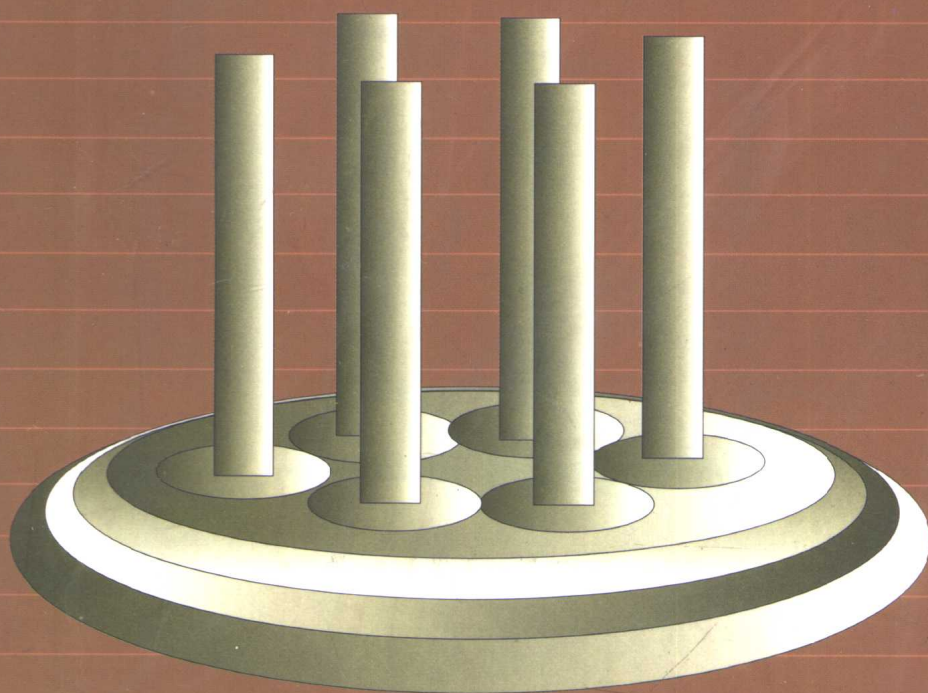


钢材生产集约化进展

李士琦 主编



.31

科学出版社

钢材生产集约化进展

李士琦 主编

科学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍我国钢材生产集约化的最新进展。本书精选 27 篇论文,分别阐述炼钢、连铸、轧钢等新工艺、新设备,并探讨了工序的衔接和系统(流程)的优化工程。

本书可供钢铁生产、设计、科研及管理的工程技术人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢材生产集约化进展/李士琦主编. -北京:科学出版社,1999

ISBN 7-03-007319-3

I. 钢… II. 李… III. 钢铁工业-工业企业-集约经营-中国
IV. F426.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999) 第 03834 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 10 月第 一 版 开本:787 × 1092 1/16

1999 年 10 月第一次印刷 印张:9 1/2

印数:1—1 000 字数:213 000

定价:19.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

《钢材生产集约化进展》编辑委员会

主 编：李士琦

副 主 编：蔡开科 贺毓辛 潘 伟

编 委：曲 英 屠宝洪 茹 铮

韩静涛 童朝南 赵玉祥

施东成 薛 凌 邓海金

岳满堂 张芝香 赵承平

林 芃 王成喜

责任编辑：王成喜

前 言

中国的钢铁工业已有 100 多年的历史,新中国成立以后才有真正的发展。特别是改革开放以来的 20 年,我国年产钢量以平均 6.7% 的速率持续高速递增。1996 年以后,钢的年产量超过 1 亿吨,铁、钢、材均居世界第一位,预计中国是世界第一钢铁大国的地位仍将保持多年。

当前,国内外钢铁工业均处于急剧的深化发展中,科技含量加大、调整结构、优化流程、提高效率、改善质量、降低成本、增加效益是全世界钢铁工业发展的总趋势。其中钢材生产的集约化将是今后 10~20 年中普遍关心的课题。

本书精选 27 篇论文,以钢材生产集约化进展为命题,专业领域涉及到炼钢、连铸、轧钢等主流程工序,也包括机电装备、自控等,特别是对工序的衔接和匹配,以及高附加值材料的生产流程进行了深入研究和探讨。论文作者平均年龄不到 35 岁,都是活跃在钢铁行业科技第一线的优秀的工程技术骨干,所撰写的论文是他们在生产、科研、工程中亲身实践的研究总结和体会。每篇论文都聘请了资深的学者和专家予以评阅、修改和润色,因而本书在学术上具有以下三个特点:

- (1) 先进性:首次集中地反映了钢铁工业中钢材生产集约化的新动向;
- (2) 实践性:绝大多数论文来自于我国钢材生产、设计、科研第一线实际工作;
- (3) 趋向性:通过理论分析和实践经验,说明了钢材生产集约化的优势,指出了企业结构优化可能遇到的问题和可以采取的对策及理论依据。

