综述

铁前混配矿技术现状及发展方向

白永强，郭晓霜，张庆东
（中国矿产资源集团有限公司，北京 100142）

摘要：我国钢铁生产以“高炉—转炉”长流程为主，其中，铁前工序是铁素物质流、碳素能源流转换的核心环节，其生产成本占全流程75%以上，能源消耗约占90%，碳排放量占吨钢总排放量的95%，是影响钢铁行业高质量发展的关键工序。值得重视的是，原料质量对整个炼铁工序的稳定顺行、碳排放、能源消耗和生产成本均有重要影响。当烧结矿FeO质量分数下降1%，焦比将下降1.0%~1.5%，产量将提高1.0%~1.5%；当低温还原粉化率升高10%，焦比将升高1.5%，产量将降低3%；当TFe质量分数波动由±1%降低至±0.5%，焦比将降低1%，产量将提高2%。因此，国内领先钢铁企业均重视铁前配矿和混匀，建立了基于线性规划算法、遗传算法、模糊神经网络、自适应进化算法等的配矿模型，采取矿山混合、港口粗混、平铺直取精混、“配矿槽+强混”精混等不同形式的混匀方式，在铁矿种类繁多和总量偏紧的情况下，提高资源利用效率。此外，针对全球钢铁行业绿色低碳发展与优质铁矿资源日益减少的矛盾，需进一步加强混配矿技术创新，优化铁矿资源配置，助力钢铁行业实现低碳高质量发展。

关键词：铁矿；配矿技术；生产成本；能源消耗；碳排放
中图分类号：TF521 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-8764(2024)05-0001-08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.068

Technology status and development direction of pre-iron ore proportioning technology

BAI Yongqiang, GUO Xiaoshuang, ZHANG Qingdong
(China Mineral Resources Group Co., Ltd., Beijing 100142, China)

Abstract: Iron and steel production is dominated by the long process of “blast furnace-converter” in China, in which the pre-iron process is the core link of conversion between ferrite material flow and carbon energy flow, and its production cost accounts for more than 75% of the whole process, energy consumption accounts for about 90%, and carbon emissions account for 95% of the total emissions per ton of steel, which is a key process affecting the high-quality development of the steel industry. It is worth noting that the quality of raw materials has an important impact on the stability of the entire ironmaking process, carbon emissions, energy consumption and production costs, when the FeO mass fraction of sinter decreases by 1%, the coke ratio will decrease by 1.0%~1.5%, and the output will increase by 1.0%~1.5%; when the pulverization rate of low-temperature reduction increases by 10%, the coke ratio will increase by 1.5% and the yield will decrease by 3%; when the fluctuation of TFe mass fraction decreases from ±1% to ±0.5%, the coke ratio will decrease by 1% and the yield will increase by 2%. Therefore, all leading domestic iron and steel enterprises attach their great importance to the pre-iron ore proportioning and mixing, have established a ore proportioning model based on linear programming algorithm, genetic algorithm, fuzzy neural network, adaptive evolution algorithm, etc., and adopt different forms of mixing methods such as mine mixing, port coarse mixing, fine mixing between tiling and direct extraction, and “ore proportioning tank + strong mixing” fine mixing, so as to improve resource utilization efficiency in the case of a wide variety of iron ore types and tight total amount. In addition, in view of the contradiction between the green and low-carbon development of the global steel industry and the decreasing high-quality iron ore resources, it is necessary to further

收稿日期：2023-12-06；**修回日期**：2024-02-07
作者简介：白永强(1982—)，男，正高级工程师，从事烧结、球团、炼铁工艺技术和优化配矿等方面的研究工作。

strengthen the technological innovation of ore proportioning, optimize the allocation of iron ore resources, and help the steel industry achieve low-carbon and high-quality development.

Key words: iron ore; ore proportioning technology; production costs; energy consumption; carbon emissions

钢铁工业是碳排放大户，全球钢铁碳排放量占能源系统排放总量的7%左右。我国钢铁行业碳排放总量在31个制造业门类中排名最高，超过全社会碳排放总量的15%。其中，炼铁工序(包括焦化、烧结、球团、高炉等)的能源消耗占钢铁生产总能耗的90%，CO_2排放量占吨钢总排放量的95%[1]，即超过全国碳排放总量的14%。降低以高炉为中心的生铁冶炼流程碳排放和能源消耗，提高炼铁工序碳利用效率是整个钢铁工业绿色低碳发展的核心。高炉炼铁界素有“七分原料、三分操作”的说法，含铁炉料的质量对整个炼铁工序的碳排放、能源消耗、成本和生产效率均有重要影响，而炉料质量则由铁矿资源禀赋、混配矿技术共同决定。因此，在全球优质铁矿资源日益减少的背景下，加强混配矿技术创新，优化铁矿资源配置，对于钢铁行业低碳高质量发展具有重要意义。

