

Advanced Technology of
Materials Forming

现代材料成形 新技术

徐光 常庆明 陈长军 编著



化学工业出版社

武汉科技大学材料与冶金学院和钢铁冶金与
资源利用省部共建教育部重点实验室资助

Advanced Technology of Materials Forming

现代材料成形 新技术



冶金工业出版社



化学工业出版社
· 北京 ·

元 00.85 价 定

本书主要介绍材料成形领域中发展很快或者是极具发展前景的新技术,包括薄板坯连铸连轧技术,双辊薄带铸轧技术,金属低温变形技术,超级钢的制备技术,半固态成形、挤压铸造成形等铸造新技术,激光、电子束加工新技术,以及电火花加工、超声波加工、离子束加工、化学研磨等特种加工技术。

本书适宜从事材料成形工作的技术人员以及高等院校材料专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代材料成形新技术/徐光,常庆明,陈长军编著.
北京:化学工业出版社,2009.10
ISBN 978-7-122-06279-6

I. 现… II. ①徐…②常…③陈… III. 工程材料-成形-新技术 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 118446 号

责任编辑:邢 涛
责任校对:吴 静

装帧设计:杨 北

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:北京市彩桥印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张 10 $\frac{3}{4}$ 字数 218 千字 2009 年 9 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:28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

材料在人类社会文明和发展中起着非常重要的作用，材料科学与技术的发展推动着社会的进步。随着科学技术的进步，材料成形技术也在不断更新和发展，使材料性能不断增强，新材料不断涌现。

材料的种类很多，包括金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料等大类，相应的材料成形和制备技术也不相同。本书内容以金属材料成形新技术为主。金属材料成形与制备新技术包括连铸连轧、薄带铸轧、半固态凝固、挤压铸造、激光加工、电子束加工、电火花加工、超声波加工、水刀切割、离子束加工、化学研磨等。由于篇幅限制，本书只介绍几种主要的金属加工新技术。

本书由武汉科技大学材料与冶金学院的徐光、常庆明、陈长军编著，其中第1~4章由徐光编写，第5章由常庆明编写，第7~8章由陈长军编写，全书由徐光定稿。

特别感谢北京科技大学田乃媛教授对本书的支持和帮助。

本书的出版得到武汉科技大学材料与冶金学院和钢铁冶金与资源利用省部共建教育部重点实验室的资助，编者在此表示衷心的感谢！

徐光
2009年7月

目 录

1 薄板坯连铸连轧	1
1.1 概述	1
1.2 薄板坯连铸连轧的典型工艺	3
1.2.1 CSP 工艺	3
1.2.2 FTSRQ 工艺	10
1.2.3 ISP 工艺	15
1.2.4 CONROLL 工艺	17
1.2.5 ASP 工艺	17
1.2.6 几种主要 TSCR 工艺与传统流程的比较	20
1.3 世界和中国薄板坯连铸连轧生产线概况	20
1.3.1 薄板坯连铸连轧生产线类型和产能统计	20
1.3.2 中国薄板坯连铸连轧生产线	22
1.4 薄板坯连铸连轧的发展趋势	26
参考文献	29
2 双辊薄带铸轧	30
2.1 双辊薄带铸轧技术国外研究进展	31
2.1.1 美国 Nocor 公司的 Castrip 工程	31
2.1.2 欧洲的 Eurostrip 工程	34
2.1.3 新日铁和三菱重工业公司的双辊薄带连铸技术	36
2.1.4 浦项公司与戴维公司共同开发的薄带连铸机	37
2.1.5 英国钢铁公司的带钢连铸技术	37
2.2 双辊薄带铸轧技术国内研究进展	37
2.2.1 Baostrip 工艺	38
2.2.2 铸态带钢质量	39
2.3 双辊薄带铸轧关键技术	40
2.4 双辊薄带铸轧研究热点	42
2.4.1 双辊铸轧工艺与森吉米尔轧机联合生产冷轧极薄硅钢	42
2.4.2 用双辊铸轧法生产高磷铜含量钢板	43
2.4.3 双辊铸轧工艺与二次轧制联合生产镁合金薄带	43
参考文献	44
3 金属低温变形技术	45
3.1 金属低温变形的产生	45

3.2	国内外研究现状	47
3.3	铁素体轧制	48
3.3.1	铁素体轧制的产生	48
3.3.2	铁素体轧制的定义	48
3.3.3	铁素体轧制适用条件	49
3.3.4	铁素体轧制产品组织和性能特点	50
3.3.5	铁素体轧制工艺的优势	50
3.3.6	铁素体轧制工艺制度	50
3.4	国内外铁素体轧制生产情况	51
	参考文献	52
4	超级钢的制备技术	54
4.1	概述	54
4.1.1	我国钢铁材料的现状	54
4.1.2	钢铁材料的发展趋势	55
4.1.3	超细晶粒钢的研究	57
4.2	金属晶粒尺寸的基本概念	58
4.3	超级钢性能与制备	61
4.3.1	超级钢的性能	62
4.3.2	超级钢的制备	64
4.4	超级钢的研究方向	66
	参考文献	67
5	铸造新技术	69
5.1	半固态成形技术	69
5.1.1	半固态成形技术概述	69
5.1.2	半固体金属坯料的制备	72
5.1.3	半固态金属的组织特性与形成机制	74
5.1.4	铝合金的半固态凝固组织及其影响因素	77
5.1.5	半固态金属的力学行为	78
5.1.6	半固态成形工艺	80
5.1.7	半固态成形技术研究开发动向	88
5.2	挤压铸造成形技术	88
5.2.1	挤压铸造概述	88
5.2.2	挤压铸造工艺特点及应用	89
5.2.3	工艺方法分类	92
5.2.4	挤压铸造工艺参数	94
5.2.5	挤压铸造设备	96
5.2.6	挤压铸造合金的组织与性能	100
5.2.7	挤压铸造的发展动向	103

