

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0025-05

先进钢铁生产流程进展及先进钢铁材料生产制造技术^①

干 勇, 仇圣桃

(钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要: 简要回顾了 20 世纪钢铁工业生产总量、钢材质量、劳动生产率、原料及能源消耗的状况, 介绍了氧气转炉炼钢、连续铸钢、炉外精炼及控冷控轧技术的特点及优势, 指出了钢铁工业发展所存在的环境污染严重、能源及资源循环使用率低、钢材服役周期短等问题, 描述了现代钢铁生产流程连续、高效、柔性、可控的发展特征。展望了 21 世纪先进钢铁生产流程中氢冶金、第 2 代薄板坯连铸连轧及铸-轧-材一体化等流程技术的实现。在此基础上, 简要介绍了先进钢铁材料的特征及生产制造技术进展。

关键词: 钢铁生产流程; 氢冶金; 薄板坯连铸连轧

Development of advanced steel production process and steel products manufacturing technology

GAN Yong, QIU Sheng-tao

(General Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The current status of iron and steel industry were summarily reviewed, i. e. gross production, quality, productivity, material and energy resources consumption. The characteristic and advantages of oxygen converter steelmaking, continuous casting, secondary refining, controlled rolling and controlled cooling were introduced. Several problems in iron and steel industry, such as environmental pollution, low cycle availability coefficient of energy resources and service time of steels were referred. The characteristics of up-to-date steel production process, i. e. continuous, high efficiency, flexible and controllable were described. Realization of the hydrogen metallurgy technology, secondary generation continuous thin-slab casting and rolling and integration of casting-rolling-product of the advanced steel production process in 21 century were prospected. Furthermore, the character of advanced steel products and the development of manufacturing technology were summarily recommended.

Key words: steel production process; hydrogen metallurgy technology; continuous thin-slab casting and rolling

钢铁工业属于资源、资金和科技密集型产业, 包括了地质、采矿、选矿、炼铁、炼钢、轧制和金属制品等系列工程, 是生产、经营、科技和经济的综合体。钢铁制造过程在消耗大量原材料和能源的同时, 也带动了机械、电力、化工、建材、交通、通讯、商业、文教、卫生、房地产和农副产品等部门和行业的发展^[1]。无论是在过去和现在, 还是在将来相当长的历史时期内, 钢铁工业的发展水平仍然是衡量一个国家工业化和现代化水平高低的重要标志之一^[2]。专家们估计^[3], 随着生产技术的不断发展, 钢铁产品应用的日趋广泛和深入, 世界钢材消

耗量仍将占全部金属的 95% 以上。铝、塑料等其它原材料在相当长的时期内将无法从根本上取代钢铁作为结构-功能材料的主导地位。本文在对 20 世纪钢铁工业生产流程发展概况进行回顾的基础上, 展望了 21 世纪钢铁生产流程及钢铁材料生产制造技术的进展。

1 20 世纪钢铁工业的现状和问题

1.1 20 世纪钢铁工业发展的业绩

20 世纪堪称为钢铁的世纪, 钢铁产品总量逐

① 作者简介: 干 勇(1948-), 男, 中国工程院院士。

通讯作者: 仇圣桃, 电话: 010-62183487; E-mail: qjust@CISRT.com.cn

年增加,产品质量逐年提高,产品种类趋于多元化。

从产量角度看,20世纪钢铁工业的发展大体分3个阶段^[4]。第1阶段是1901~1951年,钢产量以4.0%的年均速度增长,1951年世界钢产量达到2亿t,其中美国最为突出,其钢材产量占世界钢铁总量的45%;第2阶段是1952~1974年,钢产量以5.4%的年均速度增长,其中日本最为突出,在优化生产流程结构的基础上,年增长速率达到13.4%;第3阶段是从1975年至今,世界钢铁总量略有提高,但生产流程结构更加优化,先进产钢国和新兴工业国完成了钢铁生产从吨位扩张到生产流程结构优化的转移,一些发展中国家则加速了吨位提高。其中最为突出的是日本、韩国和中国。日本钢铁在产量增长的同时,依靠科技进步,加快生产流程结构优化的步伐;韩国钢铁则采用最新技术、装备,完成了产量的增长和先进生产流程的建设;而中国在低水平工艺装备基础上,完成了产能的扩张,成为世界第一产钢大国。

