



ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

钢铁行业提高能效的机会

Ernst Worrell, Christina Galitsky

环境与能源技术部

2006 年 5 月

本项工作通过美国能源部，获得能源基金会的支持，合同编号为 DE-AC02-05CH11231。

免责声明

本文件编写工作由美国政府资助。同时，虽然本文件中的信息被认为是准确的，但是无论是美国政府或是其机构，加州大学董事会或是其雇员都既不对文件的准确性，完整性，信息的有用性，仪器，产品，以及披露的过程，或是其使用不侵犯私有权进行明示或暗示的保障，也不负法律责任。此处提到的任何具体商业产品，过程或有商标名称，商标，制造商名的服务，并不一定构成或暗示美国政府或其机构，加州大学董事会的认可，推荐，或偏袒其使用。作者在这里表示的观点和意见，并不一定代表美国政府及其机构，或加州大学董事会。

劳伦斯伯克利实验室是一个机会均等的雇主。

铁行业提高能效的机会

劳伦斯伯克利国家实验室
环境能源技术部

该报告提供了与一些应用于钢铁行业的技术和措施相关的节约能源、成本和二氧化碳减排方面的信息。这些技术和措施包括现在用于全球范围内钢铁厂的最新措施以及局部应用的或将近商业化的先进措施。

本报告重点在采用商业化的可行技术上，但其中很多技术也可应用于新建工厂。对于每项技术或措施，在应用的各个环节上，要估算每生产一吨粗钢所需的成本和节能量，并计算所用燃料而产生的二氧化碳减排量。表 1 列出了本报告中各工序应用的所有措施。表 2 为各项技术提供下列信息：每吨粗钢的燃料、电力和基本节能；每年运行成本；每吨粗钢的投资费用及应用于一项综合通用钢生产的每项措施的二氧化碳减排量。表 3 提供了电弧炉产出的二级钢生产的类似信息。

降低能耗和二氧化碳减排的先进技术和措施包括综合钢铁生产中的熔融还原工艺（如 COREX, CCF, DIOS, AISI 和 HISmelt），炉外精炼的 Contiarc 电弧炉和 Comelt 炉，及薄带铸造。这些技术现在都不用于商业用途（除了 COREX 工艺）。

这些信息起初收集于美国钢铁行业报告(Worrell et al., 1999)，并且得到 Worrell et al. (2004) 和 Martin et al. (2000)作为补充。本报告中提供的信息基于广泛可得报告、杂志文章以及全球技术应用案例研究。但是节能、成本和碳排放数据均基于美国的条件计算。

表 1. 钢铁行业的最新技术水平和先进节能措施

所有措施（应用于综合和二级企业的措施）	
预防性维护 能源监测和管理系统 烟气处理、泵和通风机的变频调速 联合发电	
综合炼钢厂措施	炉外精炼措施
铁矿制备（烧结矿生产） 烧结厂热回收 烧结厂使用废燃料 减少空气泄漏 增加燃烧床深 控制环节的改进 炼焦 煤调湿技术 程序性加热 焦炉气压缩机变频 干熄焦 炼铁--高炉 粉煤喷吹（介质和高水平） 天然气喷射 顶压回收发电 高炉气体回收 热风炉自动化 热风炉换热器 高炉的控制改善 熔融还原过程* 炼钢--底吹氧气炉 BOF 气体及显热回收（限制燃烧） 通风机变频	电弧炉 控制改进的环节（神经网络） 燃气的监控 变压器节能措施 炉底搅拌/吹气 泡沫渣法 氧燃料燃烧器/吹氧 二次燃烧 偏心炉底出钢 (EBT) 直流 (DC) 弧炉 废钢预热 Consteel 工艺 竖炉电弧炉 双壳直羚弧炉 IHI 工艺* 环形竖炉直流电弧炉 (Contiarc process)* 倾斜电极竖炉直流电弧炉 (Comelt process)*
铸件和轧制（通常应用于综合厂和炉外精炼）	
铸件 采用连续铸造 有效钢包预热 薄扁钢坯铸造 薄带铸造* 轧制 热炉料 再热炉中的换热式烧嘴 控制氧水平和燃烧风机的变频调速 热钢带轧机的环节控制 炉子的绝热 热轧机的节能驱动 冷水中的废热回收 退火线的热回收（仅用于综合钢） 自动监测及目标系统 减少酸洗机组蒸汽的使用	

*这些措施是仍在开发中的先进措施，并可能影响钢铁行业能效的长期趋势，但并非钱能买到的。

表2.应用于综合钢铁生产节能技术和措施的节能量、成本以及二氧化碳减排

选项	节省燃料 (GJ/吨粗钢)	节省电力 (GJ/吨粗钢)	节省主要能源 (GJ/吨粗钢)	年运作成本 (US\$/吨粗钢)	Retrofit 投资 成本 (US\$/吨粗钢)	二氧化碳减排 量 (kgC/吨)
铁矿准备 (烧结)						
烧结厂热回收	0.12	0.00	0.12	0.00	0.66	3.41
减少空气泄漏	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.12
增加燃烧床深	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.59
环节控制的改进	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.30
烧结厂使用废燃料	0.04	0.00	0.04	0.00	0.04	1.16
炼焦						
煤调湿技术	0.09	0.00	0.09	0.00	14.69	0.55
程序性加热	0.05	0.00	0.05	0.00	0.07	0.31
焦炉气压缩机的变频调速	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.01
干熄焦	0.37	0.00	0.37	0.15	20.99	2.25
炼铁-高炉						
粉煤喷射 130 kg/thm	0.69	0.00	0.69	-1.78	6.24	11.42
粉煤喷射 225 kg/thm	0.51	0.00	0.51	-0.89	4.64	8.45
天然气喷射 140 kg/thm	0.80	0.00	0.80	-1.78	4.46	13.35
顶压回收发电	0.00	0.10	0.30	0.00	17.84	4.29
高炉气体回收	0.06	0.00	0.06	0.00	0.27	0.98
热风炉自动化	0.33	0.00	0.33	0.00	0.27	5.49
热风炉换热器	0.07	0.00	0.07	0.00	1.25	1.19
控制改进高炉的系统	0.36	0.00	0.36	0.00	0.32	5.93
熔融还原工艺*	3.2	0.00	3.2	-6.3	-120	52.7
炼钢-底吹氧气炉						
BOF 气体及显热回收 (抑制燃烧)	0.92	0.00	0.92	0.00	22.00	12.55
通风机的变频调速	0.00	0.00	0.01	0.00	0.20	0.14
综合铸造						
采用连续铸造	0.24	0.08	0.49	-5.35	11.95	36.06
有效钢包预热	0.02	0.00	0.02	0.00	0.05	0.27
薄扁钢坯铸造	3.13	0.57	4.89	-31.33	134.25	177.60
薄带铸造*	-	-	0.22	-	180	-
综合热轧						
热炉料	0.52	0.00	0.52	-1.15	13.09	7.18
热钢带轧机的环节控制	0.26	0.00	0.26	0.00	0.61	3.59
换热式烧嘴	0.61	0.00	0.61	0.00	2.18	8.38
炉子的绝热	0.14	0.00	0.14	0.00	8.73	1.91
控制氧水平和通风机的变频调速	0.29	0.00	0.29	0.00	0.44	3.95
节能驱动 (热轧机)	0.00	0.01	0.03	0.00	0.17	0.39
废热回收 (冷水)	0.03	0.00	0.03	0.06	0.70	0.46
低 NO _x 燃烧器	0.77	-0.02	0.7	0.36	2.5	9.8
综合冷轧和精炼						
退火线的热回收	0.17	0.01	0.19	0.00	1.55	2.73
减少蒸汽的使用 (酸洗机组 e)	0.11	0.00	0.11	0.00	1.61	1.55
自动监控和目标系统	0.00	0.12	0.38	0.00	0.63	5.51
总计						
预防性维护	0.43	0.02	0.49	0.02	0.01	9.74
能源监测和管理系统	0.11	0.01	0.14	0.00	0.15	2.60
联合发电	0.03	0.35	1.1	0.00	14.52	22.39
烟气处理、泵和通风机的变频调速	0.00	0.02	0.06	0.00	1.30	0.40

*这些措施是仍在开发中的先进措施，并可能影响钢铁行业能效的长期趋势，但并非钱能买到的。因此，成本和节能信息并不完备。

表 3. 应用于二级钢铁生产节能技术和措施的节能量、成本以及二氧化碳减排

选项	节省燃料 (GJ/吨粗钢)	节电 (GJ/吨粗钢)	主要节能 (GJ/吨粗钢)	年运作成本 (US\$/吨粗钢)	改造投资 费用(US\$/ 吨粗钢)	二氧化碳 减排量 (kgC/t)
炼钢电弧炉						
控制改进的环节（神经网络）	0.00	0.11	0.33	-1.00	0.95	4.81
燃气监控	0.00	0.05	0.17	0.00	2.00	2.40
变压器-UHP 变压器	0.00	0.06	0.19	0.00	2.75	2.72
炉底搅拌/吹气	0.00	0.07	0.22	-2.00	0.60	3.20
泡沫渣技术	0.00	0.07	0.20	-1.80	10.00	2.88
氧燃料烧嘴	0.00	0.14	0.44	-4.00	4.80	6.41
现有炉子偏心炉底出钢 (EBT)	0.00	0.05	0.17	0.00	3.20	2.40
直流 (DC) 弧炉	0.00	0.32	1.00	-2.50	3.90	14.42
废钢预热-隧道式炉 (CONSTEEL)	0.00	0.22	0.66	-1.90	5.00	9.61
废钢预热, 二次燃烧 - 炉身(FUCHS)	-0.70	0.43	0.63	-4.00	6.00	9.62
双壳直轧 w/ 废钢预热	0.00	0.07	0.21	-1.10	6.00	3.04
IHI 工艺*	-	-	1.9	-	-	-
Contiarc 工艺*	-0.03	0.77	2.33	-10	-	34.8
Comelt 工艺*	-0.25	0.44	1.11	-8 to -10	3.90	16.9
二级铸造						
有效钢包预热	0.02	0.00	0.02	0.00	0.05	0.27
薄扁钢坯铸造	2.86	0.57	4.62	-31.33	134.29	64.68
薄带铸造*	-	-	0.22	-	180	-
二级热轧						
热钢带轧机的环节控制	0.26	0.00	0.26	0.00	0.61	3.59
换热式烧嘴	0.61	0.00	0.61	0.00	2.18	8.38
炉子的绝热	0.14	0.00	0.14	0.00	8.73	1.92
控制氧水平和通风机变频调速	0.29	0.00	0.29	0.00	0.44	3.95
热轧机的节能驱动	0.00	0.01	0.03	0.00	0.17	0.39
冷水中废热回收	0.03	0.00	0.03	0.06	0.70	0.46
低 NOx 燃烧器	0.77	-0.02	0.7	0.36	2.5	9.8
通用技术						
预防性保养/维修	0.09	0.05	0.24	0.02	0.01	4.09
能源监控系统	0.02	0.01	0.06	0.00	0.15	1.02

