

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180113

铁矿烧结过程能耗数学模型的研究进展

王海东¹, 余海钊¹, 范晓慧¹, 李海亮¹, 景涛^{1,2}, 郭慧¹

(1. 中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南长沙 410205)

摘要: 综述了铁矿烧结过程能耗数学模型的研究动态, 重点介绍了烧结过程能耗分析与能源管理, 热平衡模型、固耗预测模型、碳效模型和烟效率模型等能效评价数学模型, 以及烧结工艺参数优化等进展。同时展望了烧结过程能耗数学模型的研究方向, 即创新能效评价方法, 找出用能薄弱环节, 并建立能耗数学模型科学评价烧结过程的能源消耗, 在一定的指标参数和状态参数约束条件下最优化调节烧结工艺参数, 最终提高烧结过程能效并实现绿色生产。

关键词: 烧结过程; 数学模型; 能耗; 能效评价; 工艺参数优化

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)10-0001-07

Progress in research on mathematical model of energy consumption of iron ore sintering process

WANG Hai-dong¹, YU Hai-zhao¹, FAN Xiao-hui¹, LI Hai-liang¹, JING Tao^{1,2}, GUO Hui¹

(1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: Research developments of mathematical models of the energy consumption of iron ore sintering process were summarized. The energy consumption analysis and the energy management, including the evaluation model of energy efficiency such as the heat balance model, the solid consumption prediction model, the carbon efficiency model, the exergy analysis model in sintering process, and the optimization of sintering process parameters were introduced. At the same time, the future research direction in the area was predicted: innovate methods of the evaluation of energy efficiency, finding the energy weak link in the sintering process, building the mathematical model to evaluate the energy consumption of the sintering process scientifically, optimizing the process parameters under the constraints of certain parameters and state parameters. The ultimate goal is to increase the energy efficiency of the sintering process and achieve green production.

Key words: sintering process; mathematical model; energy consumption; evaluation of energy efficiency; optimization of process parameter

烧结过程作为钢铁生产第二大耗能环节, 其耗能量巨大, 在钢铁总能耗中约占 15%。自 1987 年日本川崎钢铁公司佐佐木等根据碳燃烧量(RC)和炽热区面积比(HZR)两个变量建立焦粉配比控制模型^[1]以来, 烧结能耗数学模型的应用越来越广泛。特别是依据质量平衡、热量平衡、燃烧反应和传热传质原理等建立的机理模型; 以及其他非机理模型, 如非线性系统辨识模型, 基于神经网络(ANN)、支持向量机(SVM)等的驱动模型, 专家系统、模糊系统、灰色系统理论等智能集成模

型。烧结能耗模型计算结果在烧结过程能耗分析与能源管理、能效评价模型和工艺参数优化等方面为工艺过程运行提供参数优化指导, 有效地降低了过程能耗并提高能源利用效率, 具有十分重要的意义。

1 能耗分析与能源管理

烧结过程是将铁矿粉加工成具有一定强度、粒度、孔隙率和冶金性能烧结矿的复杂物理化学反应过程, 在这个过程中会发生焦粉燃烧、新矿物形成

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474237)

作者简介: 王海东(1963—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** joewhd@126.com; **收稿日期:** 2018-03-20

通讯作者: 余海钊(1985—), 男, 博士生; **E-mail:** yuhaizhao@csu.edu.cn

等化学变化,以及相变、传热和传质过程等物理变化。烧结过程伴随着碳素燃料燃烧产生 CO_2 等碳素流变化,以及铁矿石矿物结构、形态和冶金性能改变等铁素流变化^[2]。

烧结过程的能源消耗主要是熔剂和燃料破碎、配料、混料、烧结、烧结矿破碎和筛分等所消耗的能源^[3]。能耗组成主要是固体燃料、电力、点火燃气和动力消耗,其比例依次约为80%、13%、6%、1%。烧结过程能量收入主要有带入的各类物理热,燃烧反应、生石灰消化等化学反应放热以及其他物理放热;而能量支出主要有碳酸盐分解、铁氧化物还原、水分蒸发、脱硫等物理化学反应吸热,化学不完全燃烧热、烧结矿残碳损失、烧结饼和烧结废气带走的物理热以及其他散热等。参照烧结机热平衡测定与计算方法暂行规定(YS/TI 19.8—1984),以国内某钢铁厂360 m²烧结机实际生产数据为基础,绘制的烧结过程能源流向如图1所示。

