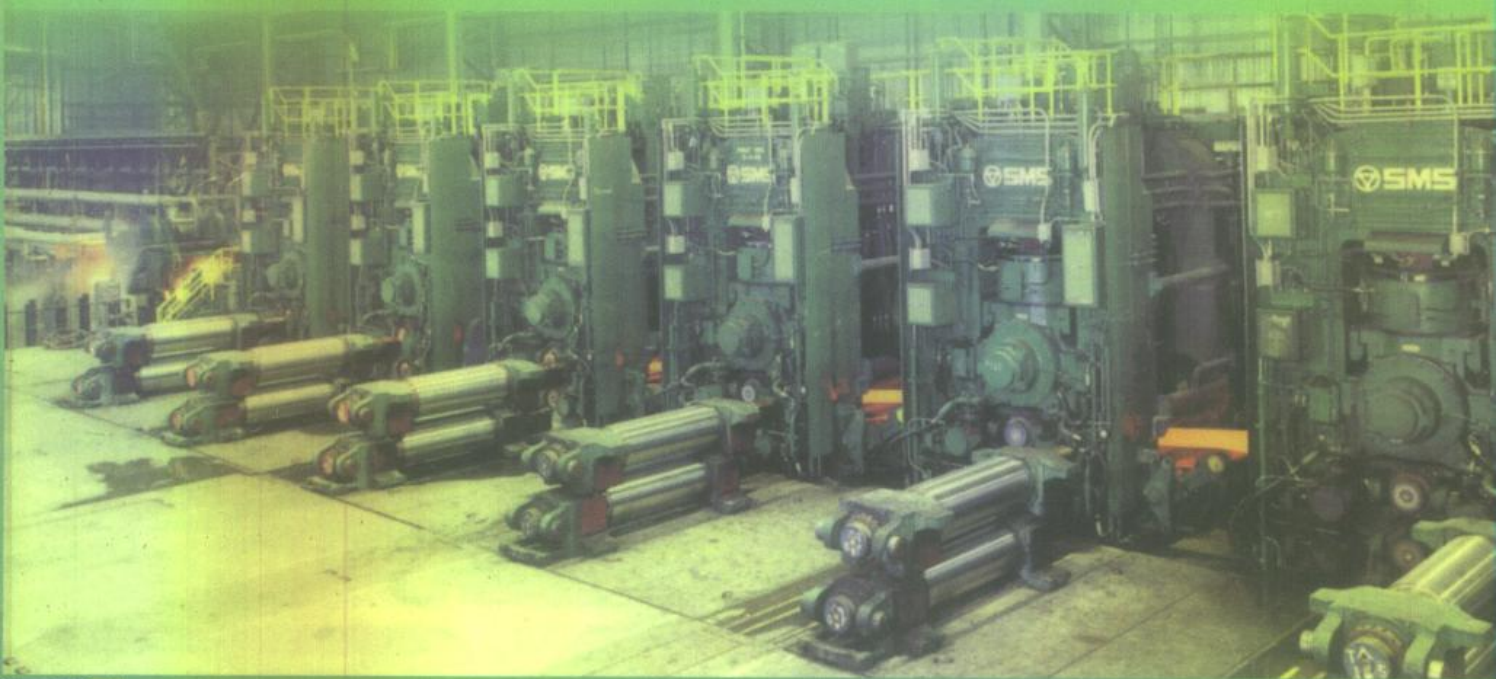


薄板坯 连铸连轧

田乃媛 编著



BAOBANPI LIANZHU LIANZHA

冶金工业出版社

薄板坯连铸连轧

田乃媛 编著

北 京
冶金工业出版社
1998

内 容 提 要

本书共分 8 章,包括薄板坯连铸连轧工艺,薄板连铸坯的轧制,薄板坯连铸连轧工艺的产品现状及质量分析,薄板坯连铸连轧工艺的相关技术,薄板坯连铸连轧生产线上的炼钢设备,薄板坯连铸连轧工艺的工程分析,薄板坯连铸连轧技术的工程投资问题等内容。书中详细论述了薄板坯连铸连轧工艺中的关键技术;全面介绍了 CSP、ISP、FTSRQ、CONROLL、TSP、CPR、Sumitomo 等工艺的特点和现状,我国兰州钢厂的薄板坯连轧机的概况,以及与流程相关的技术。

本书可供与薄板坯连铸连轧技术相关的管理、科研、设计及教学人员学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

薄板坯连铸连轧/田乃媛编著. —北京:冶金工业出版社,1998.7

ISBN 7-5024-2237-4

I. 薄… II. 田… III. ①连续铸钢,薄板坯②连续轧制:薄板轧制 IV. ①TF777.7②TG335.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 14677 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑:刘小峰 美术编辑:李 心 责任校对:白 迅

北京新兴胶印厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1998 年 7 月第 1 版,1998 年 7 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;13.75 印张;330 千字;208 页;1-2000 册

