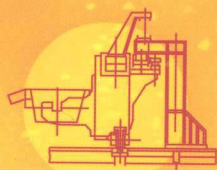
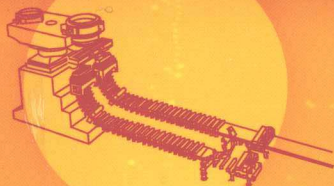
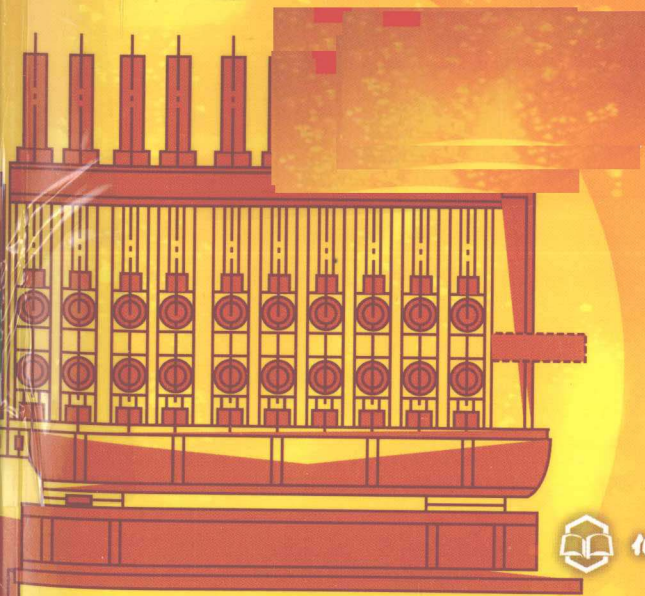


连续铸钢 生产技术

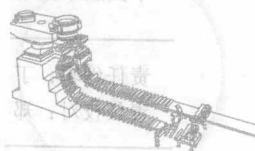
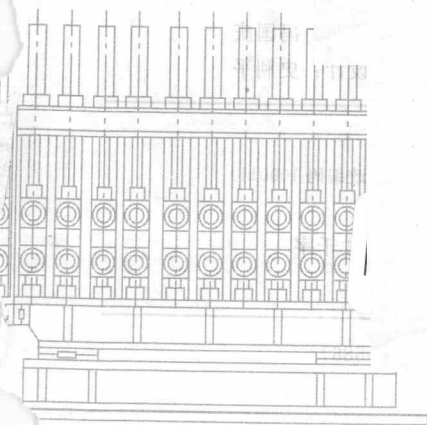
杨吉春 编著



化学工业出版社

连续铸钢 生产技术

杨吉春 编著



化学工业出版社

北京

本书重点阐述了连铸工艺操作、连铸坯质量的控制与防护措施和连铸新技术,包括连铸技术发展及新技术、连铸设备的应用、连铸工艺、连铸坯质量改善及预防措施、连铸新技术的应用及连铸发展过程的关键技术等内容。本书力求从实用的角度出发,内容求新,理论联系实际。

本书适用于从事连铸生产的现场技术人员、高等院校和高职院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

连续铸钢生产技术/杨吉春编著. —北京:化学工业出版社, 2010.11
ISBN 978-7-122-09474-2

I. 连… II. 杨… III. 连续铸钢 IV. TF777

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第176072号

责任编辑:丁尚材

责任校对:郑捷

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:化学工业出版社印刷厂

850mm×1168mm 1/32 印张8 $\frac{3}{4}$ 字数204千字

2011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:25.00元

版权所有 违者必究

前言

我国钢产量连续十几年居世界首位，已成为世界上最大的钢铁生产和消费国，为国民经济的持续、稳定、健康发展作出了重要贡献。近年来我国连铸技术尤其是薄板坯和薄带技术也取得了非常大的进步，新技术、新工艺不断出现，我国钢铁工业应坚持“炼钢-炉外精炼-连铸三位一体组合优化”的发展原则，在连铸生产中，积极推广、采用已有的技术创新成果。

本书回顾了连铸技术的发展历程，重点阐述了连铸工艺操作、连铸坯质量的控制与防护措施和连铸新技术，全书共 5 章。第 1 章介绍了连铸的特点及新技术；第 2 章概述了连铸设备的发展及应用；第 3 章重点讲述了连铸工艺过程所涉及的所有关键技术；第 4 章深入阐述了连铸坯质量改善及预防措施；第 5 章介绍了连铸新技术的应用及连铸发展过程的关键技术。

