应用

优质球团矿产品多元化低成本清洁生产技术开发与应用

易陆杰[1]，蒋林海[1]，李 建[2]，牛长胜[1]，陈精华[3]，朱德庆[4]，潘 建[4]，杨聪聪[4]，田宏宇[4a]

（1. 宝钢湛江钢铁有限公司，广东 湛江 524000；2. 宝钢股份中央研究院，上海 200000；
3. 武钢资源集团鄂州球团有限公司，湖北 鄂州 436000；4. 中南大学 a. 资源加工与生物工程学院；
b. 低碳与氢冶金研究中心，湖南 长沙 410086）

摘要：针对球团矿生产企业普遍面临的高品质球团精粉资源供应短缺、原料品种和性质波动大而导致生产控制难度大、产品质量不稳定现状，鉴于传统链算机—回转窑工艺存在原料适应性较差、产品相对单一、回转窑易结圈等瓶颈，本文从球团原料资源供应低成本宽口径、球团产品多元化、生产过程稳定和清洁化等多方面开展理论与技术创新，以期解决困扰球团行业的卡脖子难题，促进大型链算机—回转窑球团生产线的平稳运行，提升我国球团“精料”制备技术水平及促进钢铁工业低碳高质量发展。

关键词：球团矿；链算机—回转窑；清洁生产；磨矿；脱硫脱硝；工业应用

中图分类号：TF046.6；X701 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0095－09

doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.013

Technology development and application of diversified low cost clean production of high quality pellet products

YI Lujie[1], JIANG Linhai[1], LI Jian[2], NIU Changsheng[1], CHEN Jinghua[3], ZHU Deqing[4], PAN Jian[4], YANG Congcong[4], TIAN Hongyu[4a]

(1. *Baosteel Zhanjiang Iron & Steel Co., Ltd., Zhanjiang* 524000, *Guangdong*, *China*; 2. *Academia Sinica*, *Baosteel*, *Shanghai* 200000, *China*; 3. *Ezhou Pelletizing Co., Ltd., Wuhan Iron and Steel Group*, *Ezhou* 436000, *Hubei*, *China*; 4. *a. School of Minerals Processing & Bioengineering*; *b. Research Center of Low Carbon and Hydrogen Metallurgy*, *Central South University*, *Changsha* 410086, *Hunan*, *China*)

Abstract: In view of the fact that pellet producers are generally facing shortage of high quality pelletizing concentrate resources supply, fluctuating varieties and properties of raw materials, resulting in difficult production control and unstable product quality, while the traditional chain grate-rotary kiln process has bottlenecks such as poor raw material adaptability, relatively single product, and rotary kiln prone to knotting. Therefore, theoretical and technological innovation is carried out from many aspects such as low cost wide caliber, diversified pelletizing products, stable and clean production process of pelletizing raw material resource supply, in order to solve the key problems that bother the pelletizing industry, promote the smooth operation of the large chain grate-rotary kiln pelletizing production line, improve the technical level of “concentrate” preparation technology for pellets in China and promote the low-carbon and high-quality development of the iron and steel industry.

Key words: pellet; chain grate-rotary kiln; clean production; grinding; desulfurization and denitrification; industrial applications

收稿日期：2021－12－14；**修回日期**：2021－12－30

基金项目：自然科学基金资助项目(52004339)

作者简介：易陆杰(1978—)，男，工程师，从事球团生产技术管理。

通讯作者：朱德庆(1964—)，男，教授，从事铁矿造块、低碳与氢冶金理论和新技术，低品位矿及大宗固废综合利用等方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

我国钢铁工业以高炉－转炉长流程为主，铁前工序的污染物产生量约占全流程的60%左右[1]，因此，其节能减排是钢铁工业实现绿色低碳发展的重点[2]。相比烧结工序，球团污染负荷比仅为其20%，具有更清洁、低碳排放的优势[3-4]。此外，球团矿具有粒度均匀、强度高、铁品位高和冶金性能优良的特点，作为高炉生产的优质炉料，有利于提高铁水产量和降低焦比，而我国的球团矿不足20%，一直处于较低水平不足20%[5-7]。因此，在钢铁行业实现“双碳”目标的大背景下，大力发展球团矿生产、提高球团矿入炉比例是我国现阶段钢铁行业绿色低碳发展的重要措施和发展方向之一。

球团生产主要有链算机—回转窑，带式焙烧机和竖炉3种工艺，目前国内主要以链算机—回转窑工艺为主，其产量占比约为总产量的70%[8]。过去，我国的球团矿品种长期以酸性球团为主，缺乏链算机—回转窑工艺生产碱性球团矿的技术储备和成熟经验[9]。但是，高品质碱性球团的稳定生产是提高球团矿入炉比例的重要前提[10]。湛江球团原设计生产碱性球团，是全球唯一以赤铁矿为主要原料的大型链算机—回转窑生产线。为减少回转窑结圈、避免环冷机板结及降低球团还原膨胀指数，球团生产对原料条件要求非常苛刻，必须使用低硅、低碱金属的优质铁精粉，但市场上这些优质精粉的资源非常匮乏，大大增加了采购难度和成本。同时，作为国内第一家长期生产碱性球团的生产线，由于没有成熟经验可借鉴，且无稳定原料来源，导致投产初期存在吃百家矿、设备运行不稳定、球团矿质量欠佳等问题。如何保障球团原料供应、优化球团矿品质，已直接关系到大型链算机—回转窑球团生产线的生存及未来的可持续发展。