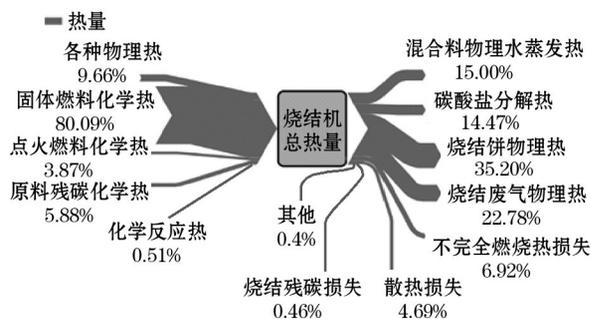


图1 烧结过程能源流向图

Fig. 1 Energy flow diagram of sintering process

在此基础上,胡兵等^[4]建立了烧结过程能耗精细化管理软件,系统通过OPC与一级自动化控制系统进行数据交换,结合烧结专家系统的分析数据进行模型计算,得出各种能源消耗计算值,可以直观掌握烧结过程用能状况和科学判断节能潜力。付明辉^[5]把烧结过程划分为配料、混合与布料、烧结和冷却4个子工序,全面分析了烧结工艺过程的能流、物流和烟分布,开发了一套烧结生产能源管理系统,系统能够计算吨烧结矿工序能耗,可以为节能降耗提供准确的信息参考。对烧结过程物质流、能量流进行细化分析,是从系统节能的角度考虑提高过程资源、能源利用效率,有利于进一步促进烧结生产实现生态化转型和可持续发展。烧结能源管理为能耗分析以及相关能耗模型的建立提供了完整、准确和真实的数据信息,对烧结过程开展能效评价工作具有较高的实用价值。

2 能效评价模型

2.1 热平衡模型

烧结热平衡主要体现能量守恒原理,描述的是过程热量收入和热支出之间的数量平衡关系。一般定义烧结机热效率为热平衡模型评价指标,烧结有效热除以供给热即为烧结机热效率,其计算公式见式(1)^[6]。

$$\eta_1 = \frac{Q'_1 + Q'_2 + \beta Q'_3 - Q_1 + Q'_4}{Q_1 - Q_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η_1 为烧结机热效率,%; Q'_1 为混合料物理水蒸发热量和结晶水分解热量,kJ/t; Q'_2 为碳酸盐分解热量,kJ/t; Q'_3 为烧结饼物理热量,kJ/t; Q'_4 为烧结台车和算条吸热量,kJ/t; Q_1 为烧结机热收入总量,kJ/t; Q_1 为烧结混合料物理热量,kJ/t; β 为烧结成品率,%。

烧结成品率 β 计算公式见式(2)。

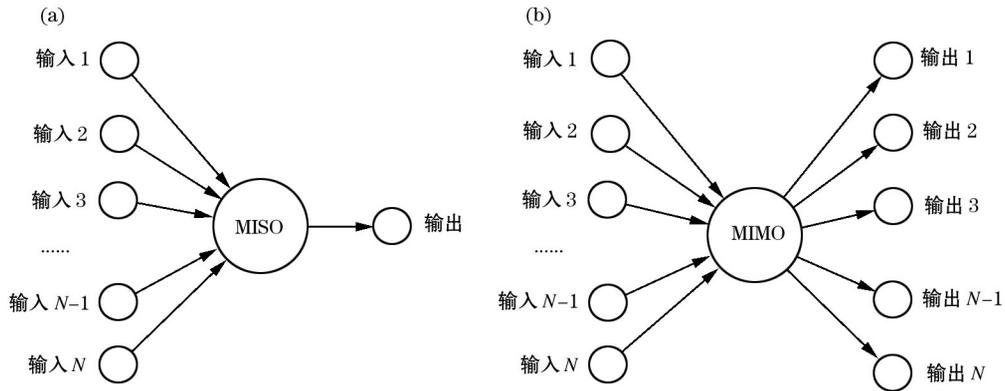
$$\beta = \frac{G'_1}{G'_1 + G'_2 + G'_3} \quad (2)$$

式中: G'_1 为成品烧结矿的量,kJ/t; G'_2 为烧结自返矿的量,kJ/t; G'_3 为排出烧结机的灰量,kJ/t。

烧结热平衡模型得到了广泛的研究和实际应用。宝钢对所属烧结机进行了热平衡测试,全面掌握了烧结机的物料和热收支水平,计算了成品矿机时产量、固体燃料单耗、热效率等技术经济指标,并与国内其他烧结机热利用情况进行横向对比分析,探讨了影响能耗的主要因素并提出改进建议,为节能改造提供了重要的数据参考依据^[7-8]。李宗平等通过PLC获取烧结原料参数、设备参数和工艺参数等实时数据,对烧结过程质量平衡和热平衡进行分析,建立了烧结固体燃料在线计算系统,系统能够最优化计算烧结焦粉配比,为烧结能效优化提供了数据指导^[9]。建立烧结过程热平衡模型能够从宏观上掌握烧结能量消耗的大小、分布以及利用情况,反映的是能量的数量关系,能够在一定程度上揭示能量的外部损耗情况,但在微观层面特别是能量的内部损耗方面存在薄弱环节。

