

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20170245

铁矿烧结配矿模式研究进展

李 军¹, 刘代飞², 史先菊¹, 陈许玲³

(1. 宝钢股份中央研究院武汉分院炼铁所, 湖北 武汉 430000; 2. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 新常态经济下中国钢铁工业进入创新驱动式内涵发展的新阶段, 进一步提升铁矿石配矿的技术经济综合指标对烧结生产至关重要。归纳了烧结配矿过程描述模式, 提出了综合工序、特性和技术、经济及环境指标信息的配矿求解组态模式。分析了主要烧结配矿技术的特点, 结合配矿组态模式, 探讨了烧结配矿信息的解析和模式化, 对配矿模式研究方向进行了展望。

关键词: 铁矿石; 烧结过程; 烧结特性; 求解模型; 优化配矿

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)01-0008-09

Progress of iron ore matching patterns in sinter process

LI Jun¹, LIU Dai-fei², SHI Xian-ju¹, CHEN Xu-ling³

(1. Ironmaking Section, Wuhan Branch of Baosteel Central Research Institute, Wuhan 430000, Hubei, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 3. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: As the economy steps into the new normal phase, Chinese iron and steel industry enters into the stage of innovation-driven and connotation development. It is vital for sintering production to further improve the comprehensive technical and economic index of iron ore blending. The methods and description models of iron ore matching were summarized, and a uniform expression and configuration mode of iron ore match computing was proposed. This solution integrated five indexes, i.e. procedure, characteristics, technical, economic and environmental information indicators. The application of sintering ore matching technology and patternization of iron ore match information were discussed, and a new prospect for sintering ore matching research was explored combined with the configuration model of ore blending.

Key words: iron ore; sinter process; sintering characteristics; computing models; optimization matching

中国钢铁工业在2006—2014年期间, 受国民经济高速增长的强劲推动, 呈快速迅猛式发展, 粗钢产量由4.19亿增至8.22亿t。烧结矿在炼铁高炉总料中约占70%~80%, 是主要入炉原料, 其年产量也不断增加。受国内铁矿资源条件的制约, 中国钢铁企业长期以来多从澳大利亚、印度、巴西、南非等国大量进口铁矿石。随着铁矿供应量和价格的不断变动, 烧结用原料表现出品种繁多、配系复杂、性能不稳定等显著特点。这使得钢铁企业一直面临着一个很重要的任务: 如何充分利用企业自身资源和工艺设备的优势, 通过对原料的合理调配, 稳定原料条

件, 实现对烧结原料技术经济指标的优化管控^[1-2]。

中国经济步入“十三五”后, 钢铁行业竞争异常激烈, 钢铁企业的发展模式已由粗放式产能取胜步入创新驱动式内涵发展的战略新阶段^[3-4]。2016年, 中国粗钢产量为8.08亿t, 同比增长1.2%, 生铁产量为7.01亿t, 同比增长0.7%; 2015年, 重点钢企的利润率为工业行业最低, 亏损面达50.5%, 2016年降为20.2%。新常态经济下大力推进科技创新, 实现优化操作、提升产量质量和降低成本成为钢铁企业的首要任务^[5]。

在中国钢铁工业10年大发展中, 烧结配矿技术

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674042); 湖南省自然科学基金资助项目(11JJ4046)

作者简介: 李 军(1979—), 男, 硕士, 高级工程师; **E-mail:** 13554690815@163.com; **收稿日期:** 2017-05-16

通讯作者: 刘代飞(1977—), 男, 博士, 讲师; **E-mail:** dfcanfly@126.com

有了长足进步,出现了如微型烧结试验配矿、铁矿高温性能配矿、数学模型和人工智能系统配矿等系列典型方法^[6]。这些方法有力地推动和促进了烧结工业的发展。当钢铁工业步入战略转型和纵深发展,烧结生产和研究必须主动适应行业深化的大格局,进一步提升核心环节和关键性技术。本文回顾了近年来烧结配矿主要技术和体系,系统地归纳和分析了烧结配矿代表性方法和重要成果,探讨了今后配矿研究和应用的发展趋势。

1 烧结过程配矿模式的描述

铁矿石由烧结原料变成烧结成品矿要经过混匀配矿、混合制粒、高温烧结、冷却整粒4道工序,烧结配矿必须满足原料成分、粒度组成、冶金性能、经济指标等评价要求^[7]。铁矿石的配矿处理方式与配矿模式的解析思路密切相关,目前有4类主要模式。

(1) 从原料准备角度解析,分为混匀矿前、后两阶段。为了应对铁矿粉来源不固定、品种繁杂、化学成分不稳定等问题,通过料场调配铁矿粉是烧结配矿的基本手段。多种铁矿粉经料场调配后,形成原料结构合理的混匀矿粉,再参与后续熔剂、燃料和水分的配料。这即是基于混匀矿的“两步法”^[8-9]。

(2) 从铁矿粉物理化学特性角度解析,分为常温和高温两类特性。铁矿粉常温特性主要包括铁矿粉的类型、化学成分、粒度组成和孔隙率等;高温特性主要包括同化性、液相流动性、黏结相自身强度、铁酸钙生产特性、连晶固结强度等。利用常温和高温特性可以实现矿种的定性归类分析,通过结合“性能互补原则”进行配矿^[10]。

(3) 从铁矿粉烧结的时空尺度角度解析,分为微观和宏观两类尺度。烧结过程信息的尺度划分有:纳米尺度、单颗粒尺度等微观层尺度;颗粒聚团、单元操作级、装备级、工序级等宏观层尺度。烧结体系的微观特性包括铁矿粉的矿物形貌及脉石赋存状态、混匀矿制粒的颗粒黏附状态、烧结过程液相形成及黏结状况、烧结矿内部矿物结晶形态及分布等。结合烧结操作条件和微观结构开展“宏微观结合分析”^[11],这有利于深入探究烧结机理。

(4) 从配矿模型求解角度解析,分为线性和非线性模型。过程模型为烧结的化学成分、粒度组成、物化反应等体系参数的计算提供了基础。但烧结原料体系中的Ca、Mg、Al、Si、Fe等元素在烧结过程中具有复杂的行为。如TFe依据物质守恒可建立