铁前混配矿涵盖烧结、球团、高炉三大工序的配矿、混矿两个工艺过程。配矿包括高炉炉料结构配比、烧结配矿、球团配矿等3个环节；混矿主要对各工序配矿方案的落地实施，最大程度实现配矿设定的理想目标。高炉炉料结构优化是将各类烧结矿、球团矿和块矿按照一定规则计算配加比例，其约束条件是保障高炉稳定顺行，目标函数通常为成本最低或产量最高，核心任务是增加高性价比炉料的使用量。烧结(球团)工序优化配矿是在满足烧结矿(球团矿)质量要求和矿石供应条件的前提下，通过配矿使各类矿石混合得到的混匀矿具备优良的制粒性能、成矿性能，生产出的烧结矿(球团矿)能使高炉取得良好的技术经济指标。混矿主要是通过不同的工艺装备实现各类原料的混合，实现烧结矿(球团矿)化学成分在时间维度上的均质性，降低产品质量波动，为高炉稳定顺行、精细化操作提供优质原料支撑。

当前，高炉和烧结配矿技术及应用相对成熟。随着带式焙烧机产能的提升、适用资源种类的增加，球团配矿也取得了明显进步。混矿技术的目标是减小实际成分与理论配矿成分之间的差异，目前主要集中于烧结原料的混合，如各类粗混、原料场平铺直取精混、“配矿槽+强混”精混等。为此，本文综述了铁前主要工序的配矿技术和混矿技术现状和特点，梳理铁前一体化配矿、智慧料场混矿、非主流矿集中精混、特殊矿偏析混合等铁前混配矿技术的发展方向，以期为铁前混配矿工序的升级改造、提高资源和能源利用效率提供参考。

1 铁前混配矿的重要性和技术现状

1.1 铁前混配矿的重要性

铁前混配矿技术是影响原料质量和成本的重要环节，如烧结矿FeO质量分数每下降1%，焦比将下降1.0%~1.5%，产量将提高1.0%~1.5%；低温还原粉化率将升高10%，焦比将升高1.5%，产量将降低3%[2]；烧结矿TFe质量分数波动由±1%降低至±0.5%，焦比将降低1%，产量将提高2%[3]。因此，国内外领先水平的钢铁企业对混配矿的重视程度极高。不同钢铁企业因混配矿技术应用水平不一，能源消耗和碳排放等指标有明显差距，如：宝钢股份采用先进的铁前配矿技术，配备机械化混匀料场实现高水平混料，高炉燃料比常年保持在495 kg/t左右，尤其近年在综合入炉品位下降至58.5%、非主流铁矿配比增加的情况下，通过优化配矿、强化混匀和智能管控等技术措施，混匀矿的TFe、SiO_2波动率均保持在国内领先水平。高炉仍能保持原有的燃料比水平(535 kg/t)，比国内相近条件的高炉低15 kg/t以上，吨铁减少碳排放量40 kg以上，更是远优于行业的平均燃料比。

1.2 配矿技术现状

1.2.1 高炉配矿

高炉炼铁的炉料主要分烧结矿、球团矿、块矿等三大类。不同钢铁企业因生产特点、资源禀赋和物流运输等条件差异，炉料结构差别较大。我国重点统计钢铁企业的烧结矿配比范围为45%~80%，球团矿配比为0~55%，块矿配比为0~

30%。各企业根据自身高炉生产条件设定合理的炉料结构。同时，不同企业的烧结矿、球团矿的质量和成分存在较大差别，另外还有几十种进口块矿和球团矿，因此实现高炉低碳、低成本生产目标的配矿过程十分复杂。

高炉配矿主要有定配比法和定成分法。定配比法是给定烧结矿、球团矿和块矿等原料的成分和配比，计算原料成本及铁水和炉渣的化学成分，如不符合目标要求，可采用定成分法继续优化。定成分法是根据预测的铁水和炉渣成分，按企业要求设置元素分配系数，进行配料计算，得出满足成分目标的原料配比。目前国内高炉配矿常用的工具有 Excel 软件、Matlab 线性规划软件等，能够满足高炉配矿的基本需求，然而在一定程度上难以满足铁前一体化综合寻优要求。