26.50 元

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

序

工业生产流程优化的主要内容，包括流程技术（工艺、装备）的先进性，经济（规模、投资）的合理性。工业生产流程的发展决定于社会对产品的需求，并依赖于客观环境、基础条件和主观能力。合理的工艺、装备、技术组合起来的流程与企业管理水平、员工素质、资金运营水平的有机结合构成了企业的市场竞争能力。

现代科学技术的进步，市场经济的发展，钢铁工业生产由粗放型经营向集约型经营的转变，促进了连铸技术和轧制技术的发展。近终形连铸技术及热连轧技术因其经济性和合理性得到了迅速推广。近终形连铸与轧制的紧凑衔接构成了现代钢铁企业结构优化发展的方向，其典型代表是薄板坯连铸连轧。

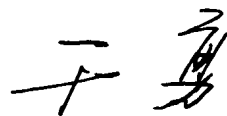
热轧带钢是钢铁工业最重要的钢材产品之一，其产量在工业发达国家中占钢材总产量的50%左右，因此热轧带钢生产工艺流程的不断改进和发展，对钢铁工业的技术进步和经济效益的提高具有重要的影响。

薄板坯连铸连轧是80年代末、90年代初开发成功的生产热轧板卷的一项短流程工艺，是继氧气转炉炼钢、连续铸钢之后钢铁工业最重要的革命性技术之一，国外各钢铁大国先后投入了大量人力、物力进行了专项研究。美国纽柯公司克拉福兹维莱厂薄板坯连铸连轧生产线的成功投产，标志着热轧板卷大工业生产一代新流程的诞生。与传统生产工艺流程相比，短流程可节约投资、提高成材率、降低生产成本、大幅度缩短生产周期等。目前，世界上已建成或在建生产线已达45流，典型的工艺有CSP、ISP、CONROLL、

FTSRQ、TSP、CPR 等，它们使传统的热轧带钢工艺流程受到了强烈的挑战。

田乃媛教授在深入进行薄板坯连铸连轧相关技术研究的基础上，与有经验的专家、学者共同撰写的《薄板坯连铸连轧》一书，详细论述了薄板坯连铸连轧工艺中的关键技术；全面介绍了 CSP、ISP、CONROLL、FTSRQ 等工艺的特点、现状以及与流程相适应的冶金设备；分析了薄板坯连铸连轧工艺中的金属学特点、生产钢种和产品质量水平；讨论了各工序时间、温度等因素的优化及各工序间的配合、衔接与缓冲；并对不同规模、流程薄板坯连铸连轧工艺的工程投资进行了综合评价，体现了作者对钢铁生产最先进流程的深刻理解和深厚、广博的专业研究水平。

本书是目前国内最为全面、系统介绍薄板坯连铸连轧技术的专业书籍，是从事冶金专业技术人员了解新技术、提高业务水平的好教材，也是从事薄板坯连铸连轧研究人员必备的参考书。本书的出版将对我国发展薄板坯连铸连轧技术起到推动和促进作用。



1998 年 1 月

前 言

薄板坯连铸连轧是当今世界钢铁冶金工业的具有革命性的前沿技术,它集科学、技术和工程为一体,将热轧板卷的生产在一条短流程的生产线上完成,充分显示出先进性和科学性。世界各国都对此给予了极大关注,使得薄板坯连铸连轧近年来又有了突飞猛进的发展。

本书作者于1993年主编了《连续铸钢继续教育丛书——薄板坯连铸及热装直接轧制》一书,这是国内第一本介绍薄板坯连铸连轧的科技书。随着时间的推移,薄板坯连铸连轧技术不断完善,新的技术、新的生产线相继推出,加之我国引进三条CSP生产线的现状,为满足国内同行们的需要,有必要尽快地将最新的信息介绍给大家。

历经近一年的工作,完成的《薄板坯连铸连轧》一书,系统地介绍了该技术的主体和相关技术(炼钢、精炼、连铸、连轧等);一一展示了当今世界上各类已建和在建的各条生产线,详尽地列出各种薄板坯连铸连轧工艺的工艺参数、设备配置、主要特点等,读者可从中分析、对比、选择;针对薄板坯表面质量这一关键问题,做了质量分析;在对薄板坯连铸连轧工艺流程优化方向和原则分析的基础上,对该技术的工程投资加以详细的解析,指出投资趋势。书中附有大量图表,读者可直观地了解各种流程的实际情况。为确保本书内容的质量,作者在编写过程中,注意所收集资料的全面性、新颖性和时效性。它的出版必将会有助于国内从事连铸工作的科研、设计、生产及教学人员吸取更多新技术,也会对未来三条CSP生产线的建设、投产起到积极的推动作用。

全书由田乃媛编著，其中第3章由北京科技大学唐荻教授撰写。为编著此书，作者搜集了大量资料，此过程得到不少国内外企业的帮助，并曾和许多国内外专家、学者进行过交流，获益匪浅，在此深表感谢！

