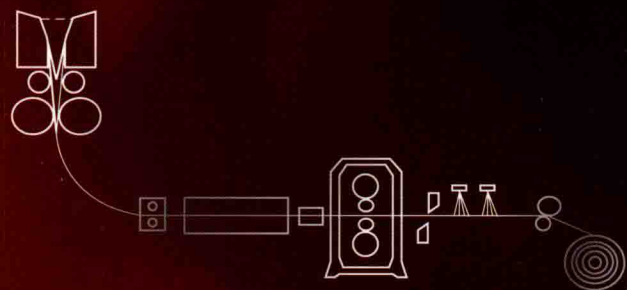


BAOBANPI LIANZHU LIANZHA
GONGYI YU SHEBEI

薄板坯连铸连轧 工艺与设备

曹建国 等编著



化学工业出版社

薄板坯连铸连轧 工艺与设备

曹建国 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

薄板坯连铸连轧技术作为一种先进的钢铁制造流程,被誉为国际钢铁工业发展中的“第三次技术革命”,具备流程短、投资少、成本低和效益高的突出特点。本书结合作者近十余年承担的国家及薄板坯连铸连轧等国家骨干企业科研项目成果与热轧国际前沿技术进步,主要介绍了薄板坯连铸连轧技术进步、主要特征与发展历程,九种典型薄板坯连铸连轧工艺与设备,薄板坯连铸、均热、自由规程轧制、板形控制、高速钢工作辊、轧制润滑、半无头和无头轧制、铁素体轧制、轧后控冷、飞剪和卷取技术,重点讨论了薄板坯热连轧国际主流轧机机型与电工钢自由规程轧制板形控制、连轧过程轧制界面氧化与润滑、轧后控制冷却等前沿技术进展,以及我国 CSP、UTSP、ASP 和 ESP 等九条代表性的薄板坯连铸连轧生产线,力求反映薄板坯连铸连轧工艺与设备的技术发展趋势。

本书适合轧钢工程技术人员、研发人员阅读,也可作为高等工科院校机械工程及自动化、冶金工程、材料成型与控制工程等专业的本科生和研究生教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

薄板坯连铸连轧工艺与设备/曹建国等编著. —北京: 化学工业出版社, 2017. 1
ISBN 978-7-122-28580-5

I. ①薄… II. ①曹… III. ①薄带坯连铸②薄带坯-薄板轧制 IV. ①TF777.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 287172 号

责任编辑: 刘丽宏
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 余纪军
装帧设计: 刘丽华

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: 三河市延风印装有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张 16 字数 335 千字 2017 年 1 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: 69.00 元

版权所有 违者必究

薄板坯连铸连轧 (Thin Slab Casting and Rolling, 简称 TSCR) 是世界钢铁工业于 20 世纪 80 年代末开发成功的重大创新技术, 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, 是钢铁工业典型的高效、节能、环保短流程技术。薄板坯连铸连轧是将现代电炉/转炉冶炼、精炼、连铸、连轧等工序的先进技术, 以连续性-紧凑性为原则, 科学地倡响起来的一项集成创新工程, 是一种先进的钢铁制造流程。

1985 年 10 月, 德国西马克 (SMS Schloemag-Siemag) 公司率先试验浇铸成功厚度为 50mm 的薄板坯取得突破, 并将这项新技术命名为 CSP (Compact Strip Production), 1989 年 7 月美国纽柯钢铁 (Nucor Steel) 公司克劳福兹维尔厂采用 CSP 技术投产了世界上第 1 条薄板坯连铸连轧生产线, 标志着薄板坯连铸连轧技术在上世界上首次实现了工业化生产, 主要生产 40~70mm 厚的板坯, 年产热轧卷 80 万吨; 1994 年 4 月扩建了第 2 流, 年产量提升到 170 万~180 万吨; 为了扩大生产规模, 又增设了第 3 台电炉, 使其年产量达到 200 万吨。随后, 德国德马克 (Mannesmann Demag) 公司 (现已并入西马克公司) 与意大利的阿西埃尔里亚-阿莱德 (Acciaieria Arvedi) 集团合作开发的 ISP (In-line Strip Production) 技术于 1992 年在阿莱德集团克雷莫纳厂 (Cremona works) 投产, 年产热轧卷 50 万吨; 在 ISP 基础上, 意大利的阿西埃尔里亚-阿莱德发展了一种新的薄板坯连铸/无头轧制的阿莱德 ESP (Endless Strip Production) 技术, 可生产 0.8mm 厚的热轧薄板卷。奥地利的 VAI 奥钢联 (Voest Alpine), 也就是现在的德国西门子奥钢联 (Siemens VAI), 和意大利达涅利公司合作开发了薄板坯连铸连轧的 CONROLL (Continuous Thin Slab Casting and Rolling) 技术, 主要用于中厚板坯生产。意大利达涅利公司开发了薄板坯连铸连轧的 FTSR (Continuous flexible Thin Slab Rolling) 技术, 主要用来生产 70~90mm 厚的板坯。目前, 已投入商业运行的薄板坯连铸连轧技术主要有上述的 CSP 技术、FTSR 技术、CONROLL 技术、ISP 技术、ESP 技术、日本住友公司开发的 QSP (Quality Strip Production) 技术和中国鞍钢开发的 ASP (Angang Strip Production) 技术等。其中 CSP 技术应用最为普及, 约占全球市场份额的一半以上。

连铸和连铸直接轧制的思想几乎是同时出现的。但连铸在 20 世纪 50 年代之后发展很快, 而连铸直接轧制的真正实现是在进入 80 年代之后, 才正式投入工业生产的。特别是进入 80 年代之后, 连铸本身的发展和完善对连铸坯的直接轧制起了决定性的作用。我国是世界上开发和应用连续铸钢技术较早的国家之一。1960 年 9 月, 北京科技大学徐宝陞教授设计的世界上第一台弧形连铸机在北京试验成功, 浇铸出了 200mm×200mm 方坯, 1964 年 6 月在重钢三厂投产了世界上第一台工业生产型板坯和方坯两用的“1700 弧形连铸机”, 可浇铸断面为 180mm×(1200~1500) mm 的板