线性模型;而FeO质量分数却与碱度、料层高度、燃料配比、粒度等因素相关;低温还原粉化率表现出与MgO、TiO₂、Al₂O₃质量分数呈正相关性,与SiO₂、FeO、CaO/SiO₂质量分数呈负相关性。此时,可建立非线性模型。采用“过程综合建模分析”^[12-14],有利于对烧结过程的系统参数进行分析。

结合现代烧结生产需求和配矿实践,本文从过程模式综合组态出发,提出配矿模型组态图谱,以烧结矿配矿的技术、经济、环境等目标为导向,基于烧结原料的化学成分、粒度组成两个维度解析配矿模型。模式组态描述如图1所示。

2 配矿信息获取的主要技术

烧结配矿的主要任务是对多种限定体量的铁矿原料进行调配,以满足烧结和炼铁冶炼需要的技术和经济指标。其中,烧结生产要求烧结矿产量高、质量好,能耗低;高炉生产要求具有良好的还原性、低温还原粉化、软化熔滴等冶金性能;技术经济要求成本低、整体经济效益好。目前配矿信息的获取有如下代表性方法。

2.1 基于烧结试验的信息提取

利用烧结杯进行铁矿粉烧结试验,这是探索和验证配矿规律的重要手段。通过对现有烧结生产配矿用料特点和规律的总结,制定出新矿初配比,再结合铁矿粉单烧或多原料组合烧结试验,探讨烧结性能和合理烧结配矿结构,分析确定最佳的烧结配矿组合。

在没有配矿经验知识可借鉴的前提下,试验的设计非常关键。如:周明顺^[15]等定性确定鞍钢铁矿烧结和球团配矿矿种,优化确定碱度1.95以上条件烧结用矿种定量配比。孙艳芹^[16]等对承钢钒钛磁铁矿烧结配矿正交试验得出配比(质量分数):黑山钒粉14%、普通精粉20%、钢渣1%。刘振林^[17]等试验优化得出济钢烧结原料配比(质量分数):纽曼山45%、卡拉加斯20%、富铁库粗粉10%、杂精粉15%和西石门粗粉10%。黄柱成^[18]等试验FMG褐铁矿高配比烧结表明:FMG矿与巴西矿搭配,混合料水分(质量分数)为7.5%、焦粉(质量分数)为4.9%,转鼓强度为65.33%,利用系数为1.40 t/(h·m²)。张建良^[19]等对本溪北钢的澳洲矿和巴西矿调优,控制澳洲矿粉总配比不超过45%,降低烧结混合料成本为16.02元/t。实践表明,在缺乏经验信息作参考时,烧结试验对探索矿种匹配宏观层面的客观规律具有重要作用。

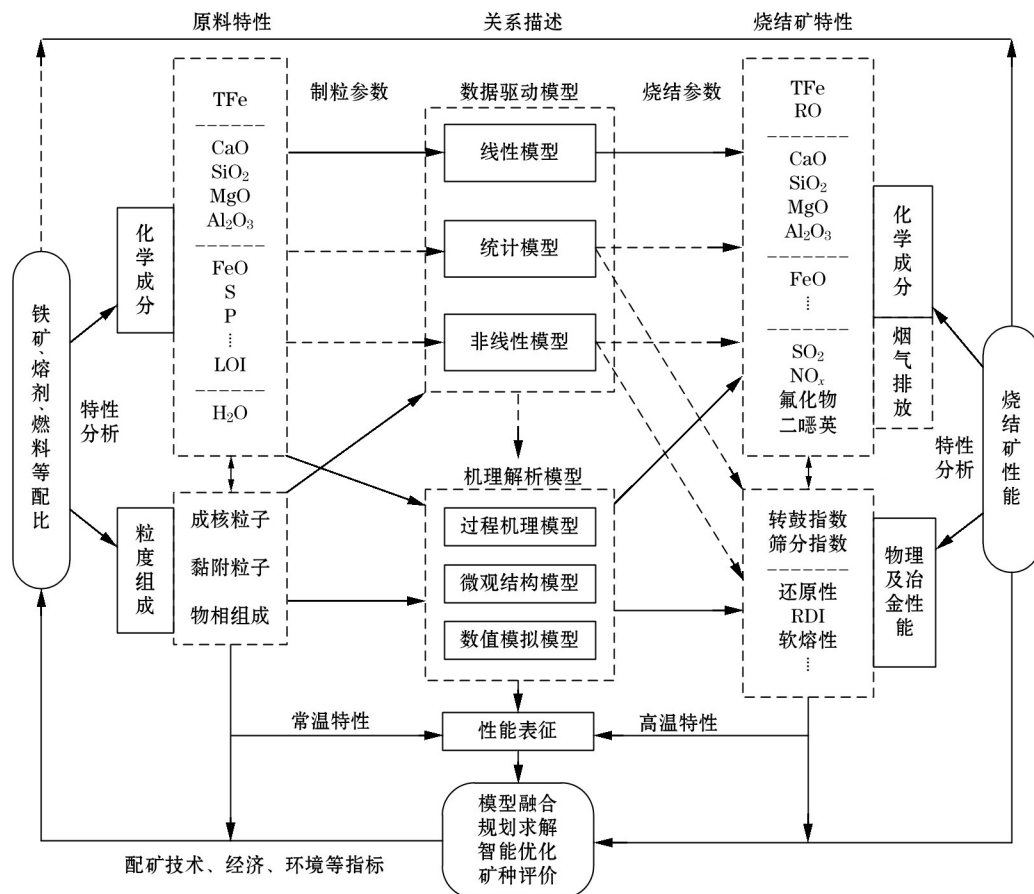


图 1 铁矿粉烧结配矿模式的组态

Fig. 1 Configuration model of iron ore match computing in sinter process

单纯依靠烧结试验的配矿是“尝试性和以量取胜”的模式,其不足是当处理品种繁多的铁矿石组合时,试验方向存在盲目性和不确定性,试验过程中的人力、物力和财力消耗较大。

2.2 基于铁矿高温基础特性的信息表征

铁矿粉的高温特性直接影响烧结性能,铁矿原料结构和高温烧结条件不同,其成矿机理和过程差别很大。实践表明^[20]:烧结温度为 1 000~1 200 °C 时约有 10%~20% 的铁酸钙生成,但晶粒尚未连续;1 250~1 280 °C 时约有 30%~40% 的铁酸钙生成,强度最好;1 280~1 300 °C 时铁酸钙下降到 30% 左右,晶形由针状变为柱状,强度升高,还原性下降。烧结矿含大量铁橄榄石时,强度和转鼓强度好,但高炉冶炼还原性差、焦比高、产量低。