对此，本文基于宝钢湛江5×10^6 t/a的大型链算机—回转窑球团生产线从建厂至今在相关领域产学研的紧密合作以及多年积累的球团生产经验，开展从球团原料资源供应低成本宽口径、球团产品多元化、生产过程稳定和清洁化等多方面的技术创新，对解决上述存在的卡脖子难题，提升我国球团行业技术水平，改善钢铁冶炼环境具有重要的现实意义。

1 资源宽口径配矿及矿石表面改性技术

1.1 粗粒粉矿搭配细粒镜铁精粉的资源宽口径配矿技术

为满足高炉对高品质球团矿化学成分的要求，宝钢湛江球团生产初期采购原料要求精矿铁品位大于65.5%，SiO_2质量分数低于3.5%，优质球团资源供应问题已成为其可持续发展的瓶颈。而烧结卡粉年产量在1亿吨以上，其化学成分完全满足球团原料品位要求，并且与同品位的磁铁精矿相比，具有价低优势，最大价差可达到70元/t幅度，但国内未有使用粗粒粉矿做球团原料的先例；镜铁精粉则由于表面亲水性差，难成球、难焙烧，属于难利用的铁精粉，市场给予较大的折扣优惠(见表1)。因此，湛江球团通过以烧结卡粉为突破口，在国内率先将烧结卡粉磨矿及表面改性后，得到具有良好成球性的细磨卡粉，搭配成球性差的细粒镜铁精粉用于球团生产，得到的预热球团和焙烧

表1 铁矿石主要化学成分、粒度组成和采购价

Table 1 Main chemical composition, size distribution and purchase price of iron ores

铁矿石种类	质量分数/%									*采购价差/(元·t^{-1})
	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	P	S	-0.074 mm粒级占比	
烧结卡粉	65.71	1.56	1.91	1.02	0.077	0.220	0.059	0.044	18.58	-70
镜铁精粉	67.11	0.28	3.51	0.47	0.011	0.062	0.013	0.013	97.90	-30
磁铁精粉1	68.43	29.00	1.70	0.46	0.760	0.380	0.011	0.200	97.50	+40
磁铁精粉2	68.84	29.42	1.67	0.62	0.710	0.520	0.019	0.039	99.60	+44

注：*表示与65%铁品位的磁铁精矿价格对比。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

球团强度分别可达到 530 N/P 和 2 881 N/P(见表 2 和表 3)，一举解决了其资源瓶颈及“卡脖子”难题。低价赤铁矿配比大幅增高后，每吨球团原料成本降低近 100 元，资源适应性达到世界先进水平。

表 2　铁矿石静态成球性

Table 2　Statical balling properties of iron ores

铁矿石种类	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	最大分子水/%	最大毛细水/%	毛细水迁移速度/($mm \cdot min^{-1}$)	静态成球性指数
烧结卡粉(细磨后)	1 105	5.37	13.31	4.65	0.68
镜铁精粉	930	1.56	12.98	11.59	0.14
磁铁精粉 1	1 674	2.81	13.19	7.79	0.27
磁铁精粉 2	1 599	3.04	13.97	7.17	0.28

表 3　高配比粗粒粉矿搭配细粒镜铁精粉工业生产指标

Table 3　Industrial production index of combination between high ratio of coarse powder ore and fine specular hematite concentrate

球磨矿浆				一段溢流矿浆			
-0.075 mm	-0.045 mm	浓度/%	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	-0.074 mm	-0.045 mm	浓度/%	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
59.98 ~ 64.19	41.87 ~ 44.22	65 ~ 70	1 002 ~ 1 110	88.49 ~ 89.51	76.27 ~ 77.85	25.89 ~ 26.71	1 501 ~ 1 535

一段沉砂矿浆			过滤前矿浆	滤饼	混合矿辊磨前	混合矿辊磨后
-0.075 mm	-0.045 mm	浓度/%	浓度/%	水分/%	比表面/($cm^2 \cdot g^{-1}$)	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
15.38 ~ 16.41	10.15 ~ 11.00	41.19 ~ 42.31	62 ~ 66	9.4 ~ 9.7	1 520 ~ 1 550	1 740 ~ 1 805

生球				预热球	成品球
水分/%	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/($N \cdot P^{-1}$)	爆裂温度/℃	抗压强度/($N \cdot P^{-1}$)	抗压强度/($N \cdot P^{-1}$)
8.7	8.70	14.55	490	530	2 881

