



## 电弧炉炼钢过程的系统工程思考

陈 煜<sup>1</sup>, 赵瑞敏<sup>2</sup>, 魏光升<sup>3</sup>

(1 中国金属学会, 北京 100081; 2 北京中冶设备研究设计总院有限公司, 北京 100029;

3 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘 要:**随着系统科学体系的逐步完善, 钢铁生产方式由于科技创新和发展也经历了从经验模式转变为科学生产模式, 对具有过程系统特征的钢铁工业, 可以应用系统工程的方法整体进行思考和分析, 借助系统科学的技术手段对复杂的电弧炉炼钢过程进行抽象描述, 将复杂的涉及多物态多能态的电弧炉炼钢过程抽象为以物质和能量转化为约束的单元系统, 全面理解电弧炉炼钢生产中能量和物质转化过程, 对约束条件附加过程时序因素, 可以建立过程模型对生产过程进行模拟, 针对实际工况下电弧炉冶炼过程的系统解析和抽象, 能够建立以工艺操作为控制因素的过程控制模型, 对实际生产炉料结构产生的问题, 准确分析影响技术经济指标的关键工艺因素, 解决了目标温度和碳含量“同步”问题, 取得了将单炉冶炼周期缩短 2 min 的生产效果。

**关键词:**电弧炉炼钢; 系统工程; 过程优化

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00041 **中图分类号:**TF087

## Systems Engineering Considerations for the Electric Arc Furnace Steelmaking Process

Chen Yu<sup>1</sup>, Zhao Ruimin<sup>2</sup>, Wei Guangsheng<sup>3</sup>

(1 The Chinese Society for Metals, Beijing 100081, China; 2 Beijing Metallurgical Equipment Research Design Institute Co., Ltd., Beijing 100029, China; 3 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the gradual improvement of the system science system, the iron and steel production mode has undergone a transformation from the empirical mode to the scientific production mode due to scientific innovation and development, the iron and steel industry with the characteristics of the process system can apply the system engineering approach to think and analyze as a whole, with the technical means of systems science to abstract the complex electric arc furnace steelmaking process description, the complex involving multiple states of matter and energy states of the electric arc furnace The abstraction of the steelmaking process into a unit system with material and energy transformation as constraints, a comprehensive understanding of the energy and material transformation process in the electric arc furnace steelmaking production, the constraints additional process timing factors, you can establish a process model for the simulation of the production process, for the actual working conditions of the electric arc furnace smelting process system analysis and abstraction, to be able to establish a process control model with process operation as the control factor, for the actual production of furnace charge It can analyze the key process factors affecting the technical and economic indexes, solve the problem of "synchronization" of target temperature and carbon content, and achieve the production effect of shortening the smelting cycle of single furnace by 2 minutes.

**Key Words:** Electric Arc Furnace Steelmaking; Systems Engineering; Process Optimization

钢铁工业是国民经济的支柱性基础产业, 短流程炼钢生产工艺是以电弧炉为生产设备, 以废钢为主要原料, 利用电能为主要转化能量的铁元素循环利用过程, 是现有炼钢生产技术中能保障经济社会可持续发展的重要钢铁生产流程<sup>[1-3]</sup>, 在当今“双碳”目标约束下的经济社会发展中, 促进短流程电弧炉炼钢健康发展, 对促进国内钢铁工业的低碳可持续发展具有重要的战略意义<sup>[4-5]</sup>。

国内经济发展受资源条件约束, 钢铁生产长期

以长流程转炉炼钢为主, 2021 年中国粗钢产量为 10.33 亿吨, 其中电弧炉炼钢产量占比约为 10.7%, 与世界同期平均水平 26.3% 存在较大差距<sup>[6-11]</sup>。从生产技术角度看, 电弧炉炼钢过程由于涉及物料从固态到液态和气态的转变, 能量涉及电能和化学能以及物理热的转化, 生产过程相较转炉炼钢在动力学和热力学上要复杂的多, 实际生产工艺控制难度较大, 虽然近年来国外在电弧炉炼钢生产效率方面有了大幅提高, 已经在某些吨位装备情况下接近同

吨位转炉炼钢生产效率,如何能够全面正确的认识电弧炉炼钢过程,能够在实际生产中精准控制操作工艺参数,取得良好的生产技术指标显得非常重要<sup>[12]</sup>。

