



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

连铸设计原理

孙立根 主编



冶金工业出版社

www.cnmip.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

连铸设计原理

主 编 孙立根

副主编 韩毅华 李慧蓉 赵定国



北 京

冶金工业出版社

2017

内 容 提 要

本书以讲授连铸基本设备设计原理和设备构成为主,同时分析了部分连铸机型的设计实例,以满足不同层次学生和设计人员学习和做相关设计的需要。

本书共分7章,主要内容包括连铸技术发展概况、连铸机机型与结构特征、中间包设计、浇注水口设计、结晶器设计、二冷系统设计和连铸自动化控制与电力传动控制系统。

本书可作为高等院校冶金工程等专业的教材(配有教学课件),也可作为从事连铸设备设计的科研和工程技术人员的培训教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

连铸设计原理/孙立根主编. —北京:冶金工业出版社,2017.8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7561-1

I. ①连… II. ①孙… III. ①连铸机—机械设计—高等学校—教材 IV. ①TG233

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第137984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 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 杜婷婷 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郭惠兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7561-1

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017年8月第1版,2017年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;13.75印张;327千字;207页

39.00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)

前 言

连铸是炼钢过程的两大核心环节之一，连铸设计也是高等学校冶金工程专业炼钢设计原理课程教学大纲所包含的核心模块之一。作者依据课程教学大纲，在多年讲授炼钢设计原理课程的实践经验和相关领域的研究成果基础上，参考本领域内的权威文献资料，编写了本书。

本书重点讲授了连铸机的机型、结构特征以及各大核心模块的设计原理、设计内容和设计方法，使学生初步具备分析和解决冶金工程实际问题的能力，为今后从事相关领域的设计工作打下扎实的理论基础。

本书以基础知识、核心设备和自动控制三大模块为主要内容，共7章，其中核心设备设计是本书的重点。第1章连铸技术发展概况，重点讲述了连铸的发展历程和未来的发展方向。第2章连铸机机型与结构特征，总体介绍了连铸机的基本组成，使学生对连铸机有一个初步的认识。第3~6章重点介绍了连铸的四大核心设备——中间包、浇注水口、结晶器和二冷系统的基本构成、设计原理和设计思路，以提高学生对连铸机的认知水平。第7章连铸自动化控制与电力传动控制系统，重点介绍了当前连铸实用的自动化控制技术，帮助学生搭建连铸机设计理论与实际生产操作相结合的桥梁。全书由孙立根担任主编，韩毅华、李慧蓉、赵定国担任副主编。

在本书编写过程中，得到了华北理工大学朱立光、刘增勋、王硕明、张彩军等资深教授的指导和帮助，同时郝剑桥、刘云松等几位研究生为书中图表的整理和编辑也做了大量工作，在此表示诚挚的感谢。

本书配套教学课件读者可在冶金工业出版社官网 (<http://www.cnmp.com.cn>) 输入书名搜索资源并下载。

由于作者水平所限，书中不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者
2017年5月

目 录

1 连铸技术发展概况	1
1.1 钢铁工业发展现状	1
1.2 连铸发展概况	2
1.2.1 世界连铸发展概况	2
1.2.2 我国连铸发展概况	3
1.3 连铸优越性	6
1.4 连铸技术发展及应用	8
1.4.1 传统连铸技术发展	8
1.4.2 连铸新技术开发	8
1.4.3 数学模型在连铸过程中的应用	9
习题	10
2 连铸机机型与结构特征	11
2.1 连铸机机型及特点	11
2.1.1 连铸机机型分类	11
2.1.2 各类连铸机的特点	12
2.2 连铸机主要设计参数的确定与铸机生产能力计算	17
2.2.1 连铸机主要设计参数的确定	17
2.2.2 连铸机生产能力计算	24
2.3 常见铸机结构特征	26
2.3.1 小方坯连铸机	26
2.3.2 板坯连铸机	28
2.3.3 圆坯连铸机	43
2.3.4 大方坯连铸机	44
习题	45
3 中间包设计	46
3.1 中间包作用	46
3.2 中间包容积和深度	47
3.2.1 中间包容积	47
3.2.2 中间包深度	48
3.3 中间包结构及内腔主要尺寸	49

