

2011 钢铁共性技术协同创新中心
工艺与装备研发平台顶层设计(十)

2011 钢铁共性技术协同创新中心由北京科技大学与东北大学两所核心协同单位,以及国内主要钢铁行业科研院校、企业等共同组建。目前,该中心已正式通过国家认定。该中心由关键共性工艺与装备研发平台和重大工程高端产品开发平台组成。其中,关键共性工艺与装备研发平台由东北大学 RAL 为主体,协同东北大学材料与冶金学院、北京科技大学、中国钢研科技集团、上海大学、武汉科技大学、宝钢、鞍钢、首钢、武钢等单位组建而成。该平台的任务是研发冶、铸、轧等工序的新工艺、新技术、新装备,实现“钢铁绿色制造”。针对工艺与装备研发平台的顶层设计内容,本报特组织相关报道,以飨读者。

复杂难选铁矿
预富集—悬浮焙烧—磁选新技术

1 研究背景

随着我国钢铁工业的快速发展,铁矿石需求大幅增加,由于国内铁矿资源开发利用与钢铁需求不匹配,供求关系严重失衡,进口矿依赖性强,因此需要实施“两个市场、两种资源”的全球多元资源战略与措施来保障钢铁工业铁原料供应。实施“两个市场、两种资源”战略,要立足国内,以降低自产矿成本为抓手,保证自产矿适当比例;要择机加大境外矿的勘探开发投资力度,建立稳定的海外资源供应基地;要保证进口矿、权益矿、自产矿的适度比例,合理利用两种资源,在全球视野下实现铁矿安全供给,建设铁矿石安全供应保障体系。国内铁矿资源禀赋特性差,国外开发的权益矿也多为资源禀赋差的低品位、难处理矿,必须通过新工艺、新技术、新装备推广应用来消除资源先天条件差的劣势,通过科技进步降低国内铁矿和权益进口矿的生产成本,实施铁矿资源的绿色加工与利用。

随着我国经济发展和国家财力的增强,资源约束正替代资本约束逐步上升为国家经济发展新常态的主要矛盾,我国铁矿供应不足已成为制约国家经济发展的瓶颈,甚至成为伴随工业化、城镇化和现代化全过程的一个重大现实问题。因而,加强国内复杂难选铁矿石高效开发利用研究,提高铁矿石自给率,具有重要的战略意义。在我国复杂难选铁矿资源中,微细粒矿、菱铁矿、褐铁矿、鲕状赤铁矿属典型难利用铁矿资源,总储量达 200 亿吨以上,广泛分布于辽宁、河北、山西、陕西、湖北、新疆等地。由于该类铁矿石矿物组成复杂、结晶粒度微细,采用常规选矿技术难以获得较好的技术经济指标,部分资源尚未获得大规模工业化开发利用,部分资源虽得以开发,但利用效率极低。因此,亟需研发创新性技术与装备以实现我国复杂难选铁矿石的高效利用。

近年来,国内许多研究单

位围绕微细粒矿、菱铁矿、褐铁矿、鲕状赤铁矿等复杂难选铁矿资源的高效开发与利用,开展了大量的基础研究和技术开发工作,基本达成了采用选冶联合工艺才能实现该类铁矿资源高效利用的共识。其中磁化焙烧—磁选技术是处理该类矿石的有效技术。磁化焙烧—磁选是指将物料或矿石在一定的加热温度下进行化学反应,使矿石中的赤铁矿、菱铁矿、褐铁矿等弱磁性铁矿物转变为强磁性的磁铁矿或磁赤铁矿,再利用矿物之间的磁性差异进行磁选分离。磁化焙烧方式有竖炉焙烧、回转窑焙烧、流态化焙烧等。

竖炉磁化焙烧工艺主要适合处理粒度 25—75mm 的块矿,且该工艺存在着单机处理能力低、能耗高、焙烧时间长、产品质量不均匀等问题。目前国内仅有酒钢选矿厂采用 44 座 100m³ 竖炉焙烧含碳酸盐铁矿石。回转窑磁化焙烧工艺适合处理粒度 25mm 以下矿石,磁化焙烧质量及分选指标较竖炉好。大西沟选矿厂采用煤基回转窑磁化焙烧—弱磁选—反浮选工艺处理菱铁矿,获得了铁精矿 TFe 品位 60.63%,铁回收率 75.42% 的良好工业生产指标。但回转窑工艺仍存在着磁化率低、易结圈、生产不稳定、作业率低和能耗高等问题。

