

连续铸钢在钢铁生产流程中的作用及 现代连铸技术简介

千勇*, 唐红伟, 仇圣桃**

中国钢研科技集团公司, 北京 100081

* E-mail: gany@cisti.com.cn

** E-mail: qiust@vip.sina.com

收稿日期: 2008-08-01; 接受日期: 2008-08-20

摘要 阐述了连铸在钢铁流程中的重要作用, 回顾了连铸技术在我国发展的曲折历程, 扼要介绍了我国高效连铸系统技术、薄板坯连铸的技术进步, 展望了连铸技术的发展方向.

关键词

连铸

高效连铸

薄板坯连铸

20 世纪, 钢铁工业发展迅猛, 生产面貌焕然一新, 钢铁产量迅速增长, 产品品质大幅提升, 生产效率显著提高, 生产成本明显降低, 环境污染得到有效控制. 究其本质因素, 核心推动力来自钢铁行业的技术进步, 即: 以氧气转炉炼钢、炉外精炼、连续铸钢、连轧与控轧控冷为核心的 4 项技术革新带动的钢铁生产流程的技术进步. 作为 4 项重大技术革新之一的连铸技术彻底改变了炼钢生产的流程和物流控制, 使得单元化、间隙式炼钢生产模式转变为连续化、大型化、专业化、优质化、高效生产模式, 同时推动了冶炼、精炼和轧制工序的技术革新. 本文将 对连铸在钢铁生产流程中的作用及连铸在我国的发展历程、现代连铸技术的典型代表—高效连铸、薄板坯连铸作简要介绍.

1 连铸在钢铁生产流程中的作用及其在我国的发展历程

1.1 连铸在钢铁生产流程中的作用

钢液成形的方法有两种: 模铸法和连铸法, 如图 1 所示. 模铸是将高温钢液浇注到一个或多个钢锭模内使之凝固成形的办法, 是钢液凝固成形的根本办法, 其典型特征是生产过程的间断化; 连铸是将高温钢液连续地浇注到一个或多个强制水冷的金属型腔内. 凝固成形后, 再经二次冷却, 使之凝固, 且成一定形状(规格)铸坯的工艺办法, 其典型特征是生产过程的连续化.

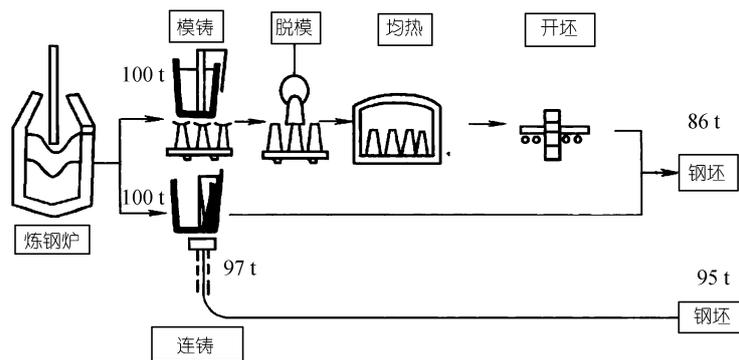


图 1 模铸-初轧与连铸的工艺流程对比^[4]

与模铸-初轧开坯工艺相比,连铸工艺具有如下特点.

- 1) 简化了铸坯生产的工艺流程,省去了模铸工艺的脱模、整模、钢锭均热和开坯工序.使单元化、间断式生产转变为连续化、大型化、高效生产.
- 2) 优化了生产流程,实现连续化、紧凑化,由经验控制改变为全流程恒温、恒速的精确控制,生产效率显著提高,铸机产能释放的同时,轧钢综合成材率提高约 12.5%.
- 3) 促进了冶炼、精炼、轧制工序的技术革新.
- 4) 生产流程基建投资可节省 40%,操作费用可节省 40%,能量消耗降低 1/4~1/2(相当于节约重油 10~30 kg·t⁻¹坯).吨钢占地面积由 2.02 m²/t 降到 1.0 m²/t 以下(例如:首钢曹妃甸吨钢占地面积为 0.7 m²/t,马钢新区吨钢占地面积为 0.6 m²/t,珠钢 CSP 称为最袖珍的钢厂 0.45 m²/t).
- 5) 提高了生产过程的机械化、自动化水平,为劳动生产率提高创造了有利条件,并可进行企业的现代化管理升级,流程生产管理趋于科学化、合理化.