5.3 铸造工艺 CAD/CAE	104
5.3.1 铸造工艺 CAD	104
5.3.2 铸造工艺 CAE	110
参考文献	121
6 激光加工与电子束加工新技术	123
6.1 激光加工原理	123
6.2 激光加工设备	125
6.3 激光加工的特点	127
6.4 激光加工的应用	128
6.4.1 激光打孔	128
6.4.2 激光焊接	130
6.4.3 激光切割	133
6.4.4 激光表面改性热处理	135
6.4.5 激光打标	137
6.4.6 激光快速成形	138
6.4.7 其它应用	141
6.5 电子束加工原理	141
6.6 电子束加工的特点	141
6.7 电子束加工的应用	142
6.7.1 电子束打孔	142
6.7.2 电子束切割	143
6.7.3 光刻	143
6.7.4 电子束焊接	143
6.7.5 电子束热处理	147
参考文献	147
7 特种加工	148
7.1 电火花加工	148
7.1.1 电火花加工的基本原理	148
7.1.2 电火花加工的工艺特点	150
7.1.3 电火花线切割加工	150
7.1.4 电火花穿孔	152
7.1.5 电火花型腔加工	153
7.1.6 电火花表面强化	154
7.2 超声波加工	156
7.3 超高压水射流切割加工	159
7.4 离子束加工	161
7.5 化学研磨	163
参考文献	163

1 薄板坯连铸连轧

1.1 概述

金属材料是国民经济和社会发展中的一种重要材料，金属材料的成形方式主要有轧制、锻压、铸造、冲压等，其中轧制是金属材料最重要的加工方式，经轧制加工成形的金属材料包括板带材、型材、管材等，广泛地应用于国民经济各行业。2008 年我国钢铁产量超过 5 亿吨，主要是经轧制加工成形的。对于工业化国家，板带材是产量最多的钢材，板带材的比例也是衡量一个国家国民经济发展水平的标志。同时，世界上大型钢铁企业也是以生产板带材为主的，比如我国的宝钢、鞍钢、武钢、首钢等大型国有钢铁企业都是以板带材为主要产品。经过 100 多年的发展，到 20 世纪 80 年代末期，热连轧板带的生产工艺已经发展为成熟的厚板坯连铸（Casting）+ 热连轧（Hot Continuous Rolling）的生产工艺，如图 1.1 所示。



图 1.1 传统的厚板坯连铸连轧生产工艺

图 1.1 所示的生产工艺称为带钢传统热连轧，或者称为长流程，连铸和轧制分为两个独立的厂区，连铸厂首先将钢水浇注成厚度为 200~250mm 的厚板坯，然后进行表面清理，清理后的连铸坯输送到热连轧厂板坯库，钢坯在热连轧厂热装（温度一般在 A_{r1} 以下），或者冷送入再加热炉（reheat furnace），钢坯在加热炉内加热到出炉温度，出炉后的钢坯首先经粗轧机（rougher）进行可逆轧制（reverse rolling），粗轧后的中间坯经中间辊道保温后，直接输送到精轧机组（finishing train）中进行轧制，精轧后的带钢经层流冷却（laminar cooling）冷却到卷曲温度（coil temperature）卷曲成卷。传统热连轧精轧机组一般由七个四辊轧机组成，根据粗轧机不同的布置，可把传统热连轧分为全连续、半连续、3/4 连续等几种不同的形式。

随着世界能源供应的日趋紧张，20 世纪 80 年代，著名的冶金设备制造商德国 SMS 公司研发了一种与传统流程不同的热连轧生产工艺，即薄板坯连铸连轧（Thin Slab Casting and Rolling）工艺，简称 TSCR 工艺，该工艺的显著特点是将原先分离的连铸和热连轧两个独立的生产工序紧密结合在一起，缩短了生产工艺流

程，提高了生产效率，降低了吨钢能耗。世界上第一条 TSCR 生产线于 1989 年在美国 Nocor 钢铁公司 Crawfordsville 厂建成投产，该条生产线又称紧凑式薄板坯连铸连轧生产线，即现在众所周知的 CSP（Compact Strip Production）工艺，该生产线工艺流程见图 1.2。

