SiO<sub>2</sub>及其他杂质混在一起，所以当生铁炼成时，Si、Mn、P、S等元素就渗进去。一般来说，生铁如果不含Si，大部分由碳化铁(Fe<sub>3</sub>C)组成，断口呈白色，称为白口铁；如果含Si在1.5%~3%之间，Si能促使碳化铁分解成游离的碳和铁，断口就呈灰色，称为灰口铁。钢铁中由于含有微量的Si、P、S等杂质，其熔点为1400~1500℃，适宜做工具、武器以及各种机械，这在冶铁技术较进步时才有可能冶炼。

冶铁技术的进步不是很快的，早期的炼铁炉既不能冶炼生铁，也不能冶炼钢铁。由于铁的熔点较高（青铜的熔点在800~1000℃之间），不容易在冶金炉中将铁熔化成液体。如何提高炼铁炉的温度，使炼出的铁成为液体，以提高冶炼的生产率，在欧洲曾经是长期不能解决的问题。直到中世纪中期我国为宋朝，由于水力鼓风炉的创造和发展，才基本上解决了这个问题。

欧洲中世纪中期所创造的冶铁鼓风炉，构造大体上和过去的炼铁炉差不多，也是上面加料，下面通风，不过比以前所用的冶炼炉要高大得多。在14世纪中叶出现于比利时的所谓“狼炉”，高度就有4.5m左右。由于炉身高大，可装更多的木炭和铁，木炭和铁接触时间较长，炉内温度又较高，因此就能使全部铁矿石充分地熔化和还原，且铁也能够吸收相当多的碳。所炼成的铁下沉炉底时，便形成生铁。生铁的熔点比熟铁低，而鼓风炉的温度比炼铁炉略高些，因此炉内最后得到的是液态铁水，不再是熟铁块了。这种炉子所以叫做“狼炉”，是因为早期的“狼炉”仍是要等到炉冷以后才能把铁块取出，那时人把这种铁块叫做“狼”。

中国开始使用铁的时间是在春秋战国时代（公元前770年~公元前221年），这种说法最早是由章鸿钊先生提出的。实际上，春秋时代（公元前770年~公元前476年）不是发明冶铁术的时期，而是冶铁术发展的时期。中国冶铁术的发明，应该是远在春秋时代以前。中国是最早发明冶铸生铁的国家，关于这一点，任何人也不能否认。英国学者李约瑟认为，欧洲冶铸生铁的技术是在10~12世纪间由中国传入的。中国古代冶铁技术的发展是比较快的，