流态化是指固体物料颗粒在流体介质作用下呈流体状态,流态化过程具有类似液体的特性。其优点为:1) 因颗粒多悬浮于气相中,颗粒处于较好的分散状态,能使气固充分接触,产品质量均匀稳定;2) 反应速度快,强度高,反应过程中的传热、传质效果好,热耗低,在氧化铝工业,流态化焙烧比传统的回转窑热耗降低 30% 以上;3) 温度和气流分布均匀,容易控制,自动化水平高;4) 设备运转部件少,维修费用低,容易调节。

早在 20 世纪 50—60 年代,流态化磁化焙烧在国外就引起广泛的关注,英国、美国、加拿大、意大利等国都有研究,但近

年来国外对于复杂难选铁矿石基本不予利用,针对复杂难选铁矿选矿技术开展研究工作的兴趣不高,国外鲜有磁化焙烧研发的报道。国内许多研究单位针对流态化焙烧技术和装备开展了大量的研究。鞍山钢铁公司曾设计建成日处理量 700 吨的折倒式半截流两相沸腾焙烧炉,对鞍钢齐大山赤铁矿石进行了工业试验,取得了较好的焙烧指标。但沸腾炉存在还原过程缓慢、还原程度不均匀等问题。以余永富院士为首的科研团队提出了循环流态化闪速磁化焙烧的概念,基于流化床技术及装置,对多种铁矿石进行粉矿流态化磁化焙烧,均获得了良好的技术指标,为我国难选铁矿石开发利用开辟了新的途径。此外,中国科学院过程工程研究所、西安建筑科技大学、浙江大学等单位也开展了大量的流态化磁化焙烧试验研究。但流态化磁化焙烧技术涉及化学反应、矿物转化、多相流动及传热传质等多个复杂物理化学反应,还存在着诸多亟待解决的理论与技术问题,至今未能实现工业化生产。目前迫切需要解决的理论与技术主要包括铁矿物相转化精准控制,矿石焙烧过程高效传热传质,非均质矿石颗粒运动状态控制及大型工业化悬浮焙烧装备研发。

东北大学韩跃新教授及其研究团队在中国地质调查局地地质调查项目、教育部重大创新项目的支持下,联合中国地质科学院矿产综合利用研究所和沈阳鑫博工业技术发展公司,对复杂难选铁矿悬浮焙烧技术开展了大量的基础研究和技术开发工作,揭示了悬浮焙烧过程中不同铁矿物物相转化及非均质颗粒的运动规律,提出了复杂难选铁矿石“预氧化—蓄热还原—再氧化”悬浮焙烧理念,研发了复杂难选铁矿石悬浮焙烧新型实验室及半工业装备,悬浮焙烧炉示意图见图 1。同时针对复杂难选铁矿石品位低、铁矿物种类多的特点,形成了复杂难选铁矿“预富集—悬浮焙烧—磁选”选冶联合新工艺 PSRM(Preconcentration—Suspension Roasting—Magnetic Separation)。“铁矿石悬浮焙烧系统及焙烧工艺”、“悬浮磁化焙烧炉”、“一种从碱性赤泥中选出精铁矿并使尾矿呈中性的方法”等多项国家发明专利获得授权。以湖北五峰鲕状赤铁矿、渝东典型沉积型赤褐铁矿、鞍钢东部尾矿、眼前山排岩矿及东鞍山铁矿石等为原料,开展了系统的 PSRM 实验室及中试试验,均获得良好的焙烧效果和分选指标,其中鞍钢东部尾矿在 TFe 品位 11.48% 的条件下,经过“预富集—悬浮