3.3.1 中间包外形	49
3.3.2 中间包内形	49
3.3.3 中间包内腔主要尺寸	50
3.4 中间包钢水夹杂物的去除	51
3.4.1 中间包内钢水流动特征	51
3.4.2 中间包内钢水流动现象	52
3.4.3 钢水的流动形态控制	53
3.4.4 钢水夹杂物去除与控制	55
3.5 中间包包衬耐火材料	57
3.5.1 中间包砌筑结构	57
3.5.2 中间包辅助结构	58
3.6 中间包加热技术	59
3.6.1 等离子加热技术	59
3.6.2 电感应加热技术	61
3.6.3 电渣加热	61
3.6.4 陶瓷电阻加热	62
习题	62
4 浇注水口设计	63
4.1 浇注水口用耐火材料	63
4.2 长水口设计	66
4.3 浸入式水口类型与设计	67
4.3.1 浸入式水口基本类型	67
4.3.2 浸入式水口设计	68
习题	70
5 结晶器设计	71
5.1 结晶器冶金作用	71
5.1.1 凝固坯壳生长均匀性	71
5.1.2 液相穴夹杂物上浮与排除	72
5.1.3 结晶器微合金化	72
5.1.4 凝固组织控制	73
5.2 结晶器材质	73
5.2.1 不同元素对铜性能的影响	73
5.2.2 连铸对结晶器用铜合金的性能要求	74
5.2.3 结晶器用铜合金热—力学特性及其使用现状	74
5.2.4 结晶器镀层	76
5.2.5 结晶器寿命	77
5.3 结晶器结构	78

5.3.1 整体式结晶器	78
5.3.2 管式结晶器	78
5.3.3 组合式结晶器	79
5.3.4 漏钢检测装置	80
5.3.5 多级结晶器	80
5.3.6 结晶器断面调宽装置	81
5.3.7 结晶器液面自动控制	82
5.3.8 结晶器快速更换台架	82
5.4 结晶器尺寸设计参数	83
5.4.1 结晶器断面尺寸及长度	83
5.4.2 方坯结晶器圆角半径	85
5.4.3 结晶器倒锥度	85
5.5 结晶器冷却水量	86
5.6 结晶器振动	87
5.6.1 结晶器振动目的	87
5.6.2 结晶器振动规律演变	88
5.6.3 正弦振动规律及振动参数	89
5.6.4 非正弦振动规律及振动参数	97
5.6.5 结晶器振动机构	105
5.7 结晶器润滑	108
5.7.1 结晶器润滑机理	108
5.7.2 结晶器内摩擦力分布	109
5.7.3 结晶器润滑介质	109
5.8 结晶器电磁搅拌	111
5.8.1 电磁搅拌分类	111
5.8.2 结晶器电磁搅拌的发展	111
5.8.3 常见结晶器电磁搅拌方法	112
习题	113
6 二冷系统设计	114
6.1 二次冷却与铸坯质量	115
6.2 二冷区作用与传热	115
6.2.1 二冷区作用	115
6.2.2 二冷区传热	116
6.3 二冷系统装置	120
6.3.1 二冷装置结构形式	120
6.3.2 拉坯矫直装置	123
6.3.3 引锭装置	127
6.3.4 铸坯切割装置	127

IV	
6.3.5	辊道及后步工序其他设备 130
6.4	铸机弧半径设计 131
6.4.1	全凝固矫直时连铸机基本圆弧半径 131
6.4.2	带液芯矫直时连铸机基本圆弧半径 133
6.4.3	现有连铸机基本圆弧半径确定方法分析 135
6.5	二冷辊列设计 136
6.5.1	足辊段与密排辊列段设计 137
6.5.2	矫直段设计 137
6.5.3	基本弧形段设计 140
6.5.4	连铸机辊列判定计算 141
6.6	二冷喷水系统设计 144
6.6.1	水喷雾冷却 144
6.6.2	气—水喷雾冷却 145
6.6.3	干式冷却（干式浇注） 146
6.7	二冷配水设计 146
6.7.1	二冷比水量的确定 147
6.7.2	二冷区冷却模式的确定 149
6.8	二次冷却控制 151
6.8.1	二次冷却控制原理 151
6.8.2	二次冷却控制方法 153
6.8.3	目标表面温度动态控制法 154
6.8.4	参数控制法 162
6.8.5	两种控制方法的比较 163
6.9	二冷压下与电磁搅拌技术 164
6.9.1	轻压下技术（Soft Reduction） 164
6.9.2	重压下技术（Heavy Reduction） 168
6.9.3	连续锻压技术（Continuous Forging） 168
6.9.4	热应力压下技术（Thermal Soft Reduction） 169
6.9.5	二冷电磁搅拌技术 169
	习题 171
7	连铸自动化控制与电力传动控制系统 173
7.1	主要自动控制系统 173
7.1.1	中间包钢水液位自动控制 173
7.1.2	保护渣加入自动控制 174
7.1.3	结晶器钢水液位自动控制 177
7.1.4	开浇自动控制 180
7.1.5	结晶器冷却水流量自动控制 181
7.1.6	二次冷却水自动控制 181