*这些措施是仍在开发中的先进措施，并可能影响钢铁行业能效的长期趋势，但并非钱能买到的。因此，成本和节能信息并不完备。

表 2 和表 3 中每一项节能措施节省的燃料和电力通常按照每吨产品节省量计算（比如，0.5 GJ/t 烧结矿）。为了将节省量在一吨产品的基础上转化为一吨粗钢的节能量，须乘以全部粗钢的生产率¹（具体工艺的产品）。运行和基本投资费用也按照燃料和电力节省量的同一方式以粗钢基准计算。最后，每项措施的二氧化碳减排量以每一工艺过程平均重量的二氧化碳排放系数(吨碳/吉焦)的基础上计算。

¹例如，如果一项措施节约 1GJ/t 铁，相当于节约 0.89GJ/粗钢 t (1 * 49.4 Mt 铁产品/55.4 Mt 综合粗钢产品)。这种转换以美国 1994 年的产品数据为基础。

所有措施

预防性维护 包括培训人员来关注能耗和能效。在许多行业已经开展了一些成功的项目(Caffal, 1995; Nelson, 1994)。炼钢中好管理的例子包括及时关闭炉门以减少热损失以及在成型步骤减少材料浪费。在荷兰一家综合钢厂的节能经验基础上(Worrell et al., 1993) 我们估算节能量占全部能耗的 2%，或产品节省燃料 0.45GJ/t，电力 0.04GJe/t。尽管需要培训和厂内信息，我们假定好的管理最小投资费用(\$0.01/t)，这会造成年运行成本增长。根据 Rover（英国一家大汽车制造厂）的好管理项目，我们估算年运作成本约每厂 \$11,000，或大约 \$0.02/t 粗钢(Caffal, 1995)。

能源监测系统 包括在不同的工序和工厂之间的能源回收和分配的现场能源管理系统。。这一能源管理系统有一个很大的不同处(Worrell et al., 1997c; Caffal, 1995)。根据 Hoogovens 钢厂（荷兰）和英国钢厂(Port Talbot, UK)的经验，我们估计节能率为 0.5%，或产品节省燃料 0.12 吉焦/吨，电力 0.01 吉焦/吨，(Farla et al., 1998; ETSU, 1992)。根据安装在 Hoogovens 钢厂(\$0.8M) (Farla et al., 1998)的这种系统的成本，估算这种系统成本接近 0.15 美元/吨粗钢。

联合发电 钢铁行业所有需要电力和热（例如蒸汽）的厂家和地方都是联合发电的极佳选择。传统联合发电使用蒸汽锅炉和蒸汽轮机（背压汽轮机）来发电。蒸汽系统通常效率低且投资大。现在的蒸汽轮机系统利用那些以前可能废弃的低成本废能源，例如美国的 Inland Steel and U.S. Steel Gary Works(Hanes, 1999)。现代联合发电单元是以燃气轮机为基础，利用一个简单循环系统（带有余热回收锅炉的燃气轮机），或 STIG（蒸汽喷射的燃气轮机），或一个综合燃气轮机和蒸汽循环的大联合循环系统。后者也可用来利用现有的蒸汽轮机系统。燃气轮机主要利用天然气。综合钢厂尾气（焦炉气、高炉气和碱性氧气转炉气）。特用的燃气轮机可以燃烧这些低热值气体，发电效率约为 45%（低热值，LHV），但内部压缩机负载将效率降低到 33% (Mitsubishi, 1993)。三菱重工已开发出这种汽轮机并且现在已经在几家钢厂使用，例如川崎千叶工厂(Takano et al., 1989)和 Hoogovens (荷兰) (Anon., 1997c)。这些系统的特点是氮氧化物低排放。

这一措施导致 1.1GJ/t 粗钢一次能源的发电增加。投资这种汽轮机系统\$1090/kWe (Anon., 1997c)。投资费用估算为\$14.5/t 粗钢。

烟气处理、泵和通风机的变频调速 根据英国经验，在泵和风机使用变频调速（VSDs）节电 42%是可行的(Anon., 1994)。如果这一技术的应用占到综合炼钢用电的 5%(Worrell et al., 1993)，节能量会有 0.04GJ/t 粗钢。根据英国一已安装系统 3.25 年回收且假定电价为 3pence/kWh (IEA, 1995)，计算得成本为 1.3 美元/吨产品。这相当于回收时间为 3.4 年(基于美国 1994 的条件)。

铁矿选矿²

铁矿在烧结厂选矿。铁矿细粉、粉焦、水处理厂污泥灰尘和石灰石（熔剂）在烧结厂里烧成烧结矿材料(U.S. DOE, OIT, 1996)。

² 不包含铁矿准备时高质量铁矿使用和烧结的碱度减少这两种节能措施(Aichinger, 1993)。由于缺乏现行实施数据，这些措施不作考虑。

烧结厂热回收 烧结厂热回收是提高烧结效率的一种方式。回收的热可以用于燃烧器的燃烧空气预热以及生产能流经电汽轮机的高压蒸汽。不同的系统可用于新的烧结厂（例如 Lurgi EOS process），而现有的烧结厂可以改进 (Stelco, 1993; Farla et al., 1998)。根据荷兰 Hoogovens 一个改进系统，电力使用增加了 1.5 千瓦时/吨烧结矿，我们评估节省燃料 1.5 千瓦时/吨烧结矿 (Rengersen et al., 1995)（蒸汽和焦炭）达 0.55 吉焦/吨烧结矿 (Rengersen et al., 1995)。系统排放的氮氧化物、硫氧化物及特殊排放物也减少。这一措施基本投资费用接近 3 美元/吨烧结矿 (Farla et al., 1998)。我们不为新烧结厂估算费用，但注意到所需投资会很大。新炼铁技术（在下面讨论）的目标是使用或混合矿或矿粉，而不是烧结矿。

减少空气泄漏损失 减少空气泄漏损失会减少通风机电流损失约 3-4 千瓦时/吨烧结矿 (Dawson, 1993)，且对热回收设备有积极效果。这些节省需要对现有设备维修的小笔投资。这些投资成本为 0.1 美元/吨烧结矿产量。

增加燃烧层深 增加烧结厂燃烧层深可以降低燃料消耗，改进产品质量，而且产量能稍提高。每增加 10 毫米厚度可以节省 0.3 公斤焦炭/吨烧结矿，并且省电 0.06 千瓦时/吨烧结矿 (Dawson, 1993)，这一措施假定没有投资费用。

改进工艺控制 各种系统中改进工艺控制可以节能，并且已经开发出许多不同的控制系统。根据工业控制和管理系统的一般经验，估计节能率达 2-5% (Worrell et al., 1997c)。我们保守地用节能率 2% 或基本节能 0.05 吉焦/吨烧结矿。假定投资费用为 0.15 美元/吨烧结矿（见能源监控系统措施）。

烧结矿废燃料使用 能减少烧结的能源需求。来自炼焦和炉气中的粉焦与铁矿混合来满足烧结中的能源需求。烧结也用来给铁鳞及含铁尘和污泥之类的副产品脱氧。利用到处都是的废油（尤其是冷轧厂的）是可行的（如美国的情况）(U.S. DOE, OIT, 1996)，但是由于废油的不完全燃烧，它的使用受到排放物或排放限制的限制。监控好的燃烧过程能减少炉内燃气的使用 (Cores et al., 1996)。由于这一措施取决于烧结厂润滑剂的成分和质量以及安装的燃气清洁系统，其节能量很难估算。然而，根据对欧洲厂家的调查，冷轧厂的平均污泥产量为 1 公斤/吨轧制品，范围从 0.01 到 10 公斤/吨钢，有很大不同。含油量少于 10%，且污泥中铁含量约 45-55%。但这并不代表很多能源，这对烧结厂处理这些污泥以回收铁是有好处的。在欧洲大约 50% 的污泥是在烧结厂回收。和回收油污泥一起，还有油、油脂，和乳剂 产量约在 1.3 公斤/吨轧制钢材 (Roederer and Gourtsoyannis, 1996)。假定这些油的高热量值与重燃料油相同，总油产量估算约为 1.2 公斤油/吨轧制钢材 (假定 7.5% 在回收油污泥内，90% 在油，油脂，和乳剂内)。假设热量值为 34 兆焦/公斤，或节能 41 兆焦/吨轧制钢，或 0.18 吉焦/吨烧结矿 (Cores et al., 1996)。Bethlehem 钢厂已开发出一种废料回收和废料喷射系统，回收 20 万吨不同材料成本约 25 00 万美元 (Schriefer, 1997)。我们估算成本达 0.20 美元/吨烧结矿。

其他措施 包括使用更高质量铁矿，低氧化铁成分，氧化镁代替氧化硅，减少烧结矿碱度，增加燃烧层深 以及使用粗粉焦(Aichinger, 1993; Dawson, 1993)。由于缺乏节能和成本方面的数据，这些其他措施并没有实施。

炼焦

煤调湿技术 利用焦炉气体的废热来干燥炼焦煤。煤水分不同，但好的焦炭煤湿度一般在 8-9%左右(IISI, 1982)。通过干燥将煤水分减少到稳定的 3-5%(Stelco, 1993; Uematsu, 1989)，这样在焦炉中依次减少燃料耗损约 0.3 吉焦/吨。可以用焦炉气热量或其他废热源来干燥煤。日本一厂家的煤调湿技术成本为 21.9 美元/吨钢(Inuo, 1995)。根据日本 1990 年的焦炭使用数据，假如约 450 公斤 焦炭/吨粗钢，则每条是技术的成本为 49 美元/吨焦炭或 14.7 美元/吨粗钢。

程序加热 代替焦炉的传统固定加热，确保炼焦过程中不同级的炉内燃气优化供应，并且减少焦炭装料前的热量损失(IISI, 1982)。程序加热能节省燃料约 10%(IISI, 1982)，约 0.17 吉焦/吨焦炭。焦炉电脑控制系统方面需要小笔投资费。我们估算要建一个大的管理系统每一座炼焦炉需要费用 75000 美元 (来自 Caffal, 1995)。对于综合钢厂（不包含商业炼焦）的炼焦产量，这相当于约 0.23 美元/吨焦炭。