焙烧—磁选”中试试验,获得铁精矿 TFe 品位 65.69%,焙烧物料磁选作业回收率 89.85%,尾矿 TFe 品位 5.68%,总回收率 55.33% 的良好技术指标,为开发复杂难选铁矿预富集—悬浮焙烧—磁选(PSRM)工业化技术奠定了良好基础。

2 关键共性技术内容

PSRM 技术涉及矿物加工、冶金、多相流体力学和数值仿真等多学科理论知识,悬浮焙烧过程则属复杂的多元多相多场反应体系,是化学反应、矿物转化、多相流动及传热传质等复杂物理化学过程的强烈耦合。PSRM 工艺首先要解决的关键问题是通过预富集将复杂难选铁矿石制备为粒度适宜、质量均匀的悬浮焙烧给料,以增加矿石颗粒的流动性和悬浮焙烧炉运行的稳定性,同时提高入炉品位;复杂难选铁矿石悬浮焙烧过程中不仅包括菱铁矿、赤褐铁矿的分解、氧化以及赤铁矿的还原相变,还存在磁铁矿向 γ -Fe₂O₃ 的转化及其他各组分之间的反应,准确控制悬浮焙烧过程中矿物相变是 PSRM 工艺的核心问题;非均质矿石颗粒在焙烧炉内的运动状态控制是实现矿石颗粒呈流态化快速磁化的基本前提,也是实现悬浮焙烧炉连续高效顺行的关键所在,所以悬浮焙烧炉内气固两相流态化特性模拟表征及控制是 PSRM 工艺需要解决的又一科学难题。

针对 PSRM 新工艺存在的重大理论与关键技术问题进行深入系统的研究,对突破复杂难选铁矿石悬浮焙烧工业化技术开发和装备结构优化具有重要的理论和实际意义。

2.1 预富集脱泥提铁优化给料及焙烧物料工艺矿物学特性

复杂难选铁矿石矿物组成复杂、品位较低,且实现矿石颗粒快速流态化要求矿石颗粒较细,故需对复杂难选铁矿石开展窄级别磨矿—强磁预富集研究,一方面可脱除矿泥和部分

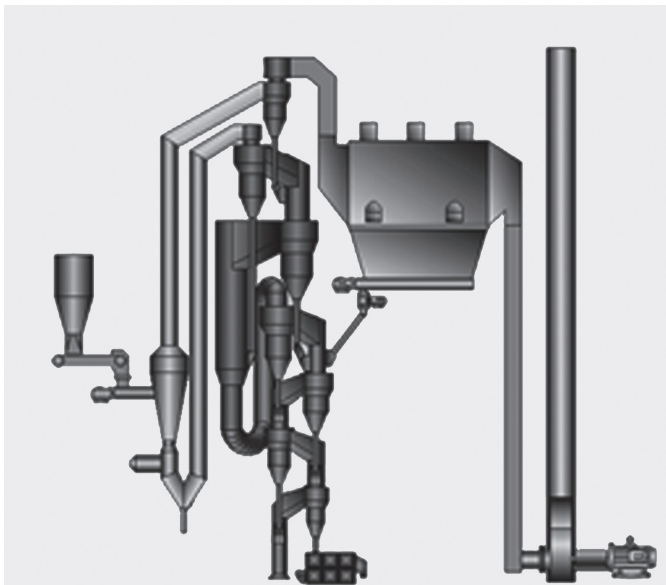


图 1 复杂难选铁矿石新型悬浮焙烧炉示意图

上接 B04 版

脉石,获得粒度适宜、质量均匀的物料,改善了物料炉内流动特性,提高了炉内的旋风分离效果;同时还提高了给料的铁品位,大幅降低了后续焙烧—磁选的处理量。复杂难选铁矿石悬浮焙烧过程中,包含铁矿石的还原相变及其他组分的还原、分解等反应,故还需要对悬浮焙烧不同阶段各种矿物微观及宏观结构的演变机制进行系统的研究。具体研究包括复杂难选铁矿石的工艺矿物学研究,矿石粒度、组成对休止角、崩溃角、分散度等流化参数影响规律研究,悬浮焙烧不同阶段物料的物相组成、磁性、微观结构等特性研究。通过以上研究以期获得性质均一的高品位给料,并查明铁矿石悬浮焙烧不同阶段物料的化学组成、矿物组成、磁性、微观结构等工艺矿物学性质的差异及其变化规律,为复杂难选铁矿石悬浮焙烧奠定矿物学基础。