本书的出版,应该感谢论文的作者们的追求和努力;感谢中国金属学会的倡导、支持,尤其是薛凌女士不懈的辛勤努力;感谢编辑的精心编辑和加工;感谢作者所在单位的热情支持;感谢科学出版社的支持和帮助。

本书是中国金属学会举办的第二期“连铸连轧高级研修班”的成果之一,衷心希望本书的出版能对中国钢铁工业的深化发展,对钢材生产集约化的进程有积极的推动作用。

李士琦

1999 年元月于北京

目 录

宝钢板坯连铸高效化	阮晓明(1)
小电炉钢厂高连铸比的实践与思考	廖卫团(6)
数学模型在板坯连铸二冷优化和控制方面的应用	张富强(10)
连铸板坯二冷区传热数学模型的研究与应用	周远华(15)
板坯连铸结晶器粘结性漏钢成因及预防措施探讨	何宇明(22)
方坯高速连铸技术	矫继刚(27)
合金钢方坯连铸连轧的衔接优化	黄东城(32)
系统优化工艺条件 实现全连铸生产	邵明天 殷汝军 杨献礼(37)
转炉增碳法连铸生产 45 钢高线工艺的冶炼参数研究	马玉平(42)
转炉增碳法连铸生产 45 钢高线的连铸工艺参数研究	马玉平(50)
连铸坯热送工艺中高温合格铸坯的生产及确保措施	刘继锋(56)
广州珠江钢厂薄板坯连铸连轧工艺	杨传柱(62)
高性能抗震钢的开发与中型轧钢车间一火成材的改造	严春明(67)
连铸方坯中心裂纹的形成和控制	颜建新(72)
南钢电炉高碳铸坯内部质量的改善措施	吴建勇(76)
梅钢实现热送热装直接轧制的可行途径	吴 俊 韩静涛(80)
国产 1700 mm 热连轧粗轧机组调宽轧制的工业实验	韩 力(85)
邢钢连铸小方坯热送热装工艺实践	蒋 毅 苑希现 郝玉林 张永藏(92)
提高热送热装能力的技术探讨	杨 雄(97)
小方坯压力水膜附加结晶器试验	张 涛(103)
高效方坯连铸机的关键设备	余希芳(106)
热卷箱技术及其在凌钢中宽热带钢轧机上的应用	张年春 程良健(111)
薄板坯连铸机控制功能的探讨	丁运乔(116)
薄板坯连铸连轧的液芯压下技术	彭晓华(122)
薄板坯连铸连轧生产不锈钢的可行性	李宏图(129)
对我国荫罩钢带等精密带材发展的几点想法	王忠祥(134)
苏钢小方坯连铸生产简析及达产措施	赵吉宏(140)

宝钢板坯连铸高效化

阮晓明

[宝山钢铁(集团)公司]

摘 要 结合宝钢板坯连铸的实际生产情况,总结了高效化的某些经验,分析了进一步高效化存在的问题,并提出了相应的对策。

关键词 板坯 连铸 高效化

一、前 言

近年来,以高拉速为中心的高效连铸技术,在各工业发达国家已取得了飞速发展。国家计委、冶金部提出“九五”期间高效连铸是我国连铸发展的重点目标之一^[1,2]。结合宝钢的具体情况,所谓高效连铸指的就是高质量、高产量、高效益。

宝钢炼钢厂连铸一分厂的1号、2号连铸机投产八年多来,围绕着这“三高”取得了长足的进步,但是与国外的某些先进冶金企业相比,仍存在着一定的差距。为此,本文结合宝钢板坯连铸的实际生产情况,在已取得高效连铸经验的基础上对进一步高效化存在的问题进行了初步的探讨。

二、现 状

2.1 铸机特点

宝钢一连铸的1号、2号连铸机于1989年投产,采用了具有80年代中期世界先进水平的20多项技术,包括结晶器液位自动控制、结晶器在线调宽、结晶器漏钢预报、电磁搅拌、压缩铸造、二冷水动态控制、小辊密排、快速硫印、在线去毛刺等。铸机特点见表1^[3]。

表1 宝钢1号、2号连铸机特点

名 称	规 格
机型	垂直弯曲型,5点弯曲4点矫直
垂直段(m)	2.55
基本半径(m)	9.55
铸机长度(m)	39.39
结晶器长度(mm)	900
盛钢桶容量(t)	300
中间包容量(t)	60
铸坯规格	
厚度(mm)	210,230,250
宽度(mm)	900~1 930
长度(mm)	5 800,8 000~12 000
辊子(对)	99(紧排列)
二冷	气水
切割	火焰切割

2.2 生产实绩

几年来,这两台连铸机与300t氧气顶底复吹转炉及KIP,CAS,RH等精炼手段相匹配,已浇出了超低碳钢(IF钢)、X系列管线钢、耐蚀钢、高压容器钢、深冲钢、电工钢、船板钢等200多个钢号。钢坯

产量从 1989 年的 $30 \times 10^4 \text{t}$ 上升到 1997 年的 $511 \times 10^4 \text{t}$, 操作人数却下降了近一半。连铸生产的各项主要指标见表 2。