钢铁研究总院常务副院长干勇同志为本书撰写了序言，他是国内资深薄板坯连铸的专家之一，他对本书给予的肯定，令人鼓舞，在此一并表示感谢！

由于作者水平所限，书中不妥之处，敬请读者批评指正。

田乃媛
1998年4月

目 录

1 概 述	1
1.1 近终形连铸技术的兴起	1
1.2 薄板坯连铸连轧技术的发展	3
1.2.1 薄板坯连铸连轧技术的出现	3
1.2.2 薄板坯连铸连轧工艺的关键技术	3
1.2.3 薄板坯连铸连轧技术的发展趋势	4
1.3 薄板坯连铸连轧工艺中的关键技术	5
1.3.1 结晶器及其相关装置	5
1.3.2 铸轧工艺	6
1.3.3 高压水除鳞	6
1.3.4 加热方式	7
1.3.5 精轧机架	7
1.4 薄板坯连铸连轧技术在我国的应用前景	7
2 薄板坯连铸连轧工艺	10
2.1 薄板坯连铸连轧工艺特点	10
2.2 薄板坯连铸连轧技术的开发和研究	13
2.2.1 薄板坯厚度的选择	13
2.2.2 冶金工艺特点	15
2.2.3 薄板坯连铸机与连轧机间的衔接匹配	22
2.3 典型的薄板坯连铸连轧工艺	23
2.3.1 CSP 工艺	23
2.3.2 ISP 工艺	57
2.3.3 FTSRQ 工艺	69
2.3.4 CONROLL 工艺	75
2.3.5 TSP 工艺	78
2.3.6 CPR 工艺	80
2.3.7 Sumitomo 工艺	81
2.3.8 中国兰州钢厂的薄板坯连铸机	84

3 薄板连铸坯的轧制	88
3.1 薄板坯连铸连轧的轧钢工艺特点	88
3.1.1 热连轧带钢生产的工艺特点	88
3.1.2 薄板坯连铸连轧的特点	91
3.1.3 新旧工艺的比较和分析	95
3.2 薄板坯连铸连轧的轧钢工艺和设备	95
3.2.1 大压下高刚度的连轧工艺	95
3.2.2 高精度的板形控制技术	98
3.2.3 热轧除鳞技术	106
3.2.4 宽度自动控制技术	114
3.2.5 控制冷却技术	119
3.2.6 自由规程轧制技术	123
3.2.7 热轧薄带生产技术	127
3.2.8 新型炉卷轧机	130
4 薄板坯连铸连轧工艺的产品现状及质量分析	135
4.1 薄板坯连铸连轧工艺生产的钢种	135
4.2 薄板坯连铸连轧技术的质量优势	144
4.3 薄板坯连铸连轧产品的主要质量问题	145
4.3.1 横向角裂	146
4.3.2 表面纵向裂纹	148
5 薄板坯连铸连轧工艺的相关技术	152
5.1 薄板坯连铸对钢水质量的要求	152
5.1.1 钢水温度	152
5.1.2 钢水成分	153
5.1.3 钢水纯净度	154
5.2 炼钢炉—薄板坯连铸生产线上的炉外精炼装置	155
5.3 浸入式水口和保护渣	156
5.3.1 浸入式水口	156
5.3.2 保护渣	158
5.4 结晶器的振动形式	161
5.5 二次冷却系统	163
5.6 加热炉及其缓冲能力	163
5.6.1 加热炉	163
5.6.2 加(均)热炉的缓冲区布置及缓冲能力	167

6 薄板坯连铸连轧生产线上的炼钢设备	169
6.1 电炉短流程	169
6.1.1 ABB 型	171
6.1.2 GHH 型 (Unarc)	172
6.1.3 CLECIM 型	174
6.1.4 VAI 型	175
6.1.5 MDH 型	181
6.2 高炉—转炉长流程	182
7 薄板坯连铸连轧工艺的工程分析	185
7.1 薄板坯连铸连轧工艺流程的优化方向和原则	185
7.1.1 优化方向	185
7.1.2 化学冶金过程优化的原则	185
7.1.3 物理冶金过程的优化原则	187
7.1.4 化学冶金过程-物理冶金过程的衔接、匹配原则	188
7.1.5 薄板坯连铸连轧流程在线/离线协调的内涵	188
7.2 薄板坯连铸连轧流程的时间解析	189
7.2.1 时间参数的重要性	189
7.2.2 时间在薄板坯连铸连轧流程中的表现形式及其内涵	189
7.3 紧凑型流程钢厂的运行特征	191
8 薄板坯连铸连轧技术的工程投资问题	193
8.1 选择工艺流程方案的依据	193
8.2 不同流程的薄板坯连铸连轧方案的经济分析	194
8.2.1 各种方案简介	194
8.2.2 各种方案的经济分析	200
8.3 薄板坯连铸连轧技术投资趋势	206
参考文献	208

1 概 述

1.1 近终形连铸技术的兴起

随着冶金工业的技术进步,新工艺的出现和不断完善,全球范围内板材连铸工艺发生了巨大变化,特别是本世纪 80 年代末近终形连铸的开发成功,更促进了板材市场的变化,见图 1-1。