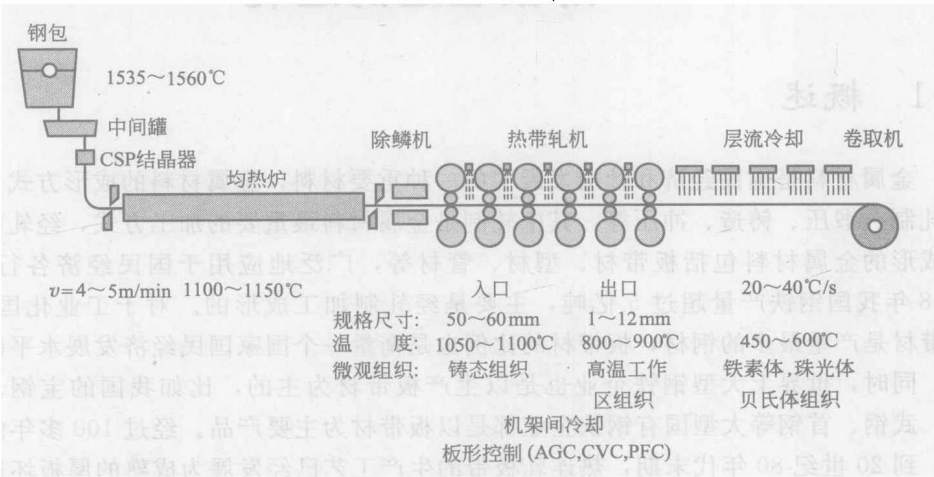


图 1.2 紧凑式薄板坯连铸连轧生产工艺

相对于传统热带生产工艺，薄板坯连铸连轧生产工艺又称为短流程工艺。自美国 Nocor 公司的 CSP 生产线投产以后，TSCR 工艺在世界各地得到了快速发展，经过 30 年的发展，目前世界上已经建成了近 60 条薄板坯连铸连轧生产线，年产量近 1 亿吨，其中，我国建成投产了 14 条生产线，总产量 3000 多万吨，占世界上 TSCR 总产量的 1/3。同时，除 CSP 工艺外，意大利 Danieli 公司、奥地利 VAI 公司等著名的冶金设备制造商先后开发出 FTSR（Flexible Thin Slab Rolling）、CONROLL（CONtinuous ROLLing）等不同的薄板坯连铸连轧生产线。

薄板坯连铸连轧生产工艺与传统流程的比较见图 1.3。

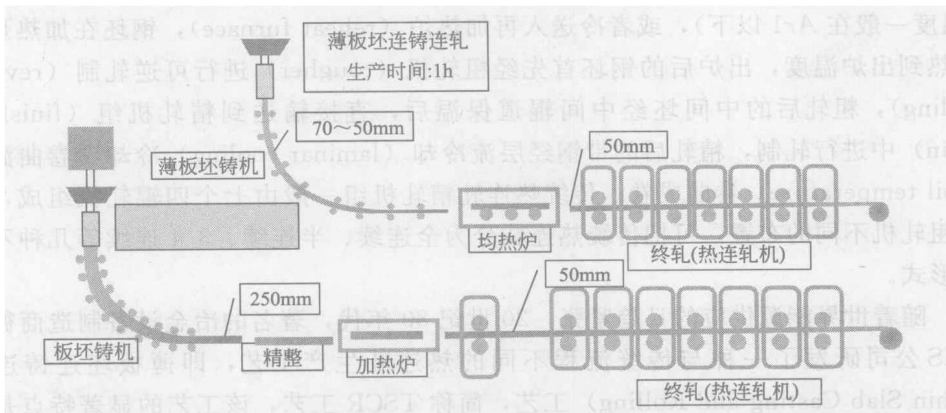


图 1.3 薄板坯连铸连轧生产工艺与传统流程的比较

薄板坯连铸连轧生产工艺已从最初的第一代发展到目前的第二代，目前，正在向第三代发展。由于受产量限制，TSCR 工艺在中型钢铁企业得到了广泛的应用，但随着 TSCR 相关技术的不断完善和发展，越来越多的大型钢铁企业正逐步重视这种短流程工艺，武钢新建的 CSP 生产线将于 2009 年投产，宝钢目前也在积极筹建 CSP 生产线，随着 TSCR 技术的发展，相信在将来这种先进的短流程热带生产工艺将得到更大的发展。

1.2 薄板坯连铸连轧的典型工艺

1.2.1 CSP 工艺

德国西马克公司（SMS）开发出的 CSP 工艺（Compact Strip Production），也称为紧凑式带钢生产工艺，是世界上第一条薄板坯连铸连轧生产工艺。CSP 工艺流程及设备布置见图 1.4。

