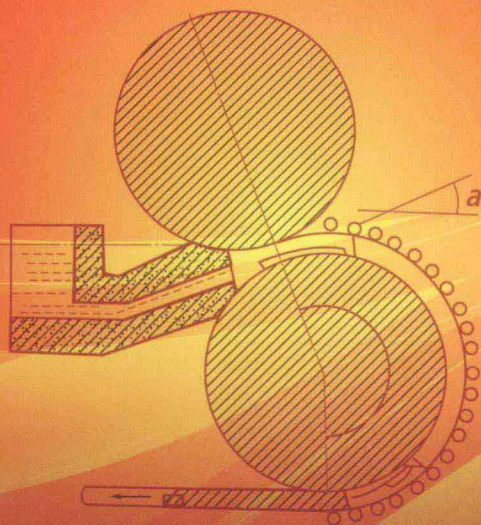


高等学校冶金工程专业“十二五”规划教材

连续铸钢

LIANXU ZHUGANG

张 芳 杨吉春 等编著



化学工业出版社

高等学校冶金工程专业“十二五”规划教材

连续铸钢

张 芳 杨吉春 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书为高等学校冶金工程专业“十二五”规划教材，主要内容包括：连铸设备、连铸基础理论、连铸操作工艺、连铸坯质量控制、连铸过程模拟、连铸新技术及典型钢种的连铸工艺等内容。本书注重理论与实际相结合，着力反映目前连铸生产工艺的发展水平，突出实用性，并力求内容新颖。

本书可作为高等学校本专科、高职高专冶金工程专业及相关专业教材，还可供从事连铸生产的现场技术人员及管理人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

连续铸钢/张芳, 杨吉春等编著. —北京: 化学工业出版社, 2013.7

高等学校冶金工程专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-17453-6

I. ①连… II. ①张…②杨… III. ①连续铸钢-高等学校-教材 IV. ①TF777

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 109950 号

责任编辑: 陶艳玲

装帧设计: 刘丽华

责任校对: 陈 静

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: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 428 千字 2013 年 8 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: 36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

我国钢产量已连续十几年居世界首位，同时也是世界上最大的钢铁生产和消费国，应该说钢铁工业为国民经济持续、稳定、健康发展做出了重要贡献。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，我国钢铁工业始终“坚持炼钢-炉外精炼-连铸三位一体组合优化”的发展原则，尤其在连铸生产中，积极推广、采用已有的技术创新成果，积极引进、消化和广泛应用国内外的先进技术和装备，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。

本书首先回顾了连铸技术的发展历程及发展现状，介绍了连铸设备的发展和应用，阐述了连铸凝固过程传热理论，重点阐述了连铸工艺操作、连铸坯质量控制、连铸过程模拟和连铸新技术，并在此基础上广泛深入地介绍了不同断面典型钢种的连铸工艺制度。全书共分8章。

本书由张芳、杨吉春等编著。张福顺编写第1章及第7章；杨吉春编写第2章及第4章；张芳编写第3章及第8章；彭军编写第5章及第6章。全书由张芳汇总定稿。

本书的编写以为高等学校本科和高职高专学生提供专业课教材为主要目的，同时也可从事连铸生产的现场技术人员解决生产中遇到的实际问题提供帮助和借鉴。在本书的编写过程中注重实际操作工艺的制定以理论指导为基础，并通过介绍大量的典型钢种的连铸工艺突出实用性，并力求内容新颖。