7.1.7 铸坯定长切割自动控制	183
7.2 电力传动控制	184
7.2.1 连铸过程对电力装备的要求	185
7.2.2 连铸过程电力传动系统的运转方式	186
7.2.3 连铸过程电力传动控制	187
7.2.4 连铸过程电力传动主要控制系统	189
习题	206
参考文献	207

钢铁工业是原材料工业，是国民经济发展的基础工业，钢铁产品广泛用于国民经济的各行各业，它的发展与一个国家整体经济发展规模和速度密不可分。一般情况下，在国民经济发展初期，基础设施、基础工业、建筑业发展较快，钢材消费量增长较快，产品结构中以条钢、型材为主；在加工、制造业快速发展时期，汽车制造、船舶制造、电站锅炉、压力容器、能源运输、农业机械、家用电器等行业迅速发展，板材、扁平材消费比例增长较快；而在第三产业和高新技术产业发展到一定比例时期，钢材消费量将处于相对下降状态。目前，钢铁产品的数量、质量和生产技术的先进性已成为衡量一个国家工业发展水平的重要标志之一。

1.1 钢铁工业发展现状

从原材料角度看，20 世纪堪称为钢铁世纪，钢铁产品总量逐年增加，质量逐步提高，品种趋于多元化。1900 年全球粗钢产量约为 3000 万吨，到 2014 年达到 16.7 亿吨。在经济、社会和科技进步等多方面因素的推动下，特别是中国经济发展的推动下，全球粗钢产量得到迅速增长，近 40 年的世界粗钢产量如图 1-1 所示。而钢铁工业的发展也经历了提高生产率、提高质量、节约能源、改善环境等发展阶段。

从技术创新角度看，20 世纪下半叶以来，世界钢铁工业的技术经济面貌发生了革命性变化，出现了两轮大规模的创新高潮，推动发达国家完成了从产品数量扩张到结构优化的战略转移。突出的贡献之一在于连续铸钢技术的工业化，基本取代了用钢锭模铸钢、初轧机开坯的第一代钢液成形技术，不但可以提高成材率 8% ~

10%，还可以节约能源 20% ~ 50%，也促使了连铸连轧的发展。目前连铸比已经成为衡量一个国家钢铁行业发展的重要指标。

就我国而言，经过 50 年的建设与发展，我国钢铁工业规模由小到大，已形成包括由采矿、烧结、焦化、炼铁、炼钢、轧钢以及相应的铁合金、耐火材料、碳素制品和地质勘探、工程设计、建筑施工、科学研究等部门构成的完整的工业体系。

截止到目前，我国粗钢产量已经占到世界总产量的一半以上，诞生了如宝钢、武钢、鞍钢、河钢、首钢等十余个世界级大型钢铁集团公司，多家冶金企业进入世界企业 500



图 1-1 近 40 年世界粗钢产量的变化

强。我国近几十年的粗钢产量变化如图 1-2 所示。

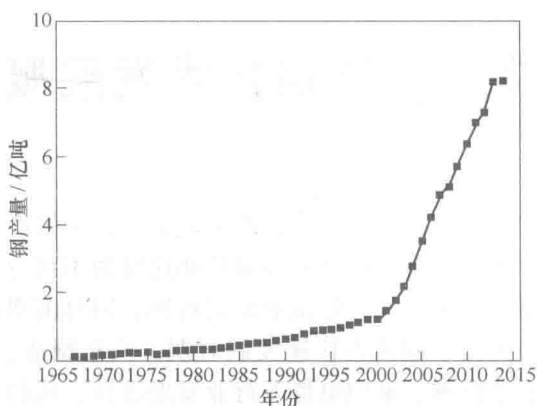


图 1-2 近 50 年我国粗钢产量的变化

从图 1-2 中可以看出,从 2000 年开始,世界粗钢产量的增长值基本为我国钢铁产量的增长值,特别是到了 2005 年后,我国粗钢产量呈井喷式增长,到 2014 年,粗钢产量已经达到 8.23 亿吨。

1.2 连铸发展概况

将高温钢水连续不断地浇注到一个或一组水冷铜质结晶器内,钢水沿结晶器周边逐渐凝固成坯壳,待钢液面上升到一定高度,坯壳凝固到一定厚度后由拉矫机把铸坯拉出,并经二冷区喷水冷却使铸坯完全凝固,由切割装置根据轧钢要求切成定尺。这种使高温钢水直接浇注成钢坯的工艺称为连续铸钢,简称连铸。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。