1.2.2　烧结配矿

国内钢铁企业以生产高碱度烧结矿为主，碱度范围为 1.7 ~ 2.3。全行业平均烧结矿配比为 74%左右，烧结矿主要质量指标包括转鼓强度、低温还原粉化率、还原度指数、高温熔滴性能等，其对高炉稳定顺行、节能低碳降本生产影响程度最大。烧结配矿约束条件包括 TFe、SiO_2、Al_2O_3、P、K、Na、Zn 等成分范围以及各类铁矿的合理配比区间；寻优目标一般以成本最低为主，兼顾产量、冶金性能等指标。市场上可选择的烧结铁矿粉达数十种，其化学成分、粒度组成和高温烧结特性等各不相同[4]。总之，烧结配矿是连接铁矿资源和高炉炼铁的重要环节，对高炉高效低碳炼铁影响程度高，需考虑的约束条件和寻优目标众多，是烧结生产工艺的重点。其常采用的优化方法包括线性规划算法、遗传算法、模糊神经网络、自适应进化算法等[5-6]，为企业高效利用铁矿资源提供较好的技术支撑。

1.2.3　球团配矿

国内钢铁企业以酸性球团矿生产为主，TFe 范围一般在 61%~64%，SiO_2 质量分数基本超过 5%，有的高达 8%。生产装备以链算机—回转窑和竖炉为主，该生产方式的原料适用性低，主要原料是国产高硅磁铁精粉[7-8]。而在球团配矿方面开展的工作较少，导致球团矿生产成本高，且质量和冶金性能与国外球团矿存在较大差距，影响我国钢铁行业球团矿比例的提高和应用效果。近年来，随着我国钢铁行业节能低碳、绿色发展的要求日益提高，球团矿总体需求量增加，原料适用性高的带式焙烧机球团装备产能快速增加。进口赤铁精矿粉也可作为球团的重要原料来源，以降低配矿成本，拓宽球团用铁精粉来源[9-11]。马丽等[12]开展了球团配加细磨麦克粉的试验，认为在球团生产过程中配加不超过 30% 的麦克粉在技术上可行；贺新亮等[13]通过改进设备和优化操作，将镜铁矿配比提升至 50%，生产成本大幅下降；彭道胜等[14]对细磨卡粉制备熔剂性球团进行试验研究，结果表明：细磨后卡粉的微细颗粒质量分数增大，生球的落下和抗压强度明显提高，膨润土用量降低，成品球的还原性和高温软熔性能改善。在优化配矿系统开发方面，陈金鸿等[15]基于遗传算法建立了球团矿配料寻优模型，在已知球团矿的抗压强度、黏结率的情况下，将抗压强度、黏结率的实测值与预测值之差作为寻优目标，较好地探究了原料与指标的关系并实现配料优化。

1.3　混矿技术现状

目前，国内混矿特指烧结工序混矿，主要是因为烧结矿使用的原料种类多且在高炉中的使用比例高，各类矿粉在时间维度上的混匀程度越高，烧结矿的质量越稳定，其对整个铁前工序稳定运行和节能降碳有重要的支撑作用。服务于烧结矿生产的混矿工序涉及不同环节，有多种形式，主要包括矿山混合、港口粗混、港口精混、原料场精混、烧结配矿槽直接混合。不同形式混矿工序的作用和效果也存在较大差别。矿山混合和港口粗混的产品目标是生产一种标准粉，这种标准粉还需要与其他类型铁矿粉再次混合，才能用于烧结生产；港口精混、原料场精混和烧结配矿槽直混的作用是将烧结配矿用到的所有铁矿粉进行混匀，然后与熔剂、燃料一同进入烧结机的后续工序。

1.3.1　矿山混合

矿山混合是指原矿点较多的企业在生产出不同品质的铁矿粉后直接在矿山进行混合，主要目的是生产出一种供应规模大、成分相对稳定、钢

铁企业接受度高的铁矿。典型的矿山混合产品有澳大利亚的 PB 粉、FMG 混合粉，其质量稳定性好且保供能力强，属于我国钢铁企业用量排名前列的品种，近年来进口量分别超过 1.3 亿 t/a 和 0.6 亿 t/a。另外，巴西南部的烧结标准粉 SSFG、IOC6 等均属于混合粉，该类矿粉的原矿种类多、成分波动大，使用效果不如 PB 粉、FMG 混合粉。

