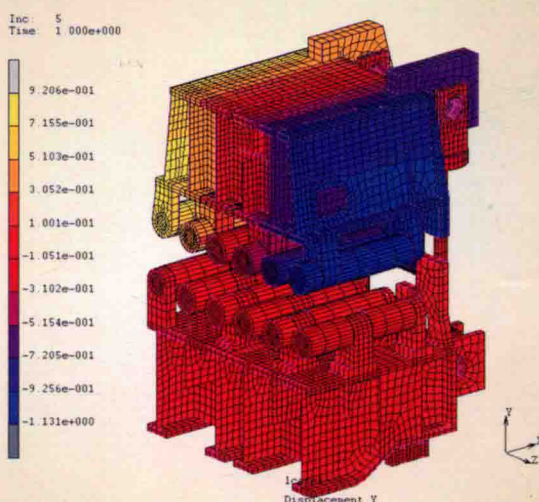


连铸设备的 热行为及力学行为

Thermal and Mechanical Behavior of Continuous Casting Equipment

(第2版)

秦 勤 吴迪平 邹家祥 等编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

主要内容

本书主要介绍连续铸造设备的热行为及力学行为

连铸设备的热行为及力学行为

Thermal and Mechanical Behavior of Continuous Casting Equipment

(第2版)

秦 勤 吴迪平 邹家祥 等编著

内容

第一章

第二章

第三章

第四章

第五章

第六章

第七章

第八章

第九章

第十章

第十一章

第十二章

第十三章

第十四章

第十五章

第十六章

第十七章

第十八章

第十九章

第二十章

北 京

冶金工业出版社

2018

内 容 提 要

本书系统地论述了连续铸钢设备及其运行过程中的热行为和力学行为,包括钢包、钢包回转台、结晶器及其振动机构、扇形段及凝固末端轻压下的力学特性的设计计算及仿真。本书还通过连铸设备介绍了现代机械设计理论方法以及现代检测方法。

本书可供机械、冶金等专业的本科生和研究生使用,也可供有关设计院所及工厂技术人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

连铸设备的热行为及力学行为/秦勤等编著. —2版.
—北京:冶金工业出版社, 2018.4
ISBN 978-7-5024-7795-0

I. ①连… II. ①秦… III. ①连铸设备—热学—
研究 ②连铸设备—力学—研究 IV. ①TG233.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第071771号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7795-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2013年4月第1版,2018年4月第2版,2018年4月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 19.25印张; 464千字; 294页

99.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

第2版前言

本书自2013年出版以来,经过两次印刷,广大读者的反响较好,同时也收到许多读者的反馈和建议。随着科学技术的进步和研究成果的不断取得,有必要对本书进行相应的修订。

在本次修订中,既注意保留原书的优点,又充实了一些新的内容,使之更符合教学和科研要求。修订总的原则是:

(1) 基本保持全书的体系不变:考虑到最新的科学技术发展和最新成果,补充修订相关内容,特别是补充最新的成熟成果。

(2) 考虑科学知识的系统性,增加了铸坯的高温力学性能和本构关系,并尽可能地增加一些成功的工程案例。

(3) 对原版中的一些语言叙述进行了调整,对文字错误进行了订正。

经修订后,基本保留了前7章和第12章的题目和结构,更新了部分内容,并适当增加了工程案例;增加了第8章铸坯的高温力学性能和本构关系;第9章增加了高温铸坯蠕变材料模型的确定;第10章增加了临界应变和板坯动态轻压下的案例;第11章增加了板坯连铸鼓肚变形计算模型改进等方面的内容。新增加的内容一般融汇于相关章节中,使得本书在反映最新技术的同时,也保证其系统性和实用性。

本书的修订工作主要由秦勤完成,田明亮、蒲金森、杨政霖等协助完成了本次修订。在修订本书的过程中,作者参考了许多国内外有关文献资料(详见参考文献),并引用了其中的部分资料和图表,在此深表谢意。更多未能在参考文献一一列明的,在此一并表示感谢!