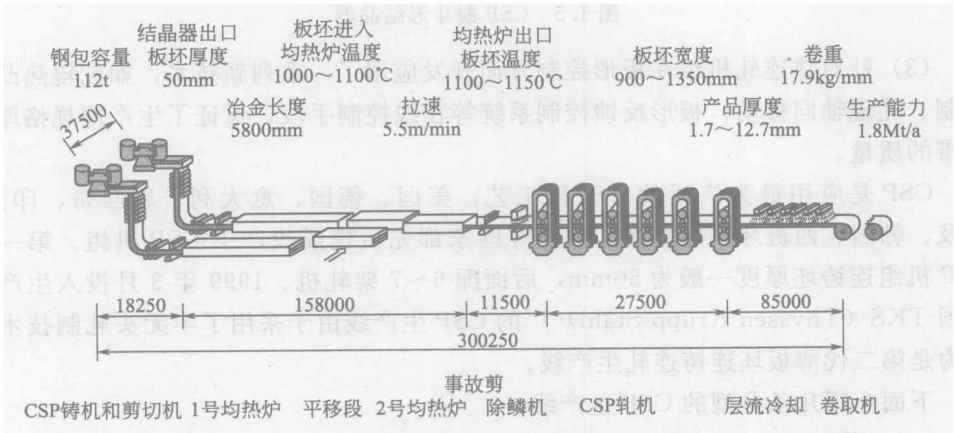


图 1.4 CSP 工艺流程及设备布置

CSP 工艺具有流程短、生产简便稳定，产品质量好、成本低，具有很强的市场竞争力等一系列优点。该 CSP 工艺生产工艺流程为：电炉（转炉）→钢包精炼炉→薄板坯连铸机→均热炉→热连轧机→层流冷却→地下卷取机。从钢水冶炼到钢卷卸卷一般仅需 1.5h，生产成本大大低于传统生产线的成本。

CSP 工艺采用了许多关键技术，保证了生产的正常进行。

(1) 使用漏斗形结晶器（mould）（见图 1.5）这种结晶器上口断面较大，出口处铸坯厚度为 50~70mm，这种结晶器形状可满足保护渣融化、薄板铸坯厚度的需要。

(2) 严格控制钢水质量，提高纯净度。

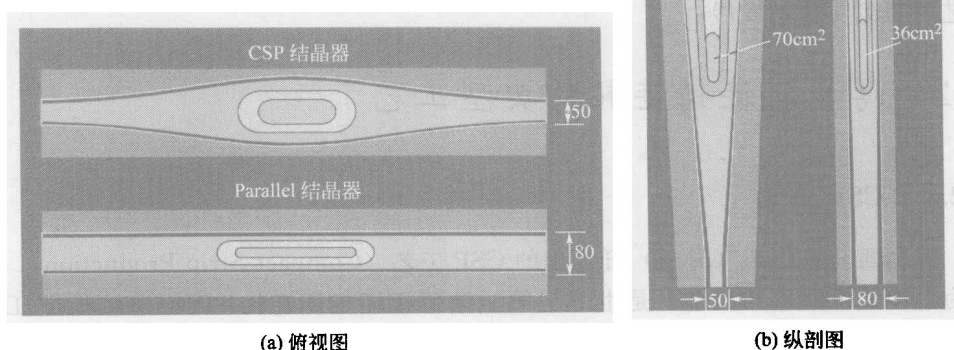


图 1.5 CSP 漏斗形结晶器

(3) 针对热连轧机组在板形控制方面开发应用了一系列新技术，如轧辊热凸度控制、轧辊轴向移动、板形反馈控制系统等在线控制手段，保证了生产薄规格厚度热带的质量。

CSP 是应用最为广泛的 TSCR 工艺，美国、德国、意大利、墨西哥、印度、埃及、韩国、西班牙、加拿大、中国等国家都先后建成投产了 CSP 机组。第一代 CSP 机组连铸坯厚度一般为 50mm，后面配 6~7 架轧机。1999 年 3 月投入生产的德国 TKS (Thyssen Krupp Stahl) 厂的 CSP 生产线由于采用了半无头轧制技术被称为是第二代薄板坯连铸连轧生产线。

下面介绍几条典型的 CSP 生产线。

1.2.1.1 美国 Nocor 钢铁公司 Crawfordswill 钢厂

1989 年 7 月投产的 Nocor I 厂 CSP 生产线布置及主要参数见图 1.3。初建时精轧机为 4 个机架，1996 年增加至 6 个机架，可生产厚度为 1.7~12.7mm 的热轧带卷，机架的增加是为了生产冷轧原料，1996 年冷轧原料量达到 80 万吨/年。该机组主要技术参数见表 1.1。

1992 年 8 月，Nocor 公司又在 Hickman 钢厂建成投产了第二条 CSP 生产线，至 1994 年生产能力达到 220 万吨/年。

1.2.1.2 墨西哥 Hylsa 钢厂 CSP 生产线

1992 年 2 月投产，年初 150 万吨/年。主要设备及工艺参数见表 1.2，生产线布置及有关参数见图 1.6。该生产线可轧制普碳钢、低合金钢、硅钢等，其中 20% 是 0.9~1.0mm 的产品，占领传统的冷轧带钢市场。该生产线的显著特点之一为轧制产品厚度薄。

