评述

钢铁生产流程物流-能流-环境作用机理及广义热力学优化

陈林根^{1,2,3*}, 冯辉君^{1,2,3}, 谢志辉^{1,2,3}, 姜泽毅⁴, 高峰⁵, 徐安军⁶, 张欣欣⁴

1. 海军工程大学热科学与动力工程研究室, 武汉 430033;

2. 海军工程大学舰船动力工程军队重点实验室, 武汉 430033;

3. 海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033;

4. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083;

5. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124;

6. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

* E-mail: lgchenna@yahoo.com; lingenchen@hotmail.com

收稿日期: 2017-02-08; 接受日期: 2017-05-23; 网络出版日期: 2017-08-10

国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB720405)和国家自然科学基金(批准号: 51506220, 51579244)资助项目

摘要 将有限时间热力学、构形理论和焓理论等现代热力学理论与冶金流程工程学相结合, 提出钢铁生产流程广义热力学优化理论. 在搭建钢铁流程能耗排放仿真平台和建立焓分析与生命周期评价结合的物流-能流-环境作用评价方法的基础上, 基于钢铁生产流程广义热力学优化理论对单体组件、工序模块、功能子系统和流程进行物流-能流-环境作用机理研究, 并开展多学科、多目标的广义热力学优化. 优化后流程和工艺的选择、物流和能流的分配、余能余热综合利用更加合理, 流程系统得到集成、运行调控更加合理, 物流-能流-环境得到综合协调, 实现流程能源的高效配置和余能的梯级利用, 系统能耗和排放显著降低. 本文通过探索钢铁生产流程高效、节能、减排技术途径为钢铁联合企业能源环保中心的设计运行提供了理论支撑, 也为一般物质转化过程高效节能的相关共性问题的解决提供了研究平台, 奠定了科学和技术基础.

关键词 广义热力学优化, 钢铁生产流程, 有限时间热力学, 构形理论, 焓理论, 冶金流程工程学

1 引言

我国重点钢铁企业平均能耗与国际平均水平的差距约为10%~15%, 因此具有较大的节能减排潜力^[1-4]. 较低的余热余能回收利用率和技术集成度是制约我国钢铁工业发展的重要瓶颈, 突破这些瓶颈对钢铁生产能耗和排放的降低有重大促进作用^[5,6].

考虑到单体组件和工序性能优化的局限性, 许多学者从流程整体角度对钢铁生产过程进行了大量分析和优化. Michaelis等人^[7]和Costa等人^[8]计算了钢铁生产流程中各工序的焓损失, 并提出减少排放、回收固体废物、充分利用副产品等是流程节能的重要途径. 陆钟武等人^[9]基于“基准物流图”对流程能耗进行了分析, 奠定了定量分析复杂物流问题的基础. Fruehan等

引用格式: 陈林根, 冯辉君, 谢志辉, 等. 钢铁生产流程物流-能流-环境作用机理及广义热力学优化. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 111-135
Chen L G, Feng H J, Xie Z H, et al. Interaction mechanism among material flows, energy flows and environment and generalized thermodynamic optimizations for iron and steel production processes (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 111-135, doi: [10.1360/N092017-00038](https://doi.org/10.1360/N092017-00038)

人^[10]提出了钢铁生产流程理论最小能耗概念,建立了理论最小能耗模型,并与流程实际能耗进行了比较. Larsson和Dahl^[11]建立了钢铁厂过程集成模型,采用混合整数线性规划法对模型进行了优化,分析了不同生产状况下能源使用、产品成本 and 环境影响问题^[12,13],指出对废钢进行预热对流程节能有显著效果. 王建军^[14]分析了钢铁生产流程中物流和能流的相互作用关系,提出了流程优化的基本原则,为钢铁企业流程优化提供了指导. 韩晓威^[15]计算了4种高炉-转炉流程的二次能源产生量,分析了其主要影响因素,由此指出了钢铁企业节能的主要方向. Wang等人^[16]采用过程集成方法以生产成本和二氧化碳减排最小为目标对钢铁生产流程进行了优化,并以高炉-转炉系统为例得到了综合考虑两种目标的Pareto解集. 张欣欣等人^[17]对某钢铁企业的能耗进行了分析,指出降低氧耗和电耗、提高蒸汽回收量和转炉煤气回收量、提高铸坯入炉温度是实现钢铁生产流程节能的重要措施. 张琦等人^[5]建立了以能耗、排放和成本为优化目标的钢铁生产过程集成模型,指出通过过程集成方法对物流量和能量流结构进行优化可实现流程的节能和减排. Zhang等人^[18]对钢铁生产流程的物质流和能量流进行了分析,发现采用新技术对低温热源余热进行回收能够提高余热回收的潜力. Liu等人^[19]建立了包含480个单元的钢铁生产流程优化模型,通过优化富余煤气和蒸汽的分配实现了流程成本的最小化. Lu等人^[20]以能量强度为优化目标对钢铁生产流程进行了优化,优化后能量强度降低了2.9%,指出炼铁工序降低能量强度潜力较大而轧钢工序潜力最小. Wu等人^[21]分析了钢铁生产流程中各工序的能量效率和烟效率,发现高炉具有最大的烟损失,且高炉炼铁工序对环境的影响也是最大的.

目前,前人对钢铁生产流程的研究工作主要侧重于暗箱模型的分析 and 优化,从物流-能流-环境作用机理角度对钢铁生产全流程进行综合优化的还比较少见. 冶金反应动力学和其他冶金基本理论仅能对单体组件和冶金过程的优化工作提供指导,并不能在流程层次指导钢铁生产流程的优化工作,目前也尚无统一的理论指导流程优化. 因此,将一些新兴的优化理论,如冶金流程工程学^[22-24]、有限时间热力学理论^[25-34](或熵产最小化理论^[35-37])、构形理论^[38-45]和焓理论^[46-52]等引入钢铁生产流程的优化中非常有必要. 本文将有

限时间热力学、构形理论和焓理论等现代热力学理论与冶金流程工程学相结合,提出钢铁生产流程广义热力学优化理论;研究流程单体组件、工序模块、功能子系统和整体系统的功能特点、热力学和动力学特征,建立全流程的系统仿真平台,开展流程资源、能源消耗 and 环境影响的综合评价;基于钢铁生产流程广义热力学优化理论研究物流-能流-环境作用机理,实现多学科、多目标的广义热力学优化,为钢铁生产流程高效节能的系统集成和运行调控奠定科学和技术基础.

2 钢铁生产流程优化理论

钢铁生产流程涉及范围极广、对象众多、模型较为复杂. 本文将从热科学角度重新审视钢铁生产流程,在钢铁生产流程物流-能流-环境作用机理及广义热力学优化的研究过程中,应用到了有限时间热力学理论、构形理论、焓理论、冶金流程工程学和广义热力学优化理论^[26,28,45,53-55]. 本节将首先阐述有限时间热力学理论和广义热力学优化理论的含义,紧接着在阐述构形理论、焓理论和冶金流程工程学等相关理论含义的基础上,给出钢铁生产流程广义热力学优化理论的定义,并结合单元组件、工序模块、功能子系统和流程整体阐明该理论的具体内涵. 下面将这些理论作简要叙述.

2.1 有限时间热力学理论

考虑到卡诺热机热效率最大而输出功率为零,Reitlinger^[56], Novikov^[57], Chambadal^[58], Curzon和Ahlborn^[59]等人先后将有限速率传热引入可逆卡诺循环的研究中,导出了内可逆卡诺热机最大输出功率时的效率 $\eta_{CA} = 1 - (T_L / T_H)^{0.5}$ (T_H 和 T_L 分别为高、低热源温度). 它的导出是有限时间热力学理论诞生的重要标志. 有限时间热力学理论以热力学、传热学和流体力学相结合促使热力学发展为基本特征,在有限时间和有限尺寸约束条件下,以减少系统不可逆性为主要目标,优化存在传热、传质和流体流动不可逆性的实际热力系统的性能,已成为物理学和工程学等领域研究热力系统的重要工具. 基于这一理论,大量学者对各种过程和循环进行了优化^[60-70],使得它得到进一步发展.

2.2 广义热力学优化理论

有限时间热力学理论的研究对象实质上主要是以温度为驱动力、熵为位移的传统热力学. Radcenco^[53]的广义热力学理论研究表明,自然界存在守恒和耗散作用的物理系统均可以用基于能量变换的广义多变过程来统一描述,即: $YX^n = \text{常数}$ 或 $Y = \text{常数} X^n (n > 0)$, 式中, n , Y 和 X 分别为广义多变指数、广义热力学力和广义位移. 因此,机械、电、磁、化学、气动等过程和装置均可与传统的热过程采用统一处理思想和方法进行分析和优化. 将传统的热机有限时间热力学理论拓广到上述广义热力学系统,广泛采用内可逆模型以突出分析主要不可逆性,建立设计和运行优化的理论,即称为“广义热力学优化理论”^[26,28,54].

2.3 构形理论

在对街道网络的形成和发展^[71]进行建模和数学分析后, Bejan^[72]提出了构形理论, 构形定律可表述为“对于一个沿时间箭头方向(或为适应生存环境)进行结构演化的有限尺寸流动系统来讲, 为流过其内部的‘流’提供越来越容易通过的路径是决定其结构形成的根本原因”或可更简单地表述为事物结构源自于性能达到最优^[40]. 在构形定律的基础上, 冯辉君等人^[73]进一步提出了“广义构形优化”思想, 即: 对于任意有形结构参数和无形性能参数的传递系统, 在一定的传输材料体积、系统体积和其他参数总量的约束下, 可寻求一种最佳系统结构和最佳性能参数使得传递系统内部的流越来越容易(或越来越难)从其内部通过, 这一优化方法称为“广义构形优化”, 对应的最佳系统结构和最佳性能参数称之为“广义最优构形”. 许多学者基于构形理论对各种过程和系统进行了优化^[74-83], 这些工作促进了构形理论的发展.