1.2　基于矿物硬度匹配的组合磨矿技术

入磨矿石自身的特性，如硬度、脆性、解理、韧性、结构缺陷及含泥量等会对磨矿过程产生显著影响。由于卡粉通常作为烧结粉矿使用，其平均粒度粗、分布宽，与细粒精矿的性质截然不同，采用原有球磨机系统及参数处理卡粉，必然影响磨机效率和能耗。因此，在球磨前需要了解矿粉的可磨性，并寻求与球磨机系统处理能力相匹配的磨矿方案。而基于矿石硬度来估算矿石可磨性的方法，可以简化矿石可磨性测定的繁琐过程，节省时间和成本，给球团原料采购和生产带来极大便利。本技术借鉴煤的显微硬度测定方法，系统测定了不同类型铁矿粉的硬度，并测定了相应矿粉的邦德磨矿功指数。在此基础上，建立了矿石硬度与可磨度的匹配关系(图 1)。

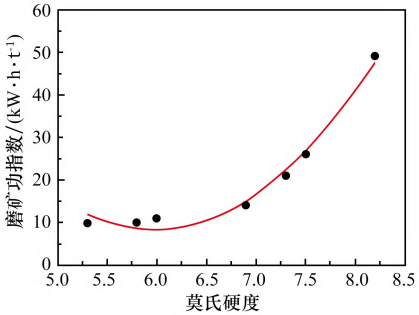


图 1　矿石硬度与可磨度的关系

Fig. 1　Effect of Mohś hardness of minerals on the grindability

鉴于资源量大，供应稳定的烧结卡粉硬度较低，莫氏硬度仅为 5.8 ~ 6.0，具有易破碎易

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

磨的特点；而细粒镜铁精粉则硬度大，莫氏硬度达 7.5 左右，具有难磨的不足。本文开发了软质矿与硬质矿湿磨联合高压辊磨的组合磨矿技术(见图 2)，其充分利用了选择性磨碎规律，将粗颗粒的烧结卡粉(-0.074 mm 为 18.58%)和细粒镜铁精粉(-0.074 mm 为 97.90%)混合球磨，在磨矿产品中形成的易磨碎矿物细粒级偏多及难磨矿物粗粒级偏多的现象，新生的细粒级卡粉颗粒吸附在难磨的镜铁精粉颗粒表面，使其表面能降低。同时，还会吸附在镜铁精粉颗粒的裂纹内壁上并楔入到裂纹的表面，达到改善镜铁精粉磨矿效率的目的，并进一步改善了混合料的亲水性和造球效果(图 3 与表 4)。此外，测算出混合矿莫氏硬度的加权平均和不大于 7.2，混合矿磨矿功指数不大于 20 kW·h/t 时具有较好的磨矿性价比，建立了粗粒烧结卡粉细磨粒度 -0.074 mm(65%~75%)的磨矿标准。

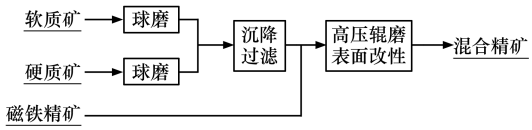
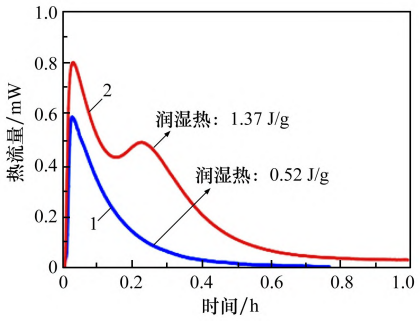


图 2 基于矿物硬度匹配的组合磨矿技术

Fig. 2 Technique of combined grinding based on the matched hardness of minerals

1.3 基于矿石特性配合的载体沉降及强化过滤技术

单一卡粉细磨后难沉降、过滤性能较差，只使用细磨卡粉，通过现有的过滤设备很难得到水分小于 9.5% 的滤饼，单独大比例使用难(大于20%)，因而影响生产效率和生产顺行。



1—高压辊磨前；2—高压辊磨后。

图 3 组合磨矿对混合料亲水性的影响

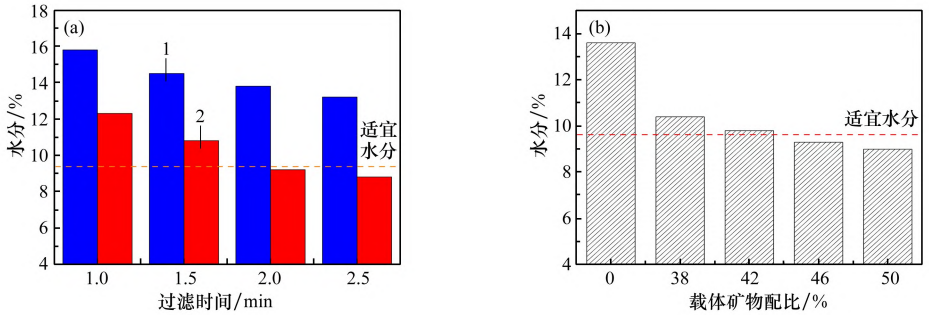
Fig. 3 Effect of combined grinding on the hydrophile of mixture

