



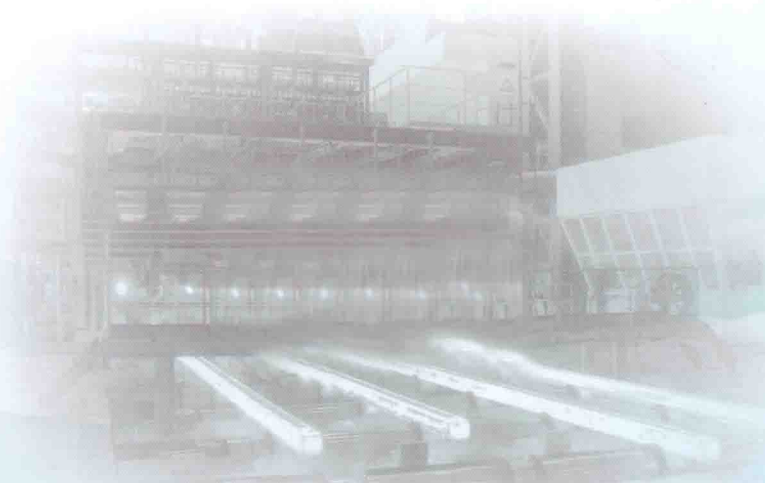
普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

连续铸钢

(第2版)

主编 贺道中



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”



连续铸钢

(第2版)

主 编 贺道中
副主编 周书才 肖鸿光

北 京
冶金工业出版社
2013

内 容 提 要

本书系统地阐述了连续铸钢的设备、基础理论、工艺与操作及连铸用耐火材料等内容,重点介绍了连铸坯质量控制以及连铸新技术应用。

本书主要作为高等院校冶金工程及相关专业本科生的教学用书,也可作为高职高专与职业技术学校的教学参考书,还可供冶金相关企事业单位的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

连续铸钢/贺道中主编. —2版. —北京:冶金工业出版社,
2013.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6311-3

I. ①连… II. ①贺… 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160024号

出 版 人 谭学余

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 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 王 优 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6311-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2007年9月第1版,2013年8月第2版,2013年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;18印张;430千字;273页

38.00元

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

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(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

第2版前言

“连续铸钢”一直是冶金工程专业的重要专业课程之一。一些高校把《连续铸钢》作为冶金工程专业学生学习钢铁冶金课程的教材或教学参考书，其在培养专业知识面宽、工程应用能力强、具有创新能力的应用型人才方面，起到了积极的作用。本书第1版自2007年出版以来，被冶金专业本科和高职高专院校以及钢铁企业广泛采用，取得了较好的社会效益。由于连铸工艺技术发展较快，为了更好地反映现代连续铸钢理论和技术的发展，满足课程教学的需要，受冶金工业出版社的委托，我们对第1版进行修订，以使其在冶金工程及相关专业的人才培养中发挥更好的作用。

本次修订的重点是连铸基础理论、连铸工艺与操作、连铸坯质量以及连铸新技术应用等，着力强化了连铸坯质量控制理论与相关工艺措施的分析，突出工程应用能力的培养，力求使内容更加系统、精练、实用。

本书由湖南工业大学贺道中任主编，重庆科技学院周书才、华菱集团湖南衡阳钢管（集团）有限公司肖鸿光任副主编。具体编写分工为：周书才编写第3、4章及第6章6.7节，肖鸿光编写第6章6.2节及第7章，其余部分由贺道中编写。全书由贺道中统稿、定稿。

编写过程中，承蒙武汉科技大学李光强教授、重庆大学陈登福教授、河北联合大学冯聚和教授、河北科技大学冯捷教授的指导和企业专家组的审定以及同行的帮助，湖南工业大学高泽平、苏振江老师对本书提出了许多宝贵的修改意见，在此一并表示诚挚的谢意。编写中参阅了许多文献资料，特此向有关作者致谢。

由于水平所限，书中不足之处，敬请读者批评指正。

编 者
2013年5月

第1版前言

钢铁工业是世界经济的支柱产业。从矿产资源、能源消耗、生产成本、生产规模、市场需求及发展潜力、环境协调性、加工及使用性能、社会效益等多方面分析,钢铁材料与其他结构材料如有色金属、塑料、陶瓷及复合材料相比,仍具有很大优势。钢铁仍将是中国21世纪结构材料的支柱。2006年,我国钢产量达4.19亿吨,连铸比已达98.57%,高于世界平均水平。现代连续铸钢技术已成为当今钢铁生产的重要工艺之一,而我国目前仍有些企业的连铸生产率不高,设备老化,技术水平还较落后,能耗较高,产品质量不稳定,浇注一些特殊钢种还有困难,这些严重制约了我国钢铁工业高效、优质、低耗的发展进程。目前,全世界连铸比高于97%的国家有25个,其中高于99%的有15个(100%的有7个)。因此,加速发展连续铸钢技术,是实现我国钢铁工业结构优化的重要一环。为了适应连铸技术发展的需要,根据国家教育部高等学校冶金工程专业教学大纲的要求,按照冶金行业高等学校“十一五”教材建设的规划,我们编写了本书。

