

# 转炉—连铸 工艺设计与程序

贾凌云 编著

ZHUANLU LIANZHU  
GONGYI SHEJI YU CHENGXU



冶金工业出版社  
<http://www.cnmp.com.cn>

# 转炉—连铸工艺设计与程序

贾凌云 编著

北京

冶金工业出版社

2005

## 内 容 提 要

本书运用通俗易懂的语言,介绍了炼钢和连铸工艺设计程序、编制数学模型的原则和基础,并列出了程序软件的用户说明和全部程序软件的源程序。主要包括钢铁工业的发展和氧气转炉炼钢,现代转炉炼钢连铸车间的特征,现代转炉炼钢连铸车间设计的依据和目标,设计程序的编制目的、组成和特点,氧气转炉炉体的设计及其程序,转炉炼钢连铸厂的主要技术经济指标和厂房组成及主要尺寸程序,转炉炼钢连铸厂的物料、热平衡计算及程序,连铸机组的工艺设计和程序等。

本书适合转炉炼钢和连铸专业的设计工作者阅读,对钢铁企业的生产技术人员、科研人员和大专院校冶金专业的师生也有参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

转炉-连铸工艺设计与程序/贾凌云编著. —北京:  
冶金工业出版社, 2005. 10  
ISBN 7-5024-3679-0

I. 转… II. 贾… III. ①转炉炼钢—工艺设计  
②连续铸钢—工艺设计 IV. TF7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 041029 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 王雪涛 张 卫 美术编辑 李 心

责任校对 刘 倩 李文彦 责任印制 牛晓波

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

2005 年 10 月第 1 版, 2005 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 58 印张; 1512 千字; 912 页; 1-3000 册

159.00 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)

## 作者简介

贾凌云 男，汉族，1928年3月生，大学文化，山西省清徐县人，包头钢铁设计研究院高级工程师。1948年分配到太钢工作，先后任技术员和值班主任，1954年在平炉试炼成功含铬钢40Cr。1955年调任北满钢厂任炼钢技术组长，1959年在甘肃省冶金局工作。1962年负责包钢公司钢厂工艺设计等，1981年后负责炼钢连铸设计软件开发，编写了Fortran77语言程序5万多行，其中转炉车间设计软件，1993年获第三届全国工程设计优秀软件二等奖；1995年连铸工艺设计软件经专家鉴定评为国内领先。另发表炼钢连铸专业及钢铁经济论文30余篇。

## 序

在我国实现工业现代化和发展钢铁业的进程中，优质而快速地做出先进的钢铁厂设计是重要的，没有现代化的设计就没有现代化的工业和现代化的社会。

十年前由原包头钢铁设计研究院贾凌云等同志开发的转炉—连铸的工艺设计程序，经原冶金工业部专家组鉴定通过，认为它是先进的，并已用于实际设计中。然而钢铁技术的发展突飞猛进，原软件有许多已不适应形势需要，因此，作者对原有软件经大量修改补充和完善，并可用于微型计算机上，使程序的质量得到了提高，使用更为方便。

由贾凌云同志编写的《转炉—连铸工艺设计与程序》一书，就现代钢厂的设计原则、数学模型和其程序软件的使用做了详尽阐述，相信它对今后搞好钢厂设计和提高我国钢厂生产技术水平将有很大帮助。

中国科学院院士，中国工程院院士  
原中国金属学会常务理事及炼钢学术委员会主任  
1992年被日本钢铁协会推选为名誉会员

邵象华

2004年9月26日

# 前 言

钢铁是经济建设和科学发展必不可少的基础材料。在 20 世纪，全世界钢的产量由 1900 年的 2850 万 t 上升到 2000 年的 8 亿多吨，产量增长 28 倍。进入 21 世纪以来，钢产量的增长势头虽然大为减缓，但许多发展中国家，尤其是我国，钢产量的增长趋势依然强劲，由于我国经济飞速发展的需要，相当长的时期内看不出钢产量会出现萎缩或锐减的征兆；当然我国的钢铁业虽然从 1996 年以来已成为世界第一钢产量大国，但改造和调整我国钢铁产品结构的任务还相当繁重，因此今后我国钢铁工业的发展和实现现代化，重点是大力改造老钢厂和重点增建现代化新钢厂。

设计在我国国民经济建设和社会发展中占有重要的地位和作用。在建设项目确定以前，它为项目决策提供科学依据；在建设项目确定以后，又为建设项目提供实施蓝图。建设工程勘察、设计的质量和水平的高低，对于建设项目的质量和投资效益起着决定性作用，同时也影响着我国的工业现代化水平，影响我国资源配置和生态环境建设水平，影响我国城市现代化和人民生活条件的提高等。

工程设计是将科研成果转化为现实生产力的重要步骤，工程设计采用工艺技术的科技含量，决定了所建设工程（工厂）的市场竞争力，没有现代化的设计就没有现代化的工业和现代化的社会。

钢铁企业设计必须依照 2000 年 9 月中华人民共和国国务院第 293 号令公布的《建设工程勘察设计管理条例》执行，以确保建设工程设计的质量，保护人民生命和财产安全。

《条例》第三条中提出：“建设工程勘察、设计应当与社会、经济发展水平相适应，做到经济效益、社会效益和环境效益相统一”；在第六条中又提出：“国家鼓励在建设工程勘察、设计活动中采用先进技术、先进工艺、先进设备、新型材料和现代管理方法”。