修订内容中的研究工作得到国家自然科学基金资助项目“铸坯在辊列中的黏塑性变形及高温蠕变遗传机理研究”(51375041)资助;北京科技大学为本书的出版提供了经费支持,在此表示感谢。

编著者

2018年2月

第1版前言

近年来,随着我国钢铁工业的迅猛发展,特别是连续铸钢技术的进步,彻底改变了炼钢生产的流程和物流控制,使之成为连续化、大型化、优质高效的生产模式。科学技术的进步推动了连续铸钢生产,连续铸钢生产反过来又促进了连铸技术的发展。围绕连铸设备和机型的发展,相伴产生了新的设计计算方法和成套的计算软件。针对现代连铸技术的进步,考虑到冶金机械工程教学和冶金机械工程技术人员继续教育的需要,我们编著了本书。本书在内容安排上,结合我们的科研成果和生产实践,重点突出连铸设备的设计原理、新的设计理念和计算方法,并将计算机模型、仿真技术融入其中,同时也注意介绍现代连铸设备的最新技术与发展趋势。希望书中内容能对读者有所启发,特别是对工程技术人员的创新能力有所帮助。

本书共11章。第1、2章简述了连续铸钢生产技术的发展及主要设备简介;第3章结合连铸工艺和生产实践,介绍了连铸坯的热行为;第4~7章介绍了钢包、钢包回转台和结晶器及其振动技术的力学行为;第8~10章介绍了连铸坯顶弯及矫直、凝固末端轻压下及扇形段的力学特性研究;第11章简要介绍了一些连铸过程检测技术。

本书由邹家祥(第1章部分、第2章部分、第4章、第5章部分)、章博(第1章部分、第2章部分)、臧勇(第5章部分)、吴迪平(第8~10章)和秦勤(其余各章)编写;尚书协助完成了一些整理编排工作;秦勤担任主编工作。

全书由潘毓淳教授审阅,特致谢忱。武汉大西洋连铸工程技术有限公司刘联群先生从本书选题立意、编写到出版给予了支持和帮助,特表示诚挚的感谢。

在编写本书过程中,作者参阅了国内外有关文献、资料。书中也列举了一些文献作者的工作成果,包括北京科技大学和武汉大西洋连铸工程技术有限公司合作的共同研究成果,在此一并表示感谢。

由于编著者水平所限,书中难免存在疏漏和不足之处,诚恳地欢迎广大读者批评指正。

编著者

2012年3月于北京科技大学

目 录

1 连续铸钢生产及技术的发展	1
1.1 连续铸钢生产的特点	1
1.2 连续铸钢技术的发展	2
1.2.1 世界连铸技术的发展历程	2
1.2.2 我国连铸技术的发展历程	4
1.3 现代连铸技术的研究及应用	5
1.3.1 现代化连铸机的主要技术特征	5
1.3.2 高效连铸技术	6
1.3.3 薄板坯连铸连轧技术	13
1.3.4 薄带连铸技术	17
参考文献	19
2 连铸机机型及主要设备	21
2.1 连铸机的主要机型	21
2.1.1 立式连铸机	21
2.1.2 立弯式连铸机	22
2.1.3 弧形连铸机	22
2.1.4 水平连铸机	24
2.1.5 旋转式连铸机	24
2.2 连铸车间的主要设备	25
2.2.1 连铸设备的构成	25
2.2.2 钢包及钢包回转台	26
2.2.3 中间包及中间包车	26
2.2.4 结晶器及振动装置	28
2.2.5 二次冷却装置	30
2.2.6 拉坯矫直装置	32
2.2.7 引锭装置和铸坯切割装置	33
参考文献	35
3 连铸坯的热行为研究	36
3.1 连铸凝固传热过程及特点	36

3.1.1	连铸凝固传热的过程	36
3.1.2	连铸凝固传热特点	36
3.2	结晶器传热与凝固	38
3.2.1	钢水在结晶器中的凝固过程	38
3.2.2	结晶器传热量的计算	39
3.2.3	影响结晶器传热的因素	42
3.2.4	结晶器冷却强度与坯壳厚度的关系	45
3.3	二冷区的传热与凝固	47
3.3.1	二冷区的传热	47
3.3.2	影响二冷区传热的因素	48
3.3.3	二冷区坯壳的生长	50
3.4	连铸坯凝固传热的数学模型	50
3.4.1	凝固传热微分方程	50
3.4.2	初始条件及边界条件的确定	51
3.4.3	物性参数的确定	52
3.5	连铸坯温度场计算实例	54
3.5.1	圆坯温度场仿真	54
3.5.2	板坯温度场仿真	57
3.5.3	圆坯凝固过程应力和应变有限元仿真	59
	参考文献	62
4	钢包回转台的力学行为研究	63
4.1	钢包回转台的分类及结构参数	63
4.1.1	钢包回转台的分类	63
4.1.2	典型钢包回转台的主要参数	67
4.2	钢包回转台主要部件的强度分析	68
4.3	钢包回转台动态特性	71
4.3.1	连杆式钢包回转台动态特性分析	71
4.3.2	钢包回转台动荷系数计算研究	73
4.4	钢包回转台支撑臂疲劳寿命分析	75
4.4.1	支撑臂的载荷谱及疲劳校核点的选定	75
4.4.2	材料 $S-N$ 曲线及支撑臂 $S-N$ 曲线	77
4.4.3	非零应力均值的修正和 Miner 损伤累积准则的应用	77
4.4.4	支撑臂焊缝的疲劳寿命计算	78
4.5	钢包回转台螺栓强度分析	80
4.5.1	连接推力轴承的螺栓及地脚螺栓的计算	80
4.5.2	钢包回转台连接螺栓和地脚螺栓强度及有限元分析	81
	参考文献	83
5	钢包的热行为和力学行为	85
5.1	钢包传热及热循环过程	85