2.4 焓理论

针对现有传热学理论中存在的不足, 过增元院士等人^[46]基于热量传递现象的本质定义了描述物体所具有的热量传递总能力的新物理量——焓, 将热量传递过程中传递能力的损失称为焓耗散, 并提出了焓耗散极值原理. 焓理论的提出, 为传热优化开辟了新的方向, 解决了传统热阻和熵产评价传热性能优劣的局限性和不准确性. 许多学者基于焓理论对各种传热

优化问题进行了研究^[84-104], 这些工作促进了焓理论的发展.

2.5 冶金流程工程学

为了能在整体上解决流程制造业中各类制造流程的有效性、有序性、协调性、连续性和紧凑性等问题, 从制造流程层次、大尺度和总体结构上研究冶金制造流程已成为共识, 殷瑞钰院士^[23]由此提出了冶金流程工程学. 它是建立在(制造)生产流程层次上的大尺度整体集成性理论, 是一门以物质和能量转换为基础的流程制造业中关于制造流程的工程学科和工程技术方面的学问. 它的研究对象是一个开放的、远离平衡的、不可逆复杂流程体系, 因此对研究钢铁生产流程具有很强的适应性. 基于冶金流程工程学的生产流程研究有助于揭示流程的本质, 为各种生产流程的大尺度结构研究与优化提供了理论指导.

2.6 钢铁生产流程广义热力学优化理论

有限时间热力学理论、广义热力学优化理论、构形理论、焓理论和冶金流程工程学彼此之间本质上是不同的. 由于钢铁生产流程中既存在各种热力系统, 也存在各种传递过程, 因此上述优化理论均能用于钢铁生产流程的研究中. 由于各种理论自身的局限性, 将它们结合起来综合应用于钢铁生产流程的研究中, 有利于各种理论之间取长补短, 进一步对钢铁生产流程这样一个开放、远离平衡、不可逆的复杂系统进行深度优化, 达到深度挖掘钢铁行业节能减排潜力的目的. 基于这一考虑, 将上述理论结合应用于图1所示的钢铁生产流程节能减排研究中, 逐步凝练形成了钢铁生产流程广义热力学优化理论. 该理论表述为^[45,55]: 将有限时间热力学理论、构形理论、焓理论、冶金流程工程学相结合, 在有限资源和/或有限尺寸约束条件下, 以节能、降耗、减排、增产为主要目标, 优化存在各种不可逆性的钢铁生产流程单元组件、工序模块、功能子系统和流程整体性能, 实现多层次流程体系物流-能流-环境的综合协调. 在对单元组件的研究中, 基于构形理论和焓理论, 分别以热损失率、熵产率和焓耗散最小等为目标, 考虑绝热层和反应器体积等约束条件, 对炉墙绝热层和余热回收反应器进行优化, 使得绝热层绝热性能得到提

图1 (网络版彩图)钢铁生产流程示意图

高、低温余热资源品味得到提升. 在对工序模块的研究中, 基于有限时间热力学理论、构形理论和冶金流程工程学, 分别以工序能耗最小、二氧化碳排放最小、产量最大、废气输出焓最大和焓损失最小等为目标, 考虑成本、冶金制度和冷却水流量等约束条件, 对焦化工序、烧结工序、高炉炼铁工序、转炉炼钢工序和连铸连轧工序进行优化, 提高各工序的性能和余能余热利用率, 实现各工序的节能和减排. 在对功能子系统的研究中, 基于有限时间热力学理论和冶金流程工程学, 分别以输出功率、效率、焓输出率、焓效率和焓经济性等为目标, 考虑系统换热面积和尺寸等约束条件, 对焦化、烧结、高炉、转炉各工序中煤气、烟气和炉渣的余能余热回收利用子系统进行优化, 使得各工序的余能余热得到充分利用, 有利于钢铁工业的深度节能减排. 在对钢铁生产全流程的研究中, 基于有限时间热力学理论、构形理论和冶金流程工程学, 分别以理论能耗最小、能耗最小、二氧化碳排放最小以及相应复合函数最小等为目标, 考虑冶金制度和成本等约束条件, 对热装轧制工艺和直轧工艺的传统钢铁生产流程和氧气高炉钢铁流程进行比较分析和广义热力学优化, 实现流程能源的高效配置和余能的梯级利用, 流程能耗和排放显著降低, 从热力学优化角度为钢铁生产流程的节能减排提供新的指导. 本文将介绍基于钢铁生产流程广义热力学优化理论所开展的钢铁生产流程物流-能流-环境作用机理及广义热力学优化研究工作.

3 钢铁生产流程物流-能流-环境作用机理及广义热力学优化

下面将从4个方面介绍主要研究内容.

3.1 钢铁生产流程的普适性物理模型及整体行为特征

建立了单体组件、工序模块和功能子系统等各层次的普适性数理模型, 基于构形理论、有限时间热力学理论和焓理论等相关理论, 开展了高温冶金过程模型、余热余能利用功能子系统和单体组件热过程模型性能分析和优化, 得到了各过程和系统的最小能耗和 CO_2 排放等最优性能指标, 并分析了各种参数对最优性能的影响规律. 这3个层次的研究对象涉及到传热、流动、传热传质、化学反应和热功转换等过程. 对于传热、流动、传热传质和化学反应等过程, 采用了构形理论和焓理论等相关理论对这些过程进行了性能分析和优化, 这部分工作主要集中在第3.1.1和3.1.3节; 对于余热余能利用的热功转换过程, 采用了有限时间热力学理论对其进行了性能分析和优化, 得到了各种热力循环最优性能和对应的循环最佳热力学参数. 这从能量转换角度揭示了各过程和系统能耗降低的热力学原因, 拓展了热力学研究的方向. 这部分工作主要集中在第3.1.2节.

3.1.1 高温冶金过程模型及参数分析与优化

钢铁生产流程中各工序模块均涉及到高温冶金过程^[105-114], 对各种高温冶金过程进行参数分析和优化具有重要意义. 针对各工序的节能减排问题开展了深入研究, 以焦化工序能耗(图2)和 CO_2 排放^[115]为目标, 分析了干熄焦和煤调湿技术对两种目标的影响. 以烧结矿能值最小^[116]和产量最大^[117]为目标, 烧结铁矿石、燃料和熔剂用量为优化变量, 对烧结矿配料过程进行了优化; 以废气输出焓最大^[118]为目标, 烧结矿料层高度为优化变量, 对烧结环冷过程进行了构形优化, 并比较了不同冷却方式的场协同数^[119,120]. 以能耗最小、

烟损失最小、产量最大等共9个指标为优化目标,烧结矿用量、球团矿用量等参数为优化变量,考虑了成

本和冶金约束条件,对高炉炼铁过程和工序(图3和4)进行了传统优化(图5)^[121~126]、有限时间热力学优化

图 2 (网络版彩图)焦化工序能量流图

图 3 (网络版彩图)高炉炼铁工序构形优化物理模型

图 4 高炉炼铁工序传统优化物理模型

图5 鼓风湿度(φ)、鼓风富氧率(f)和鼓风温度(T_b)对焓损失最小值($I_{\min}$)的影响

(图6~8)^[127]以及广义构形优化(图9)^[127,128].以钢水产量最大、能耗和排放最小等为目标,废钢用量为优化变量,考虑了原料总成本约束条件,对转炉炼钢过程和工序(图10)进行了广义构形优化^[129]和有限时间热力学优化(图11)^[130].以热损失(焓耗散、能耗和排放)复合函数最小为目标,冷却水流量为约束条件,对连铸连轧工序(图12)进行了广义构形优化(图13和14)^[131~135].对各工序进行的优化,有利于工序性能和余能余热利用率的提高,实现了各工序的节能和减排,所得结果从热力学和传热学优化角度为工序优化设计提供了新的优化准则和备选方案.

3.1.2 余能余热利用功能子系统的研究

钢铁生产流程中存在大量的余能余热^[136~138],对余

图6 开式简单布雷顿循环装置图

图7 开式简单布雷顿循环T-s图

图 8 铁水产量和有效能的复合函数与压气机压比和进口相对压降损失的关系

图 9 高炉炼铁工序广义构形优化后最佳成本分配

图 10 (网络版彩图)转炉炼钢工序物理模型

图 11 钢水产量和有效能的复合函数与压气机压比和进口相对压降损失的关系

图 12 薄板坯连铸连轧工序示意图

能余热利用功能子系统进行性能优化使余热余热得到充分利用有利于流程节能减排。首先考虑了热风炉烟气和环冷机中温段废气余热(图15)^[139]的节能潜力,再基于经典热力学和有限时间热力学建立了18种燃气轮机发电系统的余热余热回收模型,涉及简单(图16和17)和复杂、闭式和开式燃气轮机动力循环^[140-152]、热电联产系统^[153-162]和热电冷联产系统^[163-169],并进一步考虑了热电发电余热利用模型(图18)^[170-177],最后对钢铁工业余热回收过程进行了综合评价(图19)^[178,179]。结果

表明:钢厂余热余热驱动的燃气轮机动力装置或联产装置的优化设计为钢铁工业的深度节能减排提供了一个可资借鉴的研究方向;对于热电发电装置,烟气热源时换热通道长度不宜过长,废水热源时换热通道可以较长;全流程焓效率最大化是用能合理性的唯一评价指标。