表 2 1992 年至 1997 年连铸生产的主要指标

年	1992	1993	1994	1995	1996	1997
合格坯产量($\times 10^4 \text{t}$)	371	420	457	472	483	511.9
作业率 ¹⁾ (%)	76.20	80.95	82.62	86.63	89.54	92.45
综合收得率(%)	95.23	95.03	96.18	95.26	95.91	96.49
平均拉速 ²⁾ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	1.06	1.12	1.23	1.19	1.07	1.15
连浇炉数(炉)	5.64	7.2	9.12	11.46	10.67	12.98
中间包寿命(炉)	4.53	4.81	5.58	5.24	5.14	5.96
热送率(%)	63.52	66.75	72.54	66.31	72.14	71.19

1) 作业率=(浇注时间+准备时间)/日历时间;

2) 平均拉速为各钢种年平均拉速的加权平均值。

2.3 采取的措施

2.3.1 提高作业率

由表 2 可见,这些年来,宝钢将提高连铸坯产量的重心一直放在提高铸机作业率上,主要采取了以下措施。

(1) 强调钢水的“三命中”,即冶炼终点的钢水成分、温度、冶炼时间达到目标值,避免由于前工序的原因导致非正常停浇。

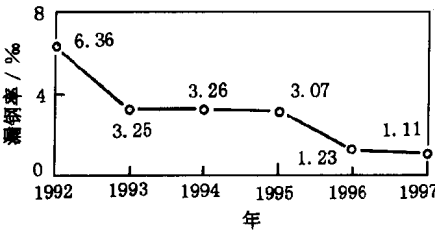


图 1 1992 年至 1997 年漏钢率示意图

(2) 提高中间包连浇炉数。合理编制生产计划,充分发挥结晶器在线调宽功能;采用快速更换中间包、快速更换浸入式水口技术;采用异钢种连浇技术;改进中间包和水口的烘烤制度。

(3) 严格标准化作业提高操作技能,减少由于操作原因的停机时间。降低漏钢率,由图 1 可以看出自 1992 年起漏钢率呈逐年下降趋势。

(4) 减少浇注间隙时间。

(5) 提高员工素质,推行排行榜制度。

2.3.2 强化设备管理

设备是连铸生产顺行的基础,是质量的保证。分厂在强化全员设备管理同时,着重抓了以下几个方面:

- (1) 加强设备点检,坚持不懈做好设备给油脂工作;
- (2) 狠抓对弧精度,要求全线精度在 $\leq 0.5 \text{mm}$ 的比例达 95% 以上;
- (3) 狠抓现有设备的投入率;
- (4) 做好设备基础管理工作。

三、分析与讨论

铸机产量可以用式(1)表示:

$$Q=2 \times 365 \times 1440 \times F \times E \times S \times \rho \times v \quad (1)$$

式中 Q ——铸机年产量(t);

$2 \times 365 \times 1440$ ——2流 $\times$ 日历天数 $\times 1440 \text{min/d}$;

F ——作业率(%);

E ——综合收得率(%);

S ——加权平均断面(m^2);

ρ ——密度(7.6t/m^3);

v ——平均拉速($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)。

从式(1)可以看出影响铸机高效化的主要因素有:作业率、综合收得率、平均拉速。

3.1 作业率

作业率是整个钢厂生产组织管理水平的综合体现。宝钢连铸机在作业率上,已较接近国外的先进冶金厂(表3)。若要使作业率再有明显提高,难度较大。

表3 宝钢与国外部分先进冶金厂连铸生产指标对比表

项 目	板坯尺寸 (mm $\times$ mm)	拉速 ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	作业率 (%)	漏钢率 (%)	年产量 ($\times 10^4 \text{t}$)	无清理 率(%)	热送比 (%)
日本住友公司鹿岛厂3号连铸机	270 $\times$ 1450	>2.0	>90	<0.02	>300	>95	>95
日本钢管公司福山厂5号连铸机	220 $\times$ (700~1650)	2.5	93	0.02	>300	>90	>90
美国钢铁公司格拉尼特城厂连铸机	240 $\times$ (965~1727)	2.0	>90	0.05	200		
德国克虏伯公司莱茵录森厂连铸机	260 $\times$ (850~1650)	1.6	85	0.03	>200		
美国钢铁公司蒙·瓦利厂连铸机	(210~250) $\times$ (700~1650)	2.0	>90	0.05	260		
中国宝钢1号、2号连铸机	(210~250) $\times$ (900~1930)	1.6	>92	≤ 0.111	>511	~84	>96

3.1.1 定修、检修时间

现在宝钢连铸机总的定修时间是20h/次 $\times 1$ 次/月,且每年要集中检修7天左右,仅这两项就占日历时间的4.66%,而目前总的维修时间也只有4.75%,所以要该值再明显下降是不大可能的。