1.2.1 世界连铸发展概况

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 年转炉炼钢的发明者贝斯麦 (Herry Bessemer) 使用水冷旋转双辊式连铸机生产锡箔、铅板和玻璃板。当时他就提出了用双辊式连铸机连续铸钢的设想,由于钢的导热系数小,热焓大,凝固速度慢,凝固过程不易控制,限于当时的技术条件未能在生产中应用。1872 年美国人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。1927 年连铸的先驱者德国人西格弗里德容汉斯 (Siegfried Junghans) 试验成功了铜和铝的连铸,到 1933 年容汉斯建设了第一台 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,使有色金属连续浇注于 20 世纪 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)。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，它是世界上第一台工业性生产连铸机，其形式为立式双流板坯半连续铸钢设备，生产断面为 $180\text{mm} \times 800\text{mm}$ ，产量为 3600t/a 。1952 年，在英国的巴罗（Barrow）工厂建成第一台小方坯连铸机，浇注碳素钢和低合金钢，断面为 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \sim 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。与此同时，德国人斯莎贝尔（O. Schacher）提出了弧形连铸机的专利。1956 年，在英国的巴罗钢厂建成了立弯式连铸机，大大降低了立式连铸机的高度。1963 年，第一台弧形结晶器的小方坯连铸机在瑞士建成投产。1964 年，第一台弧形板坯连铸机在德国的梯林根钢厂建成投产，断面最大为 $250\text{mm} \times 1600\text{mm}$ 。与立式连铸机相比较，高度大大降低。20 世纪 70 年代以后为连铸大发展时期。连铸机已具备与大型氧气转炉相配合进行工业生产的可能性。连铸机设备和工艺技术日臻完善，促进了连铸的迅速发展。

连续铸钢是炼钢领域内发展最快的技术之一。40 多年来，全世界的连铸坯产量由 1966 年的 60 万吨增加到 1986 年的 37153 万吨，20 年增长了 54 倍。1995 年增加到了 56000 万吨，2003 年增加到了 85085 万吨，2014 年更是增加到了 176600 万吨，连铸比从 1975 年的 13.5% 增长到 2014 年的 95.9%。连铸技术具有明显的经济优越性，因此受到各国普遍重视。图 1-3 为世界连铸比变化情况。

连铸机型由最初的旋转双辊式发展为立式、立弯式、弧形、椭圆形、水平式，直至现在的薄板坯连铸等近终形连铸。

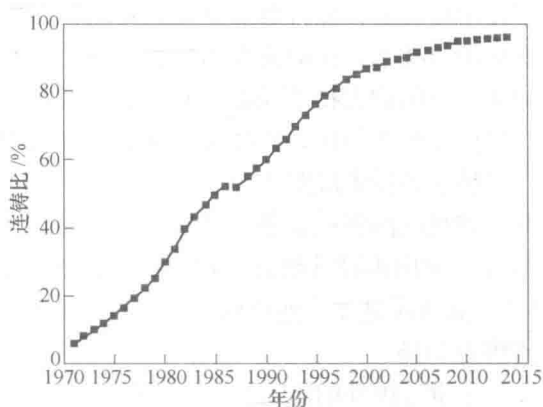


图 1-3 近 40 年世界产钢连铸比的变化

1.2.2 我国连铸发展概况

我国是研究、应用连铸技术较早的国家之一。20 世纪 50 年代中期开始探索性的工作，1956 年在当时的重工业部钢铁综合研究所建成了 80mm 圆坯半连铸试验装置。1957 年在上海钢铁公司中心试验室建成一台高架式方坯连铸机。1958 年在重钢三厂建成投产一台两机两流、配合 30 吨平炉、浇注 $175\text{mm} \times 250\text{mm}$ 铸坯的立式连铸机。安装在重钢三厂的这台立式连铸机，在设计中有许多新的构思，如结晶器强迫下降、弹簧上升的振动方式、500 吨大型飞剪、简单可靠的拉辊油压系统、铸坯链式提升机等都具有独创性。1960 年在唐钢建成一机一流、配合 5 吨转炉，浇注断面 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的方坯连铸机，后改为一机两流断面为 $140\text{mm} \times 140\text{mm}$ 的方坯。

进入 20 世纪 60 年代，中国连铸技术开发与应用曾掀起一股高潮，突出表现在对弧形连铸技术的开发上。北京钢铁学院徐宝陞教授提出弧形连铸机的设计并于 1960 年在学院试验厂建设一台简单的试验装置，浇注 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 方坯。在此基础上，由徐宝陞教授主持设计的一台大型弧形板坯连铸机于 1964 年 4 月 26 日在重钢三厂投产。这是一台方、板坯兼用机，曲率半径 6m ，浇注板坯最大宽度是 1700mm ，这也是世界上最早的生产用弧形机之一。由于弧形连铸机的高度低、出坯方便，因此在重钢三厂取得成功后，许多工厂

