

连续铸钢技术丛书

连铸结晶器

蔡开科 等 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

连续铸钢技术丛书

连 铸 结 晶 器

蔡开科 等编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2008

内 容 提 要

本书在阐明连铸结晶器内钢水流动、传热、凝固行为、坯壳生长、产生应力等热状态的基础上,详细介绍了影响这一过程的结晶器的设计、制造与应用、操作及相关工艺技术,还介绍了铸坯质量保障措施和结晶器专家系统等。

本书可供从事连铸设计、制造、生产、科研、管理和教学的人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

连铸结晶器/蔡开科等编著. —北京:冶金工业出版社,
2008. 10

(连续铸钢技术丛书)

ISBN 978-7-5024-4635-2

I. 连… II. 蔡… III. 连续铸钢—结晶器(冶金炉)
IV. TF777

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 130782 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

策划编辑 张 卫 刘小峰 责任编辑 尚海霞 王 楠 美术编辑 张媛媛

版式设计 张 青 责任校对 王贺兰 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-4635-2

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 10 月第 1 版, 2008 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 29 印张; 698 千字; 445 页; 1-3000 册

69.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

出版前言

正如殷瑞钰院士在其著作《冶金流程工程学(第2版)》中所述的那样,今天我国钢铁工业得到突飞猛进的发展,正是得益于20世纪90年代我国钢铁工业先后重点突破了6项对钢厂生产流程联系紧密、结构影响力大的关键技术和能使钢厂用得上的先进或实用的共性技术,这其中排第一位的就是连铸技术。

我国连铸技术的发展过程经历了“以连铸为中心,炼钢为基础,设备为保证”、“以炼钢炉—炉外精炼—连铸机三位一体组合优化”和“以发展高效、高速连铸技术和近终形连铸技术为重点进一步大跨度协调优化”等三个阶段。连铸技术通过工艺优化、装备改良和国产化等途径有了长足进步,影响与带动了钢铁生产流程及前后工序技术的优化,如促进了炉外精炼技术、高效连铸技术与装备、薄板坯连铸连轧等的快速发展,提高了钢材质量,提高了生产效率,实现了钢铁工业的清洁生产、节能与可持续发展。

近年来,我国连铸比迅速提高,连铸比已达到98%以上,重点企业已实现全连铸。

中国正在大步从钢铁大国迈向钢铁强国,全面总结代表现代钢铁生产流程核心技术的连铸技术,是新时期对钢铁工作者提出的高层次要求,是钢铁工作者的历史使命。

通过我国连铸工作者的不懈努力,连铸的理论研究、生产工艺、设备制造与自动化等方面已取得大量的科研成果。为了进一步促进我国连铸技术的发展,我们共同组织编写一套《连续铸钢技术丛书》。

这套丛书旨在反映国内外连续铸钢先进技术水平,具有科学性、指导性和实用性,并与钢铁企业生产紧密结合。希望这套丛书的出版能为国内连铸领域的工程技术人员、生产人员、科研人员、管理人员,以及高等学校冶金工程专业的教学人员提供有价值的参考。

这套丛书由冶金工业出版社和中国金属学会连续铸钢分会共同筹划确定书目，并邀请国内钢铁冶金领域的专家学者分册撰写，由冶金工业出版社陆续编辑出版。

冶金工业出版社
中国金属学会连续铸钢分会
2008年10月

前 言

经过改革开放近30年的发展，我国钢产量已居世界首位，连铸比进入世界产钢国家的领先行列。目前我国连铸机可以生产从小方坯、大方坯、圆坯、异形坯轧制各类长材产品到生产厚板坯、中厚板坯、薄板坯轧制各类板管带产品，钢的品种、规格和质量都在不断满足国民经济各部门建设对钢材多样性和苛刻性的需求。