焦炉煤气压缩机的变频调速 安装来减少压缩能源。焦炉煤气在低压下产生，并在内部气网运输。然而，由于炼焦反应焦炉，焦炉煤气流动变化超时。荷兰一家焦炭厂在压缩机上安装变频调速系统节省了 6-8 兆焦/吨焦炭，投资 0.3 美元/吨焦炭 (Farla et al., 1998)。

干熄焦 是传统水冷却焦的替代。这一工艺能减少灰尘排放，改善工作环境，回收焦炭的显热。干熄焦作为一项环境控制的代表性技术来实施。在巴西、芬兰、德国、日本和台湾应用不同的系统(IISI, 1993)，但是都基本上在容器中回收热，在这容器中用惰性气体（氮气）熄灭焦炭。热用来产生蒸汽（大约 400-500 公斤蒸汽/吨），相当于 800-1200 兆焦/吨焦炭(Stelco, 1993; Dungs and Tschirner, 1994)。蒸汽能用在厂区或用来发电。根据德国最近新建厂的建设成本，新焦炭厂成本约为 50 美元/吨焦炭(Nashan, 1992)。更新的投资成本主要取决于焦炭的产量，且节省会很高，达 70 到 90 美元/吉焦 (Worrell et al., 1993)。运行和维护成本估算增加 0.5 美元/吨焦炭。

炼铁—高炉

炼铁是综合炼钢中最消耗能源的工序。

炼铁阶段的一个主要节能措施是将燃料喷射进高炉，特别是粉煤喷射（PCI）。粉煤喷射取代焦炭的使用，减少焦炭的生产因而在炼焦（见上所述）中节省能源，并减少了焦炉排放和相关的维护费用。

增加燃料喷射需要消耗能源来鼓吹氧气、煤、电及设备来粉碎煤。煤部分代替用于化学反应燃料的焦炭。焦炭在高炉中仍用作辅助原料。最大的燃料喷射取决于高炉的尺寸和铁矿质量的影响（例如硫）。在欧洲许多高炉内喷射煤粉是常见的工艺，并且在美国也在增加以减少对焦炭的需求量。最大理论喷射煤粉率约 280-300 公斤/吨高炉铁水。

粉煤设备的投资费用约为 50-55 美元/吨喷射煤粉 (Farla et al., 1998)。O&M 成本呈现净减是由于焦炭的购买成本和（或）现有炼焦炉维护费用的减少，而这种减少的费用部分被增加的喷吹氧以及高炉和粉煤设备维护费用成本而抵消。根据 1994 年动力煤和焦炭煤的价格，减少的运行成本为 15 美元/吨 (IEA, 1995)到 33 美元/吨（后者导致高炉铁水产品成本减少 4.6%）(Oshnock, 1995a)。

粉煤喷射 130 公斤/吨高炉铁水 在这一措施中，平均喷射速度增加到 130 公斤/吨高炉铁水。净增 128 公斤/吨高炉铁水使得节省燃料 0.77 吉焦/吨高炉铁水，节省费用 7 美元/吨高炉铁水(Farla et al., 1998)。运行成本将减少 2 美元/吨高炉铁水(IEA, 1995)。粉煤喷射可以减少高炉利用。因此，经济效益因厂而异。

粉煤喷射 225 公斤/吨高炉铁水 这一措施中喷射速率从起始的 2 公斤/吨高炉铁水提高到 225 公斤/吨高炉铁水（如 USX Gary13 号高炉已经达到），这可以节省燃料 0.57 吉焦/吨高炉铁水，额外投资 5.2 美元/吨高炉铁水，减少运行成本 1 美元/吨高炉铁水 (Schuett and White, 1997)。

天然气喷射³ 在美国，由于煤价格低廉而认为是可行的喷射措施。喷射天然气是一种替换。最大喷射速率低于煤喷射(Oshnock, 1995b)。天然气替换速率从 0.9 公斤到 1.15 公斤/公斤焦炭(Oshnock, 1995b)。燃气研究所做的天然气喷射测试速率最大为 130-150 公斤/吨高炉铁水，节约成本 4-5 美元/吨高炉铁水。降低的运行成本与低速煤粉喷射（PCI）相似（2 美元/吨高炉铁水）。

顶压回收气轮机（湿型）用来回收利用炉顶的压力。虽然压差比较小，但是气体的体积大使得回收经济可行。压差用来生产 15-40 千瓦时/吨高炉铁水(Stelco, 1993)。高炉上安装气轮机已在世界范围内采用，尤其是电价相对高的地区（如西欧和日本）。标准的气轮机带有一套湿的燃气清洁系统。如果电力回收能力为 30 千瓦时/吨高炉铁水，投资费用约为 20 美元/吨高炉铁水。

高炉煤气回收 用来回收在高炉上料期间损失气体的 1.5%。荷兰的 Hoogovens 已开发并应用回收系统。估计节省量达 66 兆焦/吨高炉铁水，成本 0.3 美元/吨高炉铁水 (Farla et al., 1998)。

热风炉自动化 能减少炉子能耗，提高运行的可靠性，增加炉子寿命，及优化气体混合(Beentjes et al., 1989; Derycke et al., 1990; Kowalski et al., 1990)。这一系统的节能

³这次，我们并没有关于天然气喷射实际水平的充分数据。其他燃料也能喷射，但由于缺乏数据，不包含在内。速率 30 公斤/吨高炉铁水的塑料废弃物喷射已经在德国 Stahlwerke Bremen 测试(Janz and Weiss, 1996)。热含量（由于 PVC）

量估计在 5% (Beentjes et al., 1989) 和 12 — 17% (Derycke et al., 1990)之间。根据热高炉的高能耗，假定节能量约 370 兆焦/吨高炉铁水 (Derycke et al., 1990)。Gent (Belgium)Sidmar 安装的热高炉自动化系统两个月得到回收(Derycke et al., 1990)。投资为 0.3 美元/吨高炉铁水。

热风炉换热器 热风炉用来加热高炉的燃烧气体。热风炉燃气的出口温度约 250℃。这些热可用于炉内燃烧气体的预热。已开发应用不同的回收系统 (Stelco, 1993)。节省燃料量不同，在 80-85 兆焦/吨高炉铁水之间 (Farla et al., 1998; Stelco, 1993)。换热器系统成本高且与炉子大小（如高炉）有重要关系。估算成本为 18-20 美元/吉焦 节省量 (Farla et al., 1998)，相当于 1.4 美元/吨高炉铁水。一座效率高的热风炉不需要天然气也能运行。

改善高炉控制系统 日本和欧洲已经开发出这一系统，并目前提供改进的控制系统给加拿大使用。芬兰的 Rautaruukki 钢厂已安装上一个成功的控制系统，能减少总燃料使用量为 440-450 公斤/吨高炉铁水(Stelco, 1993)，增加产量和 flexibility (Pisila et al., 1995)。英国钢厂已开发出高炉控制的专家系统(Fitzgerald, 1992)。改进高炉控制步骤估计节省量是 Rautaruukki, 如 0.4 吉焦/吨高炉铁水 (Pisila et al., 1995)节省量的一半。另一半用于控制材料 upgrading。基本投资费用约为每座高炉 50 万美元。运行成本没有大变化。

熔融还原工艺 最近在生铁生产中开发出的，放弃了焦炭的制备。工艺也是在放弃选矿下开发的，包括 CCF, DIOS, AISI 和 HISmelt。目前，只有 COREX 工艺（澳大利亚 Voest-Alpine）是商业化的，并在南非和韩国运行，在印度、韩国和南非也正在建设一些工厂。美国 Geneva 钢厂对 COREX 工艺感兴趣。COREX 工艺使用已由热浴产生的煤气预还原的混合矿。预还原的铁之后在这个炉里熔炼。这一工艺产生的多余煤气用于发电、DRI 产品或作为燃气。

放弃炼焦将减少投资费用约 250 美元/吨高炉铁水（和新建高炉厂 330-350 相比），并且节省能源(Worrell, 1995)。动力煤的利用会减少煤炭的购买成本。与焦炉相比，这一工艺本质上更清洁(Worrell, 1995)。煤炭净利用约为 15-17 吉焦/吨高炉铁水 (Worrell, 1995)。目前 COREX 工艺节能量约为 3.6 吉焦/吨高炉铁水 (以美国能源消耗 18.6 吉焦/吨 高炉铁水为基础估算)。基本投资成本约为 250 美元/吨高炉铁水，与一座现代高炉厂的 385 美元/吨高炉铁水相比，减少了 135 美元/吨高炉铁水，并且运行成本减少约 7 美元/吨 高炉铁水 (Meijer et al., 1994)。通过放弃矿造块来降低成本是可行的，目前正开发高级熔融还原工艺（见下面）和新的 COREX: FINEX。

炼铁——可选性

直接还原铁 (DRI), 热压铁 (HBI) 和碳化铁在炼铁工艺都可替代(McAloon, 1994)。最新直接还原生产铁法技术的能耗为 10-11 吉焦/吨铁和 110 千瓦时/吨(Midrex, 1993)。直接还原铁是通过在铁的熔化点下还原铁矿石产生的，主要在电弧炉

(EAF) 厂用作高质量铁生产。一种新可选的铁生产工艺——碳化铁工艺由 Nucor 领先并在特里尼达一家工厂运行，并计划在美国德克萨斯州另建一家工厂。

炼钢—碱性氧气转炉 (BOF)

在碱性氧气转炉 (BOF) 中炼钢供应中铁水和废钢及其它一些附属品 (锰和 fluxes) 被加热和精炼来用于生产粗钢。

碱性氧气转炉煤气和显热回收 (抑制燃烧) 在这一工艺过程中是单独最节能的工艺改善, 使得 BOF 工艺成为净能源生产者。通过减少通过转炉的空气量, CO 没有转化为 CO₂。显热 of the off-gas 在废热锅炉里第一次回收, 产生高压蒸汽。煤气已清洁回收。总节能量在 535-916 兆焦/吨钢之间变化, 这取决于蒸汽回收方式(Stelco, 1993)。压制燃烧减少了灰尘排放, 因此灰尘中金属含量高, 约 50%的灰尘可以在烧结厂回收(Stelco, 1993)。成本取决于额外气柜的需求。压制燃烧在欧洲和日本的综合钢厂很常见, 但在美国似乎没有 BOF 煤气回收(U.S. DOE, OIT, 1996; Hanes, 1999)。根据日本(Inoue, 1995)和荷兰(Worrell et al., 1993)各厂情况, 预计能源回收率为 916 兆焦/吨粗钢(Stelco, 1993), 基本投资费用 22 美元/吨粗钢。需要额外的运行和维护费用。