坯或三流 180mm×250mm 的大钢坯；1990 年 10 月，钢铁研究总院主持的我国第一台薄板坯连铸坯试验机在兰钢建成，成功拉出中国第一块 50mm×900mm 铸坯；1999 年 8 月，我国珠钢采用 CSP 技术投产了第 1 条薄板坯连铸连轧生产线；2005 年马钢成为中国首次采用 CSP 薄板坯连铸连轧短流程工艺成功轧制出第一批 MG-W600 无取向电工钢热轧卷。目前我国已成为世界上薄板坯连铸连轧产量最大的国家，中美两国随后相继投产多条连铸连轧生产线，且其薄板坯连铸连轧产量占全世界产量一半以上。

板带材是冶金工业重点优先发展品种，通过近年来大力建设或改造高精度宽带钢热、冷连轧机，以满足日趋严苛的质量要求和不断增加的板带材产品消费需求，近年来我国板带比，即板带材占钢材总量的比例达到 50% 以上。作为冶金工业具有高技术附加值的板带产品成为国内外冶金工业发展的重点。板带材生产技术水平不仅是冶金工业生产发展的重要标志，也反映了一个国家工业与科学技术发展的水平。板带材发展主要有两种生产路线：一是采用传统连铸板坯、常规热连轧生产线；二是 TSCR 薄板坯连铸连轧生产线。前者投资大、成本高，起步规模大，但生产规模大、产品品种多和质量好，20 世纪 70 年代末以来武钢、宝钢和鞍钢等特大型钢铁联合企业一开始就选择了这种长流程生产线并形成了主要生产能力和主要生产能力。20 世纪 90 年代以来，我国经济进入了快速发展时期，一些新建企业和传统长材企业，如珠钢、邯钢、包钢、马钢、唐钢、连钢、武钢在调整产品结构过程中，开始采用 TSCR 生产线并取得了成功。

用钢水直接制取形状、质量接近最终成品的材料，是冶金科学工作者们长期以来一直努力追求的目标。1846 年，英国亨利·贝塞麦（H. Bessemer）提出设想，100 多年来，许多人为之奋斗，但由于关键技术未能突破，直到 20 世纪 80 年代，这项技术的研究始终没有多大进展。近 20 多年来，由于世界能源危机，人们更关注近终形连铸 NNSC（Near Net Shape Casting）技术，即是接近最终产品形状的连铸技术，特别是近年来攻克了快速凝固技术、自动控制和自动检测技术、新材料控制技术等关键技术，加上近年来世界许多钢铁企业投入大量人力、财力联手开发近终形连铸技术，这项技术的研究终于取得了可喜的成果。

NNSC 技术是当代连铸新发展的一个标志。NNSC 产品包括薄板坯（厚度 < 100mm）、带钢（厚度 ≤ 10mm）、薄带（厚度 < 1mm）、箔材、丝材、棒材、中空管坯、工字梁用异型坯等，这些坯材，只要稍稍加工即可使用，甚至可以直接使用。其中，薄板坯连铸、丝材连铸、棒材连铸、箔材生产等都已作为成熟工艺用于工业生产，其中应用最广、影响最大的当推薄板坯连铸。TSCR 生产线自 1989 年在美国纽柯公司和 1992 年在意大利阿莱德公司投产以来，引起全世界冶金界的高度重视，产生了巨大的反响。TSCR 薄板坯连铸连轧技术在美国钢铁行业得到了迅速发展和广泛应用。薄板坯连铸连轧生产线已形成了一支可以提供优质热轧宽带钢的新的生力军，对世界钢铁工业的技术结构调整和组织结构调整，已经产生了并在继续产生重要的影响。在世界各国的 TSCR 生产线中，最具有代表性的工艺设备主要有：德国 SMS Siemag 公司开发的 CSP 技术、德国 SMS Siemag 公司与意大利 Arvedi 公司合作开发的 ISP 技术、意大利 Danieli 公司开发的 FTSR 技术、德国 SIEMENS 与意大利 Arvedi 公司合作开发的 ESP 技术。其他的 TSCR 生产线还有，奥钢联的 CONROLL

技术、日本住友的 QSP 技术和中国鞍钢的 ASP 技术等。在全球 66 套 TSCR 机组中, CSP 机组 35 套, 占全球 TSCR 机组的 53%; ISP 机组 7 套, 占 10.6%; FTSP 机组 9 套, 占 13.6%; ESP 机组 3 套, 占 4.5%。采用这 4 种典型技术的机组共计 54 套, 占全球 TSCR 机组的 80% 以上。我国已有珠钢、邯钢、包钢、鞍钢、马钢、唐钢、涟钢、本钢、通钢、济钢、酒钢和武钢等多家钢铁企业的 TSCR 薄板坯连铸连轧生产线 15 条 30 流, 年产能力 3790 万吨, 其中 CSP 机组 7 条, FTSP 机组 3 条, ASP 机组 3 条, ESP 机组 2 条。

20 世纪 80 年代的世界能源危机催生了 TSCR 薄板坯连铸连轧技术, TSCR 技术被誉为国际钢铁工业发展中的“第三次技术革命”, 这项重大高新技术具备流程短、投资少、成本低和效益高的突出特点。自 1989 年 7 月美国纽柯公司克劳福兹维尔厂建成投产世界上第一条薄板坯连铸连轧工业化生产线以来, 美国成为 TSCR 技术最积极的推动者, 通过十余年的努力, 美国薄板坯连铸连轧产品占全美市场份额的 50% 以上。至 2014 年, 全球已建薄板坯连铸连轧生产线 66 条 101 流, 总年产能力达到 1.1 亿吨, 成为热轧板带的重要生产方式之一。我国已成为全球拥有薄板坯连铸连轧生产线最多、产能最大的国家, 并开发了许多具有自主知识产权的创新或原创性技术。本书结合作者近年来主持或完成的国家高等学校博士点基金博导类、国家公派高级研究学者项目、市创新领军人才计划和多条薄板坯连铸连轧和常规热轧国家大型骨干工业生产线的重点科研合作成果与热轧国际前沿技术进步, 主要介绍了薄板坯连铸连轧技术进步、主要特征与发展历程, 九种典型薄板坯连铸连轧工艺与设备, 薄板坯连铸、均热、自由规程轧制、板形控制、高速钢工作辊、轧制润滑、半无头和无头轧制、铁素体轧制、轧后控冷、飞剪和卷取技术, 重点讨论了薄板坯热轧国际主流轧机机型与电工钢自由规程轧制板形控制、连轧过程轧制界面氧化与润滑、轧后控制冷却等前沿技术进展, 以及我国 CSP、UTSP、ASP 和 ESP 等九条代表性的薄板坯连铸连轧生产线, 力求反映薄板坯连铸连轧工艺与设备的技术发展趋势。本书适合轧钢工程技术人员、研发人员阅读, 也可作为高等工科院校机械工程、冶金工程、材料成型与控制工程等专业的本科生和研究生教材。

