梅钢烧结低碳减排技术的探索与实践

李和平

(上海梅山钢铁股份有限公司炼铁厂,江苏 南京 210039)

摘要:烧结作为长流程钢铁联合企业的重要工序之一,具有高能耗、高污染的特点,烧结节能减排工作也是钢铁"双碳"目标实现的关键环节之一。文中重点阐述了梅钢公司近年来在烧结节能减排方面所做的主要研究探索工作,如优化烧结配矿技术、喷吹焦炉煤气强化烧结技术、烧结矿竖式冷却技术及烧结烟气超低排放治理技术等。其总体应用效果:梅钢烧结固体燃料消耗(干基)、工序能耗分别逐渐由51.23 kg/t、53.98 kgce/t降至48.90 kg/t、45.77 kgce/t,烧结机头烟气SO_2、NO_x、颗粒物排放质量浓度(16%基准氧,干态)分别达到2.31、41.83、0.99 mg/Nm^3。虽然指标有进步,但与国内外先进企业相比还存在较大的差距。在"双碳"目标达成及环保A类企业创建的背景下,烧结工序关键技术的开发突破及绿色低碳、高质量发展仍是下一步的工作重点。

关键词:烧结; 节能减排; 低碳技术; 优化配矿; 焦炉煤气; 竖式冷却; 烟气治理

中图分类号:TF046.4;X701 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8764(2022)01-0112-07

doi:10.13403/j.sjqt.2022.01.015

Exploration and practice of low carbon emission reduction technologies of Meishan Iron & Steel sintering

LI Heping

(*Iron-making Plant, Shanghai Meishan Iron & Steel Co., Ltd., Nanjing* 210039, *Jiangsu, China*)

Abstract: As one of the important processes in the long process steel complex, sintering is characterized by high energy consumption and high pollution, so energy conservation and emission reduction in sintering is one of the key links to achieve the goal of "peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality" in iron & steel industry. The main research and exploration works done by Meishan Iron & Steel in recent years in sintering energy conservation and emission reduction are emphasized, such as optimized sintering ore distribution technology, enhanced sintering technology with coke oven gas injection, vertical cooling technology for sintering ore and ultra-low emission control technology for sintering flue gas. Its overall application effect: the sintering solid fuel consumption (dry basis) and process energy consumption of Meishan Iron & Steel gradually decreased from 51.23 kg/t and 53.98 kgce/t to 48.90 kg/t and 45.77 kgce/t respectively, and sintering head flue gas SO_2, NO_x and mass concentration of particulate matter emissions (16% base oxygen, dry state) reached 2.31, 41.83, and 0.99 mg/Nm^3, respectively. Although there is progress in indicators, a large gap between advanced enterprises at home and abroad still exists. In the context of achieving the "carbon peaking and carbon neutrality" goals and creating an environmental protection A-class enterprise, the development of key technologies for the sintering process and the development of green, low-carbon and high-quality development are still the focus of the next step.

Key words: sintering; energy conservation and emission reduction; low carbon technologies; optimization of ore proportioning; coke oven gas; vertical cooling; flue gas management

收稿日期: 2021-10-22; **修回日期**: 2022-01-06

作者简介: 李和平(1971—),男,正高级工程师,从事烧结工艺技术管理工作

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2019 年 4 月 28 日生态环境部等发布的《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》中有关组织排放控制指标：烧结机机头、球团焙烧烟气在基准氧体积分数为 16% 条件下，其颗粒物、二氧化硫、氮氧化物小时均值排放质量浓度分别不高于 10、35、50 mg/m^3。2020 年 9 月 22 日，习近平总书记在第七十五届联合国大会上向国际社会作出郑重承诺："中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和"。2021 年 2 月，中国宝武提出：2021 年提出低碳冶金路线图，2023 年实现碳达峰，2025 年具备减碳 30% 工艺技术能力，2035 年力争减碳 30%，2050 年力争实现碳中和。

