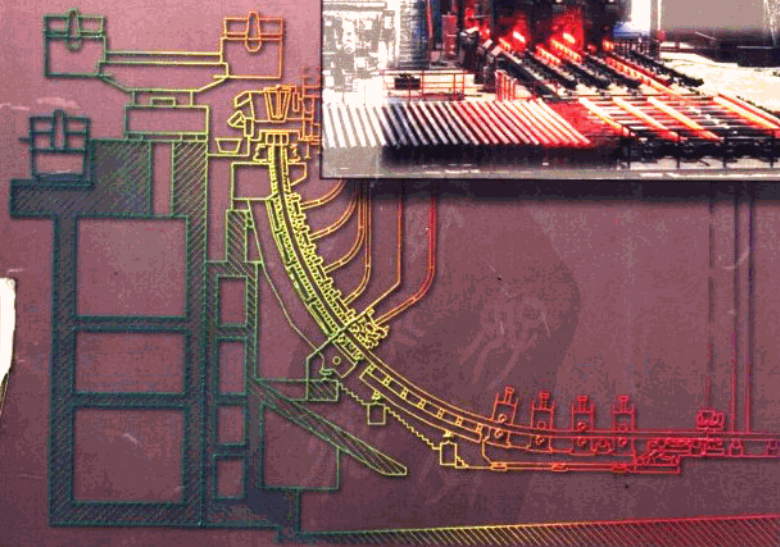
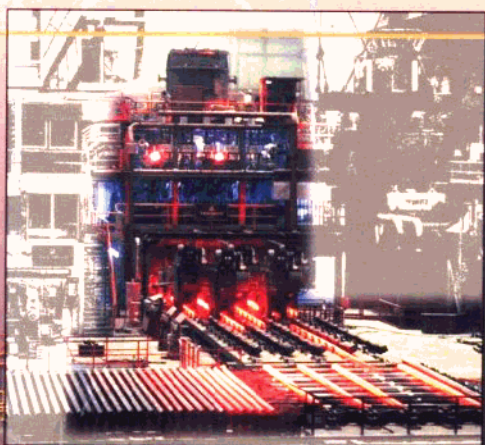


新
编

连续铸钢 工艺及设备

王雅贞
张 岩
刘术国

编著



冶金工业出版社

新编连续铸钢 工艺及设备

王雅贞

张岩 编著

刘术国

北 京

冶金工业出版社

1999

图书在版编目 (CIP) 数据

新编连续铸钢工艺及设备/王雅贞等编著. —北京:
冶金工业出版社, 1999.9

ISBN 7-5024-2383-4

I. 新… II. 王… III. ①连续铸钢-生产工艺 ②连续铸钢-熔炼设备 IV. TF777

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 45219 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 易文君 美术编辑 王耀忠 责任校对 朱翔 责任印制 牛晓波

北京源海印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1999 年 9 月第 1 版, 1999 年 9 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 9.125 印张; 245 千字; 280 页; 1-4000 册

20.00 元

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

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)

前 言

当今连续铸钢技术已成为现代钢铁生产的重要工艺之一，加速发展连续铸钢技术是实现我国钢铁工业结构优化的政策。我国已提出到 2000 年钢产量的连铸比力争达到 80% 的目标。为了适应连续铸钢技术发展的需要，受冶金工业出版社的委托，在北京钢铁学校具体组织下，根据冶金中等专业学校冶金专业教学大纲的要求，我们编写了《新编连续铸钢工艺及设备》一书。

本书主要包括：连续铸钢设备、连续铸钢基本理论、连续铸钢操作工艺、连铸坯质量、连续铸钢技术新进展及技术经济指标等。

本书的第 1 章由首都钢铁公司技工学校的张岩、第 2 章由北京钢铁学校的刘术国、第 3~8 章由北京钢铁学校的王雅贞提供原稿，全书由王雅贞汇总串编。

在编写过程中，编者曾到首钢炼钢厂、宝钢炼钢厂、上钢三厂炼钢分厂、上钢五厂炼钢分厂、武钢第二炼钢厂等单位调研学习，得到有关领导、工程技术人员和工人师傅的大力支持和帮助；此外还得到蔡开科教授、史震兴高工、潘荫华高工和王为民总工的指导，在此表示衷心的感谢。编写本书时还参阅了有关连铸、炼钢方面的著作、杂志及其有关人员提供的资料与经验，在此也向有关作者和出版社致谢。