转炉炼钢连铸车间（钢厂）设计是综合性钢铁企业，即包括高炉转炉的钢铁企业设计的一个重要组成部分，有时它也可单独成为一个设计项目。

作为钢铁企业设计重要组成部分的转炉炼钢连铸车间，不但要大力提高设计质量，采用先进工艺技术，以节约投资，缩短工期，并保证投产后生产顺利进行，提高劳动生产率，取得满意的生产结果；并且要达到良好的环境保护水平。此外，设计采用现代管理方法，建立信息网络管理系统是重要的内容，并且积极采用计算机软件，进行设计内容所必需的各项计算、方案对比择优、设计文件内容的编制和绘图等，是提高设计质量和快速完成设计工作的关键手段。

为了有利于更新改造我国的许多老旧钢厂和重点建设一些现代化的新钢厂，在设计工作中采用设计计算程序解决许多繁杂的设计问题是必要的。有鉴于此，我国各钢铁设计研究院多年来都为开发设计程序做了不懈的努力，做出许多重大贡献，其中包头钢铁

设计研究院炼钢专业的贾凌云、高留治，计算机专业的马伯、周笙涛和赵喜悦等，采用 Fortran 77 语言，负责开发的氧气转炉及其车间的工艺设计程序和连铸机组辊列设计程序，于 1991 年和 1995 年分别经过由原冶金工业部组织的有北京钢铁设计研究总院、北京钢铁研究总院、重庆钢铁设计研究院、武汉钢铁设计研究院、首钢设计院、西安重型机械研究所、包头钢铁公司和包头钢铁学院等单位参加的专家组的鉴定（其中连铸机组辊列程序用数学模型经过原西安重型机械研究所李平总工的校审），评为国内领先，并随后在 1993 年和 1996 年分别被评为国家优秀设计软件二等奖和铜奖。后被广泛地使用在包头钢铁设计研究院等单位设计的转炉及连铸项目中，主要是高阶设计，部分也用于施工设计，对提高设计质量和速度发挥了重大作用。

科学技术的发展日新月异，钢铁工艺技术也在不断前进。在 20 世纪 90 年代开发的炼钢设计软件，许多已经不适应时代的需要，例如钢锭模浇注系统已基本为连铸机所取代；铁水预处理和钢水炉外精炼已普遍应用在炼钢生产中，组成了炼钢炉—炉外精炼—连铸机三位一体的优化流程；连铸机的拉坯速度已显著提高，由 5~6 台连铸机配合转炉的匹配关系已经改变。另外，在信息技术突飞猛进的今天，微型计算机的容量和速度成倍提高，以往在 VAX11 小型计算机上运行的炼钢及连铸工艺设计程序，已经落后于时代步伐。因此，在原设计程序用数学模型的基础上，根据炼钢连铸技术的进步，对原软件取其精华，去其糟粕，并大量引入新的技术成就，重新整理和补充编写新的炼钢和连铸工艺设计程序是完全必要的。因此，从 1998 年起，贾凌云同志利用退休赋闲的时间，在包头退休的高级工程师李培信和晋铸同志的热情帮助下，进行了这一工作，新编写的程序业已脱胎换骨，与原程序软件相比，主要的改变有以下几方面：

- (1) 采用微型计算机作程序软件的运行计算机；
- (2) 取消了原程序中的钢锭模浇注系统和小转炉的设计部分；
- (3) 增加了转炉装料尺寸优化和铁水包尺寸程序；
- (4) 增加了铁水预处理和钢水炉外精炼设施部分的程序；
- (5) 连铸机组辊列设计中加入中薄板坯的辊列和高拉速的影响；
- (6) 增加了专用铁水包的倾翻力矩计算程序部分；
- (7) 更新了转炉物料和热平衡计算程序部分；
- (8) 炼钢连铸技术经济指标计算的更新等。

经过重新编写和彻底修改补充的新氧气转炉及其车间的工艺设计程序和连铸机组辊列设计程序，已与原程序大不相同。原程序为 LD02、LD03 和 CAST 三个子程序，新程序增加为 LD20、HMPOT、SLAB、BLOOM、LDMh 和 Plant 六个子程序，它既包括了原有软件的精华部分，又增加了许多新的功能，将能更好地适应时代发展的需要。

为了便于使用转炉炼钢和连铸工艺设计程序以提高工作效率，本书采用通俗易懂的语言，介绍了炼钢和连铸工艺设计程序编制的数学模型原则和基础内容，并且列出程序软件的用户说明。

考虑到炼钢连铸工艺飞速的进步，必须不断地对程序进行修改补充，其中炼钢技术经济的费用成本计算，包括原材料和能源价格，还有设备和基建投资价格水平，几乎是一个变化莫测的问题，全部采用输入法又太繁琐，我们以 1998 年价格水平为基准，乘物

价系数来计算,在较短时间内误差尚小,时间较长或为了计算较准确,修改程序软件的价格数组是必要的;其次在数学模型中只能列出关键的和主要的数学模型,大量的许多细小和一般的计算式,也没有必要和很难一一列出,因此我们将转炉连铸车间设计的全部源程序予以列出,以便较完整地了解转炉连铸的工艺设计的内容。在计算机和程序已大为普及的今天,读者只要了解一点程序语言,读起来并不费劲,将能更好地了解转炉连铸的工艺设计。