本教材获得2012年度内蒙古科技大学教材建设基金资助。

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。

编者

2013年4月

目 录

1 绪论	1
1.1 铸钢生产概述	1
1.2 连铸技术发展概况	3
1.2.1 国外连铸发展概况	3
1.2.2 国内连铸发展概况	3
1.3 连铸技术进步	4
1.3.1 高效连铸技术	5
1.3.2 薄板坯连铸技术	6
1.3.3 带钢连铸技术	7
1.3.4 电磁技术应用	7
1.3.5 近终形连铸技术	8
复习思考题	9
2 连铸设备	10
2.1 连铸机类型及特点	10
2.1.1 连铸机分类	10
2.1.2 各种连铸机的特点	11
2.1.3 连铸设备的构成	15
2.1.4 连铸机的规格	16
2.1.5 连铸机选型的依据	19
2.2 钢包及支撑设备	20
2.2.1 钢包	20
2.2.2 钢包回转台	22
2.3 中间包及运载设备	23
2.3.1 中间包	23
2.3.2 中间包运载设备	28
2.4 结晶器及振动装置	31
2.4.1 结晶器类型和结构	31
2.4.2 结晶器设计参数	34
2.4.3 结晶器振动装置	35
2.4.4 新型高效结晶器	39
2.5 二次冷却装置	40
2.5.1 二次冷却的作用	40
2.5.2 二次冷却装置的结构形式	41

2.6	拉坯矫直装置	44
2.7	引锭装置	46
2.8	铸坯切割装置	48
	复习思考题	49
3	连铸基础理论	50
3.1	连铸过程凝固特点及凝固结构	50
3.1.1	连铸过程凝固特点	50
3.1.2	连铸坯的凝固结构	50
3.1.3	连铸过程的相变	51
3.1.4	连铸过程的应力	51
3.2	连铸结晶器钢水凝固与热量传输	53
3.2.1	结晶器热量传输过程	53
3.2.2	结晶器弯月面区钢水凝固行为	62
3.2.3	结晶器凝固坯壳生长	70
3.3	连铸二冷区钢水凝固与热量传输	74
3.3.1	二冷区的冷却方式	74
3.3.2	二冷区的传热	74
3.3.3	影响二冷区传热的因素	75
3.3.4	二冷区坯壳的生长	77
3.4	空冷传热	78
	复习思考题	78
4	连铸操作工艺	79
4.1	连铸钢水质量保证	79
4.1.1	连铸钢水的温度控制	79
4.1.2	连铸钢水的成分控制	86
4.1.3	钢水纯净度的控制	88
4.2	连铸工艺与操作	93
4.2.1	浇注前的准备	93
4.2.2	浇注操作工艺	97
4.2.3	多炉连浇技术	105
4.2.4	异钢种连浇技术	106
4.2.5	连铸操作中常见事故分析	106
4.3	连铸保护渣	109
4.3.1	连铸保护渣的冶金功能	109
4.3.2	连铸保护渣的组成	110
4.3.3	保护渣的特性	111
4.3.4	不同钢种连铸保护渣的特点	113
4.3.5	连铸保护渣的加入方法	114
4.4	连铸用耐火材料	117
4.4.1	连铸对耐火材料的要求	117

4.4.2 耐火材料质量对工艺操作的影响	118
4.4.3 连铸用耐火材料的选择	119
复习思考题	122

5 连铸坯质量控制 124

5.1 连铸坯的凝固结构特征	124
5.1.1 连铸坯内部结构及检验	124
5.1.2 连铸坯凝固结构的控制	125
5.2 连铸坯表面缺陷和预防措施	127
5.2.1 表面和角部纵裂纹的特征、成因及预防措施	127
5.2.2 表面和角部横裂纹的特征、成因及预防措施	128
5.2.3 星形裂纹的特征、成因及预防措施	128
5.2.4 针孔缺陷的特征、成因及预防措施	129
5.2.5 表面夹渣的特征、成因及预防措施	129
5.3 连铸坯内部缺陷和预防措施	130
5.3.1 内部裂纹的形成及预防措施	130
5.3.2 中间裂纹的成因及预防措施	131
5.3.3 中心线裂纹（断面裂纹）的成因及预防措施	131
5.3.4 对角线裂纹（角部裂纹）的成因及预防措施	131
5.3.5 矫直与弯曲裂纹的成因及预防措施	131
5.3.6 中心偏析的成因及预防措施	132
5.3.7 中心疏松的成因及预防措施	133
5.3.8 夹杂物的产生及预防措施	134
5.4 连铸坯形状缺陷和预防措施	135
5.4.1 方坯菱形变形（脱方）的成因及预防措施	135
5.4.2 铸坯纵向和横向凹陷的成因及预防措施	135
5.4.3 板坯鼓肚的成因及预防措施	136
5.4.4 圆坯变成椭圆形或不规则形状的成因及预防措施	136
5.5 连铸坯质量检查和控制	137
5.5.1 连铸钢水质量检查和控制	137
5.5.2 连铸过程参数的自动检测	143
5.5.3 连铸坯表面缺陷检测及清理方法	147
5.6 连铸的技术经济指标	149
5.6.1 连铸坯产量	149
5.6.2 连铸比	149
5.6.3 连铸坯合格率	149
5.6.4 连铸坯收得率	149
5.6.5 连铸坯成材率	150
5.6.6 连铸机作业率	150
5.6.7 连浇炉数	150
5.6.8 溢漏率	150