本书力求从实用角度出发，内容求新，理论够用，联系实际，便于从事连铸生产的现场技术人员、高等院校和高职院校师生的学习掌握，为解决生产中遇到的实际问题提供帮助。

限于编著者水平，书中难免有不少缺点和不足之处，恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 连铸的特点	1
1.2 连铸技术进步	4
1.2.1 高效连铸技术	5
1.2.2 薄板坯连铸技术	8
1.2.3 带钢连铸技术	10
1.2.4 电磁技术应用	12
1.2.5 近终形连铸技术	15
第2章 连铸设备	17
2.1 连铸机类型及特点	17
2.1.1 连铸机分类	17
2.1.2 各种连铸机的特点	19
2.1.3 连铸设备的构成	24
2.1.4 弧形连铸机规格的表达方法	26
2.1.5 连铸机选型的依据	27
2.2 钢包及支撑设备	28
2.2.1 钢包	28
2.2.2 钢包回转台	31
2.3 中间包及运载设备	33
2.3.1 中间包	33
2.3.2 中间包运载设备	41
2.4 结晶器及振动装置	45

2.4.1	结晶器的形式和结构	45
2.4.2	结晶器的设计参数	50
2.4.3	结晶器的振动装置	52
2.5	二次冷却装置	59
2.5.1	二次冷却的作用	59
2.5.2	二次冷却装置的结构形式	59
2.6	拉坯矫直装置	65
2.7	引锭装置	68
2.8	铸坯切割装置	71
第3章	连铸工艺	73
3.1	连铸钢水质量保证	73
3.1.1	连铸钢水的温度控制	73
3.1.2	连铸钢水的成分控制	84
3.1.3	钢水纯净度的控制	88
3.2	连铸工艺控制技术	97
3.2.1	浇注前的准备	97
3.2.2	浇注操作	104
3.2.3	合金钢连铸技术	117
3.2.4	多炉连浇技术	128
3.2.5	异钢种连浇技术	130
3.2.6	连铸操作中常见事故分析	131
3.3	连铸保护渣	136
3.3.1	连铸保护渣的冶金功能	137
3.3.2	连铸保护渣的组成	138
3.3.3	保护渣的特性	140
3.3.4	不同钢种连铸保护渣的特点	143
3.3.5	连铸保护渣的加入方法	146
3.4	连铸用耐火材料	150
3.4.1	连铸对耐火材料的要求	151
3.4.2	耐火材料质量对工艺操作的影响	152

3.4.3 连铸用耐火材料的选择	155
第4章 连铸坯质量控制	162
4.1 连铸坯的凝固结构特征	162
4.1.1 连铸坯内部结构及检验	163
4.1.2 连铸坯凝固结构的控制	165
4.2 连铸坯表面缺陷和预防措施	167
4.2.1 表面和角部纵裂纹的特征、成因及预防措施 ...	167
4.2.2 表面和角部横裂纹的特征、成因及预防措施 ...	169
4.2.3 星形裂纹的特征、成因及预防措施	170
4.2.4 针孔缺陷的特征、成因及预防措施	171
4.2.5 表面夹渣的特征、成因及预防措施	171
4.3 连铸坯内部缺陷和预防措施	172
4.3.1 内部裂纹的形成及预防措施	172
4.3.2 中间裂纹的成因及预防措施	174
4.3.3 中心线裂纹的成因及预防措施	174
4.3.4 对角线裂纹的成因及预防措施	175
4.3.5 矫直与弯曲裂纹的成因及预防措施	175
4.3.6 中心偏析的成因及预防措施	175
4.3.7 中心疏松的成因及预防措施	178
4.3.8 夹杂物的产生及预防措施	179
4.4 连铸坯形状缺陷和预防措施	181
4.4.1 方坯菱形变形的成因及预防措施	181
4.4.2 铸坯纵向和横向凹陷的成因及预防措施	182
4.4.3 板坯鼓肚的成因及预防措施	184
4.4.4 圆坯变成椭圆形或不规则形状的成因及预防 措施	184
4.5 连铸坯质量检查和控制	185
4.5.1 连铸钢水质量检查和控制	185
4.5.2 连铸过程参数的自动检测	196
4.5.3 连铸坯表面缺陷检测及清理方法	204