通风机变频调速 BOF 工艺基本上是一个处理过程。烟气量在时间上有很大的不同, 使得变频驱动成为选择。BOF 厂使用大风机来控制空气质量。在美国 Hoogovens, BOF 使用变频调速已证明能节电(Worrell et al., 1993)——减少电力需求约 20%, 或 0.9 千瓦时/吨粗钢 (Farla et al., 1998)。总成本为 100 万美元 (1988), 投资费用为 0.2 美元/吨粗钢 (Farla et al., 1998)。

炉外精炼——电弧炉 (EAF)

电弧炉或炉外精炼包括源自废金属的钢产品, 废金属利用电在电弧炉内熔化并精炼 (U.S. DOE, OIT, 1996)。电弧炉和高炉/碱性氧气转炉相比平均产量小, 用能也少。

改进工艺控制(神经网络) 通过典型控制系统能减少电耗。例如, 神经网络或模糊逻辑系统能分析数据并超过最好的控制人员。目前已经开发使用电弧炉的模糊逻辑控制系统, 利用电流、电力因素和用电来控制电极浴 (Staib and Bliss, 1995)。平均节电约将近 8% (或 38 千瓦时/吨), 产量平均增加 9-12%, 并且减少电极耗损 25%(Staib and Bliss, 1995)。世纪节省量取决于废料的使用和炉的运行。炉子维修成本也降低。假定平均改进效率为 30 kWh/吨 (或 0.1 吉焦/吨)。基本投资和投产费用约每座炉子 250,000 美元, 年节省成本大约 1 美元/吨 (Kimmerling, 1997)。

烟气监测和控制 利用变频调速能减少燃气风机用能, 减少烟气热损失(Stockmeyer et al., 1990; Walli, 1991; Worrell et al., 1997c)。烟气随时间流动的不同使得变频调速成为可能。烟气变频驱动在不同国家都有安装 (如德国、英国)。节电约为 15 千瓦

时/吨 (Stockmeyer et al., 1990), 2-3 年的回收期(Walli, 1991; Worrell et al., 1997c)。基本投资费用约为 2 美元/吨, 应用这一措施到所有 100 吨或更大的炉子。

超高功率变压器 变压器的损失可高达电力输入的 7%(CMP, 1992)。损失量主要取决于变压器大小和使用时间。在替代变压器时可以让炉子超高功率下运行, 这样提高产量, 也减少能源损失。超高功率电力炉都有一个超过 700 千伏安/吨 热容量 (IISI, 1983)的变压器。每提高 1MW 电力节能量约为 1 千瓦时/吨。许多美国电弧炉运行商安装了新的变压器和电力系统来增加炉子功率, 例如 Co-Steel (Raritan, NJ), SMI (Sequin, TX), Bayou Steel (Laplace, LA) (Ninneman, 1997)。超高功率运行可能导致热流动, 增加耐火材料层, 使得炉子 panel 冷却成为可能(Teoh, 1989)。这导致部分热损失抵消了节省的电力。增加的电力可以通过新的变压器或并联已有的变压器而达到。1997 年 Co-Steel (NJ)一个 93 MVA 变压器替换为 120-144 MVA。这包含在一个总成本为 620 万美元 (Ninneman, 1997)的项目内。这相当于生产了 8.3 美元/吨 钢。因为总项目也包含其它设备, 所以这是高成本的估算。假定所有 15 年以上的中型到大型变压器可以替换成更节能的设备。估计总节能为 17 千瓦时/吨, (14 千瓦时是由于变压器替换, 3 千瓦时升级成为超高功率)。

炉底吹风/煤气喷吹 通过在电弧炉炉底喷吹惰性气体 (如氩气) 来增加熔化时的热交换和炉渣与金属的相互作用 (使得液态金属产量增加 0.5%) (Schade, 1991)。根据 Lukens Steel Co. in 1990 的测试 (Schade, 1991), 这增加的底吹带来节电 11 到 22 千瓦时/吨, 计算增加的人工成本和氩气成本在内, 年净产量成本减少 0.5 到 1.0 美元/吨。增加的钢水产量使净节约成本提高到 0.9-2.3 美元/吨 (Jones, 1993)。喷吹氧气的炉子能充分流动,减少惰性气体搅拌的需求 (见下面)。省电大约 20 千瓦时/吨 且节省成本 1.5 美元/吨。目前没有关于美国电弧炉应用的数据。假定应用潜力约在 1994 年电弧炉数量的 11% (如不具备氧气喷吹的小型 AC 炉)。用于增加的耐火材料成本和安装通风管, 改造现有炉子的基本投资费用 约为 0.6 美元/吨(1987) (Riley and Sharma, 1987)。年购买惰性气体的成本约为 1.1 美元/吨 (Riley and Sharma, 1987)。增加产量 (不包括节能成本, 包括节省的电极成本, 人工和合金) 为 3.1 美元/吨 (Riley and Sharma, 1987)。通风管的使用寿命限制在 100-200 高温 (Riley and Sharma, 1987)或者将近 6 个月。

泡沫渣技术 通过用泡沫渣覆盖弧和融化表面的辐射来帮助减少热损失。通过喷吹碳 (颗粒煤) 和氧气, 或者只喷射氧气可以得到泡沫渣。考虑生产氧气用能在内净节能为 5-7 千瓦时/吨钢 (源于 Adolph et al., 1990)。根据安装氧气枪的成本, 估计投资约 10 美元/吨容量 (Jones, 1997b)。泡沫渣技术也可以通过减少冶炼时间来增加产量, 相当于节省成本 1.8 美元/吨钢 (源于 Adolph et al., 1990)。

氧-燃料燃嘴/吹氧 可以安装在电弧炉上通过用燃料替代电力来减少电耗, 增加热交换并减少热损失 (见上面泡沫渣技术)。典型的节能量范围从 2.5 到 4.4 千瓦时/ Nm^3 喷吹氧 (IISI, 1982; CMP, 1987; Haissig, 1994; Stockmeyer et al., 1990), 通常喷吹速率为 18 Nm^3 /吨 (IISI, 1982)。燃料喷吹速率可以增加到 26 m^3 /吨。天然气喷吹是 10 scf/kWh, 或 0.3 m^3 /kWh, (CMP, 1992), 典型的节能量 从 20 到 40 kWh/t (Jones,

1996)。调整的投资费用取决于炉子大小。电弧炉平均容量为 110 吨时，投资约为 4.8 美元/吨 (Jones, 1996)。改进的热分布减少了约 6%的冶炼时间(CMP, 1995)，使年成本节省量达 4.0 美元/吨 (CMP, 1987)。氧气喷吹也减少了钢中氮的含量，从而改善了产品质量。

二次燃烧 电弧炉烟道气的二次燃烧帮助优化氧气和燃料喷射。当利用煤气燃烧热来加热电弧炉桶内的钢(通过第四个孔或在干舷)或预热废钢时，CO 可以进一步氧化成 CO₂。节电量取决于喷吹氧的量。喷吹氧二次燃烧 2.8 kWh/m³ (Kleimt and Koehle, 1997)，节电量达 50–800 kWh/t(Gregory et al., 1996; Jones, 1997a)。美国 Cascade Steel (OR)已安装一台二次燃烧系统，节能量将近 64 kWh/t (Gregory et al., 1996)。

偏心炉底出钢 (EBT) 偏心炉底出钢 (EBT) 应用于最现代的高炉，可以无渣冶炼，缩短冶炼时间 (提高产量)，减少耐火材料消耗，减少电极耗 (0.1–0.3 公斤/吨) 并且延长钢包寿命。EBT 帮助减少能源损失和改善排放控制。估节能量为 15 千瓦时/吨 (0.05 吉焦/吨) (CMP, 1992)。改造 Ipsco, Regina (Saskatchewan, Canada)现有的 EAF 炉花费 220 万美元(Ninneman, 1997)。炉子年产量 68.8 万吨，改造费用约为 3.2 美元/吨产量。

直流电弧炉 用直流(DC)代替传统的交流 (AC)。直流炉中使用单独的电极，通道底部被用作阳极，可以改进炉内热分布，这减少了电耗。直流炉的另一主要优点在于减少了冶炼时间和电极耗损 (降低到 1.2–1.6 kg/吨钢) (Macauley and Smailer, 1997; Mueller, 1997)，增加了耐火材料的寿命，并且提高稳定性(Jones, 1997b; Stelco, 1993)。直流技术应用于大炉子 (80–130t 热容量)，而小炉子希望沿用 AC 系统。更大的 DC 炉 (使用两个电极) 正在调查研究中。DC 系统的缺点是投资费用高达 10–35%(Jones, 1997b)。目前由于使用一个电极最大电流受到限制，而超高功率 DC 系统正在开发中(Palacios and Arana, 1995)。净节能约为 90 kWh/t (包括生产氧 0.4 kWh/Nm³ (Hendriks, 1994))。和新的 AC 炉相比，节省量局限在 10–20 kWh/吨之间 (Jones, 1998)。和 AC 炉相比，根据对一座 100 吨炉子成本估算，需要额外投资为 270 万美元，或 3.9 美元/吨容量(1991) (CMP, 1991)。预计节省成本 2–6 美元/吨 (CMP, 1991)。包括节省的电极成本，成本节约将近 2 美元/吨钢(CMP, 1992)。预计年节省成本 (不包括能源成本) 2.5 美元/吨。

废钢预热 这项技术通过利用炉子废热预热供应的废钢能减少电弧炉的电耗。旧的 (装料罐) 预热系统存在各种问题，如排放、高处理费以及相当的低热回收率。现在的系统减少了这些问题且非常高效。节能量取决于废钢的预热温度。已开发出不同的系统并应用于欧美各地，如 Consteel 隧道型预热器, Fuchs 烟道竖炉和 Fuchs 双竖炉。双壳炉 (见下面) 也可用作废钢加热系统。所有系统都能应用于新建厂以及改造已有厂。

康斯迪(Consteel)工艺 由输送机把废钢经过通道进入到电弧炉。美国许多厂采用 Consteel 工艺，例如 Florida 钢厂(现在的 AmeriSteel, NC)、新泽西(NJ) 和 Nucor (SC)，日本也有一家。安装在新泽西钢厂是现有炉子的改造 (Lahita, 1995)。除了节

能, Consteel 工艺提高生产率 33% (Jones, 1997a), 减少电极耗损 40% (Jones, 1997a), 并且能减少灰尘排放(Herlin and Busbee, 1996)。在改造中没有补充燃料喷吹的情况下, 用电减少至 370-390 kWh/t (Herlin and Busbee, 1996), 而在新建厂能耗已达到 340-360 kWh/t (Jones, 1997c)。预计改造后节电 60 kWh/t。年生产能力 400-500,000 吨的额外投资为 200 万美元 (1989) (Bosley and Klessner, 1991), 特殊投资将近 4.4 到 5.5 美元/吨。由于产量增加, 电极费用减少且产量增加, 年节约费用约为 1.9 美元/吨(Bosley and Klessner, 1991)。