表 1.1 Nocor I 厂 CSP 主要技术参数

CSP 铸机	生产能力	180 万吨/年
	薄板坯厚度	50mm
	薄板坯宽度	900~1350mm
	薄板坯长度	47m
	钢包容量	112t
	中间罐容量	17t
	拉坯速度	2.5~5.5m/min
	结晶器长度	1100mm
CSP 加热炉	总长度	162mm
	入口温度	平均 950~1050℃
	出口温度	1100℃
CSP 轧机	6 机架,带有液压压下、CVC 技术、精整时控制工作辊弯曲度系统	
	终轧厚度	1.7~12.7mm
	终轧宽度	900~1350mm
	轧制力	30MN
	工作辊尺寸	780×1700mm
	支撑辊尺寸	1350×1500mm
	轧制速度	最大 11.0m/s
地下卷取	带卷半径	最大 1950mm
	带卷重量	最大 24t

表 1.2 Hylsa 钢厂 CSP 主要技术参数

CSP 铸机	流数	2
	薄板坯厚度	50mm
	薄板坯宽度	790~1350mm
	中间罐容量	28t
	结晶器长度	1100mm
	拉坯速度	2.8~5.5m/min
	冶金长度	6020mm
	薄板坯长度	47m
CSP 加热炉	长度	220m
	燃料	天然气
CSP 精轧机	轧机	6 机架,CVC
	带卷厚度	1.0~12.7mm
	带卷宽度	790~1350mm
	卷外径	1000~1950mm
	卷重	20t,18kg/mm
	工作辊直径	790mm(F ₁ ~F ₃),500mm(F ₄ ~F ₆)
	工作辊身长度	1700mm(CVC 技术)
	支撑辊直径	1350mm(F ₁ ~F ₃),1250mm(F ₄ ~F ₆)
	支撑辊身长度	1500mm
	轧制力	30MN(F ₁ ~F ₃),25MN(F ₄ ~F ₆)
	带卷冷却方式	层流冷却
	卷取机	2