2.2 复杂难选铁矿石悬浮焙烧过程中热力学及动力学研究

常规磁化焙烧技术处理含赤铁矿、菱铁矿及褐铁矿等复杂难选铁矿石时,存在以下三方面的问题:1)由于铁矿物性质不一致,相同还原条件下不同矿物的反应不同步,弱磁性铁矿物不能完全反应生成强磁性的 Fe_3O_4 ,或者出现过还原生成无磁性的 FeO ,甚至生成极难还原的硅酸铁(Fe_2SiO_4 、 FeAl_2O_4),进而影响分选指标;2)物料加热和还原是在同一炉腔内进行,还原气用量大且还原气氛难以保证,工业化装备实施困难;3)焙烧物料冷却过程未对潜热进行高效回收利用。针对以上问题,东北大学韩跃新等提出了复杂难选铁矿石“预氧化—蓄热还原—再氧化”悬浮焙烧新技术,即首先将矿石在快速悬浮流动态和氧化气氛下加热,使矿石中铁矿物(Fe_2O_3 、 FeCO_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)全部氧化为赤铁矿(Fe_2O_3),然后依靠气力输送方式使矿石快速通过体积较小的还原炉腔,悬浮态下利用矿石自身储蓄热量在还原气氛下使 Fe_2O_3 还原为 Fe_3O_4 ,最后进入冷却腔,通过控制温度和气氛使 Fe_3O_4 全部或部分氧化为强磁性 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$,该过程释放大量的潜热,回收后可实现热量的高效循环利用。由此可见,复杂难选铁矿石悬浮焙烧过程涉及矿物转化、多相流动及传热传质等复杂物理化学反应,针对该多元多相多场复杂反应体系,通过系统的热力学计算以及试验研究,建立多场作用条件下多元多相反应热力学、动力学数学模型,阐明复杂多相反应机制,得出有价值元

矿物物相转化规律及其优化机制,为高效低耗悬浮焙烧奠定理论和技术基础。具体研究包括复杂难选铁矿石分解、氧化及还原热力学计算,悬浮态下菱铁矿、褐铁矿氧化反应动力学研究,悬浮态下赤铁矿蓄热式还原动力学研究,悬浮态下 Fe_3O_4 氧化为 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 动力学研究,操作因素(温度、气氛、物料粒度、气体流量等)对铁矿物物相演变规律及调控机制研究。开展研究在外场、温度、气氛等因素作用下黏连相生成和调控机制,防止焙烧炉内发生黏结堵塞。同时开展实验室连续型悬浮焙烧炉的温度场分布规律及传热传质优化研究。最终建立主要铁矿物多元多相反应热力学基础,揭示复杂难选铁矿石预氧化—蓄热还原—再氧化悬浮焙烧热力学机制,探明不同铁矿物物相转化规律,建立悬浮焙烧过程动力学模型并确定限制性环节,获得焙烧物料磁性和组分调控机制,为复杂难选铁矿石悬浮焙烧奠定理论和技术基础。

2.3 复杂难选铁矿石悬浮焙烧气固两相流化特性及数值模拟

非均质矿石颗粒在焙烧炉内呈快速悬浮运动状态是实现悬浮焙烧的基本前提,本研究拟将还原气体和保护气体看作背景流体,将矿石看作离散分布的颗粒研究焙烧炉内矿石颗粒的运动特性。具体研究包括悬浮焙烧炉内矿石颗粒运动轨迹控制方程及主炉管三维物理模型的建立,悬浮焙烧炉内矿石颗粒浓度及速度径向分布的模拟计算,操作因素(物料粒度、粒度分布、给料浓度等)对悬浮炉内颗粒运动特性影响预测,悬浮焙烧炉内矿石颗粒运动特性冷态模拟试验。建立非均质矿石颗粒在焙烧炉内运动特性数学模型,对不同操作因素下的矿石颗粒运动状态进行数值模拟,为实现矿石颗粒悬浮态高效焙烧及悬浮炉结构优化提供理论支撑。