表 4 组合磨矿对混合料造球效果的影响

Table 4 Effect of combined grinding on the balling performance

生球试样	落下强度/[次·(0.5 m)$^{-1}$]	抗压强度/(N·P^{-1})	爆裂温度/℃
单矿	1.55	9.4	560
配矿	3.25	12.9	545
配矿 + 高压辊磨	4.45	18.8	520

而单一镜铁精粉则易沉降和过滤，在过滤时间 2 min 内即可达到滤饼水分低于 9.5% 的指标要求。因此，基于矿物表面性质差异，开发了以颗粒规则、晶格缺陷少、表面亲水性差的镜铁精粉做载体颗粒的载体沉降及强化过滤技术(图 4)。该技术使强亲水性的细磨卡粉沉降速度提高 24.4%，过滤脱水效率提高 10.6%，解决了微细颗粒对水体污染问题和造球原料水分难以保证的难题，提高了资源利用率(图 5)。



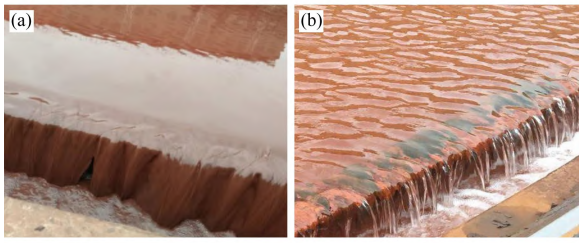
(a) 过滤时间；(b) 载体矿物

1—细磨烧结粉；2—球团精矿。

图 4 过滤时间和载体矿物配比对滤饼水分的影响

Fig. 4 Effect of filtration time and proportion of carrier minerals on the moisture of filter cake

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）浓缩池铁矿微细颗粒水体污染俗称“跑红”；
（b）浓缩池铁矿沉降正常

图 5　载体沉降强化技术对沉降池沉降效果的影响

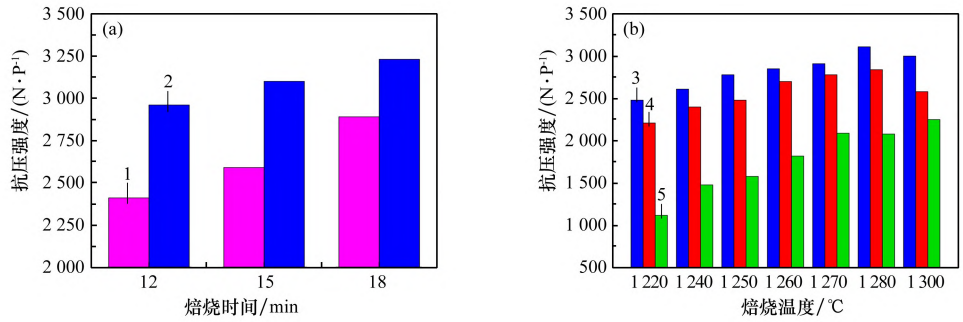
Fig. 5　Effect of improved sedimentation techniques by carrier on the performance of sedimentation in the settling basin

资源宽口径配矿及矿石表面改性技术于 2016 年 1 月开始在宝钢湛江球团全面应用，打破了粗粒烧结粉用于球团的“技术壁垒”，并使镜铁精矿的磨矿功耗下降了近 30%，软质粗粒烧结卡粉年配比提高至 40% 以上。低价的非主流镜铁矿球团精粉和粗粒烧结卡粉总配比达到 80%~85%，每吨球团原料成本降低幅度最高达近 100 元，近 3 年因原料成本降低带来的直接经济效益超 7 亿元，资源适应性达到世界先进水平。相关技术从 2016 年 12 月开始推广应用到武钢资源鄂州球团厂和安阳豫河永通球团有限责任公司，取得了良好的经济社会效益。

2　链算机—回转窑工艺球团品种多元化制备关键技术

本文针对镁质球团存在难焙烧和强度差的问题，通过技术研究系统揭示了含镁熔剂性球团的固结机制，阐明了碱度与MgO对球团焙烧性能的耦合效应，开发了大型链算机—回转窑工艺含镁熔剂性球团制备的机械与化学活化关键技术，解决了高镁球团强度低的问题。研究发现，随着 MgO 质量分数的增加，预热球团和焙烧球团抗压强度都随之降低。而随着球团碱度的提高，球团内赤铁矿再结晶更加充分，晶粒增大，新生成铁酸钙黏结相增多，因而将镁质浮士体包裹起来，弥补了由于含镁浮士体存在导致的晶体结构缺陷，镁质球团的抗压强度得以改善。并且发现不同碱度条件下，轻烧菱镁矿作为镁源熔剂具有最佳效果(图 6)。与此同时，发现碱度与 MgO 对球团冶金性能亦存在耦合效应，提高碱度，成品球团矿还原膨胀呈现极值变化规律，存在适宜的碱度范围 $R_2<0.3$ 或 $R_2>0.8$；提高氧化镁质量分数，有利于抑制球团矿还原膨胀；同时提高碱度和 MgO，成品球团还原性升高，还原膨胀性能改善(图 7)。