本书力求内容系统、精练、实用,通俗易懂,理论联系实际,着力反映连续铸钢新设备、新工艺。既便于学生学习掌握连续铸钢的基本理论、基本工艺,又利于学生了解连续铸钢的新技术及发展趋势。

本书由湖南工业大学贺道中任主编;重庆科技学院周书才、华菱集团湖南衡阳钢管(集团)有限公司肖鸿光任副主编。周书才编写第3章、第4章、第9章;肖鸿光编写第7章第1、2节及第10章;其余部分由贺道中编写。全书由贺道中汇总定稿。

编写过程中,承蒙武汉科技大学李光强教授,重庆大学陈登福教授,河北科技大学冯捷教授的指导,企业专家组的审定,以及同行的帮助,在此表示诚挚的感谢。编写中参阅了许多文献资料,特此向有关作者致谢。

限于编者水平,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

编者
2007年7月

目 录

1 绪论	1
1.1 钢的浇注概述	1
1.1.1 模铸	1
1.1.2 连铸机的分类及特点	3
1.1.3 连铸机的主要设备组成及工艺流程	6
1.1.4 连铸的优越性	7
1.2 现代连铸技术的发展历程	9
1.2.1 国外连铸技术的发展	9
1.2.2 国内连铸技术的发展	11
1.3 现代连铸技术的特点	13
复习思考题	14
2 连铸设备	15
2.1 弧形连铸机的基本参数	15
2.1.1 弧形连铸机规格的表示方法	15
2.1.2 弧形连铸机的基本参数	15
2.2 钢包及钢包回转台	20
2.2.1 钢包	20
2.2.2 钢包回转台	22
2.3 中间包及中间包车	24
2.3.1 中间包	24
2.3.2 中间包车	29
2.4 结晶器	30
2.4.1 结晶器的类型与构造	31
2.4.2 结晶器的重要参数	33
2.4.3 结晶器的材质与寿命	36
2.4.4 结晶器断面调宽装置	36
2.4.5 结晶器的润滑	36
2.5 结晶器的振动装置	37
2.5.1 结晶器振动的目的	37
2.5.2 结晶器的振动方式	38
2.5.3 结晶器的振动机构	41

2.5.4 结晶器快速更换装置	43
2.6 二次冷却装置	43
2.6.1 二次冷却的作用	43
2.6.2 二次冷却装置的结构	44
2.6.3 方坯连铸机二次冷却装置	47
2.6.4 板坯连铸机二次冷却装置	48
2.6.5 二次冷却区快速更换装置	48
2.7 拉坯矫直装置	49
2.7.1 拉坯矫直装置的作用与要求	49
2.7.2 小方坯连铸机的拉坯矫直装置	49
2.7.3 板坯连铸机的拉坯矫直装置	50
2.7.4 压缩浇注	51
2.8 引锭装置	52
2.8.1 引锭装置的作用与组成	52
2.8.2 引锭杆的装入与存放方式	53
2.8.3 脱引锭头装置	54
2.9 铸坯切割装置	55
2.9.1 火焰切割装置	56
2.9.2 机械剪切装置	58
2.10 后步工序设备	58
2.10.1 出坯辊道	59
2.10.2 后步工序其他设备	59
2.11 电磁搅拌装置	60
2.11.1 连铸电磁搅拌的原理	60
2.11.2 电磁搅拌的分类及特点	64
2.11.3 电磁搅拌技术的应用与发展	67
2.11.4 结晶器电磁制动	69
复习思考题	70
3 连铸基础理论	71
3.1 钢液凝固结晶理论	71
3.1.1 钢液的结晶过程	71
3.1.2 钢液结晶的特点	75
3.2 连铸坯凝固传热的特点	83
3.3 连铸坯凝固过程热平衡	84
3.4 结晶器的传热与凝固	85
3.4.1 结晶器内坯壳的形成	85
3.4.2 结晶器的传热机构	87
3.4.3 结晶器的散热量计算	91