从技术角度看,伴随着钢铁生产总量的变迁,20世纪钢铁工业出现了两轮大规模的技术创新高潮^[5],在炼铁、炼钢、铸钢、轧钢、自动化、节能、环保等方面出现了众多新技术。钢铁生产流程技术也随之由第1代技术发展到第2代技术。即:以氧气顶吹转炉炼钢、连续铸钢、连续轧制为代表的第2代生产流程技术代替了以空气低吹转炉、酸性平炉、模铸为代表的第1代生产流程技术;和铁水预处理、炉外精炼、控制轧制、熔融还原、薄板坯连铸连轧等技术对第2代技术的完善及补充。

第2代技术的特点是以单体工艺及流程的创新为重点,主要包括^[6]:1) 氧气转炉炼钢技术。与平炉、空气低吹转炉相比,冶炼速度加快,品种进一步扩大,可进行负能炼钢,并与连铸工序相匹配,获得了很高的生产率和经济效益。其技术特点主要体现在:利用超音速氧枪喷吹纯 O_2 ,渣钢乳化效果加强;反应面积提高近1000倍,促进钢渣反应平衡。氧气转炉炼钢首创了钢铁工业高效化生产的途径,推动了冶炼生产设备的大型化、高效化和连续化。2) 连续铸钢技术。与传统的钢锭模铸法相比,可提高成材率8%~10%,节约能源8%~10%,使炼钢到轧制成材的工艺生产线连续化成为可能。其主要技术特点体现在:利用中间包-结晶器-二次冷却-拉矫机等生产设备,连续生产合格铸坯;采用结晶器振动和保护渣,改善了铸坯表面质量;采用二次冷却和电磁搅拌,提高了铸坯内部质量。连铸

技术的发展,不仅提高了钢铁成材率和生产效率,而且促进了钢铁生产从单元化、间断生产的模式向连续化方向发展。3) 多机架串列式的连续高速轧制技术,代替传统的并列式轧制工艺,特别是热轧宽带钢连续轧制的发展,使轧制过程实现了高效、高速、高精度化。

20世纪80~90年代,先进产钢国在第2代技术基础上,开发了2项带有系统性和综合性的技术,其特点是不再突出某个工艺、某个流程,主要包括:1) 为适应市场对钢的质量和洁净度的要求,发展了铁水预处理(包括废钢处理、铁水脱硫、脱磷、脱硅以及热送等)、炉外精炼(RH、LF、VD等大型真空精炼设备)等系统精炼技术,使得钢水中的S、P、O、H、N等有害元素含量降到了低限,钢液的洁净度达到 $S \leq 5 \times 10^{-6}$ 、 $P \leq 20 \times 10^{-6}$ 、 $N \leq 15 \times 10^{-6}$ 、 $H \leq 1.5 \times 10^{-6}$ 、 $TO \leq 10 \times 10^{-6}$ 、 $C \leq 10 \times 10^{-6}$ 水平。炉外精炼技术的主要特点体现在:创造最佳的热力学动力学条件;实现了分阶段冶炼、保证钢水纯洁度;采用真空精炼,提高脱C脱气速率;采用电弧加热,精确控制钢水温度;采用吹氩搅拌工艺,精确控制钢水成分。炉外精炼的发展,大幅度提高了钢水净化度,明显改善了产品的性能,为新一代钢铁材料的发展奠定了坚实的工艺基础。2) 为保证钢材高精度、高性能的要求,轧钢方面形成了一整套既控制形状(尺寸、表面)的高精度、又控制材质的高性能的控制轧制技术(包括在线检测控制、热处理、表面处理等)。控轧控冷技术的主要特点体现在:采用多机架连续轧制实现了一火成材,采用控轧控冷工艺可实现钢材组织、晶粒的控制,利用余热进行热处理简化了工艺流程。连轧与控轧工艺技术的发展,不仅大幅度提高了生产效率,实现“一火”成材,而且将离线热处理改变为在线余热热处理,提高了产品质量,降低了环境污染。

由上述总结可见,20世纪钢铁工业诞生的氧气转炉炼钢、炉外精炼、连续铸钢、控冷控轧技术具有划时代的意义,奠定了现代钢铁生产流程连续、高效、柔性、可控特征的基础,充分证明技术创新是钢铁工业进展的灵魂,技术革命是推动钢铁生产工艺发展进步的核心动力。