纷纷筹建自己的弧形连铸机,如1965年上钢三厂建成一台半径为4.65m的矩形坯弧形连铸机,浇注坯尺寸为270mm×145mm。1967年北京首都钢铁公司(简称首钢)试验厂投产一台半径为5.5m的直结晶器弧形连铸机。同一年末,在徐宝陞教授主持下,重钢公司又投产了一台曲率半径为10m的方、板坯兼用机,可以浇注(250~300)mm×(1500~2100)mm板坯和3流300mm×300mm和4流250mm×250mm方坯。到1986年底我国仍在生产的自行制造的弧形连铸机有35台。鉴于这一成就,徐宝陞教授在30年后被一部世界连铸发展史书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。

应当提出的是上述铸机的设计和制造,以及在这之后的十多年时间里连铸技术的开发都是立足于国内完成的。一个突出例子是20世纪70年代初,上钢一厂投产了一台由该厂和西安重型机械研究所合作推出的板坯连铸机。投产后遇到的突出质量问题是板坯纵裂,严重影响了生产的进行。在这种情况下,冶金工业部(简称冶金部)和机械工业部联合组织了技术攻关组,经过参加单位的共同努力,在较短时间内,成功开发和应用了浸入式水口和保护渣技术,在解决板坯裂纹问题上取得突破性进展,显示了依靠自己的力量在解决连铸生产中的重大技术问题方面的水平和能力。

但由于缺乏与国外的技术交流,不能及时有效地借鉴国外的先进技术。而在这一时期,世界连铸技术应用正处于大发展中。这样,我国连铸生产技术水平与国外的差距明显拉开,如我国的铸机装备、操作工艺和相关技术与实际工业生产要求不相适应,尽管到1978年,靠国内设计制造、建设的铸机已近20台,但实际产量只112万吨,连铸比仅为3.5%。而当时世界上连铸机数量已近400台,1978年连铸坯产量已达1.5亿吨左右,连铸比约为21%。

为了学习国外的先进技术和经验,促进我国连铸生产发展,一些企业从20世纪70年代后期开始引进国外技术和设备,如武汉钢铁公司(简称武钢)二炼钢厂在1978年10月、1979年2月和1979年3月先后投产了3台从德国西马克·德马克公司引进的单流板坯连铸机。尤其应当提到的是,这3台铸机投产之后,在引进消化国外技术的基础上,武钢二炼钢厂围绕着装备、操作、质量控制和品种开发以及生产管理等方面进行了大量的改进和完善,并于1985年实现了全连铸生产,1985年实际产量达到了160万吨,其中包括硅钢、深冲钢和船板钢等高附加值产品。同时根据自身的经验总结出“以连铸为中心,以炼钢为基础,以设备为保证”的连铸生产组织方针,比较切合实际地反映了搞好连铸生产的基本要求和客观规律。应当说,武钢二炼钢厂发展连铸过程中积累的经验 and 做法是多方面的,它的成功曾为我国连铸事业的发展提供了样板。

在方坯连铸方面,1982年以后,为解决我国中小型钢铁厂开坯能力不足的问题,引进一批旨在浇注90mm×90mm、120mm×120mm及150mm×150mm、供成品轧机一火成材使用的小方坯连铸机。由于引进的小方坯连铸机装备水平较高,为我国消化引进连铸技术、提高我国连铸技术水平开辟了新的途径。

1972年钢产量2338万吨,连铸坯产量46.6万吨,连铸比1.99%,到1978年钢产量为3178万吨,连铸坯产量112.7万吨,连铸比3.5%。到1987年底我国连铸坯产量724万吨,连铸比达12.9%。到1996年钢产量超过1亿吨,连铸坯产量5377万吨,连铸比53.3%。2003年钢产量2.2234亿吨,连铸坯产量2.21亿吨,连铸比96.3%。2014年钢产量8.23亿吨,连铸比达到98.3%。我国连铸比变化如图1-4所示。

从图 1-2 和图 1-4 可以看出, 1988~1998 年, 我国钢年产量增加了 5500 万吨, 连铸坯年产量增加 7000 万吨, 连铸比增加了 54.13%, 年均增长 5.41%, 这是我国连铸比发展最快的 10 年, 比发达国家增长最快时期的速度还快, 如日本连铸生产发展最快的 1973~1985 年, 年均增长 5.33%。并且 1995 年起我国连铸坯产量稳居世界第三, 仅次于日本、美国。可以说连铸的高速增长是我国钢铁工业快速发展的最主要原因之一。