4.6 连铸的技术经济指标	208
第5章 连铸新技术	211
5.1 连铸坯热装和直接轧制技术	211
5.1.1 热装和直接轧制的工艺流程特点	212
5.1.2 实现热装和直接轧制的技术关键	214
5.2 连续矫直和压缩矫直技术	216
5.2.1 连续矫直技术	216
5.2.2 压缩矫直技术	218
5.3 连铸坯动态轻压下技术	218
5.3.1 动态轻压下机理	219
5.3.2 实现动态轻压下的关键技术	220
5.4 连铸电磁搅拌技术	223
5.4.1 电磁搅拌技术特点和类型	223
5.4.2 连铸电磁搅拌工艺选择	225
5.4.3 电磁搅拌对铸坯内部凝固结构的控制	230
5.4.4 电磁搅拌对铸坯表面和皮下质量的影响	232
5.4.5 电磁搅拌对铸坯中心偏析、缩孔和疏松的 控制	233
5.4.6 结晶器电磁制动技术	236
5.5 薄板坯和薄带连铸技术	238
5.5.1 薄板坯连铸关键技术及工艺特点	241
5.5.2 典型的薄板坯连铸连轧技术	252
5.5.3 带钢连铸技术	259
参考文献	270

第1章

绪论

1.1 连铸的特点

连续铸钢技术是一种促使钢水成型的新方法。20 世纪 50 年代，作为钢铁工业革命标志的连铸技术，成为钢厂生产的核心环节，连铸在整个生产流程中担负着承上启下的关键作用，是优化钢铁工业生产流程结构、改善产品品种、提高产品质量、节能降耗和减少污染的核心技术。因此，连续铸钢技术是当前世界钢铁工业发展最快的技术之一，围绕连铸的新技术、新工艺、新设备的不断开发成功，连铸已成为现代钢铁生产流程中不可缺少的工艺环节，其特点是过程速度快，投资集中，技术日趋完善。

连铸坯的质量 (t) 与总铸坯 (锭) 的质量 (t) 之比称为连铸比，它是衡量一个国家或一个钢铁企业生产发展水平的重要标志之一，也是连铸设备、工艺、管理以及和连铸有关的生产环节发展水平的综合体现。1970 年全世界的连铸比仅为 5.6%，而到 1990 年全世界连铸比已达到 62.4%，1994 年达到 72.4%，世界上许多钢厂以全连铸代替模铸生产进展神速，到 1994 年实现全连铸的国家已达 24 个，2003 年全世界的连

铸比更是达到了90%。我国2000~2007年间的连铸比和连铸坯的增长情况见表1-1。

表1-1 我国2000~2007年间的连铸比和连铸坯的增长情况

项目	年 份							
	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年
连铸坯/万吨	10420	13360	16885	20800	26500	33420	41279	48342
连铸比/%	82.5	89.71	91.15	93.52	95.8	95.68	98.57	98.86

从以上连铸技术发展如此之快来看，究其原因连铸和过去常规生产相比具有很大的优越性，现就与模铸生产进行比较如下。

(1) 连铸坯综合成材率高

模铸生产过程中，由于有切头切尾损失10%~20%，所以模铸的综合成材率在84%~88%；而连铸的切头切尾损失只有1%~2%，其成材率可以达到95%以上。成材率的提高，对于一个年产100万吨的钢厂来讲，若以提高10%计算，采用连铸生产，相当于增加了约10万吨的钢材量，其经济效益非常可观。

(2) 降低能量消耗

模铸和连铸的生产工艺如下。

模铸：浇注→钢锭→均热炉→初轧→连轧。

连铸：连铸→连铸坯→连轧（近终形连铸技术）。

由于连铸省去了模铸工艺中间环节均热炉的再加热工序，每吨连铸坯综合节能约130kg标准煤。

连铸坯热送热装是指铸坯在400℃以上热状态下送入加热炉。而铸坯温度在650~1000℃时送入加热炉，节能效果最好。相对于连铸冷装工艺而言，采用一般热送热装工艺时可节能35%，采用直接热送热装工艺可节能65%，再采用直接轧



制工艺时可节能 70%~80%。采用热送热装的好处还有：加热炉产量可提高 20%~30%，金属收得率可提高 0.5%~1.0%，缩短生产周期 80% 以上，降低建设投资和生产成本，同时可改进产品质量，提高成材率 0.5%~1.5%。如采用连铸直接轧制工艺，能耗还可以进一步降低，不同工艺的能耗比较见表 1-2。