2.2 固体燃料消耗预测模型

建立烧结固体燃料消耗(固耗)预测模型有两类模式:(1)多输入单输出模式(MISO模型),如线性回归、支持向量回归(SVR)等回归模型;(2)多输入多输出模式(MIMO模型),如反向传播(BP)、径向基函数(RBF)、极限学习机(ELM)等神经网络模型。如图2所示。



(a) MISO 模型; (b) MIMO 模型。

图 2 预测建模模式

Fig. 2 Schematic of predictive modeling

预测建模过程一般有 5 个步骤: (1)确定模型的输入量和输出量; (2)对异常数据进行清理; (3)输入量归一化(将输入量转换成 0~1 之间的数据); (4)抽取一部分数据作为训练集,其余部分作为测试集,进行模型训练; (5)采用测试集计算模型精度,如图 3 所示。

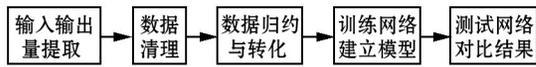


图 3 预测建模过程

Fig. 3 Predictive modeling process

采用平均相对误差 e_{mean} 、最大相对误差 e_{max} 、均方差 E_{mse} 、决定系数 R^2 4 类指标对模型精度进行评价。

$$e_{\text{mean}} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (|\tilde{y}_k - y_k| / y_k) \quad (3)$$

$$e_{\text{max}} = \max\{|\tilde{y}_k - y_k| / y_k\} \quad (4)$$

$$E_{\text{mse}} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (\tilde{y}_k - y_k)^2 \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{(m \sum_{k=1}^m \tilde{y}_k y_k - \sum_{k=1}^m \tilde{y}_k \sum_{k=1}^m y_k)^2}{(m \sum_{k=1}^m \tilde{y}_k^2 - (\sum_{k=1}^m \tilde{y}_k)^2)(m \sum_{k=1}^m y_k^2 - (\sum_{k=1}^m y_k)^2)} \quad (6)$$

式中: m 为测试集样本数; $y_k (k=1, 2, 3, \dots, m)$ 为第 k 个样本的实际值; $\tilde{y}_k (k=1, 2, 3, \dots, m)$ 为第 k 个样本的预测值。

焦粉和煤粉等固体燃料在烧结总体能源消耗中占比很大。韩庆虹等采用 Matlab 建立三层前向 BP 网络结构模型,模型输入为白云石、成品率、透气性、点火强度、料层厚度等 10 个参数,模型输出为固体燃耗,模型取得了较高的预测精度,模型运算结果为进一步优化工艺参数奠定了基础^[10]。针对 BP

神经网络算法泛化能力弱、收敛速度慢、易出现局部最优等问题,孟辉等采用附加动量法和自适应学习速率调整法改进 BP 神经网络模型,结合单因素法确定影响烧结能耗的主要因素,以原料参数、操作参数等 30 个变量作为模型输入,模型较好地预测了烧结能耗^[11]。王俊凯等采用支持向量回归(SVR)建立烧结固耗预测模型,把原料参数、状态参数、操作参数等 26 个变量作为模型输入,采用 SVR 模型预测烧结固体能耗在预测精度和时间效率上具有显著优势^[12]。烧结固耗预测模型可以作为约束条件通过不断迭代运算求解最优的配矿方案组,最终实现烧结节能降耗,这也是烧结固耗预测今后的一个研究方向。

2.3 碳效模型

烧结能量来源主要是焦粉和燃气的燃烧,如何有效地计算烧结碳消耗量和评价碳燃烧效率是当前的研究热点。影响烧结碳效的因素很多,从原料的角度考虑,焦粉配比是重要的影响因素;从能源利用的角度考虑,烧结机运行状态和焦粉完全燃烧是重要的影响因素。目前有两种指标来评价烧结过程碳效。