3.1.2 连铸工序内部原因引起的停机时间

影响这部分时间的主要原因可分为设备故障和操作事故,1997年它们分别为0.78%和0.52%。这两项之和较原设计值4.3%已大幅下降。在总维修时间从原设计的9.6%下降1997年的4.75%的情况下,想要继续减少设备故障时间,具有一定的困难。在操作上,降低漏钢率将仍是一项艰巨的任务,目前纵裂漏钢问题还没有得到完全控制,该事故对设备损害大,造成停机时间长。

3.1.3 前工序影响

前工序的影响主要来自高炉、转炉的故障,以及受精炼能力的影响。随着2号RH上马,该影响将有所下降,但幅度不会大。

从以上几个方面的分析看,在今后的生产中,从提高作业角度来提高铸机产量的能力将十分有限。

3.2 平均拉速

这里讲的平均拉速指的是各钢种拉速的加权平均值,故该值将受各钢种比例和各钢种拉速的影响。

3.2.1 各钢种比例

目前,在宝钢连铸生产的钢种中,从目标拉速可分为两大类:Al-K 钢(1.4m/min)和 Al-Si-K 钢(1.2m/min)。这两大类的比例直接受市场和整个钢铁各单元生产能力匹配的影响。

3.2.2 平均拉速

对于每一次连浇而言,平均拉速可用式(2)表示:

$$v = G_n / [2(t_0 + t_1/C_n)S\rho] \quad (2)$$

式中, v ——平均拉速(m/min);

G_n ——平均炉产量(t·炉⁻¹);

C_n ——平均连浇炉数(炉);

t_0 ——平均每炉浇注时间(min);

t_1 ——平均每个 cast 准备时间(min);

S ——平均断面(m²);

ρ ——钢密度(7.6t/m³)。

从式(2)可得出,影响平均拉速的原因主要有以下三个方面。

(1) 平均连浇炉数。宝钢 1996 年的平均连浇炉数为 10.67 炉,由公式(2)可计算得,当其它参数不变时,将 C_n 提高到 15 炉,平均拉速仅从 1996 年的 1.07m/min 提高到 1.1m/min。并且从铸坯质量、铸机设备状况考虑, C_n 也并非越高越好。

(2) 平均每个 cast 准备时间。该时间受前工序、设备状况影响较大。宝钢 1997 年的平均每个 cast 准备时间为 47.6min,在一切正常情况下,准备时间的设计值为 45~50min。

(3) 平均每炉浇注时间。在公式(2)中,该时间是一个最有影响的因素,要减少这个时间,主要有以下两个途径。

① 提高目标拉速。现在实际生产中,250mm 厚的低碳 Al-K 钢和低 Al-Al-K 钢的目标拉速为 1.4m/min,这对于其铸机设备条件来讲,还是很有潜力的。从理论上计算,该钢种拉速达 1.8m/min 时,完全凝固位置在 35.8m 处。所以在保护渣工序间的匹配等外部条件满足时,提高目标拉速是可行的。

② 尽量保持恒拉速浇注。这不仅有利于铸坯质量,而且对提高平均拉速有非常重要的作用。宝钢 1996 年 Al-K 钢的目标拉速是 1.4m/min,但其平均拉速只有 1.12m/min,而在 1994 年和 1995 年却分别达到了 1.27,1.23m/min。可见在这方面,同样是有潜力的。要保证恒速浇注,就要求尽量减少由于钢水温度过高、成分波动过大或到达时间晚引起降速;也要求避免由于水口堵塞、水口断裂、漏钢误报等操作原因引起的降速。

从以上的分析来看,今后“高效”的重点应从提高作业率转移到提高平均拉速上来。对于 1996 年来讲,粗略计算一下,平均拉速若提高 0.1m/min,年产量可提高 40×10^4 t 左右。

3.3 综合收得率

3.3.1 浇注收得率

影响浇注收得率的因素有:①钢包内残钢;②中间包内残钢、漏钢;③氧化铁皮;④切

割渣;⑤切头切尾。从目前生产看,对浇注收得率影响较大的主要来自中间包内残钢及漏钢。宝钢 1995 年的漏钢率为 0.307%,中间包大冷钢 180 次;1996 年漏钢率为 0.123%,中间包大冷钢 118 次。浇注收得率从 96.32%上升到 96.94%。为了进一步控制漏钢率,1997 年又合作开发了一套神经元模糊控制漏钢预报系统。

3.3.2 精整收得率

精整损失主要来自铸坯质量问题,包括铸坯表面清理和废坯。图 2 是宝钢 95、96 两年来的吨钢缺陷报废量。较之 1995 年,1996 年的质量从整体上有所提高。但双浇报废量没有得到有效控制,夹渣报废量上升,从 1995 年的 0.38kg/t 上升到 96 年的 1.15kg/t。