3.4.4 影响结晶器传热的因素	93
3.5 二冷区的传热与凝固	102
3.5.1 二冷区的冷却特点	102
3.5.2 二冷区的传热	102
3.5.3 影响二冷区传热的因素	103
3.5.4 二冷区坯壳的生长	106
3.6 连铸坯凝固传热的数学模型	107
3.6.1 数学模型描述	107
3.6.2 凝固传热微分方程	108
3.6.3 数学模型的初始条件和边界条件	109
3.6.4 数学模型的求解	111
3.6.5 计算中物性参数的处理	111
3.6.6 数学模型的验证与应用	112
3.7 连铸坯的凝固结构及其控制	113
3.7.1 连铸坯的凝固结构	113
3.7.2 连铸坯凝固结构的控制	114
复习思考题	115
4 连铸工艺与操作	116
4.1 连铸钢液准备及温度控制	116
4.1.1 连铸钢液成分的控制	116
4.1.2 连铸钢液洁净度及脱氧的控制	117
4.1.3 连铸钢液温度的控制	118
4.2 连铸中间包冶金与结晶器冶金	119
4.2.1 中间包冶金	119
4.2.2 结晶器冶金	123
4.3 保护浇注	124
4.3.1 无氧化保护浇注	124
4.3.2 保护渣	127
4.3.3 钢水覆盖剂	138
4.4 连铸拉速的控制	142
4.4.1 连铸拉速的确定	142
4.4.2 连铸拉速的控制	144
4.5 连铸过程冷却控制	144
4.5.1 结晶器一次冷却控制	145
4.5.2 二冷区二次冷却控制	146
4.6 连铸操作工艺	151
4.6.1 主要工艺参数的确定	151
4.6.2 浇注前的准备	154

4.6.3 浇钢操作	156
4.7 浇注事故分析	160
4.7.1 钢包滑动水口故障	160
4.7.2 中间包故障	161
4.7.3 漏钢	162
4.8 连铸技术经济指标	162
复习思考题	164
5 连铸坯质量	165
5.1 连铸坯质量特征、标志与控制原则	165
5.1.1 连铸坯质量特征	165
5.1.2 连铸坯质量标志与控制原则	165
5.2 连铸坯的洁净度	166
5.2.1 连铸过程夹杂物的形成特征	166
5.2.2 连铸坯中夹杂物的类型及来源	166
5.2.3 连铸坯中夹杂物的分布特征	168
5.2.4 影响连铸坯洁净度的因素	173
5.2.5 转炉-精炼-连铸过程钢中夹杂物的控制技术	174
5.3 连铸坯的表面质量	177
5.3.1 连铸坯表面缺陷的类型	177
5.3.2 连铸坯裂纹形成机理	178
5.3.3 表面裂纹	179
5.3.4 深振痕	184
5.3.5 表面夹渣	185
5.3.6 皮下气泡与气孔	186
5.3.7 表面凹坑和重皮	186
5.3.8 提高连铸坯表面质量的主要措施	187
5.4 连铸坯的内部质量	187
5.4.1 内部裂纹	187
5.4.2 中心偏析	189
5.4.3 中心疏松	190
5.4.4 提高连铸坯内部质量的主要措施	190
5.5 连铸坯的形状缺陷	191
5.5.1 鼓肚变形	191
5.5.2 菱形变形	192
5.5.3 圆坯变形	193
复习思考题	193

6 连铸工艺实践与新技术应用	195
6.1 合金钢连铸	195
6.1.1 合金钢的凝固特性	195
6.1.2 合金钢连铸工艺的特点	197
6.1.3 合金钢连铸设备的要求	197
6.1.4 典型钢种的连铸	198
6.2 水平连铸	204
6.2.1 水平连铸概述	204
6.2.2 水平连铸机的主要设备	205
6.2.3 水平连铸坯的凝固特点	207
6.2.4 水平连铸工艺的技术参数	208
6.2.5 水平连铸坯的质量控制	209
6.3 近终形连铸	209
6.3.1 近终形连铸的类型	209
6.3.2 薄板坯连铸连轧的发展	210
6.3.3 薄板坯连铸连轧的关键技术	213
6.3.4 典型的薄板坯连铸连轧工艺	216
6.3.5 带钢连铸技术	221
6.3.6 异形坯连铸技术	222
6.4 高效连铸	226
6.4.1 高拉速技术	226
6.4.2 高铸机作业率技术	229
6.4.3 多炉连浇技术	229
6.5 轻压下技术	230
6.5.1 轻压下技术概述	230
6.5.2 轻压下冶金效果分析	230
6.5.3 轻压下数学模型	234
6.6 连铸坯热装和直接轧制	236
6.6.1 连铸坯热装和直接轧制的发展	236
6.6.2 连铸坯热装和直接轧制的关键技术	238
6.6.3 连铸向轧钢供坯模式	240
6.7 连铸过程的检测和自动控制	242
6.7.1 中间包钢液温度测定	242
6.7.2 结晶器液面检测与自动控制	243
6.7.3 连铸机漏钢预报装置	245
6.7.4 连铸二次冷却水控制	247
6.7.5 水口下渣检测	247
6.7.6 铸坯表面缺陷在线检测	249