连铸结晶器是连铸机的“机头”，其重要性被喻为连铸机的“心脏”。结晶器是一个高效率的换热器、钢水凝固成形器、钢水夹杂物净化器和铸坯表面缺陷控制器。结晶器内钢水、坯壳、渣相、铜板的相互关系反映在结晶器内钢水流动、钢水传热凝固、坯壳生长和相变以及坯壳应力的相互作用上，这是一个非常复杂的动态过程。因此，结晶器的设计、制造、操作工艺和热工作状态对这一动态过程的控制有十分重要的影响，它对连铸机产量、铸坯质量和生产的安全性有决定性作用。

随着连铸技术的发展，人们对结晶器研究日益深入，形成了一整套的结晶器控制技术和专家系统。为了适应我国连铸生产发展的需要，中国金属学会连铸分会与冶金工业出版社共同组织编写了《连铸结晶器》这一专著。本书的编著者都长期工作在连铸设计、制造、生产和技术研究的第一线，有丰富的实践经验和理论基础。编著者力图从理论与实践的结合上、内容的广度和深度上来阐明连铸结晶器的设计、制造、热工作状态的原理和工艺以及控制的技术对策。希望本书对从事连铸设计、制造、生产、科研和教学的人员有所裨益。

本书内容共分13章。编写分工如下：第1章为蔡开科（北京科技大学），第2章为林刚（中冶京诚工程技术公司），第3章为毛敬华（中冶赛迪工程技术公司）、易余哲、孙束（中冶华天工程技术公司），第4章为魏祖康（邯钢连铸连轧厂），第5章为许寿华（上海宝钢机械厂），第6章为刘新（钢铁研

究总院), 第7章为余志祥(武汉钢铁公司), 第8章为李宪奎(燕山大学), 第9章为周川生(中钢洛阳耐火材料研究院), 第10章为朱苗勇(东北大学), 第11章为谢兵(重庆大学), 第12章为毛斌(中国科学院力学所), 第13章为姚曼(大连理工大学)。全书由蔡开科统编、审定。

中国金属学会连铸分会万体娅女士对本书编写工作进行了组织协调, 北京科技大学冶金与生态工程学院孙彦辉副教授、秦哲博士对书稿进行了编录校对, 冶金工业出版社对本书编写出版给予了积极支持, 对此编著者表示衷心的感谢。

限于编著者水平, 书中不当之处, 敬请专家和读者批评指正。

编著者

2007年12月

目 录

1 连铸结晶器钢水凝固与热量传输	1
1.1 结晶器热量传输过程	1
1.1.1 钢水凝固热量释放	1
1.1.2 结晶器钢水热量传递	3
1.1.3 热量传递机构	5
1.1.4 影响结晶器传热的因素	9
1.2 结晶器弯月面区钢水凝固行为	13
1.2.1 结晶器钢液弯月面形成	13
1.2.2 结晶器弯月面渣子行为	14
1.2.3 结晶器弯月面初生坯壳凝固钩形成	16
1.2.4 结晶器弯月面区凝固坯壳振痕形成	19
1.2.5 包晶相变对凝固坯壳收缩的影响	21
1.3 结晶器凝固坯壳生长	24
1.3.1 结晶器初生坯壳的凝固结构	24
1.3.2 结晶器初生凝固坯壳均匀性	26
1.3.3 结晶器凝固坯壳生长	31
1.4 结晶器钢水凝固传热数学模型	34
1.4.1 结晶器凝固传热数学模拟概述	34
1.4.2 结晶器铸坯温度场数学模拟中几个问题处理	35
1.4.3 结晶器钢水凝固传热数学模型	36
1.4.4 数学模型应用	38
1.5 结晶器铜板温度场数学模型	39
1.5.1 解析结晶器铜板温度场的意义	39
1.5.2 板坯结晶器的铜板导热数学模型	39
1.5.3 结晶器铜板温度场数学模型应用	40
参考文献	42
2 连铸板坯结晶器设计	45
2.1 板坯结晶器的形式	45
2.2 板坯结晶器的结构	46
2.2.1 用于电动机械式振动的结晶器	46
2.2.2 用于液压振动的结晶器	51