本书可作为冶金中等专业学校冶金专业基本教材，也可供冶金专业的大专和技校学生阅读参考，还可作为冶金企业从事连续铸钢生产的工作人员（包括管理人员、技术人员和工人）的技术培训教材。

由于编者水平所限，编写时间仓促，书中难免有错误和缺点，
敬请广大读者批评指正。

编 者

1999年5月28日

目 录

绪 论	1
1 弧形连铸机设备	15
1.1 弧形连铸机的几个重要参数	15
1.1.1 弧形连铸机规格的表示方法	15
1.1.2 弧形连铸机的生产流程	16
1.1.3 弧形连铸机的几个重要参数	16
1.2 盛钢桶及其运载设备	24
1.2.1 盛钢桶	24
1.2.2 盛钢桶运载设备	29
1.3 中间罐及其运载设备	30
1.3.1 中间罐	30
1.3.2 中间罐小车	40
1.4 结晶器	44
1.4.1 结晶器的构造	44
1.4.2 结晶器的重要参数	50
1.4.3 结晶器材质与寿命	53
1.4.4 结晶器断面调宽装置	55
1.4.5 结晶器的润滑	56
1.4.6 结晶器液面自动控制	56
1.5 结晶器的振动装置	58
1.5.1 结晶器振动的目的	58
1.5.2 结晶器的振动方式	59
1.5.3 振动机构	61

1.5.4	结晶器快速更换台架	65
1.6	二次冷却系统装置	66
1.6.1	二次冷却的作用及二次冷却装置的结构形式	66
1.6.2	方坯铸机二次冷却装置	69
1.6.3	板坯铸机二次冷却装置结构	70
1.6.4	铸坯的二次冷却装置	70
1.6.5	二冷区扇形段更换装置	75
1.7	拉坯矫直装置	77
1.7.1	小方坯铸机的拉矫装置	78
1.7.2	一点矫直、多点矫直和连续矫直	80
1.8	引锭装置	84
1.8.1	引锭装置的作用及组成	84
1.8.2	引锭杆的装入、存放方式	85
1.8.3	脱引锭头装置	87
1.8.4	辊缝测量装置	87
1.9	铸坯切割装置	89
1.9.1	火焰切割装置	90
1.9.2	机械剪切装置	92
1.10	辊道及后步工序其他设备	95
1.10.1	辊道	95
1.10.2	后步工序其他设备	99
1.11	电磁搅拌装置	103
1.11.1	电磁搅拌的原理	103
1.11.2	电磁搅拌的分类	103
1.11.3	电磁搅拌的应用	106
1.12	连铸车间工艺布置	107
1.12.1	连铸机的布置方式	108
1.12.2	连铸机的几个主要尺寸	109
1.12.3	连铸车间内环境保护	112

2 钢的结晶与连铸坯凝固结构	115
2.1 钢的结晶过程	115
2.1.1 结晶的热力学条件	115
2.1.2 结晶的动力学条件	116
2.2 钢液结晶的特点	118
2.2.1 结晶温度范围	119
2.2.2 成分过冷	120
2.2.3 化学成分偏析	123
2.2.4 夹杂物、气体的形成和排出	126
2.2.5 凝固收缩	128
2.3 连铸坯的凝固特征和结构特点	129
2.3.1 连铸坯的凝固特征	129
2.3.2 连铸坯的凝固结构	133
2.4 连铸坯冷却过程中的相变和应力	137
2.4.1 相变	137
2.4.2 凝固及降温过程中的应力	137
3 连铸操作工艺	141
3.1 钢液的准备	141
3.1.1 温度的控制	141
3.1.2 钢液成分的控制	146
3.1.3 钢液纯净度的控制	148
3.1.4 连铸用钢液炉外精炼工艺路线	150
3.2 连铸操作工艺	151
3.2.1 浇注前的准备	151
3.2.2 浇注操作	157
3.2.3 浇注温度控制	162
3.2.4 拉坯速度的控制	162
3.2.5 冷却制度	163