李士琦教授团队长期从事电弧炉炼钢生产工艺的研究<sup>[13-19]</sup>,在李士琦教授不断完善冶金系统工程理论的基础上,以系统工程的方法从整体上解析电弧炉炼钢过程,探索全局性理解其过程,探究复杂过程中的限制性操作因素,建立符合实际生产需求的系统控制模型,以达到优化控制其生产过程和提高其生产效率。

## 1 冶金系统工程

系统工程是以系统的思维方法,在解决工程问题时采用数学的最优化方法,得到工程系统整体的最优的综合化的组织、管理、技术和方法的总称。冶金系统工程就是将系统工程思维运用到观察和认识冶金工程现象,或者说是研究冶金工程现象的系统性质和规律,并解决冶金工程问题<sup>[20-24]</sup>。

钢铁生产属于过程工业,即原料经一系列的单元工序被加工成合格产品的工艺过程,其中包括能量的转换。电弧炉炼钢生产过程是涉及到多种原料、多种能源的复杂物质和能量转化过程,实际工作单元如图1(a)所示,由于其主要能源来源于电弧的热量,过程中伴随着物理热和化学热转化,对生产过程和控制增加了相应的设备系统和操作,为分析和控制电弧炉炼钢过程增加了很大的难度,可以对复杂的生产过程抽象出关键影响因素,如图1(b)所示。

李士琦教授<sup>[26]</sup>的冶金系统工程理论认为冶金工程本身是一类客观存在的工程实体,属于过程系统范畴,这样的过程系统具有众多的变量,各变量

之间的关系又非常复杂,仅采用化学的方法、物理化学的方法,或物理的方法都无法给出恰当的描述,采用系统工程的方法更能接近其本来的面目。在工程实践中,冶金工业生产中人们一直在大量地、经常地运用系统工程的观念和方法实现工程目的,尚未归纳和提炼出明确的理论体系。

## 2 电弧炉炼钢过程的系统工程分析

### 2.1 电弧炉炼钢生产的过程抽象

电弧炉炼钢过程涉及高温、多相的冶金反应过程,为达到过程控制的目的,需要建立过程工艺模型,运用系统工程的思维方法,将过程系统从环境中抽象出来,视为“黑箱”方便研究其外部特征,过程因素包括输入变量、输出变量、设备参数和工艺参数四大类。从生产控制角度,电弧炉炼钢生产过程可控操作因素可以分为两大类,一是物料相关因素,二是能量相关因素,这两大类因素决定了生产过程的最终结果,若要获得成分合格的钢水,合理的钢水温度、高的生产率就需要对电弧炉炼钢过程中这两大类因素进行控制和优化<sup>[27]</sup>。

运用冶金系统工程方法将电弧炉炼钢过程抽象为物质转变和能量转化的单元耗散系统,如图2所示:从物质流角度-环境中的含铁原材料进入到系统中,物态由固态到液态的转变,成分由非均质到均质化的碳基合金转化;从能量流角度-环境中的电能和化学能,转变为产品的物理热和耗散到环境中的能量,使产品具有一定的流程加工性能。通过进行过程抽象描述,将复杂的电弧炉炼钢过程表达为一个科学抽象的过程:对于电弧炉炼钢过程抽象为一个以物质和能量为输入,热焓和成分为输出目标,能量转换和物质转换为约束条件的单元系统;借助系统科学的工具对过程进行分析,可以简化为