源程序以 Fortran 77 为基础,个别数学公式采用现成程序,它们有的是 Fortran 4;还有为便于阅读,在程序行后采用了 Fortran 90 的注释。应该说明,在实际编制过程中,尽管微型机的内存一般已达 16MB 以上,而常规内存却只有 1MB,往往出现内存溢出和堆栈不够等问题,使程序通不过,造成大量的时间耗费在程序的编译上,因此多次修改补充和改变段落结构方式,一切以程序通过为目标,这样最后的程序显得臃肿重复,七拼八凑,不够流畅简练。如果重新整理,缩短 1/4 的程序内容是可能的,所以从 Fortran 语言程序的水平来看,它并不是满意的,更不能作为样板和典范。只是在软件运行结果上尚属满意,限于时间,完善语言格式只能有待未来完成了。

对于有兴趣继续开发和完善转炉连铸工艺设计程序软件的读者,本书所附的源程序是可以借鉴的,它可以作为开发和完善转炉连铸工艺设计程序软件的平台和出发点,当然也可以大胆地突破既有程序的框框。另外,对源程序的疑难之处,我们还将尽力解释,并欢迎合作;但也应说明,如果没有对源程序做全面细致的了解和分析,想简单地利用源程序编制运行程序,可能不会很顺利,更不能保证计算结果完全正确。这里,对于有志继续开发转炉—连铸工艺设计程序软件的人员,如需要了解程序的细节和现成的运行软件,可与作者联系(电话:0472—2113125;地址:包头市昆区钢 24 街坊 22 栋 22 号,邮编:014010)。

由于水平所限,书中疏忽遗漏之处,欢迎读者批评指教,希望本书能抛砖引玉,为提高我国炼钢—连铸工艺设计水平发挥作用。

编 者

2005 年 1 月



# 目 录

<b>1 钢铁工业的发展和氧气转炉炼钢</b> .....	1
1.1 炼钢工艺的主要进步 .....	2
1.2 钢铁生产中全连续流程的形成和特征 .....	2
1.2.1 钢的全连续流程的主要前提条件 .....	2
1.2.2 钢的全连续流程的特征 .....	3
1.3 钢的全连续流程类型 .....	4
1.4 钢的全连续流程结构在主要产钢国的进展 .....	5
参考文献 .....	6
<b>2 现代转炉炼钢连铸车间的特征</b> .....	7
<b>3 设计的目标和依据</b> .....	9
3.1 设计的前期工作阶段 .....	9
3.2 设计的程序步骤 .....	9
3.3 设计的依据 .....	10
3.4 设计的目标 .....	10
<b>4 设计程序软件的编制目的、组成和特点</b> .....	11
<b>5 氧气转炉炉体的工艺设计及其程序</b> .....	14
5.1 氧气转炉炉体 .....	14
5.1.1 氧气转炉炉体概述 .....	14
5.1.2 转炉炉型参数的确定 .....	15
5.1.3 转炉炉型尺寸数据的计算 .....	20
5.2 转炉的倾动力矩和最佳耳轴位置 .....	28
5.2.1 转炉倾动力矩的类型和特点 .....	28
5.2.2 转炉内液体(钢水)重心的计算 .....	29
5.2.3 转炉的最佳耳轴位置 .....	50
5.2.4 转炉倾动力矩计算中的几个注意点 .....	50
5.2.5 转炉传动用电动机容量的确定 .....	53
5.3 转炉氧枪喷头的设计 .....	55
5.3.1 喷嘴氧气参数的选择和喷孔数的确定 .....	57
5.3.2 单个喷嘴尺寸的计算 .....	58
5.3.3 多孔喷头结构尺寸参数的确定 .....	61
5.3.4 吹氧喷头的射流特性和对熔池的冲击坑 .....	66
5.4 转炉的位置和装料用具 .....	74
5.4.1 转炉的横向位置 .....	74
5.4.2 铁水包尺寸参数的确定 .....	78
5.4.3 装料废钢槽尺寸参数的确定 .....	79
5.5 转炉的炉形、倾转力矩、氧枪喷头和装料尺寸设计软件用法简介 .....	81
5.5.1 软件的目的和用途 .....	81
5.5.2 软件的优点 .....	81
5.5.3 使用的前提准备 .....	82
5.5.4 程序运行 .....	82
5.5.5 输出数据的表示 .....	82
5.5.6 输出文件及数据的补充说明 .....	83
5.6 氧气顶吹转炉炉型、倾动	