2.3.1 综合焦比

采用“综合焦比”(CCR)^[13]来描述烧结过程的碳消耗量,它是指每生产一吨成品烧结矿所消耗的碳量,其计算方法见式(7)。

$$\eta_2 = \frac{M_c}{M_s} \quad (7)$$

式中: η_2 为综合焦比, kg/t; M_c 为混合料中焦粉用量, kg/h; M_s 为成品烧结矿产量, t/h。

烧结过程全流程时间跨度很大,综合焦比依据式(7)计算存在着较长的时间滞后,实际应用中往

往需要提前预报。而烧结综合焦比影响参数众多,且参数之间耦合性很强,很难直接建立机理模型,目前多采取数据驱动建模。陈鑫等结合烧结过程机理分析和灰色关联度分析,确定影响综合焦比的因素为风机负压、焦粉配比、SiO₂质量分数、CaO质量分数、终点位置、料层厚度、台车机速和烧成率,建立了混沌粒子群算法优化的BP神经网络预测模型和遗传算法优化的小波神经网络预测模型^[14-15]。陈晓霞等通过离散小波变换(DWT),把烧结原料参数和操作参数共8组输入变量分别分解成5组波动分量,每组建立BP神经网络预测模型,通过子序列输出值叠加生成最终的预测结果,模型能够准确地预测综合焦比^[16];建立了综合焦比混合时间序列预测模型^[17],包括Elman循环神经网络(RNN)时间序列预测和双联线性-非线性极限学习网络(JLNELN)Elman残差预测两部分。通过分析烧结机尾断面图像,设计了一种综合焦比混合实时软测量模型^[18],包括3个步骤:(1)从烧结机出料口拍摄的视频中截取关键帧;(2)采用基于遗传算法的模糊碳均值聚类方法从关键帧中提取特征参数;(3)通过已建立的在线和离线子模型,以提取的特征参数作为输入来预测综合焦比。

综合焦比计算式(7)可以进一步表示为式(8)。

$$\eta_2 = \frac{10 \times W_c}{p \times s} \quad (8)$$

式中: W_c 为焦粉配比,%; p 为成品率,%; s 为烧成率,%。

翁卫卫等建立了综合焦比级联预测模型^[19-20],首先是烧结终点温度和平均垂直烧结速度等热状态预测模型,其次是成品率预测模型,最后为综合焦比预测模型。其中,成品率预测模型输入参数有碱度、TFe质量分数、料层厚度、平均垂直烧结速度预测值和烧结终点预测值,采用混沌粒子群算法(CPSO)优化BP神经网络模型初始参数,进一步提高模型预测精度。

2.3.2 CO/CO₂比值

由碳燃烧化学反应可知:碳完全燃烧时会生成CO₂,并放出大量的热量;碳不完全燃烧时生成CO,放出少量的热量。因此,可以通过烧结废气中CO/CO₂的比值间接评价碳的燃烧效率,计算方法见式(9)。

$$\mu = \frac{\Psi_{CO}}{\Psi_{CO_2}} \quad (9)$$

式中: μ 为CO/CO₂比值,%; Ψ_{CO} 为单位烧结废气中

CO质量,mg/m³; Ψ_{CO_2} 为单位烧结废气中CO₂质量,mg/m³。

向德通过分析烧结过程焦炭燃烧机理和石灰石分解机理,结合灰色关联度分析方法,得出CO/CO₂计算模型的输入变量为风箱平均温度、风箱负压、终点温度、碳配比、圆辊转速和台车速度等,采用加权前向神经网络对其进行模型计算,取得了较高的预测精度^[21]。CO/CO₂级联预测模型也取得了良好的预测效果^[22],它分为关键状态参数预测子模型和CO/CO₂计算子模型两级,其中关键状态参数为烧结终点温度和风箱负压。

采用综合焦比和CO/CO₂比值对烧结过程碳效进行量化计算和评价,能够科学评价过程中碳素燃烧的充分程度,模型建立过程简便且具有较高的模型计算精度,易于在实际生产中推广应用,能够为后续碳效优化控制打下基础。

2.4 焓效率模型

自1963年Brauer采用焓效率模型分析炼铁工序能耗以来^[23],焓分析在钢铁工业等高能耗行业的应用引起了国内外学者的高度关注。焓一般指系统或物质流、能量流达到与参考环境平衡时产生的最大功。焓也可以称为有效能,它综合运用了热力学第一定律和热力学第二定律的基本原理,代表了能量的“量”与“质”的统一部分,能够揭示系统能量“质”的贬值和损耗,采用这个热力学状态函数能够对用能系统能效优劣进行评价。

烧结过程焓流按来源、去向和作用的不同一般可以分为6类,即输入焓 $E_{x,in}$ 、返矿焓 $E_{x,r,in}$ 、输出焓 $E_{x,s}$ 、外部损失焓 $E_{xl,out}$ 、内部损失焓 $E_{xl,in}$ 、回收自用焓 $E_{x,r,out}$ 。焓流分布如图4所示^[24]。

