

15 1077-1084

钢铁制造流程的解析和集成*

殷瑞钰

(钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要 对钢铁制造流程中若干深层次的理论问题进行了学科分支意义上的讨论. 对工序功能集的解析-优化, 工序关系集的协调-优化和流程工序集的集成-优化等给予物理-数学方面的概括和描述, 提出了对可能发展起来的学科分支——冶金流程学的展望. 同时进一步指出, 制造流程的系统理论和制造过程的信息系统是 21 世纪制造科学, 制造工业发展的共性基础理论.

关键词 钢铁制造流程, 解析与集成, 工序功能集, 工序关系集, 流程工序集, 冶金流程学

中图法分类号 TF01

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)10-1077-08

ANALYSIS AND INTEGRATION OF STEEL MANUFACTURING PROCESS

TF01

YIN Ruiyu

Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081

Correspondent: YIN Ruiyu, professor, Member of Chinese Academy of Engineering, Tel: (010)62181020,

Fax: (010)62182302, E-mail: mseryin@public.bta.net.cn

Manuscript received 2000-04-21, in revised form 2000-06-22

ABSTRACT Some profoundly academic problems in steel manufacturing process, which aim at setting up branch of discipline, have been discussed in this paper. The physical-mathematical generalization and descriptions have been made through analyzing optimization of the collection of procedure's functions, harmonizing optimization of the collection of procedure's relations, integrated optimization of the collection of procedure of process. The prospects of metallurgical process engineering, which would probably developed as a branch of discipline, have been pointed out. It was further pointed out that systematical theory and information system of manufacturing process are the common basic theories for development of manufacturing industry in the 21st century.

KEY WORDS steel manufacturing process, analysis and integration, collection of procedure's function, collection of procedure's relation, collection of procedure of process, metallurgical process engineering

符号说明

- A_j 生产过程中加入的能量、辅助剂等
- B_j 生产过程中的排放物、废弃物等
- C 控制策略集
- $C_{f,i,j}$ 功能 i 在工序 j 中的分配数 (0—1)
- C_j 可能出现的某些间歇现象、间歇因素等
- F 流程系统工序功能集
- $f_{i,j}$ 某一工序 i 所具备的某一功能 j
- $g(t)$ 时间参数及其表现形式
- i 过程系统中的某一项功能, 或流程内的工序序号
- j 制造流程中某一单元工序, 或流程内的工序序号

- m 流程的功能数
- n 流程的工序数
- O 工序的输出集
- P_j 生产体 (如矿石、生铁、钢液、铸坯、热轧材等)
- $P_{s,c}$ 流程系统工序集
- Q 物质量
- R 组元 (工序) 间关系的集合, 或流程系统工序关系集
- r 表示两个工序间的关系
- $r_{i,j}$ 流程中工序 i, j 的关系集
- S_{mf} 多维过程物质流系统
- S_v "粘性" 制造过程系统
- T 过程中金属流温度
- T_k 系统中影响金属流温度的有关因素
- t 过程时间
- W 金属物质量 (包括流量、浓度等)
- w 生产体的重量、流量、浓度等

* 国家自然科学基金资助项目 5944002

收到初稿日期: 2000-04-21, 收到修改稿日期: 2000-06-22

作者简介: 殷瑞钰, 男, 1935 年生, 教授, 中国工程院院士

- w_k 系统中影响金属物质量的有关因素
- X 流程工序集合
- X_I, X_O 流程中的第 I 和第 O 个工序, 它们既可能是相邻工序, 也可能是非相邻工序
- $\sum F_i$ 柔性组元 (工序) 集合
- $\sum R_i$ 刚性组元 (工序) 集合

现代钢铁制造流程系统已发展成包含资源及能源利用、质量控制、新品开发、环境保护等内容的工程技术大系统, 并进一步向准连续化 / 连续化、紧凑化 / 简化、高效化和综合利用、环境友好的方向发展. 钢铁制造流程的特点是: 规模以年产百万吨计, 而其关键环节的工艺控制和装置的技术水平不亚于任何“新”材料的水平^[1]. 钢铁工业成为世界上最高产、高效和技术先进的工业之一^[2],

进入 21 世纪更面临着市场竞争和可持续发展的挑战^[3].