表 1-2 不同工艺的能耗比较

工艺路线	冷坯加热轧制	热装轧制	铸坯直接轧制
能耗/($\times 10^3$ kJ/t 坯)	1260	840	420

可见，热装轧制和钢坯直接轧制不仅节能效果好，而且还缩短加工周期，从钢水到轧制成成品整个流程的时间是：冷坯加热轧制 30h，热装轧制 10h，钢坯直接轧制 2h。

(3) 简化工序，缩短流程

如图 1-1 所示，与模铸工艺相比，连铸最大的特点是省去了模铸的脱模、整模、钢锭均热和开坯等工序。基建投资节约 40%，占地面积减少 30%，节省劳动力 75%。

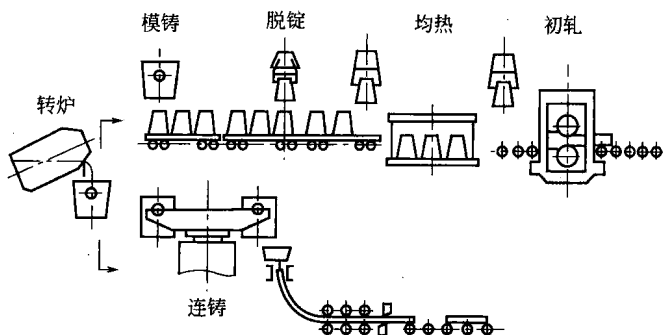


图 1-1 模铸与连铸生产流程示意

薄板坯连铸技术的发展，使工序流程进一步简化。与传统



板坯连铸（坯厚150~300mm）相比，薄板坯连铸（坯厚40~70mm）省去了粗轧机组，厂房面积减少约48%，连铸机设备重量减少约50%，热轧设备重量减少约30%。从钢水到薄板的生产周期大大缩短，传统板坯连铸约需40h，薄板坯连铸仅为1~2h。如美国纽柯（Nucor）钢厂的CSP生产线，薄板坯连铸的生产成本下降20%，吨钢投资费用节省20%~30%。

（4）连铸坯质量好于钢锭，品种扩大

由于模铸钢锭凝固时间长，组织较粗大，元素偏析显著；而连铸坯断面小，冷速大，树枝晶间距小，偏析较轻，组织致密。目前几乎所有的钢种均可采用连铸工艺生产。

（5）易于实现机械化和自动化

模铸车间劳动环境恶劣，手工劳动强度大，是炼钢生产中最落后的工序。尤其对氧气转炉炼钢车间，模铸已成为提高生产率的限制环节。采用连铸后，设备和操作水平不断提高，计算机控制和管理技术不断升级，劳动环境得到根本性的改善，连铸操作的全程计算机控制和无人化管理正成为现实。

1.2 连铸技术进步

产品质量是连续铸钢的命脉。随着经济和社会的发展，连铸产品的质量将成为市场竞争的焦点之一。作为连续铸钢，就是要提高无缺陷坯的比率，在连铸工艺、设备和生产操作等多方面开发新的技术。现代化连铸机的关键技术主要反映高效连铸技术、近终成形连铸技术方面，适合连铸连轧的热态调宽的结晶器（机械和液压两种方式），单双流板坯连铸机不同结构的双缸式液压振动机械装置，大方坯连铸机内外弧双缸式液压振动机械装置，铸轧式液压夹紧扇形段和动态轻压下液压夹紧扇形段，振动装置伺服阀控制的液压伺服控制系统和动态轻压



下技术,连铸机主机全新的设备结构,计算机质量判断、最佳定尺切割等应用软件,以及曲线精确衔接的连续弯曲连续矫直计算技术,动态轻压下跟踪凝固终点的数学模型等。采用这些先进的技术,是连铸机制造的关键。我国钢铁工业积极引进、消化和广泛应用国内外的先进技术及装备,不断加大技术改造、技术进步和技术创新力度,经过多年的努力,工艺技术整体水平明显提高,重点大型钢铁企业已经达到或接近国际先进水平。

1.2.1 高效连铸技术

高效连铸就是以高质量为基础,以高拉速为核心,实现高连浇率、高作业率的系统优化技术。

高效连铸技术是一项系统的整体技术,实现高效连铸需要工艺、设备、生产组织和管理、物流管理、生产操作以及与之配套的炼钢车间各个环节的协调与统一。主要技术内容如下。

① 保证适宜的钢水温度,最佳的钢水成分,并保证其稳定性的连铸相关配套技术。

② 供应清洁钢水和良好流动性钢水的连铸相关技术。

③ 连铸的关键技术——高冷却强度的、导热均匀的长寿结晶器总成(包括结晶器整体结构、精密水套、导热均匀的曲面铜管等)。

④ 高精度、长寿的结晶器振动装置是高效连铸关键技术之一,包括振动装置硬件的优化及结晶器振动形式、振动工艺参数的软件优化。液压振动可以在浇注过程中调整振幅、频率、波形偏斜率(结晶器上升、下降时间及速度),以取得最佳的负滑动时间和保护渣流动效果。液压振动在20世纪90年代中后期已得到迅速推广,在传统板坯连铸机上大有替代机械振动的趋势。



