

炼钢厂系统的运行原则与调控策略

刘青¹, 田乃媛¹, 殷瑞钰²

(1. 北京科技大学冶金学院, 北京 100083; 2. 北京钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要: 炼钢厂系统是钢铁制造过程系统的一个重要子系统, 其制造过程的复杂性、过程控制的艰巨性是钢铁制造过程多维物质流管制最集中的体现. 炼钢区段的优化与控制是钢铁制造过程系统运行控制的关键. 在总结以往炼钢厂物质流管制研究工作的基础上, 从理性角度对炼钢厂系统的运行与控制进行探索, 归纳出炼钢厂系统运行优化的逻辑与实现关系, 并对转炉炼钢厂系统调控策略进行补充, 阐述了炼钢厂系统运行优化的层次与指导策略.

关键词: 钢铁冶金过程工程; 炼钢厂; 运行原则; 调控策略

中图分类号: TF758; N941.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2003)02-0171-06

1 前言

钢铁工业既有连续型工业生产的特征, 各工序连续/准连续, 又有离散型工业生产的特征, 工序之间的衔接离散是典型的混合型过程工业. 总的看, 钢厂生产过程的连续化、紧凑化程度发生了变化, 现正处在从间歇/准连续向准连续/连续的方向演进之中^[1]. 对于钢铁生产过程实施系统控制的难度极大. 混合型工业的过程控制难于连续型工业和离散型工业, 若能提出有效的运行原则和控制策略, 进而形成系统运行控制技术, 对于具有准连续/间歇运行特性的一般混合型过程工业的控制与优化将产生指导和借鉴作用.

2 炼钢厂系统运行优化的理论基础

炼钢厂系统是钢铁制造过程系统的一个重要子系统, 炼钢厂系统的运行优化就是解决系统复杂性问题. 钱学森^[2]指出, “所谓‘复杂性’实际是开放的复杂巨系统的动力学, 或开放的复杂巨系统学.” 文献^[3]就钢铁制造过程工程的研究内容进行了简要描述, 其中以“推”-“缓冲”-“拉”为特征的系统运行宏观动力学是钢铁冶金过程工程研究的调控策略. 钢铁制造过程系统运行动力学特征在系统不同的层次上有着不同的体现. 在钢铁联合企业层次, 高炉生产的本质是不间断地连续生产(虽然出铁是分次的), 从过程物流的角度看, 是一种连续不断的“推力”; 从炼钢厂连铸机的生产运行本质看, 希望能够不间断地多炉连浇, 这对于过程物质流而言是一种“拉力”; 来自高炉物质流的“推力”和来自连铸机的“拉力”若能有效地“缓冲”达到协调一致, 则钢铁制造过程系统能够均衡、协调、高效、连续地运行^[4]. 在炼钢区段/系统层次, 转炉是过程物质流的推力源, 连铸机仍是过程物质流的拉力源, 如能在该区段内形成合理、优化的“缓冲”, 则可实现炼钢厂系统有序、稳定、高效、连续的运行. 本文构筑建立了炼钢厂系统运行过程“缓冲”的思路及方法, 以指导系统的优化运行. “缓冲”构筑的实质是时间、温度和物质量3个基本参数在系统运行过程中的协调、匹配、合理调控, 其中温度和物质量参数均是以时间参数为基准, 通过对运行过程时间参数的精确控制, 可实现对温度与物质量参数的有效控制, 这在系统运行过程中呈现出节奏性.

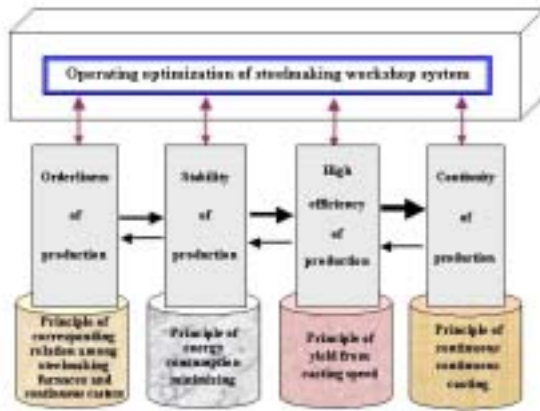


图1 炼钢厂系统运行优化的逻辑与实现关系
Fig.1 Logic and its realizing relation for optimized running steelmaking workshop systems