6.7.7 辊间距检测方法	250
6.7.8 计算机辅助质量控制系统——连铸坯质量专家系统	251
复习思考题	255
7 连铸用耐火材料	257
7.1 钢包用耐火材料	257
7.1.1 包衬材质	257
7.1.2 包衬材质的选用与砌筑	260
7.2 中间包用耐火材料	261
7.2.1 绝热板	261
7.2.2 涂料	263
7.3 滑动水口用耐火材料	265
7.4 连铸用功能耐火材料	265
7.4.1 长水口	266
7.4.2 钢水过滤器	267
7.4.3 浸入式水口	267
7.4.4 水平连铸用分离环	269
7.4.5 吹氩棒和透气砖	270
复习思考题	271
参考文献	272

1 绪 论

1.1 钢的浇注概述

1.1.1 模铸

铸坯或铸锭是炼钢产品最终成型工序，直接关系到炼钢生产的产量和质量。钢的浇注有钢锭模浇注（模铸）、连续铸钢（连铸）、压力浇注、真空浇注四种方法。常用的是模铸和连铸。模铸法生产钢锭已有 100 多年的历史。由于我国的钢铁工业起步较晚，目前国内一些小型钢厂或特殊钢厂仍在采用这种方法生产钢锭。近年来，随着世界钢铁工业的迅猛发展，连续铸钢法已逐渐取代模铸法，成为钢液浇注的主要方法。

如图 1-1 和图 1-2 所示，模铸法分为上注法和下注法两种。上注法是钢液由钢包经中间装置，或由钢包直接从钢锭模上部注入的一种方式。上注法适用于浇注大型的或特殊的钢锭。这种方法铸锭的准备工作简单，耐火材料消耗少，钢锭收得率高，成本低，钢中夹杂物含量少。由于浇注时钢锭模内的高温区始终位于钢锭上部，钢锭的翻皮、缩孔、疏松等缺陷有所减少。但是，该方法每次只能浇注 2~4 根钢锭，在开浇时容易产生飞溅而造成结疤、皮下气泡等钢锭表面缺陷。此外，浇注时钢液直接冲刷模底，锭模、底板易被熔蚀，使材料的消耗增加。

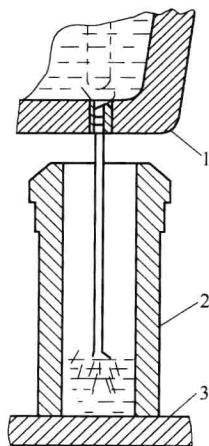


图 1-1 上注法

1—钢包；2—钢锭模（沸腾钢用）；3—底盘

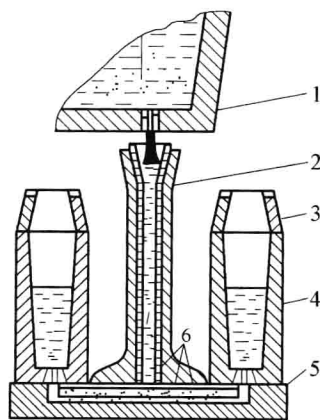


图 1-2 下注法

1—钢包；2—中注管；3—保温帽；4—钢锭模（镇静钢用）；5—底盘；6—流钢砖

下注法钢液由钢包流经中注管、流钢砖，再分别由钢锭模底部注入各钢锭模。下

注法每次可浇多根（可达几十根）钢锭，钢液在模内上升平稳，钢锭质量好，生产率高。采用下注法生产钢锭的准备工作较复杂，每吨钢要额外增加 5 ~ 25kg 浇口、流钢通道钢的耗损，金属收得率低，生产成本增加，钢中非金属夹杂物多，劳动条件较差。

模铸工艺如图 1-3 所示。模铸通过采用快速浇注、增大钢锭质量、改进设备，生产能力有所增长；采用合成固体保护渣、气体保护浇注，显著改善了钢锭质量；在上小下大钢锭模上应用绝热板浇注镇静钢和半镇静钢，钢锭的成材率也有了进一步提高。