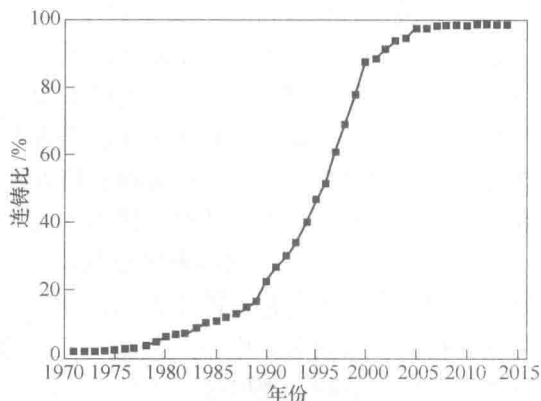


图 1-4 近 40 年我国产钢连铸比的变化

(1) 连铸的快速增长推动了钢产量的大幅增长。从 1999 年至今, 鉴于前期连铸比已经较高, 因此连铸比并未发生较大增幅, 但连铸坯产量发生了翻天覆地的变化。2014 年, 全国连铸坯产量已经突破 8 亿吨, 当然这些成绩与前期连铸发展所开展的工作密不可分。

(2) 连铸水平与钢材总量同步提高, 保证了连铸坯产量的持续高速增长。1985 年 5 月, 武钢二炼钢厂率先实现生产组织的全连铸, 1998 年我国全连铸钢厂已达 75 家; 1999 年 10 月, 武钢实现了特大型企业生产组织的全连铸, 标志着全连铸生产组织模式在我国得到了迅速推广。1988~1993 年, 通过抓“洁净”钢条件, 铸机设备维护, 连铸生产组织优化和铸机改造, 于 1993 年从总体上解决了单机设备达产问题, 单流铸机年产能力普遍提高了 40%~150%。

我国连铸生产的技术经济指标大幅度提高, 表现在如下几个方面:

- 1) 漏钢率。方坯连铸, 普遍降低到 0.5% 以下, 板坯连铸降低至 0.2% 以下。
- 2) 作业率。方坯生产中, 普遍大于 90%, 最高达到 95%; 板坯生产中, 大于 85%, 最高 93%。
- 3) 连浇炉数。平均大于 10 炉/次, 多数小方坯连铸机大于 20 炉/次, 最高能达到 30 炉/次以上。

连铸生产品种不断扩大, 铸坯质量不断提高。不锈钢, 轴承钢, 齿轮钢, 低、中、高碳钢, 包晶和亚包晶钢均可进行连铸, 且表面和内部质量已完全或基本满足轧制工序要求。

(3) 高效连铸技术开发与推广取得突破性进展。高效连铸技术是 20 世纪 90 年代以来连铸技术完善与发展的主要方向之一, 在国外被称为高速连铸技术。我国在增加高连浇率、高质量等内容基础上, 称为高效连铸技术。国家计划委员会 (现名: 国家发展和改革委员会, 简称发改委) “九五”专门立项, 组织连铸技术国家工程研究中心、北京科技大学等单位, 进行了科技攻关, 很快取得了重大突破, 其基本指标如下:

- 1) 120mm×120mm 方坯, 最大拉坯速度 4.2m/min。
- 2) 150mm×150mm 方坯, 最大拉坯速度 3.5m/min。
- 3) 200mm×1450mm 板坯, 最大拉坯速度 1.8m/min。

且部分指标沿用至今。

(4) 近终形连铸技术取得长足进步。近终形连铸技术是高效连铸技术的一种特殊形式,是今后连铸生产完善和优化发展的方向。在薄板坯连铸方面,中宽度薄板坯连铸攻关取得成功,以珠钢、邯钢、包钢引进的 CSP,唐钢等引进的 FTSR 为代表薄板坯连铸连轧生产线已在国内遍地开花;在薄带坯连铸方面,200mm、600mm 宽的不锈钢和电工钢薄带坯连铸试验已取得初步成果;在线材连铸方面, $\phi 5 \sim 10\text{mm}$ 的线材水平连铸试验已获成功;在异型坯连铸方面,马钢、莱钢、津西的 H 型钢连铸机发挥了重要的作用。