在近年来研究工作的基础上,从过程系统运行的角度归纳得出炼钢厂系统运行优化的逻辑与实现关系,提出炼钢厂系统运行优化的“炉机对应”原则、“能耗最小”原则、“拉速决定流量”原则和“连浇”原则,如图1所示。

对一个炼钢厂而言,尤其是高效连铸技术被广泛采用后,炼钢-连铸过程的生产节奏明显加快,如何实现生产的有序性、稳定性、高效性、连续性,优化系统的运行过程变得极为迫切。下文就对系统运行特性具有重要影响、实现炼钢厂系统优化运行的“炉机对应”原则、“能耗最小”原则、“拉速决定流量”原则和“连浇”原则逐一阐述。

3 系统运行的原则

3.1 “炉机对应”原则

所谓“炉机对应”原则,是指在由铁水供应、炼钢、二次冶金、连铸、铁水包、钢包、中间包、天车、系统维护及其它辅助工序等组成的“弹性链”制造系统中,对于其中的“刚性”组元,即炼钢厂系统的主要生产工序—炼钢工序和连铸工序之间确立明确的对应关系。炉机对应关系问题的确定是炼钢厂系统运行优化的首要问题/基础。建立炉机对应关系的实质是对钢铁制造过程物质流的时间和物质量2个基本参数在系统运行过程中的优化、匹配、合理调控。

炉机对应原则旨在建立炼钢厂系统运行的有序性,实现具有时空结构^[2]的炼钢厂系统内各组分/子系统的有序运行,广义地说,它包括系统内所有单元/装置在生产过程中以炼钢、连铸工序为中心各自有序地运行。反映在生产上表现为生产模式简捷优化,生产组织便利顺畅。

炉机对应原则的表现形式一般分为“定炉对定机”和“一一对应”2种。所谓“一一对应”是指在转炉数量与连铸机数目相等的炼钢厂系统运行过程中,每座炼钢炉相应与某台连铸机对应匹配地进行生产,它是炉机对应原则的高级表现形式。所谓“定炉对定机”是指炼钢厂系统在运行过程中,炼钢炉与连铸机之间具有明确的对应匹配关系,但不是“一一对应”关系,例如某普通长材型转炉炼钢厂有3座12 t转炉与2台150 mm×150 mm连铸机(其中一台为高效铸机,一台是常规铸机),其定炉对定机的关系见图2,图中1号机为高效铸机。由于炼钢过程系统物质流的复杂性,使得系统在运行过程中炼钢与连铸工序之间的对应关系较为复杂,不同程度地影响了系统的运行效率。炉机对应关系的建立主要是从工序/装置的节奏匹配和产能平衡角度实现系统运行的有序性,具体的表现形式会有多种,受炼钢厂的配置、装备、技术、管理水平与员工素质等综合因素的影响。

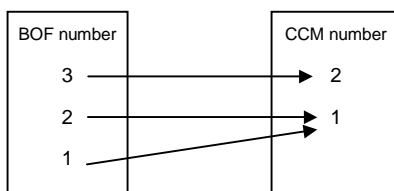


图2 三炉-两机的“定炉对定机”关系
Fig.2 Definite corresponding relation among 3 BOFs and 2 CCMs

3.2 “能耗最小”原则

所谓“能耗最小”原则,包括两层含义:其一,

是将炼钢厂系统内钢水在其经历的工序/装置内部操作过程温降,或钢水在不同工位之间传搁过程的温降,经过系统调控使其趋于最小化,表达如式(1);其二,是指在炼钢厂系统运行过程中,诸工序/装置的作业时间,或钢水在不同工位之间传搁的过程时间经过控制、协调使其最短,表达如式(2)所示.

$$\sum_i^n \Delta t_i \rightarrow \text{Min}, \quad (1)$$

$$\sum_i^n \Delta \tau_i \rightarrow \text{Min}, \quad (2)$$

式中: Δt 为炼钢厂系统中工序/装置内部操作过程温降,或钢水在不同工位之间传搁过程的温降; $\Delta \tau$ 为炼钢厂系统中工序/装置的作业时间,或钢水在不同工位之间传搁的过程时间; i 为炼钢厂系统中的工序/装置.

上述能耗最小原则的定义简言之即是温降最小原则和过程时间最短原则.系统运行的有序关系建立后,炼钢厂系统运行的稳定性主要体现在 2 个方面:过程温降最小和工序/装置运转准时.根据制造过程时间的构成,过程时间最短原则要求系统在运行过程中减少工序/装置运转时间中的无效时间和多余时间,使作业时间靠近必要基本时间,减少运行过程的波动因素,提高系统运行的效率.而工序/装置运行的准时性/正点率即是系统运行效率改善的主要表现之一.因此可以说,能耗最小原则在很大程度上就是实现系统运行稳定性的原则.