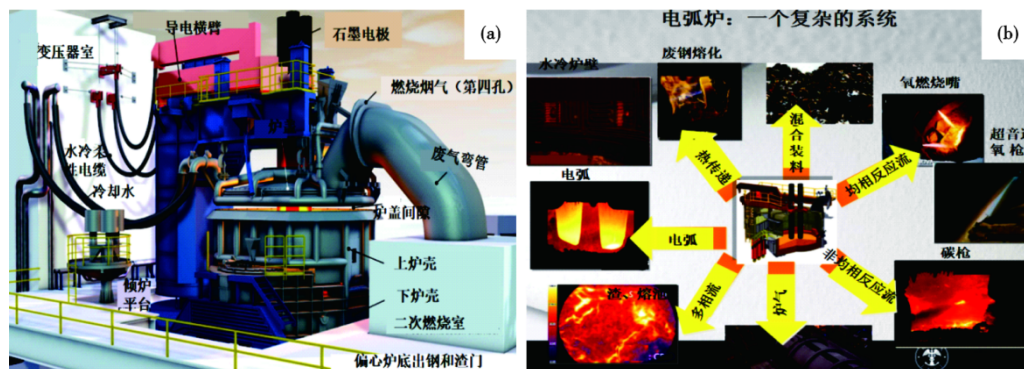


图1 电弧炉炼钢生产过程系统<sup>[25]</sup>

Fig. 1 Electric arc furnace steelmaking production process system<sup>[25]</sup>

能量转化和物质转化约束的优化问题;提高生产率的生产问题就转变为针对性解决限制性操作因素,达到改善实际生产过程的工程问题。

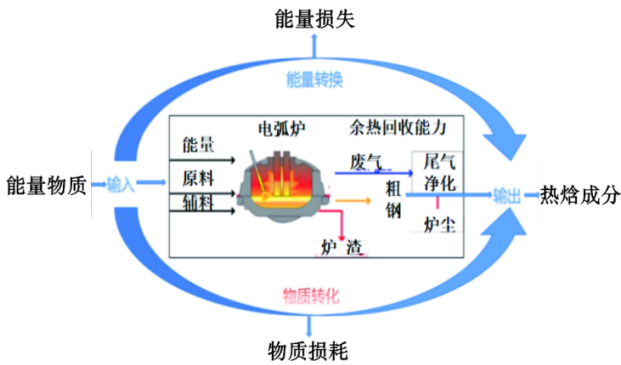


图2 电弧炉生产过程的抽象描述

Fig. 2 Abstract description of the electric arc furnace production process

### 2.2 电弧炉生产过程的动态抽象描述

电弧炉冶炼装置为一单元生产系统,包括供电系统及其辅助能源提供系统,在一个用于盛钢液的炉体内进行物质转变,以冶金系统工程观点来看,该单元系统可以抽象为一个“反应器”。该单元系统的重要技术特征是物质与能量的高效转化,电弧炉炼钢生产过程主要是固态金属料熔化,出于对原料的特点考虑,为高效接收电弧热源的辐射热将电能转化为钢液的物理热熔化废钢,在炉体设计时采用小的高径比炉膛,电弧炉生产过程的限制性问题是传热学问题;当系统原料条件改变,从以固态含铁原料为主转变为以液态含铁原料为主时,电弧炉生产过程的限制性问题是脱碳的动力学问题。

通过系统科学的抽象描述,结合电弧炉炼钢过程的实际特点,将抽象的从初始到目标的系统工程问题赋予过程的时序特性,转化为物质能量转化时序约束下的从初始状态到目标状态的动态优化过程,即为单元系统过程中物质转化速率与能量转化速率作为约束条件的优化匹配工程,如图3所示,进而可以采用系统科学体系的优化控制技术对电弧炉炼钢过程进行分析和优化。

## 3 电弧炉炼钢过程问题的系统工程分析

### 3.1 电弧炉炼钢过程问题产生

铁水具有大量的物理热和化学热,热装铁水可以满足电弧炉炼钢高效化所需要的热能,即铁水的加入,增加了电弧炉炼钢物理热和化学热的供应,

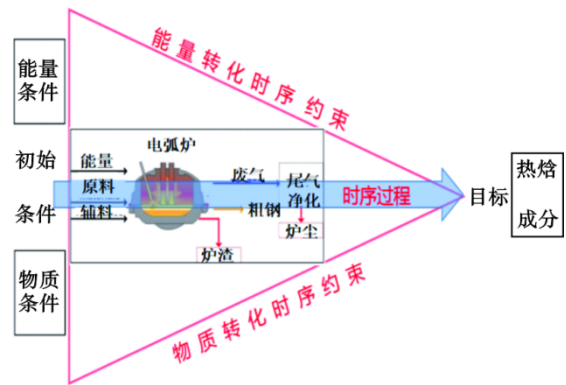


图3 物质和能量时序转化的单元约束优化系统

Fig. 3 Unit-constrained optimization system for temporal transformation of matter and energy