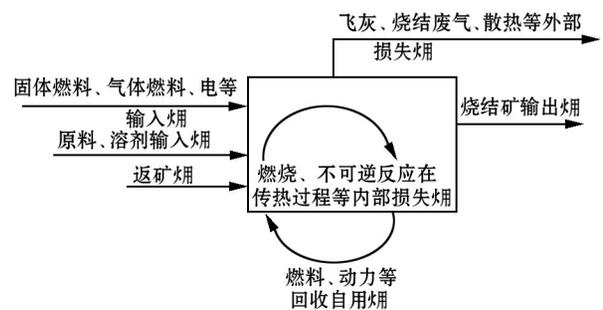


图4 烧结过程焓流分布

Fig. 4 Exergy flows distribution during sintering process

烧结过程焓平衡方程见式(10)。

$$E_{x,in} + E_{x,r,in} = E_{x,s} + E_{xl,in} + E_{xl,out} + E_{x,r,out} \quad (10)$$

以热力学完善度和焓效率作为用能过程焓分析的评定准则。其中,热力学完善度为过程输出的

烟流值与输入烟流值之比,见式(11);烟效率 ε 为过程被利用的烟流值与输入的烟流值之比,见式(12)。

$$\varepsilon = \frac{\sum E_{x,out}}{E_{x,in}} = \frac{E_{x,s} + E_{xl,out}}{E_{x,in}} \quad (11)$$

$$\varphi = \frac{E_{x,s}}{E_{x,in}} \quad (12)$$

胡兵等对烧结过程动能、热量、水等物理烟,元素、化合物、混合物、燃料等化学烟的计算进行了研究^[25],采用普遍烟效率和目的烟效率作为评价指标,并提出了一些切实有效的节能措施。王芳建立了烧结烟耗计算模型,通过分析烟平衡关系找出烧结过程低烟效率和高烟损率产生的原因,最终为工艺过程效率的改进提供指导意见;结合烟分析和过程机理分析,确定影响烧结焦比的关键影响因素,进而采用人工智能方法有效地预测了烧结综合焦比^[26]。通过烟平衡分析可以确定工序节能的潜力和方向,为节能改造提供参考依据^[27]。烟分析模型明确了烧结过程烟消耗量、有效利用率和损失率,并且从“量”和“质”的角度指出了过程能源消耗的分布和利用情况,比热平衡分析更具科学性,为烧结过程能耗的优化和控制奠定了基础,在烧结过程节能中值得进一步推广与应用。

3 工艺参数优化

烧结过程产生的实时数据包括原料参数、设备参数、操作参数等工艺参数,以及状态参数和指标参数(包括生产指标和能效指标等),这些参数呈现出强非线性和强耦合性,如图5所示。在烧结实际生产中,一般通过调整烧结工艺参数来获取最优的状态参数,最终生产出具备良好指标参数的成品烧结矿^[28]。

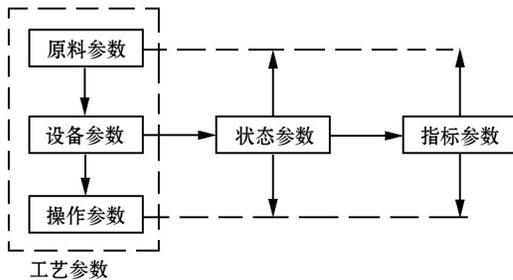


图5 烧结过程模型图

Fig. 5 Schematic of sintering process

建立烧结过程能耗数学模型,可以满足烧结一定状态参数和产质量指标等约束条件,实现最优能效指标,对于烧结节能降耗具有很强的现实意义。

马俊杰等建立了烧结料层侧面温度场模型和料层蓄热能量关系模型,计算得到烧结碳酸盐分解和水分蒸发所需热量,最终得出烧结配料过程最低焦粉配比^[29]。HUANG Xiao-xian等建立了烧结料层透气性、BTP等状态参数软测量模型,通过模糊控制器和专家控制器等智能控制策略,对过程状态进行在线评估,最终调整主抽风机频率、料层厚度和风箱阀门开度等操作参数,取得了不错的效果,日均节约电耗约为1万kW·h^[30-31]。冯朝辉等建立了RBF神经网络能耗预报模型,结合遗传算法,以烧结矿产量和质量要求为约束,使得固体燃料、气体燃料、电等消耗量最小,求解得到最优的工艺参数^[32]。LI Zong-ping等通过在线极限学习机(OS-ELM)预测烧结矿FeO质量分数和转鼓强度,采用VIKOR算法对烧结生产技术经济指标进行多目标评价,得出混合料水分、料层厚度、进口负压、点火温度、有效抽风量、燃料比等工艺参数的最优值,实际运行结果表明,生产每吨烧结矿能节约标煤约0.5kg^[33]。陈鑫等建立了烧结碳效优化与控制系统(OCSCE)^[34-35],包括碳效优化、生产优化调整与控制及碳效综合评价3部分,采用烧结综合焦比评价碳利用效率,以k-means聚类算法识别烧结过程操作模式,并用粒子群算法求解优化问题,最终得出返矿比例、焦粉配比、SiO₂质量分数、CaO质量分数、MgO质量分数、TFe质量分数、台车速度、料层高度等参数的最优调整值。当前研究多以过程机理和产质量指标为约束条件最优化调整工艺参数,以能效指标作为约束条件考虑的不多,建立科学合理的能耗数学模型最优化调整工艺参数是烧结过程绿色生产的一个重要研究方向。