2.4 连续型悬浮焙烧装备结构优化及全流程优化研究

根据复杂难选铁矿石工艺矿物学、悬浮焙烧反应机理及矿石流动性数值模拟研究结果,对焙烧装备结构及悬浮焙烧—磁选全流程进行优化。研究内容包括实验室连续型悬浮焙烧炉的结构参数优化研究,悬浮焙烧工艺条件(还原温度、还原时间、气体流量、冷却方式等)的试验研究,悬浮焙烧熟料的粉磨和分选条件的优化设计。最终成功研发出新型连续型悬浮焙烧系统装备,建立悬浮焙烧—磁选流程参数优化调控机制,最终在还原温度 $500\sim 600^\circ\text{C}$ 之间,获得铁精矿TFe品位 $>65\%$,铁回收率 $>80\%$ 的技术指标,为工业化

装备的结构设计及优化提供理论指导。

3 研究技术路线与实施方案

PSRM新技术是矿物加工、冶金、多相流体力学等多学科有机结合,首先利用现代测试手段和分析技术,系统深入地研究复杂难选铁矿石悬浮焙烧过程及调控机制,开展铁矿物悬浮焙烧过程热力学计算、悬浮态反应动力学分析、矿石颗粒流态化控制及数值模拟等研究,配合大量的物相、显微结构、形貌分析,建立针对不同关键技术问题的反应机理模型,形成复杂难选铁矿石悬浮焙烧理论体系。在此基础上完成实验室及中试连续型悬浮焙烧炉设计制造,通过实验室及中试试验检测悬浮焙烧装备对不同类型复杂难选铁矿石的适应性,并据此进行悬浮焙烧炉结构优化,为工业化装备的开发奠定基础。具体实施方案如下。

3.1 复杂难选铁矿石预富集及焙烧物料工艺矿物学特性 通过系统的工艺矿物学研究,确定复杂难选铁矿石的化学组成、矿物组成、嵌布粒度等工艺矿物学特性,采用搅拌磨磨矿制备窄级别物料,再经强磁预选技术脱除原矿中矿泥,优化悬浮焙烧给料粒度组成,增强给料的流动特性,提高给料铁品位。通过化学分析、光学显微镜、EPMA、FSEM-EDS、MLA、穆斯堡尔谱、振动磁强计等分析手段研究悬浮焙烧各阶段物料的化学组成、矿物组成、微观形貌、磁性特征等工艺矿物学特性;采用粉体综合特性测试仪测定不同粒度及组成给料的流化特性;采用FactSage6.3热力学计算软件进行各种矿物反应特性的热力学计算和分析,结合不同焙烧条件物料的工艺矿物学分析结果,探究悬浮焙烧过程中矿物的反应特性、焙烧产物物相及微观结构演变规律。

3.2 复杂难选铁矿石悬浮焙烧过程控制及调控机制研究 采用动态法和静态法研究悬浮焙烧过程还原的动力学。动态法即非等温法:采用DTA-TG测试技术,结合化学分析和物相分析,研究不同铁矿物在预氧化、蓄热还原及再氧化过程中的反应历程及各个阶段的动力学参数(活化能E、反应级数n、指前因子A等),确定各个反应阶段的动力学方程;静态法即等温法:在不同恒定的温度下,采用TG测试

技术,研究不同温度下铁氧化物转化率随时间的变化规律,获得相关的动力学方程和动力学参数,确定反应的限制环节,为强化反应提供理论依据。

将气体看作背景流体,将矿石看作离散分布的颗粒,借助Fluent软件的离散相模型(discrete phase model-DPM)对悬浮炉内矿石颗粒的运动特性进行模拟,先构建悬浮炉核心炉管结构的物理模型,确定悬浮焙烧炉内矿石颗粒的流体动力学模型,开展操作因素对悬浮炉内颗粒轴向和径向的运动特性模拟。以透明树脂材料为原料制作悬浮炉核心炉管结构的仿真物理模型,利用高速摄像机观察不同操作因素下矿石颗粒的实际运动状态,进行冷态模拟验证试验。