1.2 连铸在我国的发展历程

连铸在我国的发展经历了曲折的发展过程,大致可以分为研究开发、缓慢发展、规模建设、跨越发展四个阶段.

1) 研究开发阶段(1954 年~1967 年).原冶金部钢铁研究总院、上海交大、重庆钢铁厂等单位开始了连铸的试验研究,研究与实验内容包括:连铸结晶器振动、二冷、拉矫机、直流变速、液压切割等关键设备;机型设计包括:水平、倾斜、弧形、立弯、立直等;铸坯断面包括:方坯(60 mm×60 mm~250 mm×250 mm)、矩形坯(130 mm~180 mm×160 mm~280 mm)、板坯(110 mm~250 mm×550 mm~2000 mm).值得一提的是 1964 年重钢三厂弧形板坯连铸机投产,比号称世界第一台弧形连铸机的德国迪林根钢厂弧形铸机还早一个星期!可以肯定 20 世纪 60 年代初期与中期我国连铸技术的研发与生产取得了与世界同步的成绩.

2) 缓慢发展阶段.即文革阶段.连铸技术的完善与发展在我国处于停滞状态,直至 1980 年我国连铸比稍见增长,1982 年全国连铸比为:7.6%,连铸坯产量 275 万吨.此外,我国平炉慢节奏生产客观上阻碍了连铸的发展,15 年的徘徊不前,使我国连铸生产大大落后于欧、日等发达国家,连铸比仅为与日本连铸比的十几分之一.

3) 规模建设阶段(1983年~1989年). 1983年全国炼钢工作会议上, 原冶金部钢铁司明确提出加快发展连铸技术和连铸生产的任务. 组织了对西马克—康卡斯特引进的板坯连铸机的消化吸收和对上钢一厂国产板坯连铸机的联合攻关工作, 1985年, 武钢二炼钢成为我国第一个全连铸炼钢厂. 1988年原冶金工业部召开了第一次全国连铸工作会议, 总结了三十年来连铸发展的经验和教训, 第一次提出了“以连铸为中心, 炼钢为基础, 设备为保证”的连铸生产技术方针. 1988年和1989年, 在连铸机建设速度增加的同时, 连铸比上年增长达到1.6个百分点, 年增铸坯超过110万吨. 增强了全行业加快发展连铸的信心.

4) 跨越发展阶段(1990年至今). 在实现全连铸生产和炼钢—炉外处理—连铸“三位一体”组合优化等技术目标的引领下, 我国连铸取得了长足进步, 连铸成为我国钢铁生产突破模铸生产“瓶颈”, 加快淘汰平炉, 促进高炉、转炉高效长寿, 实现流程优化和跨越式发展的关键因素. 1990年, 我国连铸比为25.07%; 1993年后, 我国连铸坯的年增长量超过产钢的年增长量; 1996年我国连铸比首次突破50%; 2001年连铸比达88.2%, 首次超过了世界平均连铸比86.8%的水平. 截至2007年底, 我国现有铸机996台2906流, 铸机产能达到5.0亿吨以上, 连铸比稳定保持在95%以上. 基本确立了我国在连铸生产第一大国的领先地位. 与此同时, 高效连铸技术的自主开发与薄板坯连铸连轧技术消化与创新也取得了可喜成绩.

2 现代连铸技术简介

2.1 高效连铸技术

高效连铸技术的内涵是: 以高拉速为核心, 以高质量、无缺陷铸坯生产为基础, 实现高连浇率、高作业率的系统生产技术. 其核心技术包括: 高效结晶器技术、电磁连铸技术、振动优化技术、带液芯压下技术、二冷动态控制技术、连续弯曲与矫直技术等等. 高效连铸与传统连铸的技术指标对比如表1所示. 高效连铸的应用, 获得了铸机产能提高一倍以上, 品种覆盖几乎所有钢种的冶金效果.