提高了单元系统内的能源供给速率,提高了能量和物质转化速率,能够实现生产的高效化。但随之带来的冶金问题是,由于反应器形状的影响,熔池的充分混合成为限制性环节,影响了钢液内的传热条件和传质动力学,导致冶炼末期熔池内碳含量较低时温度均匀和脱碳反应进行困难,如何保证反应器内能量供给的速度与脱碳反应进行的速度达到“同步”,是保证电弧炉兑入大量铁水后实现反应器高转化效率的关键,在这方面存在相关的冶金工程问题。

随着炉料结构的改变,电弧炉炼钢过程中能量的输入构成及速率有了较大的改变,热铁水携带的化学能和物理能提高了电弧炉炼钢过程的能量输入功率,电弧炉炼钢中配入大量的热铁水后必需通过强化供氧操作才能将铁水带入的化学能高效的利用,由于电弧炉炉体的设计问题,大幅限制了冶炼过程中的脱碳反应速度和温度的均匀性,随着供氧强度的提高,尤其是在冶炼的末期,势必造成钢液的局部氧化,从而使渣中氧化亚铁增高,金属收得率降低,如何尽量避免或减少这种情况的发生,也是非常值得研究的冶金问题。

### 3.2 工程实例背景

某钢厂100 t电弧炉技术参数见表1。

冶炼操作过程中,炉料为配加49%的铁水和51%的废钢,采用70 t料篮一次性装料模式,吊运铁水包通过铁水溜槽向炉体提供铁水。随时间进行的炼钢过程操作参数如图4所示。

基于现场实际生产炉次统计的数据,计算出单元系统过程的总物料计算和能量平衡如图5<sup>[28]</sup>。

### 3.3 实际生产过程中的冶金工程问题

由于兑入高比例热铁水,应考虑供电升温与供

表 1 100 t 电弧炉主要工艺设备参数

Table 1 Main process equipment parameters for 100 t EAF

名称	参数
类型	交流电弧炉
公称容量/t	100
平均出钢量/t	105
最大出钢量/t	110
炉壳直径/mm	6500
石墨电极直径/mm	Φ610
炉壁氧枪数目/支	3
炉壁碳枪数目/支	2
碳粉流量/(kg·min <sup>-1</sup> )	2×(20~60)

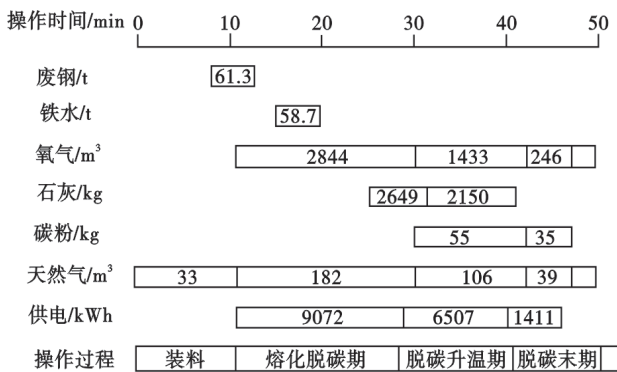


图 4 100 t 电弧炉炼钢过程操作-时间图

Fig. 4 100 t electric arc furnace steelmaking process operation-timing diagram

氧脱碳操作的匹配问题; 熔化初期, 钢液温度低, 废钢未完全熔化, 有废钢的有效包围, 氧枪采用烧嘴模式, 以辐射传热为主, 主要进行切割废钢操作, 熔化后期形成一定的熔池, 可以提高供氧档位, 提高氧气利用率, 此阶段以脱碳升温为主, 不建议大功率供电, 同时应避免停电等待脱碳的操作, 减少热停损失。

在脱碳升温期, 随着冶炼过程的进行, 熔池逐步变大, 此时热铁水中剧烈的脱碳反应有利于造泡沫渣, 熔池搅拌和对电弧的覆盖较好, 此阶段熔池整体热效率最好, 可采用大功率供电、大流量供氧。

脱碳末期, 由于钢液中碳含量降低, 此时进入脱碳限制性环节, 熔池内碳氧反应强度较低, 造成钢液搅拌强度降低, 熔池均匀性变差, 容易造成局部过氧化, 泡沫渣操作很难实现, 电弧热效率较低, 给冶炼操作带来很大困难, 往往会造成冶炼时间延长。