(5) 炼钢、连铸、轧钢的衔接更加紧密。连铸生产的迅速发展,带动了我国钢铁工业结构优化的步伐。首先是连铸生产的优化,促进了洁净钢的生产,钢液精炼比大幅提高,炼钢原料精料、出钢双命中率(终点 [C]、温度)的控制水平显著提高。其次,连铸生产的优化使生产品种、规格进一步扩大;高温无缺陷铸坯的生产,使得连铸与轧制工序的衔接更加紧凑,生产流程趋于一体化。同时,生产流程的紧凑推动了炼钢到轧钢工序自动控制水平的提高,加快了生产流程管理一体化的进程。

(6) 连铸技术专业队伍已经形成。我国已具备对不同规格和性能的连铸机(少数合金钢大方坯、大圆坯铸机除外)进行设计、制造、建设和工程总承包的能力,形成了一支高水平的专业队伍。

(7) 一批相关技术已与连铸技术发展相配套。连铸、精炼用耐火材料供应已完全立足国内,并有少量出口。功能性耐火材料的研制、应用也取得一定成效,国产常规和高速连铸用保护渣已广泛用于生产,自控检测领域也已涌现出一批性能良好的国产化装备。

上述成绩推动了钢铁生产的持续大幅度增长,优化了钢铁生产工艺流程,全面改善了炼钢生产的技术经济指标。即便如此,我国钢铁生产现状与国际先进产钢国仍然存在着较大差距,集中表现在如下几方面:

(1) 品种、质量方面。随着社会工业化和现代化的发展,市场对钢材的品种、质量提出了更高的要求。其重要标志之一是板材、管材、带材比重的提高,日本、美国、西欧等先进产钢国,钢材总量中板、管材比率已达 60% 以上,高附加值产品钢材总量在 40% 以上,特别是日本,其每年所产 8000 万吨钢几乎全部是高附加值钢。而我国钢铁产品基本上以型钢、线材为主,合金钢比率相对要低。国民经济急需的关键高档品种,如高牌号石油管线等还需要进口。

(2) 工艺、技术装备方面。目前,我国在生产工艺、装备水平上达到国际先进水平的大型企业较多,如宝钢、首钢、沙钢等,但全行业工艺、技术装备,落后的比重仍很大,其特点如下:

- 1) 部分企业,特别是民营企业,装备、技术水平低,能耗高,效率低。
- 2) 工艺结构有待进一步完善。
- 3) 流程技术装备,如铁水预处理、炉外精炼等技术在普通企业的普及率不高。
- 4) 部分企业还存在自动化水平不高的问题。

1.3 连铸优越性

钢液成型的方法有两种:模铸法和连续铸钢法。两种工艺如图 1-5 所示。

模铸是将高温钢液浇注到一个或多个钢锭模内使之凝固成型的方法,是钢液凝固成形

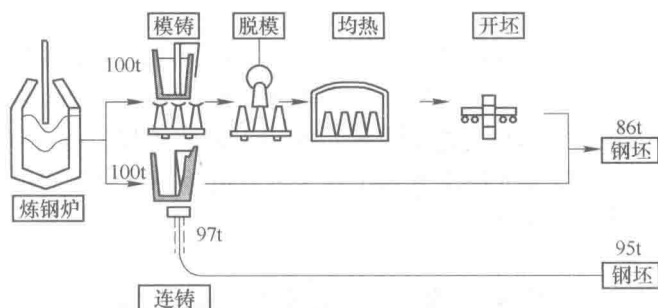


图 1-5 连铸和模铸的工艺流程对比

的基本方法，其典型特征是生产过程的间断化；连续铸钢是将高温钢液连续地浇注到一个或多个强制水冷的金属型腔内。凝固成形后，再经二次冷却，使之凝固，且成一定形状（规格）铸坯的工艺方法，其典型特征是生产过程的连续化。

连铸技术的迅速发展是当代钢铁工业发展的一个非常引人注目的动向，连铸之所以发展迅速，主要是它与传统的钢锭模浇注相比具有较大的技术经济优越性，主要表现在以下几个方面：

（1）简化生产工序。由于连铸可以省去初轧开坯工序，不仅节约了均热炉加热的能耗，而且也缩短了从钢水到成坯的周期时间。近年来，连铸的主要发展之一是浇注接近成品断面尺寸铸坯的趋势，这将进一步简化轧钢的工序。

（2）提高金属的收得率。采用钢锭模浇注从钢水到成坯的收得率大约是 84%~88%，而连铸约为 95%~96%，因此采用连铸工艺可节约金属 7%~12%，这是一个相当可观的数字。日本钢铁工业在世界上之所以有竞争力，其重要原因之一就是在钢铁工业中大规模采用连铸。从 1985 年起日本全国的连铸比已超过 90%。对于成本昂贵的特殊钢、不锈钢，采用连铸法进行浇注，其经济价值就更大。我国的武钢第二炼钢厂用连铸代替模铸后，每吨钢坯成本降低约 170 元，按年产量 800 万吨计算，每年可收益约 13.5 亿元。由此可见，提高金属收得率，简化生产工序将会获得可观的经济效益。