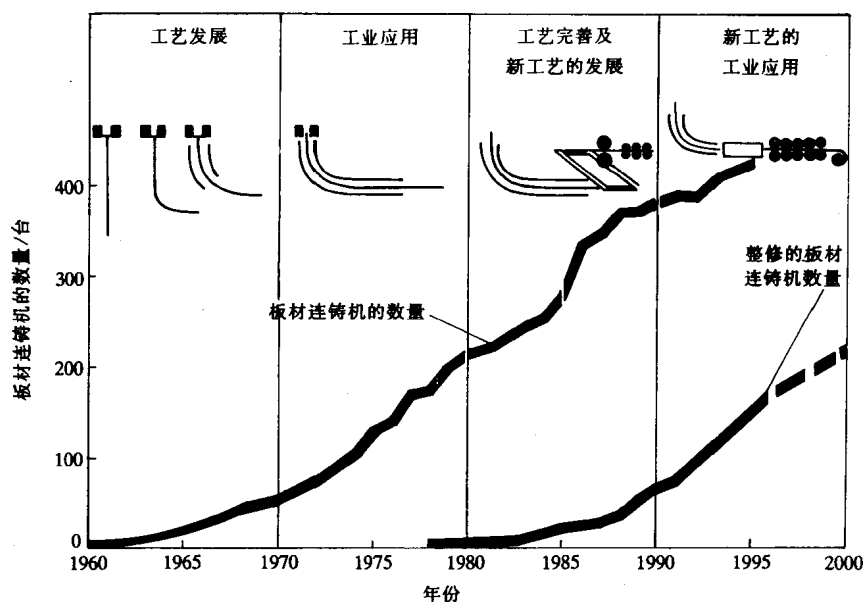


图 1-1 板材连铸工艺技术的市场趋势

近终形连铸是一项高新技术,目前已趋于成熟,走向工业化。它的实质是在保证成品钢材质量的前提下,尽量缩小铸坯的断面来取代压力加工。近终形连铸通常可分为三大类:薄板坯连铸、薄带连铸和喷雾成形。与普通连铸工艺相比,薄板坯连铸连轧具有如下特点:

(1) 工艺简化,设备减少,生产线短。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,缩短了施工日期,可较快地投产并发挥投资效益。

(2) 生产周期短。从冶炼钢水至热轧板卷输出,仅需 1.5h,从而节约流动资金,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,薄板坯连铸连轧可直接节能 66kg/t、间接节能 145kg/t,成材率约提高 11%~13%。

近终形连铸技术中的薄板坯连铸连轧工艺自 1989 年在美国纽柯厂和 1992 年在意大利阿维迪厂投产以来,引起了全世界冶金界的重视。面对当今世界能源紧缺和市场对难于塑性加工的板带产品需求的增加,近终形连铸显示出它的明显优势。近年来已建和新建的工程项目达几十家,国内不少企业也极为关注,表现出强烈的投资意向,1996 年 5 月珠江钢厂、邯鄹钢铁总厂和包头钢铁公司三家企业捆绑引进该技术的合同正式签订,20 世纪内有望在我国建成薄板坯连铸连轧生产线。

从图 1-2 中可以预测出至 2015 年薄板及中等厚度板材的市场份额,不难看出近终形连铸将在很长一段时间内呈上升的趋势。

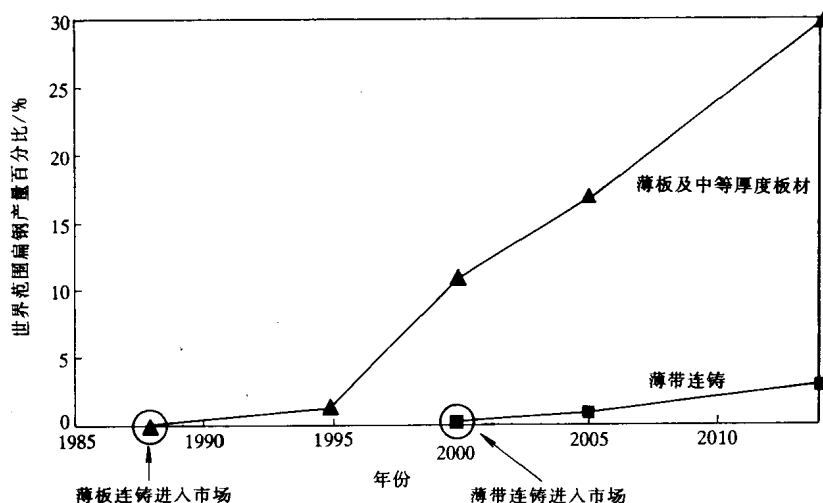


图 1-2 新工艺市场成效的预测

年 份	薄板及中等厚度板材	薄带连铸
1996	2.2%	
2000	11%	0.3%
2005	17%	1.0%
2015	30%	3.0%

预计薄板坯连铸连轧技术在今后十年内将对传统的钢铁企业造成大的冲击。到 2010 年全球有可能建成 75 个薄板坯连铸连轧工厂,总生产能力可达 1.9 亿 t,即全球 50%左右的热轧板卷将由薄板坯连铸连轧技术来生产。