解析炼钢厂系统制造过程的时间参数、温度参数,认识系统物质流运行的温降规律,对于减少制造过程的温降、提高系统运行的稳定性、并进一步优化系统的运行有着重要的作用.能耗最小原则的实质是对钢铁制造过程物流的时间和温度参数在系统运行过程中的优化、匹配、合理调控.

在炼钢厂系统的运行优化研究中,温降最小原则有 3 层含义:(1) 过程温降最小,(2) 过程温降值稳定,(3) 过程“最大温降”值的降低.具体解释如下:过程温降最小,是指每一个工序/装置的操作过程温降和系统全过程温降最小化;过程温降值稳定,是指每一个工序/装置的操作过程温降值和系统全过程温降值稳定;过程“最大温降”值的降低,是指系统全过程温降最大值的幅度最小化.炼钢厂过程温度的控制可从 2 个方面来进行,一是控制炼钢厂系统内钢水在诸工位上操作过程的温降,二是控制钢水在不同工位之间传搁过程中的温降.实际上,炼钢厂系统温度控制的“源头”在炼钢工序,从原料、辅料等入炉料开始系统实施全过程控制,逐步使过程温降和诸工位操作温降趋近“最小”值,温度波动随之趋近“最小”,系统运行的稳定性则趋近“最大”,制造过程的稳定性逐步提高.系统运行稳定,制造过程波动小,对于控制产品质量、降低耐火材料消耗,提高产品市场竞争力都是极为有益的.某 15 t 转炉炼钢厂应用能耗最小原则指导系统运行优化的过程中,出钢温度已由 1999 年初的 1709℃ 降低至 2002 年 12 月的 1650℃,综合效益显著.

可见,系统运行的有序性推动了稳定性的逐步建立,稳定性又使有序性得以充分贯彻.

3.3 “拉速决定流量”原则

所谓“拉速决定流量”原则,是指炼钢厂系统在“炉机对应”和“温降最小”系统运行原则实现的基础上,连铸机的拉速决定了炼钢厂系统过程物质流量,连铸机的运行状况体现了炼钢厂的生产效率,决定着炼钢厂的生产规模.拉速决定流量原则的数学表达式见下式:

$$Q_{\text{smp}} = V_s n S_b \rho \tau, \quad (3)$$

式中： Q_{smp} 为炼钢厂的过程物质流量(t)， V_s 为拉坯速度(m/min)， n 为连铸机的流数， S_b 为连铸坯的横截面积(m^2)， ρ 为连铸坯的比重(t/m^3)， τ 为连铸机的纯拉坯时间(min)。

由式(3)可知，在进行炼钢厂系统的过程物质流量评价时，当连铸坯断面尺寸确定后，连铸机拉速的高低决定了炼钢厂系统过程物质流量的大小。

近年来，以高拉速为核心的高效连铸技术的研发成功，连铸机生产的高速化带动了转炉冶炼的高效化，使钢产量得以大大提高。炼钢厂系统运行的结果是以其产品——连铸坯的数量来体现的，连铸工序的运行水平是衡量炼钢厂系统运行效率的主要指标，表1给出了上述某15 t转炉炼钢厂连铸机的相关情况。拉速决定流量原则的实质，是对钢铁制造过程多维物质流的时间、温度和物质质量3个基本参数在炼钢厂系统运行过程的优化调控，它是系统运行优化进入高级阶段的表征，体现出系统运行的高效性。

表1 某15 t转炉炼钢厂连铸机年产量、拉速、作业率
Table 1 Data of yield, casting speed and operation ratio of CCM in a 15 t BOF workshop

CCM number	Year	Casting speed (m/min)	Operation ratio (%)	Yield (t/a)
1	1999	2.91	85.22	392 570.2
	2000	3.17	90.84	478 343.1
3	1999	1.97	89.08	432 556.2
	2000	2.15	92.31	503 957.7

Note: The section of No.1 CCM is 120 mm×120 mm, and the section of No.3 CCM is 150 mm×150 mm.