本书相关思考题、参考文献、全部图稿的电子文件可以打开以下链接免费下载:
<http://download.cip.com.cn/html/20161214/359115927.html>。

本书由北京科技大学曹建国教授等编著, 分工如下: 第 4 章由孔宁博士编著, 第 6 章由朱冬梅副教授编著, 第 7.3.1~7.3.3 节由杨光辉副教授编著, 其余内容由曹建国编著, 全书由曹建国统稿。在本书编写过程中, 北京科技大学汪浩鹏博士、董强博士、居龙博士、博士生李艳琳、刘晓立和硕士生柴雪婷、王礼勇、撒莹莹、江军、邱澜等同志协助整理了部分资料, 在此一并表示感谢。本书的编写和出版得到了北京科技大学“十二五”教材建设经费的资助, 同时感谢北京科技大学教育教学改革与研究项目(JC2014YB034)的支持。

由于 TSCR 工艺与设备关键技术不断优化和发展, 书中不足之处难免, 恳请读者批评指正。

北京科技大学
曹建国

目录



第1章 薄板坯连铸连轧发展概述

1.1 连铸和连铸连轧技术	001	特点	006
1.2 薄板坯连铸连轧主要技术		1.3 薄板坯连铸连轧品种及质量	010

第2章 薄板坯连铸连轧主要工艺流程

2.1 TSCR 主要工艺流程类型及特点	014	2.6 ASP 鞍钢中薄板坯连铸连轧生产工艺流程	036
2.2 CSP 紧凑型带钢生产工艺流程	020	2.6.1 ASP 工艺流程示意图	036
2.2.1 CSP 工艺流程示意图	021	2.6.2 ASP 主要设备与技术特点	037
2.2.2 CSP 工艺原理与技术特点	021	2.7 ESP 无头轧制生产工艺流程	038
2.2.3 CSP 生产工艺类型	022	2.7.1 ESP 工艺流程示意图	038
2.2.4 CSP 生产能力	023	2.7.2 ESP 主要设备和技术特点	039
2.3 ISP 在线带钢生产工艺流程	025	2.7.3 ESP 无头轧制生产线的主要优势	044
2.3.1 ISP 工艺流程示意图	025	2.8 CPR 铸压轧生产工艺流程	044
2.3.2 ISP 突出技术特点	026	2.8.1 CPR 工艺流程示意图	045
2.3.3 ISP 生产能力	028	2.8.2 CPR 法的主要优点、局限性与对策	045
2.4 CONROLL 连续薄板坯连铸和轧制生产工艺流程	029	2.9 TSP 倾翻带钢生产工艺流程	045
2.4.1 CONROLL 工艺流程示意图	029	2.9.1 TSP 工艺流程示意图	045
2.4.2 CONROLL 工艺与技术特点	030	2.9.2 TSP 技术特点	046
2.5 FTSR 灵活的薄板坯连铸连轧生产工艺流程	031	2.10 QSP 品质板坯生产工艺流程	046
2.5.1 FTSR 工艺流程示意图	031	2.10.1 QSP 工艺流程示意图	047
2.5.2 FTSR 主要设备和技术特点	032	2.10.2 QSP 主要技术特点	047
		2.11 薄板坯连铸连轧生产线技术进步与主要特征	047

第3章 薄板坯热连轧轧机机型与电工钢板形控制

3.1 薄板坯连铸连轧与常规热轧带钢轧机的比较	051	控制	054
3.2 薄板坯连铸连轧轧机机型与板形因素		3.2.1 轧机机型设计配置的决定因素	054

3.2.2	热轧板形控制选型配置策略	055	3.6.1	CVC 连续变凸度工作原理 ...	084
3.2.3	热轧宽带钢产品的板形质量要求	059	3.6.2	CVC 热轧工作辊辊形改进与应用	086
3.2.4	热轧主要机型与控制性能分析	062	3.6.3	CSP 薄板坯连铸连轧 CVC 轧机板形调控特性	096
3.2.5	热连轧机机型设计配置	063	3.7	控制不均匀磨损的日本 K-WRS 轧机	100
3.3	电工钢高温变形本构关系	065	3.7.1	K-WRS 长行程窜辊工作原理	100
3.3.1	电工钢热模拟试验	065	3.7.2	K-WRS 轧机不均匀磨损控制效果	101
3.3.2	电工钢高温热力学行为	066	3.8	控制不均匀变形和不均匀磨损的中国 ASR 轧机	104
3.3.3	电工钢完整轧制过程本构关系	070	3.8.1	ASR 非对称自补偿轧制工作原理	105
3.4	电工钢薄板热轧轧辊磨损特征与预报模型	073	3.8.2	电工钢热轧板形控制的 ASR 技术	106
3.4.1	薄板坯连铸连轧轧辊磨损特征与辊形评价	074	3.8.3	宽幅电工钢热轧板形控制	114
3.4.2	电工钢热轧工作辊磨损预报模型	078	3.8.4	电工钢“批量同宽”自由规程轧制板形控制	118
3.5	电工钢制造主要工艺流程与自由规程轧制板形控制策略	081	3.9	新一代热连轧机电工钢板形控制融合集成效应	124
3.5.1	电工钢制造轧制变形主要工艺流程	081	3.9.1	电工钢板形控制的多种方法与装置	124
3.5.2	电工钢自由规程轧制板形控制策略	082	3.9.2	电工钢板形控制融合集成效应	130
3.6	控制不均匀变形的德国 CVC 轧机	084			