表1 高效连铸与传统连铸的技术指标的对比

技术参数	高效连铸	传统连铸	备注
拉坯速度/m·(min) ⁻¹	~4.2	1.8~2.3	120×120 mm ²
	~3.0	1.5~1.8	150×150 mm ²
	~1.8	0.8~1.0	厚度≥180 mm
连铸机作业率	≥90%	~70%	
连铸坯无缺陷率	≥95%	~80%	普碳、低合金

1) 高效结晶器技术. 高效结晶器技术是当今连铸技术优化发展的核心技术之一. 其目标是: 提高结晶器内热流密度, 增加坯壳凝固厚度; 改善结晶器传热均匀性, 均匀凝固坯壳; 均匀内壁与铸坯表面的摩擦, 提高结晶器铜板(管)的寿命. 以方坯连铸连续锥度结晶器技术为例, 通过优化结晶器铜管内腔锥度, 实现了强化初生凝壳在结晶器内边、角部位的传热, 均匀纵断面方向热流分布的目标, 如图2所示.

2) 电磁连铸技术. 电磁技术在连铸工艺中有着广泛的应用, 概括地讲可以分为如下几个

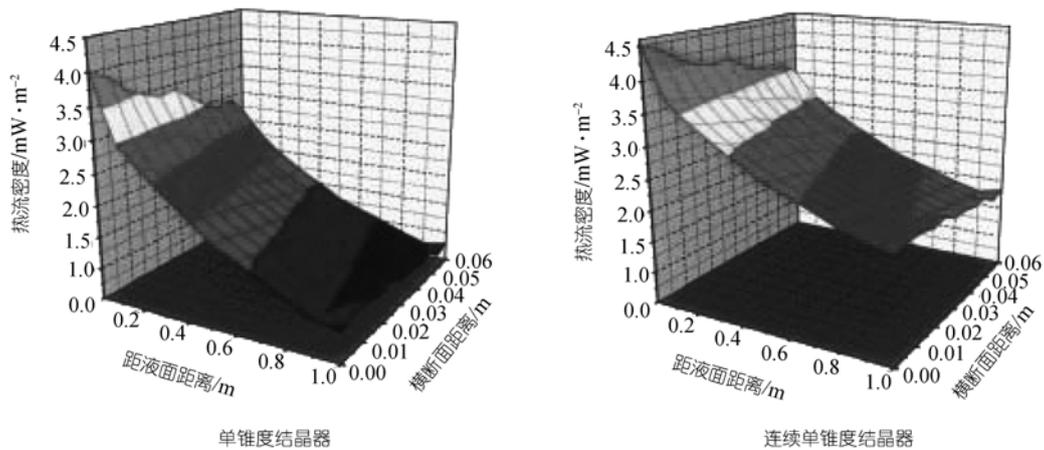


图 2 连续锥度结晶器与传统单锥度结晶器的热流分布

方面: ①电磁力学特性的利用, 如注流约束、电磁制动、电磁搅拌、电磁软接触等; ②电磁热特性的利用, 如中间包感应加热等; ③电磁物理特性的利用, 如电磁下渣检测、液面检测等. 已被用于工业生产的电磁冶金技术主要是电磁制动和电磁搅拌技术. 以电磁制动为例, 通过改变结晶器内的钢液流动, 进而改变结晶器的传热和铸坯内的溶质分布, 以改善连铸坯的凝固组织. 与常规连铸相比, 电磁制动能够降低结晶器内钢液向下冲击的深度, 促进凝固前沿非金属夹杂物的上浮, 稳定弯月面的波动, 促进保护渣的均匀分布. 如图 3 所示.

电磁制动的作用包括: 当拉速处在高拉速的情况下, 其作用力可以让板坯外壳充分冷却, 使得漏钢概率降低; 当拉速变化时达到稳定拉速的作用, 从而达到抑制结晶器液位波动、减少钢水偏析、提高板坯质量的作用.