（3）节约能量消耗。据有关资料介绍，生产 1 吨连铸坯比模铸开坯省能 627~1046kJ，相当于 21.4~35.7kg 标准煤，再加上提高成材率所节约的能耗大于 100kg 标准煤。按我国目前能耗水平测算，每吨连铸坯综合节能约为 130kg 标准煤。

（4）改善劳动条件，易于实现自动化。连铸的机械化和自动化程度比较高，连铸过程已实现计算机自动控制，使操作工人从笨重的体力劳动中解放出来。近年来，随着科学技术的发展，自动化水平的提高，电子计算机也用于连铸生产的控制，除浇钢开浇操作外，全部都由计算机控制。例如，我国宝钢的板坯连铸机，其整个生产系统采用 5 台 PFU-1500 型计算机进行在线控制，具有切割长度计算、压缩浇注控制、电磁搅拌设定、结晶器在线调宽、质量管理、二冷水控制、过程数据收集、铸坯跟踪、精整作业线选择、火焰清理、铸坯打印标号和称重及各种报表打印等 31 项控制功能。

（5）铸坯质量好。由于连铸冷却速度快、连续拉坯、浇注条件可控、稳定，因此铸坯内部组织均匀、致密、偏析少、性能也稳定。用连铸坯轧成的板材，横向性能优于模铸，深冲性能也好，其他性能指标也优于模铸。近年来，采用连铸已能生产表面无缺陷的铸

坏,直接热送轧成钢材。

连铸是一项系统工程,涉及炼钢、轧钢、耐火材料、能源、备品备件、生产组织管理等一系列的工序。多年的生产实践证明:只有树立“连铸为中心,炼钢为基础,设备为保证”的思想,才能较好地掌握现代连铸技术,连铸工艺的采用,改变了传统的工艺要求、操作习惯和时间节奏。这就要求操作者和技术人员加强学习,更新知识,以适应连铸新技术的发展,做好技术培训工作。

1.4 连铸技术发展及应用

1.4.1 传统连铸技术发展

近几年来,虽然钢铁工业在国家供给侧改革政策下发展受到一定程度的限制,而且国际上许多国家钢铁产量有所下降,但连铸坯的产量仍在不断增加,连铸工艺更趋完善,技术更加成熟。此外,随着炼钢和轧钢技术的进步,钢铁工业结构的优化和对产品规格、质量的更高要求,也都促进了连铸技术的发展。主要表现在如下几个方面:

- (1) 大型炼钢厂以及高效热连轧机的出现,促使连铸机向大型化及高效化方向发展。
- (2) 生产流程的紧凑化,促使连铸机向品种及高生产效率方向发展。
- (3) 市场对产品品种、规格的要求,促使连铸机的多元化。

上述3个方面的综合作用,奠定了传统连铸技术发展方向,即连铸生产的高效化。

1.4.2 连铸新技术开发

在传统连铸技术进一步发展的同时,新型连铸技术的开发也初见成效。其中,以近终形连铸和电磁连铸技术发展最快。

1.4.2.1 近终形连铸

近终形连铸技术的实质是在保证成品钢材质量的前提下,尽量缩小铸坯的断面以取代压力加工。近终形连铸通常分为四大类:薄板坯连铸、薄带坯连铸、异型坯连铸和喷雾成形。

与传统连铸工艺相比,薄板坯连铸连轧具有如下特点:

- (1) 工艺简化,设备简单,生产线缩短。薄板坯连铸连轧省去了粗轧和部分精轧机架,生产线一般仅200余米,降低了单位基建造价,缩短了施工周期,可较快地投产并发挥投资效益。
- (2) 生产周期短。从冶炼钢液至热轧板卷输出,仅需1.5h,可节约流动资金,降低生产成本,企业可很快取得较好的经济效益。
- (3) 节约能源,提高成材率。由于实现了连铸连轧,吨钢可直接节能66kg,间接节能145kg,成材率约提高11%~13%。

薄板坯连铸连轧技术取得成功的有众多公司和单位,其中最具有代表性的工艺有MDH(德马克公司)的ISP工艺、SMS(西马克公司)的CSP工艺、VAI(奥钢联)的CONROOL工艺、Daimiel(丹涅利公司)的FTSR工艺、Sumitomo(日本住友公司)的QSP工艺以及我国鞍钢的ASP工艺等。尽管各自的工艺路线不同,设备也各具特点,但最