第4章 薄板坯热连轧过程轧制界面氧化与润滑

4.1	轧制界面氧化与润滑概述	132		评价指标	150
4.1.1	高温氧化	133	4.3.3	轧制润滑原理	154
4.1.2	轧制润滑	135	4.3.4	轧制润滑对轧制过程的影响	156
4.2	轧制界面的氧化	135	4.3.5	轧制润滑工艺在热轧生产中的应用	157
4.2.1	轧辊的氧化	136	4.3.6	未来轧制润滑的发展方向	162
4.2.2	带钢的氧化	137	4.4	轧制界面的实验与仿真分析方法	162
4.2.3	氧化铁皮在热轧界面的接触特性	139	4.4.1	轧制界面的实验研究方法	162
4.2.4	氧化铁皮的控制与利用	140	4.4.2	轧制界面氧化计算模型	164
4.3	热连轧过程的轧制润滑	142	4.4.3	轧制润滑计算模型	166
4.3.1	热轧润滑剂的分类	142			
4.3.2	润滑剂在热轧应用过程中的				

第 5 章 薄板坯连铸连轧主要设备与技术

5.1 薄板坯连铸主要设备与关键技术	169	5.3.2 自由规程轧制板形控制技术	178
5.1.1 结晶器关键技术	169	5.3.3 半无头轧制技术	184
5.1.2 液芯压下技术	174	5.3.4 无头轧制技术	187
5.2 薄板坯连铸连轧均热设备与技术	176	5.3.5 铁素体轧制技术	189
5.3 薄板坯轧机配置与轧制关键技术	177	5.4 薄板坯轧后控冷设备	195
5.3.1 粗轧和精轧机组	177	5.5 高速飞剪和卷取机	195
		5.5.1 高速飞剪	196
		5.5.2 卷取机	196

第 6 章 薄板坯连铸连轧轧后控制冷却技术

6.1 轧后控制冷却机理	198	6.3.3 轧后冷却终冷温度的影响	203
6.2 控制冷却方式	198	6.4 冷却过程温度场计算模型	203
6.2.1 幕状层流冷却	199	6.4.1 控制方程	204
6.2.2 管层流冷却	199	6.4.2 初始条件	204
6.2.3 超快速冷却	200	6.4.3 边界条件	204
6.2.4 冷却装置采用的新技术	201	6.4.4 相变潜热	205
6.3 冷却工艺参数对钢材强韧性的影响	202	6.4.5 热物性参数确定	205
6.3.1 轧后冷却速度的影响	202	6.5 层流冷却的冷却策略	206
6.3.2 轧后开冷温度的影响	203	6.6 层流冷却的控制策略	207

第 7 章 薄板坯连铸连轧生产线

7.1 国外薄板坯连铸连轧生产线概览	209	7.3.4 唐钢 UTSP 超薄热带生产线	221
7.2 我国薄板坯连铸连轧生产线概览	211	7.3.5 马钢 CSP 生产线	224
7.3 我国代表性 TSCR 生产线	212	7.3.6 鞍钢 ASP 生产线	226
7.3.1 珠钢 CSP 生产线	212	7.3.7 涟钢 CSP 生产线	230
7.3.2 邯钢 CSP 生产线	216	7.3.8 武钢 CSP 生产线	232
7.3.3 包钢 CSP 生产线	219	7.3.9 日钢 ESP 生产线	235
		7.4 薄板坯连铸连轧生产线发展趋势	237

结 束 语	239
参考文献	240

薄板坯连铸连轧发展概述

1.1 连铸和连铸连轧技术

TSCR 薄板坯连铸连轧生产线自 1989 年在美国纽柯钢铁公司克劳福兹维尔厂和 1992 年在意大利阿莱德公司克雷莫纳厂投产问世以来,引起全世界冶金界的高度重视,因其显著的经济效益、优越的产品质量而得到飞速发展^[1]。“连铸连轧”是指由连铸机生产出来的高温无缺陷坯,无需清理和再加热(但需经过短时均热和保温处理)而直接轧制成材,这样把“铸”和“轧”直接连成一条生产线的工艺流程就称为连铸连轧,国外把这种技术亦称作 CC-DR 连铸坯直接轧制(Continuous Casting and Direct Rolling)技术。

基于能源、经济、质量、环保和生产周期等诸方面的原因,连铸连轧都显示出了无比的优越性。从热送热装,或者连铸连轧工艺角度分析,连铸坯更有利于实现热送热装和直接连铸连轧,从而可以大大地节约能源^[2,3]。例如,将室温下的钢加热到 1250℃ 所需有效热量大约为 48.7MJ/t。若重油发热值为 2.33MJ/kg,炉子效率为 50%,则吨钢油耗达 41.6kg;若炉子效率为 30%,则吨钢油耗达 49.4kg。若热装温度提高 100℃,则可分别节油 3.27kg/t 和 5.66kg/t,足见热送热装的节能效果是非常显著的。加热炉的效率越低,节能效果越明显。目前连续式加热炉的效率多为 50% 左右。同时,加热炉采用热装时,在一定措施的前提下,还可以减少氧化损失 0.5%~1.0%。因此,自从 20 世纪 50 年代出现连铸工艺伊始,连铸坯直接轧制的思想就已经被提了出来。

常规连续铸钢的最早提出者可以追溯到美国炼钢工程师亚瑟(B. Atha)和德国工程师达勒恩(R. M. Daelen),前者于 1886 年采用底部敞口、垂直固定的厚壁铸铁结晶器,并与中间包相连,进行间歇式拉坯;后者于 1887 年采用固定式水冷薄壁同结晶器,进行连续拉坯,带有二次冷却、飞剪切割和引锭杆垂直贮放装置。近终形连铸的节能、简化流程、降低成本等优势不言而喻,而质量提高、产品高端化和生产能力(速度优势)发挥令人鼓舞,英国冶金学家亨利·贝塞麦(Henry Bessemer)早在 1856 年提出双辊薄带铸机的概念,并预言直接浇铸薄带可能是未来板材生产选取