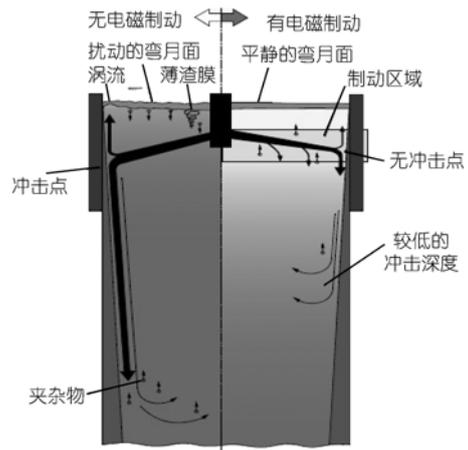


图 3 电磁制动的原理图^[2]

3) 结晶器振动优化技术. 其核心是实现结晶器的非正弦振动, 通常指与正弦振动相对应、具有一定偏斜的波形, 如图 4 所示.

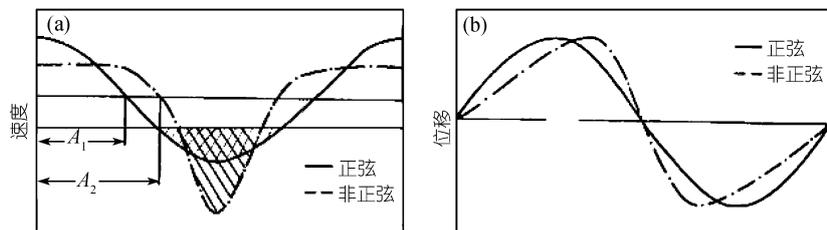


图 4 结晶器正弦振动与非正弦振动波形

(a) 振动速度曲线; (b) 振动位移曲线

结晶器非正弦振动与正弦振动相比其具有如下特点: 结晶器上升时间长且速度平缓, 可减少初生坯壳所承受的拉伸应力; 结晶器下降时间短且速度快, 对初生坯壳施加了压应力, 有利于脱模; 负滑动时间明显减少, 可减少振痕深度, 提高铸坯表面质量, 如图 5 所示。

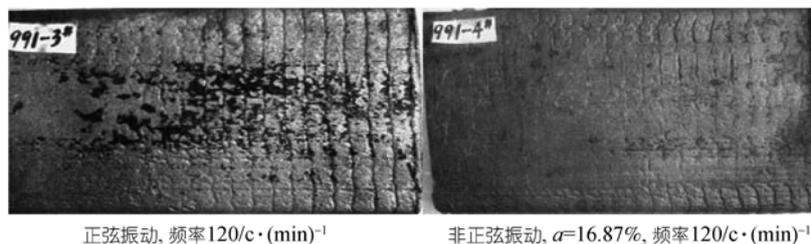


图 5 正弦振动与非正弦振动铸坯表面的比较

4) 带液芯压下技术. 带液芯压下是融浇注凝固与塑性变形、连铸与轧制一体的新工艺技术. 具体形式有辊式轻压下技术和锻压式轻压下技术, 典型辊式轻压下工艺过程仿真如图 6 所示。

带液芯压下的主要作用概括为如下四方面: 在连铸坯的凝固末端进行适量压下, 以减小铸坯中心宏观偏析及疏松, 改善铸坯质量; 在结晶器下方进行压下, 以扩大结晶器容积, 利于稳定薄板坯连铸结晶器内钢液面, 促进钢中夹杂的上浮; 提高薄板坯连铸保护渣的润滑效果, 改善铸坯表面质量; 可以灵活地改变铸坯厚度, 增加产品规格范围, 使生产组织具有更大的灵活性。

2.2 薄板坯连铸连轧技术

薄板坯连铸连轧技术开发初衷体现在如下三方面: 最大限度地减少加工工序; 最大限度地节能; 最大限度地使薄板坯温度均匀. 在大约 240 m 空间跨度和 3 h 时间跨度内, 实现了从冶炼到热轧薄板卷成品的冶金过程, 典型薄板坯连铸连轧工艺流程如图 7 所示。

与传统板坯连铸工艺相比, 薄板坯连铸连轧具有如下特点^[4]:

- 1) 工艺简化, 设备简单, 生产线缩短: 薄板坯连铸连轧省去了粗轧和部分精轧机架, 生产线一般仅 200 余米, 降低了单位基建造价, 缩短了施工周期, 可较快地投产并发挥投资效益;
- 2) 生产周期短: 从冶炼钢液至热轧板卷输出, 仅需 1.5 h, 可节约流动资金, 降低生产成本, 企业可很快取得较好的经济效益;
- 3) 节约能源, 提高成材率: 由于实现了连铸连轧, 可直接节能 $66 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 材、间接节能 $145 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 材, 成材率约提高 11%~13%。

薄板坯连铸连轧工艺技术的关键是薄板坯连铸, 而结晶器又是薄板坯连铸的技术核心. 多种薄板坯连铸结晶器的成功开发, 使得无缺陷薄板坯高速连铸技术得以实现. 我国是薄板坯连铸技术开发较早的国家之一, 在薄板坯连铸结晶器、浸入式水口、保护渣三大核心技术方面取得了重大突破. 开发了双弧形、椭圆形及锥形内腔曲面薄板坯连铸结晶器(如图 8 所示), 并用于工业生产。

薄板坯连铸连轧技术自 1989 年实现工业化以来, 在世界范围内得到广泛应用. 截至 2007 年底, 世界各国薄板坯应用概况如表 2 所示。

目前,我国已经成为薄板坯连铸连轧的大国和强国,具体体现在品种方面,在普遍实现了冷轧基料(CQ, DQ, DDQ, EDDQ)的生产,钢研院、包钢、珠钢开发了 Nb 微合金化生产技术,批量

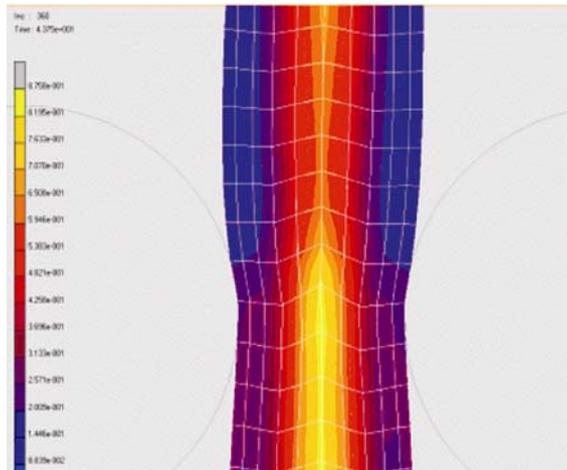


图 6 带液芯压下过程典型计算结果^[3]