1.3.2 港口粗混

港口粗混一般是将两种铁矿粉在港口卸矿点和堆场进行混合，最早由巴西淡水河谷公司主导开展，目的是与澳大利亚的 PB 粉、纽曼粉、金布巴粉、罗伊山粉和麦克粉等高品位主流矿粉竞争，满足我国钢铁企业对中品位铁矿的需求。该公司将巴西北部 65% 品位的优质卡粉和巴西南部不同矿点的高硅粉按照一定比例混合，生产的 BRBF 粉的铁品位为 63%、SiO_2 质量分数为 5%。该模式不仅有效降低了淡水河谷公司的运输及生产成本，而且将销售地点前置到我国港口，缩短了与终端用户的距离，有效地提高了销售量、增加了效益。该公司目前在我国重点港口几乎都建设了混矿基地，具备了覆盖全国钢铁企业的销售能力。澳大利亚力拓公司为了保持其自身产品的贸易份额，也在我国港口开展了相关混矿业务，将皮尔巴拉的 SP10 粉和加拿大精粉在我国港口进行混合，向我国市场推出了新产品 RTBF 粉，其铁品位与 BRBF 粉相近，该混合粉的 SiO_2 质量分数约为 0.85%、Al_2O_3 质量分数约为 0.4%。

需要指出的是，在当前铁矿贸易处于卖方市场的状态下，国外矿山公司在我国港口开展铁矿粗混业务对于我国钢铁企业也有不利影响：一是港口粗混产品质量不稳定，对下游烧结和高炉工序节能低碳、稳定顺行生产造成负面影响；二是铁矿供应种类减少，尤其是高品质铁矿种类减少，钢铁企业在铁矿种类的选择性方面下降；三是混矿过程产生的加工费转嫁给钢铁企业，造成我国钢铁企业的生产成本增加。

1.3.3 港口精混

港口精混一般以钢铁企业为主导，通过与港口、铁矿供应商的多方合作，对多品种铁矿在港口进行配矿混匀加工，为钢铁企业提供符合生产要求、可直接供烧结使用的成品混匀矿。典型项目有“宝武资源马迹山港矿石加工中心”项目，精混产品专供重庆钢铁使用；“宁波舟山港中宅精混矿”项目，精混产品专供沙钢集团使用。两个项目采用“配矿槽 + 强混”的精混新工艺、“中心刮刀 + 高精度配料秤”的新配料技术和“在线检测 + 智慧配矿”的智能化技术，实现了在线自动取样、实时检测、全程精确控制，强力混合机混匀能力达 2 000 t/h，精混矿的铁分波动和控制在 ±0.2% 以内，达到行业领先水平，对于稳定烧结矿质量、提高高炉精细化操作水平、降低铁前工序能源消耗和碳排放有较大的促进意义。

1.3.4 原料场精混

原料场精混是我国钢铁企业矿石混合的主要形式，是铁前工序精料加工的重要环节。该工艺在满足烧结矿质量要求和矿石供应条件的前提下，使各类矿石混合得到的混匀矿具备优良的制粒性能、成矿性能，生产出的烧结矿可使高炉取得良好的技术经济指标。现阶段，我国钢铁行业先进水平的原料场精混模式以 20 世纪 80 年代宝钢原料场的建成投产为代表，其通过混匀配料槽对含铁原料进行优化配料，采用混匀堆料机平铺造堆，采用混匀取料机沿横向截面取料。近年来，宝钢采取往返变速平铺布料和端部延时堆积技术，提高混匀矿的堆积质量，从而得到粒度、成分比较均匀稳定的混匀矿，取得了较好的混匀效果，使混匀矿 SiO_2 质量分数标准偏差平均值降低至为 0.128[16]。进入十三五以来，原料智能混匀技术应用步伐加快，混匀产品的质量进一步提升，该技术在钢铁企业节能减碳、降本增效等方面发挥了重要作用。

1.3.5 烧结配矿槽直接混合

烧结工序供料流程一般包括一次料场、二次料场、配料仓等环节，以保证混配矿过程的精确度和混匀矿成分稳定性。但是，一些企业基于场地条件、投资规模和对混匀矿质量重视程度等因素考虑，取消了二次料场环节，而采用一次料场直供配料仓的模式。该模式虽然会对后续工序的节能和生产稳定造成不利影响，但也能基本保证铁前工序的正常运行，甚至起到降低原料库存、

提高配矿灵活性的作用。湘钢 2022 年对烧结直供料工艺进行了工艺创新，通过皮带将铁矿从码头直接输送至烧结配料仓，采用加强设备管理、精准排料、智能管控等措施，实现了混匀矿质量不下降的良好效果，不仅节省了 12 万 m^2 二次料场的封闭费用 8 亿元，而且将原料在厂内的运转时间由 10 d 缩短至 1 d，大幅降低了原料的库存时间。