FUCHS 竖炉电弧炉 包括输送尾气以预热废钢的垂直竖炉。废钢可以连续填充 (全世界有 4 家工厂采用) 或通过一个所谓的‘手指’系统(全世界 15 家工厂采用) (VAI, 1997)。理想的回收系统为双竖炉 (全世界 3 家工厂采用), 仅应用于新建厂。Fuchs 系统使得几乎 100% 废钢预热成为可能, 可以达到节能潜力 100-120 kWh/t (Hofer, 1997)。节能量取决于使用的废钢和二次燃烧的程度(氧水平)。要控制好一氧化碳和氧气聚集以减少爆炸的危险, 美国 North Star-BHP 就发生过爆炸。废钢预热系统能减少电极耗损, 提高产量 0.25-2% (CMP, 1997; VAI, 1997), 生产量提高 20% (VAI, 1997), 并减少燃气灰尘排放 25%(减少危害废物处理费用) (CMP, 1997)。已为改造现有炉子开发了特殊系统, 称为 Fuchs 优化改造竖炉, 竖炉相对小。现有 100t 炉子的改造费用约为 6 美元/吨(Hofer, 1997)。使用二次燃烧-能耗约为 340-350 千瓦时/吨 (Jones, 1997d)和 0.7 吉焦燃料喷射(Hofer, 1996)。生产成本节约量达 4.5 美元/吨(不包括节省的电力成本) (Hofer, 1997)。

IHI 工艺 日本 IHI 公司目前正在开发一种新工艺, 由带两极 DC 炉的立筒预热器组成(Takeuchi et al., 1995; Jones, 1997b)。使用两个 DC 电极把热流导入炉子中部, 减少了炉墙热损失。工艺全自动运行。日本有两家试点/示范企业在运行。这一工艺参数的电耗约为 260 千瓦时/吨, 消耗燃料 0.8 吉焦/吨, 并且喷射氧气 33 NM³/吨钢 (Jones, 1997a)。由于产量高, 基本投资费用预计比传统 DC 炉低。这项研究的基本投资费用数据无法得到。

Contiarc 工艺 contiarc 工艺由 Mannesmann Demag (德国) 开发。这一工艺由连续的废料熔融过程(取代 current batch process) 组成, 生产能力为 100 百吨/年。这一设计以节能和低排放为目标(Reichelt and Hofman, 1996)。Contiarc 工艺只在小范围内测试过, 可能很快会建一个试点厂(Möllers et al., 1997)。当喷射为 0.48 吉焦/吨钢时, 设计和期望的电耗约为 250-258 千瓦时/吨 (Reichelt and Hofman, 1996; Mannesmann, 1998)。每生产吨钢的产品成本预计减少 10-14 美元, 减幅量达 20% (Reichelt and Hofman, 1996; Mannesmann, 1998)。最初两个 Contiarc 订单在 1999 年 (Martin et al., 2000)。

熔融工艺 熔融工艺(Voest Alpine, Austria) 目的在于开发高效的半连续工艺 (Jones, 1997b)。这工艺有四个石墨电极和一个底部返回电极。整个炉子 tilted to tap the heat。电极的位置使增加的热能够回收 as the shaft 预热器可以置于炉顶。估计电耗为 307 千瓦时/吨, 使用天然气 0.24 吉焦/吨 (加上额外使用的碳), 电极消耗仅 1.8 公斤/吨钢水 (Jones, 1997b)。大的熔融单元基本投资费用预计与 DC 炉相同(Jones,

1997b), 而小容量的成本更高。产品成本约为 8-10 美元/吨, 比传统 DC 或 AC 炉低 (Berger and Mittag, 1995)。

铸造

粗钢产品可铸造成小钢胚, 大钢胚, 扁钢胚, 钢锭等不同尺寸。钢水倒入分离器后, 流出到模中形成至更多。

采用连续铸造法。粗钢钢锭须在均热炉预热后, 经分块压延机轧制成扁钢胚。连续铸造法取代了直接轧制扁钢胚, 或大钢胚, 小钢胚制成 3 英寸薄钢板的方法。连续铸造法减少均热炉的能量消耗, 更重要的是降低了 6% 的原材料损耗 (连续铸造法原材料损耗约为 2%)。大多数工业国家几乎 100% 采用连续铸造法制钢, 节能 2.86 吉焦/吨铸钢 (Stelco, 1993; U.S. DOE, OIT, 1996)。Hogan (1992) 估计由于设备和加工减少和原材损耗的减少节约的成本为 31 美元/吨。英国 Scunthorpe 钢厂 (年产量 125 万吨/年) 一个新的钢胚轧制机的投资费用为 69 美元/吨 (Anon., 1996)。

有效钢包预热法 铸造机钢包 (和 BOF) 通过煤气烧嘴预热。由于没有顶盖和热辐射会导致部分热损失。这部分损失可通过安装温度控制器, 机罩, 或加装换热炉 (Caddet, 1987), 采用氧气烧嘴 (Gitman, 1998) 来降低, 或对钢包有效的管理 (减少预热的需求) 也可降低热损失。有效预热将减少用能 50% 或 0.02 吉焦/吨粗钢, 预计 1.1 年收回成本 (把钢包加工部分节能考虑在内), 或 0.06 美元/吨产品, 假定煤气价格为 2.8 美元/吉焦 (IEA, 1995)。

薄扁坯连铸法 是在同一工艺上整合连铸和连轧的新技术, 并带动减少在轧钢前对加热钢的需要。美国纽柯 Crawfordsville 和 Hickmann 厂在这方面起到示范作用。世界范围内许多工厂在运行, 在建或已订购。最初这种方法是为小规模的生产线设计的, 第一个建成的综合厂 (Acme, U.S.; Posco, Korea) 宣布薄扁钢连铸机的最高生产能力可达到 150 万吨/年 (Worrell and Moore, 1997)。目前, 有四家供应商 (德国 (2 个), 澳大利亚和意大利) 提供这项技术。这里的阐述是依据 SMS (德国) 开发的 CSP 工艺, 因为在世界范围内广泛采用此项技术。节能量预计为 4.9 千焦/吨粗钢 (一次能源)。一个 CSP 厂预热炉能耗为 94 兆焦/吨燃料, 用电 43 千瓦时/吨 (Flemming, 1995)。大型工厂投资成本估计为 110—180 美元/吨产品不等 (Anon, 1997a; Anon., 1997b, Schorsch, 1996)。由此我们预测投资成本是 134 美元/吨粗钢, 估计运行成本节约 25-46 美元/吨产品 (来源于 Ritt, 1997 and Hogan, 1992, Schorsch, 1996)。

近终形连铸坯/带坯连铸技术 是近来在金属塑形中最广泛应用的技术。目前金属铸造成钢锭和扁钢胚。钢锭和扁钢胚在铸造轧棍后, 需要预热定型。近终形连铸坯/薄板坯连铸技术将钢材的铸造与热轧合并到一个工艺过程, 可减少在轧制钢材前加热钢材的需要。带坯连铸是直接铸造成一条 1-10 毫米的带状钢材 (De Beer et al. 1998, Opalka 1999, Worrell et al., 1997c)。从 1975 年开始, 在欧洲, 日本, 澳大利亚, 美国, 加拿大等国家, 约有 11 个钢材制造商, 技术供应商和研究群体开发近终形连铸/带钢连铸技术 (Luiten and Blok, 2003)。至此, 3 种商业技术合并。这三项技术是以 Bessemer 提出的同一原则为依据。钢材在两个水冷连铸轧中铸造出来,

使得钢材快速冷却并加快生产速度。带钢连铸的主要优点是由于较高的生产效率并合并了几个生产步骤，极大的减少了资本的投入。此技术首先在不锈钢生产中应用，有两个制造厂示范了碳钢的带钢连铸技术。第一批商业技术是：

- **薄带连铸设备。**依据 BHP（澳大利亚）和 IHI（日本）公司开发的技术，薄带连铸形成产品商业化。第三个合作方是 Nucor(美国)。Nucor 是美国最大的钢铁生产者，也是把薄扁坯连铸法引入美国的公司。第一台商业薄带连铸设备在 Nucor 的 Crawfordsville Indiana 工厂建设，工厂于 2002 年试投产，2003 年生产，工厂生产能力为 50 万吨/年。
- **欧式薄带连铸** 欧式薄带连铸是澳大利亚、法国和德国公司的合作产品，它融合了一些项目和在铸造方面的长期实践。第一个试点工厂在 Terni(意大利)运行。试点工厂现在采用薄带连铸碳钢。第一个商业化工厂于 1999 年在 Krefeld (德国)开放。该技术的产量在 50 万吨/年。
- **日石三菱。**这两个日本公司在新日铁公司（日本）Hikari 工厂使薄带连铸技术商业化。这仍然是个相对较小的设备（每年产量 35,000 吨）。

此技术能极大降低成本并节能，也因原材料损耗的减少而间接节能。运行及维护费用的降低虽然很依赖于铸造中耐热滚筒的寿命和当地状况，但这些费用预计也能降低 20-25%。建造一个连续轧铸造机的基准成本是 200 美元/吨年产量。Nucor 的 Crawfordville 钢厂（印度）的一等带坯连铸机建造投资费用约为 180 美元/吨。与现在技术相比，此技术投入较低，没有回收期。近终形连铸坯/带坯连铸技术的能耗明显低于连铸过程，节约燃料为 0.04 MBtu/ton（0.05 吉焦/吨），节电 39kwh/t(42 kWh/tonne)。

热轧⁴

铸造之后，成型的产品进一步轧制成薄板，钢带以及其他结构钢 (U.S. DOE, OIT, 1996)。

热装工艺 在提高的温度下把扁钢坯料运装到热轧厂的加热炉。扁钢坯可以在不同温度下装料，装料温度越高越节能。技术的实施取决于该厂的规划和铸机与热轧厂的距离。在一些工厂铸机和加热炉相邻，这降低了热装料成本(如美国的 LTV 和比利时的 Usines Gustav Boel)。如果铸机和热轧厂距离远时，需要处理和输送扁钢坯(如所谓的“热连接”) (Worrell et al., 1993)。热装料不仅节能，还改进材料质量，减少材料损失，提高产品质量（达 6%），并能减少扁钢坯库存(Ritt,1996)。向加热炉装料前需注意扁钢坯的除鳞(Caddet, 1990a)。根据美国 Burns Harbor Bethlehem 钢厂 (Ritt, 1996)的经验，假定装料温度为 700℃，节约量达到 0.6 吉焦/吨热装钢。附加年