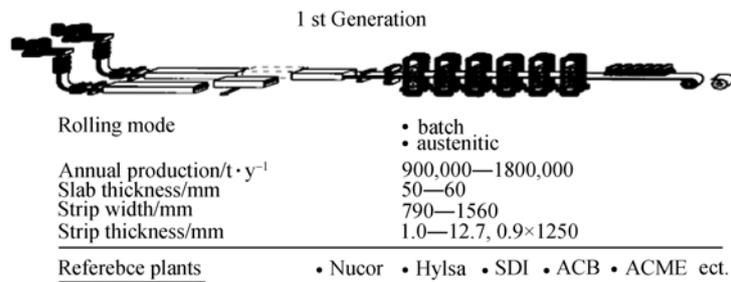


图 7 典型薄板坯连铸连轧工艺流程

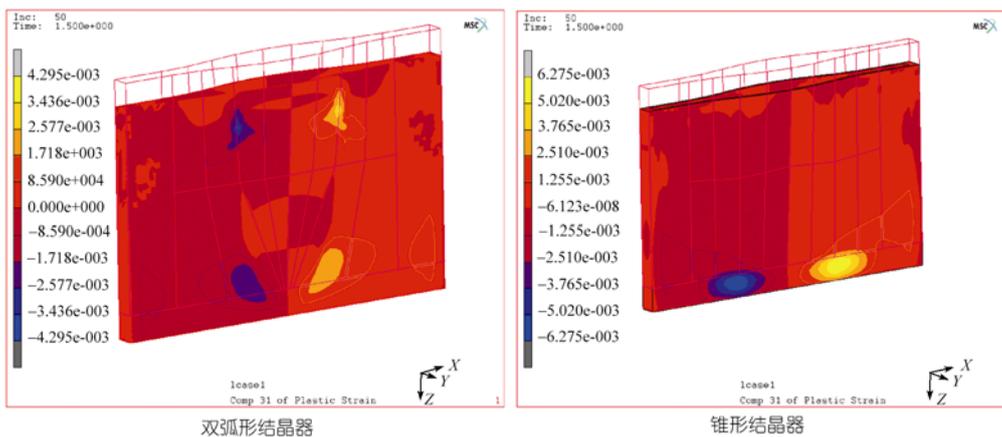


图 8 结晶器内曲面坯壳剪切应变^[5]

表 2 薄板坯连铸连轧生产线建设状况及生产能力^{a)}

国家	生产线								年生产能力/万吨	铸机流数
	CSP	ISP	FTSR	QSP	CONROLL	TSP	其它	合计		
美国	8			2	1	2		13	1962.5	18
德国	1							1	240	2
意大利	2	1						3	280	3
韩国	1	2						3	600	6
中国	7		3					3	3280	28
其它	10	4	3	1	3			21	2830	29
总计	29	7	6	3	4	2	3	54	9192.5	86

a) 中国未记入唐山国丰 ZSP 生产线; 以前的统计中含有台湾烨联的生产线, 据了解该生产线未建。

生产 Nb 微合金化管线钢、汽车冲压用钢和船板钢; 珠钢成功地利用 V-N 微合金化技术开发出了 550 MPa 级钢, 利用 Ti 微合金化达到 700 MPa 级; 马钢实现了无取向电工钢的工业化生产, 同时创造了众多世界领先; 珠江钢厂薄板坯连铸连轧高质量、超薄热轧钢板所占比例已达世界第一; 唐钢 FTSC 生产线具备了年产 300 万吨的能力; 唐钢和涟钢进行了半无头轧制工艺的开发。

3 连铸技术发展展望

在生产能力方面: 随着电磁组合结晶器、非正弦振动、轻压下、凝固动态控制技术的工业化, 板坯连铸机产量达到 200 万吨/流·年, 方坯连铸机产量达到 40 万吨/流·年, 形成单台铸机对单台连轧机的生产流程。

在品种结构方面: 随着电磁技术及凝固控制技术的应用, 连铸品种将有望实现品种的 100%, 而且实现组织控制、内部及表面质量控制, 达到全无缺陷坯高效生产。

在电磁连铸方面: 随着超导技术的发展, 用于浇注钢的电磁约束结晶器、电磁激震装置的工业化将成为可能, 在此基础上, 将有望开发无模、无振动、断面形状可任意组合的连铸机。

4 结束语

二十一世纪, 钢铁工业正朝着环境友好、资源循环、性能极限、高效生产方向发展, 其核心推动力来自钢铁行业技术的创新和集成, 即: 连续、紧凑、快节奏的高效生产工艺技术; 高洁净、高强度、高性能、长寿命的材料设计与加工技术以及高效能源转换与资源利用技术。不断提高生产效率、改善产品品质、节能降耗的连铸本质特征将继续促进钢铁生产朝着更加低耗、优质、高效、清洁生产的方向优化。连铸仍然是当今最活跃、最具战略影响力的钢铁科技创新点。

参考文献

- 1 蔡开科, 程士富. 连续铸钢原理与工艺. 北京: 冶金工业出版社, 1994
- 2 干勇, 仇圣桃, 萧泽强. 连续铸钢过程数学物理模拟. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- 3 陈栋梁. 薄板坯连铸过程轻压下机理研究. 博士学位论文. 北京: 钢铁研究总院, 1997
- 4 田乃媛. 薄板坯连铸连轧. 北京: 冶金工业出版社, 1998
- 5 张慧. 薄板坯连铸漏斗型结晶器热行为及铸坯纵裂纹形成机理. 博士学位论文. 北京: 钢铁研究总院, 2006