2.3 板坯结晶器的设计参数	54
2.3.1 结晶器的长度	54
2.3.2 结晶器的断面尺寸和倒锥度	54
2.3.3 结晶器铜板的材质	55
2.3.4 结晶器铜板的镀层	56
2.3.5 结晶器铜板的厚度	57
2.3.6 结晶器铜板冷却水量和流速	57
2.3.7 结晶器铜板水槽的分布	58
2.3.8 结晶器调宽力的计算	58
2.3.9 结晶器单边调宽行程	59
2.4 板坯结晶器的装配、调整和运转	59
2.4.1 结晶器使用前的检查	59
2.4.2 结晶器的调整和对中	60
2.4.3 结晶器的准备	60
2.4.4 开浇前的前提条件	61
2.4.5 结晶器的故障	62
参考文献	62
3 连铸方坯、圆坯、异形坯结晶器设计	63
3.1 连铸方坯(小方坯、大方坯)结晶器的设计	63
3.1.1 方坯结晶器的形式及技术要求	63
3.1.2 方坯结晶器断面选取原则	64
3.1.3 方坯结晶器的主要设计参数	66
3.1.4 方坯结晶器结构特点	77
3.1.5 方坯结晶器技术的发展	84
3.2 连铸圆坯结晶器的设计	85
3.2.1 圆坯结晶器的形式及技术要求	85
3.2.2 圆坯结晶器的内腔断面选取原则	87
3.2.3 圆坯结晶器的主要参数	87
3.2.4 圆坯结晶器的结构特点	89
3.3 连铸异形坯结晶器的设计	90
3.3.1 异形坯结晶器的形式及技术要求	90
3.3.2 异形坯结晶器的内腔断面选取原则	91
3.3.3 异形坯结晶器的主要参数	92
3.3.4 异形坯结晶器的结构特点	93
参考文献	95
4 薄板坯连铸结晶器设计	96
4.1 薄板坯连铸结晶器的类型	96

4.2 漏斗形薄板坯连铸结晶器的内腔形状设计原理	99
4.2.1 结晶器宽面设计	99
4.2.2 结晶器窄面设计	109
4.3 薄板坯连铸结晶器内腔工艺尺寸和结构设计	112
4.3.1 结晶器内腔工艺尺寸	112
4.3.2 背腔冷却水通道形状设计	121
4.3.3 铜板材质的选择	128
4.3.4 表面镀层	129
4.3.5 结晶器结构	130
4.4 结晶器的维修	131
参考文献	132
5 板坯连铸结晶器制造与应用	135
5.1 几种典型结晶器结构简介	135
5.1.1 西马克-德马格机型	135
5.1.2 奥钢联机型	135
5.1.3 达涅利戴维机型	138
5.1.4 SPCO 机型	138
5.2 结晶器材料的选择与应用	138
5.2.1 结晶器焊接件的材料选择	138
5.2.2 铜板母材材料的选择与应用	141
5.2.3 结晶器铜板表面处理的材料选择与应用	144
5.3 结晶器制造	146
5.3.1 结晶器焊接件制造方法	146
5.3.2 结晶器支撑框架制造	151
5.3.3 板坯连铸结晶器水箱制造	152
5.3.4 结晶器铜板制造	153
5.3.5 结晶器调宽装置制造	154
5.3.6 结晶器足辊制造	155
5.3.7 结晶器安装	158
5.3.8 薄板坯结晶器制造	162
5.3.9 薄带结晶器制造	163
5.3.10 结晶器铜板表面处理	163
5.4 结晶器的应用与维护	167
5.4.1 结晶器对中	167
5.4.2 结晶器在线检查	168
5.4.3 结晶器铜板失效分析	170
5.4.4 夹紧装置失效分析	171
5.4.5 调宽装置失效分析	171

