

蔡开科 程士富 主编

连续铸钢原理 与工艺

LIANXU ZHUGANG YUANLI YU GONGYI

冶金工业出版社

680
连续铸钢继续教育丛书

连续铸钢原理与工艺

蔡开科 程士富 主编



A1020625

冶金工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

连续铸钢原理与工艺/蔡开科,程士富主编. — 北京:
冶金工业出版社, 1994.12(2002重印)

(连续铸钢继续教育丛书)

ISBN 7-5024-1457-6

I. 连… II. ①蔡… ②程… III. ①连续铸钢—理论②连续铸钢—铸造—工艺 IV. TF777

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 40175 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 刘小峰 责任印制 李玉山

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行, 各地新华书店经销

1994 年 12 月第 1 版, 2002 年 8 月第 3 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 12.75印张; 330千字; 388 页, 4001·6000册

25.00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

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

序

第二次世界大战以后，国际上钢铁工业有了长足的进步。从科技进步而言，氧气转炉炼钢、铁水预处理、钢的二次冶金、连续铸钢等技术均是革命性的进步。

连续铸钢技术开发成功后，日臻成熟，不断发展，其功能已经远远超过传统模铸系统的范围，它具有凝固器、成型器、冶金器、节能器的作用。目前连续铸钢技术已为全世界各产钢国普遍采用，不少发达国家连续铸钢的比例已达90%以上。不少炼钢厂已实现全连铸，全连铸钢厂已成为发展方向。

钢铁生产流程采用连续铸钢装置，特别是实现全连铸钢厂，使钢铁企业结构发生了重大的变化。由于连铸取代了模铸和初轧工序，替代了开坯工序，使联合企业的钢材产品向专业化方向发展；钢铁厂的车间布置，合理规模，甚至仓库设置，资金周转等，也随之发生了巨大变化，就对钢厂结构的影响而言，连续铸钢的影响之大，迄今为止当属之最。

我国自1978年确立改革、开放政策以来，十分重视发展连续铸钢技术。冶金部在基本建设、技术改造、科技攻关、科学研究等方面都为发展连铸作出了规划和具体安排。钢铁企业界、科学技术界、工程设计界、机械装备界以及施工建设界的各方面人士都做了大量的工作，投入了大量的人力、物力、财力，于80年代建成了120台连续铸钢装置，并形成了一支较强的专业技术队伍，取得了重要成就。

第七个五年计划期间，连续铸钢有了新的发展，对连铸的认识和实践有了进一步提高，冶金工业部部长钱元靖同志总结了十

年来连续铸钢的基本经验之后，提出了“以连铸为中心，炼钢为基础，设备为保证”的生产技术方针，在整个冶金系统取得了显著效果，并且继续有效地指导着我国连续铸钢技术的发展。

90年代，我国钢铁工业将加快发展，为2000年实现一亿吨钢的宏伟目标而努力，并且在这个过程中要上四个新台阶：工艺技术和装置现代化的新台阶；品种、质量以及有效供给的新台阶；综合经济效益的新台阶；集约化经营和规模经济的新台阶。不难看出，在加快发展和上四个新台阶的过程中，发展连续铸钢应是重要措施之一。

鉴于连续铸钢对发展我国钢铁工业具有重要意义，进一步培训连铸专业技术人员，提高他们的水平，是一项相当重要的措施。为此，在有关方面的关注和支持下，组织了有较高理论水平和具有丰富实践经验的专家、学者和实际工作者在总结实践经验的基础上编撰了连续铸钢系列教材，相信这套教材将对我国连续铸钢技术的发展起到推动作用。

冶金工业部副部长 殷瑞钰

一九九二年十一月

前 言

发展连续铸钢是我国钢铁工业的一项重要技术政策。经过十多年的努力，我国的钢铁工业已进入了以发展全连铸为方向，炼钢-炉外精炼-连铸“三位一体”组合优化，促进炼钢生产发展的重要时期。据预测，到2000年，我国将拥有50~60个全连铸钢厂，全国钢产量的连铸比将达到70~80%。