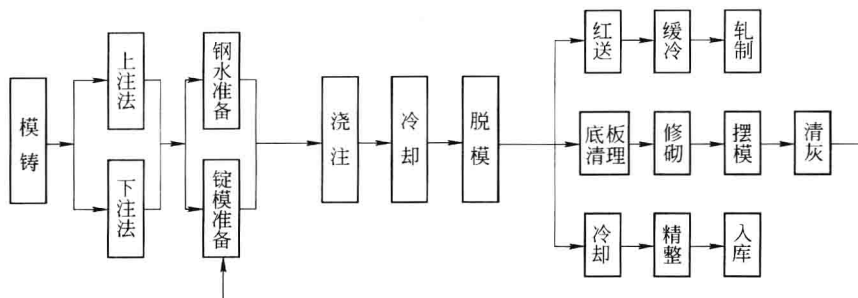


图 1-3 模铸工艺

模铸设备包括钢包、钢锭模、保温帽、底板、中注管等。所有的合金钢、大部分低合金钢、多数碳素结构钢均属于镇静钢。镇静钢钢锭的成分比较均匀，结构比较致密，轧制成的钢材性能较好。但是，镇静钢钢锭的头部有缩孔，开坯时切头损耗大，成材率低。这种钢在冶炼时使用的脱氧剂较多，浇注时要安放保温帽而消耗耐火材料，钢锭成本高。镇静钢下注法的操作要点是：开流稳、跟流准，逐渐增，平稳升，防沸腾。镇静钢上注法的操作要点是：对正、稳开无声、快开满，圆流、快注。

沸腾钢亦称不完全脱氧钢。它只用弱脱氧剂脱氧，有时也加入少量的铝调节钢液的氧化性。钢液碳含量一般为 0.05% ~ 0.30%；硅含量不大于 0.30%；氧含量一般为 0.035% ~ 0.045%，高于与 [C] 相平衡的含量。浇注过程中，随着温度的降低和结晶的不断进行，在凝固前沿的 [C] 和 [O] 不断富集并发生反应，生成大量的 CO 气泡，使钢锭模内的钢液产生沸腾，故称这种钢为沸腾钢。

钢液在模内沸腾，有利于钢中气体、夹杂物的排除，减少了钢锭翻皮缺陷的产生，钢锭的表面质量好。由于沸腾钢钢锭内部残留了部分气泡，钢锭头部没有集中缩孔，因而使得钢锭的切头率减少 10% 左右。沸腾钢碳、硅含量低，具有较好的焊接、冲压、冷弯性能。其采用上小下大的钢锭模浇注，使脱模、整模工作大大简化，有助于铸锭车间生产能力的提高。沸腾钢消耗的耐火材料、脱氧剂少，金属收得率高，成本低。但是，与镇静钢相比，沸腾钢的偏析严重，钢材性能不均、强度降低、时效敏感性大。

沸腾钢一般用于型材、线材、冲深钢板、锅炉钢板、焊接钢管的生产。但是，由于沸腾钢碳含量的范围不宽，该类钢的生产受到限制。

沸腾钢浇注工艺的中心内容是：采取合适的注速、注温，调整沸腾强度和封顶操作。

模铸由于准备工作复杂、综合成材率较低、能耗高、劳动强度大、生产率低，目前已基本上被连铸所取代。

1.1.2 连铸机的分类及特点

连铸是把液态钢用连铸机浇注、冷凝、切割，直接得到铸坯的工艺。它是连接炼钢和轧钢的中间环节，是炼钢生产厂(或车间)的重要组成部分。连铸生产的正常与否不但影响炼钢生产任务的完成，而且影响轧材的质量和成材率。

连铸机的分类方式很多。其按结晶器是否移动可以分为两类。一类是采用固定式结晶器(包括固定振动结晶器)的普通连铸机，如立式连铸机、立弯式连铸机、弧形连铸机、椭圆形连铸机、水平式连铸机等。这些机型已成为现代化连铸机的基本类型，如图 1-4 所示。另一类是采用同步运动式结晶器的各种连铸机，如双辊式连铸机、双带式连铸机、单辊式连铸机、单带式连铸机、轮带式连铸机等，这些是正在开发中的连铸机机型，如图 1-5 所示。这种机型的结晶器与铸坯同步移动，铸坯与结晶器壁间无相对运动，因而也没有相对摩擦，能够达到较高的浇注速度，适用于生产接近成品钢材尺寸的小断面或薄断面铸坯。