5.6.9 浇成率	151
复习思考题	151
6 连铸过程模拟	152
6.1 连铸过程物理模拟	152
6.1.1 原理及相关技术	152
6.1.2 中间包水模实例	157
6.1.3 结晶器水模实例	158
6.2 中间包数值模拟	163
6.2.1 中间包内的控制方程	163
6.2.2 边界条件的处理	164
6.2.3 中间包数值模拟实例	164
6.3 结晶器数值模拟	166
6.3.1 计算控制方程	166
6.3.2 边界条件	170
6.3.3 结晶器数值模拟实例	173
6.4 连铸二冷区数值模拟	176
6.4.1 连铸二次冷却凝固的控制方程	177
6.4.2 边界条件	180
6.4.3 连铸二冷区数值模拟实例	181
复习思考题	183
7 连铸新技术	184
7.1 连铸坯热装和直接轧制技术	184
7.1.1 热装和直接轧制的工艺流程特点	184
7.1.2 实现热装和直接轧制的技术关键	185
7.2 连续矫直和压缩矫直技术	187
7.2.1 连续矫直技术	187
7.2.2 压缩矫直技术	188
7.3 连铸坯动态轻压下技术	189
7.3.1 动态轻压下机理	189
7.3.2 实现动态轻压下的关键技术	190
7.4 连铸电磁搅拌技术	191
7.4.1 电磁搅拌技术特点和类型	191
7.4.2 连铸电磁搅拌工艺选择	192
7.4.3 电磁搅拌对铸坯内部凝固结构的控制	195
7.4.4 电磁搅拌对铸坯表面和皮下质量的影响	196
7.4.5 电磁搅拌对铸坯中心偏析、缩孔和疏松的控制	197
7.4.6 结晶器电磁制动技术	198
7.5 薄板坯和薄带连铸技术	199
7.5.1 薄板坯连铸关键技术及工艺特点	200

7.5.2 典型的薄板坯连铸连轧技术	206
7.5.3 带钢连铸技术	210
复习思考题	215

8 典型钢种的连铸工艺 217

8.1 不同钢种连铸工艺控制	217
8.1.1 不同钢种连铸工艺特性及其可浇性	217
8.1.2 难浇钢种的连铸工艺控制要点	218
8.2 大方坯连铸工艺	223
8.2.1 大方坯连铸机的特点	223
8.2.2 典型钢种大方坯连铸工艺	229
8.3 小方坯连铸工艺	238
8.3.1 小方坯连铸工艺特点	238
8.3.2 典型钢种小方坯连铸工艺	239
8.4 板坯	242
8.4.1 板坯连铸工艺特点	242
8.4.2 典型钢种板坯连铸工艺	247
8.5 薄板坯	250
8.5.1 我国薄板坯连铸生产现状	251
8.5.2 典型钢种薄板坯连铸工艺	252
8.6 圆坯	257
8.6.1 圆坯连铸工艺特点	257
8.6.2 典型钢种圆坯连铸工艺	257
8.7 异型坯	263
8.7.1 异型坯连铸工艺特点	263
8.7.2 异型坯连铸关键技术	264
复习思考题	265