根据生产现场观察和交流, 在生产临近终点时, 存在钢液温度和碳含量不能同时达到预期目标的情况, 图 6(a) 中的操作在第 38.4 min 到达温度目标, 第 41.1 min 到达碳含量目标, 延长了冶炼周期 2.7 min, 降低了生产效率。图 6(b) 中的操作炉次在临近冶炼终点时温度和碳含量几乎同时达到预期目标, 但是冶炼过程中存在熔化结束后停电进行吹氧脱碳的操作, 造成高温条件下的热停工, 产生大量热量损失, 造成能量转化效率下降, 间接降低了生产效率。

#### 4 电弧炉炼钢过程问题的系统工程解决方案

在前期对电弧炉炼钢过程进行抽象简化为单元操作系统, 根据实际生产炉料结构, 依据物料平衡和能量平衡确定单元系统过程总的能量需求, 按冶金操作将时序约束转化为各个操作阶段的能量需求; 每个操作阶段内先确定钢液物理热需求, 然后根据物质转化约束, 确定脱碳速度, 制定供氧操作制度, 再根据能量转化约束确定电能供给速率, 制定供电操作制度, 进而使两项能量功率在单元系统内对时间的累积满足工位级该时段的能量需求, 最终使各操作阶段的能量供给之和与实现物质转

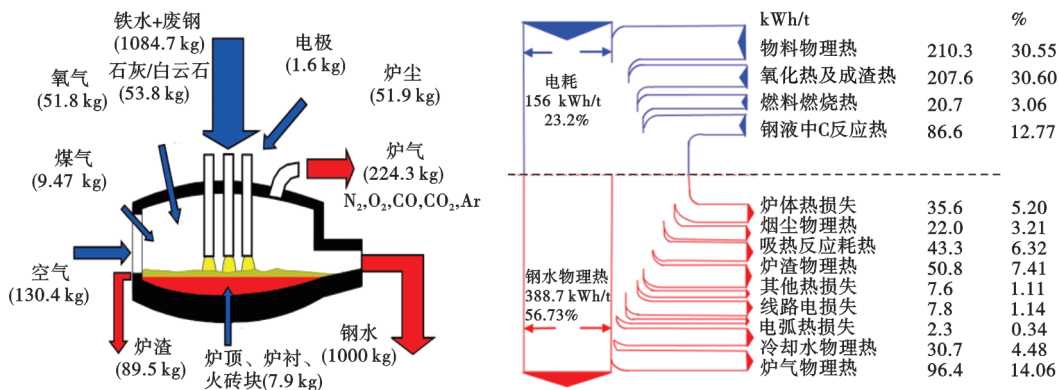


图 5 100 t 电弧炉铁水比 49.0% 冶炼的物料平衡图、能量平衡图

Fig. 5 Material balance diagram and energy balance diagram of 100 t electric arc furnace molten iron ratio 49.0% smelting

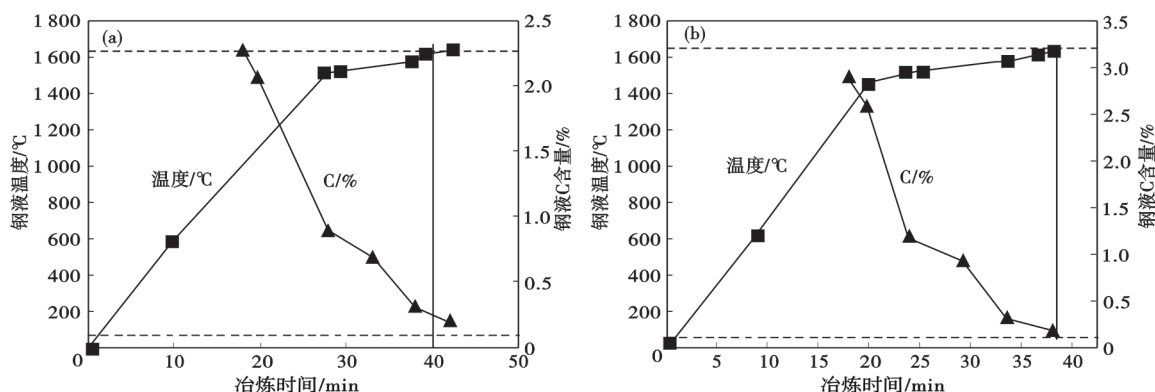


图 6 两组典型操作炉次脱碳升温曲线<sup>[28]</sup>  
 Fig. 6 Decarburization and heating curves of two typical operation heats<sup>[28]</sup>