此外，由于镁质熔剂性球团的适宜焙烧温度不高，焙烧区间较窄(一般在 1 250 ~ 1 275 ℃)，链算机预热段的热量供应不够，因而高比例赤铁矿镁质熔剂性球团预热球强度偏低，易在回转窑中产生大量粉末而导致回转窑结圈物形成频繁。为弥补链算机预热段热量不够提高链算机下层球温，开发了内配煤赤铁矿镁质熔剂性球团生产技术。该技术在内配煤 0.5% 的条件下，可使预热球强度提高 20% 以上，而其氧化率仍能保持 80% 以上，从而解决了高比例赤铁矿镁质熔剂性球团预热球强度偏低、焙烧温度操作偏高的难题(图 8)。

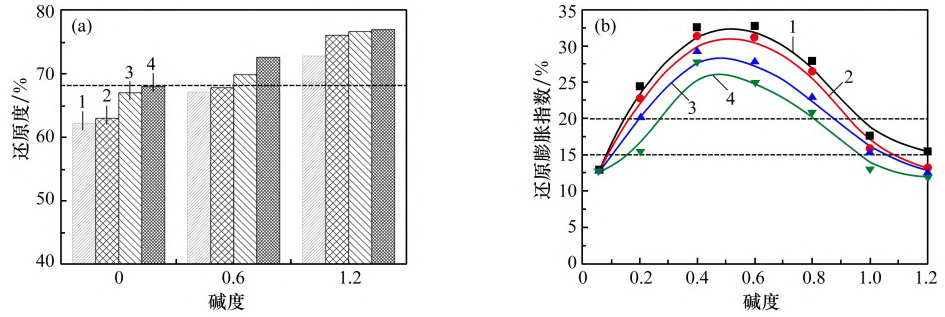


（a）焙烧时间；（b）焙烧温度
1—菱镁矿；2—轻烧镁粉；3—石灰石；4—消石灰；5—生石灰。

图 6　镁基和钙基熔剂对球团抗压强度的影响

Fig. 6　Effect of magnesium-based and calcium-based fluxes on the compressive strength of pellets

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

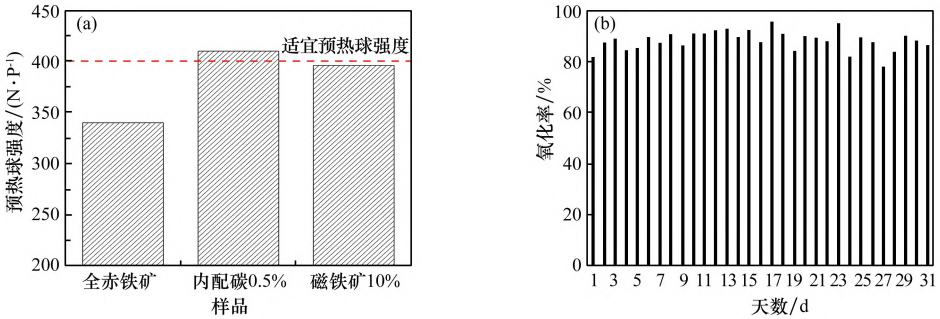


（a）还原度；（b）还原膨胀指数

w(MgO)/%：1—0.08(自然)；2—1.0；3—2.0；4—3.0。

图 7 碱度和 MgO 质量分数对球团还原度和还原膨胀性能的影响

Fig. 7 Effect of binary basicity and MgO content on the reduction degree and swelling of pellets



（a）预热球强度；（b）氧化率

图 8 内配煤对赤铁矿镁质熔剂性球团预热球团强度及氧化率的影响

Fig. 8 Effect of carbon-burdened on compressive strength and oxidation degree of hematite magnesium flux pellets

目前宝钢湛江球团具备熔剂性球团生产线不停机在线切换生产酸性球团、镁质球团的能力(表 5)。生产酸性球团、镁质球团均不影响产量，所生产的多品种球团均在超大型高炉上进行过使用验证。近 2 年多元化球团产品出口到日本制铁、韩国浦项等国外钢企，出口创汇超 10 亿元。

表 5 宝钢湛江出口镁质球团与熔剂性球团指标对比

Table 5 Index comparison between exported magnesia pellets and flux pellets from Baosteel Zhanjiang iron and steel plant

品种	碱度 R	w(TFe)/%	w(MgO)/%	产量/(t·d^{-1})	成品率/%	抗压强度/(N·P^{-1})	转鼓强度/%	还原膨胀率/%
镁质球团	0.32	65.15	1.20	14 488	94.5	3 000	96.8	19.9
熔剂型球团	0.87	64.79	0.29	14 033	91.7	3 145	96.8	19.4