为了适应连铸技术的发展和人才培训的需要，冶金部组织编写了连铸技术系列培训教材，本书就是其中之一。全书共分十二章，内容有连续铸钢的发展，连铸机型和结构特征，连铸工艺参数的设计原理，连铸钢水质量控制，连铸操作工艺，中间包冶金，连铸保护浇注，结晶器冶金，连铸坯凝固与传热，连铸二次冷却控制，连铸坯质量控制，连铸保护渣和覆盖剂等。编著者力图从理论和实践结合的角度来阐明连铸原理和工艺以及应采取的技术对策，希望本书对从事炼钢和连铸生产、设计、科研、教学的人员有所裨益。

本书编写者分工如下：第2、3章为程士富，第4章为程士富、杨焕祥、叶枫，第5章为张颖哲、程士富，第6章为蔡开科、杨焕祥，第7章为刘新华，第1、8、9、11章为蔡开科，第10章为张跃萍、吴钢玮，第12章为王钊宗。全书由蔡开科、程士富统编。

本书编写和出版过程中，冶金部继续教育中心给予了大力支持，李名俊教授、刘祥教授、邢玉录副教授对全书进行了认真的审阅，在此表示衷心感谢。

限于编著者水平，书中错误和不当之处，敬请专家和读者批评指正。

蔡开科（北京科技大学）

程士富（东北大学）

1993. 7.

目 录

1	连续铸钢的发展	(1)
1.1	连续铸钢发展概况	(1)
1.1.1	连续铸钢发展历史和现状	(1)
1.1.2	我国连续铸钢技术发展	(5)
1.2	连续铸钢的优越性	(8)
1.2.1	节省工序缩短流程	(8)
1.2.2	提高金属收得率	(9)
1.2.3	降低能量消耗	(9)
1.2.4	生产过程机械化和自动化程度高	(10)
1.2.5	连铸钢种扩大,产品质量日益提高	(10)
1.3	传统连铸技术的发展与新的连铸技术的开发	(10)
1.3.1	传统连铸技术的发展	(10)
1.3.2	新的连铸技术的开发	(13)
	参考文献	(14)
2	连铸机机型和结构特征	(15)
2.1	连铸机机型	(15)
2.1.1	连铸机机型分类	(15)
2.1.2	各种连铸机的特点	(15)
2.2	连铸机的结构特征	(25)
2.2.1	小方坯连铸机	(25)
2.2.2	板坯连铸机	(30)
2.2.3	圆坯连铸机	(35)
2.2.4	大方坯连铸机	(37)
2.3	连铸机机型的选择	(38)
2.3.1	连铸机机型选择原则	(38)

2.3.2 连铸机型的确定	(41)
参考文献	(45)
3 连铸工艺参数的设计原理	(46)
3.1 连铸机生产能力	(46)
3.1.1 连铸机产量计算	(46)
3.1.2 铸坯断面	(47)
3.1.3 连铸机流数	(50)
3.1.4 连铸机的作业率	(51)
3.1.5 金属收得率	(54)
3.1.6 浇注时间	(56)
3.1.7 准备时间	(56)
3.1.8 连浇炉数	(57)
3.2 连铸机的基本参数计算	(58)
3.2.1 铸机的弧形半径	(58)
3.2.2 冶金长度	(62)
3.2.3 拉速设计	(64)
3.3 中间包结构的设计	(69)
3.3.1 中间包容积	(69)
3.3.2 中间包形状	(71)
3.3.3 中间包内腔主要尺寸	(73)
3.3.4 中间包内衬	(76)
3.3.5 中间包水口流量控制	(76)
3.4 结晶器的设计	(78)
3.4.1 结晶器的结构	(78)
3.4.2 结晶器主要尺寸计算	(80)
3.4.3 结晶器冷却水量	(84)
3.5 二冷区设计	(85)
3.5.1 二冷区比水量的确定	(85)
3.5.2 二冷区水量及各段水量分配	(88)
3.5.3 二冷区喷水系统	(90)
3.6 水口设计	(95)
3.6.1 定径水口计算	(95)