的技术方法^[4,5]。

20 世纪 50 年代,连续铸钢步入工业化应用,全世界共建造了 40 台连铸机,机型主要是立式,只有 25% 是立弯式,连铸设备设计主要由德国人容汉斯(Siegfried Junghans)、美国人罗西(Irving Rossi)和原苏联巴尔丁(Ivan P. Bardin)等完成。容汉斯于 1933 年提出结晶器振动的专利,最初将其用于连铸黄铜;罗西基于容汉斯振动结晶器专利开发的连铸技术掀起一场钢厂转变生产流程的革命,并使短流程(指电炉+连铸,即 Minimill)成为可能,罗西被誉为“短流程钢厂之父”。此外,他在 20 世纪 50 年代初还最先提出非正弦振动和漏斗结晶器的专利,为后来这些技术的应用和发展打下基础。连铸步入工业化的头十年间世界共有 40 台连铸机投产,其中 22 台源于容汉斯和罗西两人的技术设计,被尊称为“现代连续铸钢技术的奠基者”。到 1960 年,世界连铸钢的产量为 115 万吨,连铸比仅为 0.34%。这主要是因为当时钢产量的 80% 为平炉钢,而电炉和转炉钢只占 10%。电炉钢的产量较低,只有这些钢厂才易于连铸匹配,因此初期的连铸设备都配备在电炉钢厂,规模很小。1952 年,德国人萨波尔(O. Schaber)提出弧形连铸概念,并申请了德国专利(DP1.025.578),为连铸的未来发展奠定了重要基础。50 年代以来,连续铸钢工业化应用的出现和飞速发展,是推动钢铁工业生产的巨大动力,同时也使钢铁厂从生产模式到钢厂结构发生了深刻的变革^[5-7]。国际连铸界著名的冶金学者奥地利沃尔夫 M. Wolf 博士(1937~2001)在 1992 年国际钢铁协会于加拿大多伦多举行的第 75 届炼钢会议上的著名专题报告《连铸历史》中提出世界连铸技术发展上有“十三位做出突出贡献的先驱者”(见图 1-1),按出生年份排列分别是:原苏联巴尔丁 Ivan P. Bardin (1883~1960),德国容汉斯 Siegfried Junghans (1887~1954),美国罗西 Irving Rossi (1889~1991),原苏联巴依琴科 Mikhail Stepanovich Boichenko (1890~1967),意大利科罗姆波 Enzo Colombo (1905~1990),日本牛岛清人 Toshiro Onaka (1911~1995),中国徐宝陞 (1912~2007),奥地利塔曼 Bruno Tarmann (1914~1984),瑞典奥尔松 Erik Allan Olsson (1916~1991),英国哈利戴 Iain Halliday (1918~1975),美国籍匈牙利人罗可普 Joseph Rokop (1924~),德国施莱维 Hans F. Schrewe (1925~)和法国巴尔比 Jacques Barbé (1934~)等,均对连铸技术的发展做出了突出贡献。

1989 年 7 月美国纽柯钢铁(Nucor Steel)公司克劳福兹维尔厂采用 CSP 技术投产了世界上第 1 条薄板坯连铸连轧生产线,标志着薄板坯连铸连轧技术在世界上首次实现了工业化生产,主要生产 40~70mm 厚的板坯,年产热轧卷 80 万吨。20 世纪 90 年代以来,近终形连铸技术与装备得到迅速发展,如 CSP、FTSC 生产线和 H 型坯连铸机等;2006 年在美国印第安纳州的美国纽柯钢铁(Nucor Steel)公司克劳福兹维尔厂建成第一台生产型双辊薄钢带铸机。该机最大浇铸(0.7~2.0)mm×2000mm 的钢带,铸速 80~150mm/min,设计能力 50 万吨/年。贝塞麦 150 年前的一个伟大的技术预言梦想成真。

我国是世界上开发和应用连续铸钢技术较早的国家之一。20 世纪 50 年代中期就开始了连铸方面的研究试验工作:1957 年,当时的上海钢铁公司吴大柯先生主持设计的立式连铸机,浇铸了我国第一根连铸钢——断面尺寸为 75mm×180mm 小方坯;60 年代,我国连铸技术的开发和应用更是掀起了一股高潮,1960 年 9 月,北京科技大学徐宝陞教授设计的世界上第一台弧形连铸机在大学附属试验工厂试验成功,浇铸



S. Junghans



I. Rossi



I. P. Bardin, M. S. Boichenko



E. Colombo



T. Onaka



徐宝陞



B. Tarmann



E. A. Olsson



I. M. D. Halliday



J. Rokop



H. P. Schrewe



J. Barbé

图 1-1 连铸历史上做出突出贡献的十三位先驱者

出了 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 方坯，1964 年 6 月在重钢三厂投产了世界上第一台工业生产型板坯和方坯两用的“1700 弧形连铸机”，可浇铸断面为 $180\text{mm} \times (1200 \sim 1500)\text{mm}$ 的板坯或三流 $180\text{mm} \times 250\text{mm}$ 的大钢坯；1990 年 10 月，钢铁研究总院主持的我国第一台薄板坯连铸坯试验机在兰钢建成，成功拉出中国第一块 $50\text{mm} \times 900\text{mm}$ 铸坯；20 世纪 90 年代，我国轧钢系统完成了从模铸到连铸的改造，实现了 100% 的连铸比；2005 年马钢成为中国首次采用 CSP 薄板坯连铸连轧短流程工艺成功轧制出第一批 MG-W600 无取向电工钢热轧卷。典型的模铸和连铸工艺供坯的轧钢系统平面布置如图 1-2 所示。