图 13 不同水量分配方案下板坯表面温度和中心温度与距结晶器弯月面距离的关系

图 14 连铸连轧工序能耗和温差复合函数二次最小值和对应的无量纲单位产品能耗与拉坯速度的关系

图 15 烧结余热利用模型图

图 16 转炉余能余热驱动的开式简单燃气轮机热电冷联产装置图

图 17 回收利用钢厂熔渣余热的空气中冷布雷顿循环装置图

图 18 (网络版彩图)烧结烟气热电发电模型示意图

图 19 (网络版彩图) 钢厂的余能余热利用网络

3.1.3 单体组件热过程与余热回收研究

钢铁生产流程中单体组件众多^[180~185], 对各种单体组件热过程进行优化并对相应的余热资源进行回收有利于提高流程性能. 在提出绝热过程焓耗散极值原理^[91]的基础上, 以焓耗散最小为目标, 绝热层厚度为优化变量, 考虑了绝热层体积约束条件, 对不同传热边界条件下的4种轧钢加热炉壁绝热层(图20)^[91,186~189]进行了构形优化(图21). 此外, 还对高炉炉墙绝热过程(图22)^[190]、余热回收的气固反应器传热传质过程(图23)^[191,192]和活塞流反应器重整反应过程^[193]进行了优化研究. 结果表明: 采用变厚度(变截面)绝热层最优构形设计可使得绝热层的绝热性能得到提高; 对高炉炉墙冷却壁水管进行构形优化后提高了炉墙的绝热性能; 反应器的构形优化提高了低温余热的温度或

图20 炉壁多层绝热层模型. (a) 等厚度绝热层; (b) 变厚度绝热层

图21 不同低温侧炉壁温度时最小焓耗散率和热损失率下的绝热层最优性能比较

图22 高炉炉墙传热模型

图23 树状圆盘气固反应器传热传质模型

利用低温余热产生了有用的化工产品; 基于焓理论的传热构形优化使得系统整体传热性能得到了有效提高, 内部温度梯度更均匀, 体现了焓理论的科学性和优越性.

3.2 钢铁生产流程资源、能源与环境效应评价方法

构建了以焓为表征参数的资源耗竭潜力分析模型^[194,195], 开展了高炉-转炉流程的累计焓需求分析(图24), 计算得到了高炉转炉生产吨粗钢的累计焓需求为20.244 GJ. 分析了钢铁生产水资源的耗竭潜力, 通过对水使用的追踪, 计算得到了各生产过程的水使用清单: 吨钢耗新水量为4.852 t, 损失水量为2.779 t, 排放废水量为1.803 t, 其中废水处理损失的水量为0.001 t. 建立了矩阵分析算法与清单数据分析方法, 构建了钢铁生产流程生命周期影响评价特征化方法. “十三五”期间, 如果我国有4亿吨钢产量综合应用上述节能减排技术, 预计钢铁行业每年CO₂减排5945万吨, SO₂减排6.8万吨, NO_x减排3.8万吨(图25). 建立了全生命周期物质流模型^[196~198], 计算得到了钢铁生命周期物

图 24 (网络版彩图)高炉转炉各流程的累计焓需求

图 25 (网络版彩图)节能减排技术对流程整体的环境影响

质流的各项数据。通过情景预测分析,得到了不同情景下中国废钢增长趋势对钢铁流程的结构演变及其能耗和排放的影响规律。研究表明,转炉钢产量会快速增长之后开始下滑,而电炉钢则一直增长至某一值后保持稳定;废钢的回收率是对钢铁流程结构影响较大的因素,废钢回收率提升会提升电炉钢比值,有助于缩短到达钢铁流程结构稳定的时间。

3.3 钢铁生产流程多层次物流、能流网络及运行时序特征

分析物质流和能量流,建立了全流程的铁素流系统动力学模型,并开展动态特性研究。针对铁-钢-轧区段,开展了生产组织与过程优化。运用各层次单元之间的物流、能流关系及流程网络重构技术,开发了各种新流程与传统流程的仿真平台,研究获得了钢铁生

产流程能耗与排放的整体特性。

3.3.1 钢铁生产全流程的铁素流动态特性研究

铁素流是物质流的重要研究对象,对其开展动态特性研究^[199]是流程性能优化的基础。将烧结^[200]、高炉炼铁^[201]、转炉炼钢^[202]、轧钢^[203]等各主要工序集成,以各工序和全流程的生产时间及原料消耗量为约束,基于物质平衡建立了钢铁生产全流程的铁素流网络系统动力学模型^[203],形成了铁素流因果回路图(图26)。结果表明:为使某工序的产品铁素流输出更大,可以增大下游工序的返回上游的铁素流返回率,同步减小下游工序的本单元铁素流返回率,但这会导致下游工序的产品铁素流输出波动变大;物料铁素存量的动态特性关联钢铁生产流程的各种生产设备的抗波动性,会在一定程度上影响设备的运行状况,减小物料铁素的波动性可使设备在额定工况下运行。

3.3.2 铁-钢-轧区段生产组织与过程优化

钢铁生产流程中各区段之间衔接是否良好对流程性能有重要影响^[204,205],因此对区段生产组织与过程进行优化十分必要。开展了多功能铁水包运输铁水过程温降规律研究,重点对铁水包是否加盖(图27)^[206]和是否进行扒渣操作进行了对比研究,给出了实测结果,并验证了数值计算结果。深入开展了转炉炼钢系统的生产组织优化^[207-210]和钢水温度变化规律^[211,212]的研究,建立了基于案例推理的炼钢-连铸流程温度预报模型,分析了出钢时间、渣层厚度和精炼结束温度等参数对预报模型的影响,并开发了相应的程序界面。

图 26 全流程铁素流因果回路图

图 27 (网络版彩图)铁水包加盖与不加盖下铁水温降规律

设计了粗粒度并行遗传算法解决了大规模板坯调度算法效率和效果不足的问题, 研究了离线炉温数据库设定策略, 实现加热炉节能型控制(图28)。考虑了实际生产时生产节奏和入炉温度往往偏离基准入炉温度和基准生产节奏的情况, 采用公式法和修正值法, 实现了单个板坯在实际生产状况下炉温在线优化^[213], 并进一步设计了出炉目标温度修正模型。

3.3.3 典型生产流程的仿真和能耗排放特征

能耗和排放是钢铁生产流程关注的重要问题^[21]。采用gPROMS商用平台, 建立了钢铁生产流程能耗排放特征仿真平台(图29), 基于平台构建了3类(7种)典型生产流程, 获得了流程的物质流^[214-216]、能量流^[217,218]特征以及能耗(图30)^[219]、碳排放(图31)^[219]的情况。结果表明: Fastmet-EAF流程的总能耗最高, 消耗的电力也多; COREX-BOF流程设定的消耗废钢比例较大, 碳排放最多, 但发电能力最强; OBF-BOF流程自发电能力很弱, 与CO₂捕集或利用相结合后将具有显著的减

图 28 (网络版彩图)加热炉节能控制离线仿真优化软件程序界面

碳优势; Midrex-EAF流程在减碳方面也十分突出, Fastmet-EAF流程的碳排放比高炉略低, 两种流程均不产电力。

3.4 生产流程系统构型及运行调控的广义热力学优化

在对单体组件、工序模块和功能子系统进行建模的基础上, 进一步建立钢铁生产全流程模型。将单体组件、工序模块和功能子系统的优化结合在一起, 应用钢铁生产流程广义热力学优化理论对钢铁生产全流程进行性能分析和优化, 比较研究全氧和传统高炉长流程的能耗和碳排放, 综合分析钢铁生产能源消耗, 得到传统非线性规划优化和广义热力学优化后的钢铁生产全流程优化结果。

3.4.1 全氧高炉流程与传统长流程能耗排放比较研究

与传统高炉炼铁相比, 全氧高炉炼铁是高炉炼铁的一种新工艺^[220,221], 对其开展比较研究具有十分重要

图 29 (网络版彩图)用户自主构建钢铁生产流程

图 30 (网络版彩图)典型生产流程的能耗对比

图 31 (网络版彩图)典型生产流程的CO₂排放量对比

的意义. 基于全流程模型, 系统解析了氧气高炉流程物质流和能量流, 获得了传统和氧气高炉流程的能量平衡关系(图32)^[222]. 与传统钢铁流程相比, 氧气高炉

钢铁流程的CO₂直接排放降低了26.2%; 若捕集CO₂实现捕集, 直接排放可以降低56.5%, 可见它受我国电力结构和发电效率的影响.

3.4.2 基于理论最小能耗的流程能源消耗与CO₂排放分析

根据美国能源部2000年发布的钢铁生产理论最小能耗计算方法^[10], 针对烧结、高炉炼铁、转炉炼钢与电炉炼钢4个生产过程, 结合我国钢铁生产实际并考虑各种影响因素, 建立了理论最小能耗模型和烟分析模型^[223], 研究得到了不同生产条件下工艺参数对理论最小能耗、内部烟损失、外部烟损失以及烟效率的影响规律. 针对轧钢过程, 考虑加热能耗和形变能耗, 计算分析了4种钢坯在5种生产条件下的理论最

图 32 采用电力当量值计算的的传统和氧气高炉钢铁流程的能量平衡

小能耗^[223]。基于各物质的CO₂排放因子, 计算得到了上述各生产过程采用单一与多种燃料组合时各燃料的用量及对应的CO₂排放量^[223]。研究表明: 对烧结工序, 返矿率增大后能耗增加, 但烟效率升高; 对高炉炼铁工序, 铁水含硅量增加后能耗增加, 但烟效率增大; 对转炉炼钢工序, 废钢质量增加后能耗增加, 烟效率升高; 对电弧炉炼钢工序, 废钢和生铁预热温度升高后能耗减少, 烟效率升高。上述工作, 可对实际生产过程中工艺参数的合理设定和节能减排潜力的挖掘提供一定参考。