参考文献 266

1.1 铸钢生产概述

连续铸钢（简称连铸）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、新设备在不断开发成功，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。

连铸坯的吨数与总铸坯（锭）的吨数之比称为连铸比，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各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年全世界的连铸比达到了90%，2010年我国连铸比达到98.12%。

连铸技术发展如此之快，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约10%~20%，所以模铸的综合成材率大约在84%~88%左右；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，节能效果要最好。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 1-1。

表 1-1 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/ 10^3 kJ/t 坯	1260	840	420

可见，热送和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装 30h，热装 10h，直接轧制 2h。

(3) 简化工序，缩短流程

如图 1-1 所示模铸与连铸生产流程示意图，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%。

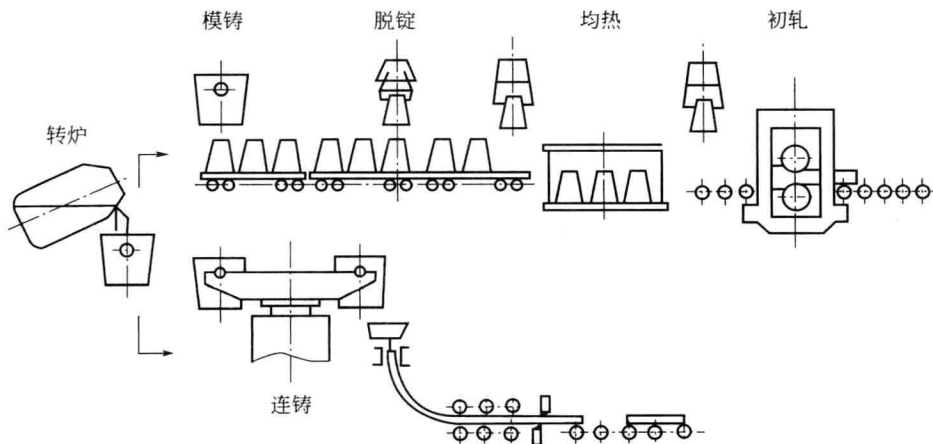


图 1-1 模铸与连铸生产流程示意图

薄板坯连铸技术的发展，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）又省去了粗轧机组，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%，每吨钢投资费用节省 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，冷却强度大，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，手工劳动多，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成为现实。

1.2 连铸技术发展概况

1.2.1 国外连铸发展概况

1846年,亨利·贝塞麦(H. Bessemer)提出了连续浇注(Continuous Casting)液态金属的设想,1857年获得专利。

1933年,德国的容汉斯(S. Junghans)提出并发展了结晶器振动(Mold Oscillation)装置后,浇注铜合金成功,1937年铝合金连铸成功,进入有色金属工业化阶段。

1945年二战结束后,容汉斯和罗西(Rossi)解决了结晶器振动难题,1949年钢水连铸成功。

1950年,容汉斯和曼内斯曼(Mannesmann)公司合作,建成世界上第一台工业试验型连铸机。容汉斯和曼内斯曼成立德马克公司(Demag),罗西在瑞士成立康卡斯特公司(Concast),连铸进入了工业应用时期。1952年第1台立弯式连铸机在英国巴路厂投产,主要用于浇铸碳素钢和低合金钢,铸坯规格是 $50\text{mm}\times 50\text{mm}\sim 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的小方坯。同年在奥地利卡芬堡钢厂建成1台双流连铸机,它是多钢种、多断面、特殊钢连铸机的典型代表。1954年在加拿大阿特拉斯钢厂投产第1台方坯和板坯兼用连铸机,可以双流浇铸 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 的方坯,也可以单流浇铸 $168\text{mm}\times 620\text{mm}$ 的板坯,主要生产不锈钢。