力矩、装料尺寸及氧枪喷头的计算结果实例 .....	84	布置设计 .....	288
5.7 算法2 250t 转炉 .....	121	6.4.1 矩形坯连铸机的基本半径和机长 .....	289
5.8 转炉炉型、倾动力矩、氧枪喷头和装料尺寸设计程序 (Bof20. for, Hmpot. for) .....	128	6.4.2 密排导辊段的确定 .....	290
参考文献 .....	267	6.4.3 矫直段主要参数的确定 .....	291
<b>6 连铸机组工艺设计和程序 .....</b>	<b>268</b>	6.4.4 基本弧形段和水平段 .....	291
6.1 连铸工艺的发展和主要新技术 ..	268	6.4.5 矩形坯连铸机组的二次冷却制度 .....	292
6.2 连铸机组基本参数的选择和确定 .....	273	6.5 板坯连铸机组设计软件使用说明及实例 .....	293
6.2.1 铸坯的断面尺寸规格 .....	273	6.5.1 程序功能和用途 .....	293
6.2.2 拉坯速度 ( $V_0$ ) .....	275	6.5.2 程序特点 .....	293
6.2.3 铸机的冶金长度和主机长度 .....	278	6.5.3 程序适用条件 .....	294
6.2.4 连铸机组的机型和基本弧半径 .....	278	6.5.4 上机前的准备工作 .....	294
6.2.5 结晶器的内形尺寸和锥度 ..	279	6.5.5 连铸程序的上机操作 .....	294
6.2.6 结晶器振动参数的选择 .....	280	6.5.6 输入文件的建立 .....	294
6.3 板坯连铸机组的辊列布置设计 ..	280	6.5.7 打印结果说明: (Slab. dat 文件) .....	299
6.3.1 连铸机组的每一扇形段的导辊对数和辊缝 .....	281	6.5.8 板坯连铸机的程序绘图 (此为原 VAX 机所用, 微型机绘图待开发) .....	300
6.3.2 连铸机组的弯曲与矫直段 ..	281	6.5.9 计算实例 (2 型板坯连铸机组的输出数据) .....	300
6.3.3 连铸机组的足辊和矫直辊直径 .....	282	<b>6.6 矩形坯连铸机组辊列程序的使用说明及实例 .....</b>	<b>330</b>
6.3.4 弯曲矫直半径及夹角的确定 .....	282	6.6.1 程序的功能和用途 .....	330
6.3.5 连铸机基本弧段的导辊对数、导辊直径及扇形机架数的确定 .....	283	6.6.2 程序输出的主要内容 .....	331
6.3.6 水平机架段的计算 .....	284	6.6.3 输入文件的准备 .....	331
6.3.7 板坯连铸机组的驱动辊数及二次冷却制度的确定 .....	284	6.6.4 上机前的准备 .....	334
6.3.8 关于板坯方坯两用连铸机组 .....	285	6.6.5 大方坯连铸机组计算程序的上机操作 .....	334
6.3.9 板坯连铸机组拉坯力学性能的校算 .....	285	6.6.6 有关几点说明 .....	335
6.4 方矩形坯连铸机组的辊列		6.6.7 矩形坯连铸机组辊列计算输出实例 (Bloom. dat) .....	335
		6.6.8 绘图数据的输出实例 (Bloom. CAD) .....	354
		<b>6.7 板坯及矩形坯连铸机组辊列设计源程序——(Fortran77 语言) .....</b>	<b>363</b>
		6.7.1 板坯连铸机组辊列设计程序	

(Slab. for) .....	363	计算软件源程序——	
6.7.2 大方坯连铸机组辊列设计		LDmh. for .....	612
程序——(Bloom. for) ...	471	参考文献 .....	662
参考文献 .....	552		
<b>7 转炉炼钢连铸车间的物料、热平衡</b>		<b>8 转炉炼钢连铸厂的主要技术经济</b>	
<b>    计算及程序 .....</b>	<b>553</b>	<b>    指标和厂房组成及主要尺寸程序 ...</b>	<b>663</b>
7.1 转炉炼钢用铁合金配料计算 .....	554	8.1 转炉炼钢连铸厂的主要技术	
7.1.1 脱氧和合金化时元素		经济指标计算 .....	663
的收得率 .....	554	8.1.1 钢生产的产品大纲 .....	663
7.1.2 转炉铁合金用量的计算 .....	555	8.1.2 主要生产设备的数量	
7.1.3 铁合金加入后对钢水温度、		和特性 .....	663
钢水量和渣量的影响 .....	557	8.1.3 转炉炼钢的生产指标 .....	663
7.2 转炉冶炼的物料平衡与热平衡		8.1.4 主要原材料和能源的消耗	
计算 .....	558	指标 .....	666
7.2.1 转炉冶炼所使用的物料		8.1.5 厂房各跨间的主要尺寸	
种类、成分和性能 .....	558	和建筑面积 .....	667
7.2.2 转炉装入钢铁料的数量		8.1.6 主要工艺设备项目表 .....	668
和平均成分 .....	559	8.1.7 主要产品的设计成本和	
7.2.3 转炉冶炼终点的钢水温度 ...	560	钢厂的投资费用 .....	668
7.2.4 金属炉料成分在氧化时的		8.2 厂房的主要类型的选择和组成 ...	668
需氧量和反应产物量 .....	560	8.2.1 现代转炉连铸车间的	
7.2.5 转炉冶炼过程中的成渣量 .....	561	布置特征 .....	668
7.2.6 转炉冶炼的热收入计算 .....	564	8.2.2 现代转炉连铸车间的	
7.2.7 转炉冶炼的热支出计算 .....	564	各跨间组成 .....	669
7.2.8 转炉冶炼的供氧计算和烟气		8.2.3 铁水供应和铁水处理 .....	670
指标的计算 .....	565	8.2.4 废钢的应用 .....	673
7.2.9 转炉冶炼的钢水量计算 .....	565	8.2.5 炉渣运送 .....	673
7.3 转炉冶炼的物料平衡和热平衡		8.2.6 转炉跨操作 .....	674
计算程序的使用说明和		8.2.7 炉外精炼处理 .....	677
计算实例 .....	566	8.2.8 连铸各跨间 .....	677
7.3.1 转炉冶炼的物料平衡和热		8.3 转炉连铸厂房主要平面尺寸	
平衡计算软件的使用说明 ...	566	设计计算 .....	679
7.3.2 转炉冶炼的物料平衡和热平衡		8.3.1 转炉连铸厂房各跨间柱距	
计算软件计算结果实例1 .....	569	和跨度的确定 .....	679
7.3.3 转炉冶炼的物料平衡和热平衡		8.3.2 转炉跨 .....	680
计算软件计算结果实例2 .....	577	8.3.3 装料跨 .....	681
7.4 转炉冶炼的物料平衡和热平衡		8.3.4 炉外精炼处理跨 .....	682
		8.3.5 连铸跨 .....	684
		8.3.6 连铸出坯跨 .....	686