3.3	操作事故	170
3.3.1	盛钢桶滑动水口故障	171
3.3.2	中间罐故障	171
3.3.3	漏钢	172
4	中间罐冶金与保护浇注	176
4.1	中间罐冶金	176
4.1.1	中间罐冶金功能	176
4.1.2	中间罐加砌挡墙和坝	176
4.1.3	中间罐精炼技术	180
4.1.4	中间罐过滤技术	181
4.1.5	中间罐加热技术	183
4.2	保护浇注	187
4.2.1	盛钢桶到中间罐注流保护	187
4.2.2	中间罐到结晶器注流保护	192
4.3	保护渣	195
4.3.1	保护渣的功能	195
4.3.2	保护渣的结构	196
4.3.3	保护渣的理化性能	197
4.3.4	保护渣的配制	201
4.3.5	保护渣对铸坯质量的影响	202
4.3.6	保护渣的选择	205
4.4	中间罐用保护渣及覆盖剂	207
5	连铸坯质量	209
5.1	连铸坯的纯净度	211
5.1.1	连铸坯纯净度与产品质量	211
5.1.2	连铸坯夹杂物	212
5.2	连铸坯表面质量	217
5.2.1	表面裂纹	218

5.2.2	表面夹渣	222
5.2.3	皮下气泡与气孔	224
5.3	连铸坯内部质量	224
5.3.1	中心偏析	224
5.3.2	中心疏松	227
5.3.3	内部裂纹	228
5.4	连铸坯形状缺陷	229
5.4.1	鼓肚变形	229
5.4.2	菱形变形	230
5.4.3	圆铸坯变形	232
6	特殊钢连铸	233
6.1	特殊钢的凝固特性	234
6.1.1	钢中含有的活泼元素	234
6.1.2	凝固温度区间的变化	234
6.1.3	凝固组织	234
6.1.4	热物理性能	235
6.1.5	钢的高温性能	236
6.1.6	裂纹敏感性	236
6.2	合金钢连铸工艺的特点	236
6.3	合金钢连铸设备的要求	237
6.4	典型钢种的连铸	238
6.4.1	不锈钢	238
6.4.2	硅钢	240
6.4.3	轴承钢	241
6.4.4	易切钢	242
6.4.5	其他钢种	242
7	连铸技术的新进展	248
7.1	连铸坯热送热装 (CC-DHCR) 技术	248

7.1.1	工艺流程	248
7.1.2	高温出坯	249
7.1.3	连铸坯热送热装的优越性	250
7.2	近终形连铸技术	251
7.2.1	薄板连铸技术	252
7.2.2	薄带连铸技术	258
7.2.3	异形坯连铸技术	259
7.3	水平连铸技术	265
7.3.1	概述	265
7.3.2	水平连铸机设备的特点	267
7.3.3	连铸坯的凝固特点	270
7.3.4	水平连铸的工艺特点	271
7.3.5	铸坯质量	271
8	连续铸钢的技术经济指标	273
8.1	连铸坯的产量	273
8.2	连铸比	273
8.3	连铸坯合格率	274
8.4	连铸坯收得率	274
8.5	连铸坯成材率	275
8.6	连铸机作业率	275
8.7	连浇炉数	275
8.8	连铸机达产率	276
8.9	溢漏率	277
8.10	浇成率	277
8.11	连铸坯的吨坯成本与利润	277
8.12	吨钢利润	278
8.13	其他指标的计算	278
8.13.1	钢水的镇静时间	278
8.13.2	连铸平台钢液的温度	278

8.13.3	钢液供应间隔的时间.....	279
8.13.4	中间罐的平均罐龄.....	279
8.13.5	结晶器的使用寿命.....	279
参考文献		280

绪 论

1 连续铸钢技术发展的概况

连续铸钢简称连铸。早在 19 世纪中期美国人塞勒斯 (1840 年)、赖尼 (1843 年) 和英国人贝塞麦 (1846 年) 就曾提出过连续浇注液体金属的初步设想, 并用于低熔点有色金属的浇铸; 但类似现代连铸设备的建议是由美国人亚瑟 (1886 年) 和德国人戴伦 (1887 年) 提出来的。在他们的建议中包括有水冷的上下敞口的结晶器、二次冷却段、引锭杆、夹辊和铸坯切割装置等设备; 当时是用于铜和铝等有色金属的浇铸。

此后又经过许多先驱者不懈地研究试验, 于 1933 年德国人容汉斯建成一台结晶器可以振动的立式连铸机。并用其浇铸黄铜获得成功, 后又用于铝合金的工业生产。

结晶器振动的实现, 不仅可以提高浇注速度, 而且使钢液的连铸生产成为可能, 因此容汉斯成为现代连铸技术的奠基人。

然而, 在工业规模上实现钢的连续浇铸困难很多, 与有色金属相比, 钢的熔点高、导热系数小、热容大、凝固速度慢等。要解决的这些难题, 都集中在结晶器技术的试验研究上。容汉斯的结晶器振动方式是结晶器下降时与拉坯速度同步, 铸坯与结晶器壁间无相对运动; 而英国人哈里德则提出了“负滑脱”概念。在哈里德的负滑脱振动方式中, 结晶器下振速度比拉坯速度快, 铸坯与结晶器壁间产生了相对运动, 真正有效地防止了铸坯与结晶器壁的粘连, 钢连续浇铸的关键性技术得到突破。因而在 20 世纪 50 年代连续铸钢步入了工业生产阶段。