3.4.3 基于非线性规划的钢铁生产流程分析与优化

在21世纪初瑞典Larsson教授工作^[11-13]的基础上, 开展了各主要生产工序^[244]物质流和能量流以及能耗^[225]和CO₂排放的详细分析; 并进一步将各生产工序集成为全流程系统, 基于非线性规划理论开展了钢铁生产流程的传统分析与优化^[226,227], 集成了各种新型节能技术, 在全流程层面研究了总的节能减排效果。首先对流程进行了能耗结构解析(图33), 并对全流程能耗进行了计算, 分析了影响全流程能耗和CO₂排放的主要因素。

以能耗最小为目标, 烧结矿配、球团矿配、块矿配、焦炭配和煤粉配用量、鼓风量及鼓风温度等参

图 33 钢铁生产长流程能耗结构解析示意图

数为优化变量, 考虑了61个冶金约束条件, 采用非线性规划方法对钢铁生产全流程进行了优化。优化后, 流程吨钢可比能耗降低了2.39%, 吨钢综合能耗降低了2.29%。分析了各工序钢比系数、烧结矿品位TFe等参数变化对于整个流程最小吨钢可比能耗、最小吨钢综合能耗的影响(图34和35)。

考虑4类新型高效节能技术, 研究了各种新型节能技术应用对流程能耗的影响。结果表明: 综合采用“分层烧结、燃气喷吹+高/转炉渣显热回收+高温LDG显热回收”等新型节能技术, 最大节能为20.63 kgce/t钢, 降低流程能耗效果约为3.40%。在综合配矿优化和新型节能技术情况下, 总的节能效果最佳, 吨钢综合能耗可降低5.69%(表1)。

3.4.4 钢铁生产流程广义热力学优化

钢铁生产流程是一个复杂的能、质传递和转换

图 34 最小吨钢可比能耗随烧结矿品位 TFe 的变化

图 35 最小吨钢综合能耗随烧结矿品位 TFe 的变化

系统, 基于本文作者提出的钢铁生产流程广义热力学优化理论对其开展优化是一个全新的研究内容. 考虑

如图36和37所示的钢铁生产全流程模型. 将“广义构形优化”思想、有限时间热力学理论和冶金流程工程

表 1 钢铁流程吨钢综合能耗的节能效果对比^{a)}

指标	基本流程	配比优化	新型节能技术	配比优化+新型节能技术
吨钢综合能耗 (kgce/t)	606.64	592.77	586.01	572.14
节能效果	—	2.29%	3.40%	5.69%

a) 本流程能耗计算以1780 mm热轧板材生产流程为原型, 连轧工序仅考虑热轧方式

图 36 (网络版彩图)钢铁生产流程示意图

图 37 (网络版彩图)钢铁生产流程余能余热利用示意图

学相结合, 将其引入到钢铁生产全流程的优化研究中, 针对考虑热装轧制工艺和直轧工艺的两种不同的钢铁生产流程, 在流程总成本给定的条件下, 均分别以吨钢能耗(二氧化碳排放)与钢产品温差复合函数最小^[117]、钢产量和有用能复合函数最大为目标^[228], 以烧结工序原燃料用量、高炉炼铁工序原料用量和燃气轮机空气压缩机压比、转炉炼钢工序冷却剂用量、连铸连轧工序二冷区和层流冷却区水量分配等共22个参数为优化变量(图38~41), 对两种钢铁生产流程进行了广义热力学优化, 并比较了不同余热回收方式下的流程吨钢能耗和CO₂排放。

研究表明: 对于考虑热装轧制工艺的钢铁生产流程, 广义热力学优化后流程吨钢能耗降低了5.54%, 吨钢CO₂排放降低了6.66%, 各工序相互协调使得整体流程能耗降低。考虑直接轧制工艺的优化后的钢铁生产流程吨钢能耗和吨钢CO₂排放相对于考虑热装轧制工

图38 钢产量和有用能复合函数与连铸二冷区水量分配比的关系

图39 吨钢CO₂排放和温差复合函数与高炉炼铁工序燃气轮机空气压缩机压比的关系

图40 吨钢能耗和温差复合函数与连铸二冷区水量分配比的关系

图41 吨钢能耗和温差复合函数与层流冷却区冷却方式的关系

艺的分别降低了2.72%和5.24%。采用直接轧制工艺的流程节能减排效果较好。与不考虑任何余热回收的情况(表2中第1种情况)相比, 本节流程吨钢能耗和CO₂排放(表2中第2种情况)分别降低了15.99%和9.16%; 考虑两级流化床串联布置的高炉渣余热回收新工艺以及转炉烟气低温段泡沫金属基管壳式余热回收新工艺的钢铁生产流程(表2中第3种情况)与本节流程相比, 流程吨钢能耗和CO₂排放分别降低了0.39%和0.40%。可见尽可能多地考虑回收钢铁生产流程中的余热余热、采用余热回收新工艺一定程度上可以降低流程能耗和排放。对钢铁生产流程进行广义热力学优化所得结果对其节能减排具有一定的理论指导意义, 这一工作可推广应用到其他生产流程的优化研究中。

表 2 不同余能余热回收情况下流程吨钢能耗和吨钢CO₂排放比较

不同情况	吨钢能耗(kgce/t)	吨钢CO ₂ 排放(t CO ₂ /t)
第1种情况	759.73	2.73
第2种情况	638.27	2.48
第3种情况	635.77	2.47

4 结论

本文介绍了所提出的钢铁生产流程广义热力学优化理论,在搭建一个仿真平台和建立一种评价方法的基础上,基于该理论对单体组件、工序模块、功能子系统和流程所进行的物流-能流-环境作用机理研究和多学科、多目标的广义热力学优化,使流程和工艺的选择、物流和能流的分配、余能余热综合利用得到了合理的优化,完成了流程系统的集成和运行调控的优化,使得物流-能流-环境得到了综合协调优化,实现了流程能源高效的配置和余能的梯级利用,系统能耗和排放得到了显著降低. 本文介绍的研究工作要点主要包括:

(1) 引入有限时间热力学、焓理论和构形理论,建立了包含时间因素和各种不可逆性的热动力学普适模

型,获得了热力学与动力学耦合机制.

(2) 基于冶金流程工程学,集成了包含单体组件、工序模块、功能子系统的全流程整体系统的普适模型,实现了能耗最低、排放最少和成本最低等多个目标下的广义热力学优化,获得了最优工艺参数和设计参数及影响规律. 在考虑常规节能技术的基础上,集成了各种节能减排新技术,显著提升了节能减排效果.

(3) 扩展了钢铁行业资源耗竭潜力评价方法和理论,研究了流程整体的物流-能流-环境作用机理;构建了环境影响多目标评价方法,完成了钢铁生产流程节能减排技术应用的环境效益评价. 建成了一般钢铁生产流程的系统仿真平台,分析了流程配置各种构型、产品需求、资源消耗、废弃物循环和排放限制等对系统整体运行效果的影响规律.

(4) 总结形成了钢铁生产流程广义热力学优化理论思想和框架,通过全流程物质流和能量流整体特征分析和时序仿真,获得了流程调控优化策略.

本文所述工作为钢铁生产流程高能效、低排放的系统集成优化和一般物质转化过程高效节能的相关共性问题的解决,提供了新的理论方法和研究平台,奠定了科学和技术基础.

致谢 本文材料主要由国家重点基础研究发展计划“钢铁生产过程高效节能基础研究”(2012CB720400)课题5“钢铁流程系统的能耗排放特征及其广义热力学优化”课题组提供,在此感谢海军工程大学孙丰瑞教授、秦晓勇副教授、戈延林副教授、刘雄博士、沈勋博士、丁泽民讲师、夏少军讲师、孟凡凯讲师、刘长鑫博士、杨博工程师、张子煜工程师、刘泽淼工程师、熊兵工程师、王文华副教授,北京科技大学田付山博士、张学昌博士、刘志涛博士、冯凯博士、贺东风博士、汪红兵博士、汪鹏博士、耿心怡博士、郝诗宇博士、杨业建博士、蔡峻博士、金鹏博士、邓帅博士、刘成博士、陈贤哲博士,北京工业大学崔淑萍教授、孙博学博士、张宇峰博士、王宏涛博士等团队成员. 两位审稿人对本文提出了细心、无私和充满建设性的意见,在此致以诚挚的谢意!

参考文献

- 1 陆钟武, 蔡九菊. 系统节能基础. 沈阳: 东北大学出版社, 2010
- 2 Lin B Q, Wang X L. Carbon emissions from energy intensive industry in China: Evidence from the iron & steel industry. *Renew Sust Energ Rev*, 2015, 47: 746–754
- 3 Wu X, Zhao L, Zhang Y, et al. Cost and potential of energy conservation and collaborative pollutant reduction in the iron and steel industry in China. *Appl Energ*, 2016, 184: 171–183
- 4 Wang X L, Lin B Q. Factor and fuel substitution in China's iron & steel industry: Evidence and policy implications. *J Cleaner Prod*, 2017, 141: 751–759