2　混配矿技术发展方向

2.1　铁前一体化配矿

高炉是铁前工序的核心，炉料的铁品位、转鼓强度、还原度指数、低温还原粉化率、熔融性能、粒度分布、质量稳定性和有害元素含量等对高炉的生产效率、生产成本、工序能源消耗和碳排放量等均有重要影响。混配矿技术的应用效果最终由高炉生产来评价。因此，由各类铁矿粉混配生产的烧结矿、球团矿，进而与市场上各类块矿混配，是要实现高炉生产指标的综合性能最优，而非仅仅实现烧结、球团等单一工序的结果最优。铁前一体化配矿系统应包含两个重要内容：

（1）原料端需针对烧结和球团用矿粉、块矿等不同类型的铁矿，建立统一的坐标系进行对比。以生产成本为例，烧结配矿使用 A 矿粉能够降低烧结矿的生产成本，但是 A 矿粉的成分与成本更低的 B 块矿粉的匹配度低，铁前一体化配矿系统可用来解决 A 矿粉、B 块矿与其他矿种合理配比的问题。

（2）应用端需建立各类铁矿冶炼效果的综合评价体系。炉料质量涵盖包括铁品位在内的十几种指标，其中的关键指标和影响因子需结合不同区域和企业的高炉运行状态诊断后确定。效果评价应包含成本、使用和能源利用效率、碳排放等多项指标。如 C 矿粉可直接用作烧结原料，生产 1 t 生铁创造的经济效益为 20 元，CO_2 排放量为 1.6 t，但是与性价比更高的 D 矿粉不匹配。若通过磨矿提质作为球团矿原料，生产 1 t 生铁创造的经济效益为 15 元，CO_2 排放量为 1.4 t，高炉利用系数更高，并且其与 D 矿粉的匹配度更高。综合评价，后者经混配后的效果更优。因此，铁前一体化配矿系统可以对不同铁矿创造的经济和社会效益进行系统评价和计算，以综合效益最优为目标函数进行配矿。

2.2　智慧混匀料场技术

高炉装备的大型化和减量化对长寿稳定顺行提出了更高要求，原料质量的稳定性对于高炉长周期稳定顺行、节能降碳、低成本生产的贡献度较以往更高。智慧混匀料场技术是未来混配矿的主要发展方向之一，主要包括以下系统：

（1）智能混匀配料系统。该系统以稳定混匀矿的硅、铁含量为目标，采用等硅等铁堆积算法进行模型计算，自动生成原料配槽计划，自动优化和实时动态调节给料装置的切出速率，实时预测混匀矿的目标成分，以多维立体方式跟踪混匀配料过程。

（2）智能流程控制系统。综合考虑运转成本、设备状态、检修计划等信息，该系统智能决策出距离最短、能源消耗最低的最优动态流程，自动匹配物料属性、跟踪物料流向、控制运输量，并实现全流程一键式操作，使胶带机根据用户需求智慧运行。

（3）数字化料场系统。该系统利用三维激光设备实时扫描料堆轮廓，采用图像处理技术和高精度三维图像重构技术，对料场矢量化建模，建立实时的料堆三维数字化模型，并结合图像分析模型精确计算料堆体积和重量，实现料场数字化管理、自动实时盘库和精细化管控。

（4）在线三维生产仿真系统。该系统通过 3D 仿真技术对原料场的生产能力进行建模，模拟实际生产过程并进行展示，根据生产能力、设备状况、物料品种等的变化进行仿真，验证当前条件下生产、检修计划的可行性。

2.3　非主流矿集中精混

我国钢铁行业进口铁矿的种类多达几十种，然而，高度依赖国外铁矿资源造成我国资源安全保障形势十分严峻。国外“四大矿山”在铁矿产量、价格和品质等方面存在明显优势，而国际铁矿定价权被国外机构主导，进而使得全球钢铁产业链各环节的利润分配严重不合理。非主流铁矿是我国铁矿需求市场的重要补充。然而，受存在种类

多、供应量小、到港周期不稳定、质量波动大、有害元素高等因素影响，钢铁企业非主流矿的配比一般不超过35%，分配到每种非主流矿的比例则更低，加之各矿种的来料周期不匹配、混匀效果差等不利因素，非主流矿的用量受到限制、节能低碳应用效果欠佳。