3.6.2	浸入式水口	(96)
	参考文献	(100)
4	连铸钢水质量控制	(101)
4.1	钢水温度的目标管理	(101)
4.1.1	连铸钢水温度控制的重要性	(101)
4.1.2	连铸钢水传递过程温度变化规律	(101)
4.1.3	连铸钢水浇注温度的确定	(104)
4.1.4	连铸钢水温度控制对策	(108)
4.2	钢水成分的控制	(116)
4.2.1	碳及硅、锰含量的控制	(117)
4.2.2	磷、硫含量的控制	(119)
4.2.3	残留元素含量的控制	(121)
4.3	钢水纯净度的控制	(121)
4.3.1	冶炼过程钢水含氧量控制	(122)
4.3.2	脱氧控制	(123)
4.3.3	少渣或无渣出钢工艺	(126)
4.3.4	吹氩搅拌	(127)
4.4	连铸钢水炉外精炼工艺路线	(129)
4.4.1	各种炉外精炼设备的功能	(130)
4.4.2	连铸钢水炉外精炼工艺路线	(133)
	参考文献	(134)
5	连铸操作工艺	(135)
5.1	浇注前的准备	(135)
5.1.1	钢包的准备	(135)
5.1.2	中间包的准备	(135)
5.1.3	结晶器的检查	(137)
5.1.4	铸坯导向和二冷区检查	(138)
5.1.5	拉矫机和剪切操作检查	(138)
5.1.6	堵引锭头操作	(139)
5.2	浇注操作	(139)
5.3	浇注温度控制	(142)

5.4	拉坯速度控制	(142)
5.5	冷却水控制	(145)
5.5.1	一次冷却	(145)
5.5.2	二次冷却	(146)
5.6	操作中事故分析	(154)
5.6.1	漏钢	(154)
5.6.2	水口堵塞	(158)
5.7	异钢种连浇技术	(159)
5.8	耐火材料质量对工艺操作影响	(160)
5.8.1	连铸耐火材料的选择	(160)
5.8.2	耐火材料质量对操作的影响	(162)
	参考文献	(163)
6	中间包冶金	(164)
6.1	中间包操作过程的流动现象	(165)
6.1.1	中间包钢液流动概念	(165)
6.1.2	钢包注流冲击区	(166)
6.1.3	注流卷入空气	(167)
6.1.4	旋涡	(168)
6.1.5	流动不稳定性和波的形成	(168)
6.2	中间包钢水夹杂物的去除	(169)
6.2.1	夹杂物上浮	(169)
6.2.2	钢水平均停留时间	(170)
6.3	中间包流动形态控制	(174)
6.3.1	中间包无控制流动	(174)
6.3.2	中间包控制流动	(174)
6.3.3	中间包卷渣	(176)
6.4	中间包精炼技术	(179)
6.4.1	中间包双层覆盖渣	(179)
6.4.2	中间包吹 Ar	(179)
6.4.3	夹杂物形态控制	(181)
6.5	中间包过滤器应用	(182)