- 5 张琦, 蔡九菊, 沈峰满. 钢铁企业系统节能减排过程集成研究进展. *中国冶金*, 2011, 21: 3–6
- 6 Wang X L, Lin B Q. How to reduce CO₂ emissions in China's iron and steel industry. *Renew Sust Energ Rev*, 2016, 57: 1496–1505
- 7 Michaelis P, Jackson T, Clift R. Exergy analysis of the life cycle of steel. *Energy*, 1998, 23: 213–220
- 8 Costa M M, Schaeffer R, Worrell E. Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems. *Energy*, 2001, 26: 363–384
- 9 陆钟武, 蔡九菊, 于庆波, 等. 钢铁生产流程的物流对能耗的影响. *金属学报*, 2000, 36: 370–378
- 10 Fruehan R J, Fortini O, Paxton H W, et al. Theoretical minimum energies to produce steel for selected conditions. Technical Report. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2000
- 11 Larsson M, Dahl J. Reduction of the specific energy use in an integrated steel plant—The effect of an optimisation model. *ISIJ Int*, 2003, 43: 1664–1673
- 12 Larsson M. Process integration in the steel industry—Possibilities to analyse energy use and environmental impacts for an integrated steel mill. Dissertation of Doctoral Degree. Lulea: Lulea University of Technology, 2004
- 13 Larsson M, Ryman C. Adaptation of process integration models for minimisation of energy use, CO₂-emissions and raw material costs for integrated steelmaking. *Chem Eng Trans*, 2007, 12: 495–500
- 14 王建军. 钢铁企业物质流、能量流及其相互关系研究与应用. 博士学位论文. 沈阳: 东北大学, 2008
- 15 韩晓威. 典型钢铁制造流程二次能源利用和自发电模式. 硕士学位论文. 唐山: 河北理工大学, 2009
- 16 Wang C, Larsson M, Ryman C, et al. A model on CO₂ emission reduction in integrated steelmaking by optimization methods. *Int J Energ Res*, 2008, 32: 1092–1106
- 17 张欣欣, 时娜, 冯妍卉, 等. 钢铁生产流程系统综合节能实例研究与分析. *冶金能源*, 2010, 29: 3–7
- 18 Zhang H, Dong L, Li H Q, et al. Investigation of the residual heat recovery and carbon emission mitigation potential in a Chinese steelmaking plant: A hybrid material/energy flow analysis case study. *Sust Energ Technol Assess*, 2013, 2: 67–80
- 19 Liu J Y, Li Y, Cai J J. Optimization model of power production side in iron and steel enterprises. *Energy Dev Front*, 2013, 2: 72–79
- 20 Lu B, Chen G, Chen D M, et al. An energy intensity optimization model for production system in iron and steel industry. *Appl Thermal Eng*, 2016, 100: 285–295
- 21 Wu J N, Wang R Q, Pu G Y, et al. Integrated assessment of exergy, energy and carbon dioxide emissions in an iron and steel industrial network. *Appl Energ*, 2016, 183: 430–444
- 22 殷瑞钰. 钢铁制造流程的本质、功能与钢厂未来发展模式. *中国科学E辑: 技术科学*, 2008, 38: 1365–1377
- 23 殷瑞钰. 冶金流程工程学. 第2版. 北京: 冶金工业出版社, 2009
- 24 殷瑞钰. 冶金流程集成理论与方法. 北京: 冶金工业出版社, 2013
- 25 Andresen B. Finite-Time Thermodynamics. Copenhagen: Physics Laboratory II, University of Copenhagen, 1983
- 26 Chen L G, Wu C, Sun F R. Finite time thermodynamic optimization or entropy generation minimization of energy systems. *J Non-Equil Thermodyn*, 1999, 24: 327–359
- 27 Chen L G, Sun F R. Advances in Finite Time Thermodynamics: Analysis and Optimization. New York: Nova Science Publishers, 2004
- 28 陈林根. 不可逆过程和循环的有限时间热力学分析. 北京: 高等教育出版社, 2005
- 29 Andresen B. Current trends in finite-time thermodynamics. *Angew Chem Int Ed*, 2011, 50: 2690–2704
- 30 李俊, 陈林根, 戈延林, 等. 正反向两源热力循环有限时间热力学性能优化的研究进展. *物理学报*, 2013, 62: 130501
- 31 陈林根, 夏少军. 不可逆过程的广义热力学动态优化. 北京: 科学出版社, 2017
- 32 陈林根, 夏少军. 不可逆循环的广义热力学动态优化. 北京: 科学出版社, 2017
- 33 Ge Y L, Chen L G, Sun F R. Progress in finite time thermodynamic studies for internal combustion engine cycles. *Entropy*, 2016, 18: 139
- 34 毕月红, 陈林根. 空气热泵性能有限时间热力学优化. 北京: 科学出版社, 2017
- 35 Bejan A. Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow. New York: Wiley, 1982
- 36 Bejan A. Entropy Generation Minimization. Boca Raton FL: CRC Press, 1996
- 37 Bejan A. Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes. *J Appl Phys*, 1996, 79: 1191–1218
- 38 Bejan A. Shape and Structure, from Engineering to Nature. Cambridge: Cambridge University Press, UK, 2000
- 39 Bejan A, Lorente S. Design with Constructal Theory. New Jersey: Wiley, 2008
- 40 Chen L G. Progress in study on constructal theory and its applications. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 802–820
- 41 Bejan A, Lorente S. Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. *J Appl Phys*, 2013, 113: 151301
- 42 Bejan A. Constructal law: Optimization as design evolution. *J Heat Transfer*, 2015, 137: 061003
- 43 Bejan A. The Physics of Life: The Evolution of Everything. New York: St. Martin's Press, 2016

- 44 Bejan A, Errera M R. Complexity, organization, evolution, and constructal law. *J Appl Phys*, 2016, 119: 074901
- 45 陈林根, 冯辉君. 流动和传热传质过程的多目标构形优化. 北京: 科学出版社, 2016
- 46 Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G. Entransy—A physical quantity describing heat transfer ability. *Int J Heat Mass Transfer*, 2007, 50: 2545–2556
- 47 Chen L G. Progress in entransy theory and its applications. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 4404–4426
- 48 Chen Q, Liang X G, Guo Z Y. Entransy theory for the optimization of heat transfer—A review and update. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 63: 65–81
- 49 Chen L G. Progress in optimization of mass transfer processes based on mass entransy dissipation extremum principle. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 2305–2327
- 50 Cheng X T, Liang X G. Entransy: Its physical basis, applications and limitations. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 5309–5323
- 51 Cheng X T, Liang X G. Work entransy and its applications. *Sci China Tech Sci*, 2015, 58: 2097–2103
- 52 Zhang T, Liu X H, Tang H D, et al. Progress of entransy analysis on the air-conditioning system in buildings. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1463–1474
- 53 Radcenco V. Generalized Thermodynamics. Bucharest: Editura Technica, 1994
- 54 Chen L G, Bi Y H, Wu C. The influence of nonlinear flow resistance relations on the power and efficiency from fluid flow. *J Phys D-Appl Phys*, 1999, 32: 1346–1349
- 55 Chen L G, Feng H J, Xie Z H. Generalized thermodynamic optimization for iron and steel production processes: Theoretical exploration and application cases. *Entropy*, 2016, 18: 353
- 56 Reitlinger H B. Sur L'utilisation de la Chaleur Dans les Machines à Feu. Liège, Belgium: Vaillant-Carmanne, 1929
- 57 Novikov I I. The efficiency of atomic power stations. *Atomnaya Energiya*, 1957, 3: 409–412
- 58 Chambadal P. Les Centrales Nucleaires. Paris, France: Armand Colin, 1957
- 59 Curzon F L, Ahlborn B. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. *Am J Phys*, 1975, 43: 22–24
- 60 Chen L G, Sun F R, Wu C. Influence of internal heat leak on the power versus efficiency characteristics of heat engines. *Energy Conv Manage*, 1997, 38: 1501–1507
- 61 Chen L G, Sun F R, Wu C. Optimal allocation of heat-exchanger area for refrigeration and air-conditioning plants. *Appl Energy*, 2004, 77: 339–354
- 62 Ge Y L, Chen L G, Sun F R. Finite-time thermodynamic modelling and analysis of an irreversible Otto-cycle. *Appl Energy*, 2008, 85: 618–624
- 63 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Optimization for entransy dissipation minimization in heat exchanger. *Sci Bull*, 2009, 54: 3587–3595
- 64 Chen L G, Feng H J, Sun F R. Exergoeconomic performance optimization for a combined cooling, heating and power generation plant with an endoreversible closed Brayton cycle. *Math Comp Model*, 2011, 54: 2785–2801
- 65 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Entransy dissipation minimization for a class of one-way isothermal mass transfer processes. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54: 352–361
- 66 Chen L, Xia S, Sun F. Maximum power output of multistage continuous and discrete isothermal endoreversible chemical engine system with linear mass transfer law. *Int J Chem Reactor Eng*, 2011, 9: 1616
- 67 Liu X W, Chen L G, Wu F, et al. Fundamental optimal relation of an irreversible quantum Carnot heat pump with spin-1/2 systems. *Math Comp Model*, 2011, 54: 190–202
- 68 陈林根, 孟凡凯, 戈延林, 等. 半导体热电装置的热力学研究进展. 机械工程学报, 2013, 49: 144–154
- 69 Chen L G, Ni D L, Zhang Z L, et al. Exergetic performance optimization for new combined intercooled regenerative Brayton and inverse Brayton cycles. *Appl Thermal Eng*, 2016, 102: 447–453
- 70 Zhou J L, Chen L G, Ding Z M, et al. Analysis and optimization with ecological objective function of irreversible single resonance energy selective electron heat engines. *Energy*, 2016, 111: 306–312
- 71 Bejan A. Street network theory of organization in nature. *J Adv Trans*, 1996, 30: 85–107
- 72 Bejan A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. *Int J Heat Mass Transfer*, 1997, 40: 799–816
- 73 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Generalized constructal optimization for solidification heat transfer process of slab continuous casting based on heat loss rate. *Energy*, 2014, 66: 991–998
- 74 Wu W J, Chen L G, Sun F R. Heat-conduction optimization based on constructal theory. *Appl Energy*, 2007, 84: 39–47
- 75 Zhou S B, Chen L G, Sun F R. Optimization of constructal economics for volume-to-point transport. *Appl Energy*, 2007, 84: 505–511
- 76 Wei S H, Chen L G, Sun F R. “Volume-Point” heat conduction constructal optimization with entransy dissipation minimization objective based on rectangular element. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2008, 51: 1283–1295
- 77 Chen L G, Xiao Q H, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for tree-shaped assembly of fins. *Int J Heat Mass Transfer*, 2013, 67: 506–513