5.1.1 钢包传热研究的进步	85
5.1.2 钢包热循环实测研究	86
5.2 钢包温度场数值模拟及测试	87
5.2.1 烘烤过程钢包包壳及包壁温度场研究	87
5.2.2 钢包稳态温度场的研究	90
5.3 钢包应力场数值模拟	91
5.3.1 受钢工况钢包包壁应力场的模拟	91
5.3.2 钢包工作衬对钢包应力影响的研究	92
5.4 300t 钢包裂纹生成分析及钢包改制研究工作实例	93
5.4.1 300t 钢包裂纹统计及分析	93
5.4.2 300t 钢包包壳表面温度测试及数值模拟	95
5.4.3 300t 钢包包壳永久变形测试及包壳材料试验研究	96
5.4.4 300t 钢包包壳应力分析	100
5.4.5 钢包的倾翻力矩和倾翻带强度计算	101
参考文献	102
6 结晶器现代设计及力学行为研究	103
6.1 板坯结晶器的现代设计	103
6.1.1 结晶器内的铸坯凝固行为研究	104
6.1.2 结晶器铜板的热机耦合分析	106
6.2 方坯连铸机的现代设计	108
6.2.1 小方坯连铸机有限元分析	109
6.2.2 结晶器的锥度曲线	114
6.3 连铸圆坯结晶器的设计	115
6.4 连铸异型坯结晶器	117
6.4.1 连铸异型坯结晶器的分析	117
6.4.2 结晶器内腔断面选取原则	120
6.4.3 异型坯结晶器的主要参数	120
6.5 薄板坯连铸结晶器设计	121
6.5.1 薄板坯连铸结晶器的类型	121
6.5.2 漏斗形薄板坯连铸结晶器的内腔形状设计原理	121
6.5.3 薄板坯连铸结晶器现代设计	129
参考文献	136
7 结晶器振动技术研究	138
7.1 铸坯振痕	138
7.2 正弦振动参数设置	140
7.2.1 正弦振动波形函数	140
7.2.2 正弦振动的工艺参数确定	140

7.2.3 振动基本参数确定	142
7.2.4 正弦振动结晶器振动参数确定实例	143
7.3 非正弦振动规律及振动参数	145
7.3.1 非正弦振动波形及波形函数	145
7.3.2 非正弦振动参数	149
7.3.3 非正弦振动参数的确定	150
7.4 常用的结晶器振动装置	151
7.4.1 四连杆振动机构	151
7.4.2 四偏心振动机构	151
7.4.3 弹簧板导向的结晶器振动机构	152
7.4.4 液压振动机构	153
7.4.5 本体振动式方坯结晶器	154
7.5 结晶器振动机构研究	154
7.5.1 结晶器振动机构的运动学和动力学分析	155
7.5.2 基于虚拟样机技术的结晶器振动机构的动力学分析	159
7.5.3 结晶器振动装置模态分析	161
7.5.4 结晶器振动机构强度仿真分析	162
7.6 振动装置的选择与应用	165
参考文献	165
8 铸坯的高温本构方程	166
8.1 铸坯高温本构方程研究现状	166
8.1.1 弹塑性本构模型	166
8.1.2 黏弹性本构模型	166
8.1.3 黏弹塑性本构模型	167
8.2 铸坯高温力学性能试验分析	168
8.2.1 试验方案设计	168
8.2.2 连铸坯高温拉伸实验结果分析——流变应力变化规律	171
8.3 连铸坯高温固相本构关系	175
8.3.1 连铸坯指数型 Arrhenius 本构模型	176
8.3.2 连铸坯时间硬化本构模型	178
8.3.3 连铸坯的应变硬化本构模型及修正	181
8.3.4 连铸坯分段本构模型	185
参考文献	189
9 连铸顶弯与矫直过程的坯壳行为及仿真研究	191
9.1 概述	191
9.1.1 铸坯的带液芯弯曲	191
9.1.2 铸坯的带液芯矫直	192