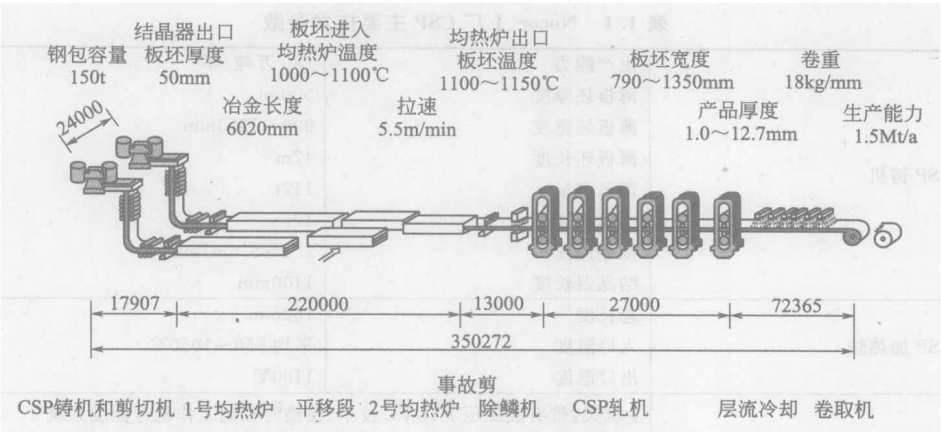


图 1.6 Hylsa 钢厂 CSP 生产线布置及参数

1.2.1.3 美国 ACM 里弗代尔厂 CSP 生产线

1996 年投产，其生产线布置及有关参数见图 1.7。生产工艺流程为：高炉→转炉→钢包精炼炉→CSP 铸机→7 机架精轧机。

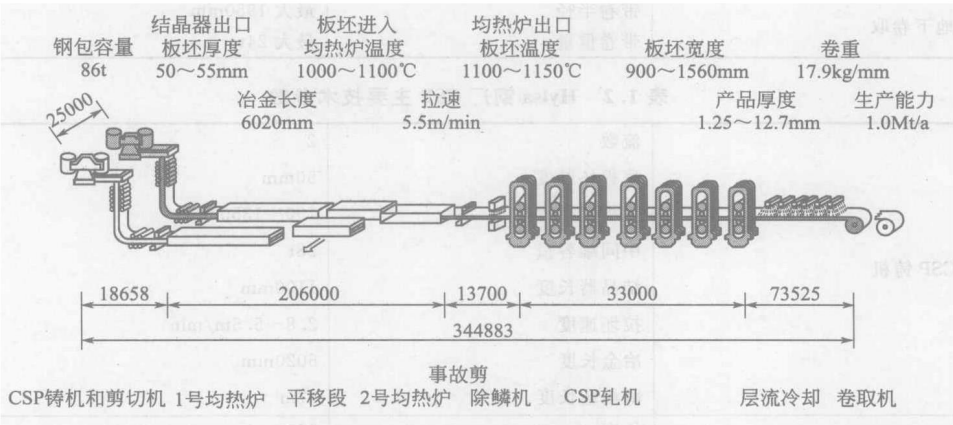


图 1.7 ACM 厂 CSP 生产线布置及参数

CSP 铸机结晶器断面尺寸为 50mm×1524mm，铸坯出结晶器下口经液芯压下、气雾冷却、均热后进入 7 架精轧机（精轧机全部采用液压压下）、液压弯辊和 CVC 板型控制，最终轧成 (1.25~12.7)mm×(900~1560)mm、卷重 25~30t 的带卷。该厂可生产碳素钢及低合金钢、高碳钢 (C 0.9%)、高强度钢、工具钢等钢种，产品涉及面广，甚至包括卷尺用热处理钢、刀具钢等，其中高碳钢占 50% (C 0.50%~1.0%)。ACM 厂的实践证明，转炉钢水比 100% 用废钢的电炉钢水质量好，同于用 50% DRI 的电炉钢水，钢水质量好保证了产品质量，7 个机架的使用可生产出极薄的高强度纯净薄板。相比以往的 CSP 生产线均是含碳量 0.5% 以下的低碳钢，ACM 厂的成功无疑是对薄板坯连铸连轧工艺的新突破，证明氧气转炉炼钢也能适应薄板坯连铸连轧工艺，对该技术的发展起到了推

进的作用。

1.2.1.4 西班牙 ACB 钢铁联合公司 CSP 生产线

该 CSP 生产线于 1996 年 10 月投产，是欧洲第一条短流程 CSP 生产线，其设备技术参数见表 1.3，生产线布置及有关参数见图 1.8。与前述 CSP 均热炉横移式板坯方式不同，该 CSP 均热炉采用了摆动式钢坯输送方式。

表 1.3 ACB 公司 CSP 技术参数

CSP 铸机	流数	2
	薄板坯厚度	50~60mm
	薄板坯宽度	790~1560mm
	中间罐容量	28t
	结晶器长度	1100mm
	拉坯速度	2.8~5.5m/min(53mm 板厚),将来 6m/min 6.5m/min(50mm 板厚),将来 6.9m/min
	冶金长度	6970mm
	薄板坯长度	最大 50m
CSP 加热炉	长度	185m
	燃料	天然气
CSP 轧机	轧机组	6 机架轧机
	带厚度	1.15~12.7mm
	带宽度	790~1560mm
	带卷外径	1000~2000mm
	带卷重	最大 28t,20kg/mm
	工作辊直径	800/730mm(F ₁ ~F ₄),600/545mm(F ₅ ~F ₆)
	工作辊身长度	1950mm(CVC 技术)
	支撑辊直径	1500/1350mm(F ₁ ~F ₄),1450/1350mm(F ₅ ~F ₆)
	支撑辊身长度	1750mm
	轧制分离力	40MN(F ₁ ~F ₄),32MN(F ₄ ~F ₆)
	带卷冷却方式	层流冷却
	冷却组数	8
	卷取机	1