世界上第 1 台工业性生产连铸机于 1951 年在前苏联“红十

月”冶金厂建成，是1台立式双流板坯半连续铸钢设备，用于浇铸不锈钢，其断面为 $180\text{mm} \times 800\text{mm}$ 。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，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20世纪60年代，弧形连铸机的问世，使连铸技术出现了一次飞跃。世界第一台弧形连铸机于1964年4月在奥地利百录厂诞生。同年6月由我国自行设计制造的第1台方坯和板坯兼用弧形连铸机在重钢三厂投入生产。此后不久，在前联邦德国又上马了1台宽板弧形连铸机，并开发应用了浸入式水口和保护渣技术。同年英国谢尔顿厂率先实现全连铸生产，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。也开发应用了浸入式水口和保护渣技术。1967年由美钢联工程咨询公司设计并在格里厂投产1台采用直结晶器、带液心弯曲的弧形连铸机。同一年在胡金根厂相继投产了2台超低头板坯连铸机，浇注断面为 $(150 \sim 250)\text{mm} \times (1800 \sim 2500)\text{mm}$ 的铸坯，该铸机至今仍在运行。

由于氧气顶吹转炉炼钢法的普及，更需要与连续铸钢相匹配，以适应快节奏生产；因而又一批弧形连铸机建成投入生产。到20世纪60年代末，世界连铸机总数已逾200多台，设备能力近5000万t。20世纪70年代，世界范围的两次能源危机促进了连铸技术的大发展，提高了连铸机的生产能力，从而改善了铸坯的质量，扩大了品种。到1980年，连铸坯的产量已逾2亿t，相当于1970年的8倍。进入20世纪80年代以后，连铸技术日趋成熟，如出现了盛钢桶精炼、电磁搅拌、小方坯多级结晶器、钢液钙处理、结晶器液面检测和漏钢预报、粒状保护渣的使用和自动加入、中间罐冶金、结晶器在线调宽等一系列技术；连铸坯的热送和直接轧

制及其相伴随无缺陷铸坯生产技术；近终型薄板薄带连铸机的开发；异型坯连铸机建成投产等，都说明连铸技术的飞速发展和深入普及。

自 20 世纪 50 年代连续铸钢开始步入工业生产到 60 年代末，世界钢产量的连铸比仅为 5.6%；70 年代末上升为 25.8%，10 年中连铸比每年平均增长 2 个百分点；80 年代连铸比每年平均增长 3.66 个百分点；到 1997 年连铸比为 80.5%。其增长情况如图 1 所示。工业发达国家的连铸比已超过 90%，日本的连铸比增长速度尤为突出。1996 年一些发达国家连铸比的统计：日本为 96.4%；欧共体（12 国）为 94.3%，德国为 95.8%，法国为 94.6%，美国的连铸比是 93.2%。目前连铸技术的开发与应用已成为衡量一个国家钢铁工业发展水平的标志。

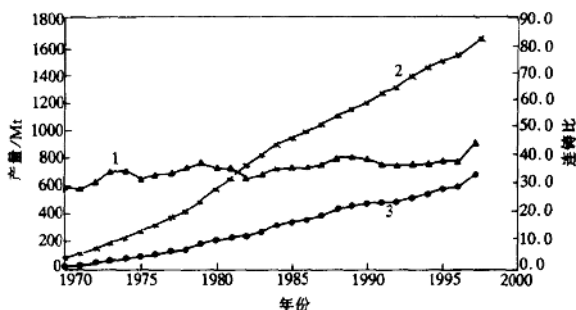


图 1 世界钢产量、连铸坯产量及连铸比的增长

1—世界粗钢产量；2—世界钢产量连铸比；3—世界连铸坯产量

2 我国连续铸钢技术发展概况

我国是连续铸钢技术发展较早的国家之一，早在 20 世纪 50 年代就已开始研究和工业试验工作。1957 年当时上海钢铁公司中心试验室的吴大柯先生主持设计并建成第 1 台立式工业试验连铸