烧结作为长流程钢铁联合企业的重要工序之一，具有高能耗、高污染的特点。据统计，烧结工序的能耗占钢铁行业总能耗的 11%～16%[1]，烧结烟气中 CO 体积分数在 0.5%～2.0%[2-3]之间，CO_2 排放占钢铁企业排放总量的 12%～14%，含有的 SO_2、NO_x 及颗粒物排放分别占钢铁企业排放总量的 40%～60%、50%～55% 和 15%～20%[4-5]。因此，烧结节能减排工作是广大烧结工作者永恒追求的目标和方向。本文主要针对对梅钢近年来在烧结节能减排方面所做的主要研究探索工作进行了阐述，并对其综合利用效果进行了分析，以期为同行提供借鉴，指明进一步的发展方向。

1　低碳减排技术的探索与实践

1.1　烧结配矿技术

基于梅钢公司烧结配矿的基本模式：梅山精矿＋进口富粉，其中梅山精矿为梅山矿业公司生产的铁精矿，长期以来作为梅钢公司烧结配矿的基础矿种和必用矿种。针对梅山精矿矿物组成复杂（图 1）、烧结性能特殊的特点，深入研究铁矿粉基础特性，建立了"单种矿综合性能评价模型"，坚持"降硅、降镁，提品位、提成品率"的技术路线，合理控制烧结矿化学成分，统筹考虑铁矿石自身工艺特性、铁矿石之间配合特性及工艺参数的匹配性等 3 个方面，开发了"以梅山精矿为必用矿进行合理互补搭配"的具有梅钢特色的烧结优化配矿技术。在保持较高梅山精矿比例情况下，梅钢烧结矿 TFe、SiO_2、MgO、转鼓指数、固体燃料消耗等关键指标（2021 年上半年分别为 57.48%、5.05%、1.42%、81.56%、48.90 kg/t），在行业内具有一定的优势。

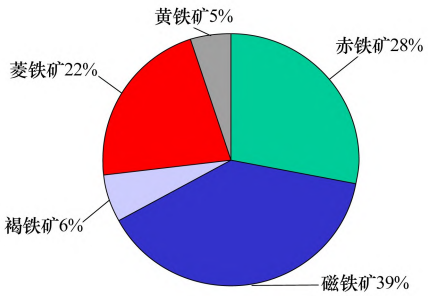


图 1　梅山精矿含铁矿物组成

Fig. 1　The iron mineral component of Meishan concentrate

1.2　燃料二次分加技术

燃料二次分加工艺（图 2），是将总配加固体燃料的 45%～55% 部分从二次混合制粒机出口端抛入。由于此时制粒过程已基本完成，外配燃料可粘附在小球表面。通过燃料外加，可改善燃料的燃烧条件，促进燃料的燃烧，减少不必要的燃料损失；同时，由于燃料的密度小，在布料过程中形成燃料的合理偏析，可增加料层上部中的燃料量，料层中热量的分配更趋合理，从而达到降低固体消耗、改善烧结矿质量的目的。

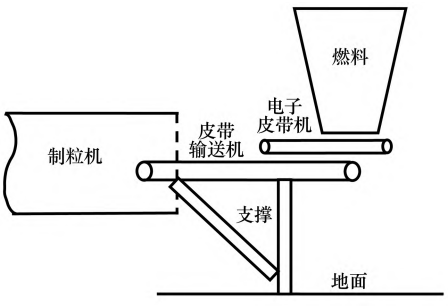


图 2　燃料二次分加工艺

Fig. 2　Fuel secondary plus technology

梅钢 198 m^2（3#）烧结机生产实践结果证明，燃料二次分加技术使用后，烧结机利用系数提

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

高 0.02 t/(m²·h)，烧结矿成品率提高 1.5%，固体燃料消耗(干基)降低 0.6 ~ 1.0 kg/t，取得了降低固体燃料消耗和提高烧结矿产、质量的效果。

1.3 富氧烧结技术

在梅钢 3#烧结机系统开展了利用高炉余氧进行富氧烧结技术的研究应用工作。富氧烧结系统由向烧结料层吹氧和富氧点火两部分构成(图 3)。富氧烧结中，氧气流量控制在 1 200 ~ 1 800 m³/h 左右，空气氧体积分数提高 2% 左右。该技术增加了炉膛和烧结料层中的氧化气氛，加速了燃料的燃烧，使烧结料层中火焰前沿移动速度与热波移动速度更趋一致。