3 回转窑结圈预防关键技术

高赤铁矿配比的熔剂性球团存在生产时预热、焙烧温度高、操作窗口窄、工艺控制难度大，回转窑易结圈板结、窑内结圈物厚度及分布不能直接测定等技术难题。宝钢湛江球团和武钢矿业公司鄂州球团厂自投产以来，回转窑结圈现象频繁，严重影响了球团生产线的顺行生产。通过回转窑外壁温度红外连续的三维测定，构建窑内结圈物厚度与分布数学模型，开发了专门的回转窑结圈防控系统，可以有效的预测窑内结圈物厚度与分布，从而实现了结圈物生长厚度预测与可视化(图 9)[11]。相关成果在宝钢湛江和武钢资源鄂州球团两条 5×10^6 t/a 链箅机—回转窑生产线成功得到应用，效果显著，每百万吨成品球团因结圈板结造成停机时

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

间由 3 182 min 降低为 146 min，处理效率也大幅提升，单次处理时间由 389 min 缩短为 81 min，生产效率明显提高。

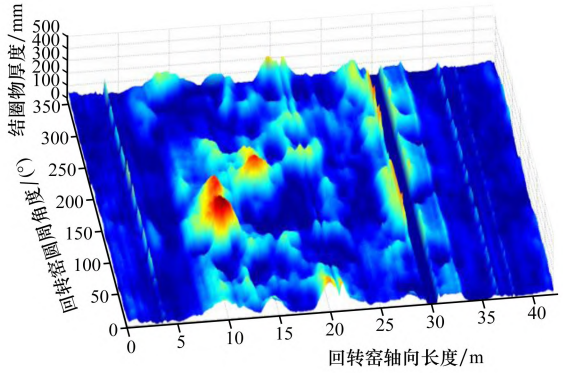


图 9　回转窑结圈厚度 3D 图

Fig. 9　3D image of rings thickness in the rotary kiln

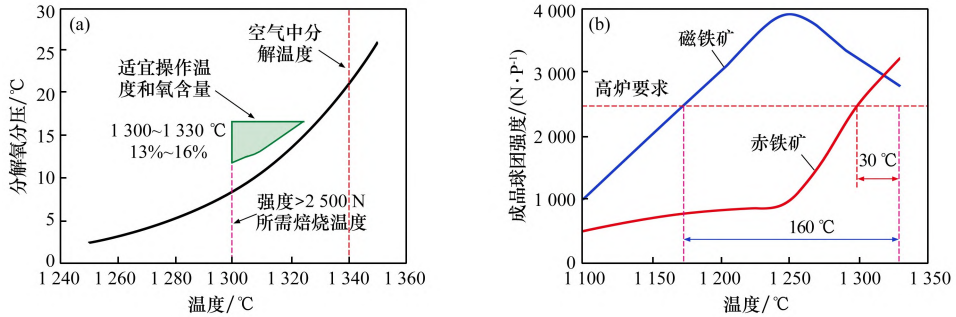
4　球团生产全烟气梯级循环控制系统与烟气分段选择性脱硫脱硝技术

基于链算机预热段烟气高硫氧化物和高氮氧化物的特点和窑内热量和含氧量双重控制难度较大的特点，本文开发了以环冷机冷却风机及回热风机动态调整为核心的球团生产全烟气梯级循环控制系统。

此外，在预热制度方面：磁铁矿球团预热温度低，大于 750 ℃即可，操作区间宽，达到 200 ℃；赤铁矿预热温度高，必须大于 970 ℃，操作区间窄，仅 80 ℃。焙烧制度方面，磁铁矿在1 175 ~ 1 250 ℃就能保证强度大于2 500 N，含氧量不用专门控制，基本能保证氧化彻底，再结晶良好；赤铁矿焙烧温度必须大于 1 300 ℃，温度范围为1 300 ~ 1 330 ℃，含氧量为 13% ~ 16%（图 10）。超出该范围，将导致强度不足或分解成磁铁矿，而在环冷机上再氧化放热，导致球团板结。最严重时，4 天结圈或板结一次，均需停机处理，均无法正常生产。

通过建立风热平衡实时监控系统，实现了生球干燥、干球预热、成品球团焙烧全过程可视化、数字化；开发链算机内负压梯度控制、烟罩和废气温度双重优化技术，实现了回转窑内热能自动迁移至链算机，提高预热球强度，减少入窑粉末量；以环冷机冷却风机及回热风机动态调整为核心，构建包括过程模拟模型、热平衡模型、智能控制系统的链算机—回转窑球团生产过程模型，开发回转窑内热量与操作制度合理匹配技术，构建了球团生产全烟气梯级循环控制系统，作业率达到 96.7%，远远超过 90.4% 的设计指标，球团强度提高，FeO 质量分数明显降低（图 11）。