烧结矿内在微观结构与外表宏观性能指标密切相关,其中矿物组成与微观结构是主要因素^[21-22]。Clout J M F^[23-24] 等结合 SFCA 具体分型指出磁铁矿和赤铁矿烧结时黏结机理的不同,磁铁矿以熔融时晶粒间扩散黏结,赤铁矿以大量铁酸钙来黏结。Loo C E^[25] 等分析了磷、硅、铝和氧化镁、烧结矿碱

度以及烧结温度对烧结矿黏结结构形成的影响。陈耀铭^[1]等利用烧结矿矿相研究高温烧结和冷却结晶过程内部微观结构,指出改善烧结矿微观结构和工艺操作优化的方向。张玉柱^[26]等结合烧结矿显微结构及矿物组成,研究了碱度、SiO₂、MgO、配碳量、硼酸和 CaCl₂ 溶液等对低硅烧结矿冶金性能的影响。吴胜利^[27-29]等提出了系列描述烧结基础特性的新概念,如同化性、液相流动性、黏结相自身强度、铁酸钙生成特性、连晶固结强度等。这为深入探究烧结机理和配矿过程建立了表征和测度指标,具有重要的理论和应用价值。

基于烧结高温基础特性,进行配矿优化的指导原则如下:混合矿应具有适宜的同化性,合理的液相流动性,较低温度敏感指数,较好的黏结相自身强度以及较高的铁酸钙生成特性。不同种类铁矿粉的同化性和液相流动性存在差异,可通过性能互补来搭配^[10,30-33]。基于铁矿高温基础特性配矿的优点是对烧结配矿具有较好的定性指导作用,不足之处是各指标参数及各单矿的性能叠加不一定等于混匀矿的性能^[34],即综合后的复杂矿系性能指标具

非线性。当其规律不明确时,不利于复杂多矿组合的定量描述。

2.3 基于过程数学模型的信息解析

利用数学模型对烧结过程进行解析是一种重要方法^[12-13],烧结过程建模的着力点有^[35]:用化学动力学研究烧结过程固体燃料的燃烧;用传热理论研究烧结过程的温度分布和蓄热现象;用气体动力学理论分析料层透气性及工艺参数的关系;用多相流理论研究固相及烧结矿生成机理。国外研究起步较早:尼科拉因科 A H^[36]等依据查波罗什钢铁烧结厂正交烧结试验,建立采用湿度、烧结料平均直径、烧结机布料漏斗的料高,建立描述烧结初期料层收缩的数学模型。Takazo Kawaguchi^[37]等建立了铁矿石烧结综合模拟模型,包括透气性、热状态、熔融、孔隙率、矿物和质量6个子模型。Waters A G^[38]等以原料粒度分布、添加水量和物理特性为基础,建立制粒数学模型进行混合料颗粒粒度分布的预测。Venkataramana R^[39]等建立了铁矿石烧结过程混合制粒阶段颗粒粒度分布和冷料层透气性的复合模型。Cumming M J^[40]等通过分析传质传热、水分干燥冷凝、熔融凝固、料层特性等因素,建立了铁矿石烧结过程模拟模型。

国内研究起步稍晚,但进展很快。邹志毅^[41]建立了一个以湿料带传热、传质机理为基础的烧结水分迁移全过程数学模型,采用混合料特性、进料层气体特性和操作条件作为模型输入,计算料层温度以及水分迁移过程的参数值。吕学伟^[42]等提出湿容量概念并建立基于物料 CaO、Al₂O₃、MgO、小于 0.2 mm 粒级和 0.2~0.7 mm 粒级等参数的湿容量预测模型。沈峰满^[43]等考察了水分质量分数和原料粒度分布对造粒粒度分布的影响,建立造粒粒度分布质量概率密度函数的数学模型。王崇茂^[44]等采用模糊数学和微观结构评价指标,建立铁矿粉多因素层次模糊综合评判决策数学模型。龙红明^[14]等建立综合铁矿物理性能、化学成分、基础特性和单烧性能的多层权重评判模型,预测铁矿归属 4 类用途集(块矿、球团矿、富矿粉和精矿粉)的归类分析。范晓慧^[45]等以混合料中小于 0.5 mm 黏附粉和大于 0.5 mm 核颗粒的比例为权重,综合黏附粉的最大毛细水量和核颗粒的持水量建立制粒水分数学模型。

烧结过程的数学建模多为工艺机理模型加自适应修正算法。模型的建立和应用是基于特定条件的,通过对具体问题或过程进行合理的概括和简化,并以微分方程和边界条件组成的数学模型表

示。为了提高模型的应用精度和适用性,必须注重模型的维护和二次开发^[46-47]。

2.4 基于规划和优化理论的信息挖掘

烧结配矿要实现多种铁矿、熔剂、燃料的定量计算,如图 1 所描述的一般要处理两种情况:(1)未考虑反应的守恒计算,混匀矿化学成分的线性规划。可直接采用 MATLAB 中 linprog() 函数求解,也可用户自编程求解,如日本住友的 Ueno N^[48]等开发了基于线性规划的原料管理与控制系统,刘代飞^[49]等开发了烧结通用配料计算系统。(2)考虑原料特性、物理化学反应、烧结冶金性能的非线性规划求解^[50]。基于价格或性能参数多目标有约束的非线性优化问题可用式(1)描述。

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \quad \text{价格、性能或烟气排放目标} \\ x \quad \text{s.t.} \quad & \begin{cases} Ax \leq B & \text{线性不等式约束} \\ A_{eq}x = B_{eq} & \text{线性等式约束} \\ C(x) \leq 0 & \text{非线性不等式约束} \\ C_{eq}(x) = 0 & \text{非线性等式约束} \\ x_m \leq x \leq x_M & \text{变量上下界约束} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x 为一组待求解变量; $f(x)$ 为优化目标函数; $C(x)$ 和 $C_{eq}(x)$ 分别为非线性函数; x_M 和 x_m 分别为变量值域上下限; A 和 B 分别为线性不等式约束中的系数项和常数项; A_{eq} 和 B_{eq} 分别为线性等式约束中的系数项和常数项。