进入60年代,是连铸的稳步发展时期。连铸机的机型也由立式向立弯式和弧形连铸机过渡。铸坯也由方坯向板坯过渡。1961年第一台立弯式板坯连铸机在联邦德国建成,铸坯断面为 $200\text{mm}\times 1520\text{mm}$ 。1963年第一台弧形结晶器小方坯连铸机在瑞士建成投产。1965年联邦德国埃斯维特尔钢厂4流圆坯弧形连铸机投产。1968年美国钢厂的弧形结晶器板坯连铸机投产,用于生产镀锡板。同年,在加拿大钢厂投产一台工字梁连铸机。1964年,英国谢尔顿厂在世界上率先实现了全连铸生产,共有4台连铸机11流,主要生产低合金钢和低碳钢,浇注断面为 $140\text{mm}\times 140\text{mm}$ 和 $432\text{mm}\times 632\text{mm}$ 的铸坯。1969年法国瓦卢埃克建成第一台立式离心旋转连铸机并投产,用于生产管坯。开发出了一批连铸新技术,如保护渣浇注,浸入式水口,钢流保护技术等。

20世纪70年代是连铸的迅猛发展时期,以日本、法国、德国、意大利为代表发达国家,连铸技术发展最快,连铸比大幅度上升。1970年全世界有325台连铸机,生产能力为2600万吨/年,1974年有550台连铸机,生产能力为1.4亿吨/年,这一时期,连铸技术攻关主要以连铸生产率、改善铸坯质量、降低能耗为主要目标,相继开发出了如结晶器在线调宽、带升降的大包回转台、多点矫直、压缩浇注、气水冷却、电磁搅拌、无氧化浇注、中间包冶金、上装引锭杆等技术。连铸坯断面不断扩大,拉速不断提高,流数不断增加。

进入20世纪80年代,连铸已达到成熟,其技术进步表现在铸坯质量设计和质量控制方面达到新的水平;逐步实现热送和直接轧制,大幅度降低能耗,缩短生产周期;薄板坯连铸正在兴起。

20世纪90年代至今,薄板坯(带)连铸技术走向成熟。截止2009年底,世界各国薄板坯连铸连轧生产线合计63条,年生产能力10618万吨。

1.2.2 国内连铸发展概况

我国是世界上开发和应用连续铸钢技术较早的国家之一,从20世纪50年代中期就开始

建设连铸机，紧跟世界连铸的发展。1958年第一台立式连铸机就在重钢三厂建成投产，1964年又在重钢三厂建设了浇铸110mm、300mm厚的弧型板坯连铸机，以后又陆续在天津、武汉、上海、北京等地建设了一批连铸机。到1978年，我国连铸机仅有21台，设计生产能力312万吨/年，1978年生产连铸坯112.7万吨，连铸比3.5%。1980年全国共有连铸机25台，生产能力为345万吨，但1980年实际仅生产铸坯230万吨，连铸比为6.2%。由于历史的原因，20年间连铸发展缓慢，许多连铸机达不到生产能力，品种单一。

1978年以后，我国提出了“以连铸为中心，炼钢为基础，设备为保证”的生产路线，进入新的发展时期，连铸比平均年增3.27%。

1985年3月，武钢二炼钢实现了全连铸；1999年底已实现全连铸的单位达到了108个，全连铸企业65家，武钢、唐钢在十大钢厂中率先实现全连铸。

1999年底，生产的连铸机已达到334台，1028流，设计年产11364万吨。1999年生产连铸坯9591.5万吨，连铸比77.4%。

2002年有30个单位开始实现全连铸，从而全连铸单位已达174个，拥有连铸机的钢厂近90%。马钢股份公司和莱钢集团公司已先后于2002年4月16日和12月1日开始实现全公司全连铸。2002年全国连铸比达93.56%。

2007年，我国连铸生产伴随着钢铁生产持续高速增长的形势，再次取得可喜的成绩。据不完全统计，2007年新诞生连铸机共81台、235流，年增产能7083万吨。2007年我国重点钢铁企业的连铸比为98.86%，达到世界先进水平。全国的连铸技术设备已有60%实现了连铸机的高效化。