- 78 Xie Z H, Chen L G, Sun F R. Constructal entropy generation rate minimization of line-to-line vascular networks with convective heat transfer. [Int J Thermal Sci](#), 2013, 74: 72–80
- 79 Chen L G, Feng H J, Xie Z H, et al. Constructal optimization for “disc-point” heat conduction at micro and nanoscales. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2013, 67: 704–711
- 80 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal optimization for a single tubular solid oxide fuel cell. [J Power Sources](#), 2015, 286: 406–413
- 81 Xie G N, Song Y D, Asadi M, et al. Optimization of pin-fins for a heat exchanger by entropy generation minimization and constructal law. [J Heat Transfer](#), 2015, 137: 061901
- 82 Bejan A, Ziaei S, Lorente S. Distributed energy storage: Time-dependent tree flow design. [J Appl Phys](#), 2016, 119: 184901
- 83 Chen L G, Yang A B, Xie Z H, et al. Constructal entropy generation rate minimization for cylindrical pin-fin heat sinks. [Int J Thermal Sci](#), 2017, 111: 168–174
- 84 Chen Q, Ren J X. Generalized thermal resistance for convective heat transfer and its relation to entransy dissipation. [Chin Sci Bull](#), 2008, 53: 3753–3761
- 85 Liu X B, Wang M, Meng J A, et al. Minimum entransy dissipation principle for optimization of transport networks. [Int J Nonlinear Sci Numer Simul](#), 2010, 11: 113–120
- 86 程雪涛, 徐向华, 梁新刚. 广义流动中的积原理. [物理学报](#), 2011, 60: 118103
- 87 Xie Z H, Chen L G, Sun F R. Comparative study on constructal optimizations of T-shaped fin based on entransy dissipation rate minimization and maximum thermal resistance minimization. [Sci China Tech Sci](#), 2011, 54: 1249–1258
- 88 Xiao Q H, Chen L G, Sun F R. Constructal entransy dissipation rate minimization for “disc-to-point” heat conduction. [Chin Sci Bull](#), 2011, 56: 102–112
- 89 陈林根, 田凤红, 肖庆华, 等. 基于横截面流道矩形单元体的积耗散率最小传质构形优化. [热科学与技术](#), 2012, 11: 136–141
- 90 Xu M T. Variational principles in terms of entransy for heat transfer. [Energy](#), 2012, 44: 973–977
- 91 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Thermal insulation constructal optimization for steel rolling reheating furnace wall based on entransy dissipation extremum principle. [Sci China Tech Sci](#), 2012, 55: 3322–3333
- 92 Jia H, Liu Z C, Liu W, et al. Convective heat transfer optimization based on minimum entransy dissipation in the circular tube. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2014, 73: 124–129
- 93 Cheng X T, Liang X G. Entransy variation associated with work. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2015, 81: 167–170
- 94 Wang Y, He Y L, Yang W W, et al. Numerical analysis of flow resistance and heat transfer in a channel with delta winglets under laminar pulsating flow. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2015, 82: 51–65
- 95 Wu J. A new approach to determining the intermediate temperatures of endoreversible combined cycle power plant corresponding to maximum power. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2015, 91: 150–161
- 96 Chen Q, Wang Y F, Xu Y C. A thermal resistance-based method for the optimal design of central variable water/air volume chiller systems. [Appl Energ](#), 2015, 139: 119–130
- 97 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for triangular heat trees at micro and nanoscales. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2015, 84: 848–855
- 98 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for helm-shaped fin with inner heat sources. [Sci China Tech Sci](#), 2015, 58: 1084–1090
- 99 Guo J F. Design analysis of supercritical carbon dioxide recuperator. [Appl Energ](#), 2016, 164: 21–27
- 100 Gong S W, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal optimization of cylindrical heat sources with forced convection based on entransy dissipation rate minimization. [Sci China Tech Sci](#), 2016, 59: 631–639
- 101 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization of a rectangular body with nonuniform heat generation. [Sci China Tech Sci](#), 2016, 59: 1352–1359
- 102 Xia S J, Chen L G, Xie Z H, et al. Entransy dissipation minimization for generalized heat exchange processes. [Sci China Tech Sci](#), 2016, 59: 1507–1516
- 103 Yang A B, Chen L G, Xie Z H, et al. Thermal performance analysis of non-uniform height rectangular fin based on constructal theory and entransy theory. [Sci China Tech Sci](#), 2016, 59: 1882–1891
- 104 Xia S J, Chen L G, Sun F R. Optimization of equimolar reverse constant-temperature mass-diffusion process for minimum entransy dissipation. [Sci China Tech Sci](#), 2016, 59: 1867–1873
- 105 Caputo A C, Cardarelli G, Pelagagge P M. Analysis of heat recovery in gas-solid moving beds using a simulation approach. [Appl Thermal Eng](#), 1996, 16: 89–99

- 106 Zhang D H, Wang B X, Zhou N, et al. Cooling efficiency of laminar cooling system for plate mill. *J Iron Steel Res Int*, 2008, 15: 24–28
- 107 Jang J Y, Chiu Y W. 3-D transient conjugated heat transfer and fluid flow analysis for the cooling process of sintered bed. *Appl Thermal Eng*, 2009, 29: 2895–2903
- 108 Chen W, Zhang Y Z, Wang B X. Optimisation of continuous casting process parameters based on coupled heat and stress model. *Ironmak Steelmak*, 2010, 37: 147–154
- 109 Helle H, Helle M, Saxén H. Nonlinear optimization of steel production using traditional and novel blast furnace operation strategies. *Chem Eng Sci*, 2011, 66: 6470–6481
- 110 陈光, 杨婷, 丁毅, 等. 钢铁生产能量流解析及炼焦主要单元应用. 冶金能源, 2013, 32: 3–8
- 111 Doctor Y N, Patil B T, Darekar A M. Review of optimization aspects for casting processes. *Int J Sci Res*, 2015, 4: 2364–2368
- 112 Liu Y, Yang J, Wang J, et al. Prediction, parametric analysis and bi-objective optimization of waste heat utilization in sinter cooling bed using evolutionary algorithm. *Energy*, 2015, 90: 24–35
- 113 Abdillah I L, Nurjannah I. Inter-rater reliability of wound care skills checklist in objective structured clinical examination. *Int J Res Med Sci*, 2016, 5: 283–286
- 114 Rajshekar Y, Alex T C, Sahoo D P, et al. Iron ore slime as an alternate coolant in steelmaking: Performance evaluation at commercial scale. *J Cleaner Production*, 2016, 139: 886–893
- 115 刘泽森, 谢志辉, 张泽龙, 等. 焦化工序能耗及二氧化碳排放量计算及参数影响. 钢铁研究, 2016, 44: 1–4
- 116 Liu C X, Xie Z H, Sun F R, et al. Optimization for sintering proportioning based on energy value. *Appl Thermal Eng*, 2016, 103: 1087–1094
- 117 刘雄. 钢铁生产流程的多目标广义构形优化. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2016
- 118 Feng H J, Chen L G, Liu X, et al. Constructal optimization of a sinter cooling process based on exergy output maximization. *Appl Thermal Eng*, 2016, 96: 161–166
- 119 Shen X, Chen L G, Xia S J, et al. Numerical simulation and analyses for sinter cooling process with convective and radiative heat transfer. *Int J Energy Environ*, 2016, 7: 303–316
- 120 沈勋, 陈林根, 夏少军, 等. 竖罐式和环冷式烧结矿冷却过程的数值模拟. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 36–45
- 121 刘雄. 高炉炼铁过程的热力学优化模型及分析. 硕士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2013
- 122 秦晓勇, 刘雄, 陈林根, 等. 高炉利用系数目标优化模型的研究和应用. 中国冶金, 2014, 24: 5–10
- 123 Liu X, Chen L G, Qin X Y, et al. Exergy loss minimization for a blast furnace with comparative analyses for energy flows and exergy flows. *Energy*, 2015, 93: 10–19
- 124 Liu X, Qin X Y, Chen L G, et al. CO₂ emission optimization for a blast furnace considering plastic injection. *Int J Energy Environ*, 2015, 6: 175–190
- 125 张子煜. 高炉炼铁工序的热力学分析与优化. 硕士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2014
- 126 张子煜, 秦晓勇, 陈林根, 等. 以降低能耗为目标的高炉炼铁工序的优化. 钢铁研究, 2016, 44: 1–5
- 127 Liu X, Chen L G, Feng H J, et al. Constructal design of a blast furnace iron-making process based on multi-objective optimization. *Energy*, 2016, 109: 137–151
- 128 Liu X, Feng H J, Chen L G, et al. Hot metal yield optimization of a blast furnace based on constructal theory. *Energy*, 2016, 104: 33–41
- 129 Chen L G, Liu X, Feng H J, et al. Molten steel yield optimization of a converter based on constructal theory. In: *Proceeding Energy Engineering, Economics and Policy*. Orlando, 2017
- 130 Liu X, Feng H J, Chen L G, et al. Constructal design of a converter steel-making procedure based on multi-objective optimization. In: *Proceeding Energy Engineering, Economics and Policy*. Orlando, 2017
- 131 冯辉君, 陈林根, 丁泽民, 等. 基于Matlab的板坯连铸凝固传热过程及热损失研究. 连铸, 2013, 6: 16–22
- 132 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Generalized constructal optimization for the secondary cooling process of slab continuous casting based on entransy theory. *Sci China Tech Sci*, 2014, 57: 784–795
- 133 Saiful Alam M, Wijayanta A T, Nakaso K, et al. Study on coal gasification with soot formation in two-stage entrained-flow gasifier. *Int J Energy Environ Eng*, 2015, 6: 255–265
- 134 Feng H J, Chen L G, Liu X, et al. Generalized constructal optimization of strip laminar cooling process based on entransy theory. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1687–1695
- 135 冯辉君, 陈林根, 孙丰瑞. 薄板坯连铸连轧流程数值分析. 钢铁研究, 2015, 43: 23–27
- 136 Chan D Y L, Yang K H, Lee J D, et al. The case study of furnace use and energy conservation in iron and steel industry. *Energy*, 2010, 35: 1665–1670
- 137 Si M, Thompson S, Calder K. Energy efficiency assessment by process heating assessment and survey tool (PHAST) and feasibility analysis of