一个多世纪以来, 钢铁制造过程一直是解析的方法为主, 将整个制造过程分解成原料准备与处理、焦化、炼铁、炼钢、凝固、金属塑性压力加工、金属热处理等工序并形成了学科分支, 然后机械地将过程联接起来, 造成了过程物质流的停顿、间歇, 过程物质温度的多次起伏, 能耗及物耗高、排放量大、过程时间长等问题. 因此, 迫切需要一种立足于制造过程整体系统上的理论, 来解决整体流程中的物质流、能量流及信息流优化集成问题——即进行钢铁制造流程解析-集成优化的研究, 提出新的理论和方向, 以支持钢铁工业的健康发展.

钢铁制造流程的解析与集成在不同层次上有不同的涵义, 详见图 1.

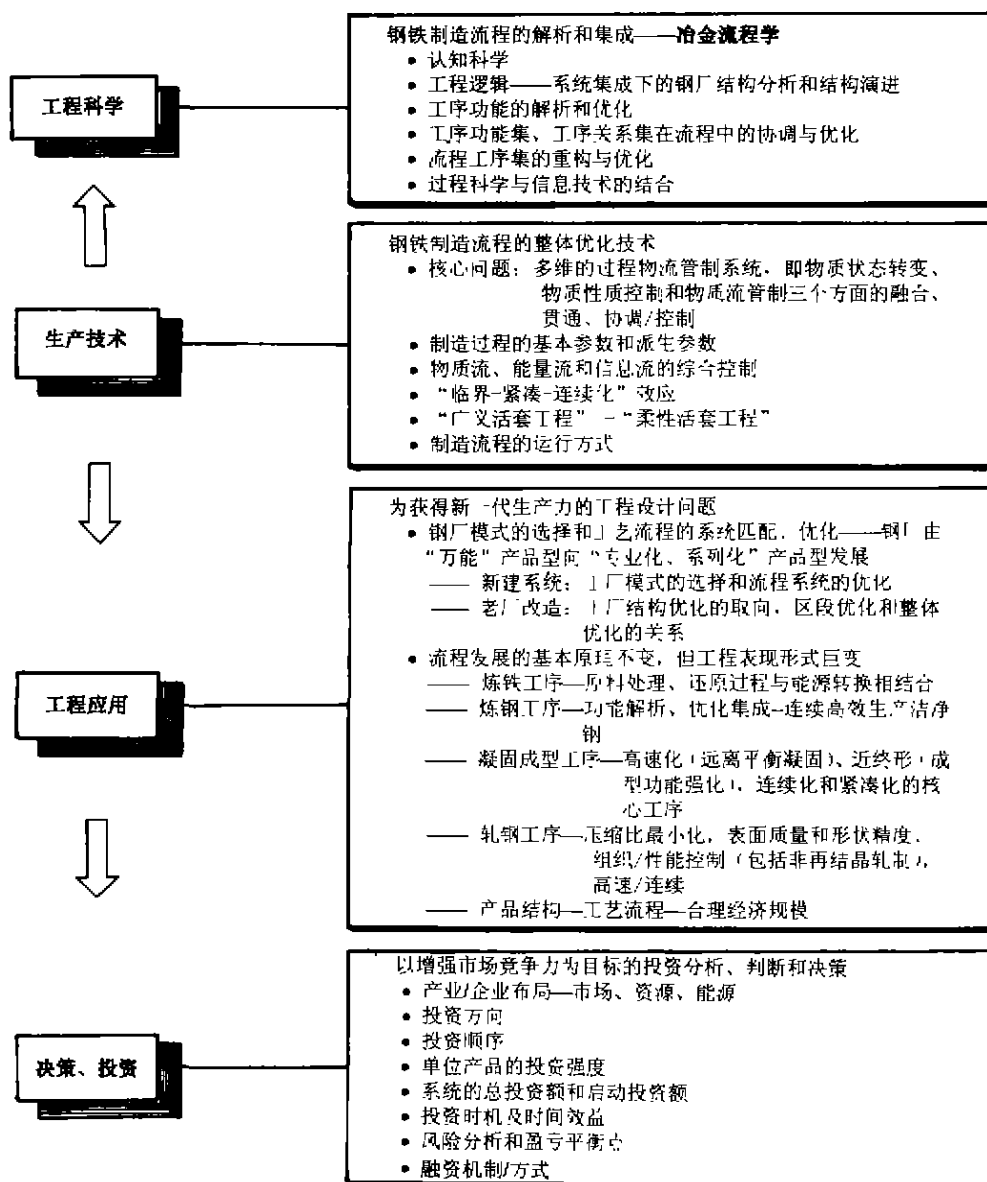


图 1 钢铁制造流程的解析和集成在不同层次上的涵义

Fig.1 The connotation of analysis and integration of steel manufacturing process in different levels

实际上是使制造流程系统朝着由“刚性组元”和“柔性组元”组成的“粘性”连续系统演进^[4]。也就是可以将现代化的钢厂类比为由“刚性组元”和“柔性组元”组成的“粘性”制造流程系统。即

$$S_v = F\left(\sum F_i, \sum R_i, R\right) \quad (2)$$

在钢厂生产流程中,上述模化的“刚性组元”、“柔性组元”只是在其不同功能上的相对意义上的抽象。在实际运行过程中,“刚性组元”在基本参数上带有一定的“弹性”(即其基本参数可在一定范围内波动);“柔性组元”也不是无限“可柔”的,在运行中带有一定的极限限制。由于流程中不同类型的“刚性组元”在运行中的“弹性”值不同,不同类型“柔性组元”的运行“极限”值不同,以致前后工序间的衔接、匹配关系不同,因此,钢铁制造流程系统的实际运行方式呈现出不同类型的“弹性链/半弹性链”谐振方式^[4]。