4 结语

烧结过程是一个高耗能的过程,为了降低烧结过程的能耗,关键是提高能源利用效率。确立烧结过程能耗的统计分析边界,对烧结能耗进行精细化管理和分析,并建立在线能源消耗数学模型具有很强的现实意义。但是,烧结过程具有大滞后性、复杂性和强动态时变性特征,因此该领域的研究工作可向以下几个方面发展:创新能效建模方法,更科学客观地评价烧结过程能源的消耗情况;运用数学模型找出用能薄弱环节,如提高焦炭燃烧效率和余热回收等,有针对性地提出能效优化策略;建立能耗数学模型用以在线优化调整工艺参数,提高烧结过程产量和质量,并改善过程能效。

参考文献:

- [1] 范晓慧. 铁矿造块数学模型与专家系统[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (FAN Xiao-hui. The Mathematical Model and Expert System of Iron Ore Building Block[M]. Beijing: Science Press, 2013.)
- [2] 胡长庆, 张玉柱, 张春霞. 烧结过程物质流和能量流分析[J]. 烧结球团, 2007, 32(1): 16. (HU Chang-qing, ZHANG Yu-zhu, ZHANG Chun-xia, et al. Analysis of mass flow and energy flow in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2007, 32(1): 16.)
- [3] 张春霞, 酆秀萍, 周继程, 等. GB 21256—2013, 粗钢烧结主要工序单位产品能源消耗限额[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. (ZHANG Chun-xia, LI Xiu-pin, ZHOU Ji-cheng, et al. GB 21256—2013, The Norm of Energy Consumption Per Unit Product of Major Individual Process of Crude Steel Manufacturing Process[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.)
- [4] 胡兵, 王兆才, 李宗平, 等. 烧结工序能耗精细化管理及其软件开发[J]. 中国冶金, 2016, 26(9): 12. (HU Bing, WANG Zhao-cai, LI Zong-ping, et al. Refined management for energy consumption in sintering process and software development[J]. China Metallurgy, 2016, 26(9): 12.)
- [5] 付明辉. 钢铁烧结生产工艺过程能源管理系统的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010. (FU Ming-hui. Study of Iron Sintering Process Energy Management System[D]. Changsha: Central South University, 2010.)
- [6] 赵斌, 张志远, 冯俊小, 等. 烧结工序能量平衡及节能诊断分析[J]. 钢铁, 2011, 46(3): 83. (ZHAO Bin, ZHANG Zhi-yuan, FENG Jun-xiao, et al. Energy balance and energy-saving diagnosis in sintering process[J]. Iron and Steel, 2011, 46(3): 83.)
- [7] 胡志远, 楼国锋, 温治, 等. 烧结热过程质量和能量平衡的诊断及分析[J]. 冶金自动化, 2008, 32(5): 20. (HU Zhi-yuan, LOU Guo-feng, WEN Zhi, et al. Diagnosis and analysis of mass and energy balance in sintering thermal process[J]. Metallurgical Industry Automation, 2008, 32(5): 20.)
- [8] 周茂军, 何志军, 袁兵, 等. 宝钢1号烧结机质能平衡测试与分析[J]. 烧结球团, 2011, 36(6): 9. (ZHOU Mao-jun, HE Zhi-jun, YUAN Bing, et al. Test and analysis of mass and energy balance in sintering process of No.1 sinter machine of Baosteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2011, 36(6): 9.)
- [9] 李宗平, 胡兵, 曾辉. 基于烧结热平衡理论的固体燃料精确计算技术研究与应用[C]//2014年度全国烧结球团技术交流会论文集. 厦门:《烧结球团》杂志社, 2014: 28. (LI Zong-ping, HU Bing, ZENG Hui, et al. Research and implementation of accurate calculation technology of solid fuel consumption based on the theory of heat balance of sintering[C]//The Annual Conference on the Annual Meeting of the National Sintering and Pelletizing Technical Exchange in 2014. Xiamen: Sintering and Pelletizing, 2014: 28.)