⑤ 保护渣技术是连铸高效化的一项关键技术。连铸高效化后必须有低黏度、低熔点、高熔化速度、大凝固系数的保护渣与之匹配。

⑥ 结晶器钢水液面控制技术。拉速越高，结晶器液面波动越大，越易产生卷渣及夹杂物造成铸坯缺陷，保持液面稳定非常重要。

⑦ 二次冷却的硬件及软件技术。二次冷却的硬件要求尽量做到冷却均匀（无障碍喷淋）且可方便调节。板、方坯连铸机二冷动态自动控制喷水冷却有了较快的发展，软件的发展更其实用性和适用性，对各种钢种、不同拉速、不同温度变化都可及时调整水量，以生产高质量铸坯。

⑧ 连续矫直技术。根据铸坯带液芯矫直机理，选择三次抛物线作为连铸机弧形段和直线段的连续矫直曲线，在高效连铸中起到了良好效果。采用轻压下技术，以减小偏析、缩孔，提高铸坯质量。在小方坯中采用热压缩技术，以代替电磁搅拌技术、轻压下技术，也取得了满意的效果。

⑨ 其他技术。包括铸坯支撑及强化冷却技术、保护浇注技术、钢包技术、中间包技术、电磁搅拌技术、自动开浇技术、低温浇注技术等。

在国外一台5流连铸机，生产 $125\text{mm} \times 125\text{mm}$ 方坯，年产100万吨，单流产量达到20万吨；一台6流连铸机，生产 $105\text{mm} \times 105\text{mm}$ 、 $140\text{mm} \times 140\text{mm}$ 、 $160\text{mm} \times 160\text{mm}$ 方坯，年产140万吨，单流产量23.3万吨。其平均拉速： $105\text{mm} \times 105\text{mm}$ 方坯为 5.2m/min ； $140\text{mm} \times 140\text{mm}$ 方坯为 3.8m/min ； $160\text{mm} \times 160\text{mm}$ 方坯为 3.2m/min 。一台单流板坯连铸机，生产厚200mm、宽1400~1750mm的板坯，年产200万吨，单流产200万吨。

国内如太钢二钢厂两台单流板坯连铸机经过改造，年产能



从原设计 50 万吨/台提高到 100 万吨/台；天津钢管股份有限公司一台四流圆管坯连铸机经过改造，年产能从原设计的 60 万吨提高到 80 万吨。三明、石钢、邢钢等钢铁企业各更新一台方坯连铸机。到 2002 年末，我国高效、较高效连铸机累计已达 75% 左右，但还有不少连铸机亟待高效化，以达到降本增效目的。新疆八一钢厂生产 $120\text{mm} \times 120\text{mm}$ 方坯，单流年产 12 万吨，平均拉速 3m/min ； $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 方坯，单流年产 14 万吨；

一般方坯连铸机使用的结晶器主要有喷淋结晶器和水缝结晶器两种。但方坯连铸机高效化后，关键是解决结晶器的冷却强度和效率问题，有普遍使用窄水缝结晶器的趋势。高效结晶器有如下特征：

- ① 结晶器普遍采用多锥度或抛物线锥度；
- ② 结晶器横端面形状采用凹型或凸型；
- ③ 对“气隙”的作用给予了足够的重视，采用改变锥度、截面形状和水压等方法减少“气隙”的影响；
- ④ 采用窄水缝技术；
- ⑤ 冷却水压力提高，流速达 10m/s 以上；
- ⑥ 提高结晶器铜管和水套的制造精度，保证水缝的均匀性。

为适应高效连铸技术，开发的高效方坯结晶器有以下几种。

① “凸型”结晶器，是康卡斯特公司推出的，又名 Convex 结晶器。它的基本特征是：结晶器上部内腔铜壁面向外凸出，而不是平的，即上口内圆角大于 90° ；往下沿整个结晶器长度方向上逐渐变为平面，即到铜管出口处内圆角又恢复到 0° 。坯壳向下运行时，逐渐冷却收缩并自然过渡到平面段，使结晶器传热效率大为改善。