- waste heat recovery in the reheating furnace at a steel company. *Renew Sust Energy Rev*, 2011, 15: 2904–2908
- 138 Ma G, Cai J, Zeng W, et al. Analytical research on waste heat recovery and utilization of China's iron & steel industry. *Energy Procedia*, 2012, 14: 1022–1028
- 139 Chen L G, Yang B, Shen X, et al. Thermodynamic optimization opportunities for the recovery and utilization of residual energy and heat in China's iron and steel industry: A case study. *Appl Thermal Eng*, 2015, 86: 151–160
- 140 王俊华, 陈林根, 孙丰瑞. 回热式等温加热修正的Brayton循环功率与效率特性. *热力透平*, 2013, 42: 112–118
- 141 王俊华, 陈林根, 孙丰瑞. 高炉余能余热驱动内可逆中冷回热Brayton热电联产循环经济性分析. *燃气轮机技术*, 2013, 26: 1–12
- 142 张万里, 陈林根, 孙丰瑞. 开式双轴燃气轮机循环的热力学优化. *热力透平*, 2013, 42: 104–111
- 143 张泽龙, 陈林根, 戈延林, 等. 焦炉煤气驱动的回热式燃气轮机装置热力学分析. *钢铁研究*, 2013, 41: 37–40
- 144 张泽龙, 陈林根, 孙丰瑞. 回热式布雷顿-两平行逆布雷顿联合循环第一定律分析与优化. *燃气轮机技术*, 2013, 26: 1–5
- 145 Zhang Z L, Chen L G, Ge Y L, et al. Thermodynamic analysis for a regenerative gas turbine cycle in coking process. *Int J Energy Environ*, 2014, 5: 701–708
- 146 王文华, 陈林根, 丁泽民, 等. 高炉煤气燃气轮机简单循环热力性能分析. *热力透平*, 2014, 43: 276–280, 290
- 147 张泽龙. 钢厂余能余热利用布雷顿循环热力学分析与优化. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2015
- 148 Zhang Z L, Chen L G, Yang B, et al. Thermodynamic analysis and optimization of an air Brayton cycle for recovering waste heat of blast furnace slag. *Appl Thermal Eng*, 2015, 90: 742–748
- 149 王文华, 陈林根, 丁泽民, 等. 恒温热源闭式燃气轮机中冷循环性能密度优化. *工程热物理学报*, 2015, 36: 1617–1621
- 150 张泽龙, 陈林根, 王文华, 等. 回收熔渣余热的空气中冷布雷顿循环热力学分析. *钢铁研究*, 2015, 43: 4–8
- 151 张泽龙, 陈林根, 杨博, 等. 高炉渣余热驱动空气布雷顿循环有限时间热力学分析. *中国冶金*, 2015, 25: 16–21
- 152 Wang J H, Chen L G, Ge Y L, et al. Power and power density analyzes of an endoreversible modified variable-temperature reservoir Brayton cycle with isothermal heat addition. *Int J Low-Carbon Tech*, 2016, 11: 42–53
- 153 杨博, 陈林根, 孙丰瑞. 高炉余能余热驱动ICR Brayton CHP装置的燃经济性性能优化. *电力与能源*, 2013, 34: 317–320
- 154 杨博. 布雷顿热电和热电冷联产装置有限时间热力学分析与优化. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2014
- 155 Yang B, Chen L G, Ge Y L, et al. Exergy performance optimization of an irreversible closed intercooled regenerative brayton cogeneration plant. *Arab J Sci Eng*, 2014, 39: 6385–6397
- 156 Yang B, Chen L G, Ge Y L, et al. Finite-time exergoeconomic performance of a real intercooled regenerated gas turbine cogeneration plant. Part 2: Heat conductance distribution and pressure ratio optimization. *Int J Low-Carbon Tech*, 2014, 9: 262–267
- 157 Yang B, Chen L G, Ge Y L, et al. Exergy performance analyses of an irreversible two-stage intercooled regenerative reheated closed Brayton CHP plant. *Int J Exergy*, 2014, 14: 459–483
- 158 Yang B, Chen L G, Sun F R. Exergetic performance optimization of an endoreversible variable-temperature heat reservoirs intercooled regenerated Brayton cogeneration plant. *J Energy Institute*, 2016, 89: 1–11
- 159 杨博, 陈林根, 王文华, 等. 考虑压降的开式布雷顿CHP装置性能优化. *机械工程学报*, 2016, 52: 166–175
- 160 Feng H J, Tao G S, Chen L G, et al. Exergoeconomic optimal performance of a real regenerative gas turbine closed-cycle heat and power cogeneration plant. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE) Conference. Tampa, 2017
- 161 Chen L G, Yang B, Feng H J, et al. Modelling, analyses and optimization for exergy performance an irreversible intercooled regenerated Brayton CHP plant. Part 1. Thermodynamic modeling and parametric analyses. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE) Conference. Tampa, 2017
- 162 Yang B, Chen L G, Feng H J, et al. Modelling, analyses and optimization for exergy performance an irreversible intercooled regenerated Brayton CHP plant. Part 2. Performance optimization. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE) Conference. Tampa, 2017
- 163 陈林根, 杨博, 谢志辉, 等. 高炉余能余热驱动回热布雷顿CCHP装置焓分析. *钢铁研究*, 2013, 41: 9–13
- 164 杨博, 陈林根, 王文华, 等. 高炉余能余热驱动内可逆回热布雷顿循环热电冷联产装置的最优焓性能. *燃气轮机技术*, 2013, 26: 26–33
- 165 Yang B, Chen L G, Ge Y L, et al. Exergy analyses of an endoreversible closed regenerative Brayton cycle CCHP plant. *Int J Energy Environ*, 2014, 5: 655–668
- 166 杨博, 陈林根, 孙丰瑞. 开式回热燃气轮机热电冷联产装置性能分析与优化. *热力透平*, 2014, 43: 193–198, 208
- 167 陈林根, 杨博, 谢志辉, 等. 转炉煤气驱动开式燃气轮机CCHP装置FTT建模与优化. *中国冶金*, 2014, 24: 50–58
- 168 杨博, 陈林根, 孙丰瑞. 不可逆回热布雷顿CCHP装置FTT建模. *热科学与技术*, 2015, 14: 239–249
- 169 Chen L G, Yang B, Ding Z M, et al. Performance investigation of an open simple-cycle gas turbine CCHP plant driven by basic oxygen furnace gas in China's steelmaking plants. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE) Conference. Tampa,

2017

- 170 陈林根, 孟凡凯, 孙丰瑞, 等. 热电发电技术回收钢铁工业余热节能潜力分析. *钢铁研究*, 2013, 41: 41–43, 58
- 171 孟凡凯, 陈林根, 杨博, 等. 烧结烟气余热热电发电模型与数值模拟. *工程热物理学报*, 2014, 35: 2323–2328
- 172 Meng F K, Chen L G, Sun F R, et al. Thermoelectric power generation driven by blast furnace slag flushing water. *Energy*, 2014, 66: 965–972
- 173 熊兵. 工业余热驱动两级热电发电装置热力学分析与优化. 硕士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2014
- 174 Xiong B, Chen L G, Meng F K, et al. Modeling and performance analysis of a two-stage thermoelectric energy harvesting system from blast furnace slag water waste heat. *Energy*, 2014, 77: 562–569
- 175 Chen L G, Meng F K, Sun F R. Thermodynamic analyses and optimization for thermoelectric devices: The state of the arts. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 442–455
- 176 Meng F K, Chen L G, Sun F R. Effects of thermocouples' physical size on the performance of the TEG-TEH system. *Int J Low-Carbon Tech*, 2016, 11: 375–382
- 177 熊兵, 陈林根, 孟凡凯, 等. 烧结烟气余热驱动圆筒式两级热电发电装置热力学分析与优化. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46: 293–301
- 178 孟凡凯, 陈林根, 谢志辉, 等. 钢铁工业余热回收过程的用能合理性评价. 见: 中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议论文集. 厦门, 2015
- 179 孟凡凯, 陈林根, 谢志辉, 等. 钢铁工业余热回收技术的评价指标体系. *中国冶金*, 2015, 25: 76–81
- 180 Wu L, Zhou W, Cheng H, et al. The study of structure optimization of blast furnace cast steel cooling stave based on heat transfer analysis. *Appl Math Model*, 2007, 31: 1249–1262
- 181 高泽平, 苏振江. 大方坯连铸结晶器浸入式水口结构优化. *炼钢*, 2008, 24: 42–45
- 182 张美杰, 林小龙, 黄奥, 等. 六流中间包场协同分析及流场优化. *特殊钢*, 2009, 30: 1–4
- 183 Kang D H, Lorente S, Bejan A. Constructal distribution of multi-layer insulation. *Int J Energ Res*, 2013, 37: 153–160
- 184 Jiang Z Y, Chen P Y, Liu P, et al. Numerical simulation and structure optimization of converter gas evaporative cooler. In: *Proceedings of 2013 Summer Heat Transfer Conference*. Minneapolis, 2013
- 185 Kumar A N. Heat transfer analysis of blast furnace refractory lining. Dissertation of Masteral Degree. Odisha: National Institute of Technology Rourkela, 2014
- 186 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy optimizations for insulation layer of steel rolling reheating furnace wall with convective and radiative boundary conditions. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 2470–2477
- 187 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for variable cross-section insulation layer of the steel rolling reheating furnace wall. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2014, 52: 26–32
- 188 冯辉君, 陈林根, 谢志辉, 等. 基于焓理论的轧钢加热炉壁变截面绝热层构形优化. *物理学报*, 2015, 64: 054402
- 189 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal designs for insulation layers of steel rolling reheating furnace wall with convective and radiative boundary conditions. *Appl Thermal Eng*, 2016, 100: 925–931
- 190 Liu X, Chen L G, Feng H J, et al. Constructal design for blast furnace wall based on the entransy theory. *Appl Thermal Eng*, 2016, 100: 798–804
- 191 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. “Disc-point” heat and mass transfer constructal optimization for solid-gas reactors based on entropy generation minimization. *Energy*, 2015, 83: 431–437
- 192 Feng H J, Chen L G, Xie Z H, et al. Constructal entransy dissipation rate minimization for solid-gas reactors with heat and mass transfer in a disc-shaped body. *Int J Heat Mass Transfer*, 2015, 89: 24–32
- 193 Chen L G, Shen X, Xia S J, et al. Thermodynamic analyses for recovering residual heat of high-temperature basic oxygen gas (BOG) by the methane reforming with carbon dioxide reaction. *Energy*, 2017, 118: 906–913
- 194 Sun B X, Nie Z R, Gao F. Cumulative exergy consumption (CEXC) analysis of energy carriers in China. *Int J Exergy*, 2014, 15: 196–213
- 195 Sun B, Liu Y, Nie Z R, et al. Exergy-based model for quantifying land resource in China: A case study of sintered brick. *Int J Exergy*, 2014, 15: 429–446
- 196 Zhang Y J, Gao F, Wang Z H. Updated resource depletion characterization factors for life cycle assessment-case studies on iron and steel production in China. *Mater Sci Forum*, 2016, 847: 358–365
- 197 Hu J Y, Gao F, Wang Z H, et al. Life cycle assessment of steel production. *Mater Sci Forum*, 2014, 787: 102–105
- 198 Sun B X, Nie Z R, Liu Y, et al. Research on life cycle CO₂ emissions of energy carriers in China. *Mater Res Innov*, 2014, 18: S4-56–S4-61
- 199 Swinerd C, McNaught K R. Design classes for hybrid simulations involving agent-based and system dynamics models. *Simul Model Pract Theor*, 2012, 25: 118–133
- 200 Liu C X, Xie Z H, Sun F R, et al. System dynamics analysis on characteristics of iron-flow in sintering process. *Appl Thermal Eng*, 2015, 82: 206–211