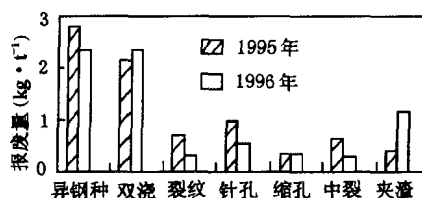


图 2 宝钢 1995 年和 1996 年吨钢缺陷报废量示意图

(1) 夹渣

形成夹渣的原因有很多,对于目前夹渣上升迅猛,笔者认为主要是由于液面波动和钢流紊流引起的未熔保护渣的混入。造成这种原因有两方面:一是为了保证中间包的连浇炉数,防止水口堵塞,对浸入式水口的吹氩量,操作工有宁大勿小的认识,这种必然造成液面的翻动;二是部分操作人员片面追求恒速浇注这个指标,进行违章操作。

针对以上原因,目前一方面加紧不吹氩水口的试验,以替代吹氩水口。另一方面应细化考核指标,加强考核力度。

(2) 双浇。

当水口堵塞、折断或是出现漏钢报警时,由于急降速就会产生双浇痕。从统计的数据来看,1995 年水口断裂 138 根,结塞 223 次,而 1996 年水口断裂仅 109 根,结塞 191 次,总计减少 61 次。可见 1996 年双浇报废量的上升主要来自漏钢误报警。这在新的预报系统投入后,将会有所下降。从以上的分析可以看出,收得率与质量关系密切,而对于质量来讲,又与设备状态、操作水平、工序配合息息相关。

四、结 语

从对宝钢连铸生产指标的分析来看,宝钢一连铸的 1 号、2 号连铸机在国内尚属先进,但与国外的部分先进冶金厂相比,还有一定的差距。作为其进一步高效化的重点应从提高作业率转移到提高铸机平均拉速上来。

参 考 文 献

- [1] 殷瑞钰. 继续大力发展连铸,推动钢铁工业结构优化,促进两个根本转变. 冶金工业部第六次全国连铸工作会议文集(唐山). 1996.
- [2] 翁宇庆. 加深“九五”连铸主导思想的认识,推进连铸工作的集约化发展. 冶金工业部第六次全国连铸工作会议文集(唐山). 1996.
- [3] 熊毅刚. 板坯连铸. 北京:冶金工业出版社,1994,184.
- [4] 倪满森. 近年来连铸效率的提高与发展. 连铸,1996(4):3.

小电炉钢厂高连铸比的实践与思考

廖卫团

(韶关钢铁集团有限公司)

摘 要 在总结投产两年来的生产实践基础上,从实现炉机匹配的工艺与设备条件着手,对韶钢二钢厂 4 座普通功率电弧炉匹配 1 台小方坯连铸机提高连铸比进行了讨论。

关键词 电炉 连铸比

一、前 言

连铸技术在降低能耗、提高效率、增加生产能力、提高铸坯质量、改善劳动条件以及提供生产连续化、自动化等方面具有很大优势,炼钢厂走连铸生产路线是降成本求生存的必然要求,而高连铸比(甚至全连铸)就是这些优势的综合体现之一。纵观全国,电炉钢厂已实现全连铸的有 20 多家,但其都是在炉容比较大且炉子座数 ≤ 3 座或有精炼升温措施,或连铸机台数多于 1 台的情况下所获得。而韶钢二钢厂以 1 台小方坯连铸机匹配 4 座普通功率小电炉,且无精炼调温手段,既要充分发挥炉子的作用,又要满足连铸为中心,在投产不到两年连铸比超过 84.96%,并使吨坯成本基本保证了在外购坯价格以下。

二、生产条件概况

二钢厂目前有 4 座普通功率电弧炉(表 1),1 台 1995 年 6 月交付使用的全弧形

表 1 冶炼工艺参数

电炉	公称容量(t)	变压器容量(kV·A)	平均出钢量(t)	平均冶炼时间(min)
5 号	5	5000	18	150
6 号	5	5000	24	150
7 号	15	9000	28	160
8 号	15	9000	28	160

ROKOP 三机三流小方坯连铸机,以吹氩、喂线为精炼手段,主要钢种 20MnSi。炉子数量多、冶炼周期长、出钢时间不稳定且出钢量不一,是钢水调度的最大困难。而厂房是由原有模注厂房改造而来,连铸机成横向布置,使得炼钢、浇铸、出坯都不互相干扰。

三、连铸生产实绩分析

作为韶钢“八五”重点改造项目,ROKOP 连铸机于 1995 年 6 月热试车,8 月正式投产,生产情况见表 2。

3.1 生产实绩分析

(1) 设计方面。为了实现 3 炉连浇,连铸机配备有钢包回转台、东西两工位的快速烘

烤中间包装置及两台中间包车,中间包容量设计为 9.5 t 的贮备空间;塞棒控制加定径水口的敞开浇铸,使方便分流扎引锭的二冷室设置优势得以发挥,可以实现 3 流浇注的单独控制。

(2) 设备方面。①机械、电气设备的运行可靠,保证了拉速的可调和铸坯的顺行。钢水充足时,正常拉速保持在 2.0m/min 左右,最高可达 2.55m/min。而根据出钢条件,一定时间内拉速为 1.0m/min 也是可行的。②对生产中出现的各种问题进行了整改,如试产时的结晶器上口漏水问题,改变了 O 型耐热密封材