5.4.6	铜板修复	172
5.4.7	水箱修复	173
5.4.8	结晶器足辊修复	173
	参考文献	173
6	方坯、圆坯和异形坯结晶器制造与应用	174
6.1	概述	174
6.2	结晶器制造标准和材质的选择	174
6.2.1	结晶器制造标准	174
6.2.2	管式结晶器的材料和理化性能	175
6.3	方坯和矩形坯结晶器的制造	176
6.3.1	结晶器铜管结构形式和尺寸公差	176
6.3.2	铜管参数和材质的选择	179
6.3.3	毛坯铜管的制造	180
6.3.4	成形铜管的制造	182
6.3.5	导流水套、外水套和足辊	184
6.3.6	方坯和矩形坯结晶器的总成	186
6.4	方坯结晶器的使用和维护	189
6.4.1	连铸方坯的质量与结晶器的使用	189
6.4.2	影响方坯结晶器铜管过钢量的因素	190
6.4.3	提高铜管过钢量的措施	190
6.4.4	铜管的修复	191
6.5	矩形坯组合式结晶器的改造	191
6.5.1	管式结晶器和组合式结晶器	192
6.5.2	大断面矩形坯结晶器的铜管	193
6.5.3	大断面矩形坯结晶器总成及应用	194
6.6	圆坯结晶器的制造与应用	195
6.6.1	圆坯结晶器铜管	195
6.6.2	导流水套的制造与工艺	198
6.6.3	圆坯结晶器总成	198
6.7	异形坯结晶器的制造与应用	199
6.7.1	国内的异形坯连铸机	199
6.7.2	异形坯结晶器	200
6.7.3	异形坯结晶器的铜管	201
6.7.4	异形坯管式结晶器的总成	202
6.8	成品铜管的贮运和保管	203
6.8.1	质量证明书	203
6.8.2	铜管的包装	203
6.8.3	铜管的运输	204

6.8.4 铜管的储存	204
参考文献	204
7 结晶器操作	205
7.1 开浇操作	205
7.1.1 开浇前的准备工作	205
7.1.2 结晶器、引锭头的密封操作	209
7.1.3 手动开浇操作	209
7.1.4 自动开浇操作	210
7.1.5 开浇升速操作	210
7.2 正常浇铸操作	210
7.2.1 保护渣操作	211
7.2.2 快换水口操作	211
7.2.3 快换中间包操作	211
7.2.4 异钢种连浇操作	212
7.2.5 在线调宽操作	212
7.3 浇铸结束操作	213
7.4 操作异常及对策	214
7.4.1 开浇自动流钢	214
7.4.2 中间包开浇后控制失灵	214
7.4.3 浇铸过程中控流失灵	214
7.4.4 浸入式水口和座砖间隙漏钢	214
7.4.5 中间包滑板漏钢	214
7.4.6 浸入式水口穿、裂	215
7.4.7 水口逐渐堵塞	215
7.4.8 水口突然堵塞	215
7.4.9 结晶器漏钢	215
7.4.10 挂钢、粘连和结冷钢	216
7.4.11 坯尾漏钢	216
7.4.12 结晶器下渣	216
7.4.13 结晶器断水	216
7.4.14 结晶器振动故障	216
8 结晶器振动	217
8.1 概述	217
8.1.1 振动的结晶器使连铸生产实现工业化	217
8.1.2 结晶器振动方式的发展	217
8.1.3 结晶器润滑	219
8.1.4 铸坯表面振痕	220