为保证非主流铁矿在我国铁矿需求市场份额，降低对“四大矿山”的依赖度，未来应该在港口开展非主流铁矿石精细混配模式，利用港口矿石种类多、用户需求集中的优势，充分发挥多品种铁矿在化学成分、粒度和烧结性能等方面的互补性，集中建设非主流矿精细混配料槽、强力混合设施和智能管控系统，实现动态调整混配方案的能力，根据不同企业的个性化需求提供定制化的混矿产品，增加非主流铁矿的用量，改善非主流铁矿石的混合效果和后续工序的应用效果，降低能源消耗和碳排放。

2.4 铁矿偏析混合技术

以针状复合铁酸钙(SFCA)为主要黏结相与残余的赤铁矿、磁铁矿形成交织结构的烧结矿，具有强度高、还原性好、低温还原粉化性能优等诸多优点，形成此种微观结构的条件包括几方面：一是氧化性气氛下烧结温度控制在1 250 ~ 1 280 ℃且维持3 ~5 min；二是化学成分适宜，黏结相形成区的SiO_2质量分数为5%左右、碱度为2.5左右为宜，尤其是$w(Al_2O_3)/w(SiO_2)$最好在0.1 ~0.2，最高不超过0.3。然而，随着优质铁矿资源的不断消耗，高Al_2O_3质量分数铁矿配比越来越大。我国烧结矿Al_2O_3质量分数普遍超过2%，$w(Al_2O_3)/w(SiO_2)$达到0.4以上，常规混合技术很难达到大量生成针状SFCA的成分要求；另外，由于烧结料层存在上冷下热、边缘效应等不均匀现象，常规的混料技术很难保证所有料层烧结温度和气氛都能达到SFCA大量形成的条件。许多企业为保证整体成品率，仍采用1 300 ℃以上的高温烧结工艺，导致以铁酸钙为主要黏结相的烧结矿占比较低。

为降低烧结矿FeO含量、发展低温铁酸钙黏结结构，日本一些钢铁企业对高铝铁矿、褐铁矿采用特殊混匀技术，实现微观层面的成分偏析，以期得到适宜生成SFCA黏结相的生产条件[17-19]。如选择性制粒技术：在制粒时把含Al_2O_3高的细铁矿粉集中在颗粒的核心部分，而把Al_2O_3含量相对低的矿粉和石灰石等含CaO的物料作为黏附粉放在外层，以降低黏附层的铝硅比、提高黏附层碱度，从而改进黏附层的熔融行为，生产出SFCA黏结相含量高的烧结矿。该技术在新日铁多台烧结机均有成功应用，同时电能、燃料消耗等均有不同程度地降低。涂层制粒技术：将含结晶水的褐铁矿放在小球内部，焦粉和石灰石涂于小球颗粒外面。焦粉涂层可提高小球粒的强度，从而提高烧结料层的透气性，提高氧化性气氛；石灰石涂层可抑制铁矿过熔融反应，减少铁酸钙中的Al_2O_3和Fe_2O_3含量。该技术在日本JFE公司多台烧结机应用，烧结矿还原度指数提高3%，低温还原粉化率降低5%，高炉使用这种烧结矿后燃料比降低7 kg/t[20]。

3 结论和建议

铁前混配矿对于钢铁企业高炉稳定运行、节能低碳、降成本生产均有重要影响，我国钢铁行业在铁矿高效低碳应用方面与日本等领先国家仍有较大差距。随着我国碳减排工作的深入开展，炼铁工艺作为工业领域碳排放量最大的生产工艺环节，混配矿的考核目标应从单一的成本最低向经济效益、节能低碳效益综合最优转变，相应的各类铁矿石的性价比评价标准、铁矿石采购理念、混配加工和评价体系等均应作出相应调整。为提高铁矿高效低碳应用效果，优化铁矿资源配置，建议我国钢铁行业在铁矿石混配方面开展以下几方面工作：

(1) 建立全球铁矿资源数据库和铁前一体化智能配矿系统。利用大数据技术整理全球铁矿资源的成分、粒度、烧结特性、价格、储量等信息，建立具备动态更新功能的数据库；建立配矿方案数据库、铁前工艺规则库，与不同类别企业的实际配矿方案、烧结工况联动分析，对典型工况进行智能标记和学习，对相应的炉料质量进行一键追溯，通过行业对标和历史对标，不断优化、精确规则库；基于数据库和规则库，利用智能算法