由图 1-2 可知，连铸钢的出现和发展，大大地缩短了钢铁制造工艺流程，极大地简化了轧钢生产的工艺系统，与传统的模铸坯-初轧开坯相比，连铸-热连轧工艺省去

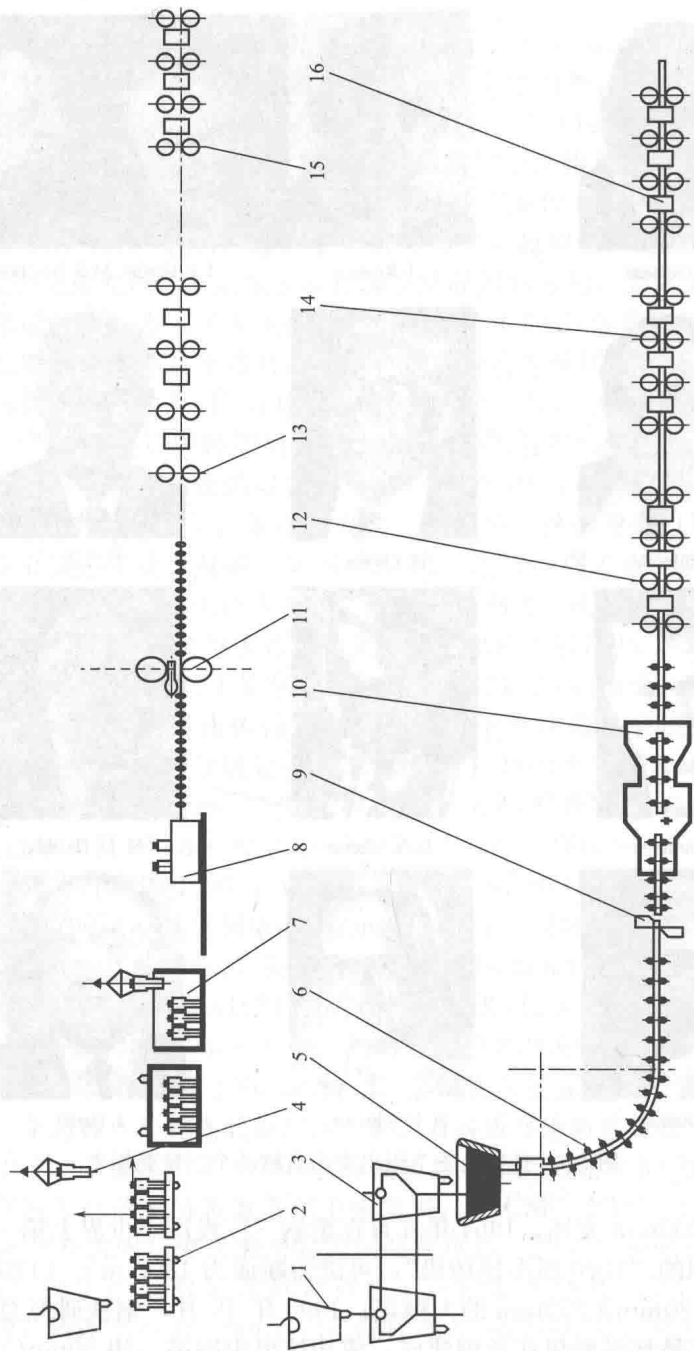


图 1-2 从钢坯（锭）到轧材两种生产流程的比较

- 1—钢包；2—铸锭车；3—双臂回转架；4—钳式吊车；5—中间包；6—弧形连铸机；7—均热炉；
8—运锭车；9—剪断机；10—加热炉；11—初轧机；12—粗轧机组；13—第一钢坯连轧机组；
14—中轧机组；15—第二钢坯连轧机组；16—精轧机组

了脱模、整模、均热初轧和连轧开坯等一系列工艺和相应的设备。这不仅明显节省了能耗，而且可显著减少设备投资和生产运行成本^[7-9]。

连铸连轧生产是综合近年来炼钢、连铸和轧钢的最新成果而发展起来的一项新的钢铁生产方式,其重要标志是连铸坯热送热装和连铸—直接轧制技术。近终形连铸,即接近最终产品形状的连铸技术,是连铸连轧生产过程的第一道工序,开发近终形连铸与轧钢系统直接连接而构成连铸连轧生产线,可以更明显地简化轧钢生产系统生产过程、降低吨钢设备投资和生产费用、加速流动资金周转和节约能源^[10-11]。同时连铸连轧工艺的开发带来了意想不到的收获,实现了不能或者难轧材料的生产,获得了控制材料性质的新的方法。与传统常规热连轧方式相比,轧制设备投入节省约30%,动力和能耗节省约50%,吨钢成本下降了185~370元。

连铸和连轧生产的连接形式主要有4种。

(1) **CC-HCR 连铸—热送装炉轧制** CC-HCR 连铸—热送装炉轧制 (Continuous Casting-Hot Charge Rolling) 是指将高温无缺陷铸坯或经过高温热清理后的铸坯,离线装入存储保温坑(池),然后再按照轧制计划从保温坑(池)调坯,装入加热炉内(装炉温度400~700℃)加热,再进行轧制。

(2) **CC-DHCR 连铸—直接装炉轧制** CC-DHCR 连铸—直接装炉轧制 (Continuous Casting-Direct Hot Charge Rolling) 是指将高温无缺陷铸坯或经过高温热清理后的铸坯,按出坯顺序,直接装入加热炉内(装炉温度700~1000℃)加热,再进行轧制。

(3) **CC-DR 连铸—直接轧制** CC-DR 连铸—直接轧制 (Continuous Casting-Direct Rolling) 是指将高温无缺陷铸坯或经过高温热清理后的铸坯(铸坯温度约1100℃),按出坯顺序,不经过加热炉加热(只经铸坯边角部温度补偿)就直接进行轧制。CC-DR又可分为连铸—不切断直接轧制和连铸—切断直接轧制两种轧制形式。连铸—不切断直接轧制指轧制前连铸坯不切断,即轧制与连铸实行同期同步在线连接。

(4) **CC-CCR 连铸—冷坯装炉轧制** CC-CCR 连铸—冷坯装炉轧制 (Continuous Casting-Cold Charge Rolling) 是指将高温无缺陷铸坯或经过高温热清理后的铸坯,以及需低温清理后的铸坯,离线装入存储仓库,然后再按照轧制计划从仓库调坯,装入加热炉内(装炉温度为室温)加热,再进行轧制。

在CC-CCR和CC-HCR方式的生产过程中,连铸—连轧生产间设有缓冲仓库或保温坑(池)的库存进行工序间的缓冲,可使炼钢、连铸和连轧工序独立编制生产作业计划,进行相对独立的生产。因此在发生设备故障或其他事故时,就有可能单独处理,使其影响几乎只限于该工序。但这两种方式由于中间有库存缓冲,生产周期长,在制品库存量大,仍属于传统炼钢、轧钢生产工艺下的组织方式,降低了连铸—连轧生产过程连续化程度和节能效果,影响了连铸—连轧生产技术的充分发挥。CC-DHCR生产方式的主要优点是:连铸与连轧没有同步要求,并可利用加热炉进行生产节奏缓冲,减少了工序间的相互牵连程度,因此灵活性强,作业率高;可实现多流多机连铸共用轧机,以充分发挥轧机的能力;通过加热、均温,促使铸坯塑性改变和变形均匀,有利于产品质量的提高,与连铸—离线轧制相比,提高了连铸—连轧生产的连续化程度和节能效果。但由于多流多机连铸共用轧机,增大了设备操作和生产物流管理的复杂性和难度。