---

8.3.7 连铸精整跨 .....	688	8.5.2 转炉连铸厂设计程序 的计算实例 .....	702
8.4 转炉连铸厂房主要剖面尺寸 设计及计算 .....	689	8.6 转炉连铸钢厂设计计算 程序 (Plant. for) .....	721
8.4.1 转炉跨的横剖面 .....	689	参考文献 .....	885
8.4.2 炉外精炼处理跨的横剖面 ..	692	<b>附 录</b>	
8.4.3 连铸机跨的横剖面 .....	693	附录 1 .....	886
8.4.4 转炉连铸厂各跨吊车剖面 有关尺寸 .....	697	附录 2 .....	888
8.5 转炉连铸厂设计程序的使用 说明和计算实例 .....	698	附录 3 .....	894
8.5.1 转炉连铸厂设计程序 的使用说明 .....	698	附录 4 .....	899
		附录 5 .....	904
		附录 6 .....	908

# 钢铁工业的发展和氧气转炉炼钢

钢铁在现在以及今后相当长一段时期内，仍然是人类社会经济建设和科技发展必不可少的基础材料，是一个国家经济强盛的重要指标。从世界钢的总产量来看，1900年为2850万t，到1950年达到18930万t，2000年达到8.23亿t，百年来钢产量增加28倍。21世纪以来，世界钢产量的增加速度虽然有所减缓，但据权威专家预测，钢产量将继续增加并达到10亿t以上；我国的钢产量的增加速度更快，已从1950年的60.6万t上升到

2004年的2.72亿t，钢产量居世界第一位，五十年内产量增加448倍。但是从人均钢产量来分析，2004年为209kg/人，尚不足发达国家的1/2。近几年来，虽然我国钢产量增长速度很快，但要达到美国、日本和西欧工业发达国家人均350~450kg的水平，即要实现我国现代化的水平，尚需经过相当长的时间。因此，21世纪，世界尤其是我国，钢产量仍将不断增长。世界主要钢生产国的生产情况见表1-1。

表 1-1 世界主要钢生产国的生产情况

国 别	钢 产 量	年 代			
		1950 年	1980 年	1990 年	2000 年 <sup>③</sup>
美 国	钢总产量/万 t	8784.8	10379	8890	10099
	其中：平炉钢/%	89.07	11.41	3.6	0
	电炉钢/%	6.23	29.49	36.8	47.0
	氧转炉钢/%		48.22	59.1	53.0
	连铸钢/%	0	20.32	67.4	96.4
日 本	钢总产量/万 t	529.8	11139.5	11030	10644
	其中：平炉钢/%	80.66	0	0	0
	电炉钢/%	15.65	24.46	31.4	28.81
	氧转炉钢/%	①②	75.54	68.6	71.19
	连铸钢/%	0	59.49	95.2	97.3
德、法、意、英	钢总产量/万 t	422.3	10479.2	10070	10898
	其中：平炉钢/%		3.43	0	0
	电炉钢/%		27.53	31.27	39.5
	氧转炉钢/%	①	约60	68.73	60.5
	连铸钢/%	约0	约41.8	93.64	约96
中 国	钢总产量/万 t	60.6	3712.1	6635	12579
	其中：平炉钢/%	85.25	32.04	19.77	1.5
	电炉钢/%	12.29	19.14	21.13	约24
	氧转炉钢/%	②	48.74	58.91	约58
	连铸钢/%	0	6.2	22.32	83.4
世 界	钢总产量/万 t	18990	71690	77022	82847
	其中：连铸钢/%	0	29.9	59.6	86.0

①、②部分空气转炉钢等未计入，因此总数小于100%；③2003年、2004年中国钢产量分别为2.201亿t和2.72亿t。

## 1.1 炼钢工艺的主要进步

钢铁产业工业化生产百余年来产量不断增加,这并不是利用老工艺和老设备周而复始地重复生产和扩大再生产,而是在激烈的竞争中,各钢铁企业通过生产工艺和生产设备的更新改造取得的。当然这也包括了采用现代信息技术,因而增加了经济效益,扩大了品种,提高了质量,降低了成本和改善了环境等。其中钢纯度的提高,如超低碳钢和IF钢等,硫和磷的含量,均已低于0.005%。20世纪后半叶,炼钢工艺与设备等有如下主要变革:

(1) 炼钢工艺的三大变革:氧气转炉取代平炉、连铸取代模铸和钢水处理技术的普遍采用。1950年以前,平炉是产钢的主力军,占世界钢产量的80%以上。自20世纪50年代出现氧气转炉后,到1985年转炉钢已占56.2%;到2000年平炉钢已降低到5%左右,即将退出炼钢的历史舞台;1970年以前冶炼的钢水基本是模铸成钢锭,然后轧制成材,世界钢的连铸比仅占4.5%;到1995年已达75.5%,其中发达国家的连铸化业已完成;在钢水处理上,1975年以前只用于少量优质钢,1990年以后,发达国家已作为钢生产流程的必要环节,形成炼钢炉—炉外处理—连铸机三位一体的新炼钢流程了。