6.5.1	过滤器原理	(182)
6.5.2	过滤器材质	(184)
6.5.3	深床过滤器动力学模型	(185)
6.5.4	过滤器应用效果	(186)
6.6	中间包加热技术	(189)
6.6.1	中间包钢水温度稳定性控制对策	(189)
6.6.2	中间包热平衡分析	(190)
6.6.3	中间包加热方法及效果	(192)
	参考文献	(195)
7	连铸保护浇注	(197)
7.1	钢水二次氧化与钢的清洁度	(197)
7.1.1	钢清洁度概念	(197)
7.1.2	二次氧化生成夹杂物特征	(198)
7.2	浇注过程中二次氧化源	(199)
7.2.1	注流与空气相互作用	(199)
7.2.2	钢液与空气相互作用	(200)
7.2.3	钢液与耐火材料作用	(202)
7.2.4	钢液与渣相的相互作用	(204)
7.2.5	渣相与耐火材料的相互作用	(205)
7.3	浇注过程中钢液二次氧化产物的形成	(206)
7.3.1	二次氧化产物形式模式	(206)
7.3.2	钢中夹杂物起源的追踪	(208)
7.4	二次氧化量度的评价	(209)
7.4.1	中间包 Al 平衡法	(209)
7.4.2	钢水氮平衡	(211)
7.4.3	钢水总氧量	(212)
7.4.4	钢中夹杂物评级	(213)
7.5	防止二次氧化的对策	(214)
7.5.1	保护介质的工艺功能	(214)
7.5.2	保护浇注方法	(215)
	参考文献	(221)

8	结晶器冶金	(222)
8.1	结晶器钢水流动行为	(222)
8.1.1	结晶器钢水流动特征	(222)
8.1.2	结晶器钢水流动形态	(227)
8.1.3	结晶器钢流控制技术	(229)
8.2	结晶器的冶金作用	(231)
8.2.1	凝固坯壳生长均匀性	(231)
8.2.2	液相穴夹杂物上浮与排除	(232)
8.2.3	结晶器微合金化	(232)
8.2.4	凝固组织的控制	(234)
	参考文献	(234)
9	连铸坯凝固与传热	(235)
9.1	连铸坯凝固与传热特点	(235)
9.1.1	连铸坯凝固过程实质上是热量传递过程	(235)
9.1.2	连铸坯凝固是沿液相穴在凝固温度区间 把液体转变为固体的加工过程	(236)
9.1.3	铸坯凝固是分阶段的凝固过程	(237)
9.1.4	在连铸机内运行的已凝固坯壳的冷却 可看成是经历“形变热处理”过程	(238)
9.2	结晶器钢水凝固与传热	(239)
9.2.1	结晶器平均散热量	(239)
9.2.2	结晶器瞬时散热量	(241)
9.2.3	结晶器坯壳生长	(245)
9.2.4	影响结晶器传热的因素	(248)
9.3	二冷区的凝固与传热	(256)
9.3.1	二冷区传热方式	(256)
9.3.2	影响二冷区传热的因素	(257)
9.3.3	二冷区凝固坯壳生长	(260)
9.4	连铸坯凝固结构	(262)
9.4.1	铸坯低倍结构特征	(262)
9.4.2	连铸坯低倍结构模型	(264)

9.4.3	铸坯结构的控制	(266)
	参考文献	(269)
10	连铸二次冷却控制	(270)
10.1	二次冷却与铸坯质量	(270)
10.2	二次冷却区的设计	(271)
10.2.1	二冷区的基本结构	(271)
10.2.2	喷嘴的选择及配置	(272)
10.2.3	冷却水分配原则及冷却方式	(276)
10.3	连铸坯凝固传热数学模型	(277)
10.3.1	基本概念	(277)
10.3.2	一维传热数学模型	(277)
10.3.3	二维传热数学模型	(281)
10.3.4	数学模型的求解	(282)
10.4	连铸二次冷却控制	(283)
10.4.1	二冷水控制方法	(283)
10.4.2	目标表面温度动态控制法	(284)
10.4.3	参数控制法	(296)
10.4.4	两种控制方法的比较	(298)
10.5	控制模型的应用	(299)
10.5.1	拉速的影响	(299)
10.5.2	浇注断面的影响	(300)
10.5.3	过热度的影响	(300)
10.5.4	冷却强度的影响	(301)
	参考文献	(301)
11	连铸坯质量控制	(302)
11.1	铸坯纯净度	(303)
11.1.1	铸坯纯净度与产品质量	(303)
11.1.2	连铸坯夹杂物	(305)
11.1.3	提高铸坯纯净度措施	(307)
11.2	铸坯表面质量	(310)
11.2.1	表面纵裂纹	(310)