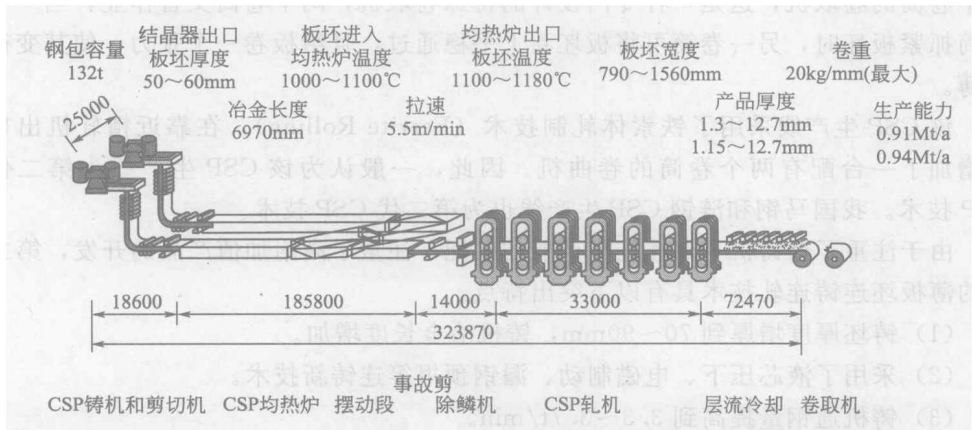


图 1.8 ACB 厂 CSP 生产线布置及参数

1.2.1.5 德国 Thyssen 钢铁公司 CSP 生产线

该 CSP 生产线于 1999 年 4 月投产，主要轧制薄规格带钢，生产线布置见图 1.9。

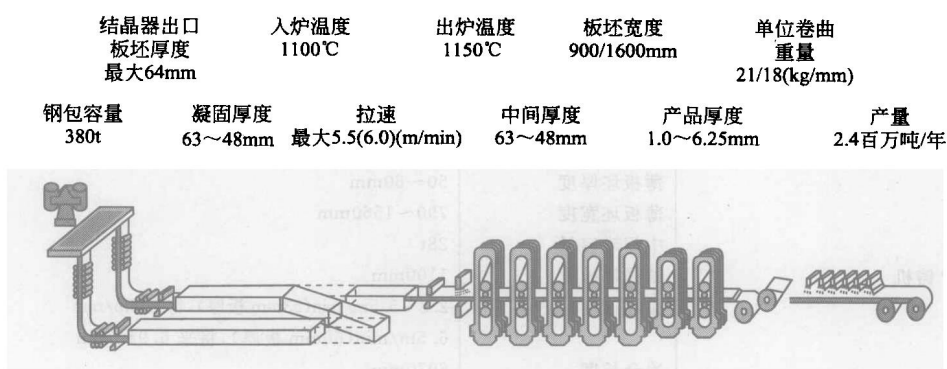


图 1.9 Thyssen 钢铁公司 CSP 生产线布置及参数

Thyssen 钢铁厂炼钢厂有氧气转炉两座，容量 365t，配有 LF 钢包炉一台，容量 380t。新建两流的薄板坯连铸机，其冶金长度为 9m（和我国邯郸的 CSP 铸机相同），结晶器上口断面为 63mm×(900~1600) mm，出结晶器下口铸坯厚度为 48~63mm。浇铸周期约 2h。铸坯经长达 240m 的辊底式加热炉进入 7 机架的精轧机，低碳钢可由 63mm 轧成 1mm 的薄产品，高碳钢可由 48mm 轧成小于 1mm 的更薄卷带。该生产线基本上只轧 1.0~3.0mm 的薄规格热轧产品，年产量 240 万吨。

这套机组特点是：CSP 生产线和长流程相接，年产量高，可充分发挥机组的生产能力。机架的精轧机布置满足了轧制极薄产品的需要。另一特点是加热炉长达 240m，原因是该条生产线采用了半无头轧制，铸坯入炉前不需要剪切，铸坯很长，出炉后直接入轧机，精轧后再切成定尺，既减少了切头切尾，又为今后生产更薄（0.7mm）的产品创造条件。由于板坯过长，轧后又很薄，精轧机后设有一台配置两个卷筒的卷取机，这是一种专门设计的特殊卷取机，两个卷筒交替作业，当一个卷筒抓紧板坯时，另一卷筒可将板坯卷上平稳通过，且给板卷一个张力，使其变得更薄。

该 CSP 生产线采用了铁素体轧制技术（Ferrite Rolling），在靠近精轧机出口处增加了一台配有两个卷筒的卷曲机。因此，一般认为该 CSP 生产线为第二代 CSP 技术。我国马钢和涟钢 CSP 生产线也为第二代 CSP 技术。

由于注重了连铸机与热连轧机产能的匹配、注重了高附加值产品的开发，第二代的薄板坯连铸连轧技术具有以下突出特点。

- (1) 铸坯厚度增厚到 70~90mm，铸机冶金长度增加。
- (2) 采用了液芯压下、电磁制动、漏钢预报等连铸新技术。
- (3) 铸机通钢量提高到 3.3~3.7t/min。
- (4) 有的隧道炉长度延长到 240~300m。

(5) 连轧机特点 轧机组成：F6~7 或 R1~2+F5~6，采用半无头轧制、超薄规格轧制技术，扩大了厚度 $\leq 2.0\text{mm}$ 的产品比例，实现了以热代冷；电机功率增大，以便进行铁素体轧制。

(6) 年产规模扩大 单流生产能力 120~150 万吨，双流达到 200~250 万吨。

1.2.1.6 意大利 Terni-AST 厂 CSP 生产线

第二代 CSP 生产线的最新发展是 2001 年 8 月投入生产的意大利 AST 厂的新的 CSP 生产线。与 TKS 厂 CSP 生产线不同的是这条线更突出 CSP 工艺在生产高合金成分的特殊钢（不锈钢、硅钢等）品种方面的开拓和进步。在工艺技术上也更加注重在炼钢，尤其是连铸部分的新技术的采用。

在 Nocor 工厂成功地生产出铁素体不锈钢热轧卷后，SMS 公司又向更高的工艺技术迈进，开发新的漏斗型结晶器、浸入式水口、保护渣、电磁闸、短杆式液压振动装置、液压控制装置等一系列新技术，在意大利的 Terni-AST 工厂利用薄板坯和厚板坯的混合轧制新工艺方案。新的 CSP 连铸机安装在现有的热带钢轧机上并通过一座加热炉相连接，形成了一个完整 CSP 生产线。