料的材质,并在铜管上口开槽以改善密封,解决了结晶器上口漏水影响生产的问题。

(3) 工艺方面。①炉前采用煤氧喷吹和炉门氧枪强化冶炼技术,采用熔氧结合、快速还原操作,缩短了冶炼周期。②强调红包出钢,出完钢后立即加保温材料(覆盖剂、炭化谷壳)。采用钢包底吹氩,均匀钢水温度、成分,进一步去夹杂,提高钢的质量。③强化连铸操作,依钢水量、温度决定开浇时间、流数、拉速。解决了漏钢、塞棒熔断等典型操作问题,杜绝操作事故的发生。④对漏钢、脱方进行了攻关。⑤采用快速更换中间包技术,最高连浇达 16 炉。由于炉子的冶炼周期长而准备浇注的限制性环节——扎引锭时间仅在 15min 以内,即停浇到重新开浇时间间隔短,故不过分追求连浇炉数。⑥为抢时间,有时也采用补漏操作,即拉钢中发生漏钢时立即关闭钢流、拉速回零并关二冷水,然后往结晶器中加冷钢,再给钢水续拉。

(4) 管理方面。为了合理控制钢水流量和钢水温度以满足炉机匹配,在各炉座和连铸平台配备有电话机。强化各种规章制度来协调各工序的配合,保证顺行。

3.2 影响钢水不能上连铸的原因

影响钢水不能上连铸的原因主要有:漏钢多造成处理二冷室残钢时间长而延长了检修时间;指挥不当造成小炉单炉;出钢温度低;连铸操作不当造成的问题(如塞棒关不住、水口堵不上)及铸机状态问题;结晶器下口漏水严重影响操作;铸机设备故障;钢水铜高转炼 Q235 等。

四、对连铸比提高的思考

连铸比是炼钢生产工艺水平和效益的重要标志之一,连铸比的提高是连铸为中心的重要前提,是连铸生产效益的直接体现。连铸比的提高,取决于钢水流量、钢水温度和铸机状态。

表 2 连铸生产情况

月份	1996		1997	
	产量($\times 10^4$ t)	连铸比(%)	产量($\times 10^4$ t)	连铸比(%)
1	0.743	—	0.837	72.48
2	1.323	—	1.780	82.22
3	1.451	—	1.995	83.21
4	1.493	73.40	1.870	81.50
5	1.282	62.14	2.113	85.00
6	1.157	63.29	1.890	85.10
7	1.457	71.28	2.114	86.00
8	1.637	73.90	2.093	83.99
9	1.501	73.39	1.843	86.82
10	1.572	71.01	1.522	90.27
11	1.847	76.95	1.614	90.79
12	1.992	80.81	1.628	90.65

4.1 连铸机生产条件分析

(1) 依据生产实践,20MnSi 的中间包浇注温度范围为 $1530\pm 15^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 30 t 钢包钢水量为 28 t,温降速度 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$;20 t 钢包钢水量为 18 t,温降速度 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

4.2 钢水流量与钢水温度匹配

为了保证炉子生产能力的发挥及连铸的多炉连浇,炉前出钢量必须适当而且相对稳定。依目前 4 座炉子的生产条件,炉子出钢量是可控的,但出钢时间却是不完全可控的。这样就给钢水流量带来许多种情况。

(1) 4 座炉子在很短时间内都出钢。由于没有精炼升温措施,为了保证顺利浇完钢水,对待浇时间长的钢水只有增加出钢温度,这必然带来电耗增多、冶炼时间加长、电极和耐火材料消耗增加等。因而快速拉完钢水使出钢温度降低是必然的要求。而从中间包水口、绝热板、塞棒的使用寿命考虑,已规定了中间包使用寿命最多为 6 炉。因此,这种情况最优先的考虑是 4 炉开 3 流快速浇完。此时,钢水总量为 $28\text{ t}\times 2+18\text{ t}\times 2=92\text{ t}$,按设计平均拉速 $1.6\text{ m}/\text{min}$ 计算,需浇注时间 102 min,拉速 $1.9\text{ m}/\text{min}$ 对应 95 min。这样,正常情况下浇完到下次来钢水间隔在 38min 以上,对准备浇注及一些事故处理有足够时间。实践证明,若钢包、中间包的准备都良好时,第一炉开浇钢包到中间包过程温降 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$,而连浇炉过程温降 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。这种情况下,加上钢包吊运和吹氩温降,则 5 t 炉出完钢的炉后温度控制在 $1600\sim 1610^{\circ}\text{C}$ 以上,15 t 炉则是 $1620\sim 1630^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 4 炉出钢顺序按前炉钢水浇完,后一炉钢水恰好到达连铸并立即开浇,此为炉机时间衔接理想型。若符合开 3 流浇钢状态,即炉子之间的出钢间隔较短,则考虑 4 炉快速拉完,然后准备下一浇次的浇注,这样每炉出完钢温度控制在 $1600\sim 1610^{\circ}\text{C}$ 就足够。若符合两流浇注,就得相应提高出钢温度,以保证顺利浇完和后续的连接。