1.2 20世纪钢铁工业发展存在的主要问题

回顾20世纪,钢铁工业取得了辉煌的业绩,生产面貌焕然一新。但是,20世纪的钢铁工业同时存在环境污染严重,资源、能源循环使用率低,生产

流程长、投资大、成本高等问题。与 21 世纪钢铁工业与环境友好、资源循环、性能极限的特征存在很大差距,具体表现在如下几个方面。

1) 环境方面。钢铁生产流程所排放的 CO₂ 引起的温室效应、二恶英对环境的破坏、废弃物对环境的污染,造成人类生存环境的恶化。钢铁生产流程资源、能源及废弃物排放情况见表 1 所示。

2) 资源、能源方面。钢铁生产流程所用资源、能源循环使用率低,即便是使用率高的高炉,其煤气综合利用率也仅为 90%,而循环利用率仅为 30%,见表 2 所示。

3) 生产流程方面。随着生产过程中成分、氧势和温度的变化,使得传统生产流程超长化,进而使流程投资大型化,生产成本提高。

2 21 世纪先进钢铁生产流程

2.1 氢冶金技术

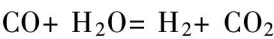
2.1.1 氢气用于铁矿粉还原的可行性

众所周知,由于氢原子体积小,对铁氧化物具有良好的还原反应动力学条件。在铁氧化物的气-固还原反应过程中,大幅度提高气体还原剂中氢气的比例,可以明显提高其还原速率。从热力学角度分析,在一定温度条件下(大于 810 ℃),用氢气还原铁氧化物所对应的 H₂ 的平衡含量比用 CO 还原时所对应的 CO 的平衡含量低,这意味着用氢气还原时可以降低还原剂的使用量,从而减少化学能的消耗。同时,氢气还原铁氧化物的主要反应产物为金属铁和水蒸汽,而水蒸汽是目前最容易实现气-固分离的气体种类(降温脱水)。还原后的尾气对环境没有破坏作用,可显著减轻环境的负荷。

2.1.2 氢气的来源

根据理论计算,在一定温度下,氢气还原铁矿

石生产 1 t 铁的消耗量大约为 550 m³。这部分氢气体量可通过煤气所含的 CO 进行水煤气变换获得。煤气中含大量 CO 气体(根据需要其成分可调),在有催化剂的条件下,可以完成以下反应:



上式中的气体产物经过变压吸附或其他处理方式(富碳),可以脱除其中的 CO₂,大量得到本工艺所需要的氢气。

2.1.3 氢冶金应用技术研究

研究背景:采用氢还原炼铁工艺后固体料比例增加;氢还原炼铁工艺后生产的铁纯度很高;还原后的球团还含有大量的氧化物如五氧化二磷、氧化硅等,易污染钢水;熔池不需要脱 C 条件下, N、O、H 等气体夹杂如何控制。

1) 超纯冶炼技术

研究内容:以高纯海绵铁为主要原料进行熔炼;采用弱氧化工艺严格控制海绵铁中硅、锰、磷等元素对钢水的污染;低氧气氛下脱氧与夹杂物控制;中低碱度炉渣综合利用;防止钢水污染吸氢吸氮的反应热力学、动力学。

技术特点:超纯、无氧化、密封处理。

研究目标:生产深冲性好、韧性高、耐蚀性优良的中低强度钢材。

2) 超纯净钢多功能炼钢技术

研究内容:高纯海绵铁与废钢混合物熔化过程高效脱 P 动力学、热力学;高纯海绵铁与废钢混合物熔化过程夹杂物去除机理;高纯海绵铁废钢混合物高温快速熔化与传热行为;高纯钢水微量元素(C、S、P、Si、Mn 等)作用的基础。

技术特点:炉料多元化,以氢还原铁、废钢和铁浴炉铁水 3 种炉料为基础;固体料比重提高,达到 50% 以上;全部炉料进行高温预热,连续加热,间断出钢;以配料熔化为主,采用少渣冶炼;生产

表 1 传统流程资源、能源及废弃物排放情况

消耗量/亿 t				排放量/万 t							
原矿	铁精矿	洗精矿	新水	CO ₂	SO _x	NO _x	未回收尘泥	烟尘	工业粉尘	废渣	废渣矿
3.75	2	1	43.76	34 600	112.4	97.7	106.4	25.84	60.8	12 000	22 800