4

⁴热轧厂的另一有效用电措施，能减少热轧机的电力需求。现代热钢机耗电量约 105 kWh/t (0.4 GJ/t) (Worrell et al., 1993)。安装现代热钢带机的节省量能达到 115 kWh/t (0.4 GJ/t)。这些厂中最常用的是电机。应用于热轧机和退火泵 2.5 kWh/t (Anon., 1994)，通过应用变频调速和控制能节能 42-76%。这个系统需要投资量为 0.24 美元/吨产品，节能 1.9kWh/吨热轧钢。减少维护费用 0.02 美元/吨产品 (Anon., 1994)。这一措施在列入表 1-3 前还需进一步认证。

费用节省量达到 1.15 美元/吨热装。投资费用主要取决于规划，根据 LTV 经验预计有 15 美元/吨热轧钢(Wakelin, 1997)。

直接轧制 是热装和薄扁钢坯铸造的变化。标准扁钢坯是直接在热钢带机上轧制的，节约了处理和能源费用。预计节能量为标准冷装料能源费用的 50%(Parodi, 1993)。然而，由于轧制机座需要直接放置在连续铸造机旁边，改造费用高，在现有综合钢厂里这一选择可能难以实施。

薄扁钢坯铸造 铸造热轧前再热过的薄扁钢坯。

热钢轧机工艺控制 节能、提高产量和轧钢产品的质量(Heesen and Burggraaf, 1991; Schriefer, 1996; Vergote, 1996)。尽管直接节能受限制，但由于减少产品的废品，改进生产率和减少停工，间接节能是实在的(Heesen and Burggraaf, 1991; Schriefer, 1996; Vergote, 1996)。根据比利时 Sidmar 安装的系统，废品份额从 1.5%减少到 0.2%，停工从多于 50%减少到 6%。轧制费用从 7 美元/吨减少到 4.7 美元/吨(Vergote, 1996)。许多国家热钢轧机上安装了类似系统。在减少废品率和提高生产率的基础上燃料使用的节约量约为 9%。预计 Sidmar 厂生产能力为 280 万吨的热钢轧机投资为 200 万美元，相当于 0.7 美元/吨产品。这项措施将应用于所有薄扁钢坯铸机或类似铸机铸造的扁钢坯。

自预热烧嘴 加热炉内的自预热烧嘴能减少能耗。预计冶金行业范围内平均节能量为 30% (Worrell et al., 1997c)。加热炉内用能量取决于产品因素（如 stock，钢型），运行因素（如计划）和设计参数。因此，实际能耗变化大，在 0.6 - 3.0 GJ/t (Flanagan, 1993)之间，由于热装料所以数据低（见上面）。根据对日本、澳大利亚、英国和加拿大 151 座炉子（代表西方世界钢产品的 20%）的调查显示 18%的炉子没有热回收，75%的炉子具有独立热回收(Flanagan, 1993)。安装换热式或自预热烧嘴需要对炉子构造作本质改变，投资费用可能比较高。新设计除了更高的火焰温度外，还能低 NO_x 排放。根据英国经验(Flanagan, 1993)，大多数小炉子节能潜力燃料将近 25%，或粗略估算为 0.7 吉焦/吨产品。一座 12 吨/小时的炉子投资将近 2-3 美元/吨。烧嘴使用寿命预计为 10 年。

加热炉绝热 使用陶瓷低热惯性绝热材料 (LTM) 比传统隔热材料能进一步减少热损失。对四个国家钢行业钢加热炉的调查显示，将近 30%的加热炉有耐火纤维炉衬 (Flanagan, 1993)。预计一个连续炉实施耐火纤维炉衬可节能 2-3% (Flanagan, 1993) 节能量为 0.16 吉焦/吨产品。尽管未找到最近的成本数据，预计相关投资约 10 美元/吨产品，来源于 de Beer et al. (1994)。使用寿命约为 10 年。

控制氧水平及燃烧风机变频调速 加热炉帮助控制氧水平，并能优化炉内燃烧，尤其是炉子负载随时间变化不同。节能量取决于加热炉的负载因数和应用的控制策略。英国钢铁行业的两个案例显示了区别。Cardiff Rod Mill (UK)在步进式加热炉安装燃烧风机变频调速驱动，减少了燃料消耗 48%，回收期为 16 个月 (1985 UK 水平) (Caddet, 1994)。另一例子（没有安装变频调速）小钢坯加热的步进式加热炉，燃

料消耗节约 2%，回收期一年(1990 UK conditions) (Flanagan, 1993)。保守地假定节约 10% 或 0.33 GJ/吨产品，那么投资约为 0.5 美元/吨产品。

热轧机节能驱动 替换目前使用的传统交流驱动。大交流驱动(> 200 kWe)的效率估计在 91-97%(Worrell and Moore, 1997)。高效电机可节电将近 1-2%(de Almeida and Fonesca, 1997)。假定需电力 200 千瓦时/吨轧制钢，预计节电为 4 千瓦时/吨，或 0.01 吉焦/吨产品。替换费用约为 5 美元/千瓦 (较之平常驱动，有额外费用) (de Almeida and Fonesca, 1997)，相当于节约 0.05 美元/千瓦时，或 0.2 美元/吨轧制钢。

冷却水中废热回收 可以从热钢轧机的冷却水中回收废热。当退出时，轧钢被 80°C 喷淋水冷却。荷兰 Hoogovens 安装了一台吸热泵 (或热转换器) 来生产低压蒸汽 (1.7-3.5 bar, 130 °C) 配送到现场管网。预计节省燃料为 0.04 吉焦/吨产品，但同时增加电耗 0.15 kWh/t (Farla et al., 1997)。投资费用 42 Dfl/GJ-相当于 0.8 美元/吨产品 (Worrell et al., 1993)，增加 O&M 费用为 0.07 美元/吨产品，估计使用寿命为 15 年。

钢加热炉内低 NO_x 氧气-燃料燃烧器 是利用氧气-燃料燃烧器是另一替代方法。这些新设计向燃料提供接近化学计算量的氧气，抑制 NO_x 的形成。燃烧器中煤气高速度确保燃料在火焰更低的温度范围内完全燃烧。高速度也可以改善炉内热分布，改进炉内生产率。

如 Martin et al. (2000) 第一次讨论的，Praxair 低-NO_x 氧-燃料燃烧器已经在两座炉测试过：一座在 Bethlehem 钢厂，另一座在 Auburn 钢厂(NY)。Bethlehem 钢厂的项目由 DOE 的 NICE3 项目资助。预计 Bethlehem 钢厂的节能量为 35%，实际节能将近 50%(Selines, 2000)。在 Auburn 钢厂，由于燃烧器主要用于增加炉子的产量，所以没有节能，而且燃烧器的位置也导致无法节能。项目开始预期节能量为 30%(Valenti, 1998)。在连续加热炉内氧-燃料燃烧器更早的测试显示节能量为 28-39%(Farrell et al., 1993)。根据类似理念，美国燃烧 Pyretron® 燃烧器利用高速度和氧气可选供应来增加效率，减少 NO_x 排放。这一技术已用于许多金属，包括钢的加热炉。在一座强压式钢加热炉，新燃烧器的应用使得产量增加 (25%)，燃料节省 1.07 MBtu/ton (1.24 吉焦/吨)，耗氧 50 万立方英尺/吨 (或 14 Nm³/t) (American Combustion, 2000)。

预计平均节省燃料为 0.77 吉焦/吨，同时额外用氧 9 Nm³/吨。氧气生产消耗近 0.68 kWh/Nm³ (IISI, 1998)。估计总电耗约 6.1 kWh/t (6.8 kWh/metric tonne)。一次能源节约量为 0.73 吉焦/吨。氧气-燃料-燃烧器可以不需重建炉子，安装在现有炉子上。根据其他燃烧器系统的费用，预计投资费用为 2.3 美元/吨容量(2.5 美元/吨容量)。假定氧气供应是现成的，投资费用仅包括氧配送费用，而生产费用包含在运行和维护费用中。氧费用为 0.04 美元/Nm³ (De Beer et al., 1998)。

冷轧和加工⁵

⁵在冷轧中的一项措施实施连续退火，能降低热损失，但是投资成本相对较高。

热轧过的钢可能要冷轧并进一步加工以使产品更薄更平滑。

热回收 退火线上可以通过废热产生蒸气或在退火炉安装蓄热或换热燃烧器回收热 (Meunier and Cambier, 1993)。由于退火步骤的总能耗受限制，我们将不同的节能机会集中到一个措施。批退火的能耗约为 1.0 吉焦/吨燃料 和 25 kWh/t, 而连续退火为 0.8 吉焦/吨和 45 kWh/t (IISI, 1982)。通过实行热回收（使用蓄热燃烧器），改进隔热，工艺管理设备，以及变频调速，用能减少将近 40% (Meunier and Cambier, 1993)。估计节能为 0.3 吉焦/吨燃料和 3 kWh/t。根据荷兰 Hoogovens 的实践，投资费用预计为 2.7 美元/吨。

减少酸洗线蒸汽的使用 酸洗线上热通过氯化氢酸洗的蒸发散失。热浴正常加热温度为 95°C (IISI, 1982)。The IISI (1982)报告称假定使用蒸汽 30kg/t，通过在浴顶部安装顶盖和浮球系统，能减少使用蒸汽 5 公斤/吨，这相当于节约 17%。这一研究的投资费用数据尚无法得到。根据 de Beer et al.的保守估计(1994)预计费用为 2.8 美元/吨。

自动监测和目标系统 在冷钢带机上安装自动监测和目标系统能减少带机的电力需求以及废液。安装在英国钢厂钢轧机的系统减少了冷轧机能源需求将近 15-20%，这取决于负载因数(Caddet, 1990b)。假定平均电耗为 360 kWh/t (U.S. DOE, OIT, 1996)，预计节能 60 kWh/t。实施安装的费用为 1.1 美元/吨产品(0.63 美元/吨粗钢) (Caddet, 1990b)。

致谢

本项工作通过美国能源部，获得能源基金会的支持，合同编号为 DE-AC02-05CH11231。

参考文献

Adolph, A., G. Paul, K.H. Klein, E. Lepoutre, J.C. Vuilermoz, and M. Devaux, 1990. "A New Concept for Using Oxy-Fuel Burners and Oxygen Lances to Optimize Electric Arc Furnace Operation," *La Revue de Metallurgie – CIT* **87**(1): 47-53.

Aichinger, H.M., 1993. "Gesamtenergiesituation und Wirtschaft der Stahlerzeugende Industrie in Deutschland, Kontaktstudiums der TU Clausthal," *Metallurgie des Eisens - Teil 2: Stahlerzeugung*, Germany: Goslar-Hahnenklee.