9.2 矫直力经典计算方法	194
9.2.1 矫直力的经典理论计算方法	194
9.2.2 带液芯弯曲/矫直时的裂纹控制	195
9.3 高温铸坯的蠕变材料模型	199
9.3.1 目前铸坯常见的蠕变材料模型	199
9.3.2 高温铸坯蠕变材料模型的确定	201
9.4 连铸坯带液芯顶弯过程仿真	205
9.5 大断面合金钢连铸坯矫直过程仿真研究	208
9.5.1 大断面矩形坯连铸带液芯矫直仿真研究	208
9.5.2 大断面圆坯连铸带液芯矫直仿真研究	211
参考文献	213
10 凝固末端轻压下技术	215
10.1 连铸坯的内部质量与凝固末端轻压下技术	215
10.1.1 连铸坯的中心缺陷及造成原因	215
10.1.2 凝固末端轻压下改善铸坯内部质量机理	216
10.1.3 凝固末端轻压下的应用	218
10.2 凝固末端轻压下关键技术	220
10.2.1 压下位置及区域的确定	220
10.2.2 压下制度的确定	222
10.3 板坯连铸凝固末端轻压下技术	224
10.3.1 板坯连铸凝固末端动态轻压下技术的设备基础	225
10.3.2 轻压下位置与区域的在线确定方法	227
10.3.3 板坯连铸轻压下的压下制度	228
10.3.4 人为鼓肚轻压下技术	230
10.4 连铸坯固液界面的临界应变	231
10.5 方坯/矩形坯连铸凝固末端轻压下仿真研究	232
10.5.1 方坯/矩形坯连铸凝固末端轻压下仿真模型	233
10.5.2 轻压下作用条件下铸坯的应力应变	233
10.5.3 辊形对轻压下效果的影响仿真研究	235
10.5.4 方坯连铸动态轻压下工艺仿真分析实例	236
10.6 板坯凝固末端压下模型的研究	238
10.6.1 压下区间对压下结果的影响	238
10.6.2 压下分配对压下结果的影响	240
10.6.3 压下总量对压下结果的影响	240
参考文献	242
11 连铸扇形段铸坯鼓肚变形及辊缝控制技术	244
11.1 连铸坯鼓肚问题的理论解析	244

11.1.1	连铸坯的鼓肚变形	244
11.1.2	板坯连铸鼓肚变形解析解	244
11.1.3	板坯连铸鼓肚变形的有限元仿真	248
11.1.4	板坯连铸鼓肚变形改进的三维仿真模型	251
11.1.5	连铸过程中的鼓肚遗传研究	255
11.2	连铸机辊列设计计算	257
11.2.1	直弧形连铸机辊列设计计算	257
11.2.2	大方坯连铸机辊列设计	263
11.3	板坯连铸机辊缝控制技术	264
11.3.1	基于凝固收缩的板坯连铸机辊缝的研究	264
11.3.2	连铸机辊列辊缝的优化控制	266
11.3.3	板坯连铸机辊缝波动对浇铸状态的影响	267
11.3.4	板坯连铸机悬浮式液压扇形段工作特性研究	270
	参考文献	271
12	连铸过程检测技术	273
12.1	钢包下渣检测	273
12.1.1	涡流感应式下渣检测仪	273
12.1.2	光导式下渣检测仪	273
12.2	中间包钢水温度测定	274
12.2.1	中间包钢水温度的点测	274
12.2.2	中间包钢水温度的连续测定	274
12.2.3	黑体空腔式钢水连续测温方法	275
12.3	结晶器内钢水液面检测	276
12.3.1	射线型液面检测	276
12.3.2	电磁型液面检测	277
12.3.3	涡流型液面检测	278
12.3.4	热电偶法液面检测	278
12.3.5	激光法液面检测	279
12.4	结晶器热流检测与防漏钢在线预报	279
12.5	铸坯表面温度检测技术	281
12.5.1	红外测温原理	282
12.5.2	红外测温方式	282
12.6	连铸坯凝固坯壳厚度射钉法测量	285
12.6.1	射钉试验方法及原理	286
12.6.2	射钉试验工作步骤	286
12.6.3	射钉坯壳厚度测试结果的应用	287
12.7	辊间距检测方法	288
12.7.1	无线电式辊间距测定装置	288

12.7.2 激光法辊间距测定装置	289
12.7.3 多功能辊缝仪	289
12.8 结晶器铜管锥度检测	291
12.9 铸坯表面缺陷在线检测	291
12.9.1 工业电视摄像法	291
12.9.2 涡流检测法	291
参考文献	293