(2) 炼钢主体设备的大型化。转炉和电炉均通过新建、大修改造和停小建大使设备大型化,如美国、日本和西欧等发达国家,转炉的平均容量均由1980年的170~180t提高到1995年的约200t;电炉的平均容量均由1980年的50~60t提高到1995年的70~90t,其中日本福山钢厂已关闭170t×3转炉,只留250t及300t大转炉生产。

(3) 电炉短流程钢厂的出现和快速发展。电炉采用超高功率(约1000kV·A/t)、直流、交换双壳和LF精炼等技术,使电炉冶炼周期缩短到50~60min,适应了连铸机进行连浇作业,提高了效率,如美国纽克一厂首先采用德国SMS公司开发的CSP薄板坯连铸连轧线。取

得成功,因此各国纷纷形成兴建薄板坯连铸连轧线。目前世界已投产和在建的薄板坯连铸连轧线达30余家,包括我国珠江钢厂的生产线已在2002年投产。另外,配中薄板坯和大方坯连铸机的电炉短流程钢厂,亦已出现,形成新的高效益钢生产厂。

(4) 炼钢连铸生产中新技术的采用。如转炉的废煤气回收许多钢厂已达每吨100m<sup>3</sup>以上,使能耗大为降低;转炉的溅渣护炉使炉龄成倍延长;连铸机采用细密多节辊、多点弯曲矫直、气水雾化冷却和轻压下技术等,大大提高了连铸坯质量和拉速,尤其信息技术应用在炼钢连铸生产中,实现过程控制和CIM全盘自动化,显著提高了生产效率。

## 1.2 钢铁生产中全连续流程的形成和特征

### 1.2.1 钢的全连续流程的主要前提条件

钢的全连续流程是20世纪后期初步形成的第二个重大的变革,是当今钢铁工艺发展的方向,包括高炉、转炉(无高炉的钢厂为电炉)、连铸机、热连轧机和冷轧机,这5个主要生产设备以1—1—1—1配合的一条龙连续流水线,关键是其中的炼钢炉、连铸机和热连轧机3个环节,主要前提条件有:

(1) 连铸机的拉坯速度应达到使1流(最多2流)连铸机的浇铸周期与炼钢炉的冶炼周期相一致,如转炉的冶炼周期为35min,则连铸机的浇铸周期也能在35min左右,这样就可形成炼钢炉—连铸机—热连轧机三者的1—1—1配合。过去由多台多流连铸机与炼钢炉及轧机的匹配时,不但炼钢厂调度复杂、互相等待,轧钢厂也只能对铸坯重新排队入炉送轧,延长时间,造成温度损失;所以高拉坯速度的连铸机是这一流程的必要条件,这种连铸机一般都采用900~1200mm的长结晶器,配有电磁制动和液压非正弦振动系统,板坯连铸机用多点弯矫和细密多节辊,动态汽水二冷控制,轻压下技术和机组具有相应的冶金长度等。

(2) 热连轧机轧制连铸坯的规格应基本固

定,如热带连轧机过去有梯形轧制周期,在每一周期内(4h左右),供轧铸坯要先宽后窄,幅度相差成倍,如1500mm可变为750mm,连铸机虽有调宽功能,但浇铸周期将延长一倍,使炼钢炉和连铸机的生产节奏被打乱,并且也影响到钢的质量。因此,许多轧机进行现代化改造,精轧机采用CVC、PC技术或6辊式,使梯形周期变为自由轧制周期;粗轧机架增强立轧能力或采用连锻减宽机,使铸坯的变宽主要由粗轧机解决。当然连铸机也可生产不同断面,如板坯连铸机二流,一为1200~1400mm,另一为800~1000mm,总宽保持基本不变。

(3) 连铸坯要经辊道线直送轧钢机,并且距离愈近愈好,并能采用隧道炉,这就是连铸直轧式(CC-DR或HDR)。这样按照公司及轧钢厂的计划,炼钢炉及连铸机按钢种及规格,逐块依次将连铸坯送轧钢厂加热和轧制成材。有的钢厂因连铸厂房距轧机较远,采用将连铸坯装车热送轧钢厂的办(即HCR),也可达到节能和提高效率,但相比要差得多,并且铸坯的炉号和坯号要打乱,先装车的压在下部,后装车的则先卸先入炉先送轧,否则要重新排队编组,耽误时间,操作也麻烦。

### 1.2.2 钢的全连续流程的特征

钢的全连续流程具有以下优点:

(1) 增加了生产效率。从连铸机起到热轧成材的生产周期,由约30h缩短到20~40min,如果包括冷轧和连续退火在内,生产周期则从约20天缩短到2~3天。

(2) 提高了钢产品质量。由于全连续流程中设有铁水预处理(有高炉时)和钢水炉外精炼,可使钢质超纯化,连浇各炉钢水成分波动小,硫磷含量均可小于0.005%,可生产含氧很低的超低碳深冲钢等( $w(C) < 0.005\%$ )。另外,高速连铸机配备着结晶器电磁制动、非正弦液压振动、动态气水二冷控制和轻压下技术等利于提高铸坯质量,还有铸坯在传送作业过程中不进行降温变冷,能避免产生冷却裂纹等缺陷。

(3) 降低了能耗和成本,尤其能减少对环境的污染。由于全连续流程是热流程,省去半成品中间装卸倒运存放操作,周期短,资金周转快,因此能耗和成本均低。根据西欧工业发达国家的数[1],各种带钢生产方法的热耗见表1-2。由于热耗减少,产生的CO<sub>2</sub>也相应减少。