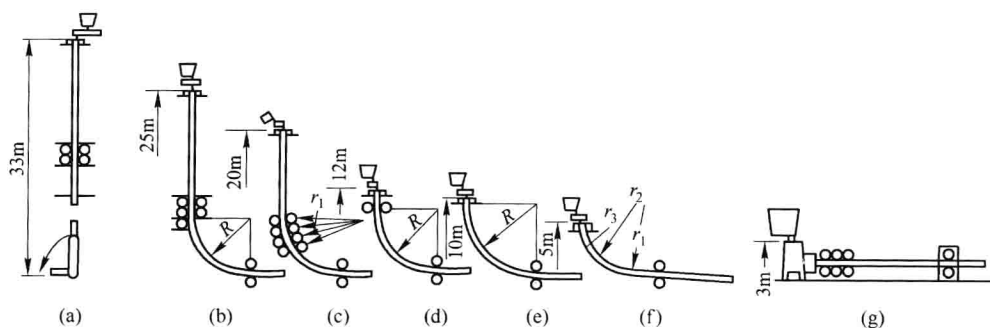


图 1-4 采用固定式结晶器的连铸机机型示意图

(a) 立式连铸机；(b) 立弯式连铸机；(c) 直结晶器多点弯曲连铸机；(d) 直结晶器弧形连铸机；
(e) 全弧形连铸机；(f) 多半径弧形(椭圆形)连铸机；(g) 水平式连铸机

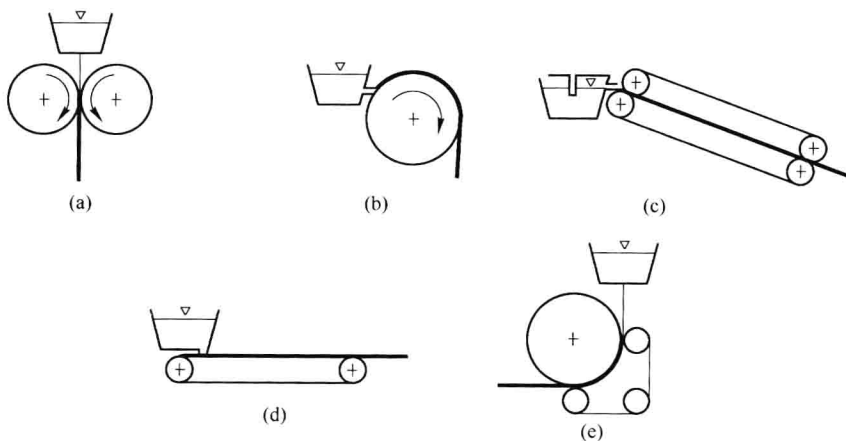


图 1-5 采用同步运动式结晶器的连铸机机型示意图

(a) 双辊式连铸机；(b) 单辊式连铸机；(c) 双带式连铸机；(d) 单带式连铸机；(e) 轮带式连铸机

另外，连铸机按铸坯断面形状，还可分为方坯连铸机、圆坯连铸机、板坯连铸机、异

形坯连铸机、方坯和板坯兼用型连铸机等；按钢水静压头，可分为高头型、低头型和超低头型连铸机等。

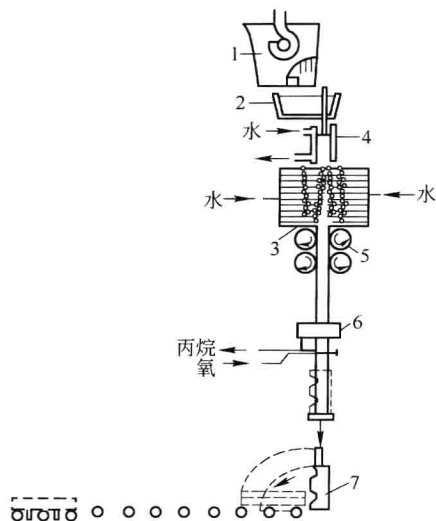


图 1-6 立式连铸机结构示意图

1—钢包；2—中间包；3—导辊；4—结晶器；
5—拉辊；6—切割装置；7—出坯装置

1.1.2.1 立式连铸机

立式连铸机是 20 世纪 50 年代连铸发展初期的主要机型，如图 1-6 所示。立式连铸机从中间包到切割装置等主要设备均布置在垂直中心线上，整个机身位于车间平面以上。采用立式连铸机浇注时，由于钢液在垂直结晶器和二次冷却段冷却凝固，钢液中非金属夹杂物易于上浮，铸坯四面冷却均匀，铸坯在运行过程中不受弯曲矫直应力作用，产生裂纹的可能性小，铸坯质量好，适于优质钢、合金钢和裂纹敏感性钢种的浇注。但这种连铸机设备高、投资费用大，且设备的维护与铸坯的运输较麻烦。由于连铸机高度增高，钢水静压力大，铸坯的鼓肚变形也较突出，因而立式连铸机只适于浇注小断面铸坯。