系统内“刚性组元”的“弹性”与“柔性组元”的“极限”以及形成这些性质(功能)的参数的组合关系,体现了整个钢厂系统的“粘性”特征。系统“粘性”特征的变化会引起流程系统内部的“粘性耗散值”的变化,最终将反映在对产品成本、质量、生产效率及环境、投资等因素的影响上。

2 冶金流程学和钢铁制造流程的解析与集成

长期以来,冶金学科的划分突出强调了过程解析基础上的学科分支,缺乏总体相关性、系统性;并在某种程度上影响了用过程信息系统等高新技术改造传统工业的有效性。因而,作为面向21世纪的工程科学问题,应该探索和研究跨现有学科分支的、作为冶金制造流程系统理论

的新学科分支——冶金流程学(metallurgical process engineering, MPE),研究制造流程的结构、功能本质及其解析与集成,无论在科学上还是经济上都有非常重要的价值。

2.1 钢厂结构的演进

第二次世界大战以后,钢铁制造流程逐步由间歇型向准连续/连续型过渡,工艺流程不断紧凑化、准连续化/连续化,产品结构专业化是钢厂结构调整的主要方向。同时,从主要注重规模的扩大和流程中工序功能的简单划分(解析)和简单叠加,转向不仅注重流程功能的解析,而且越来越注意流程功能的综合集成以及在此基础上的流程结构优化。

2.2 钢铁制造流程的结构解析

从高炉—转炉—轧钢生产流程的演进(图3)可以看出,现代化的流程系统不应是各组元的简单叠加、拼凑,它应以合理的系统结构来实现特定的功能。

因此,流程系统内各单元工序/装置应在流程整体优化的原则指导下:

——选择、分配、协调好诸多工序/装置各自的优化功能,建立起解析—优化的工序功能集合;

——建立、分配、协调好诸多工序/装置间相互的关系,建立起协调—优化的工序关系集合;

——在工序功能集的解析—优化和工序关系集的协调—优化的基础上重新组合成新一代的流程工序集,即实现流程系统内工序组成的重构—优化。

所谓流程系统结构是指系统内具有不同特定功能的工序的构成集合和各单元工序之间在一定条件下所形成的相互关系集合。系统结构的内涵不只是系统内各工序的简单的数量堆积和数量比例,更主要的是工序功能集、工