即求取一组 x , 使得函数 $f(x)$ 在满足全部约束条件的基础上最小化。对于有约束条件的寻优,有两种求解思路:将搜索范围都限制在条件约束簇内,即在可行解范围内寻优;采用罚函数将约束优化问题转化为无约束优化问题。有如下 3 种常用的烧结配矿规划和优化解法。

(1) 在 MATLAB 平台中采用 fmincon() 函数进行求解,函数调用格式为

$$[x_{\text{opt}}, \text{key}, c] = \text{fmincon}(\text{Fun}, x_0, A, B, A_{eq}, B_{eq}, x_m, x_M, \text{CFun}, \text{Opt})$$

运用该函数优点是方便、快捷,不足是函数封装和调用了系统底层模块,不利于用户全面把握求解过程,特别是有应用平台需求时,需对程序代码深入解读和移植。

(2) 结合遗传算法进行求解。遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传进化过程的计算模型。在特定的评价函数导向下,组成群体的若干个体,通过选择、交叉和变异等基因遗传操作,群体经若干代进化迭代后,实现目标函数的优化。

与常规数学算法相比,遗传算法具有更好的寻

优能力。李智^[51]基于 MATLAB 采用免疫遗传算法进行烧结配料。白晨光^[52-53]等比较了线性规划、蒙特卡洛和遗传算法的配料计算,建立结合遗传算法和回归分析的配料优化模型。遗传算法适合复杂非线性高维度空间的寻优,编程时易与其他算法进行融合。但遗传算法在迭代求解过程中易出现早熟收敛现象致使进化后期搜索效率低,所求的结果往往不是全局最优解。

(3) 结合粒群算法进行求解。粒子群算法模拟群鸟觅食过程的集群行为。粒子群中的粒子即为抽象的飞鸟,通过考察若干代群体中个体粒子的速度和位置,搜索最优群体位置以满足目标函数的最小容许误差。群鸟觅食是一个最佳决策过程,综合了两种重要信息:1)他人经验(从周围人的行为获取知识);2)自身经验(自我尝试和行动获取知识)。粒子位置的更新取决于当前位置和当前速度,粒子速度的更新则由当前速度和基于位置的决策信息来实现。决策信息包括粒子群历史全局最优位置和粒子自身历史最优位置。

粒子群算法比遗传算法求解速度要快。吴敏^[54]等提出了基于线性规划和遗传-粒子群算法的烧结配料,采用将硫质量分数折算为可比成本,兼顾节能减排目标和配料成本。赵辉^[55]等在配矿优化计算中,根据迭代次数动态调整粒子群算法中惯性权重,平衡全局和局部搜索能力。粒子群算法是一种较好的全局优化算法,非常适合优化复杂的非线性问题,算法实现简单易行,具有很强的通用性。

2.5 基于神经网络/专家系统的信息融合

人工神经网络采用大量简单的处理单元广泛连接组成复杂的网络,用于模拟人类大脑神经网络结构和行为。神经网络模型具备大规模并行处理数据和映射复杂非线性关系的能力,适合烧结配矿专家系统中对隐性和非语言类知识的数字化^[56]。

利用神经网络描述烧结配矿非线性关系,有两种应用模式:(1)模型独立式,如冯建生^[57]等建立配矿预测 BP 模型,输入为矿石及辅料配比共 60 个,输出为低温还原粉化率、强度、还原性等。刘怀^[58]建立碱度预报 BP 模型,输入为混合料中 TFe、SiO₂ 和 CaO 质量分数,输出为烧结矿碱度 R、TFe 和 SiO₂ 质量分数;张军红^[59]等建立 FeO 预测 BP 模型,输入为混合料粒度、料温、料厚、机速和废气温度;范晓慧^[60]等建立烧结性能预报 BP 模型,输入 12 个参数包括中和料化学成分、粒度组成、黏附粒子质量分数、成

核粒子质量分数、堆密度、孔隙率、赤铁矿质量分数等;输出为转鼓强度、烧结速度、成品率和利用系数。(2)模型复合式,如鲍雅萍^[61]等用灰色 GM(1,1) 模型先预处理 10 个输入参数(料温、料高、台车速度、混合水、燃料配比、SiO₂、CaO、FeO 质量分数等),再与 BP 网络结合预测烧结矿碱度。配矿专家系统融合神经网络模型对挖掘和提炼烧结配矿信息具有积极的应用意义。

神经网络类方法的不足:从配矿机理描述角度来看,本质上仍是输入输出参数的黑箱模型,建模需依靠大量的、具有典型特征的样本数据,模型参数选择要依靠经验和试验,训练过程耗时长,且易由“过学习”或“欠学习”导致局部最优,模型泛化能力不强。特别是对乏信息非线性的问题求解^[62-63],神经网络类方法效果不佳。模型独立式的应用存在局限性,必须积极开展模型的复合和融合研究。

综上所述,配矿信息获取的 5 种主要技术在一定程度上可以得到配矿特性的部分表达,这些信息还需进行深度的解析和融合。本文提出结合组态配矿模式进行信息融合,基于特定烧结原料的试验探索、模型模拟、规划优化和智能解析获得配矿元信息,求解模型融合元信息和配矿模式并结合试验验证实现优化配矿,如图 2 所示。