- 201 刘长鑫, 谢志辉, 孙丰瑞, 等. 炼铁工序铁素流的系统动力学分析. *钢铁研究*, 2014, 42: 5–8
- 202 刘长鑫, 谢志辉, 孙丰瑞, 等. 转炉炼钢工序的铁素流系统动力学分析. *中国冶金*, 2015, 25: 4–8
- 203 刘长鑫. 基于系统动力学的钢铁生产流程铁素流特性研究. 硕士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2013
- 204 朱正海, 仇圣桃, 干勇, 等. 连铸-热轧区段大板坯温度变化规律研究. *钢铁*, 2009, 44: 31–35
- 205 杨业建, 姜泽毅, 张欣欣. 钢坯热轧加热炉区生产调度模型与算法. *北京科技大学学报*, 2012, 7: 841–846
- 206 刘成, 徐安军, 贺东风, 等. 铁包加盖对铁水温降影响研究. 见: 第十八届(2014年)全国炼钢学术会议. 西安, 2014
- 207 邓帅, 徐安军, 周东升. 沙钢永新炼钢厂“准层流”式生产模式分析. 见: 第十八届(2014年)全国炼钢学术会议. 西安, 2014
- 208 蔡峻, 汪红兵, 徐安军. 炼钢厂钢包红包出钢率的影响因素仿真. *钢铁研究学报*, 2014, 87: 191–200
- 209 冯凯, 贺东风, 徐安军, 等. 基于钢包运行稳定性的炼钢厂生产计划优化. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36: 1619–1623
- 210 冯凯, 贺东风, 徐安军, 等. 钢包调度评价方法研究. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36: 1728–1732
- 211 Feng K, He D F, Xu A J, et al. End temperature prediction of molten steel in LF based on CBR-BBN. *Steel Res Int*, 2016, 87: 79–86
- 212 Feng K, He D F, Xu A J, et al. End temperature prediction of molten steel in RH based on case-based reasoning with optimized case base. *J Iron Steel Res Int*, 2015, 22: 68–74
- 213 陈贤哲, 徐安军, 钱卫忠. 连铸坯热送热装过程的平面布置优化研究. 见: 第十八届(2014年)全国炼钢学术会议. 西安, 2014
- 214 Wang P, Jiang Z Y, Liu Z T, et al. Modeling and optimizing energy utilization of steel production process: A hybrid petri net approach. *Adv Mech Eng*, 2013, 5: 191963
- 215 Wang P, Jiang Z Y, Geng X Y, et al. Dynamic material flow analysis of steel resources in China based on circular economy theory. *Adv Mater Res*, 2013, 813: 64–71
- 216 Wang P, Jiang Z Y, Geng X Y, et al. Quantification of Chinese steel cycle flow: Historical status and future options. *Resour Conserv Recycl*, 2014, 87: 191–199
- 217 Jin P, Jiang Z Y, Zhang X X, et al. Thermodynamic analysis method for iron and steel manufacturing system based on enthalpy balance. *Adv Mater Res*, 2012, 524–527: 2056–2062
- 218 Jiang Z Y, Zhang X X, Jin P, et al. Energy-saving potential and process optimization of iron and steel manufacturing system. *Int J Energ Res*, 2013, 35: 2009–2018
- 219 汪鹏, 姜泽毅, 张欣欣, 等. 中国钢铁工业流程结构、能耗和排放长期情景预测. *北京科技大学学报*, 2015, 36: 1683–1693
- 220 金鹏, 姜泽毅, 包成, 等. 炉顶煤气循环氧气高炉的能耗和碳排放. *冶金能源*, 2015, 34: 11–18
- 221 Jin P, Jiang Z, Bao C, et al. Mathematical modeling of the energy consumption and carbon emission for the oxygen blast furnace with top gas recycling. *Steel Res Int*, 2016, 87: 320–329
- 222 Jin P, Jiang Z Y, Bao C, et al. The energy consumption and carbon emission of the integrated steel mill with oxygen blast furnace. *Resour Conserv Recycl*, 2017, 117: 58–65
- 223 刘泽淼. 钢铁生产过程能耗及CO₂排放建模与分析. 硕士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2015
- 224 陈林根, 夏少军, 谢志辉, 等. 钢铁冶金过程动态数学模型的研究进展. *热科学与技术*, 2014, 13: 95–125
- 225 沈勋, 陈林根, 夏少军, 等. 钢铁流程能耗分析与节能技术的研究进展. *节能*, 2015, 34: 4–11
- 226 Shen X, Chen L G, Xia S J, et al. Iron ores matching analysis and optimization for iron-making system by taking energy consumption, CO₂ emission or cost minimization as the objective. *Sci China Tech Sci*, 2017, 60, doi: 10.1007/s11431-017-9072-9
- 227 沈勋. 基于物质流和能量流的钢铁流程能耗和排放特性分析与优化. 博士学位论文. 武汉: 海军工程大学, 2017
- 228 Feng H J, Chen L G, Liu X, et al. Constructal design for an iron and steel production process based on the objectives of steel yield and useful energy. *Int J Heat Mass Transfer*, 2017, 111: 1192–1205

Interaction mechanism among material flows, energy flows and environment and generalized thermodynamic optimizations for iron and steel production processes

CHEN LinGen^{1,2,3}, FENG HuiJun^{1,2,3}, XIE ZhiHui^{1,2,3}, JIANG ZeYi⁴, GAO Feng⁵, XU AnJun⁶
& ZHANG XinXin⁴

¹ Institute of Thermal Science and Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

² Military Key Laboratory for Naval Ship Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

³ College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

⁴ School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

⁵ College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

⁶ School of Metallurgy and Ecology Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Combining modern thermodynamic theories, including finite time thermodynamics, constructal theory and entransy theory, with metallurgical process engineering, a generalized thermodynamic optimization theory for iron and steel production processes is proposed. The simulation platform for the energy consumption and emissions of the iron and steel production process is built, and the evaluation method of the material flows, energy flows and environment combining exergy analysis with life cycle assessment is established. On the basis of the new theory, simulation platform and evaluation method, interaction mechanism investigations for the material flows, energy flows and environment of the elemental packages, working procedure modules, functional subsystems and whole process of the iron and steel production processes are conducted, and multi-disciplinary and multi-objective generalized thermodynamic optimizations of them are also implemented. After optimizations, the selections of the processes and technologies, the distributions of the materials and energies as well as the utilizations of the residual energies and heats are more reasonable. The systems of the whole process are integrated, and the material flows, energy flows and environment are synthetically coordinated. Finally, the efficient allocation of the energies and the cascade utilization of the residual energies are realized, and the energy consumption and emissions of the whole system are significantly decreased. This paper can provide theoretical supports for the designs and operations of the energy and environmental protection center of the iron and steel enterprises by exploring the efficient, energy-saving and low emission technologies of the iron and steel production processes. It also can provide research platforms and lay science and technology bases for solving the common efficient energy-saving problems of the general material transformation processes.

generalized thermodynamic optimization, iron and steel production processes, finite time thermodynamics, constructal theory, entransy theory, metallurgical process engineering

doi: 10.1360/N092017-00038