American Combustion, Inc. 2000. "American Combustion: Rolling Mill - Reheat Furnace, Pyretron." Atlanta, Georgia: American Combustion, Inc. Online at: http://www.americancombustion.com/html/reheat_furnace.html.

Anonymous, 1994. "Energy Saving VSD Quench Pumps," *Steel Times*, April: 150.

Anonymous, 1995. "Natural Gas Injection Tests Show Benefits," *Iron & Steelmaker* **22**(10): 12.

Anonymous, 1996. "BS announces 70M pound Investment," *Ironmaking and Steelmaking*, **23**(1).

Anonymous, 1997a. "\$137 Million Expansion Project to Increase Capacity to 1.5 Mt," *Iron & Steel Maker* **24**(2).

Anonymous, 1997b. "Hoogovens envisage l'installation d'une coulee continue des brames minces," *La Revue de Metallurgie-CIT* **94**(3): 583

Anonymous, 1997c. "Warmtekrachtenheid van 144 MWe bij Hoogovens" *Energie en Milieuspectrum*, October 1997, p.9

Beentjes, P.A., S.P.A.M. Wokke, and J. van Breda, 1989. "Benefits of Automation of Hot Blast Stove Operation," *Proceedings 1989 AISE Iron and Steel Exposition and Annual Convention*, September, 18-21, 1989, Pittsburgh, PA: AISE.

Berger, H. and P. Mittag. 1995. "The Comelt Electric Arc Furnace with Diagonally Ordered Electrodes." In *Stahl und Eisen* 115 (9): 53-58 (in German).

Bosley, J. and D. Klessner, 1991. *The Consteel Scrap Preheating Process*, CMP Report 91-9, Center for Materials Production, Pittsburgh, PA.

Caffal, C., 1995. "Energy Management in Industry," *CADDET Analyses Series 17*, Sittard, The Netherlands: Caddet.

CADDET, 1987. *A Horizontal Ladle Preheating Station fired with a Self-Recuperative Burner Improves Steel Production Operations*, (Project 2B.F06.1451.87.UK), Sittard, The Netherlands: CADDET.

CADDET, 1989. "Improved Design for Foundry Ladle Pre-Heaters," *CADDET Energy Efficiency Register 3.0* (project UK-89-003), Sittard, The Netherlands: CADDET.

CADDET, 1990a. "Energy Saving by Scale Removal from Charging Slab," *CADDET Energy Efficiency Register 3.0* (project JP-90-022), Sittard, The Netherlands: CADDET.

CADDET, 1990b. "Computer-based Monitoring and Targeting on a Rolling Mill," Result 139 (Project UK 90.056/2B.FO3), Sittard, The Netherlands: CADDET.

CaddeT, 1994. "Variable Speed Drive on a Large Continuous Furnace Combustion Air Fan," *CADDET Energy Efficiency Register 3.0* (project UK-94-452), Sittard, The Netherlands: CADDET.

Center for Materials Production (CMP). 1987. *Technoeconomic Assessment of Electric Steelmaking Through the Year 2000*, EPRI/CMP, Report 2787-2, October 1987.

Center for Materials Production (CMP). 1991. *Direct Current Electric Arc Furnaces*, Tech Commentary CMP-063, CMP, Pittsburgh, PA.

Center for Materials Production (CMP), 1992. *Electric Arc Furnace Efficiency*, EPRI/CMP, Report 92-10, Pittsburgh, PA: CMP.

Center for Materials Production (CMP), 1995. *Coal & Oxygen Injection in Electric Arc Furnaces*, Tech Bulletin CMP 95-7TB, CMP, Pittsburgh, PA.

Center for Materials Production (CMP). 1997. *Electric Arc Furnace Scrap Preheating*. Tech Commentary, Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon Research Institute.

Cores, A., A. Formoso, M. Sirgado, J. L. Verduras, and L. Calleja. 1996. "Recovery of Potential Thermal Energy of Rolling Mill Waste Oil Through Sintering," *Ironmaking and Steelmaking* **23**(6): 486-492.

Dawson, P.R., 1993. "Recent Developments in Iron Ore Sintering, Part 4: The Sintering Process," *Ironmaking and Steelmaking* **20**(2): 150-159.

De Almeida, A. and P. Fonsesca, 1997. "Characterization of the Electricity Use in European Union and the Savings Potential 2010," in: A. de Almeida, P. Bertoldi and W. Leonhard (eds.), *Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives*, Berlin, Germany: Springer Verlag.

De Beer, J.G., M.T. van Wees, E. Worrell and K. Blok, 1994. *ICARUS-3, The Potential of Energy Efficiency Improvement in The Netherlands from 1990 to 2000 and 2015*, Utrecht, The Netherlands: Department of Science, Technology & Society, Utrecht University.

De Beer, J., K. Blok, E. Worrell. 1998. "Future Technologies for Energy-Efficient Iron and Steelmaking," *Annual Review of Energy and the Environment* **23**, pp.123-205.

Derycke, J., R. Bekaert, P. Cousein, L. Bonte, and H. Bruneel, 1990. "Automation of Hot Blast Stove Operation at Sidmar: Control and Optimisation of Energy Consumption," *Ironmaking and Steelmaking* **17**(2): 135-138.

Douglas, J., 1993. "New technologies for Electric Steelmaking" *EPRI Journal*, October/November 1993, pp.7-15.

Dungs, H. and U. Tschirner, 1994. "Energy and Material Conversion in Coke Dry Quenching Plants as Found in Existing Facilities," *Cokemaking International* **6**(1): 19-29.

ETSU, 1992. "Reduction of Costs Using an Advanced Energy Management System," *Best Practice Programme, R&D Profile 33*, Harwell, UK: ETSU

Farrell, L.M., T.T. Pavlack, and L. Rich. 1993. "Operational and Environmental Benefits of Oxy-Fuel Combustion in the Steel Industry." In Proceedings of the 12th Process Technology Conference. Pittsburgh, PA, October 24-27.

Farla, J.C.M., E. Worrell, L. Hein, and K. Blok, 1998. *Actual Implementation of Energy Conservation Measures in the Manufacturing Industry 1980-1994*, The Netherlands: Dept. of Science, Technology & Society, Utrecht University.

Fitzgerald, F., 1992. "Energy Use and Management in British Steel Plc.," *Ironmaking and Steelmaking* **19**(2): 98-106.

Flanagan, J.M., 1993. "Process Heating in the Metals Industry," *CADDET Analyses Series 11*, Sittard, The Netherlands: CADDET.

Flemming, G., 1995. Personal Communication with G. Flemming, SMS, Dusseldorf, Germany.

Gitman, G., 1998. American Combustion, Inc., Personal Communication, August 12th, 1998.

Haissig, M., 1994. "Enhancement of EAF Performance by Injection Technology" *Steel Times*, October 1994 pp.391-393.

Hanes, C., 1999. USS/Kobe Steel, Personal communication, June 1999.

Hendriks, C.A., 1994. *Carbon Dioxide Removal From Coal-Fired Power Plants*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Herin, H.H. and T. Busbee, 1996. "The Consteel® Process in Operation at Florida Steel" *Iron & Steelmaker* **23**(2): 43-46.

Heesen, G.J. and D.H. Burggraaf, 1991. "New Process Control System of Hoogoven's Hot Strip Mill - Key to Improved Product Quality," *Ironmaking and Steelmaking* **18**(3): 190-195

Hofer, L., 1996. *Electric Steelmaking with FUCHS Shaft Furnace Technology*, Linz, Austria: Voest Alpine Industrieranlagenbau GmbH, VAI.

Hofer, L., 1997. Personal communication, Voest Alpine Industrieranlagenbau GmbH, Linz, Austria, 25 September 1997.

Hogan, W.T., 1992. *Capital Investment in Steel, A World Plan for the 1990's*, New York, NY: Lexington Books.

Inoue, K., 1995. "The Steel Industry in Japan: Progress in Continuous Casting," in *Energy Efficiency Utilizing High Technology: As Assessment of Energy Use in Industry and Buildings*, Appendix A: Case Studies, by M.D. Levine, E. Worrell, L. Price, N. Martin. London: World Energy Council.

International Energy Agency (IEA), 1995. *Energy Prices and Taxes, First Quarter 1995*, Paris: IEA.

International Iron and Steel Institute (IISI), Committee on Technology, 1982. *Energy and the Steel Industry*, Brussels, Belgium: IISI.

International Iron and Steel Institute (IISI), 1992. *Steel Statistics Yearbook 1992*. Brussels, Belgium: IISI.

International Iron and Steel Institute (IISI), 1993. *World Cokemaking Capacity*. Brussels, Belgium: IISI.

International Iron and Steel Institute (IISI). 1998. "Energy Use in the Steel Industry." September. Brussels, Belgium: International Iron and Steel Institute.

Janz, J. and W. Weis, 1996. "Injection of Waste Plastics into the Blast Furnace of Stahlwerke Bremen," *La Revue de Metallurgie-CIT* **93**(10): 1219-1226.

Jones, J.A.T., 1993. *Increased EAF Productivity through Improved Operating Efficiency*, Nupro Corporation.

Jones, J. A. T. 1996. "New Steel Melting Technologies: Part III, Application of Oxygen Lancing in the EAF." *Iron and Steelmaker* **23**(6): 41-42.

Jones, J. A. T. 1997a. "New Steel Melting Technologies: Part X, New EAF Melting Processes." *Iron and Steelmaker* **24**(January): 45-46.

Jones, J. A. T. 1997b. *Electric Arc Furnace Evolution: In Search of the Optimal Design*. Bechtel Corporation.

Jones, J. A. T. 1997c. "New Steel Melting Technologies: Part XVI, CONSTEEL Process." *Iron and Steelmaker* **24**(July): 47-48.

Jones, J. A. T. 1997d. "New Steel Melting Technologies: Part XV, Fuchs Shaft Furnace." *Iron and Steelmaker* **24**(June): 43-45.

Jones, J.A.T., 1998. Acutus Gladwin, Personal Communication, August 8th, 1998.

Kleimt, B. and S. Koehle, 1997. "Power Consumption of Electric Arc Furnaces with Post-Combustion" *Metallurgical Plant & Technology International* 3: 56-57.

Kowalski, W., K-H. Peters, W. Cronert, P. Kuhn, and D. Sucker, 1990. "Optimierung der Brenner von Winderhitzern im Hinblick auf einen hohen CO-Ausbrand," *Stahl u. Eisen* 110(11): 41-50.

Lahita, J.A., 1995. "The Consteel® Process in Operation at New Jersey Steel Corporation" *Proceedings 5th European Electric Steel Congress*, Paris, June 19-23, 1995.