11.2.2	表面横裂纹	(320)
11.2.3	铸坯表面网状(星形或晶界)裂纹	(324)
11.2.4	铸坯表面夹渣	(326)
11.2.5	铸坯皮下气孔	(330)
11.3	铸坯内部质量	(331)
11.3.1	铸坯凝固结构	(331)
11.3.2	铸坯中心偏析	(332)
11.3.3	铸坯中心致密度 ³	(340)
11.3.4	铸坯内部裂纹	(340)
11.4	铸坯形状缺陷	(347)
11.4.1	铸坯菱形变形(脱方)	(347)
11.4.2	鼓肚	(350)
11.5	热加工对铸坯缺陷影响	(352)
11.5.1	压下量对铸坯内部缺陷的作用	(352)
11.5.2	压下量对铸坯表面缺陷的影响	(353)
11.5.3	轧制过程铸坯中夹杂物变形	(354)
	参考文献	(356)
12	连铸保护渣及覆盖剂	(358)
12.1	保护渣的冶金功能	(359)
12.1.1	隔绝空气防止对钢液的二次氧化	(359)
12.1.2	吸收非金属夹杂物净化钢渣界面	(359)
12.1.3	在凝固坯壳与结晶器壁间形成润滑膜	(360)
12.1.4	改善结晶器与坯壳间传热	(360)
12.1.5	绝热保温减少钢液热损失	(360)
12.2	保护渣的基本特性	(361)
12.2.1	渣层结构	(361)
12.2.2	熔化特征	(366)
12.2.3	粘度	(370)
12.2.4	界面特性	(374)
12.3	保护渣的配制	(377)
12.3.1	保护渣基础成分的设计	(377)

12.3.2	原料的选择及组合	(377)
12.3.3	配加调整剂	(379)
12.3.4	原料加工及成品	(379)
12.4	保护渣的选用对策	(382)
12.4.1	保护渣对铸坯质量的重要性	(382)
12.4.2	使用过程对保护渣的评价	(382)
12.4.3	选用保护渣的对策	(383)
12.5	中间包保护渣及覆盖剂	(386)
	参考文献	(388)

1 连续铸钢的发展

1.1 连续铸钢发展概况

1.1.1 连续铸钢发展历史和现状

钢水凝固成型有两种方法：传统的模铸法和连续铸钢法。连续铸钢是一项把钢水直接浇铸成型的新工艺。它的出现从根本上改变了一个世纪以来占统治地位的钢锭初轧工艺。

液体金属连续铸锭的概念早在 19 世纪中期就已提出。1840 年美国塞勒斯 (Sellers) 获连铸铅管专利。1846 年转炉的发明者贝氏麦 (Bessemer) 使用水冷旋转双辊式连铸机生产锡箔、铅板和玻璃板。1872 年美国戴维尔提出移动结晶器连续浇注的概念。1886—1889 年提出垂直浇注的立式连铸机的设计。1921 年皮尔逊提出结晶器振动概念，使铸坯与结晶器之间做连续相对运动。

1933 年，连铸的先驱者德国人容汉斯 (Junghans) 建设了第一台 1700t/月立式带振动结晶器的连铸机，首先浇注铜铝合金获得成功，使有色金属连续浇铸于 30 年代就应用于生产。

在 40 年代，由容汉斯在德国建成第一台浇注钢水的试验性连铸机 (1943 年)。其原理如图 1-1 所示。由图可知，当时就已提出振动的水冷结晶器、浸入式水口、结晶器上部加保护剂等技术，这些为现代连铸机奠定了基础。随后，在美国、英国、奥地利、日本等国相继建成了中间性试验连铸机，钢水量为 150kg~7.5t。

在 50 年代，连续铸钢进入工业应用阶段，有多台连铸机相继建成。其中有代表性的钢厂有：

1951 年在前苏联的红十月冶金厂建立了第一台不锈钢板坯连铸机，生产断面 180×800mm，产量为 36000t/a。