建立深度学习优化模型，一键预测各类铁矿的综合效益，建立铁前一体化智能配矿系统。

（2）建立港口非主流铁矿精混矿生产基地，优化资源配置。由国家铁矿进口平台机构牵头，联合钢铁企业、港口企业等共同建立非主流铁矿精混矿生产基地。利用铁前一体化智能配矿系统，结合不同区域、不同种类、不同装备条件的钢铁企业的特点和主流矿资源条件，提供综合效益最优的配矿方案建议，在此基础上为各企业提供定制化的、成分稳定性高的非主流矿混合粉；充分利用港口矿石种类多、物流条件好、矿石资源保障性强等优势，优化铁矿石资源配置，不仅有利于钢铁企业降低成本，也有助于提高烧结矿的质量稳定性，提高高炉稳定顺行率和能源利用效率，降低能源消耗和碳排放。

（3）推动产学研用深度合作，推广非主流铁矿创新技术应用。针对全球优质铁矿资源紧缺且日益减少的问题，建立铁矿生产企业、科研院所、设计院和矿石应用企业深度合作机制，创新性开发和推广非主流铁矿石高效、低碳应用技术。如：推动以低品位高铝褐铁矿为主要产品的矿山公司、国内钢铁企业开展选择性制粒技术应用；开展 HIsmelt、CISP 熔融还原等非高炉炼铁使用低品位、高杂质非主流铁矿的低碳应用技术研究，减少在长流程炼铁中的应用；充分发挥我国选矿技术世界领先的优势，推进低品位进口矿磨选提质加工和高效应用等，提高我国钢铁行业铁矿石的节能低碳应用标准。

参考文献：

[1] 刘臣，叶恒棣，魏进超，等．钢铁工业炼铁工序绿色低碳技术浅析[J]．烧结球团，2021，46(6)：1－7；26.
LIU Chen，YE Hengdi，WEI Jinchao，et al. An analysis on green low carbon technology of ironmaking process in the steel industry[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(6)：1－7；26.

[2] 许满兴．烧结矿冶金性能对其质量和高炉主要操作指标的影响[J]．烧结球团，2014，39(3)：1－5；11.
XU Manxing. Influences of metallurgical properties of sinter on its quality and major operation indexes of blast furnace[J]. Sintering and Pelletizing，2014，39(3)：1－5；11.

[3] 刘晓丹，刘浩．混匀作业与高炉产量和焦比关系的探讨[J]．烧结球团，2014，39(1)：40－43；55.
LIU Xiaodan，LIU Hao. A discussion about the relationship between blending operations and blast furnace yield and coke ratio[J]. Sintering and Pelletizing，2014，39(1)：40－43；55.

[4] 姜涛．烧结球团生产技术手册[M]．北京：冶金工业出版社，2014.
JIANG Tao. Technical manual for sintering and pelletizing production[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2014.

[5] 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)：13－18.
TANG Qingli，ZHANG Jianliang，LI Kejiang，et al. Comparative analysis on methods and algorithms for optimization of raw materials blending in sinter process[J]. China Metallurgy，2017，27(5)：13－18.

[6] 李军，刘代飞，史先菊，等．铁矿烧结配矿模式研究进展[J]．钢铁，2018，53(1)：8－16.
LI Jun，LIU Daifei，SHI Xianju，et al. Progress of iron ore matching patterns in sinter process[J]. Iron and Steel，2018，53(1)：8－16.

[7] 姜涛．铁矿造块学[M]．长沙：中南大学出版社，2016.
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha：Central South University Press，2016.

[8] 许满兴，张玉兰．新世纪我国球团矿生产技术现状及发展趋势[J]．烧结球团，2017，42(2)：25－30；37.
XU Manxin，ZHANG Yulan. Current situation and development trend of my country's pellet production technology in the new century[J]. Sintering and Pelletizing，2017，42(2)：25－30；37.

[9] 胡志清，潘建，朱德庆，等．铁精矿原料特性及其对成球性能的影响[J]．烧结球团，2013，38(4)：42－45；49.
HU Zhiqing，PAN Jian，ZHU Deqing，et al. Raw material characteristics of iron ore concentrate and its influence on balling performance[J]. Sintering and Pelletizing，2013，38(4)：42－45；49.

[10] YANG Congcong，ZHU Deqing，PAN Jian. Oxidation and induration characteristics of pellets made from western Australian ultrafine magnetite concentrates and its

utilization strategy[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2016,23(9):924 – 932.

[11] 潘建,田宏宇,朱德庆,等. 超微细铁精矿的粒度特性和润湿性对其成球性能的交互影响[J]. 工程科学学报,2017,39(6):830 – 837.
PAN Jian,TIAN Hongyu,ZHU Deqing,et al. Particle size and wettability effect of ultrafine magnetite concentrate on ballability[J]. Chinese Journal of Engineering,2017,39(6):830 – 837.