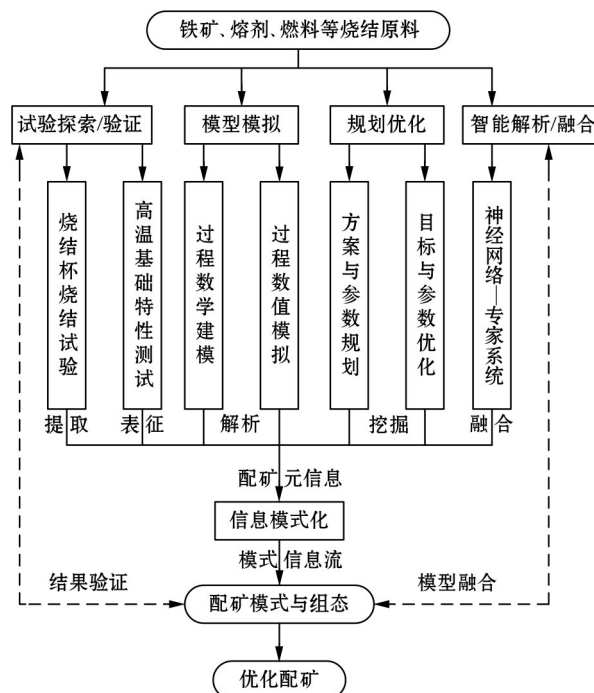


图 2 配矿信息的解析与模式化

Fig. 2 Analysis and patternization of iron ore match information

3 烧结配矿模式研究的展望

3.1 对烧结配矿求解目标和非线性模型的深度解析与表征

实现烧结配矿的深度优化,必须深化目标问题中关联参数之间相关规律的解析和建模。常规求解是以技术、经济指标为目标导向,随着国家环保工作的深入,环境指标日益受重视。融合技术、经济、环境等指标的烧结配矿将成为新内容,目标拓展后,关联参数之间的非线性模型将更为复杂。现有描述复杂过程的非线性模型中多为统计类和神经网络类模型,即利用统计方法(如回归分析、参数估计等)获得显式数学表达,或利用神经网络类(如BP、RBF、SVM等)方法来映射输入和输出获得隐式数学表达。从对烧结过程认识程度的角度来看,这些方法形成的模型仍是“黑箱”,这并不利于对过程机理的深入理解。特别是神经网络类的建模,不结合实际问题的具体特征而盲目地开展建模,往往导致模型的滥用。

建模的前提条件和应用目标非常重要。实践应用表明,神经网络类模型适用于单纯计算求解,且要求拥有大量的具有典型特征的样本数据。而采用机理分析实现过程非线性模型的具体化,更有利于过程的解析。机理类模型具有“灰箱”或“白箱”特性,因此要继续深入研究,充分利用机理信息,以机理分析为主,统计和数据分析为辅。利用融合算法实现机理解析和数据驱动的综合,深化对复杂过程参数的建模和解析。

3.2 对烧结配矿的深入基础研究

对烧结过程开展基础性的探索和研究非常重要,其中的新发现能为烧结配矿工程应用提供理论支撑,也能为烧结配矿的信息解析和表征提供新视角和新维度。如北京科技大学吴胜利等对铁矿石的烧结基础特性进行的探索以及同化性、液相流动性、黏结相强度等系列概念的提出,拓展了配矿体系的描述维度。

铁矿烧结过程诸多基础性问题并非完全解决,目前仍有许多内容需深入探究。如配矿混合制粒过程粒度的演进、铁氧化物与钙镁熔剂的矿化机理、配矿谱系图与烧结相图、烧结矿高炉冶炼过程行为及冶炼特性、不同碱度烧结矿内部微观结构与成矿机理、烧结模型与数值模拟、配矿求解复杂空间的降维与深度学习等,这些工作开展将为烧结过程非线性模型的解析提供基础。

3.3 对铁矿烧结特性评价体系的研究

从对铁矿石特性的认识角度来看,烧结配矿涉及两个层面,即对单一矿种的定性评价、对矿种参与复杂配矿系的定量计算。铁矿石在烧结过程表现的性能很多,如化学成分、物理性能、冶金性能、单烧性能等。如何深度挖掘铁矿自身特性以及其参与烧结成矿的综合性能,如何系统地实现铁矿石的综合评价,这一系列的工作目前并不完善,仍需深入研究。

4 结语

在新常态经济背景和国内钢铁供求关系严重不平衡的行业态势下,铁矿石的配矿工作对炼铁和烧结生产非常重要。面对铁矿石价格的持续变动,如何采取积极主动的烧结配矿策略非常关键。本文建立的配矿模式组态,有利于明确配矿建模过程的关键问题和优化求解时目标的分解和综合。对配矿技术进行的讨论分析,有助于系统性了解配矿技术优缺点、全面掌握配矿方法的适用条件。结合烧结配矿实践中突出的理论和应用需求,对研究方向进行了探讨。

参考文献:

- [1] 张寿荣. 进入21世纪后中国炼铁工业的发展及存在的问题[J]. 炼铁, 2012, 31(1): 1. (ZHANG Shou-rong. The development of Chinese ironmaking industry after entering the 21st century and the existing problems[J]. Ironmaking, 2012, 31(1): 1.)
- [2] 王海风, 裴元东, 张春霞, 等. 中国钢铁工业烧结/球团工序绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁, 2016, 51(1): 1. (WANG Hai-feng, PEI Yuan-dong, ZHANG Chun-xia, et al. Green development of sintering/pellet procedure in China iron and steel industry[J]. Iron and Steel, 2016, 51(1): 1.)
- [3] 王国栋. 钢铁行业技术创新和发展方向[J]. 钢铁, 2015, 50(9): 1. (WANG Guo-dong. Technology innovation and development direction of iron and steel industry[J]. Iron and Steel, 2015, 50(9): 1.)
- [4] 裴元东, 赵志星, 马泽军, 等. 国外铁矿粉烧结理论与技术的进展(一)[J]. 烧结球团, 2010, 35(3): 1. (PEI Yuan-dong, ZHAO Zhi-xing, MA Ze-jun, et al. Development of theory and technology on overseas iron ore sintering (part1)[J]. Sintering and Pelletizing, 2010, 35(3): 1.)
- [5] 魏建新, 吴汉军. 浅析钢铁行业“十三五”发展环境[J]. 冶金管理, 2015, 28(5): 19. (WEI Jian-xin, WU Han-jun. Analysis of the steel industry development environment during 13th Five-Year Period[J]. China Steel Focus, 2015, 28(5): 19.)
- [6] 赵勇, 吴铿, 申威, 等. 基于烧结基础特性的新评价方法指导烧结配矿[J]. 钢铁, 2015, 50(9): 23. (ZHAO Yong, WU Keng, SHEN Wei, et al. Guiding sintering ore matching based on a