1.1.2.2 立弯式连铸机

立弯式连铸机是连铸技术发展过程的过渡机型，如图 1-4(b) 所示。立弯式连铸机是在立式连铸机基础上发展起来的，其上部与立式连铸机完全相同，不同的是其待铸坯全部凝固后用顶弯装置将铸坯顶弯 90°，在水平方向切割出坯。立弯式连铸机主要适用于小断面铸坯的浇注。

1.1.2.3 弧形连铸机

弧形连铸机是世界各国应用最多的一种类型。弧形连铸机的结晶器、二次冷却段夹辊、拉坯矫直机等设备均布置在同一半径的 1/4 圆周弧线上，铸坯在 1/4 圆周弧线内完全凝固，经水平切线处被一点矫直，而后切成定尺，从水平方向出坯，其结构示意图见图 1-7(a)。弧形连铸机的特点有：

(1) 弧形连铸机的机身高度基本上等于连铸机的圆弧半径，所以其高度比立弯式连铸机又降低了许多，仅为立式连铸机的 1/3，基建投资费用减少，安装及维护方便。

(2) 铸坯凝固过程中承受的钢水静压力相对较小，可减少坯壳因鼓肚变形而产生的内裂和偏析，有利于提高铸坯质量。

(3) 弧形连铸机的铸坯要经过弯曲矫直，易产生裂纹；此外，铸坯的内弧侧存在夹

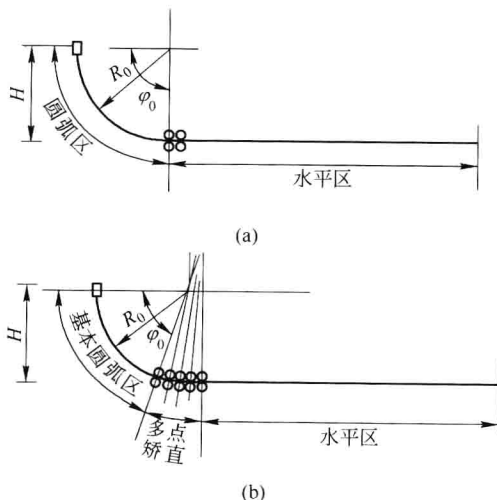


图 1-7 弧形连铸机机型示意图

(a) 全弧形连铸机；(b) 多点矫直的弧形连铸机

杂物聚集、分布不均匀的现象，影响了铸坯质量。

为减轻铸坯矫直时的变形应力，在弧形连铸机上可采用多点矫直，如图 1-7 (b) 所示。增加铸坯的矫直点和加大弧形连铸机的圆弧半径，都可以减少铸坯的变形应力。为了改善铸坯的质量，在弧形连铸机上采用直结晶器，在结晶器下口设 2~3m 垂直线段，带液芯的铸坯经多点弯曲或逐渐弯曲进入弧形段，然后再经多点矫直。垂直段可使液相穴内夹杂物充分上浮，因而铸坯夹杂物分布不均匀的现象有所改善，偏析有所减轻。多点弯曲、多点矫直的弧形连铸机机型如图 1-8 所示。

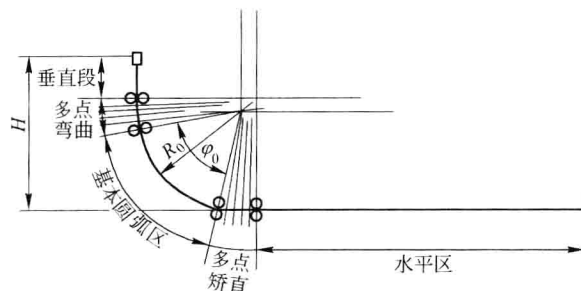


图 1-8 多点弯曲、多点矫直的弧形连铸机机型示意图

1.1.2.4 椭圆形连铸机

如图 1-9 所示，椭圆形连铸机的结晶器、二次冷却段夹辊、拉坯矫直机均布置在 1/4 圆周弧线上。椭圆形圆弧是由多个半径的圆弧线所组成的，其基本特点与全弧形连铸机相同。椭圆形连铸机进一步降低了连铸机和厂房的高度。其分为低头型和超低头型连铸机，一般根据连铸机高度 (H) 与铸坯厚度 (D) 之比来确定， $H/D = 25 \sim 40$ 时，称为低头型连铸机； $H/D < 25$ 时，则称为超低头型连铸机。超低头型连铸机最早由曼内斯曼和康卡斯特公司开发，主要是各种规格的方坯或板坯超低头型连铸机。