化的总能量需求相匹配;在此原则基础上,建立附加时序约束的生产过程物料和能量平衡模型,对系统过程进行优化,目标为最短冶炼时间内达成目标温度和目标碳含量同时满足,从而实现炼钢生产过程的高效化。

为此,进行了控制模型建构,模型设计有 157 个工艺变量,76 个统计数据,对现场实际生产 1 622 炉次数据进行统计分析,分析结果用于校正控制模型计算参数。通过对现场具体炉次生产过程中供电、供氧等的实时操作记录,分阶段计算电弧炉炼钢过程的电能热效率、化学能热效率,在单元系统目标“同步”匹配的思想指导下,合理优化各阶段供氧供电制度,通过模型预测,可以在 23 min 的冶炼时间内达到“同步”目标的冶炼控制(1 633 °C),如图 7(a)所示,将优化调整后的操作控制制度应用于实际生产过程,经生产统计分析,可以在冶炼时间为 32 min 内实现“同步”到达预期目标的冶炼控制目的(1 640 °C),如图 7(b)所示。

### 5 结论

(1)“双碳”目标约束下的经济社会发展中,促进短流程电弧炉炼钢健康发展,合理统筹规划经济社会铁元素循环,是钢铁工业减少碳排放量的重要途径之一,对促进钢铁工业的低碳可持续发展具有重要的战略意义,对电弧炉炼钢过程中影响生产效率的冶金问题进行研究非常有必要。

(2)电弧炉炼钢过程是涉及多种物质转化和能量转化的复杂过程系统,应用冶金系统工程方法可以将电弧炉炼钢过程进行科学抽象,并将其生产过程抽象化为以物质和能量转化为约束的单元系统。

(3)结合生产过程的时序条件,将电弧炉炼钢过程抽象为:根据物质和能量转化约束的过程,系统转变为物质转化速率和能量供给速率为约束的动态优化过程,建立以工艺操作因素为控制因素的控制模型,解决实际冶金工程问题。

(4)针对 100 t 电弧炉炼钢实际生产过程中采用配加热铁水提高能量供给速率,从而造成物质转化

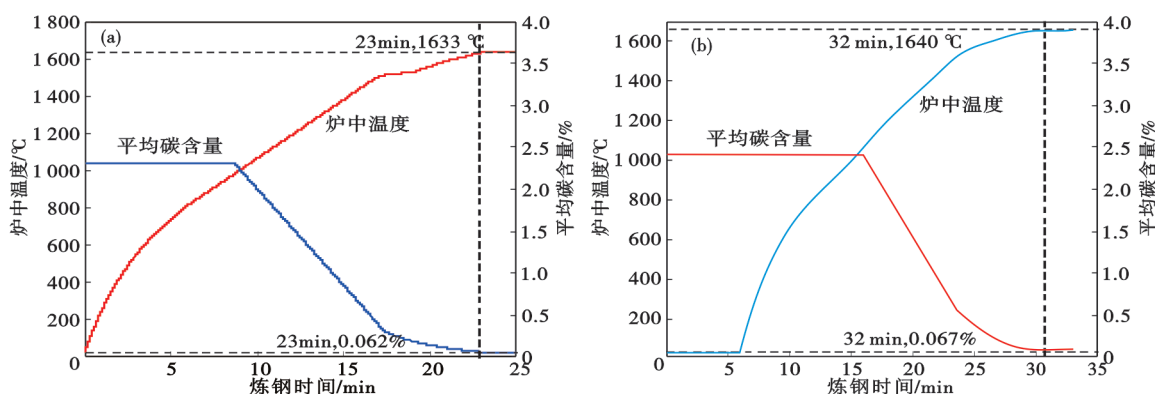


图 7 优化工艺脱碳升温预测变化曲线(a)和优化后实际生产脱碳升温变化曲线(b)<sup>[28]</sup>

Fig. 7 Prediction curve of optimized process decarburization (a) and temperature increase curve of actual production after optimization (b)<sup>[28]</sup>