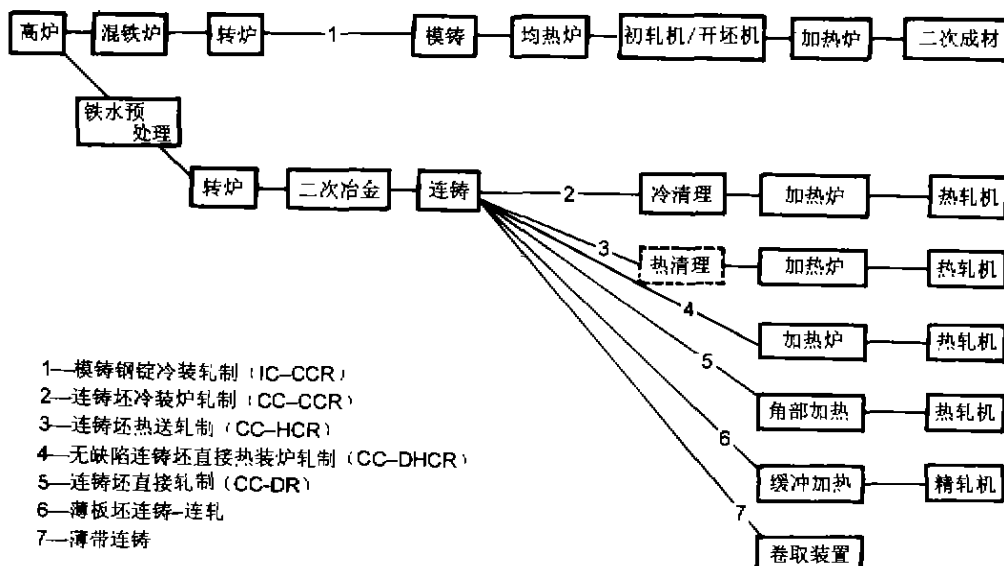


图3 高炉—转炉—轧钢生产流程的演进

Fig.3 Progress of blast furnace-converter-rolling mill producing process

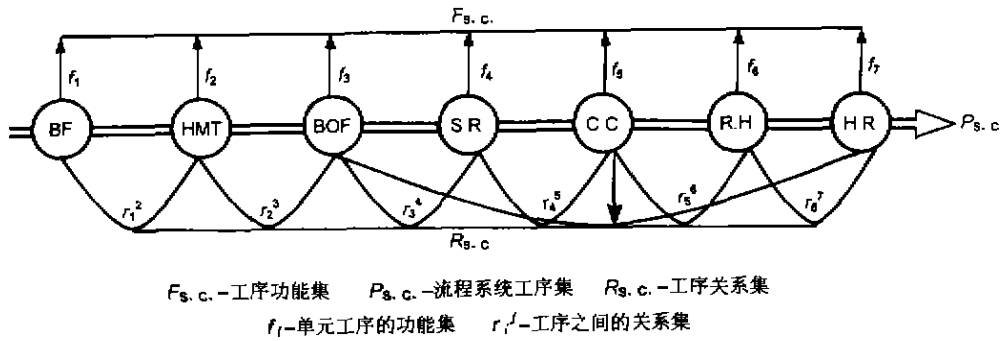


图4 钢铁制造流程解析-综合集成概念示意图

Fig.4 Scheme of some concepts used in the analysis and integration of steel manufacturing process

序关系集的合理性、系统运行的动态可调性及其内在的活力状况。

钢铁制造流程的解析-综合集成研究,就是根据流程系统的目标(群)的需要来引导流程系统的结构优化和功能优化。基本内容将涉及图4所示过程工序功能集(包括单元工序功能集)的解析-优化、工序关系集(相邻的、长期的)的协调-优化和流程系统工序集的重构-优化。