8.2 正弦振动规律及振动参数	222
8.2.1 正弦振动波形及波形函数	223
8.2.2 正弦振动的工艺参数及确定	223
8.2.3 振动基本参数的确定	225
8.2.4 正弦振动同步控制模型	228
8.3 非正弦振动规律及振动参数	230
8.3.1 非正弦振动波形及波形函数	230
8.3.2 非正弦振动参数	234
8.3.3 非正弦振动参数的确定	235
8.4 结晶器振动装置	239
8.4.1 振动装置的基本特点	239
8.4.2 振动机构导向的演变与发展	239
8.4.3 本体振动式方坯结晶器	244
8.4.4 板坯连铸振动装置和快速更换台	244
8.4.5 曼内斯曼—德马格谐振结晶器	247
8.4.6 非正弦振动发生装置	248
8.5 振动装置的选择与应用	251
8.5.1 振动装置选择原则	251
8.5.2 振动装置的性能检测与维护	252
参考文献	254
9 结晶器钢水流量控制及控流装置的设计	256
9.1 结晶器流量的无塞棒控制系统	256
9.1.1 结晶器流量的无塞棒控制系统	256
9.1.2 定径水口的分类	256
9.1.3 定径水口的设计	258
9.1.4 锆质定径水口的材质与性能	259
9.2 结晶器流量的塞棒水口控制系统	260
9.2.1 塞棒有效行程的计算	261
9.2.2 浸入式水口的设计	262
9.3 整体塞棒的设计	267
9.3.1 整体塞棒棒头的形状分类	267
9.3.2 整体塞棒棒头的设计	267
9.3.3 塞棒种类	273
9.4 浸入式水口的材质	274
9.4.1 铝碳质	274
9.4.2 铝锆碳质	275
9.4.3 吹氩式铝碳质	275
9.4.4 锆钙碳质	276

9.4.5 尖晶石质	276
9.4.6 快速更换用水口	276
9.5 定径水口和浸入式水口的热换操作	277
9.5.1 定径水口的热换操作	277
9.5.2 浸入式水口的热换操作	279
参考文献	279
10 连铸结晶器内流动控制	281
10.1 结晶器内钢液流动的基本特征	281
10.1.1 板坯结晶器内钢液的流动特征	281
10.1.2 方坯、圆坯结晶器内钢液的流动特征	282
10.1.3 薄板坯结晶器内钢液的流动特征	282
10.2 影响结晶器内钢液流动的因素	283
10.2.1 浸入式水口参数	283
10.2.2 吹氩流量	285
10.2.3 电磁力	286
10.3 结晶器内钢渣界面行为	287
10.3.1 结晶器内钢渣界面的基本特征	287
10.3.2 结晶器内的卷渣机理	287
10.4 结晶器钢液流动的水力学模拟	289
10.4.1 流动模拟相似准数的确定	290
10.4.2 渣金界面相似条件的确定	291
10.4.3 水力学模型中其他参数的确定	292
10.4.4 水模型系统构成	293
10.4.5 典型实例	294
10.5 结晶器钢液流动的数学模拟	296
10.5.1 描述结晶器内流动的控制方程	296
10.5.2 描述结晶器内钢渣界面行为的控制方程	297
10.5.3 边界条件	298
10.5.4 数值求解	299
10.6 结晶器流动控制应用	300
10.6.1 钢液流动控制(单、双循环流)	300
10.6.2 液面波动指数	301
参考文献	302
11 连铸保护渣	304
11.1 连铸保护渣概述	304
11.1.1 连铸保护渣的类型	304
11.1.2 连铸保护渣在结晶器中的行为	305