1 连续铸钢生产及技术的发展

20 世纪钢铁工业发展迅猛,生产面貌焕然一新,钢铁产量迅速增长,产品品质大幅提升,生产效率显著提高,生产成本明显降低,环境污染得到有效控制。究其本质因素,核心推动力来自钢铁行业的技术进步,即:以氧气转炉炼钢、炉外精炼、连续铸钢、连轧与控轧控冷为核心的四项技术革新带动的钢铁生产流程的技术进步。作为四项重大技术革新之一的连铸技术彻底改变了炼钢生产流程和物流控制,使得单元化、间隙式炼钢生产模式转变为连续化、大型化、专业化、优质化、高效的生产模式,同时推动了冶炼、精炼和轧制工序的技术革新。

1.1 连续铸钢生产的特点

连续铸钢(连铸)生产的最典型特点^[1,2]是:高温钢水通过带有活底的铜模后凝固成壳,随着活底被拉出铜模,形成带液芯的铸坯,并在随后的冷却工序中完全凝固成型,通过控制拉坯速度和凝固速度,使得生产过程可持续进行。采用连续铸钢的生产方式,大大简化了从钢水到固态坯料的成型工艺流程。连铸生产工艺和设备如图 1-1 所示。

连铸的主要设备包括钢包、中间包、结晶器及其振动装置、二冷区支导装置、拉矫机、切割装置和辊道等。一般情况下,冶炼合格的钢水送到连铸车间后首先进行炉外精炼处理,然后用钢包转送到连铸机,再通过中间包注入结晶器内。结晶器是强制水冷、无底的铜模,在浇铸前必须先装上引锭杆。引锭杆起类似活底的作用,当结晶器内的钢水冷却成壳时,其头部就和钢坯相互凝结在一起,而引锭杆的尾部夹持在拉坯机的拉辊中。当结晶器内的钢水液面达到一定高度后,拉坯机开动,以一定的拉坯速度将引锭杆从结晶器中拉出。

为防止铸坯在浇铸过程中与结晶器粘连,或因阻力过大导致铸坯断裂,采用结晶器振动装置对其进行上下往复振动,并对其内壁进行润滑;铸坯在拉出结晶器后,为保证能迅速凝固,需设置二冷段对其进行强制冷却。这样,钢水不断地被浇铸到结晶器内,铸坯被不断地拉出,形成连续的生产过程。

采用连铸工艺进行生产,相对传统的模铸工艺具有以下优势:

(1) 简化了工序,缩短了工艺流程。相对于模铸技术,连铸技术省去了脱模、整模、钢锭均热、开坯等工序,可节省基建投资 40%、减少占地面积 30%、节省劳动力 70%。随着薄板坯连铸连轧等新技术的出现,连铸工艺和工序得到了进一步简化,又省去了粗轧机组,这样减少厂房面积 40%、连铸机设备质量减轻 50%,大大缩短了从钢液到薄板坯的生产周期,成本得到了大幅降低。