和能量转化过程由于不“同步”产生的冶金工程问题,采用冶金系统工程的优化技术很好的解决了目

标温度和碳含量“同步”问题,取得了将单炉冶炼时间缩短2 min的生产效果。

#### 参考文献

- [1] 上官方钦, 酆秀萍, 周继程, 等. 中国废钢资源发展战略研究[J]. 钢铁, 2020, 55(6): 8-14.
- [2] “黑色金属矿产资源强国战略研究”专题组. 黑色金属矿产资源强国战略研究报告[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [3] “黑色金属矿产资源强国战略研究”专题组. 我国黑色金属资源发展形势研判[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 97-103.
- [4] 崔志峰, 徐安军, 上官方钦. 国内外钢铁行业低碳发展策略分析[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1496-1506.
- [5] 姚同路, 吴伟, 杨勇, 等. “双碳”目标下中国钢铁工业的低碳发展分析[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(6): 505-513.
- [6] 上官方钦, 刘正东, 殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 15-20.
- [7] 邢奕, 崔永康, 田京雷, 等. 钢铁行业低碳技术应用现状与展望[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 801-811.
- [8] 薛英岚, 张静, 刘宇, 等. “双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4392-4400.
- [9] 李新创, 李冰. 全球温控目标下中国钢铁工业低碳转型路径[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 224-231.
- [10] 邵远敬, 徐蕾, 刘校平, 等. 中国钢铁生产“碳中和”解决方案探讨[J]. 中国冶金, 2022, 32(4): 1-8.
- [11] 程茉莉. 钢铁企业二氧化碳减排路径分析及展望[J]. 冶金经济与管理, 2022(4): 18-22.
- [12] 王新江. 中国电炉炼钢的技术进步[J]. 钢铁, 2019, 54(8): 1-8.
- [13] 郁健, 李士琦, 孙开明, 等. 电弧炉炼钢用四元炉料的冶炼过程物耗和能耗分析[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(S1): 80-83.
- [14] 郁健, 李士琦, 孙开明, 等. 150 t电弧炉炼钢跨尺度能量集成的工业试验[J]. 特殊钢, 2010, 31(3): 41-43.
- [15] 李士琦, 林钢, 李京社, 等. 以系统优化的观点看电弧炉炼钢技术的进步[J]. 钢铁, 1996, 31(1): 70-74.
- [16] 李士琦, 武骏, 李京社, 等. 关于电炉炼钢流程发展的几点认识[J]. 钢铁, 1997, 32(7): 72-75.
- [17] 李士琦, 孙开明, 郁健, 等. 150 t交流电弧炉炼钢高效化节能[J]. 过程工程学报, 2008, 8(S1): 166-170.
- [18] 李士琦, 陈煜, 刘润藻, 等. 现代电弧炉炼钢技术进展[J]. 中国冶金, 2005, 15(6): 8-13+20.
- [19] 李士琦, 张汉东, 陈煜, 等. 电弧炉炼钢流程的能量状况[J]. 钢铁, 2006, 41(8): 24-27.
- [20] 曲英, 刘今. 冶金反应工程学导论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- [21] 王慧炯. 系统工程学导论-上册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [22] 李士琦. 冶金系统工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [23] 范鸣玉, 张莹. 最优化技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982.
- [24] 刘明忠, 王训富, 李士琦. 冶金过程中的时空多尺度结构及其效应[J]. 钢铁研究学报, 2005, 17(1): 10-13.
- [25] Hans-Jürgen Odenthal, Andreas Kemminger, Fabian Krause, et al. Review on Modeling and Simulation of the Electric Arc Furnace (EAF)[J]. steel research international, 2018, 89(1), 1-36.
- [26] 李士琦. 冶金系统工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [27] 陈煜. 新冶钢60 t电弧炉炼钢过程的反应工程学研究[D]. 北京: 北京科技大学博士论文, 2009.
- [28] 赵瑞敏. 电弧炉炼钢过程能效评价及技术应用[D]. 北京: 北京科技大学硕士论文, 2022.