图5即为在此基础上确立反映流程结构、功能本质的

物理模型后,进而建立起的描述流程运行、调控特征的数学模型。

2.3 钢铁制造流程中工序功能集的解析-优化

所谓工序功能主要是指该工序在制造流程中发挥的主要作用。每个工序的功能往往是多元化的,同时某些功能又可以在多个工序中实现^[5],因此,又出现了某些功能在不同工序中实现的程度、优化匹配、相互取代以及综合集成等问题。转炉炼钢过程的典型实例见表1。

(过程系统定义及目标分析)

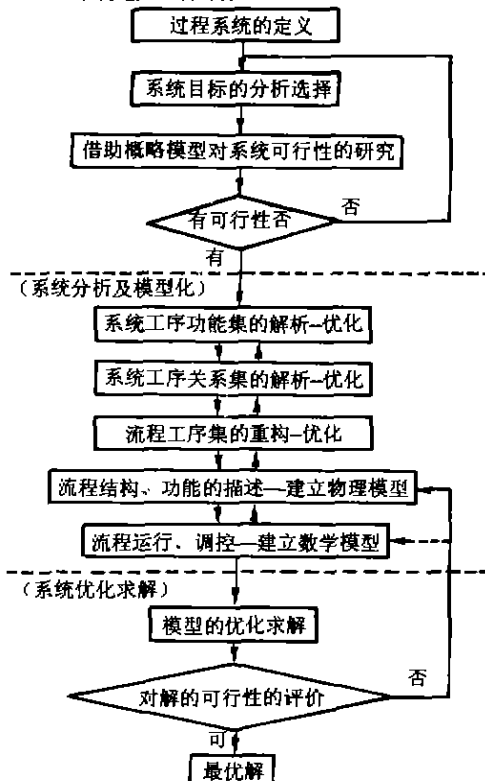


图5 钢铁制造流程解析-综合集成的分析流程图

Fig.5 Scheme of analysis and integration of steel manufacturing process

表1 炼钢过程工序功能的分解

Table 1 Disassembly of the procedure's functions in converter steelmaking process

工序功能	铁水预处理	转炉	二次精炼
脱硅	⊙ ¹⁾	← ⊙ ²⁾	
脱硫	⊙	← ⊙	→ ⊙ ³⁾
脱磷	⊙	← ⊙	→ ⊙
脱碳	⊖	← ⊙	→ ⊙ ⁴⁾
升温		⊙	→ ⊖
脱气		⊖	→ ⊙
夹杂物形态控制		⊖	→ ⊙
脱氧		⊙	→ ⊙
合金化		⊖	→ ⊙
纯净化	⊙	← ⊖	→ ⊙

- 1) ⊙ - 完成该功能的主要工序
- 2) ⊖ - 完成该功能的次要工序
- 3) ⊙ - 在该工序退化的功能
- 4) 超低碳情况下,真空脱碳更重要

由此,工序功能集至少应该分为单元工序/装置功能集和流程系统工序功能集(有时是区段系统工序功能集)。

流程系统工序功能集在流程整体优化原则指导下,首先对诸多工序的诸多不同功能进行解析,进而对不同功能在某些工序中的实现方式、实现程度进行优化选择、分配或取代,形成解析-优化的流程系统功能集。

单元工序功能集是指流程中某一工序负担的物质 / 能量转换、传输和储存以及实现规定目标所要求的特定活动, 并且要兼顾实现与其它工序之间的优化匹配和合理衔接问题, 为使工序功能更有效地解决物质 / 能量转换、传输和储存的各状态参数在流程中的合理衔接和匹配, 必须同时解决时间因素上的协调和空间上的合理配置。

若以 F 表示钢厂制造流程中工序功能集, 用 $\{f_{ij}\}$ 表示过程系统的单元工序功能集, 则

$$F = \{f_{ij}\} \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

这样, 系统中任一工序功能集 $\{f_{ij}\}$ 在数学表示形式上都具有相同的维数, 若某一工序不具备的功能可以用 0 表示, 因此, 钢铁制造流程的系统功能集 F 可以用下式表示

$$F = |f_{ij}| = \begin{array}{c} \text{功能 1} \\ \text{功能 2} \\ \vdots \\ \text{功能 } m \end{array} \begin{array}{cccc} \text{工序 1} & \text{工序 2} & \cdots & \text{工序 } n \\ f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{array} \quad (4)$$