表 1-2 各种带钢生产方法的热耗

生产方法	浇厚/mm	注速/m·min <sup>-1</sup>	浇注温度/℃	能 耗 /MJ·t <sup>-1</sup>			
				0	500	1000	1500
带钢连续铸轧	2~3	40~50					
薄板坯连铸连轧	70	4	1100				
直接轧制(HDR)	210	3	1000				
直接热装(HCR)	210	2	750				
铸坯温装(Warm CR)	210	1.5	500				
铸坯冷装(Cold CR)	210	1.5	20				

注:上表中浅色条块指燃料消耗,黑色条块指电耗。

在表1-2中,前2项即带钢连续铸轧和薄板坯连铸连轧线,均属于钢的全连续流程,其燃料消耗是相当低的;第3项即铸坯直接轧制(HDR)也基本上属于钢的全连续流程,但由于其铸坯厚度为210mm,轧制为

中厚板钢板是需要的,如果轧制薄板,则显得不够合理。因此,许多钢厂将铸坯厚度减为100~150mm,热连轧线的粗轧机架也减少为1~2架,这样其燃料消耗和电耗还可降低。

### 1.3 钢的全连续流程类型

钢的全连续流程的类型主要有以下几种：

(1) 与大型转炉 (200 ~ 300t) 生产规模匹配的板钢产品生产线。每条线的生产能力达 300 ~ 600 万 t, 这一类型又分两种: 一是较理想的炼钢厂与轧钢厂直接毗邻, 热铸坯经辊道线直送轧钢厂, 如韩国的光阳 1 号, 2 号钢厂和我国的宝钢 2 号钢厂, 日本的大分厂和室兰厂等; 二是兴建与轧钢厂相毗邻的连铸车间, 使热铸坯经辊道线直送轧钢厂, 而钢水则经全封闭的专用钢包运输线, 由炼

钢厂运到连铸厂, 如采用铁路专线的有日本的鹿岛厂, 堺厂 (现已停) 和我国的鞍钢 3 号钢厂; 采用专用传送车的有日本的福山厂 3 号钢厂<sup>[2]</sup>。

(2) 与中型炼钢炉 (转炉或电炉) 生产规模匹配的板钢产品生产线。每条线的生产能力达 100 ~ 250 万 t, 这首先是在 1989 年由美国纽克钢厂兴建的薄板坯连铸连轧生产线, 其后接踵而来, 仅美国就增加 10 多家, 起初是属于短流程钢厂的电炉供钢水, 后来又推广到综合钢厂的转炉上, 如我国的包钢 2 号厂和邯郸钢厂, 见表 1-3。

表 1-3 我国已采用薄板坯连铸连轧线的钢厂

工 厂	投产时间	炼钢炉	连铸机型	铸坯宽及厚 /mm × mm	连铸年能力 /t	加热炉	连轧机	产品尺寸 /mm
珠江钢厂	1998 年 11 月	电炉 150t × 1 (2)	CSP-1 × 2	50 × (950 ~ 1350)	80 (200)	辊底式 191.8m	精轧 6	1.27 ~ 12.7
邯钢公司	1999 年 12 月	转炉 120t × 2 (3)	CSP-1 × 2	(50 ~ 70) × (980 ~ 1560)	123 (246)	辊底式 191.8m	粗轧 1 精轧 6	1.2 ~ 20
包钢公司	2001 年 4 月	转炉 210t × 2	CSP-2 × 1	70 × (900 ~ 1680)	200	辊底式 200.8m	精轧 6	1.2 ~ 20
唐钢公司	2002 年 12 月	转炉 150t × 2 (3)	FTSC-1	(65, 70, 90) × (850 ~ 1680)	130 (250)	辊底式 187m	粗轧 1 精轧 5	0.8 ~ 6
马鞍山钢铁公司	2003 年 12 月	转炉 100t × 2	CSP-2	(65, 70, 90) × (900 ~ 1600)	220	辊底式 270m	精轧 7	0.8 ~ 8
涟源钢铁公司	2004 年 3 月	转炉 100t × 2 (3)	CSP-1	(55, 70) × (900 ~ 1600)	130 (200)	辊底式 291m	精轧 7	0.8 ~ 12.7
鞍钢公司	2000 年 7 月	转炉 100t × 2 (3)	CONROLL-1	(100, 135, 150) × (900 ~ 1620)	100 (200)	步进炉	粗轧 1 精轧 6	1.0 ~ 8
安阳钢铁公司	2003 年	转炉 100t × 2	Daniele	150 × (1600 ~ 3250)	110	步进炉	Steckel	4.5 ~ 50

薄板坯连铸的工艺也由采用漏斗结晶器的 CSP 型增加了 ISP 和 TSR 型等, 并且也增加了中薄板坯连铸, 铸坯厚度为 100 ~ 150mm, 这样就扩大了薄板产品的厚度范围, 降低了薄板和中薄板产品的成本。如美国蒙皮立钢厂, 投资 4 亿美元于 1997 年 11 月建成能力 125 万 t 生产线。这条生产线由 1 座 150tDC 电炉配 1 台 R=6.67m 的弧形连铸机, 浇铸厚 127 ~ 152mm

和宽 1220 ~ 3050mm 的铸坯, 浇铸周期 30 ~ 55min, 经步进炉加热后, 由 1 架 Steckel 轧机轧为 2 ~ 19mm 的薄板或 5 ~ 50mm 的中板<sup>[3]</sup>。

(3) 与中型炼钢炉生产规模匹配的长钢产品生产线。每条线的生产能力为 100 ~ 200 万 t。如意大利乌迪内钢厂在 2000 年 8 月投产了由丹尼利公司供货的能力 100 万 t 的棒材生产线, 钢水由电炉供应, 连铸机为渐进式多段弯