根据球团烟气排放特点，SO_x、NO_x 集中于链算机的过渡预热段和预热段排放，而该段烟气只占球团烟气总量的 54%，因此，开发了烟气分段选择性脱硫脱硝技术，选取该段高温烟气采用“半干法脱硫除尘一体化技术 + 低温 SCR 脱硝技术”的工艺路线（图 12），SO_x 和 NO_x 控制排放质量浓度分别低于 35、50 mg/Nm^3，实现了球团的清洁生产。

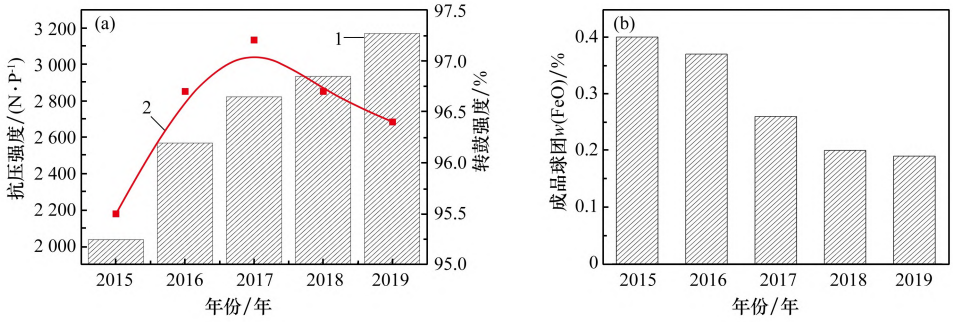


（a）理论 Fe_2O_3 分解氧分压；（b）成品球团强度

图 10　不同类型铁精矿适宜的焙烧制度和气氛

Fig. 10　Suitable roasting system and atmosphere of different iron concentrates

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

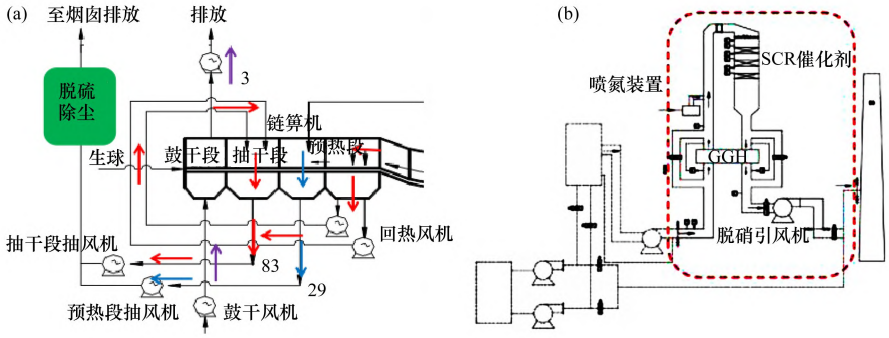


（a）抗压强度；（b）w(FeO)

1—抗压强度；2—转鼓强度。

图 11 球团生产全烟气梯级循环控制系统对球团质量的影响

Fig. 11 Effect of cascade circulation control system of total flue gas on performance of pellets



（a）半干法脱硫除尘技术；（b）低温 SCR 脱硝技术

图 12 半干法脱硫除尘一体化技术＋低温 SCR 脱硝技术的工艺路线

Fig. 12 Process route of integrated technology of semi-dry desulphurization and dust removal combined with SCR denitrification technology under low temperature

5 结 论

（1）粗粒赤铁粉矿选择性磨矿及基于矿物硬度匹配的组合磨矿技术，使镜铁精矿的磨矿功耗下降 30%；基于矿物表面性质差异，开发了以颗粒规则、表面亲水性差的镜铁精粉做载体颗粒的沉降及强化过滤技术，使难沉降、难过滤细磨赤铁粉矿沉降速度提高 24.4%，过滤效率提高 10.6%，解决了微细颗粒对水体污染的问题，提高了资源利用率。

（2）链算机—回转窑多元化球团制备技术，在高赤铁矿配比（80%～90%）下，生产镁质熔剂性球团，突破了国外镁质球团以带式焙烧机为主的工艺限制，以及国内以磁铁矿为主的原料类型限制，具备在线切换生产碱性、镁质、酸性球团能力。

（3）回转窑结圈预测和控制系统，使停机时间降低 95.4%，作业率提高 5%；采用“半干法脱硫除尘一体化技术＋低温 SCR 脱硝技术”的工艺路线，可实现球团烟气超低排放。

参考文献：

[1] 张福明. 中国高炉炼铁技术装备发展成就与展望[J]. 钢铁,2019,54(11):1－8.
ZHANG Fuming. Prospect and development achievements of blast furnace ironmaking technologies and equipments in China[J]. Iron and Steel,2019,54(11):1－8.

[2] 赵利国. 链算机—回转窑球团烟气 NO_x 控制技术与前置 SCR 脱硝工艺分析[J]. 矿业工程,2021,19(6):51－54.
ZHAO Liguo. Control technology of Chain grate-rotary kiln pellet and process analysis of flue gas NO_x preposition SCR denitration[J]. Ming Engineering,2021,19(6):51－54.