CC-DR 连铸—不切断直接轧制方式的主要优点是:生产过程连续化程度高,可

实现无头轧制,增大轧材卷重,使连铸—连轧生产的优点更为突出。但这种同期同步轧制生产缺点同样明显:铸轧同步增加了操作技术的复杂性和难度;铸坯不切断使铸机与轧机联结成一体,大大降低了轧制机组的作业率,影响了铸机与轧机的能力发挥;轧制速度低,使轧辊热负荷过大,易使辊面灼伤、龟裂,影响轧辊寿命,增加了换辊时间。CC-DR 连铸—切断直接轧制克服了不切断直接轧制带来的一些严重问题,其主要优点是:与铸轧同步直接轧制相比铸轧相互牵连少,灵活性强,作业率高;可实现多流多机连铸共用轧机,以充分发挥轧机的能力;与连铸—离线轧制相比,提高了连续化生产的连续化程度和节能效果。但它由于采用多流多机连铸共用轧机,增大了设备操作和生产物流管理的复杂性和难度。1999 年 8 月,我国珠钢采用 CSP 技术投产了第 1 条薄板坯连铸连轧生产线,即是采用 CC-DR 连铸—切断直接轧制方式。

在过去的 20 年中,美国与中国的钢铁工业分别引领了前 2 个 10 年国际薄板坯连铸连轧技术的发展。第 1 个 10 年以美欧为主,美国则主要以电炉流程为主;第 2 个 10 年以中国为主,主要以转炉流程为特点,同时铸坯厚度向 70~90mm 发展。目前我国已成为世界上薄板坯连铸连轧产量最大的国家,中美两国随后相继投产多条连铸连轧生产线,且其薄板坯连铸连轧产量占全世界产量一半以上。以节能降耗、降低生产成本著称的薄板坯连铸连轧生产线的年生产规模一般为 50 万~250 万吨:当设置一台薄板坯连铸机与热连轧机相配时,视铸坯厚度、宽度及轧制成品以及冶炼工序炉容量及座数的配置;当二台薄板坯连铸与热连轧相配时,一般年产量约在 150 万~250 万吨;有关设置三台薄板坯连铸机与热连轧机相配,拟更进一步扩大生产规模的设计,目前少有生产实践和资料报道。TSCR 薄板坯连铸连轧生产线发展的初衷主要是为了降低投资和生产成本,近 20 余年的快速发展和不断完善成熟,TSCR 薄板坯连铸连轧技术已成为支撑钢铁作为应用极为广泛的最为重要的功能结构材料的非常重要的生产方式之一。

1.2 薄板坯连铸连轧主要技术特点

20 世纪 70 年代世界第一次能源危机之后,钢铁工业面临各方面的结构调整,在推进钢铁企业大型化、全球化的同时,钢铁工业迫切需要新的工艺和装备,改变传统生产流程,实现技术结构优化,以提高竞争能力、适应市场变化和增加经济效益。TSCR 薄板坯连铸连轧技术的出现,适应了这种客观形势的需要。薄板坯连铸连轧是 20 世纪 80 年代末开发成功的生产热轧板卷的一种全新的短流程工艺,是近 30 年来世界钢铁工业取得的重要技术进步之一,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的新技术。

1989 年 6 月,美国纽柯钢铁公司克劳福兹维尔厂采用德国 SMS 公司的 CSP 生产工艺技术建成投产世界上第 1 条 TSCR 薄板坯连铸连轧生产线,标志着薄板坯连铸连轧技术在世界上首次实现了工业化生产。近年来,随着薄板坯连铸连轧生产线总体技术的不断进步,TSCR 技术引起全世界钢铁界的高度关注,发展非常迅猛,中国已成为世界上薄板坯连铸连轧产能和产量最高的国家。

与常规热连轧板生产工艺技术相比,薄板坯连铸连轧技术具有如下主要特点。

(1) 工艺简化、设备减少和生产线短 采用连轧是生产薄板带的主要发展趋势。常规宽带钢热连轧（相对连铸连轧）的生产工艺过程主要包括原料准备推钢机、加热炉、出钢机或板坯拖出机、立辊轧机、一至四架粗轧机、保温罩或热卷箱、七架精轧机、层流冷却系统及卷取机等，具体工艺流程可参见图 1-3。

薄板坯连铸连轧的生产工艺过程主要设备包括连铸机、辊底式隧道炉、液压事故剪、高压水除鳞箱、立辊轧机、七架精轧机或一至二架粗轧机和五架精轧机、快速冷却系统和层流冷却装置、飞剪、地下卷取机等，具体工艺流程见图 1-4^[8]。