表 2 高炉系统热平衡计算

项目	热量输入				热量输出					
	氢氧化放热	热风带入热	碳素氧化放热	其他热	炉顶煤气显热	热损失	氧化物分解	喷吹物分解	铁水显热	炉渣显热
热量/GJ	0.319	2.68	10.68	0.067	0.604	0.94	9.26	0.534	1.64	0.76
所占比例/%	2.32	19.49	77.70	0.49	4.39	6.86	67.38	3.88	11.94	5.55

成本最低。

目标: 生产中、高强度钢材。

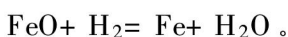
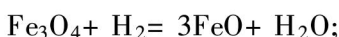
3) 无氧化加热技术

技术特征: 用氢气做燃料; 采用高温空气蓄热式燃烧技术; 燃烧产物为水蒸汽, 无 CO_2 生成; 燃烧产物经脱水处理后返回炉内(主要为氮气), 用来冲淡助燃空气中氧的含量。

消耗估算: 加热目标温度为 $1\,250\text{ }^\circ\text{C}$, 冷钢坯, 消耗氢气 $220\text{ m}^3/\text{t}$; $500\text{ }^\circ\text{C}$, 消耗氢气 $95\text{ m}^3/\text{t}$; $800\text{ }^\circ\text{C}$, 消耗氢气 $70\text{ m}^3/\text{t}$ 。

4) H_2 还原除磷技术

氢还原原理:



膜厚比例: $\text{FeO}:\text{Fe}_3\text{O}_4:\text{Fe}_2\text{O}_4 = 95:4:1$

1 t 钢带还原除磷理论耗 H_2 为 $0.707\,6\text{ kg}$ 或 7.85 m^3 。

20 世纪是氧气的时代, 伴随着大规模工业化制氧技术的成熟, 开创了冶金工业大量使用纯氧的新时代。纯氧的使用显著提高了生产效率, 改善了钢水质量, 成为推动钢铁工业技术进步的主要基石。21 世纪是氢气的时代, H_2 还原高纯铁将带动炼钢、连铸、轧钢工艺的技术革命, 形成 21 世纪钢铁生产新流程, 可生产出高纯度、高强韧性和高耐蚀性的新一代钢铁材料。

2.2 第 2 代薄板坯连铸连轧技术

20 世纪薄板坯连铸连轧的技术特征主要体现在 3 个方面: 一是降低成本, 与传统板带生产相比, 吨钢成本降低 60 美元; 二是生产品种主要以低档的普碳钢和低合金钢为主, 在高品质板如汽车板、石油管线钢、硅钢、不锈钢等领域尚未形成工业化生产技术, 更无法与传统流程相比; 三是产量较低, 一般双流薄板坯连铸生产线年生产能力为 $160\sim 200\text{ 万 t}$ 。

第 2 代薄板坯连铸连轧生产线的技术特征和发展趋势主要体现在如下 4 方面: 1) 在生产品种方面, 改变以碳素钢、优质碳素结构钢、低合金钢为主的品种结构, 生产更高档次的产品, 如: 汽车用钢、石油管线钢、电工钢、不锈钢等; 2) 在生产能力方面, 改变薄板坯连铸单流年产量 $80\sim 100\text{ 万 t}$

的现状, 将薄板坯连铸单流年产量提高到 $100\sim 150\text{ 万 t}$, 实现连铸工序与轧制工序的能力匹配; 3) 在产品规格方面, 最终产品薄规格比率逐步提高, 实现了最终产品的超薄规格化, 如规格达到 1 mm 以下的热轧板带, 使高品质钢成本进一步降低; 4) 在产品性能方面, 通过洁净钢冶炼、高速连铸、高温直轧等技术的采用, 实现最终产品组织性能的优化。

第 2 代薄板坯连铸连轧生产技术的特征和发展趋势是薄板坯连铸连轧技术向更高领域发展的必然, 它预示着该项技术将成为 21 世纪冶金工艺流程发展的主流。

2.3 铸-轧-材一体化(CRM-Tech)技术

在 20 世纪连续和高精度技术基础上, 21 世纪的钢铁生产流程将由独立、断续的铸、轧和材料热处理 3 工序演变成相互交叉、相互融合的铸-轧-材一体化新流程。

铸-轧-材一体化生产模式设计如表 3 所示。

表 3 铸-轧-材一体化生产模式设计

连铸区	衔接区	连轧区
近终产品连铸, 近终形状, 近终品质铸坯, 高速连铸	绿色衔接, 带液芯重压下, 高温热送	多功能连轧, 小压缩比连轧, 直接轧制, 控轧控冷
凝固组织控制	组织控制	(形变+ 相变) 组织