[12] 马丽,青格勒,田筠清,等. 球团配加细磨麦克粉的试验研究[J]. 烧结球团,2019,44(2):39 – 41;49.
MA Li,QING Gele,TIAN Yunqing,et al. Experimental study on pelletizing proportioned with grinded MAC fines[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(2):39 – 41;49.

[13] 贺新亮,孙广伟,王晶. 球团生产中配加镜铁矿的实践[J]. 烧结球团,2014,39(5):35 – 38.
HE Xinliang,Sun Guangwei,Wang Jing. Practice of adding specularite in pellet production[J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(5):39 – 41.

[14] 彭道胜,潘建,李军,等. 细磨卡粉制备熔剂性球团的试验研究[J]. 烧结球团,2021,46(4):50 – 57.
PENG Daosheng,PAN Jian,LI Jun,et al. Experimental research on preparation of fluxed pellets from fine grinding Carajas powder[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(6):50 – 57.

[15] 陈金鸿,张柳叶,贾学勇,等. 基于遗传算法建立球团矿配料寻优模型的研究[J]. 烧结球团,2019,44(5):43 – 49.
CHEN Jinhong,ZHANG Liuye,JIA Xueyong,et al. Research on establishing pellet proportioning optimization model based on genetic algorithm[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(5):43 – 49.

[16] 张慧峰. 宝钢提高混匀矿堆积质量实践[J]. 烧结球团,2016,41(5):43 – 47.
ZHANG Huifeng. Practice of improving stacking quality of blended ores in Baosteel[J]. Sintering and Pelletizing,2016,41(5):43 – 47.

[17] 周文涛,胡俊鸽,郭艳玲. 国外烧结球团突破性技术研究进展[J]. 烧结球团,2015,40(2):1 – 6.
ZHOU Wentao,HU Junge,GUO Yanling. Research progress about foreign breakthrough sintering & pelletizing technologies[J]. Sintering and Pelletizing,2015,40(2):1 – 6.

[18] YAMAGUCHI Y,KAMIJO C,MATSUMURA M,et al. Improvement of permeability of sintering bed by adding dry particles to granulated raw materials[J]. ISIJ International,2013,53(9):1538 – 1544.

[19] HIGUCHI T,IWAMI Y,KURIKI Y,et al. Influence of coke breeze positioning on the sintering behavior of pellets and raw material bed with embedded pellets[J]. ISIJ International,2013,53(9):1545 – 1554.

[20] 胡俊鸽,周文涛,赵小燕. 日本降低生产成本的烧结技术进展[J]. 冶金丛刊,2010(5):46 – 50.
HU Junge,ZHOU Wentao,ZHAO Xiaoyan. Sintering technology development of lowering production cost in Japan[J]. Metallurgical Collections,2010(5):46 – 50.

铁矿石优选与铁前工艺智能化河北省工程研究中心介绍

铁矿石优选与铁前工艺智能化河北省工程研究中心是由河北省发展和改革委员会指导、华北理工大学建设的科研平台。中心现有固定人员40名,包括高校教师26人,企业工程师14人。其中教授11人,博士21人,博士生导师3人,硕士、博士研究生50多人,包括国家万人计划、教育部新世纪优秀人才、河北省杰青、河北省青年拔尖人才、河北省三三三人才11人,国家级学会、省级学会的理事长、秘书长、常务理事12人。中心主持和参与国家级项目37项、企业委托横向课题80多项,发表学术论文400多篇,其中,中科院一区TOP期刊论文39篇,ESI热点、高被引论文19篇,在同领域中具有较高影响力,支撑华北理工大学工程学进入ESI全球排名前1%学科。中心基于“数据和工艺双驱动”理念,设有铁矿基因矿物加工与智能优选、铁矿粉全方位智能配矿、烟气多污染物协同治理、钢铁工业数据智能分析四个交叉科学研究方向,主要定位于人工智能和大数据技术应用于传统钢铁产业的转型升级,促进产业基础高级化和产业链现代化,为京津冀地区经济发展和国家的“双碳”目标服务。与河北钢铁集团、建龙钢铁唐山天映智能科技有限公司、山西建龙实业有限公司等国内大型钢铁企业与智能科技公司充分合作,打破了“理论 – 技术 – 应用”瓶颈,开启了一条“研用并行”的道路,为营造出“绿色矿山、绿色采购、绿色物流、绿色制造、绿色产品、绿色产业”六位一体的发展模式,为高质量完成国家制定的“绿色智能冶炼”和“双碳”战略目标贡献力量。