(2) 优化了生产流程,实现了连续化、紧凑化生产,由经验控制改变为全流程恒温、恒速的精确控制,生产效率显著提高。

(3) 金属收得率高。采用连铸工艺生产铸坯,切头切尾的损失仅为 1%~2%,和模铸

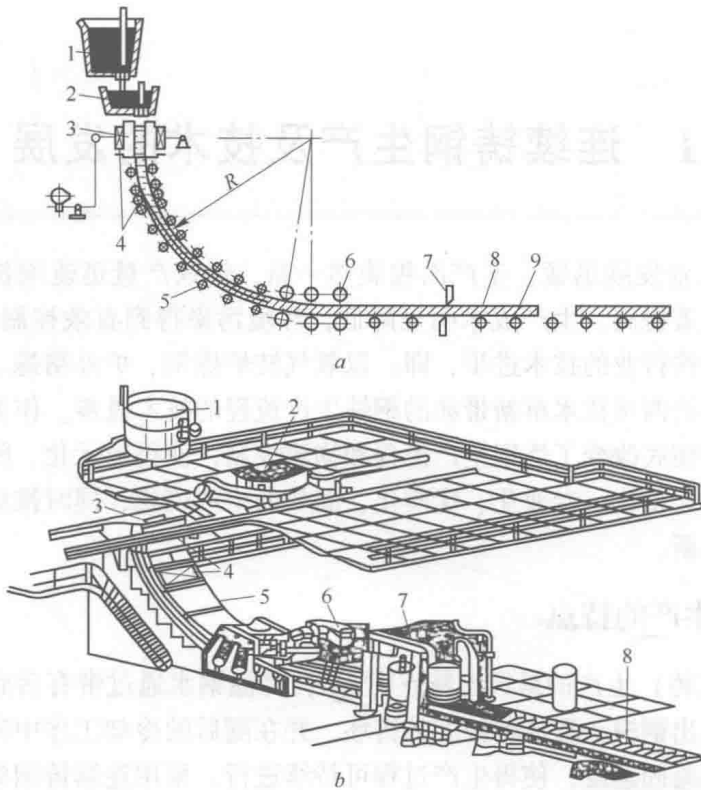


图 1-1 连铸生产工艺和设备

a—连铸生产工艺；b—连铸设备

1—钢包；2—中间包；3—结晶器及振动装置；4—电磁搅拌器；

5—二冷区支导装置；6—拉矫机；7—切割装置；8—辊道；9—轧件

生产相比，金属收得率提高了8%~14%；采用连铸工艺生产得到的产品更接近最终形状，省去了模铸的加热、开坯工序，进一步减少了金属损失，金属收得率又可以提高大约9%。

(4) 能源消耗低。采用连铸工艺，省去了模铸的开坯、加热等工序的燃烧、动力消耗，能源消耗可以降低1/4~1/2。据统计，生产1t铸坯，连铸工艺和模铸工艺相比，可以降低能源消耗400~1200MJ，相当于节省重油10~30kg。

(5) 机械化、自动化水平高。近十年来的技术发展，使得连铸生产中的自动控制和机械化程度越来越高，人均生产率迅速增长，企业的管理手段和水平也随之不断提升。

1.2 连续铸钢技术的发展

1.2.1 世界连铸技术的发展历程

连续浇铸技术从提出到世界上第一台工业生产用连铸机建成（1950年）经过了一百余年；之后又经过五十年，连铸生产工艺、设备、产品质量各方面不断发展与完善。世界连铸技术发展大体经历6个阶段^[3,4]：

(1) 连续浇铸方法提出到初步连铸法（20世纪30年代至40年代）。19世纪40年代，美国的塞勒斯（G. E. Sellers）、莱恩（J. Lainy）、英国的贝塞麦（H. Bessemer）提出了各

种连续浇铸有色金属的方法。

20 世纪 30 年代至 50 年代, 连铸机的各种专利机型和设备竞相投入试验生产, 如倾斜式连续铸钢机 (苏联), 水平式连铸机 (苏联、美国、英国、德国、日本、中国都有不同的研究和应用), 轮带式连铸机等。

(2) 立式连铸机进入钢生产领域 (20 世纪 50 年代)。由德国人德伦 (R. M. Daelen) 提出立式连铸机的雏形, 与 S·容汉斯 (S. Junghans) 的结晶器振动技术组合, 1933 年第一台浇铸黄铜的立式连铸机取得成功。随后又建立浇钢的试验机组。1946~1947 年, 美国、英国、日本、奥地利都建了试验机组。1950~1958 年, 德国曼内斯曼 (Mannesman) 公司、苏联红十月冶金厂、英国巴路厂 (Barrow)、加拿大阿特拉斯厂以及中国的重庆第三钢铁厂都建立了不同型式的生产型立式连铸机。

(3) 弧形连铸机的应用 (20 世纪 60 年代)。弧形连铸机由于其技术的优越性, 从应用开始很快得到了推广。20 世纪 70 年代占连铸机的 54%, 到 80 年代初已达 78%, 所占比例大幅提高。德国于 1963 年建成一台 200mm×200mm 断面的弧形连铸机, 1964 年又建成大型板坯 (2100mm) 弧形连铸机。此间, 瑞士康卡斯特 (Concast) 设计的弧形连铸机投入热试车。中国由徐宝陞等设计的重钢三厂 1500mm 宽弧形连铸机也投入热试车。

(4) 连铸技术迅速进入大规模生产 (20 世纪 70 年代)。20 世纪 70 年代, 世界发生能源危机, 促进了节省工序和能耗的连铸技术的推广应用, 如当时的日本, 连铸比从 1970 年的 5.6% 上升到 1980 年的 59.5%, 是连铸比上升最快的国家。意大利、法国、德国、美国、苏联, 连铸坯产量每年增加 100 万吨以上。到 1980 年, 全世界已建成连铸机 1000 多台, 一大批大型炼钢厂实现了全连铸, 年生产能力都超过 200 万吨。

(5) 连铸技术全面高速发展时期 (20 世纪 80 年代至 90 年代)。这一时期连铸技术在生产上广泛被采用, 连铸装备、工艺及相关技术全面高速发展。

生产工艺流程采用炼钢—精炼—连铸的优化组合, 中间包冶金受到高度重视。中间包容量扩大, 包内钢液深度由 60 年代的 300~400mm 增长到 800~1200mm。结晶器的变化: 板坯结晶器普遍采用在线调宽; 方坯结晶器注重内型的构造, 如以钻石形、凸形、抛物线形锥度结晶器替代以往的单锥度、双锥度结晶器; 结晶器可快速吊装更换与对中、液压振动技术。