2009年世界首台能够生产800mm圆坯连铸机在江阴兴澄特种钢铁有限公司建成投产，填补了国内外大断面圆坯生产的空白，随后在该铸机上进一步开发成功并生产了900mm和1000mm的圆坯，在生产优质碳钢和合金钢特大圆坯供机械等行业特殊需要的管材、锻件等坯料供应方面，发挥了作用。

2010年我国自主设计制造的厚度370mm×1800mm的特厚板坯连铸机在兴澄特钢公司投产并迅速实现稳产各类高品质铸坯。

2011年新余钢铁公司国产厚度420mm×2400mm的特厚板坯连铸机也相应投入生产。自主设计制造生产的360mm×480mm的特大矩形坯合金钢连铸机配备了液压振动、结晶器电磁搅拌、凝固末端轻压下等一系列先进工艺和装备，达到了国际先进水平。

我国连铸装备从小方坯到大方坯、大矩形坯、特大圆坯、板坯铸机，连铸用电磁搅拌技术与装备，连铸用保护渣与耐火材料，都已大多立足国内，促进了连铸生产持续高速增长。

1.3 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和装备, 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。

1.3.1 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 供应清洁的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、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之趋势。

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、高溶化速度、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发展, 软件的发展更具实用性、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, 也取得满意效果。

⑨ 其他技术。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 $5.2\text{m}/\text{min}$; $140\text{mm}\times 140\text{mm}$ 方坯 $3.8\text{m}/\text{min}$; $160\text{mm}\times 160\text{mm}$ 方坯 $3.2\text{m}/\text{min}$; 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；天津钢管一台 4 流圆管坯连铸机经过改造，年产能从原设计 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，以达降本增效的目的。新疆八一钢厂，生产 120mm×120mm 方坯，单流年产 12 万吨，平均拉速 3m/min；150mm×150mm 方坯，单流年产 14 万吨。

1.3.2 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 12 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。

2009 年以来，武钢以薄板坯连铸连轧生产电工钢为主要方向，于 2009 年 2 月新上 CSP 生产线 1 条，生产线设计产量为 253 万吨/年，其中硅钢原料卷为 97.8 万吨/年。至此，中国的薄板坯连铸连轧生产线已达到 13 条。表 1-2 为 2009 年我国薄板坯连铸连轧生产线产品规格。

表 1-2 2009 年中国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	铸机 流数	设计年产量 /万吨	投产 日期
珠钢	(1000~1351)×(50~60)	1.2~12.7	CSP	2	180	1999.08
邯钢	(900~1680)×70	1.2~21.0	CSP	2	247	1999.12
包钢	(1020~1530)×(52~72)	1.0~20.0	CSP	2	200	2001.08
唐钢	(1235~1600)×(80~85)	1.0~12.0	FTSR	2	250	2002.12
马钢	(900~1600)×(65~70)	3.0~9.5	CSP	2	200	2003.09
涟钢	(900~1600)×(55~70)	0.8~12.7	CSP	2	240	2004.02
鞍钢	(930~1530)×135	1.6~11.5	ASP	2	240	2000.07
鞍钢	(1000~2000)×(135~170)	1.5~25.0	ASP	2	500	2005
本钢	(850~1605)×(70~85)	0.8~12.7	FTSR	2	280	2004.11
通钢	(850~1605)×(70~85)	10.8~12.7	FTSR	2	250	2005.12
酒钢	(850~1680)×(52~70)	1.5~25.0	CSP	2	200	2005.05
济钢	(900~1600)×(135~150)	3.5~6.0	ASP	2	250	2006.11
武钢	(900~1600)×(50~90)	1.0~12.7	CSP	2	253	2009.02

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（连续凸度可控轧机），FTSR 线连轧机组采用 PC 轧机，并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（工作辊能轴向移动的轧机），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。目前，节能降耗、降低生产成本、提高薄板坯连铸连轧生产线的产能与生产效率、结合流程特点开发高附加值产品、进一步完善系统技术实现关键技术的国产化等，都是国内广大冶金工作者研究开发的目标，而且都取得了显著的成绩。