- new evaluation method about sintering basic characteristics[J]. Iron and Steel, 2015, 50(9): 23.)
- [7] 唐庆利, 张建良, 李克江, 等. 烧结配料优化方法及算法对比分析[J]. 中国冶金, 2017, 27(5): 13. (TANG Qing-li, ZHANG Jian-liang, LI Ke-jiang, et al. Comparative analysis on methods and algorithms for optimization of raw materials blending in sinter process[J]. China Metallurgy, 2017, 27(5): 13.)
- [8] 袁晓丽, 范晓慧, 万新, 等. 烧结计算配矿模型的设计与应用[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2009, 11(3): 73. (YUAN Xiao-li, FAN Xiao-hui, WAN Xin, et al. Design and application on calculating iron ores matching model[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences, 2009, 11(3): 73.)
- [9] 陈小龙, 李家新, 杨佳龙, 等. 优化球团原料的配矿[J]. 中国冶金, 2016, 26(9): 18. (CHEN Xiao-long, LI Jia-xin, YANG Jia-long, et al. Ore blending by optimizing pelletizing raw material[J]. China Metallurgy, 2016, 26(9): 18.)
- [10] 苏步新, 张建良, 常健, 等. 铁矿粉的烧结特性及优化配矿试验研究[J]. 钢铁, 2011, 46(9): 22. (SU Bu-xin, ZHANG Jian-liang, CHANG Jian, et al. Sintering characteristics of iron ores and experiment study on optimizing ore-blending[J]. Iron and Steel, 2011, 46(9): 22.)
- [11] 陈耀铭, 陈锐. 烧结球团矿微观结构[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011. (CHEN Yao-ming, CHEN Rui. Microstructure of Sinter and Pellet[M]. Changsha: Central South University Press, 2011.)
- [12] 张玉柱, 艾立群. 钢铁冶金过程的数学解析与模拟[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. (ZHANG Yu-zhu, AI Li-qun. Mathematical Analysis and Simulation of Steel Metallurgy Process[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.)
- [13] 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. Mathematical Model and Artificial Intelligence of Sintering Process[M]. Changsha: Central South University Press, 2002.)
- [14] 龙红明, 夏序河, 王平, 等. 单种铁矿性能评价体系的设计与开发[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(8): 7. (LONG Hong-ming, XIA Xu-he, WANG Ping, et al. Design and development of evaluation system for single iron ore performance[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(8): 7.)
- [15] 周明顺, 刘万山, 杜鹤桂, 等. 鞍钢烧结优化配矿研究[J]. 钢铁, 2004, 39(6): 10. (ZHOU Ming-shun, LIU Wan-shan, DU He-gui, et al. Study on sintering optimization ore matching at Anshan Steel[J]. Iron and Steel, 2004, 39(6): 10.)
- [16] 孙艳芹, 杨松陶, 吕庆, 等. 承钢钒钛磁铁矿烧结配矿正交优化研究[J]. 钢铁, 2011, 46(3): 9. (SUN Yan-qin, YANG Song-tao, LÜ Qing, et al. Orthogonal study of ore blend for sintering process using Chenggang's V-Ti bearing magnetite ore[J]. Iron and Steel, 2011, 46(3): 9.)
- [17] 刘振林, 蔡漳平. 高铁低硅烧结矿配矿技术的试验研究[J]. 钢铁, 2001, 36(12): 1. (LIU Zhen-lin, CAI Zhang-ping. Experimental investigation of proportioning ore technique for high iron and low silica sinter[J]. Iron and Steel, 2001, 36(12): 1.)
- [18] 黄柱成, 易凌云, 胡兵, 等. 高配比褐铁矿的烧结配矿试验研究[J]. 钢铁, 2012, 47(5): 9. (HUANG Zhu-cheng, YI Ling-yun, HU Bing, et al. Experimental investigation on sintering with high ratio of limonite[J]. Iron and Steel, 2012, 47(5): 9.)
- [19] 张建良, 李净, 蒋海冰, 等. 进一步降低烧结工艺成本的优化配矿试验[J]. 钢铁, 2013, 48(3): 9. (ZHANG Jian-liang, LI Jing, JIANG Hai-bing, et al. Ore blending proportion optimization for further cost reduction in sintering process[J]. Iron and Steel, 2013, 48(3): 9.)
- [20] 武钢技术中心科技信息研究所. 武钢烧结四十年[M]. 武汉: 武汉钢铁股份有限公司烧结厂, 1999. (Wuhan Steel Academy of Scientific and Technical. Forty Years History of Sintering in Wuhan Iron and Steel Group[M]. Wuhan: Wuhan Iron and Steel Group Sintering Plant, 1999.)
- [21] Lafayette C, Rodrigo O. Relation of microcosmic fabric and sintering capability and behavior[J]. Trans ISIJ, 1999, 39(4): 270.
- [22] 郭兴敏. 烧结过程铁酸钙生成及矿物学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999. (GUO Xing-min. Calcium Ferrite Formation and Mineralogy of Sintering Process[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.)
- [23] Clout J M F, Manuel J R. Fundamental investigations of differences in bonding mechanisms in iron ore sinter formed from magnetite concentrates and hematite ores[J]. Powder Technology, 2003, 130(3): 393.
- [24] MI Pownceby, JMF Clout. Importance of fine ore chemical composition and high temperature phase relations: applications to iron ore sintering and pelletising[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2003, 112(1): 44.
- [25] Loo C E, Leung W. Factors influencing the bonding phase structure of iron ore sinters[J]. ISIJ International, 2003, 43(9): 1393.
- [26] 张玉柱, 冯向鹏, 李振国, 等. 改善低硅烧结矿冶金性能的研究及实践[J]. 烧结球团, 2004, 29(1): 4. (ZHANG Yu-zhu, FENG Xiang-peng, LI Zhen-guo, et al. Study and practice of improving the metallurgical property of low silicon sinter[J]. Sintering and Pelletizing, 2004, 29(1): 4.)
- [27] 吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 254. (WU Sheng-li, LIU Yu, DU Jian-xin, et al. New concept of iron ores sintering basic characteristics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24(3): 254.)
- [28] 吴胜利, 裴元东, 陈辉, 等. 铁矿粉烧结液相流动性评价[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(10): 1095. (WU Sheng-li, PEI Yuan-dong, CHEN Hui, et al. Evaluation on liquid phase fluidity of iron ore in sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(10): 1095.)
- [29] 吴胜利, 戴宇明, Dauter Oliveira, 等. 基于铁矿粉高温特性互补的烧结优化配矿[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(6): 719. (WU Sheng-li, DAI Yu-ming, Dauter Oliveira, et al. Optimization of ore blending during sintering based on complementation of high temperature properties[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(6): 719.)
- [30] 刘成松, 李京社, 高雅巍, 等. 铁矿粉烧结优化配矿的试验[J].