- [10] 韩庆虹, 金永龙, 张军红. 人工神经网络在烧结固体燃料预测中的应用[J]. 冶金能源, 2005, 24(2): 9. (HAH Qing-hong, JIN Yong-long, ZHANG Jun-hong, et al. Application of neural networks in the prediction of solid fuel consumption in sintering process[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2005, 24(2): 9.)
- [11] 孟辉, 乔非, 李莉. 基于BP神经网络的烧结能耗预测模型[J]. 机械工程师, 2012(2): 45. (MENG Hui, QIAO Fei, LI Li. Predictive model of energy consumption in sintering process based on BP neural network[J]. Mechanical Engineer, 2012(2): 45.)
- [12] 王俊凯, 乔非, 祝军, 等. 基于支持向量机的烧结能耗及性能指标预测模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(8): 1256. (WANG Jun-kai, QIAO Fei, ZHU Jun, et al. SVR-based predictive models of energy consumption and performance criteria for sintering[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(8): 1256.)
- [13] CHEN Xiao-xia, SHE Jin-hua, CHEN Xin, et al. Modeling method of carbon efficiency in iron ore sintering process[C]//2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (IC-IT). Taibei: IEEE, 2016: 1033.
- [14] 陈鑫, 翁卫卫, 吴敏, 等. 混沌粒子群算法的烧结碳耗BP神经网络模型[J]. 计算机与应用化学, 2013, 30(10): 1223. (CHEN Xin, WENG Wei-wei, WU Min, et al. BP neural network model of sintering carbon consumption based on chaotic particle swarm optimization[J]. Computers and Applied Chemistry, 2013, 30(10): 1223.)
- [15] 翁卫卫, 陈鑫, 吴敏, 等. 基于遗传小波神经网络的烧结过程碳耗模型[C]//第32届中国控制会议论文集(CCC2013). 西安: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2013: 1860. (WENG Wei-wei, CHEN Xin, WU Min, et al. Modeling of coke consumption in sintering process based on GA wavelet neural network[C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an: TCCT, 2013: 1860.)
- [16] CHEN Xiao-xia, SHE Jin-hua, CHEN Xin, et al. Discrete wavelet transfer based BPNN for calculating carbon efficiency of sintering process[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2016, 20(7): 1070.
- [17] CHEN Xiao-xia, CHEN Xin, SHE Jin-hua, et al. A hybrid time series prediction model based on recurrent neural network and double joint linear-nonlinear extreme learning network for prediction of carbon efficiency in iron ore sintering process[J]. Neurocomputing, 2017, 249: 12.
- [18] CHEN Xiao-xia, CHEN Xin, HE Jin-hua, et al. A hybrid just-in-time soft sensor for carbon efficiency of iron ore sintering process based on feature extraction of cross-sectional frames at discharge end[J]. Journal of Process Control, 2017, 54: 14.
- [19] 翁卫卫. 基于成品率预测的烧结过程综合焦比计算模型[D]. 长沙: 中南大学, 2014. (WENG Wei-wei. Calculation Model of Complex Coke Consumption Ratio Based on Yield Prediction for Sintering Process[D]. Changsha: Central South University, 2014.)
- [20] CHEN Xiao-xia, CHEN Xin, SHE Jin-hua, et al. Hybrid multi-step modeling for calculation of carbon efficiency of iron ore sintering process based on yield prediction[J]. Neural Computing and Applications, 2016, 28(6): 1193.
- [21] 向德. 面向碳效优化的烧结过程CO/CO₂计算建模研究[D].