(3) 有两座炉同时出钢,另两座炉在大约 1h 后也同时出钢。前两炉钢水的温度要控制高一些(1620°C 以上),用两流拉钢并等到后续的两炉出钢。

(4) 一炉先出钢,后面的三炉钢在 1h 后再出。若是 15 t 炉,则提高出钢温度在 1630°C 以上,使镇静时间加长或控制冶炼节奏;若是 5 t 炉,就只有控制冶炼节奏。

总之,4 座炉正常生产时,以每浇次拉完 4 炉钢为最好,既可使炉子的出钢温度控制趋向低温,又对维护连铸机有利。

4.3 铸机状态与设备维护

铸机状态直接影响着连铸生产,是稳定、可控、顺行的重要前提。实践操作中有机机械、电气设备故障;在工艺上包括连铸起步的拉漏、拉脱,拉钢过程的拉漏,水口因烧氧过大并遇到塞棒被凝钢结死或熔损而关不死所致溢漏,都对铸机状态影响很大。

这些问题的解决,只有从抓工艺和设备的管理着手。工艺上,首先根据冶炼连铸的工艺条件提出合理的工艺参数,为生产提供参考;其次抓好钢包、中间包、结晶器这三项最直接影响浇注的工作,严格按标准化作业;再次,在顾及连浇的情况下,尽可能使钢水快速拉完,为工艺的配合、事故的处理及设备更换提供时间保证。设备上,强化检修质量,向设计

标准看齐,加强设备点检,保证设备完好。

4.4 其它影响连铸原因的处理

- (1) 钢水铜高的处理。抓入炉废钢料,强化配料,合理搭配电机废钢等含铜高的原料。
- (2) 解决结晶器下口漏水问题。

当工艺和设备有了保证后,就保证了班次的全连铸,从而实现一日的全连铸,继而实现连续几天全连铸。以后的工作必须做到检修周期到检修周期的全连铸。对满足炉子设备能力的充分发挥来说,按设计周检一次 8 h 计算,可估计连铸比为 95.2%。随着连铸比的提高,就可真正以连铸为中心来组织生产。

4.5 今后的措施

- (1) 继续保持最少钢包量热周转。
- (2) 以工艺、设备的优化来保证匹配,通过高拉速来保证快速浇完钢水,为兑铁水等提高冶炼能力的措施创造条件。增加 LF 精炼并通过计算机仿真来为炉机匹配提供依据。

图 1 为炉机时间衔接的理想型。由图 1 看出,可直接调整利用的时间是 t_1 。

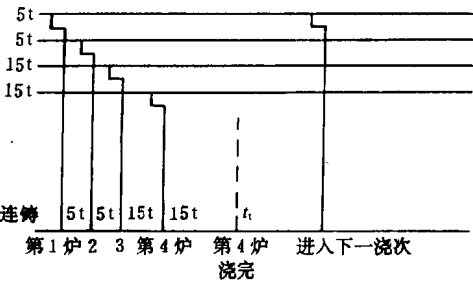


图 1 炉机时间衔接图

五、结 语

- (1) 投产两年来的实践表明,连铸生产已取得一定成绩,同样的炉子条件下产量增加,成本降低,连铸比已达到大于 84.96% 的水平。
- (2) 连铸以 4 炉连浇来组织生产最佳,既可降低炉前出钢温度,又有利于连铸机维护。
- (3) 钢水供应连铸平台的周期和每炉浇注时间大致相等对连浇、降低出钢温度、提高连铸比有利,所以必须控制好冶炼节奏。
- (4) 加强工艺和设备的管理后,连铸比可提高到 95.2% 以上。

数学模型在板坯连铸二冷优化和控制方面的应用

张富强

(鞍山钢铁公司)

摘 要 系统阐述了连铸板坯的几种二次冷却模型和优化方法,并对基于传热模型计算的二冷控制的应用进行了总结和评述。

关键词 数学模型 板坯连铸 二次冷却 优化 控制

一、前 言

在连铸过程中,二次冷却与铸坯质量和铸机的产量紧密相关,优化控制二冷区的传热十分重要。

连铸二冷的控制方法有以下几种^[1~5]。

一种传统的方法是经验模型的比水量法,以水表的形式给出拉速—喷水量的直线对应关系进行比例控制[图 1(a)]。但这种方法具有明显不足,当拉速急剧变化时会引起铸坯表面温度大幅度回升和滞后变化,易产生裂纹。