“拉速决定流量”原则的实现最好是以“炉机对应”和“能耗最小”原则的实现为基础，是系统运行优化的高级阶段，不仅如此，系统运行进入高级阶段后，又会促进系统运行的有序性、稳定性，使系统逐步实现更高层次的优化运行。

3.4 “连浇”原则

所谓“连浇”原则，是指炼钢厂系统在“炉机对应”、“能耗最小”和“拉速决定流量”等系统运行原则实现的基础上，尽可能减少连铸工序的非生产时间，提高生产过程的连续性，实现系统准连续/连续化运行。这里隐含着连铸工序的连续化带动了炼钢工序的连续化，使得炼钢厂系统的运行朝着连续化不断前进。本文所述的连浇具有2层含义，即对炼钢厂系统当中的连铸子系统而言，实现多台连铸机在尽可能连浇前提下的均衡生产；对1台连铸机而言，实现按最大连浇炉次进行生产。

炼钢厂系统过程物质流量与最大连浇炉次和浇次数之间的关系如式(4)所示：

$$Q_{\text{smp}} = m_{\text{max}} n_1 Q_0 \quad (4)$$

式中： Q_{smp} 为炼钢厂系统一定时间内的过程物质流量(t)， m_{max} 为连铸机的最大连浇炉数(炉)， n_1 为连铸机的浇次数(次)， Q_0 为1包钢水的质量(t)。

由式(4)可知，在分析所用的评价时间和出钢量一定的前提下，连铸机最大连浇炉数与浇次数成反比关系，对连铸生产而言， m_{max} 越多， n_1 越少越好；反之， n_1 越多， m_{max} 则越少。就是说，在考察1个生产规模一定的炼钢厂时，连浇炉数越多，安排连铸生产的浇次数越少，表明系统运行的连续性强，生产控制得较好；反之，则连续性差，生产控制得不好。在评价时间一定的前提下， Q_{smp} 与 m_{max} 、 n_1 和 Q_0 均成正比，换句话说，从连铸工序的角度提高炼钢厂系统产量的办法有2种，即提高最大连浇炉数与减少非作业时间、增加浇次数。从系统运行角度考虑，按照连浇原则的内涵，要以增强连铸系统生产均衡性和单机最大连浇炉数为评价尺度，实现系统运行的连续性。

由上述分析可知,连浇原则的实施与连铸系统铸机均衡生产和单机最大连浇炉数的实现有密切的关系,在实现炉机对应原则、能耗最小原则、拉速决定流量原则的基础上,连浇与中间包及长水口的寿命、炼钢炉生产节奏以及精炼装置的“缓冲”协调功能有关,是一个涉及面广、影响因素多、较为复杂的过程,需要在系统运行优化的“有序”、“稳定”、“高效”基础上,进一步实施总体的协调平衡,优化系统运行.从连浇原则的角度考虑生产作业计划的编制,对于提高系统的运行效率有重大影响.此外,系统准连续/连续化运行对于产品质量的控制、材料消耗的降低产生积极的作用.由上可见,连浇原则的实质是对钢铁制造过程多维物质流的时间、温度和物质质量 3 个基本参数在炼钢厂系统运行过程中的优化调控,体现出系统运行的连续性.在上述相同 15 t 转炉炼钢厂产量提高的背后,单个中间包的连浇时间由 1998 年的 3~4 h 提高至 2002 年的 8~9 h,采用中间包快速更换水口技术后连浇时间可达 24 h.

综上所述,系统运行原则的提出,对于认识炼钢厂系统运行优化的层次及其关系,改善系统的运行,提高系统的效率,优化配置连铸系统的流数乃至减少连铸机的台数,对实现炼钢厂系统有序、稳定、高效、连续的运行具有指导作用.

4 系统运行调控的策略

文献[5]从钢铁制造过程物质流的 3 个基本参数出发,对电炉薄板坯连铸连轧流程系统的调控策略进行了阐述,在此基础上,文献[3]对转炉炼钢厂系统中炼钢、二次冶金和连铸 3 个工序在系统运行过程中的调控策略进行了描述.由于篇幅有限,本文不赘述.

综上所述,从钢铁制造过程系统的结构来看,炼钢厂系统的运行优化分为不同的层次,如图 3 所示,相应的调控/优化策略如下:

- (1) 过程系统层次:以系统运行原则来指导系统的整体优化;
- (2) 工序关系层次:用系统调控策略指导系统工序关系的协调优化;
- (3) 工序层次:解析炼钢厂系统的诸工序/装置过程物质流运行规律,并进行合理调控,指导系统工序功能的解析优化.