为提高铸坯质量, 提高拉坯速度, 防止板坯鼓肚, 板坯二冷区普遍采用气-水喷雾替代水喷嘴, 二冷导辊改用多支点分节辊、小辊径密排布置、多点矫直、多点弯曲、流道辊缝收缩或轻压下、动态轻压下。计算机的介入不仅为自动控制提供了方便, 并为监测、数据收集分析、前后工序的联系, 建立生产过程控制系统, 包括冶炼、连铸、轧钢一体化以及质量保证体系在内的过程控制系统。

连铸技术的进步与高速发展是相辅相成的。1980 年世界连铸比为 29.9%, 1990 年连铸比达 64.1%, 2000 年连铸比达到 86%。连铸比超过 90% 的国家或地区有 40 个以上。

(6) 连铸的技术进步与发展时期 (20 世纪 90 年代及 21 世纪)。高效连铸技术的发展为连铸机实现高效率生产创造了条件, 拉速、作业率、漏钢率、铸坯无缺陷率等指标均得到改善, 一些工厂的连铸生产效率全面上升。

高效连铸在方坯连铸上也取得很大成功, 方坯实现高效率的主要措施是用抛物线形锥度、钻石形、凸面形等替代传统的单锥度结晶器, 提高振动精度, 改进二冷制度等。连铸

拉速得到提高。与此同时,连浇记录不断创新。据国际组织调查统计,世界各国连浇炉数的平均值也是成倍增长。

进入 20 世纪 80 年代,近终形(接近最终成品断面形状)连铸引起广泛关注。德国、奥地利、意大利、英国、法国、日本等主要工业国都投入力量开展研究开发,近终形连铸技术是当时最受关注的。薄板坯连铸连轧和薄带连铸是当前近终形连铸中的重点。其中,薄板坯连铸连轧(TSCR)工艺率先取得成功,并用于工业生产,最先投入工业生产的是德国的施罗曼·西马克(Schloemann Siemag,简称 SMS)公司开发的用漏斗形结晶器浇铸厚度为 50mm 的薄板坯连铸连轧工艺 CSP(compact strip production),1987 年美国纽柯(Nucor)公司率先建设生产线。随后 CSP 工艺生产线在世界上许多国家推广应用。

继 SMS 公司宣布 CSP 成功后,德国曼内斯曼·德马格(MDH)宣布 ISP 试验成功(inline strip production)。意大利达涅利(Danieli)公司研究开发的 FTSC 薄板坯连铸连轧,采用 H^2 结晶器(高效、高质量),该生产线在加拿大阿尔戈马厂于 1997 年 10 月投产。

奥地利的 CONROLL 中薄板坯连铸连轧工艺近似于传统板坯连铸,板坯结晶器厚度为 90~130mm,在二冷区将铸坯压薄,其结晶器厚度大,有利于钢液流场分布和夹杂物上浮等。

日本住友金属的薄板坯连铸连轧的专利技术称为 QSP,1997 年在美国 Trico 公司和北极星公司投产。阿维迪公司的无头连铸连轧(ESP)于 2009 年建成投产。

薄带连铸技术(strip casting):早在 150 多年前由贝塞麦提出了双辊法浇铸薄带,到 20 世纪 80 年代,作为近终形连铸技术的开发,备受冶金界重视,法国、意大利、德国、英国、澳大利亚、美国、韩国、中国等研究机构、大专院校、钢铁公司都投入很大的研究力量,对双辊连铸薄带的研究做出了很大努力。

薄带连铸进入工业化试验的有:欧洲的 EuroStrip,由法国的西诺公司、德国的蒂森-克虏伯集团、意大利 AST 公司。后来,奥地利的奥钢联加入,在意大利的特尔尼(Terni)厂试验,浇铸不锈钢、硅钢、碳钢,薄带尺寸为 $(2\sim 5)\text{mm}\times 1400\text{mm}$;澳大利亚的 M 工程是 BHP 和日本 IHI 公司联合开发研究,于 1994 年建成一台可生产厚 2mm、宽 1900mm 的薄带铸机,美国纽柯(Nucor)公司应用 M 工程的研究成果在印第安纳州建设生产性试验工厂,钢包容量为 100t,薄带尺寸为 $(0.7\sim 2.0)\text{mm}\times 2000\text{mm}$,该生产线由纽柯公司、澳大利亚的 BHP 公司和日本 IHI 公司合资建造。纽柯公司在布莱斯维尔厂建设了第二条 CAsrip 生产线,带钢宽度 1680mm、厚度 0.7~2.0mm。日本的新日铁与三菱重工、中国上海钢研所、东北大学、宝钢都先后开展此项研究,并取得较好成绩。