曲型,基本弧半径 $R=9\text{m}$ ,结晶器长 $1200\text{mm}$ ,铸坯断面 $160\text{mm}\times 200\text{mm}$ ,双流,拉坯速度对碳钢为 $6.0\sim 6.5\text{m/min}$ ,经辊道式隧道炉加热后,进入17架连轧机轧制,然后经淬火—快速冷却线,冷床,在线喷丸站和切割机等完成。产品为 $\phi 20\sim 100\text{mm}$ 棒材和 $\phi 15\sim 50\text{mm}$ 卷材,钢种包括碳钢、弹簧钢、淬火回火钢等,这一高速拉坯的方坯连铸机,并采用隧道炉加热均温即连续轧制成材的流水线,还是较为新颖的<sup>[4]</sup>,大有推广价值。

(4)与小型炼钢炉生产规模相匹配的带产品生产线,每条线生产能力 $30\sim 50\text{万t}$ ,这就是以双辊式为代表的带钢连续铸轧生产线,双辊直径为 $500\sim 1500\text{mm}$ ,浇注带钢厚度 $1.4\sim 4\text{mm}$ ,宽度 $900\sim 1450\text{mm}$ ,浇铸速度为 $30\sim 100\text{m/min}$ ,可生产不锈钢和碳钢。它已在日本新日铁公司和德国克虏伯公司等工业试验成功,进入推广阶段。

## 1.4 钢的全连续流程结构在主要产钢国的进展

日本的钢生产从1966年以来通过新建8个 $600\sim 1000\text{万t}$ 级的大型钢厂,即新建大分、室兰、君津、名古屋、福山、扇岛、鹿岛、加古川等,又改建了八幡、千叶及和歌山等3个厂,使钢的年产能力在十年内由 $5000\text{万t}$ 增到 $1\text{亿t}$ 左右,厂房和设备较新,多数采用半连铸,其中大分厂为第一个全连续铸钢厂(1971年),1980年连铸比为 $60\%$ 。后来在增设炉外精炼以大力提高质量和对连铸机改造中,逐步实现连铸坯的热装及直接轧制,使其转炉的采用全连续流程的钢厂较多(有8个),并由于它多为大钢厂和薄板产品,而电炉钢厂主要生产特殊钢,特钢比约为 $20\%$ ,大同钢公司主要生产不锈钢等,山阳钢厂年产铬轴承钢约 $100\text{万t}$ ,整个钢的生产能力亦已过剩,这可能是它没有再建短流程薄板坯连铸连轧线的原因。

美国从1950年以来钢产量一直保持在 $1\text{亿t}$ 左右,在炼钢工艺的三大变革中,大都为旧厂改造,拆平炉建转炉,浇钢系统以模铸为主,

到1980年连铸比仅 $20.3\%$ ,这样就给第二步的全连续流程变革带来困难,实现转炉全连续流程的钢厂据了解只有克里夫兰钢厂一家。但由于美国多年钢生产水平在 $1\text{亿t}$ ,废旧钢制品甚多,所以大力发展电炉炼钢,兴建短流程的薄板坯连铸连轧厂相当有利,电炉钢的比重因此约提高到 $42\%$ ,转炉钢厂已有 $1/4$ 关闭,预计未来电炉钢有可能增加到约 $50\%$ ,但由于废钢中含铜等较多( $0.3\%\sim 0.4\%$ ),不适用于生产超低碳深冲钢( $w(\text{Cu})<0.1\%$ )。近年来年进口钢材在 $3000\text{万t}$ 左右,而转炉的全连续流程,尤其采用辊道流水线有诸多困难,老旧的厂址布局已成定局,尤其炼钢与轧钢之间,多为庞大的模铸系统,地上铁路纵横,地下管线交错,增建全连续流程,即使科技发达,信息技术领先,也无济于事,何况又受庞大的医疗保险和退休金困扰,美国5大钢铁公司,除以电炉短流程薄板连铸连轧厂为主的纽柯公司外,美国钢公司、伯利恒公司、LTV公司和国家公司已连续 $2\sim 4$ 年亏损,看来短期内想彻底扭转转炉钢厂的困境是较难的。

西欧以德、法、英、意为主。几十年来西欧各国钢产量的增加靠新建钢厂与改造老厂各居一半,经过淘汰平炉和托马斯转炉,以及增建连铸机,这一变革速度虽较日本稍慢,但要比美国为快,它们也是在稳定钢总产量基础上,通过推广全连续流程等提高钢质量和增加生产效率。德国布鲁克豪森厂是利用旧厂房建成热铸坯直送,其他多为铸坯装车热送。由于炼钢连铸厂房距轧钢厂较近,如法国敦刻尔克和福斯钢厂,英国斯康索普和德国莱茵豪森钢厂等,铸坯温度约为 $800\text{℃}$ ;电炉钢的短流程薄板坯连铸连轧厂也建了一些,如意大利克瑞莫纳厂,另外,前述的意大利乌迪内厂的矩坯连铸连轧线是带首创性的。

因此在未来的炼钢连铸生产中,必然更加不断的创新和进一步现代化,电炉短流程钢厂由于投资少建设快和效益高等,必将快速发展。美国和西欧等发达国家,电炉钢的比重在2000年前已达约 $40\%$ ,这主要是几十年来,他们的钢产量一直稳定在同一水平,而废旧的