- 钢铁, 2013, 48(10): 6. (LIU Cheng-song, LI Jing-she, GAO Ya-wei, et al. Experiment on the sintering proportioning optimization[J]. Iron and Steel, 2013, 48(10): 6.)
- [31] 邓秋明, 吴胜利, 韩宏亮. 兴澄特钢烧结优化配矿的研究[J]. 烧结球团, 2009, 34(2): 11. (DENG Qiu-ming, WU Sheng-li, HAN Hong-liang. Study on optimizing ore proportioning for sintering in Xingcheng Special Steel Enterprise[J]. Sintering and Pelletizing, 2009, 34(2): 11.)
- [32] 严奕波, 张宗旺, 黄智华, 等. 南(昌)钢烧结优化配矿的研究[J]. 烧结球团, 2006, 31(4): 14. (YAN Yi-bo, ZHANG Zong-wang, HUANG Zhi-hua, et al. Study on the optimization of iron ores proportioning in Nanchang Iron and Steel Corp[J]. Sintering and Pelletizing, 2006, 31(4): 14.)
- [33] 郭卓团, 安胜利, 石凤丽, 等. 蒙古矿优化配矿的烧结基础性研究[J]. 烧结球团, 2013, 38(4): 13. (GUO Zhuo-tuan, AN Sheng-li, SHI Feng-li, et al. Study on basic sintering characteristics with optimization proportioning of Mongolia iron ore[J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(4): 13.)
- [34] 范晓慧. 铁矿烧结优化配矿原理与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013. (FAN Xiao-hui. Principle and Technology of Iron Ore Matching for Sintering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.)
- [35] 周取定. 铁矿石烧结过程基本理论的研究[J]. 烧结球团, 1980, 5(4): 1. (ZHOU Qu-ding. Research on basic theory of iron ore sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 1980, 5(4): 1.)
- [36] 尼科拉因科 A H, 李克远. 烧结初期烧结料层收缩的数学模型[J]. 烧结球团, 1984, 9(1): 87. (Nicholasenko A H, LI Keyuan. Mathematical model of sintered layer shrinkage in initial stage of sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 1984, 9(1): 87.)
- [37] Kawaguchi T, Sato S, Ichidate M, et al. Development and application of an integrated simulation model for iron ore sintering. III. Application for the evaluation of the ores and the design of the machine by the simulation model[J]. Transactions ISIJ, 1985, 25(4): 110.
- [38] Waters A G, Litster J D, Nicol S K. A mathematical model for the prediction of granule size distribution for multicomponent sinter feed[J]. ISIJ International, 1989, 29(4): 274.
- [39] Venkataramana R, Gupta S S, Kapur P C. A combined model for granule size distribution and cold bed permeability in the wet stage of iron ore sintering process[J]. International Journal of Mineral Processing, 1999, 57(1): 43.
- [40] Cumming M J, Thurlby J A. Developments in modeling and simulation of iron ore sintering[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1990, 17(4): 245.
- [41] 邹志毅. 烧结水分迁移数学模型及计算机仿真[J]. 烧结球团, 1994, 19(2): 1. (ZHOU Zhi-yi. Mathematical model and computer simulation of moisture transfer process during sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 1994, 19(2): 1.)
- [42] 吕学伟. 炼铁流程中铁矿石评价体系建设[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. (LÜ Xue-wei. The Construction of Evaluation System of Iron Ore in Iron-Making Process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.)
- [43] 代书华, 沈峰满. 造粒粒度分布及其预测模型[J]. 钢铁, 2010, 45(6): 20. (DAI Shu-hua, SHEN Feng-man. Pelletizing size distribution and its prediction model[J]. Iron and Steel, 2010, 45(6): 20.)
- [44] 王崇茂, 吴铿, 赵勇, 等. 用模糊数学建立铁矿粉评价体系的方法研究[J]. 烧结球团, 2012, 37(5): 1. (WANG Chong-mao, WU Keng, ZHAO Yong, et al. Research on establishing an evaluation system of iron ore fines by fuzzy mathematics[J]. Sintering and Pelletizing, 2012, 37(5): 1.)
- [45] 范晓慧, 甘敏, 李文琦, 等. 烧结混合料适宜制粒水分的预测[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(4): 373. (FAN Xiao-hui, GAN Min, LI Wen-qi, et al. Prediction of suitable water content on the granulation of a sintering mixture[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(4): 373.)
- [46] 刘文仲. 中国钢铁工业数学模型的应用现状及对策[J]. 中国冶金, 2010, 20(12): 1. (LIU Wen-zhong. Mathematical models application and strategies of steel industrial in China[J]. China Metallurgy, 2010, 20(12): 1.)
- [47] 储满生, 郭宪臻, 沈峰满, 等. 高炉数学模型的进展[J]. 中国冶金, 2007, 17(4): 10. (CHU Man-sheng, GUO Xian-zhen, SHEN Feng-man, et al. Development of blast furnace mathematical model[J]. China Metallurgy, 2007, 17(4): 10.)
- [48] Ueno N, Nakagawa Y, Tanimizu K, et al. Management and control systems for raw materials operation in iron steel industries [C]//Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. Oxford: Pergamon Press, 1986: 473.
- [49] 刘代飞, 范晓慧, 孙文东, 等. 烧结通用配料计算软件系统的开发[J]. 烧结球团, 2003, 28(1): 5. (LIU Dai-fei, FAN Xiao-hui, SUN Wen-dong, et al. Development of the sintering general material proportioning calculation software system[J]. Sintering and Pelletizing, 2003, 28(1): 5.)
- [50] 姚志超, 张延玲, 李士琦, 等. 考虑性能的烧结优化配料模型[J]. 包头钢铁学院学报, 2002, 21(3): 263. (YAO Zhi-chao, ZHANG Yan-ling, LI Shi-qi, et al. Model structure of burden design for properties optimization[J]. University of Iron and Steel Technology, 2002, 21(3): 263.)
- [51] 李智, 姚驻斌. 免疫遗传算法在烧结矿配料优化中的应用[J]. 上海金属, 2004, 26(6): 23. (LI Zhi, YAO Zhu-bin. Application of immune genetic algorithm in optimization of sinter raw material blending[J]. Shanghai Metals, 2004, 26(6): 23.)
- [52] 吕学伟, 白晨光, 邱贵宝. 烧结配料智能优化方法探讨[J]. 材料与冶金学报, 2007, 6(2): 87. (LÜ Xue-wei, BAI Cheng-guang, QIU Gui-bao. Approach methods of solution to model of sintering burdening optimization[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2007, 6(2): 87.)
- [53] 吕学伟, 白晨光, 邱贵宝, 等. 基于遗传算法的烧结配料综合优化研究[J]. 钢铁, 2007, 42(4): 12. (LÜ Xue-wei, BAI Cheng-guang, QIU Gui-bao, et al. Research on sintering burdening optimization based on genetic algorithm[J]. Iron and Steel, 2007, 42(4): 12.)
- [54] 李勇, 吴敏, 曹卫华, 等. 基于线性规划和遗传-粒子群算法