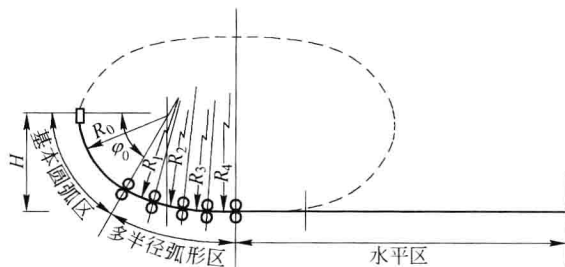


图 1-9 椭圆形连铸机机型示意图

椭圆形连铸机是一种多半径的弧形连铸机，也是目前连铸机研究与开发的主要机型。

1.1.2.5 水平式连铸机

水平式连铸机的结晶器、二次冷却区、拉坯机、切割装置等设备安装在水平位置上，如图 1-4 (g) 所示。水平式连铸机的中间包与结晶器是紧密相连的。中间包水口与结晶器相连处装有分离环。拉坯时，结晶器不振动，而是通过拉坯机带动铸坯做拉、反推、停不同组合的周期性运动来实现的。

水平式连铸机是高度最低的连铸机，其设备简单、投资省、维护方便。水平连铸机结晶器内钢液的静压力最小，避免了铸坯的鼓肚变形；中间包与结晶器之间密封连接，有效防止了钢液流动过程的二次氧化；铸坯的洁净度高，夹杂物含量少，一般仅为弧形铸坯的 $1/8 \sim 1/6$ ；另外，铸坯无需矫直，也就不存在由于弯曲矫直而产生裂纹的可能性，铸坯质量好，适合浇注特殊钢、高合金钢，因而受到各国的关注。

以上常见的几类连铸机的特点比较见表 1-1。

表 1-1 常见的几类连铸机的特点比较

铸机类型	特 点
立 式	(1) 铸坯做垂直直线运动，不受强制性弯曲变形力作用； (2) 铸坯冷却均匀，非金属夹杂物上浮条件良好，钢的成分和夹杂物偏析较少； (3) 小断面铸坯中心容易产生二次缩孔； (4) 机身高 20 ~ 30m 以上，厂房高度大，一次性投资多
立弯式	(1) 铸坯由拉坯机拉出结晶器后，被顶弯装置弯成弧形，然后在水平位置上加以矫直； (2) 保持了立式连铸机在垂直方向上进行浇注和冷凝的特点； (3) 设备总高度有所减少
弧 形	(1) 采用弧形结晶器，在结晶器内形成弧形铸坯； (2) 使用弧形二次冷却装置，在水平切点处矫直铸坯； (3) 铸机高度大大降低，但是铸坯经弯曲矫直易产生裂纹，且存在夹杂物内弧侧聚集现象； (4) 铸坯在弧形不对称的状态下冷却不均匀
椭圆形	(1) 弧形结晶器可倾斜安装，用逐渐增大圆弧半径的方法进行矫直，铸坯可沿水平方向拉出； (2) 铸坯不需要进行大量的弯曲或矫直，钢液的静压小，铸坯的鼓肚缺陷减少； (3) 夹杂物上浮的机会减少，铸机机身高度大大降低
水平式	(1) 结晶器水平安装，铸坯无弯曲矫直变形，夹杂物分离困难； (2) 以间歇式拉坯代替结晶器振动，铸坯容易产生深的波纹； (3) 不需要修建特殊的厂房，设备费用便宜，维修方便

总之，从 20 世纪 50 年代连铸工业化开始，60 多年来，连铸机的机型发展经历了一个由立式、立弯式到弧形，高度不断降低的演变过程。

1.1.3 连铸机的主要设备组成及工艺流程

一台连铸机主要是由钢包回转台、中间包、中间包车、结晶器、结晶器振动装置、二次冷却装置、拉坯(矫直)装置、切割装置和铸坯运出装置等部分组成的。图 1-10 是弧形连铸机(德马克小方坯机型)结构图。

从炼钢炉出来的钢液注入钢包内，经二次精炼处理后被运到连铸机上方，钢液通过钢包底部的水口再注入中间包内。预先调好中间包水口的位置以对准下面的结晶器。打开中间包塞棒(或滑动水口)后，钢液流入下口由引锭杆头封堵的水冷结晶器内。在结晶器内，钢液沿其周边逐渐冷凝成坯壳。当结晶器下端出口处坯壳有一定厚度时，同时启动拉坯机和结晶器振动装置，使带有液芯的铸坯进入由若干夹辊组成的弧形导向段。铸坯在此一边