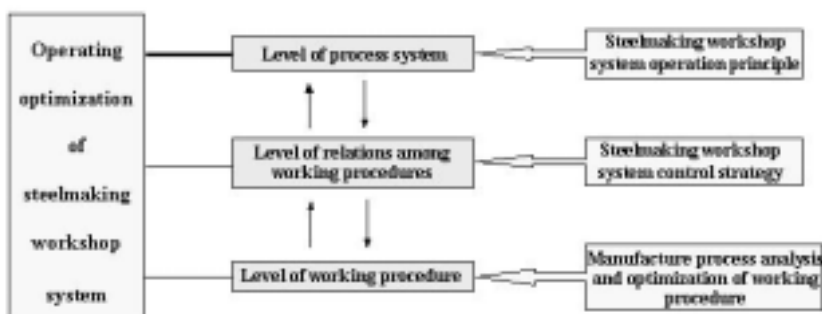


图 3 炼钢厂系统运行优化的层次与指导策略

Fig.3 Levels and guiding strategy of operating optimization for steelmaking workshop systems

从上面的分析可知,3 种调控策略的共性在于以钢铁制造过程多维物质流管制的 3 个基本参数为手段/衡量依据,是从不同尺度上对系统的运行进行优化调控,三者紧密相连、互相促进,使得炼钢厂系统的运行水平由初级阶段向高级阶段演进,炼钢厂的模式不断得以优化.

炼钢厂系统的运行原则与调控策略构成了炼钢厂系统运行控制技术的理论框架,对于钢铁制

造流程的运行优化与控制也具有借鉴作用,已经应用于炼钢厂系统的运行控制与优化配置当中^[6,7].

5 结论

(1) 钢铁制造过程系统运行动力学是炼钢厂系统运行优化的理论基础. 在炼钢厂系统内,转炉是过程物质流的推力源,连铸机是过程物质流的拉力源,如能在该区段内构筑合理、优化的“缓冲”,则可实现炼钢厂系统有序、稳定、高效、连续地运行.

(2) 从过程系统运行的角度归纳得出炼钢厂系统运行优化的逻辑与实现关系,提出指导炼钢厂系统运行优化的“炉机对应”原则、“能耗最小”原则、“拉速决定流量”原则和“连浇”原则,并进行了描述. 这4条原则分别对应系统运行的有序性、稳定性、高效性和连续性,形成较为完整的系统运行优化指导体系.

参考文献:

- [1] 殷瑞钰. 钢铁制造流程结构解析及其若干过程效应问题 [J]. 钢铁, 2000, 35(10): 1-7.
- [2] 许国志. 系统科学[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000. 310.
- [3] 刘青. 现代长材型转炉炼钢厂的模式优化研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2002. 122-126.
- [4] 殷瑞钰. 21 世纪初炼钢技术进步中若干问题的认识 [J]. 炼钢, 2001, 17(1): 1-6.
- [5] 殷瑞钰. 关于薄板坯连铸-连轧流程的工程分析 [J]. 钢铁, 1998, 33(1): 1-9.
- [6] 刘青, 殷瑞钰. 关于转炉-棒/线材生产流程的结构优化问题 [A]. 中国钢铁协会, 中国金属学会. 2002 年全国炼钢、连铸生产技术会议论文集 [C]. 2002. 55-63.
- [7] 刘青, 田乃媛, 殷瑞钰. 转炉炼钢厂的运行优化与控制 [A]. 中国金属学会炼钢专业委员会. 第 12 届全国炼钢学术会议论文集 [C]. 2002. 153-159.

Operation Principle and Control Strategy for Steelmaking Workshop System

LIU Qing¹, TIAN Nai-yuan¹, YIN Rui-yu²

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Beijing Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The steelmaking workshop is an important subsystem of steel manufacturing process system, the complexity of production process and difficulty of process control are the most concentrated expression on the multidimensional mass flow control in steel manufacturing process. Optimization and control in steelmaking zone is the key point of operation control in steel manufacturing process system. On the basis of summarizing research on mass flow control in several steelmaking workshops, the theoretical approach has been done for steelmaking system operating and controlling. The relationship between logic and realization for optimized running of steelmaking workshop has been deduced, and some supplement to control strategy of steelmaking workshop has also been made. Levels and guiding strategy of system optimized running have been expounded.

Key words: ferrous metallurgy process engineering; steelmaking workshop; operating principle; control strategy