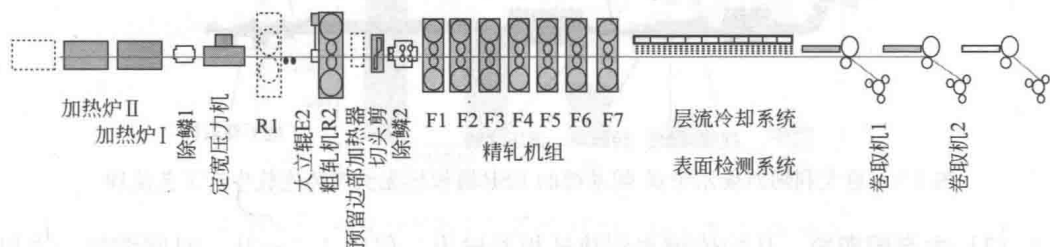


图 1-3 武钢 2250 大型常规宽带钢热连轧机生产工艺流程

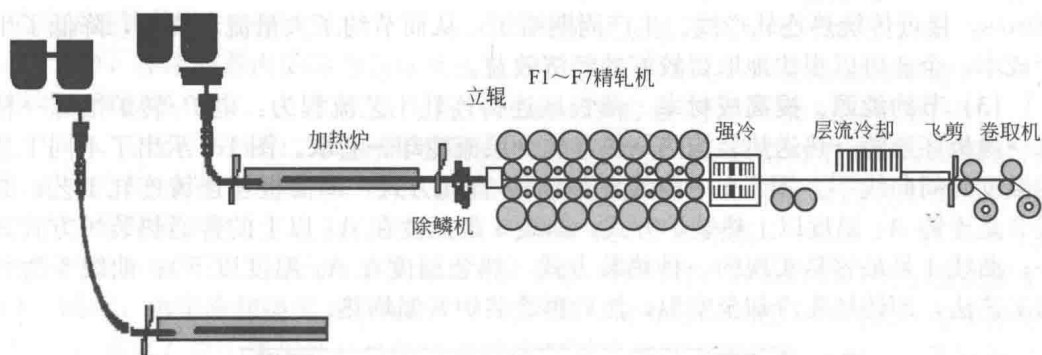


图 1-4 马钢 1800CSP 薄板坯连铸连轧生产工艺流程

与常规热轧板生产工艺技术相比，TSCR 省去了粗轧和部分精轧机架，生产线长度一般为 370m 左右，较常规热连轧机生产线 500m 以上的生产线长度明显缩短。例如，荷兰霍戈文 Hoogovens 的 ISP 生产线长度为 365m，日本第二代 Sumitomo 的 QSP 生产线长度为 377.2m；有时可缩短为仅 200m 多甚至更短，如意大利阿西埃尔里亚-阿莱德 ESP 生产线是世界上第一条无头带钢生产线（见图 1-5），它是在德马克公司的 ISP 技术基础上开发的，ESP 无头带钢生产以连续不间断的生产工艺通过薄板坯连铸连轧设备从钢水直接生产出热轧带卷，整条生产线设备极为紧凑，省去了重复穿带各个轧钢机架的操作，全厂仅 180m；我国山东日照钢厂 2014 年和 2015 年新投产的 2 条 ESP 产线，整条生产线更加紧凑高效，全长仅 125m，其主要技术特征是：采用无头轧制技术、3+5 个机架、恒速轧制、产品最薄厚度为 0.8mm，在线感应均热技术，80mm 铸坯最高拉速为 6.0m/min，单流年产量 255 万吨。由于市场对产品的品种及规格的要求不断提高，新的短流程生产线相应增加精轧机机架数量或是配置了 1~2 架粗轧机组，这更加有利于增加结晶器出口铸坯厚度、改善薄板坯结晶器的

传热和润滑状况，从而有可能以更高的效率，生产高质量、多品种、薄规格的产品。总之，工艺简化、设备减少和生产线短的薄板坯连铸连轧生产线大幅度降低了基本建设投资，缩短了建设工期，使得吨钢投资下降 19%~34%，可较快地投产并发挥投资效益。

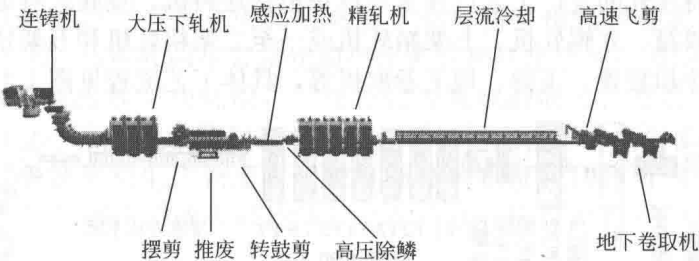


图 1-5 意大利阿西埃尔里亚-阿莱德的 ESP 薄板坯无头连铸连轧生产工艺流程

(2) 生产周期短 从冶炼钢水到热轧板卷输出，仅需 1.5~2h，时间缩短一半以上；采用半无头轧制技术或无头轧制技术的薄板坯连铸连轧机组轧制速度有较大幅度的提高并采用升速轧制工艺，如湖南华菱涟钢和马钢的 CSP 产线最高轧制速度达 22m/s，接近传统热连轧产线。生产周期缩短，从而节约了大量流动资金，降低了生产成本，企业可以很快地取得较好的经济效益。

(3) 节约能源，提高成材率 薄板坯连铸连轧工艺流程为：电炉/转炉冶炼→精练→薄板坯连铸→热送热装均热→热连轧→层流冷却→卷取。图 1-6 示出了不同工艺的温度时间曲线^[9]。图 1-6 中曲线 1 是连铸-直轧方式，即薄板坯连铸连轧工艺；曲线 2 是连铸-A₃ 温度以上热装炉方式；曲线 3 是温度在 A₁ 以上的普通热装炉方式之一；曲线 4 是最容易实现的一种热装方式（热装温度在 A₁ 温度以下）；曲线 5 为普通工艺法，即铸坯先冷却至室温，然后再冷装炉升温均热。

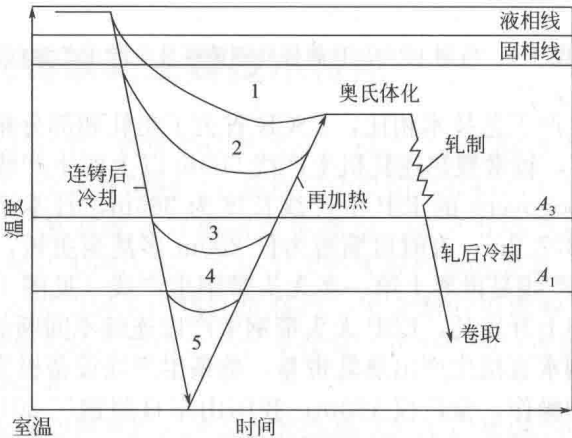


图 1-6 连铸连轧方式示意图

薄板坯连铸连轧工艺技术（曲线 1）与传统的冷装工艺技术（曲线 5）和热装工艺（曲线 3 和曲线 4）相比较，可明显节约能源。由图 1-7 可看到：CSP 薄板坯连铸连轧机组吨钢能耗比传统厚板坯机组的冷送冷装工艺降低了 62.5%，比厚板坯机组