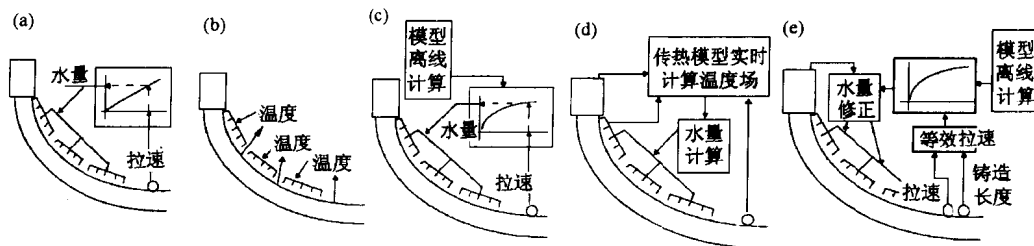


图 1 连铸二冷的控制方法

(a)比例控制;(b)实测表面温度反馈控制;(c)参数控制;
(d)计算模式的目标温度动态控制;(e)改进型动态控制

另一种方法是实测表面温度反馈控制法[图 1(b)],在每个二冷区安装高温温度计测试铸坯表面温度,根据目标表面温度与实测温度的差值来控制水量。然而由于二冷区恶劣的环境条件,该法获得可靠的表面温度十分困难,应用受到限制。

近年来,随着连铸技术的发展和计算机模拟连铸坯传热研究的日益深入,基于传热数学模型计算的二冷优化和动态控制被应用。一种是参数控制[图 1(c)],运用传热模型离线计算出水量与拉速的优化关系,把相应参数存储在智能仪表或控制计算机中对水量进行控制。另一种是计算模式的目标温度动态控制法[图 1(d)],用在线测量的数据,由数学模型实时计算板坯温度场,并根据计算所得的温度与目标表面温度的差异来调节控制喷水量。还有一种改进型动态控制[图 1(e)],通过传热模型计算出各种工艺条件下水量与

拉速的优化关系,预先设定在计算机中。运用在线的拉速和铸造长度动态计算铸坯从弯月面到各二冷区中心的平均停留时间,换算出各二冷区的等效拉速,然后根据预定的数据控制水量,并根据实际工艺参数与目标值的偏差来修正。

本文在吸收国内外连铸机二冷先进技术的基础上,阐述几种板坯连铸二次冷却模型和二冷制度的优化方法,并对几种控制方式的应用进行综述和分析。

二、板坯连铸二次冷却模型和二冷制度的优化

2.1 板坯连铸二次冷却模型

2.1.1 传热方程

连铸过程实质是一个伴随液相流动和相变的凝固传热过程。紊流流动与凝固传热耦合模型和层流流动传热模型充分考虑了流动对传热的影响,但计算过于复杂。Mizikar^[6]提出等效传热系数的方法来考虑对流传热,简单方便,在工程上得以广泛采用。对于相变传热的处理,有等效比热法^[6,7]、热焓法^[8]等板坯连铸二次冷却模型有三种,以热焓法描述(设板坯厚度方向为 x ,宽度方向为 y ,拉坯方向为 z):

(1) 二维非稳态传热模型 忽略拉坯方向传热,考虑铸坯宽度方向和厚度方向的传热

$$\partial H(T)/\partial t = \partial^2 K(T)/\partial x^2 + \partial^2 K(T)/\partial y^2 \quad (1)^{[9]}$$

(2) 一维传热模型 由于板坯具有较大的宽厚比,仅考虑铸坯宽面方向传热

$$\nu \partial H(T)/\partial z = \partial^2 K(T)/\partial x^2 \quad (2)^{[10]}$$

(3) 二维传热实时模拟模型 为在变化条件下更有效地模拟传热,考虑拉坯方向和宽面方向传热

$$\partial H(T)/\partial t = \partial^2 K(T)/\partial x^2 + \partial^2 K(T)/\partial z^2 - \nu \partial H(T)/\partial z \quad (3)^{[11]}$$

式中

$$H(T) = \rho \int_0^T \left(c(T) - L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) dT \quad (4)$$

$$K(T) = \int_0^T k(T) dT \quad (5)$$

2.1.2 边界条件和初始条件

(1) 边界条件

$$\text{结晶器} \quad -k(T) \partial T / \partial n = q \text{ 或 } q_{ave} \quad (6)$$

$$\text{二冷区} \quad -k(T) \partial T / \partial n = h(T_s - T_w) + \sigma \epsilon (T_s^4 - T_{ext}^4) \quad (7)$$

$$\text{空冷区} \quad -k(T) \partial T / \partial n = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_{ext}^4) \quad (8)$$

对于二维实时模拟模型,还需以下边界条件:

$$\text{铸坯顶端} \quad T(x, 0, t) = T_0 \text{ (开始和正常拉坯阶段)} \quad (9)$$

$$-k(T) \partial T / \partial n = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_{ext}^4) \text{ (结束阶段)} \quad (10)$$

$$\text{铸坯末端} \quad -k(T) \partial T / \partial n = \nu H(T) \quad (11)$$

$$(2) \text{ 初始条件 } T_{t=0} = T_0 \quad (12)$$

在边界条件中,结晶器和二冷区的传热十分关键。结晶器可采用瞬时热流或平均热