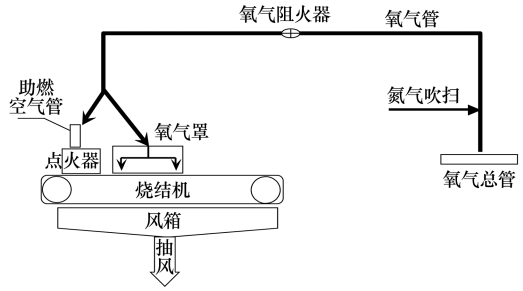


图 3 富氧烧结工艺

Fig. 3 Oxygen-richsintering

现场采用富氧烧结技术明显改善了烧结矿的产、质量指标，降低了点火燃气消耗。烧结矿成品率提高，利用系数提高 0.10 t/(m²·h)；烧结矿矿相结构得到改善，强度因此进一步改善，转鼓指数上升 0.76%；点火质量提高，煤气消耗降低 0.10 m³/t。目前，因氧气平衡问题该技术暂时停用。

1.4 喷吹焦炉煤气强化烧结技术

针对烧结生产中料层固有的“非均质性”和“自动蓄热作用”，造成水平、高度方向热量不均，料层上部冷却速度快、中下部最高温度难以控制及烧结工序碳排放量高等问题，开发了烧结料面喷吹气体燃料强化烧结技术[6]。

气体燃料强化烧结技术原理和作用：在烧结料面喷入一定量的可燃气体，在烧结负压的作用下，可燃气体被抽入烧结料层并在料层中的燃烧层上部燃烧放热，从而补充了上部热量、延缓了上层烧结矿冷却速度、拓宽了高温区(图 4)、延长了高温保持时间；同时，由于减少了烧结固体燃料的配加量，使得烧结燃烧带最高温度降低，更适合于强度和还原性能更优的复合铁酸钙组分的生成，从而改善烧结矿质量；同时，烧结固体燃料消耗的下降可大幅度地降低 CO_2 排放。

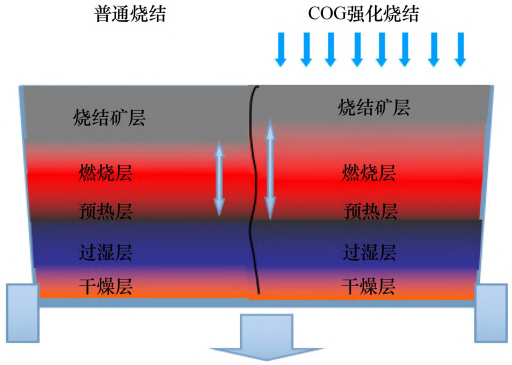


图 4 烧结料层中高温区变化

Fig. 4 The diversification of high-temperature zone in sinter bed

引进、消化、吸收日本 JFE 钢铁公司先进技术，梅钢进行了烧结料面喷吹焦炉煤气强化烧结技术的研究和工业应用工作[7-8]，在实验室研究喷吹气体种类、喷吹气体浓度、喷吹气体制度和喷吹气体模式基础上，梅钢 3#、450 m²(4#)两台烧结机实现了焦炉煤气强化烧结技术工业化生产，图 5 为现场喷吹焦炉煤气装置。



图 5 喷吹焦炉煤气现场装置

Fig. 5 Site device of COG injection

梅钢烧结机生产结果证明：喷吹焦炉煤气后(450 ~ 550 m³/h)，烧结过程均匀性、稳定性得到改善；烧结矿转鼓强度和还原性分别提高 1.5%、5.7%，烧结固体燃料消耗降低 7.3%，CO_2 年减排 1.7×10^4 t，同时减少了 SO_2、NO_x 排放。