流程系统功能存在某功能在相关工序间的优化分配问题, 这种分配 / 分担关系的优劣须用贯穿整个流程的基本变量 (物质质量 (包括质量、流量、浓度等)、温度和时间) 来评估, 即

$$f_{ij} = f\left(W\left(\sum w_k\right), T\left(\sum T_k\right), g(t)\right) \quad (5)$$

$$C_{f_{i,j}} = f'\left(W\left(\sum w_k\right), T\left(\sum T_k\right), g(t)\right) \quad (6)$$

2.4 钢铁制造过程中工序关系集的协调 - 优化

钢铁制造流程内的工序关系集不仅要考虑工序之间 (包括相邻关系和长程关系) 在时间因素、空间因素、温度因素、工序功能和装备能力的衔接匹配, 而且还要重视工序之间输送方式的合理性 (不仅是输送装备、输送状态, 而且还涉及工厂的平面布置), 即实现工序关系集的协调 - 优化, 使过程中金属物流衰减、金属流的温度起伏、过程时间和过程库存量均实现“最小化”, 以及产品质量、使用性能满足率实现优化等。

在流程系统的发展过程中, 有时某工序处于带领地位 (例如连续铸钢), 同时带动着相邻工序的发展 (见图 3)。从图 3 可见, 以高炉 - 转炉 - 热轧为代表的钢铁制造流程工序关系集不断演进, 而且由于对连续化、紧凑化、节律化、协同化等方面的追求, 使工序关系集的内涵越来越丰富。

工序功能的解析 - 优化是工序关系集优化的基础, 工序功能一般可以归纳为“容量”性功能 (如产量、生产率、输送能力等) 和“强度”性功能 (如产品或半成品的质量、性能等), 因此, 工序之间的关系一般可以概括为“容

量”性衔接、匹配关系和“强度”性衔接、匹配关系, 通过工序功能的解析 - 优化和工序之间衔接、匹配关系的协调 - 优化, 可以组成一系列短程 / 长程工序关系和工序关系集合 —— 包括物质质量、物质流量、物质浓度、温度、能量、时间、空间、组织 / 性能、质量等方面的衔接、匹配关系 —— 它实际上是一系列的、广义的“活套”工程, 其可靠性和灵活性在某种意义上标志着制造流程的整体性能的优劣, 总的追求目标是朝着尽可能小的“活套”容量发展, 例如高炉 - 混铁炉 - 平炉 - 模铸 - 钢锭库 - 均热炉 - 初轧机 - 中间坯库 - 加热炉 - 热轧机这样的流程, 为保证正常生产运行, 其“活套”的容量非常大; 而高炉 - 鱼雷罐车 - 铁水“三脱”预处理 - 转炉 - 二次冶金 - 薄板坯连铸 - 热带连轧机流程的“活套”容量则明显变小, 其技术意义以及经济价值不言而喻。

应用集合的概念可以表示系统各工序之间的关系。

令 X 为高炉 - 转炉流程钢厂内各工序 X_I 的集合, 由于系统各工序之间具有特定的“容量”性、“强度”性以及“时间”性关系^[6], 这些关系同时包含因果、功能、孕育关系 (长程关系往往如此) 以及传输关系等工程上的关系集合, 按照系统论的观点, 如果系统的某一工序 $X_I \in X$, 与系统的另一工序 $X_O \in X$ 具有影响关系, 用 r 表示这个关系, 则

$$X_I r X_O, \quad X_O r X_I \quad (7)$$

或

$$X_O = r(X_I), \quad X_I = r(X_O) \quad (8)$$

实际上流程运行过程必须依靠各单元工序间各类广义“活套”的相互协调 - 优化, 因此工序间关系集 (如以 R 表示) 包括了流程工序间的各类广义“活套”关系, 其实质是工序间“活套”关系的集合。