- 的烧结配料多目标综合优化方法[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(12): 1740. (LI Yong, WU Min, CAO Wei-hua, et al. A multi-objective optimization algorithm for sintering proportion based on linear programming and genetic algorithm particle swam optimization[J]. Control Theory and Applications, 2011, 28(12): 1740.)
- [55] 赵辉, 王明, 王红君, 等. 改进的粒子群算法在烧结配料中的应用[J]. 微型机与应用, 2012, 31(16): 85. (ZHAO Hui, WANG Ming, WANG Hong-jun, et al. Improved particle swarm optimization algorithm and application to sintering blending[J]. Micro-computer and Its Applications, 2012, 31(16): 85.)
- [56] 李立芬, 张淑会, 吕庆, 等. 烧结配矿的研究现状及展望[J]. 钢铁研究学报, 2013, 25(9): 1. (LI Li-fen, ZHANG Shu-hui, LÜ Qing, et al. Present situation and prospect of ore blending for sinter process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 25(9): 1.)
- [57] 冯建生, 王秀芝. 数据挖掘技术在宝钢配矿系统中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2001, 18(12): 24. (FENG Jian-sheng, WANG Xiu-zhi. The application of data mining in the iron ore mixing system of Baosteel[J]. Computer Applications and Software, 2001, 18(12): 24.)
- [58] 刘怀. 用BP网络模型对烧结矿质量预测[J]. 烧结球团, 1999, 24(5): 4. (LIU Huai. Adopts BP network model to forecast quality of sinter[J]. Sintering and Pelletizing, 1999, 24(5): 4.)
- [59] 张军红, 沈峰满, 谢安国. G-BP算法在烧结矿FeO指标预测中的应用[J]. 东北大学学报, 2002, 23(11): 1073. (ZHANG Jun-hong, SHEN Feng-man, XIE An-guo. The application of G-BP in FeO content prediction during sintering[J]. Journal of Northeastern University, 2002, 23(11): 1073.)
- [60] 范晓慧, 曾垂喜, 姜涛, 等. 铁矿石烧结性能预报模型[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(6): 949. (FAN Xiao-hui, ZENG Chui-xi, JIANG Tao, et al. Predictive model of iron ore sintering capabilities[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2005, 36(6): 949.)
- [61] 赵路朋, 吴铿, 朱利, 等. 基于BP神经网络的烧结矿性能预报模型[J]. 钢铁, 2017, 52(9): 11. (ZHAO Lu-peng, WU Keng, ZHU Li, et al. Prediction model of sinter properties based on BP neural network[J]. Iron and Steel, 2017, 52(9): 11.)
- [62] 刘代飞, 李军, 袁礼顺. 烧结配矿乏信息灰自助神经网络特征参数估计[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(12): 4917. (LIU Dai-fei, LI Jun, YUAN Li-shun. Parameters estimation of sinter ore match poor information combined bootstrap method, grey analysis and artificial neural networks models[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2012, 43(12): 4917.)
- [63] 鲍雅萍, 马金元, 宋强. 基于灰色神经网络的烧结矿碱度组合预测[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 791. (BAO Ya-ping, MA Jin-yuan, SONG Qiang. Combination forecasting of sintered ore alkalinity based on grey neural network[J]. Control Theory and Applications, 2008, 25(4): 791.)

《钢铁》杂志征稿启事

《钢铁》杂志创刊于1954年,由中国科学技术协会主管,中国金属学会、钢铁研究总院和北京钢研柏苑出版有限责任公司主办,是中国冶金界历史较长的综合性科技期刊,也是反映钢铁工业科技成就的主要刊物之一。《钢铁》设有由55名国内知名学者、企业家等组成的编委会,编委会顾问徐匡迪、殷瑞钰、张寿荣、翁宇庆和编委会主任委员干勇、编委会委员毛新平、谢建新等7位均为中国工程院院士。《钢铁》办刊宗旨是面向生产、结合实际;坚持为中国钢铁工业生产建设服务,报道钢铁工业的科技成就、生产工艺的技术进步、品种质量的改善提高、新技术新产品的开发应用、企业经营管理经验和专业理论应用研究等,以提高钢铁行业科技工作者和管理人员的科技水平,促进钢铁工业的发展。

2001年10月《钢铁》入选由国家新闻出版总署创建的中国《期刊方阵》;名列双百第74名。2009年以前为EI收录期刊,自1992年开始,《钢铁》连续7次入编北大图书馆核心期刊(中文核心期刊);为中信所“中国科技核心期刊”;被国际著名检索机构Scopus收录。

《钢铁》主要栏目有:综合论述、原料与炼铁、炼钢、压力加工、钢铁材料、环保与能源、装备技术、技术交流等。《钢铁》现为月刊;大16开;页码为88页;期刊为自办发行。

1 征稿对象

从事钢铁冶金生产、管理、设计、科研、教学和钢材使用部门的科技人员、专家学者和管理人员等。

2 征稿范围

钢铁冶金领域具有创新性、高水平、有重要意义的原始性研究学术论文以及反映学科最新发展状况的文献综述和技术类文章。《钢铁》在继续报道和推广钢铁工业关键共性技术的基础上,特向作者征集涉及钢铁工业关键技术的原创文章和综合论述文章。

特别欢迎作者针对钢铁企业资源优化配置和节能减排、资源综合利用等方面撰写技术文章。

3 投稿和联系方式

请登录“钢铁期刊网”网站(<http://www.chinamet.cn>)。点击“钢铁”的图标或刊名导航条,进入期刊的首页了解详情。

联系人: 尚海霞, 党玉华, 何祺;

邮箱: IS@chinamet.cn;

电话: 010-62182345;

传真: 010-62185134;

通讯地址: 北京市海淀区学院南路76号;

邮编: 100081。