在此基础上，继续开展了“焦炉煤气 + 富

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

氧”混合喷吹的实验室研究工作，结果表明，该工艺可以进一步有效提高烧结矿的转鼓强度和成品率，还能一定程度上改善烧结矿的还原性能，下一步有待进行现场实践应用。

1.5　烧结矿竖式冷却技术

传统环冷机存在构件密封难度大、漏风及无组织扬尘严重、热损失大和余热回收效率低等固有缺陷[9-11]，造成了巨大的环境污染和能源浪费。针对上述问题，借鉴成熟的干熄焦工艺技术，2006 年东北大学蔡九菊教授研究团队[9]提出了烧结矿竖式冷却回收显热工艺技术。烧结矿竖式冷却本质是一种密闭的气固逆流式移动床，热烧结矿在竖冷炉内下移过程中被逆流而来的冷却风冷却，冷风与热烧结矿充分进行热交换，从而实现烧结矿显热的高效回收[12-14]。

在充分论证基础上，2018 年梅钢 3#烧结机建成投用了一套烧结矿竖式冷却装置[12,15]。该装置主要包括上料系统、竖冷炉本体、排料系统、烟气处理及供风系统、余热锅炉系统及蒸汽余热发电系统。系统工艺流程如图 6 所示。

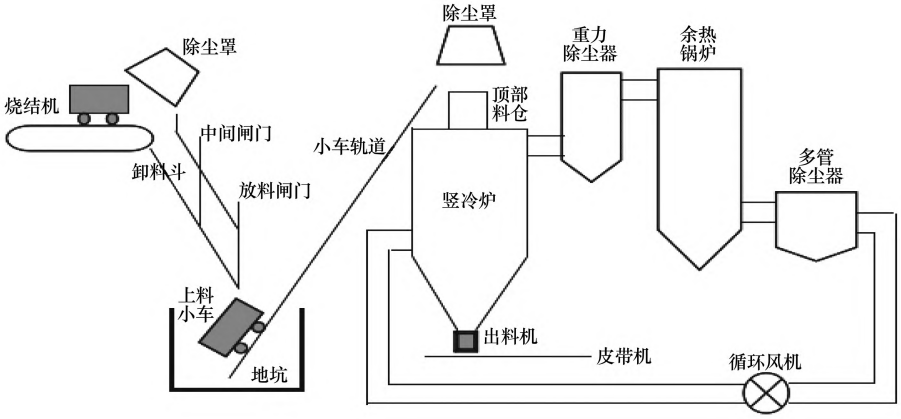


图 6　烧结矿竖式冷却工艺

Fig. 6　Sinter vertical cooling technology

在对炉内物料运动、气流运动以及传热过程的数值模拟研究基础上，结合实际运行中出现的问题，对炉内布料、布风等关键结构及参数进行了大量的优化改造，实现了该系统设备的稳定可靠运行，物流顺畅，实现连续生产；现场环境彻底改善，无扬尘，无废气外排，明显优于传统环冷机；余热蒸汽回收达 110 kg/t 以上，优于常规环冷机水平。烧结矿竖式冷却作为行业内一种全新的突破性技术，虽然在关键环节还存在一些技术瓶颈，但实践应用证明，该工艺可行并值得推广。

1.6　转臂式液密封环冷机的改造应用

在梅钢 3#烧结机建成投用烧结矿竖式冷却装置后，为降低传统环冷机无组织扬尘、提高余热回收效率等问题，2020 年底，利用年修机会将 4#烧结机传统环冷机改造为转臂式液密封环冷机。其工作过程为当台车回转至卸料区时，台车的摇臂轮开始沿曲轨上升，台车在台车本身及物料的重力偏心作用下随台车轴而缓慢翻转，将已冷却的烧结矿卸至排料溜槽内；台车卸料后，在复位辊轮的辅助下开始复位，其摇臂轮也沿曲轨下降，迫使台车反向转动直至摆平，完成烧结矿的冷却、卸料过程。

转臂式液密封环冷机上下密封均采用水密封形式，风箱上罩下部与原风箱焊接相连，上部采用水密封与回转框架相接，下部采用水槽密封，两端部和中部设有隔断密封，完善的密封系统有效降低了设备系统的漏风率(漏风率小于 5%)。生产投用后，2021 年 1 ~ 6 月份 4#烧结环冷机余热蒸汽回收达 112 kg/t，与改造前相比，蒸汽回收量提高了 40%。