1.3.3 带钢连铸技术

带钢连铸技术由英国 Bessmer 于 1856 年提出，其专利搁置了近 140 年。

用连铸机直接浇铸厚度为 1~10mm 的近终形带钢的生产工艺称为带钢（带坯）连铸。采用带钢（带坯）连铸可以省去带钢的热连轧工序，经铸轧机生产出的产品可以直接当热轧带使用，也可以进入冷轧机轧制成厚度小于 1mm 的冷轧带钢。

目前世界各大钢铁公司、有关科研院所都投入了大量的人力、财力加紧带钢连铸技术的开发研究。总的说来，薄带连铸机的类型可分辊式（单辊式、双辊式）、带式和辊带结合式。其中双辊式薄带连铸机用得最多，约占四分之三。双辊薄带连铸技术发展至今，已经能够组织工业规模的生产，可以说获得了很大的成功。各国建成的带钢连铸机的主要技术参数见表 1-3。

表 1-3 各国带钢连铸机的主要技术参数

国家和公司	连铸机类型	辊径 /mm	铸速 /m·min ⁻¹	带钢尺寸/mm		钢包容量 /t
				厚度	宽度	
蒂森[德]、克莱西姆[法]	双辊	1500	60	1~6	865~1300	25
新日铁[日]、三菱重工[日]	双辊	1200	20~130	1.6~5	1300	10
浦项(韩)、戴维[英]	双辊	750	34~40	2~6	360(1300)	10
太平洋金属[日]、日立造船[日]	双辊	1200	20~50	2~5	1050~1250	10
意大利钢铁公司	双辊	1500	0.8~100	2~10	750~850	20
英国钢铁公司、阿维斯塔[瑞典]	双辊	750	8~36	2~6	400~600	4
克虏伯[德]、日本金属工业	异径 双辊	950/600	40	1.5~4.5	1000	10
阿路德拉姆[德]、奥钢联(VAD)	单辊	2133	15~72	0.3~3	1325~1500	18
阿勒德隆公司[美]	单辊	2133	9~72	1~3	1320	
上海钢铁研究所	双辊	500	<30	1~5	210	0.5
东北大学	异径	200/500	<40	2~4	580	0.25
重庆大学	双辊	250	3~30	1~10	150	0.1

目前比较成熟的技术是双辊式带钢连铸，其基本工艺原理是钢水直接在两个反向旋转的辊之间进行浇注，两辊内部通过水冷却并安装陶瓷侧挡板。原理很简单，但生产很复杂，以 EUROSTRIP 为代表的工艺具有以下优势。

- ① 与传统生产工艺和薄板坯连铸连轧工艺相比，投资额分别降低 77% 和 68%；
- ② 与传统生产工艺和薄板坯连铸连轧工艺相比，单位投资成本分别降低 45% 和 35%；
- ③ 该工艺对空间的要求仅为传统生产工艺的 15%，是薄板坯连铸连轧工艺对空间要求的 40%；
- ④ 实时生产，生产一卷带钢只需几分钟，周期很短；
- ⑤ 降低能源消耗，与传统工艺相比，能耗减少 1400MJ/t，与薄板坯连铸连轧工艺相比，能耗减少 50%；
- ⑥ 减少废气排放量，比传统生产工艺排放的 SO₂、CO₂、NO_x 降低 70%~90%。

EUROSTRIP 工艺为我们提出了两大设想：一是可以形成无间断生产，即在线热轧的基础上直接与冷加工工艺相连接。二是很可能将现有长材设备改造成扁钢生产设备，极大地降低投资。