[3] 张福明. 首钢绿色低碳炼铁技术的发展与展望[J]. 钢铁,2020,55(8):11－18.
ZHANG Fuming. Development and prospect of green and low carbon ironmaking technologies in Shougang[J]. Iron and

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Steel,2020,55(8):11 – 18.

[4] 王欣,潘建,朱德庆,等. 铬复合氧化球团的制备工艺[J]. 钢铁,2020,55(3):23 – 28.
WANG Xin,PAN Jian,ZHU Deqing,et al. Process of pelletization of nickel laterite and chromite[J]. Iron and Steel,2020,55(3):23 – 28.

[5] 朱德庆,杨聪聪,潘建,等. 福建三钢带式焙烧机球团工艺研究[J]. 烧结球团,2020,45(4):27 – 34.
ZHU Deqing,YANG Congcong,PAN Jian,et aln. Research on pellets process of belt type roasting machine in Fujian Sangang[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(4):27 – 34.

[6] 朱德庆,黄伟群,杨聪聪,等. 铁矿球团技术进展[J]. 烧结球团,2017,42(3):42 – 49.
ZHU Deqing,HUANG Weiqun,YANG Congcong,. Technical progress in iron ore pelletization[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(3):42 – 49.

[7] 赵连达,刘迎立,薛庆国,等. 添加赤铁矿对氧化球团性能的影响[J]. 烧结球团,2020,45(2):36 – 40;66.
ZHAO Lianda,LIU Yingli,XUE Qingguo,et al. Effects of adding hematite on the properties of oxidized pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):36 – 40;66.

[8] 王维兴. 提高高炉炉料中球团矿配比、促进节能减排[J]. 冶金管理,2018(9):53 – 58.
WANG Weixing. Improve the pellet ratio of blast furnace charge to promote energy conservation and emission reduction[J]. Metallurgical Industry Management,2018(9):53 – 58.

[9] 李杰,韩闯闯,杨爱民,等. MgO 含量对镁质熔剂性球团性能的影响[J]. 烧结球团,2017,42(2):31 – 37.
LI Jie,HAN Chuangchang,YANG Aimin,et al. Effect of MgO on the performance of magnesian fluxed pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(2):31 – 37.

[10] 李杰,信自成,杨爱民,等. 碱度对镁质熔剂性球团性能的影响[J]. 钢铁,2017,52(7):35 – 41.
LI Jie,XIN Zicheng,YANG Zicheng,et al. Effect of basicity on quality of magnesium fluxed pellets[J]. Iron and Steel,2017,52(7):35 – 41.

[11] 潘建,田宏宇,朱德庆,等. 回转窑结圈形成机理及应对措施的研究进展[J]. 钢铁,2020,55(7):13 – 22.
PAN Jian,TIAN Hongyu,ZHU Deqing,et al. Research progress of ringing formation mechanisms in rotary-kiln and its response measures[J]. Iron and Steel,2020,55(7):13 – 22.

(上接第 94 页)

[12] 朱德庆,郑国林,潘建,等. 低品位红土镍矿制备镍精矿的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(1):1 – 7.
ZHU Deqing,ZHENG Guolin,PAN Jian,et al. Study of producing nickel concentrate from low-grade laterite ore[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2013,44(1):1 – 7.

[13] 朱德庆,田宏宇,潘建,等. 低品位红土镍矿综合利用现状及进展[J]. 钢铁研究学报,2020,32(5):351 – 362.
ZHU Deqing,TIAN Hongyu,Pan Jian,et al. Comprehensive utilization status and progress of low-grade laterite nickel ore[J]. Journal of Iron and Steel Research,2020,32(5):351 – 362.

[14] ZHU Deqing,XUE Yuxiao,PAN Jian,et al. An investigation into the distinctive sintering performance and consolidation mechanism of limonitic laterite ore[J]. Powder Technology,2020,367:616 – 631.

[15] ZHU Deqing,XUE Yuxiao,PAN Jian,et al. Co-benefits of CO_2 emission reduction and sintering performance improvement of limonitic laterite via hot exhaust-gas recirculation sintering[J]. Powder Technology,2020,373:727 – 740.

[16] XUE Yuxiao,ZHU Deqing,PAN Jian,et al. An investigation into the co-sintering process of limonitic nickel laterite and low-grade chromite via multi-force fields[J]. Journal of Materials Research and Technology,2021,12:1816 – 1831.

[17] 朱德庆,郭正启,潘建,等. 分流制粒强化巴西某镜铁矿的烧结性能[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(11):3719 – 3726.
ZHU Deqing,GUO Zhengqi,PAN Jan,et al. Improving sintering performance of braziliansp ecularite bearingmixture by separated granulation sintering process[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2014,45(11):3719 – 3726.

[18] 朱德庆,周文涛,潘建,等. 含硼磁铁矿强化巴西赤铁矿球团的制备[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(2):348 – 355.
ZHU Deqing,ZHOU Wentao,PAN Jian,et al. Improving pelletization of razilian hematite byadding boron-containing magnetite[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2014,45(2):348 – 355.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net