- 长沙:中南大学,2013.(XIANG De. CO/CO₂ Computational Modeling Studies of the Sintering Process for Carbon Efficiency Optimization[D]. Changsha: Central South University, 2013.)
- [22] XU Ben, CHEN Xin, WU Min, et al. A cascade prediction model of CO/CO₂ in the sintering process[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2017, 21(5): 785.
- [23] 吴复忠,李军旗,金会心,等. 烧结工序的物质流和能量焓流分析[J]. 贵州科学, 2011, 29(2): 76.(WU Fu-zhong, LI Jun-qi, JIN Hui-xin, et al. Exergy analysis on energy and materials flow of sintering process[J]. Guizhou Science, 2011, 29(2): 76.)
- [24] 吴复忠,蔡九菊,张琦,等. 炼铁系统的物质流和能量流的焓分析[J]. 工业加热, 2007, 36(1): 15.(WU Fu-zhong, CAI Jiujie, ZHANG Qi, et al. Exergy analysis of energy and materials flows in the system of ironmaking plants[J]. Industrial Heating, 2007, 36(1): 15.)
- [25] 胡兵,贺新华,王兆才,等. 烧结工序焓流分析及评价[J]. 中国冶金, 2015, 25(9): 47.(HU Bing, HE Xin-hua, WANG Zhao-cai, et al. Evaluation and analysis on exergy flow of sintering process[J]. China Metallurgy, 2015, 25(9): 47.)
- [26] 王芳. 烧结能耗和烧结焦比计算建模方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.(WANG Fang. Modeling Method for Calculation of Exergy Consumption and Coke Ratio in Sintering Process[D]. Changsha: Central South University, 2013.)
- [27] 罗国民,文五四,刘志强,等. 韶钢烧结工序用能模型开发与能流优化分析[J]. 烧结球团, 2011, 36(3): 14.(LUO Guomin, WEN Wu-si, LIU Zhi-qiang, et al. Development of energy model for Shaosteel sintering process and optimization and analysis of energy flow[J]. Sintering and Pelletizing, 2011, 36(3): 14.)
- [28] 范晓慧,王海东. 烧结过程数学模型与人工智能[M]. 长沙:中南大学出版社, 2002.(FAN Xiao-hui, WANG Hai-dong. The Mathematical Model and Artificial Intelligence of the Sintering Process[M]. Changsha: Central South University Press, 2002.)
- [29] 马俊杰,吴敏,李勇. 烧结配料过程焦粉最低配比计算方法[J]. 化工学报, 2012, 63(9): 2688.(MA Jun-jie, WU Min, LI Yong, et al. Minimal coke consumption calculating method[J]. CIESC Journal, 2012, 63(9): 2688.)
- [30] HUANG Xiao-xian, FAN Xiao-hui, CHEN Xu-ling, et al. Bed permeability state prediction model of sintering process based on data mining technology[J]. ISIJ International, 2016, 56(12): 2113.
- [31] FAN Xiao-hui, HUANG Xiao-xian, CHEN Xu-ling, et al. Research and development of the intelligent control of iron ore sintering process based on fan frequency conversion[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2016, 43(7): 488.
- [32] 冯朝辉,张华,王艳红. 烧结工序能耗预测与优化研究[J]. 烧结球团, 2012, 37(6): 13.(FENG Zhao-hui, ZHANG Hua, WANG Yan-hong, et al. Study on prediction and optimization of sintering process energy consumption[J]. Sintering and Pelletizing, 2012, 37(6): 13.)
- [33] LI Zong-ping, FAN Xiao-hui, CHEN Guo, et al. Optimization of iron ore sintering process based on ELM model and multi-criteria evaluation[J]. Neural Computing and Applications, 2017, 28(8): 2247.
- [34] CHEN Xin, CHEN Xiao-xia, WU Min, et al. Modeling and optimization method featuring multiple operating modes for improving carbon efficiency of iron ore sintering process[J]. Control Engineering Practice, 2016, 54: 117.
- [35] DU Sheng, WU Min, CHEN Xin, et al. Design of an optimization and control system for carbon efficiency in the green manufacturing of sinter ore[C]//Proceedings of the 36th Chinese Control Conference. Dalian: TCCT, 2017: 4470.

普锐特冶金技术设立唐山分公司以加强中国业务实力

2018年9月11日,普锐特冶金技术在河北省唐山市正式举行了唐山分公司开业典礼。出席本次庆典的包括来自唐山市工信局、中国冶金报社以及普锐特冶金技术总部的来宾。

自2015年成立以来,普锐特冶金技术坚持致力于提供世界一流的技术、全周期的服务和精湛的工艺及设备,积极应对挑战,以满足客户不断增长的需求。本着这样的使命,公司勇于挑战自我,努力开发创新技术,为客户提供满足未来需要的业务模式;随时了解客户的需要,始终引领技术的发展;将工艺诀窍、设计和设备制造能力同维修技能结合起来,更好地为冶金市场提供服务,帮助客户达到最大生产能力、最佳产品质量、最高能源效率、最大投资安全性,以确保它们在中国和国际市场持续获得成功。

普锐特冶金技术将进一步加强在中国的业务实力,通过充实设计力量来适应不断变化的中国和国际市场形势。普锐特冶金技术唐山分公司于2018年9月开始运营,将为中国北方的客户提供长期可靠的支持和快速及时的服务。

普锐特冶金技术(中国)有限公司首席执行官施耐德博士指出:“唐山分公司的成立是普锐特冶金技术在中国北方发展的一座重要里程碑,公司有能力快速响应和灵活应对市场环境和客户需要的变化。”普锐特冶金技术电气自动化全球主管 Hans-Jürgen Zeiher 先生补充说:“唐山分公司的成立让公司更加贴近主要的客户群体,为服务和新项目创造了新机会。这将提升对客户需要的变化快速作出响应的能力。”