薄板坯连铸连轧工艺在装备、工艺技术及其控制系统上的发展极为迅速,这几年多条生产线的生产实践已向人们证实它是能够保证工业化生产的先进技术,是钢铁工业中的革命技术。薄带连铸也有很大突破,该领域的开发,已临近工业化生产阶段,预计 2~3 年内将进入商业应用,我国也有多项薄带连铸成果通过鉴定,其中上海钢研所瞄准这当代冶金科技前沿进行攻关,在国内首次成功地铸出 3mm×586mm 的不锈钢热带,并完成了双辊薄带连铸工艺和装备的半工业性试验,通过了“八五”国家重点科技攻关项目国家级技术鉴定和验收,初步解决了大直径结晶辊、铸流及熔池成形、侧封、防氧化浇铸、轧制力与拉

速闭环自动控制等一系列关键技术和装备上的难点，在参与国际竞争上走在了前面。

近终形连铸技术的出现和高速发展基于近代冶金学的研究成果，其中，金属凝固理论的深入研究、钢水炉外精炼机理、功能及各种精炼装置的问世和纯净钢生产技术、压力加工的进步等是推动近终形连铸技术加速开发、完善的根本，而能源危机的冲击、市场需求的扩大则是企业普遍看好它的外因。近终形连铸技术的前景是光明的。

1.2 薄板坯连铸连轧技术的发展

1.2.1 薄板坯连铸连轧技术的出现

自世界上为短流程小钢厂开发的薄板坯连铸连轧技术获得工业上的成功以来，受到的不仅仅是关注，而是青睐，在冶金界产生了巨大反响，短短几年中，建起或正在兴建大批生产线，且势头迅猛。以西马克(SMS)公司的紧凑式热带生产技术(Compact Strip Production, 简称为CSP)为例，试验研究始于1985年10月，第一条生产线于1989年在美国纽柯克拉福兹维莱厂建成(Nucor Steel Corp. Crawfordsville, IN/USA)后，又相继建成了黑克曼(Nucor Steel Hickman, AR/USA, 1992-08)、希尔沙(Hylsa Monteney Mexico, 1994-11)、韩宝(Hanbo Steel Pusan, South Korea, 1995-06)、戈拉庭(Gallatin Steel, 1995-02)、第纳米克斯(Steel Dynamics Inc. (SDI) Butler, IN/USA, 1996-01)、比斯卡亚(Aceria Compacta de Bizcaya (ACB) Bilbao, Spain, 1996-07)，并有若干条生产线正在建设中，如印度的德罗伊斯帕特公司(Nippon Denro Ispat Dolvi)、美国的阿科梅公司(Acme Steel Company)、泰国的乔恩布日钢厂(Nakornthai Chonburi Strip Mill)等，预计均可在20世纪内投产。

薄板坯连铸连轧技术取得成功的有众多公司和研究单位，其中最具代表性的是德马克(MDH)、西马克(SMS)、奥钢联(VAI)、意大利的丹涅利(Daniel)公司等，尽管各自的工艺路线不同，设备也各具特点，但最终的目标是一致的，即通过结构紧凑、热送热装、连铸连轧的薄板坯连铸连轧技术来实现高的经济效益。多条生产线投产后取得成功，又促使各公司的技术相互渗透，以求更加完善，在不断改进的过程中，该项技术愈发显示出其优势。

1.2.2 薄板坯连铸连轧工艺的关键技术

薄板坯连铸连轧工艺技术的突破口是薄板坯连铸，其中结晶器是关键，各种适合在高拉速条件下生产出的铸坯比常规板坯薄很多的结晶器的成功使用，使得无缺陷薄板坯高速连铸技术得以实现。随着该技术的不断成熟，各类结晶器的型式愈来愈趋于接近，在断面上广泛采用鼓肚形上口、合理的倒锥度、电磁闸的应用、非正弦波液压振动装置等都是必须的。板坯出结晶器后的软压下(也称铸轧)技术不仅能做到薄板坯生产热轧带钢时能耗降低，又可使晶粒细化，芯部偏析减小，表面质量及平整度均好，已被各公司肯定。

在后续连轧方面，为充分发挥薄板坯连铸连轧技术经济效益上的优势，连轧机能力受到高度重视，从已投产的机组来看，以1流薄板坯连铸机对1套热连轧机组合生产，是不能充分发挥经济效益好的优势的。

在与前部工序配合方面,截止 1996 年,薄板坯连铸连轧工艺除美国阿克梅钢厂的高炉—转炉流程采用外,基本上均是与电炉流程匹配。在高炉—转炉长流程上嫁接薄板坯连铸连轧技术,既可优化产品结构,又可充分发挥该技术的结构紧凑、热送热装、连铸连轧的优势,大大提高经济效益。

1.2.3 薄板坯连铸连轧技术的发展趋势

当今薄板坯连铸连轧技术的发展趋势有以下特点:

(1) 成品规格尺寸越来越薄。90 年代初建成的薄板坯连铸连轧生产线热轧带卷的厚度,阿维迪厂碳钢为 1.7~12mm、不锈钢为 2.0~12mm,实际生产以 5mm 以上的居多;纽柯 I 厂(黑克曼)则为 1.8~12.7mm,2mm 以下的带卷产量也较少。随着市场需求的变化和技术的不断进步,热轧带卷的厚度越来越薄,1995 年投产的希尔沙(Hylsa)厂的 CSP 生产线,配有 6 架热连轧机架,轧制产品厚度为 1~12.5mm,其厚度和形状可控制在标准公差 1/4 内。未来的薄板坯连铸连轧生产线的产品规格将以 1mm 为主。

(2) 产量规模趋大。西马克公司为美国纽柯公司设计的第 I 条生产线生产能力为 50 万 t、第 II 条生产线生产能力为 70 万 t,德马克公司为意大利阿维迪设计的生产线生产能力也是 50 万 t 左右热轧带卷,新建的希尔沙 CSP 生产线设计年产量为 75 万 t。究其原因,产量受限均不是热连轧机的能力,而是这些条生产线的冶炼设备均是一座电炉。世界第一套转炉配 CSP 技术的生产厂(2 座 90t 转炉,1 流连铸机配 1 套热轧机)的年产量可达 97 万 t,已于 1996 年投产。要充分发挥热连轧机的能力,合理的薄板坯连铸连轧生产线年产量应大于 100 万 t/流,目前各企业都已充分注意发挥连轧机的能力(200~250 万 t/a),新建的产量都定为 200~300 万 t/a。为此,炼钢炉的能力要求和薄板坯连铸机的能力相匹配,采用转炉可能更有利于轧机能力的发挥。薄板坯连铸机在拉速、厚度、宽度等参数上更需优化。

(3) 利用现有老厂高炉—转炉设备,建设薄板坯连铸连轧生产线,专门生产薄规格($\leq 2.3\text{mm}$)、超薄规格($\leq 1.6\text{mm}$)的热轧卷,既可用热轧超薄板替代相当一部分商品冷轧板,节约冷轧厂的投资,又可解放传统热带钢轧机的能力,促进增产。

(4) 通过适当增加铸坯厚度、宽度,提高拉速,增加铸机流产量,有可能争取实现一台铸机(单流)与一部热连轧机配合生产,达到 200 万 t/a 以上生产能力。

如铸坯厚度增加,使长度缩短至 40m 以下,就有可能用步进式加热炉,它将使缓冲容量增大,有利于整个系统灵活性、稳定性的提高。

(5) 薄板坯连铸机的各工艺参数面临进一步优化选择。铸坯厚度-凝固时间-冶金长度间的关系直接影响轧机架数和布置方式及铸机本身结构。如铸坯厚度适当加厚,则凝固时间延长,冶金长度增加;这样,立弯式铸机应改为立弧型,更易避免产生鼓肚。这其中凝固系数 k 的选择尤显重要。西马克公司铸机 $k=25$,适于厚度约 50mm 的低碳钢种,当厚度大于 80mm 后,尤其是裂纹敏感的钢种及包晶钢等,应选择 $k=22$ 。

(6) 为使薄板坯连铸机高效、安全运行,它的水冷系统正向结晶器冷却、二次冷却和二冷段支撑辊的内冷却三部分发展。

(7) 在轧制超薄规格热轧卷时,由于受到终轧机架处带坯温度的限制,带坯在轧制过程中的再加热问题将会成为一个新的关注点。

(8) 薄板坯连铸连轧技术的先进性也决定了它的投资额是可观的,无论是阿维迪,还

是纽柯，还是后建的浦项、韩宝、希尔沙等各条生产线，投资均在 3.5 亿美元以上。而建设一家以热轧卷为主要产品的高炉—转炉联合企业总投资不会低于 30 亿美元，相比之下采用薄板坯技术生产热轧带卷还是合理的，且建设周期短得多。截至 1996 年，80% 左右的热轧卷产品已可用薄板坯连铸连轧生产的产品替代。墨西哥的希尔沙钢厂 1997 年计划生产的约 68.039 万 t (75 万短吨 (sh ton)) 薄板中，有 20% 热轧超薄板与冷轧薄板竞争市场，其最大厚度为 1.5mm，大部分在 1~1.2mm 间。这些超薄板的价格比商品热轧钢带每吨高 40 美元，但比一般商品冷轧薄板约低 5%。

可以预计，随着薄板坯连铸连轧技术的不断成熟，流程会更加合理化，相关设备会进一步优化和标准化，可望一次性投资额有所下降，而生产技术的进步又将会使产品的成本进一步降低。

在美国阿克梅钢厂第一家采用顶吹转炉与薄板坯连铸连轧配合生产后，加拿大的阿尔戈马公司也已投资建设新的薄板坯连铸连轧生产线与原有的高炉—转炉配合生产。1997 年德国著名的蒂森公司决定引入薄板坯连铸连轧生产线到现有的高炉—转炉流程中，专门生产超薄规格热轧带卷。更有新的消息，荷兰的霍戈文钢厂、德国的沙尔兹吉特尔和赫斯等高炉—转炉钢厂，均有投资薄板坯连铸连轧的打算。