由于不同类型高炉 - 转炉钢厂生产过程系统是相互间具有特定关系的多个工序组成的总体, 则整个过程系统的工序关系集有如下表达式

$$R = \{r | r = (X_I, X_O)\} \quad I, O = 1 \sim n \quad (9)$$

若用矩阵表示上述工序关系集, 则有

$$R = |r| = \begin{array}{c} \text{工序 1} \\ \text{工序 2} \\ \vdots \\ \text{工序 } n \end{array} \begin{array}{cccc} \text{工序 1} & \text{工序 2} & \cdots & \text{工序 } n \\ r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{array} \quad (10)$$

单元工序之间的关系集合主要表现为相邻工序之间的关系集合, 同时也表现为非相邻工序之间的关系集合, 则

$$R = \{r_{ij} | i = 1 \sim n, j = 1 \sim n\} \quad (11)$$

由于单元工序之间的内涵和表现形式非常复杂, 似乎以钢铁制造流程中的基本参数 (W, T, t) 来描述单元工序间的关系集将更为简便, 则

$$r_{ij} = f\left(W\left(\sum w_k\right), T\left(\sum T_k\right), g(t)\right) \quad (12)$$

2.5 钢铁制造过程中流程工序集的重构 - 优化

150 多年来钢铁工业技术进步的历程表明:

—— 一批新工艺、新装备在创新过程中发展, 例如氧气转炉、连铸、铁水预处理、二次冶金、控轧控冷、薄板坯连铸 - 连轧、薄带连铸、直接还原以及熔融还原等;

—— 一批工艺、装置在逐步演进、完善过程中得到发展, 例如高炉大型化、超高功率电炉、大型烧结机、热连轧机以及无缝钢管轧机等;

—— 一批工艺、装置在竞争过程中被更替和淘汰, 例如 Bessemer 转炉、Thomas 转炉、平炉、混铁炉、模铸、初轧 / 开坯轧机、横列式轧机、叠轧薄板轧机、小电炉及烧结锅等。

上述技术进步的过程都体现出制造过程中工序功能的解析 - 优化、工序关系集的协调 - 优化以及随之出现的流程工序集的重新构造 - 优化。总之, 钢铁制造过程中的基本参数不断向“临界 - 优化”方向收敛, 由此引起一系列工艺、装置的替代、淘汰关系, 最终引起了结构性的变化, 其主要体现是流程工序组成的改变 —— 流程工序集的重构 - 优化。

流程工序集的重构 - 优化也可以用集合概念来表示。设流程系统 X 是由诸多可识别的、独立的、具有特定功能的工序 X_I 组成的集合, 则

$$X = \{X_I \in X | I = 1 - m\} \quad (13)$$

由于流程系统是由“刚性组元”和“柔性组元”工序组成的, 故也可以表示为

$$X = \{(X_{F_i}, X_{R_i}) | X_{F_i} \in X, X_{R_i} \in X\} \quad (14)$$

上述钢铁制造过程的工序功能集、工序关系集和流程

工序集的描述, 旨在建立钢厂生产过程中系统功能、系统结构的物理模型 - 数学模型, 系统的模型化是深入了解系统结构、系统功能及不同功能间互相关联性的有效方法。

若用 S_{mf} 表示钢厂生产过程的多维物质流管制系统, 以 X 表示生产工序集合, R 表示系统中工序关系集合, F 表示系统工序功能集合, 则钢厂生产过程多维物质流管制系统可以表述为

$$S_{mf} = \{(X, F) | R\} \quad (15)$$

钢厂生产过程多维物质流管制系统的集成 - 优化在很大程度上体现在流程工序功能集的解析 - 优化、流程工序关系集的协调 - 优化及流程工序集的重构 - 优化。

3 过程科学与信息技术在制造流程中的结合

钢铁工业属于流程制造业, 信息技术在钢铁制造流程中的应用将主要体现在对过程的描述 (反映), 对过程或装置的调控、反馈以及对流程系统的评估、优化等方面。经过不断完善将会形成一种流程系统的控制策略。

流程系统的控制策略主要集中在对工艺过程中主要参数的调控、优化和使工艺过程中各工序总体目标的稳定实现。随着过程物流在工序间流动运行, 控制策略将呈现衔接、传递、转变、遗传等特性要求。当然, 流程系统的控制策略必须是既能在各工序中贯通, 又能在一系列工序的各自优化目标上分别得到调控和实现。