近终产品铸坯的生产技术的内涵包括: 与最终产品形状相近的铸坯生产技术; 与最终产品品质相近的铸坯生产技术; 接近最终产品铸坯的高速生产技术。

近终产品连铸与轧制工艺的有效衔接的内涵包括: 铸坯形状与成品形状最小加工量轧制的衔接; 铸坯品质与成品品质轧制的有效衔接; 铸机速度与轧制速度的匹配衔接。

虚拟轧钢技术的内涵包括: 模拟轧制生产线物流、信息流在生产过程中的运行、管理与控制; 模拟轧件组织性能演变; 模拟轧辊形状与轧件尺寸精度的变化; 轧制生产装备(机、电、液)的虚拟运行。

组织性能预报技术的内涵包括: 在线和离线过程仿真; 评估不同的生产线设备配置效果及生产线设计; 预报板材的温度、变形、组织演变和力学性能; 设计新钢种和新工艺; 通过优化工艺使低档次钢种达到同样的性能要求; 进行流程产品的质量控

制。

3 先进钢铁材料生产技术

3.1 先进钢铁材料的技术发展特征

先进钢铁材料的技术发展特征主要体现在 4 个方面, 即: 高质量、高性能、环境性、低成本, 如表 4 所示。

表 4 先进钢铁材料技术特征

高质量	高性能	环境性	低成本
高洁净度, 高均匀度, 超细晶粒, 高尺寸精度, 高表面质量	力学性能: 强度和韧性; 服役性能: 疲劳、延迟断裂、腐蚀蠕变; 工艺性能: 冷热加工	生产、加工、应用稳定和 经济地回收 利用	生产、加工、应用过程中 成本低

3.2 先进钢铁材料技术的基本要求

- 1) 精确的化学成分控制。结合钢种要求, 其成分控制在如下范围: 齿轮钢, 淬透性带< 4HRC; 轴承钢 (GCr15 型), 0. 96% ~ 0. 98% C、1. 3% ~ 1. 5% Cr; 高速钢, ΔC ≤ 0. 04%; 碳素结构钢, S70C; 可切削结构钢, 0. 025% ~ 0. 040% S。
- 2) 高洁净度。钢中的氧含量: 轴承钢(5~ 8) × 10⁻⁶; 齿轮钢 ≤ 15 × 10⁻⁶; 弹簧钢 (10~ 15) × 10⁻⁶; 模具钢 ≤ 10 × 10⁻⁶。
- 3) 高均匀性。以减小元素偏析为目标的高等轴晶率铸坯的生产。
- 4) 高尺寸精度和表面质量。热轧棒材尺寸公差为 ±0.01 mm; 热轧不锈钢板材厚度公差为

±0.05 mm; 冷轧 不 锈 钢 薄 板 厚 度 公 差 达 ±0.03 mm; 冷轧不锈钢板形达 10⁻¹² I。

4 结束语

回顾 20 世纪, 钢铁工业取得了巨大的进步和成就, 展望 21 世纪, 高质量、高性能、低成本、环保性将是先进钢铁材料发展的特征; 氢冶金流程将有可能代替氧冶金流程而成为钢铁工业生产的主要工艺流程; 包括近终产品高速连铸、柔性高效连轧、在线连续可控热处理和组织性能预报技术在内的铸-轧-材一体化技术(包括第 2 代薄板坯连铸连轧技术)将是钢铁生产流程的发展主流方向。

参考文献

[1] 柯 俊. 当代中国钢铁工业[M]. 北京: 当代中国出版社, 1996.

[2] 楼辉映. 钢铁经济学[M]. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 1999. 14 ~ 16.

[3] 卡互纳 L. 钢铁工业技术开发指南[M]. 韩静涛, 王福明译. 北京: 科学出版社, 2000.

[4] 国际钢铁协会. 钢铁统计年鉴[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.

[5] 张传信, 刘本仁. 中国钢铁工业技术创新战略[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.

[6] 国家冶金局. 中国钢铁工业技术进步与结构调整方向战略[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000. 4.

[7] 干 勇. 连续铸钢前沿技术的工程化[J]. 中国工程科学, 2002, 13(2): 12 ~ 18.

(编辑 袁赛前)