机，浇铸 $75\text{mm} \times 180\text{mm}$ 的小断面铸坯。由徐宝升教授主持设计的第 1 台双流立式连铸机于 1958 年在重钢三厂建成投产。接着由黑色冶金设计院设计的 1 台单流立式小方坯连铸机于 1960 年在唐山钢厂建成投产。后仍然是由徐宝升教授主持设计的第 1 台方坯和板坯兼用弧形连铸机于 1964 年 6 月 24 日在重钢三厂诞生投产，其圆弧半径为 6m ，浇铸板坯的最大宽度为 1700mm ，这是世界上最早的生产用弧形连铸机之一；鉴于这一成就，1994 年徐宝升教授在《世界连铸发展史》一书中被列为对世界连铸技术发展做出突出贡献的 13 位先驱者之一。此后，由上海钢研所吴大柯先生主持设计的 1 台 4 流弧形连铸机于 1965 年在上钢三厂问世投产；该连铸机的圆弧半径为 4.56m ，浇铸断面为 $270\text{mm} \times 145\text{mm}$ 。这也是世界最早一批弧形连铸机之一，以后一批连铸机相继问世投产。70 年代我国成功地应用了浸入式水口和保护渣技术。到 1978 年我国自行设计制造的连铸机近 20 台，实际生产量约 112 万 t，连铸比仅 3.4%。当时世界连铸机总数为 400 台左右，连铸比在 20.8%。

改革开放以来，为了学习国外先进的技术和经验，加速我国连铸技术的发展，从 70 年代末一些企业引进了一批连铸技术和设备。例如 1978 年和 1979 年武钢二炼钢厂从前联邦德国引进单流板坯弧形连铸机 3 台；在消化国外技术基础上，围绕设备、操作、品种开发、管理等方面进行了大量的开发与完善工作，于 1985 年实现了全连铸生产，产量突破了设计能力。首钢二炼钢厂在 1987 年和 1988 年相继从瑞士康卡斯特引进投产了 2 台 8 流弧形小方坯连铸机，1993 年产量已超过设计能力；并在消化引进技术的基础上，自行设计制造又投产了 7 台 8 流弧形小方坯连铸机，成为国内拥有连铸机机数和流数最多的生产厂家。1988 年和 1989 年上钢三厂和太钢分别从奥地利引进浇铸不锈钢的板坯连铸机。1989 年和 1990 年宝钢和鞍钢分别从日本引进了双流大型板坯连铸机。1996 年 10 月武钢三炼钢厂投产 1 台从西班牙引进的高度现代化双流板坯连铸机。这些连铸技术设备的引进都促进了我国

连铸技术的发展。

据统计,到1995年底我国运转和在建的连铸机已有300多台,其中自行设计制造的占80%,由国外引进的只有70台左右。目前我国在异型坯、大圆坯和大方坯连铸机的设计制造方面仍有些困难;不过,我国在高效连铸技术小方坯领域已跻身世界先进行列。到1998年在大、中型企业中,有74个全连铸分厂(车间);全年钢总产量11434.6万t;连铸坯产量7729.83万t;连铸

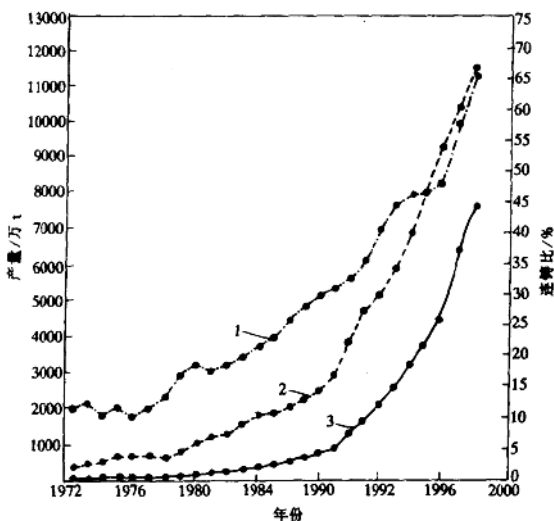


图2 1972年以来我国连铸坯产量和连铸比的增长

1—钢总产量; 2—连铸比; 3—连铸坯产量

比达67.6%。从国外引进的近终形薄板坯连铸连轧生产线,已在珠江、邯郸、包头等地起动实施,计划1998年内建成投产。马钢H型钢连铸机和H型钢轧钢机工程正在施工,不久即将投产。采用国产技术的第1台高效板坯连铸机也已在攀钢投产。

今后我国冶金企业将继续坚持不懈地推进以全连铸为方向,