如前所述, 钢铁制造流程的特性可用工序功能集 (F)、工序关系集 (R) 和流程工序集 (X) 来描述。为了实现对流程的总体协调 - 优化和评估 - 判断 - 反馈 - 调控, 在流程系统中必须有一系列的控制策略, 形成控制策略集 (C)。这样, 流程系统及其各工序经过主要由信息技术构成的控制策略集的调控后, 将分别产生工序的输出集 (O), 由此则形成了如图 6 所示的钢铁制造流程结构图。

过程科学与信息技术的结合将更好地描述流程系统物理模型, 进而提高数学模型的有效程度和可靠性。

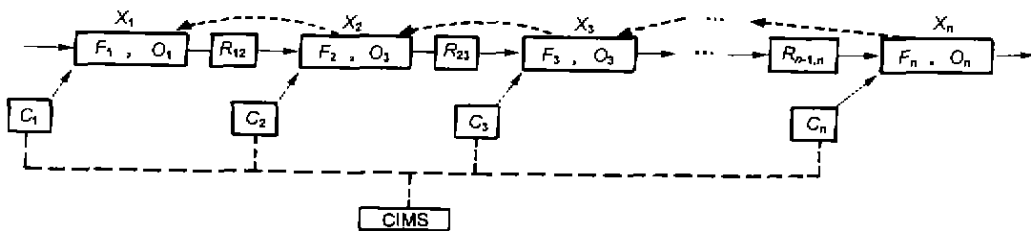


图 6 钢铁制造流程结构示意图
Fig.6 Structure scheme of steel manufacturing process

4 结论

“大制造”的概念已在全球范围内得到广泛认可,它几乎包括了一切工业产品的制造业。制造流程系统理论和制造过程信息系统是 21 世纪制造科学、制造业发展的重要共性基础理论。

钢铁工业是一种流程制造业,它既不同于离散事件型的机械制造装配工业,也不同于石油化工类的连续过程工业。钢铁工业是介于两者之间的混合类型,其制造流程的特点是间歇 / 准连续型的物质流过程。

钢铁制造过程从本质上看是集物质状态转变、物质性质控制和物质流有效管制于一体的、多维的过程物流管制系统。迫切需要有一种立足于制造过程整体系统上的理论,来解决整体流程中的物质流、能量流、信息流优化 - 集成问题。

作为科学问题,应该探索和研究跨现有冶金学科分支的冶金流程学这一可能发展起来的学科分支。冶金流程学应建立在对钢铁制造流程进行解析 - 集成的研究以及过程科学与信息技术结合的基础上,将涉及钢厂结构整体优

化的工程逻辑,以及制造流程中工序功能集的解析 - 优化、工序关系集的协调 - 优化和流程工序集的重构 - 优化等。

参考文献

- [1] National Research Council (USA). Translated by Beijing Institute of Aeronautical Materials et al. *Materials Science and Engineering for the 1990 s*. Beijing: Aviation Industrial Press, 1990: 143
(美国国家研究委员会编,北京航空材料研究所等译. 90 年代的材料科学与工程. 北京: 航空工业出版社, 1990: 143)
- [2] Kavanagh L. Translated by Han J T et al. *Steel Industry Technology Roadmap*. Beijing: Sciences Press, 1998: 1
(Kavanagh L 主编,韩静涛等译. 钢铁工业技术开发指南. 北京: 科学出版社, 1998: 1)
- [3] Yin R Y. *Iron Steel*, 1997; 32(Suppl.): 16
(殷瑞钰. 钢铁, 1997; 32(增刊): 16)
- [4] Yin R Y. *Acta Metall Sin*, 1997; 33: 29
(殷瑞钰. 金属学报, 1997; 33: 29)
- [5] Yin R Y. *Acta Metall Sin*, 1993; 29: B289
(殷瑞钰. 金属学报, 1993; 29: B289)
- [6] Yin R Y. *Iron Steel*, 1998; 33(1): 1
(殷瑞钰. 钢铁, 1998; 33(1): 1)