3.3 工业化连续型悬浮焙烧炉研制及工业化示范基地的建设

基于悬浮焙烧理论及数值模拟研究结果,对实验室连续型悬浮炉结构进行优化设计,保障矿石颗粒在炉内悬浮态高效焙烧,分别设计制造实验室和 150kg/h 半工业装备,并完成实验室和中试悬浮焙烧试验,分别考察给料粒度、还原温度、还原时间、还原剂用量等试验研究,确定适宜的工艺参数;针对磁化焙烧熟料的性质,开展磨选试验,确定磁选流程及参数,分选出合格的铁精矿,建成悬浮焙烧—磁选流程参数优化调控机制。在中试试验及装备的基础上,设计开发单台年处理能力200万吨的工业化悬浮焙烧炉,开展PSRM项目的工业化可行性研究。

4 研究计划

在已有的复杂难选铁矿石PSRM研究工作的基础上,利用4年的时间,完成相关全部研究内容,实现PSRM技术的工业化应用。具体计划如下:

◆2014年:完成复杂难选铁矿石预富集方面的流程设计及参数优化;完成悬浮焙烧还原热力学、动力学及过程热力学计算、悬浮态反应动力学分析、矿石颗粒流态化控制及数值模拟等相关理论研究工作,为悬浮焙烧炉的设计及参数优化奠定技术基础。

◆2015年:完成实验室和半工业连续型悬浮焙烧炉结构与参数的优化,开展相关的悬浮焙烧小试、中试试验,检验PSRM工艺对多种复杂难选矿石的分选效果;完成单台年处理能力200万吨的工业化悬浮

焙烧炉的结构与参数的优化,开展PSRM工业化项目的可行性研究。

◆2016年:形成悬浮焙烧共性关键技术和大型成套工艺装备,建成年处理复杂难选铁矿石600万吨的PSRM工艺工业化示范工程。

◆2017年:PSRM工业化生产技术在国内的推广应用,预期在国内推广2~3家,进一步检验应用效果。

5 预期效果

PSRM工艺属于国际首创的复杂难选铁矿石高效利用新技术,该技术具有生产能力大(单台200万吨/年)、环保无污染(排放废气粉尘浓度 $\leq 40\text{mg/Nm}^3$)、生产成本低及自动化程度高的特点。

目前,东北大学和鞍钢矿业集团合作已经完成东鞍山含碳酸盐铁矿石正浮选尾矿、眼前山磁滑轮尾矿强磁预选粗精矿、鞍钢矿业集团东部综合尾矿预富集精矿的悬浮焙烧—磁选连续扩大试验,获得了良好的经济技术指标。

1)东鞍山正浮选尾矿经悬浮焙烧—磁选扩大试验,可获得TFe品位65.10%、回收率82.77%的铁精矿;精矿品位和回收率较现有工艺分别提高7.7和37.98个百分点。

2)眼前山磁滑轮尾矿经强磁预选—悬浮焙烧—磁选扩大试验,可获得TFe品位63.01%、回收率61.68%的铁精矿。

3)东部尾矿“预富集—悬浮焙烧—磁选”试验结果表明,该技术实现了尾矿中铁的有效回收,获得了TFe品位65.69%、作业回收率89.85%,总回收率55.33%的良好指标。基于该项目的研究成果,鞍钢矿业集团东部尾矿2800万吨/年的PSRM工业化示范工程已完成初步设计,工程总投资约20亿元人民币,预计2016年正式投产,该项目的顺利投产,将为PSRM工艺的推广应用奠定坚实的基础。

复杂难选铁矿石PSRM技术的成功推广,一方面可实现我国贫杂难选赤铁矿、菱铁矿、褐铁矿石以及尾矿资源的高效利用,初步估计可盘活铁矿资源100亿吨以上;另一方面可大幅提高我国难选铁矿石的回收率,较现有工艺提高15个百分点以上。该技术属我国复杂难选铁矿石高效利用方面的重大突破,推广应用前景广阔。



東北大學
Northeastern University



RAL