11.1.3	连铸保护渣的基本功能	307
11.2	连铸保护渣的理化性能	308
11.2.1	保护渣的碱度	309
11.2.2	保护渣的熔化温度	311
11.2.3	保护渣的黏度	312
11.2.4	保护渣的熔化速度	316
11.2.5	保护渣的结晶温度	319
11.2.6	保护渣的界面性质	321
11.2.7	熔渣吸收夹杂的能力	323
11.3	连铸保护渣的热物理性能	329
11.3.1	保护渣的传热性能	329
11.3.2	保护渣的结晶性能	331
11.4	连铸保护渣的润滑与摩擦	336
11.4.1	保护渣的消耗量与渣膜厚度	336
11.4.2	铸坯与结晶器间摩擦力的研究	340
11.5	连铸工艺参数对保护渣的要求	342
11.5.1	钢种对保护渣性能的要求	342
11.5.2	结晶器断面形状及尺寸对保护渣性能的要求	343
11.5.3	拉速对保护渣性能的要求	345
11.5.4	振动条件对保护渣性能的要求	346
11.6	连铸保护渣与铸坯质量的关系	347
11.6.1	铸坯表面纵裂纹	347
11.6.2	铸坯表面凹陷	349
11.6.3	振痕及横裂	349
11.6.4	黏结漏钢	350
11.6.5	铸坯表面及皮下夹杂物	350
11.6.6	星状裂纹	351
11.6.7	表面增碳	352
11.7	保护渣的应用实践	354
11.7.1	保护渣的选择原则	354
11.7.2	保护渣应用的在线监控	365
	参考文献	368
12	连铸用结晶器电磁搅拌技术	371
12.1	方坯连铸结晶器电磁搅拌技术	371
12.1.1	结晶器电磁搅拌器的配置	371
12.1.2	结晶器电磁搅拌的基本特征	378
12.1.3	结晶器电磁搅拌运行参数的优化	383
12.1.4	结晶器电磁搅拌作用下的冶金机理和冶金效果	390

12.2 板坯连铸结晶器电磁控流技术·····	395
12.2.1 板坯连铸结晶器钢水流动控制的重要性·····	395
12.2.2 结晶器内钢水流动控制技术的主要模式·····	397
12.2.3 板坯连铸结晶器电磁搅拌 (MEMS) 技术·····	399
12.2.4 板坯连铸结晶器电磁制动技术·····	401
12.2.5 板坯连铸结晶器多模式电磁搅拌技术·····	404
参考文献·····	407
13 结晶器专家系统·····	409
13.1 概述·····	409
13.1.1 结晶器专家系统概念的提出·····	409
13.1.2 结晶器过程需要检测的重要参数·····	409
13.1.3 结晶器专家系统的作用和功能·····	410
13.2 结晶器专家系统的构成·····	411
13.2.1 结晶器专家系统的基本构成·····	411
13.2.2 必要的硬件系统简介·····	412
13.2.3 数据流构造·····	412
13.2.4 功能软件包·····	413
13.3 结晶器传热行为的监测·····	413
13.3.1 温度传感器及其安装技术·····	414
13.3.2 结晶器热流测定原理和方法·····	415
13.3.3 结晶器热监测系统构成·····	416
13.3.4 结晶器温度和热流检测系统开发实例·····	417
13.3.5 黏结漏钢预报·····	422
13.3.6 结晶器温度图和铸坯凝固可视化技术·····	423
13.4 结晶器摩擦力的在线监测·····	425
13.4.1 结晶器摩擦力简介·····	425
13.4.2 结晶器摩擦力检测方法简介·····	425
13.4.3 功率法原理和系统·····	427
13.4.4 摩擦功法原理和系统·····	429
13.4.5 压力法原理和系统·····	430
13.4.6 摩擦力的检测实例·····	432
13.4.7 摩擦力异常预报方法开发·····	437
13.4.8 检测摩擦力的作用及其应用前景·····	439
13.5 结晶器专家系统的其他应用·····	440
13.5.1 振动状态监测·····	440
13.5.2 过程监测·····	440
13.5.3 离线分析·····	441
13.5.4 操作培训·····	441

13.5.5 纵裂纹危险预报	441
13.6 国内外现状与展望	442
13.6.1 奥钢联的结晶器专家系统	442
13.6.2 英国钢厂的 MTM	442
13.6.3 达涅利的漏钢预报系统	443
13.6.4 SMS-德马格的透明结晶器	443
13.6.5 国内自主开发部分情况简况	443
13.6.6 机遇和展望	444
参考文献	444