1.2.2 我国连铸技术的发展历程

连铸在我国发展经历,大致可以分为研究开发与产业化、相持发展、规模建设、高速发展四个阶段^[5]。具体介绍如下:

(1) 研究开发与产业化阶段(1954~1967 年)。在此阶段,冶金部钢铁研究总院、北京钢铁学院、上海交通大学、重庆钢铁厂等单位开始了连铸的试验研究,研究与实验内容包括:连铸结晶器振动、二冷、拉矫机、直流变速、液压切割等关键设备;机型设计包括:水平、倾斜、弧形、立弯、立直等。值得一提的是弧形连铸机的诞生:立式连铸机有很多优点,但是整个装备过于高大,铸坯的定尺长度作业率及生产效率受到限制。为了降

低设备高度,北京钢铁学院(今北京科技大学)徐宝陞教授提出采用弧形结晶器的设想。1959年,他在重钢三厂用一个结晶轮和一块弧形结晶块组成的装置进行了试验。1960年,在北京钢铁学院附属钢厂建成一台简易的试验用弧形连铸机,浇出了200mm×200mm方坯。为了进行工业生产性试验,1962年北京钢铁学院和重钢三厂合作设计,由重钢三厂制造设备,于1964年6月24日在该厂建成并投产了一台圆弧半径为6m、厚150mm、宽1700mm的板坯、方坯两用弧形连铸机。这是世界上最早的工业用弧形连铸机之一。可以肯定,20世纪60年代初期与中期我国连铸技术的研发与生产取得了与世界同步的成绩。

(2) 相持发展阶段(1967~1982年)。这一阶段连铸技术的完善与发展在我国基本处于停滞状态,直至1980年我国连铸比稍见增长,1982年全国连铸比为7.6%,连铸坯产量275万吨。1979年武钢第二炼钢厂从德国引进了R 10m的弧形板坯连铸机,起到了一定的示范作用。此外,我国平炉慢节奏生产客观上阻碍了连铸的发展。15年的徘徊不前,使我国连铸生产大大地落后于欧、日等发达国家,连铸比仅为日本连铸比的十几分之一。

(3) 规模建设阶段(1983~1989年)。在1983年召开的全国炼钢工作会议上,冶金工业部钢铁司明确提出加快发展连铸技术和连铸生产的任务。组织了对西马克-康卡斯特引进的板坯连铸机的消化吸收和对上钢一厂国产板坯连铸机的联合攻关工作,1985年,武钢第二炼钢厂成为我国第一个全连铸炼钢厂。1988年,冶金工业部召开了第一次全国连铸工作会议,总结了30年来连铸发展的经验和教训,第一次提出了“以连铸为中心,炼钢为基础,设备为保证”的连铸生产技术方针。1988年和1989年,在连铸机建设速度增加的同时,连铸比年增长达到1.6个百分点,年增铸坯超过110万吨,增强了全行业加快发展连铸的信心。

(4) 高速发展阶段(1990~2008年)。在实现全连铸生产和炼钢—炉外处理—连铸“三位一体”组合优化等技术目标的引领下,我国连铸取得了长足进步,连铸成为我国钢铁生产突破模铸生产“瓶颈”,加快淘汰平炉,促进高炉、转炉高效长寿,实现流程优化和跨越式发展的关键因素。1990年,我国连铸比为25.07%;1993年后,我国连铸坯的年增长量超过产钢的年增长量;1996年,我国连铸比首次突破50%;2001年连铸比达88.2%,首次超过了世界平均连铸比86.8%的水平。从2008年起,我国连铸比一直保持在98%以上,基本确立了我国在连铸生产第一大国的领先地位。在此期间,连铸技术发展主要在两个方面:常规连铸生产与技术的高速发展;近终形连铸技术的开发与引进生产线建设。

1.3 现代连铸技术的研究及应用

1.3.1 现代化连铸机的主要技术特征

中国金属学会和中国钢铁工业协会在2012年出版的《2011~2020年中国钢铁工业科学与技术发展指南》指出,现代常规板坯连铸机采用的新技术主要包括:

- (1) 全程无氧化保护浇铸;
- (2) 钢包下渣检测;
- (3) 大容量及流场优化的中间包;
- (4) 结晶器液面和中间包液面自动控制;