该 CSP 生产线工艺及技术参数见图 1.10。

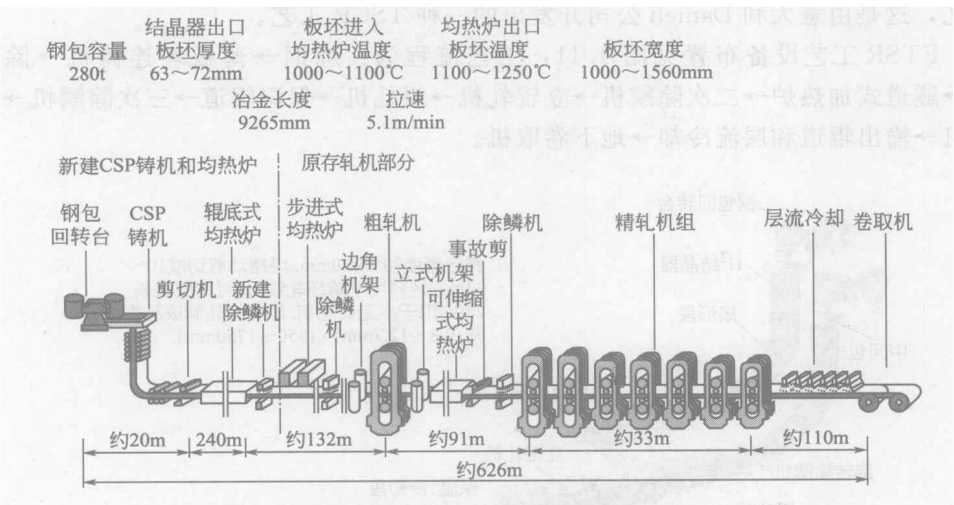


图 1.10 AST 钢铁公司不锈钢 CSP 生产线布置及参数

1.2.1.7 CSP 工艺存在的问题

在 CSP 生产实践中发现该工艺存在以下问题。

(1) 原 CSP 铸机均和电炉相连接，薄板坯连铸每台生产能力仅有 80 万吨/年左右，浇铸的薄板坯越薄，每流的生产能力就越低。如想提高生产能力可进一步提高拉速，但拉速受多方面限制，拉速达到 8m/min 是目标，为此 CSP 仍需改进。

(2) CSP 生产线电炉为冶炼设备时，受废钢质量限制，当含高残余元素时，生产高质量的钢板尚有困难。至于生产不锈钢产品目前也仅限于试浇铁素体不锈钢，其他产品有待开发。

(3) 受宽厚比和最小轧制压缩比的冶金学方面的限制, CSP 工艺很难生产出很宽的或较厚的钢板。在此问题上, 奥钢联建议结晶器出口薄板坯厚度为 90~100mm 是有一定道理的, 各公司也都纷纷增加了结晶器出口坯厚。

(4) 目前 CSP 薄板坯连铸机产品只能在线热送直接轧制。由于 CSP 铸机和精轧机的不可分, 铸坯只能热送、在线轧制, 铸坯应是无缺陷, 且二者生产能力一定要匹配, 究竟采用 5 机架还是 6 机架, 则不能单纯从投资成本考虑, 而更重要的是产品厚度。

(5) CSP 生产线均热炉设备仍未定型化, 究竟是辊底式还是步进梁式, 采用平移式还是摆动式均需生产实践进一步验证。

(6) CSP 生产线中, 铸机和转炉连接的工艺正在探索中, 多台连铸机和转炉组合, 加上连轧机合理匹配, 可以达到 240 万~400 万吨/年规模。

1.2.2 FTSRQ 工艺

FTSRQ (Flexible Thin Slab Rolling for Quality) 工艺称之为生产高质量产品的灵活薄板坯连铸连轧工艺, 为简化又称为 FTSR (Flexible Thin Slab Rolling) 工艺, 这是由意大利 Danieli 公司开发出的一种 TSCR 工艺。

FTSR 工艺设备布置见图 1.11, 工艺流程为: 炼钢→薄板坯连铸机→除鳞机→隧道式加热炉→二次除鳞机→立辊轧机→粗轧机→保温辊道→三次除鳞机→精轧机→输出辊道和层流冷却→地下卷取机。

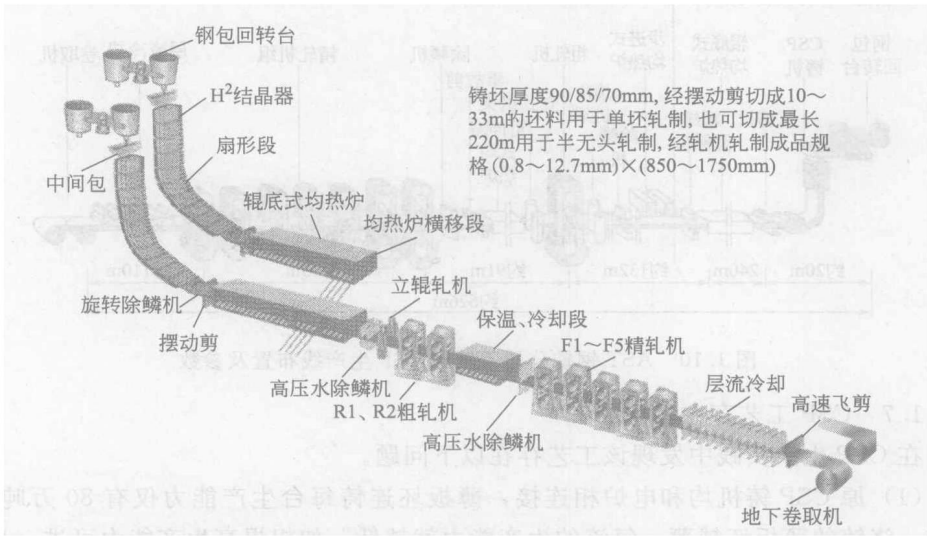


图 1.11 FTSR 生产线布置

这种 TSCR 机组与 CSP 机组的显著不同为结晶器铸坯出口厚度大 (一般为 90mm), 轧机机组分为 1~2 架粗轧机和 5~6 架精轧机。FTSR 工艺另外一个特点是能够轧制薄的带钢 (0.8mm)。