② 自适应结晶器，是达涅利公司开发的一种高效方坯结晶器，又称 Danam 结晶器。采用薄型铜管，加大并调节结晶器冷却水压，使坯壳紧贴薄铜壁以消除气隙，实现高拉速。

③ “钻石”结晶器，是 VAI 公司推出的一种高效方坯结晶器，又称 DIAMOND。VAI 采用比常规抛物线锥度大一些的新抛物线形锥度，提高整个结晶器长度上坯壳与结晶器的接触，便于坯壳在结晶器内均匀生长。增加坯壳厚度的最有效办法是延长结晶器长度，增加结晶器中铸坯质点在结晶器内的生长时间。VAI 经过计算，认为把铜管延长至 1000mm 长较好。

④ 压力水膜结晶器，是比利时冶金研究中心（CRM）和阿贝德厂联合开发的一种高效结晶器技术。在结晶器下口固定有 4 块钢板，水从每块钢板上加工的狭缝喷射出来，钢板与结晶器面呈直线放置，并与铸坯表面间留有小间隙，间隙使高速流动着的水充满并形成一层水膜。钢板上的狭缝向下倾斜，使得从中流出来的水能朝下流动。水膜既起强冷作用，又起支撑铸坯的作用。

⑤ 曲面结晶器，是中冶连铸开发的一种高效方坯结晶器技术。该结晶器从轴向看由三部分组成：上口部分轴向和横向具有变化的锥度，且横向中间往外凸；中间部分轴向具有变化锥度，横向为正方形；出口部分轴向和横向具有变化的锥度，横向中间往内凹，以补偿由结晶器热变形和小方坯收缩产生的气隙，并降低出口部角部区域的摩擦力，使坯壳在结晶器内均匀、快速生长，从而获得高拉速，改善铸坯质量。

1.2.2 薄板坯连铸技术

如果说连铸技术装备水平在一定程度上代表一个国家的冶金装备水平，那么薄板坯连铸技术装备水平则是标志其高度的一根“衡量杆”。中薄板连铸连轧技术在今后 10 年内将对传统



钢铁企业造成巨大冲击。

到目前为止,我国拥有中薄板坯连铸机生产线 15 条,预计在未来 4~5 年内,国内将会增加近 20 条生产线。

1989 年,美国纽柯公司正式投产了第一台薄板坯连铸机。目前成熟的薄板坯连铸技术有 ISP、CSP、FTSR 法等。截止 2006 年,我国已有 13 条薄板坯(包括中薄板坯)连铸连轧生产线相继投产,产能约为 3500 万吨/年,我国已投产的薄板坯连铸连轧生产线产品规格见表 1-3。

表 1-3 我国已投产的薄板坯连铸连轧生产线产品规格

生产单位	铸坯规格(宽×厚)/mm	产品规格(宽×厚)/mm	工艺技术
唐山钢铁公司	(1235~1600)×(80~85)	(1235~1600)×(1.0~12.0)	FTSR
珠江钢厂	(1000~1351)×(50~60)	(1000~1351)×(1.2~12.7)	CSP
涟源钢铁公司	(900~1600)×(55~70)	(900~1600)×(0.8~12.7)	CSP
本溪钢铁公司	(850~1605)×(70~85)	(850~1750)×(0.8~12.7)	FTSR
邯郸钢铁公司	(900~1680)×70	(900~1680)×(1.2~21.0)	CSP
包头钢铁公司	(1020~1530)×(52~72)	(1020~1530)×(1.0~20.0)	CSP
马鞍山钢铁公司	(900~1600)×(65~70)	(900~1600)×(3.0~9.5)	CSP
济南钢铁公司	(900~1600)×(135~150)	(900~1600)×(3.5~6.0)	ASP
鞍山钢铁公司	(930~1530)×135	(930~1500)×(1.6~11.5)	ASP
鞍山钢铁公司	(1000~2000)×(135~170)	(1000~2000)×(1.5~25.0)	ASP
通化钢铁公司	(850~1605)×(70~85)	(900~1560)×(10.8~12.7)	FTSR

我国已建成的 13 条薄板坯连铸连轧生产线的连轧机组的配置均采用了目前最先进的机型配置,CSP 线连轧机组全部采用 CVC 轧机;FTSR 线连轧机组采用 PC 轧机,在后两架采用在线磨辊系统 ORG;ASP 线连轧机组的后四架则采用 WRS 轧机,先进的轧机配置和控制系统为热轧板带的板厚和板形高精度控制提供了有力的保证。预计 5 年内,我国的薄板