1.3.4 电磁技术应用

电磁技术是非接触式传递力和能量的技术。近几年在连铸中的主要应用有电磁搅拌

(EMS)、软接触 (Soft Contact)、电磁制动 (EMBR) 等, 不论是在基础理论研究方面, 还是在连铸实际应用方面, 都有较大进展。电磁搅拌技术应用于连铸生产中, 有助于改善铸坯质量, 提高钢的纯净度。铸坯在整个强制冷却过程中有很长的液相穴深度, 液相穴内钢水的运动对消除过热度、改善结晶结构和成分偏析具有重大的影响。

(1) 电磁搅拌技术

电磁搅拌技术是改善连铸坯质量的主要措施之一。电磁搅拌是用来影响液相钢水运动的技术, 当磁场以一定速度切割钢水时, 钢水产生感应电流, 载流钢水与磁场的相互作用产生电磁力, 从而驱动钢水运动。电磁搅拌器的安放位置一般有三处: 即结晶器电磁搅拌 (M-EMS), 二次冷却区电磁搅拌 (S-EMS) 和最终凝固区电磁搅拌 (F-EMS)。

(2) 电磁闸 (电磁制动) 技术

电磁闸 (电磁制动) 技术是在结晶器上对钢液施加静态磁场。以加强对钢液的控制, 使钢液不翻动、不卷渣、不冲刷结晶器侧壁, 改善钢液质量的新技术。

由于电磁闸 (电磁制动) 可以限制钢流速度, 降低液面波动, 减少紊流, 减少保护渣卷入钢水, 使液面平静且温度可上升, 有利于铸坯和结晶器铜板之间的润滑, 减少表面裂纹, 同时也增加了非金属夹杂物上浮的机会, 延长结晶器的寿命, 有利于提高产品质量。

对于薄板坯连铸过程, 由于拉速比常规板坯高很多 ($5\sim 6\text{m}/\text{min}$), 使得结晶器内的钢液产生剧烈的湍流, 液面波动相当剧烈, 很易产生卷渣现象, 也促进凝固壳对夹杂物的捕获, 控制薄板坯结晶器内钢液流场是提高铸坯质量和产量的关键。随电磁制动技术在板坯的应用不断成熟, 近些年来, 在薄板坯结晶器采用电磁制动技术取得了一定的成果。

(3) 电磁连铸技术

电磁软接触结晶器连铸技术是一项崭新的连铸技术。目前, 在铝的生产中, 已实现了利用电磁铸造 (EMC) 技术的铝合金无模铸造。电磁软接触利用高频电磁场透过结晶器作用到液态金属上, 使液态金属与结晶器壁的接触减弱, 从而改善连铸坯的表面质量。同时, 金属在强磁场的作用下凝固结晶, 内部组织细密, 质量明显提高。

在电磁推力作用下, 液态金属与结晶器壁的接触减弱, 呈软接触状态, 同时高频电磁场对金属和结晶器还具有加热作用, 与冷却方向相反, 使边界向中心的冷却速率降低。此外, 电磁场对液相区内的金属有强烈的搅拌作用, 使温度趋于一致, 凝固界面拉平, 从而使铸坯凝固过程温降减缓。

1984年, 美国通用电器公司的一项电磁连铸技术专利提出了组合式软接触结晶器的雏形。1986年, 法国的 VIVES 发表了关于组合式软接触结晶器的技术的研究成果, 该成果表明采用组合式软接触结晶器技术, 可使连铸坯质量明显优于普通板坯质量, 且所用的电磁力远小于电磁连铸的电磁力。进入 20 世纪 90 年代后, 发达国家加强了钢的软接触技术的研究和开发, 使之成为继电磁搅拌之后的另一热点, 并将其与电磁制动技术相结合共同提高铸坯质量。

近年来, 随着高频电磁场作用下的弯月面行为、铸坯受力和运动状态及对铸坯质量影响等方面的深入研究, 软接触结晶器连铸技术在日、韩等国已逐渐开始进入工业性实验。

1.3.5 近终形连铸技术

近终形浇铸金属产品长期以来一直就是冶金学家和金属工业行业所专注的领域。设备投资节省, 冷、热加工以及再加热工艺效率的提高, 是近终形连铸技术发展的主要推动力。近