目前全世界钢产量为 7.5 亿 t/a，其中板带产品为 3.2 亿 t/a，占总产量的 43%。这中间通过薄板坯连铸连轧生产线所生产的热轧带卷占 4000 万 t/a，占板带产品的 1.3%。随着社会的进步，对板带产品的需求量会不断增加，当板带产品由 43% 的比例提高至 50% 时，全世界钢产量也增加至 8 亿 t，为此还需增加 8000 万 t/a 板带产品的生产能力，也即还需将薄板坯连铸连轧生产线再增加一倍。可以预见，薄板坯产品的市场是很大的，一旦它不仅以热轧带卷外售，其中一部分还能替代冷轧产品时，将具有更强大的竞争力。

1.3 薄板坯连铸连轧工艺中的关键技术

薄板坯连铸连轧具有流程短、能耗低、劳动生产率高、设备简单、投资省、成本低等一系列优点，所生产的热轧板卷价格比常规流程生产产品要便宜，显示出极具竞争力的发展势头，究其原因是该技术中有许多处突破了传统工艺概念，是大胆创新之举，它们经实践检验证明是成功的。

1.3.1 结晶器及其相关装置

薄板坯连铸机上使用的结晶器早期大体分为两类：平行板型和漏斗型。西马克公司开发的漏斗型结晶器，其上口处中间部位厚度达 150mm，有利于浸入式水口的伸入和保护渣的熔化，进而使铸坯表面质量有保证。而下口处厚度为 40~70mm，能满足铸坯厚度的要求，这是因为铸坯厚度需 70mm 以下才能直接进精轧机组轧制。从世界上现已投产的几条生产线来看，钢液在这种漏斗型结晶器内凝固时要产生变化，必须保证厚度变化过渡区的弯曲弧度设计准确，且浇钢时拉速应尽可能稳定。德马克公司在阿维迪热装生产线 (Inline Strip Production, 简写 ISP) 上最早使用的是传统平行铜板结晶器，由于上口厚度仅 60~80mm，只能使用薄片形长水口，其壁厚仅有 10mm，最大通钢量是 2t/min，受到了限制，同时水口寿命很低。为此经改进将平行板型扩展为上口宽边最大厚度为 60+ (10×2) mm 的小鼓肚

型,并逐步变大成为 $60+(2\times 25)$ mm,这种形状一直到下口处仍保留 (1.5×2) mm 的小鼓肚。由于小鼓肚的存在,上口空间加大,使薄片型水口壁厚增加至 20mm,使用寿命延长。奥钢联现也使用平行板式的直结晶器,厚度为 70~125mm,扁平状长水口,侧壁双孔出钢。丹涅利公司开发了一种新的类似凸透镜状,上口、下口断面尺寸一样的全鼓肚型结晶器,认为这种型式既可解决浸入式水口插入,又可减少铸坯表面裂纹等问题。这种结晶器内钢水容量在相同铸坯厚度时比其他类型多 60%,且坯壳生成应力低于漏斗型,气隙也小,能浇铸易裂钢种。

从结晶器型式的演变可知,为提高薄板坯连铸单流产量,提高铸坯质量,扩大品种,漏斗型乃至全鼓肚型更为实用,也正因这两种极具特色的结晶器的问世,才使薄板坯连铸工艺得以成功,有关结晶器的研究仍有待进一步深入。

与结晶器相关的还有浸入式水口的开发,其中包括形状、出口角度、材质等,在薄板坯连铸工艺中也别具特点。结晶器振动装置在此工艺中也有较大改进,西马克、奥钢联、丹涅利三种机型均已采用液压驱动,振幅最小可至 ± 1 mm、频率最大 400 次/min,振动波形由正弦而变为非正弦锯齿波。薄板坯连铸使用的保护渣特别重要,因其铸速高达 4~7m/min,要求熔点低、粘度低且流动性强的渣系才行,现开发出的中空颗粒渣能保证结晶器内器壁与铸坯间很快地形成稳定、可控的保护渣膜,起到良好的润滑作用。毫无疑问,这些与核心结晶器相关的技术的运用都是至关重要的。