Luiten, E.E.M. and K. Blok. 2003. "Stimulating R&D of Industrial Energy-Efficient Technology; the Effect of Government Intervention on the Development of Strip Casting Technology," *Energy Policy* **31** pp.1339-1356.

Macauley, D. and R.M. Smailer, 1997. "Engineering Fundamentals for a Least Cost/Flexible Steelmaking Solution" Paper presented at 25th *Advanced Technology Symposium on New Melting Technologies*, St. Petersburg Beach, FL, May 11-14, 1997.

Mannesmann Demag. 1998. "Contiarc, The Revolutionary Electric Arc Melting Furnace." Brochure. Pittsburgh, PA: Mannesmann Demag Corporation.

Martin, N., E. Worrell, M. Ruth, L. Price, R.N. Elliott, A.M. Shipley, J. Thorne. 2000. "Emerging Energy-Efficient Industrial Technologies," Lawrence Berkeley National Laboratory/American Council for an Energy-Efficient Economy, Berkeley, CA/Washington, DC.

McAloon, T.P., 1994. "Alternate Ironmaking Update," *Iron & Steelmaker* **21**(2): 37-39 + 55.

Midrex, 1993. *The Midrex Direct Reduction Process*, Charlotte, NC: Midrex Direct Reduction Corporation.

Meijer, H.K.A., G.A. Flierman, C.P. Teerhuis, J.G. Bernard, and R. Boom, 1994. "The Cyclone Converter Furnace," *Proc. Ironmaking 2000, 18th Advanced Technology Symposium*, October, Myrtle Beach, SC, USA.

Meunier, H. and M. Cambier, 1993. "Use of Furnace Modeling to Improve Energy Efficiency in the Deepdrawing Steel Sheet Industry," P.A. Pilavachi (ed.), *Energy Efficiency in Process Technology*, Amsterdam: Elsevier Applied Science.

Mitsubishi Heavy Industries, 1993. *High Efficiency From Low BTU Gas, Outline of 145 MW Combined Cycle Power Plant for Kawasaki Steel Corporation, Chiba Works*, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Tokyo, Japan.

Mödlers, G., W. Reichelt, H. Vorwerk. 1997. "New Technologies For Electric Steelmaking." In *12th Aachener Stahl-Kolloquium, Proceedings*. Aachen, Germany.

Mueller, E.G., 1997. "High Production Meltshops: Trends and Innovations" Paper presented at *25th Advanced Technology Symposium on New Melting Technologies*, St. Petersburg Beach, FL, May 11-14, 1997.

Nashan, G., 1992. "Conventional Maintenance and the Renewal of Cokemaking Technology," In: IISI, Committee on Technology, *The Life of Coke Ovens and New Coking Processes under Development*, Brussels: IISI.

Nelson, K., 1994. "Finding and Implementing Projects that Reduce Waste," in: R. Socolow, C. Andrews, F. Berkhout and V. Thomas, *Industrial Ecology and Global Change*, Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Ninneman, P., 1997. "New Melt Shops and Rolling Mills" *New Steel* **13** (9): pp.40-58.

Opalka, W.A. 1999. "Direct Strip Casting Developments Quicken," *Iron and Steelmaker* **26**.

Oshnock, T.W., 1995a. "Pulverized Coal Injection for Blast Furnace Operation, Part IV," *Iron & Steelmaker* **22**(2): 41-42.

Oshnock, T.W., 1995b. "Pulverized Coal Injection for Blast Furnace Operation, Part VI," *Iron & Steelmaker* **22**(4): 49-50.

Palasios, J.M. and J.L. Arana, 1995. "Research and Development of the EAF in Europe" *Proceedings 5th European Electric Steel Congress*, Paris, June 19-23, 1995, pp.391-400.

Parodi, G.G., 1993. "Near Net Shape Casting of Flat Products," in: *Proceedings 27th Annual Meetings and Conference, International Iron and Steel Institute*, Paris, 3-6 October, Brussels, Belgium: IISI.

Pisila, E., S. Kallo, T. Ahalo, and K. Heinanen, 1995. "High Productivity Operation of Rautaruukki Blast Furnaces," *La Revue de Metallurgie-CIT* **92**(3): 375-380.

Reichelt, W. and W. Hofmann, 1996. "'Contiarc' - An Energy Optimised and Environmental Scrap Melting Process." In *Stahl und Eisen* 116 (5): 89-92 (in German).

Rengersen, J., Oosterhuis, E., de Boer, W.F., Veel, T.J.M. and Otto, J. 1995. "First Industrial Experience with Partial Waste Gas Recirculation in a Sinter Plant," *Revue de Metallurgie-CIT* **3 92** pp. 329-335 (1995).

Riley, M.F. and S.K. Sharma, 1987. "An Evaluation of the Technical and Economic Benefits of Submerged Inert Gas Stirring in an Electric Arc Furnace" *Iron & Steelmaker* **14**(6): 27-32.

Ritt, A., 1996a. "The Benefits of Hot-Charging Slabs," *New Steel* **12**(7): 34-37+44.

Ritt, A., 1996b. "Building More Powerful Melt Shops," *New Steel* **12**(11).

Ritt, A., 1997. "Acme Rolls 0.030 Inch Hot Band," *New Steel* **13**(5).

Roederer, C. and L. Gourtsoyannis, 1996. *Coordinated Study Steel-Environment*, Luxembourg: European Commission, DG-XII.

Schade, R.J., 1991. *Bottom Stirring in an Electric Arc Furnace*, Center for Metals Production, Pittsburgh, PA, February 1991.

Schorsch, L. L., 1996. "Why Minimills Give the U.S. Huge Advantages in Steel," *McKinsey Quarterly* **(2)**:44-55.

Schriefer, J., 1996. "Improving Quality by Better Process Control," *New Steel* **12**(4): 81-83.

Schriefer, J., 1997. "Reaping the Value from Dust and Slag," *New Steel* **13**(2): 24-33.

Schuett, K.J., and D.G. White, 1997. "Record Production on U.S. Steel Gary Works' No. 13 Blast Furnace with 450 Pounds/THM Co-Injection Rates," *Iron and Steelmaker*, **24**(3): 65-68.

Selines, Ron (Praxair, Inc.). 2000. Personal communication with Ernst Worrell. Tarrytown, NY. (914) 345-6467.

Serjeantson, R., R. Cordero and H. Cooke, 1987. *Iron and Steel Works of the World, 9th edition*, Worcester Park, UK: Metal Bulletin Books Ltd.

Staib, W.E. and N.G. Bliss, 1995. "Neural Network Control System for Electric Arc Furnaces" *Metallurgical Plant & Technology International* 2: 58-61.

Stelco, 1993. *Present and Future Use of Energy in the Canadian Steel Industry*, Ottawa, Canada: CANMET.

Stockmeyer, R., K-H. Heinen, H. Veuhoff, and H. Siegert, 1990. "Einsparung von elektrischer Energie am Lichtbogenofen durch eine neue Ausqualmregelung" *Stahl u. Eisen* **110**(12): 113-116.

Takano, H., Kitauchi, Y., and Hiura, H., 1989. Design for the 145 MW Blast Furnace Gas Firing Gas Turbine Combined Cycle Plant," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **111** (April): 218-224.

Takeuchi, O., T. Fukaya, K. Ishida, K. Yamada, T. Yamada, and H. Yoshida. 1995. "New Scrap Melting Furnace With Continuous Preheating System." *Iron and Steelmaker* 22 (4): 13-14.

Teoh, L.L., 1989. "Electric Arc Furnace Technology: Recent Developments and Future Trends" *Ironmaking and Steelmaking* **16**(5): 303-313.

Uemastu, H., 1989. "Control of Operation and Equipment Prevents Coke Oven Damage," *Ironmaking Conference Proceedings*, Warrendale, PA: Iron and Steel Society.

U.S. Department of Energy, Office of Industrial Technologies (U.S. DOE, OIT), 1996. *Energy and Environmental Profile of the U.S. Iron and Steel Industry*, Washington DC: U.S. DOE, OIT.

VAI, 1997. *FUCHS Shaft Furnaces, The Power, The Performance, The Profit*, Linz, Austria: Voest Alpine Industrieanlagenbau GmbH,

Valenti, M., 1998. "A Cradle for New Steel Technologies." In *Mechanical Engineering*. 120 (11): 60-64.

Vergote, H, 1996. "New Technologies in Process Control for Hot Strip Mills," *Iron & Steelmaker* **23**(2): 21-25.

Wakelin, D.H., 1997. Personal communication with David H. Wakelin, Manager of Development Engineering, LTV Cleveland Works, December 1.

Walli, R.A., 1991. *Adjustable Speed Drives for Electric Arc Furnace Air Pollution Control Systems*, Center for Metals Production, Pittsburgh, PA, December 1991.

Worrell, E., J.G. de Beer, and K. Blok, 1993. "Energy Conservation in the Iron and Steel Industry," in: P.A. Pilavachi (ed.), *Energy Efficiency in Process Technology*, Amsterdam: Elsevier Applied Science.

Worrell, E., L. K. Price and C. Galitsky. 2004. "Emerging Energy-Efficient Technologies in Industry: Case Studies of Selected Technologies." Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL-54828).

Worrell, E., 1995. "Advanced Technologies and Energy Efficiency in the Iron and Steel Industry in China," *Energy for Sustainable Development* **2**(4): 27-40

Worrell, E, J-W. Bode, and J. De Beer. 1997 *Analysing Research and technology Development Strategies: The 'ATLAS' Project, Energy Efficient Technologies in Industry*, Prepared for Directorate General XVII of the European Commission, Dept. of Science, Technology & Society, Utrecht University (Report 97001).

Worrell, E. and C. Moore, 1997. "Energy Efficiency and Advanced Technologies in the Iron and Steel Industry," in: *Proceedings 1997 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, Washington, DC: ACEEE.

Worrell, E., Price, L., Martin, N., Farla, J., Schaeffer, R., 1997a. "Energy Intensity in the Iron and Steel Industry: A Comparison of Physical and Economic Indicators," *Energy Policy* **25** (7-9): 727-744.

Worrell, E., Farla, J., Price, L., Martin, N., Schaeffer, R., 1997b. "International Energy Efficiency Comparisons and Policy Implications in the Iron and Steel Industry," *Proceedings of the 1997 European Council for an Energy Efficient Economy Summer Study*, ECEEE.

Worrell, E., J-W. Bode, and J. De Beer, 1997c. *Analysing Research and Technology Development Strategies: The 'ATLAS' Project, Energy Efficient Technologies in Industry*, Utrecht, The Netherlands: Dept. of Science, Technology & Society, Utrecht University.

Worrell, E., N. Martin, L. Price. 1999. *Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Iron and Steel Sector*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL-41724).