1.3.2 铸轧工艺

世界首台薄板坯连铸连轧生产线阿维迪 (Arvedi) 的 ISP 技术中采用带有液芯及固相铸轧的技术,出结晶器下口 60mm 的铸坯带液芯时经软压下变至 45~50mm,形成固相后再轧至 15mm 厚。实践表明,液芯铸轧对细化晶粒的作用比相应尺寸减薄的铸坯大,由于晶粒细化,使得在相同轧制温度下铸坯获得的韧性更好,当浇铸厚度为 60~100mm 时,采用铸轧技术后最终成品质量比减薄结晶器厚度的效果更佳,液芯铸轧的好处已被公认,现在该技术已得到广泛应用,并在不断改进完善。丹涅利公司的灵活薄板坯连铸连轧工艺 (Flexible Thin Slab Rolling for Quality, 简写 FTSRQ) 中应用了动态软压下技术 (专利),可根据带卷最终厚度的要求连续调整薄板坯的厚度,产品质量达一级标准。ISP 和 FTSRQ 两种技术采用的带液芯铸轧工艺均根据浇铸速度、钢种和一冷、二冷及中间罐钢水过热度及实际浇铸时间来计算薄板坯断面尺寸和液芯长度的变化,并通过调整辊缝来实现软压下。CSP 和 CONROLL 生产工艺是依靠全凝固轧制来使铸坯变薄,而近期投产的新的 CSP 生产线也均采用了液相轻压下的铸轧工艺,液芯铸轧可以看成是降低能耗、提高产品质量的一种生产薄的板带的技术发展方向。新开发出的铸压轧 (Casting Pressing Rolling, 简写 CPR) 技术,则将“铸、压、轧”融为一体,出结晶器下口坯壳仅 10~15mm 的铸坯,此刻 1300℃ 左右即受辊压,使芯部焊合,随后由四辊轧机将铸坯轧成 15~24mm 的热轧板卷。

1.3.3 高压水除鳞

薄板坯表面积大,易出现二次氧化,生成氧化铁皮,如不及时清除,会与轧辊在高温下接触,不仅损坏轧辊,也常因轧制速度远高于浇铸速度而将氧化铁皮轧入。为此,各种薄板坯连铸机的设计方案都对除鳞给予了相当重视,新的结构都将除鳞机布置在粗轧机前,

进而在入加热炉前、精轧前再次除鳞，FTSRQ 生产线甚至在精轧机架 F_1 、 F_2 后仍进行多道除鳞，确保氧化铁皮的清除。除鳞装置有高压水、旋转高压水多种类型，其水压从 10~20MPa 提高至 40MPa。奥钢联还开发了圆环形和网状旋转式高压水除鳞装置，均是想利用高压水以一定角度打到铸坯上更有效地清除氧化铁皮。

1.3.4 加热方式

薄板坯连铸连轧的工艺要求铸坯直接进入精轧机，铸坯薄且温度高还需均匀，必须在线对铸坯予以加热保温。ISP 生产线经铸轧后的铸坯为 15mm，先进入感应加热区再由克日莫那炉 (Cremona) 天然气加热保温；CSP 生产线 50mm 以下的铸坯，经剪切后长为 47m，送到均热炉用天然气加热，该炉长达 240m，可放五块铸坯。前者布置紧凑，对环境污染小，但设备较复杂，维修困难，后者有利于铸坯贮存，一旦轧机出现故障，整个生产线有缓冲时间。均热炉又有辊底式、隧道式、步进梁式几种。选择哪一种加热方式更有利于薄板坯连铸连轧工艺仍是当今研究的问题，也是极为重要的一环，直接影响到整条生产线的连接协调。

1.3.5 精轧机架

从投资额来分析，薄板坯连铸连轧生产线中连铸机部分占 30%，轧机部分则占 70%。现有的各种类型的热精轧机组有 4 机架、5 机架、6 机架乃至 7 机架 (美国阿克梅钢公司)，其生产能力均可达 135 万~200 万 t/a，大大超过薄板坯连铸机单流生产能力。目前热精轧机组均配有轧辊轴向移动、板形平整度、厚度在线调控、轧辊表面热凸度控制等装置，轧制 1.0mm 甚至更薄的热轧带卷已不成问题，关键的问题是如何发挥出投资比例如此大的轧机能力。就其经济效益来讲，薄板坯连铸应配置两流才能与一套热连轧机组匹配，同时薄板坯连铸机的拉速也应最大限度地提高，薄板坯连铸连轧的高温、高速、连续生产的衔接技术仍有待继续开发。

1.4 薄板坯连铸连轧技术在我国的应用前景

近几年来，大批薄板坯连铸连轧生产线在世界各地纷纷建成，据初步统计，已投入生产的、正建设的和处于研究中的项目多达 50 余个。如此短的时间内有这种局面，显示出薄板坯连铸连轧技术在短流程小钢厂中是成功的，它具有多种技术和效益上的优势，现已被众多钢铁联合企业看准，并准备在传统的高炉—转炉流程中采用该技术。无疑，这将是一种新的挑战，它将充分发挥薄板坯连铸连轧技术的自身优势，又将促进传统流程的产品结构优化，大大提高经济效益。

薄板坯连铸连轧技术的出现、成功，及其走向成熟，在我国同样产生了巨大的反响。我国冶金工作者极为关注该技术的发展动向，不少部门和企业多次组团、出国考察，并在国内外广泛地进行了技术交流，各种期刊相继系统地介绍有关情况，钢铁研究总院和兰州钢厂等单位还积极进行了试验研究，探讨我国发展该技术的途径。1996 年冶金部组织邯钢、包钢、珠钢三企业同德国西马克公司签订了薄板坯连铸连轧成套设备供货合同和技术合作协议，我国的薄板坯连铸连轧建设已拉开了序幕。同时，国家已将有关薄板坯连铸连轧技术