1.7　烧结烟气超低排放治理技术

梅钢烧结机均采用“循环流化床 + 布袋除尘”的脱硫处理工艺，烧结机头烟气 SO_2、颗粒物排放质量浓度均满足国家排放标准。随着国家日趋严格的超低排放要求，自 2017 年起，梅

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

钢开始了烧结烟气治理升级改造工作。经对烧结烟气脱硫技术、脱硝技术多方考察比较，借鉴相关单位的设计运行经验，结合梅钢公司实际，综合考虑场地、在线建设、投资及运行成本等因素，选择了“循化流化床＋布袋除尘＋臭氧氧化”于一体的烧结烟气综合治理技术路线[5]。该技术在循环流化床脱硫装置基础上，配套脱硝剂(O_3)制备、供应及喷射系统，即可在一个吸收塔内同时完成脱硫脱硝过程(见图7)。其反应机理：O_3 将烟气中难溶于水的 NO 氧化为 NO_2，NO_2 与钙基吸收剂快速反应脱除，完成脱硝过程；同时，NO_2 和 SO_2 在循环流化床中与吸收剂同步反应并相互促进，$CaSO_3$ 易转化为 $CaSO_4$，NO_2 得到吸收固化脱除的同时改善了脱硫石膏的品质，主要化学反应方程如式(1)～式(2)所示。

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (1)$$

$$NO_2 + SO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(NO_3)_2 + Ca(NO_2)_2 + CaSO_3 + CaSO_4 + H_2O \quad (2)$$

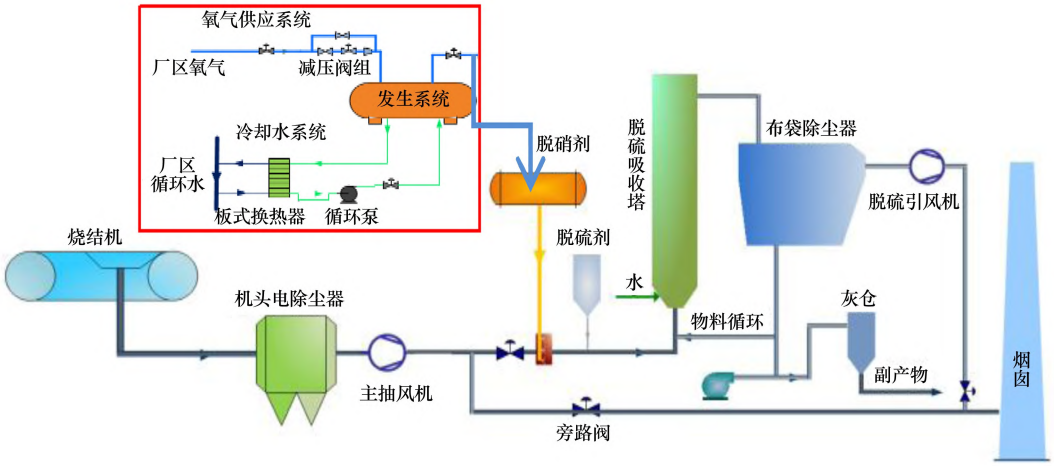


图7 烟气脱硫脱硝工艺

Fig. 7 Exhaust gas desulfurization and denitrification technology

经大量试验攻关、部分设备设施改造及生产操作的优化，自 2020 年起，梅钢烧结烟气在基准氧体积分数为 16% 条件下，颗粒物、二氧化硫、氮氧化物小时均值排放质量浓度分别不高于 10、35、50 mg/Nm^3，在实现超低排放要求的同时运行成本（不含折旧)仅为 15～16 元/t。

2 低碳减排技术实施应用效果

基于之上节能减排技术的研究与实践，包括关键工序点的技术攻关改造，如燃料四辊破碎机间隙液压自动调整、混合机添加热水、蒸汽预热混合料、微负压点火、无动力热风烧结、悬臂棒条筛与立置环保筛的改造应用及混合料槽料位与烧结层厚、烧结热制度自动调节控制等模型的开发应用等。同时，加强生产组织和操作管理，近几年梅钢烧结主要能耗、烟气污染物排放等主要指标取得了较大的进步，具体见表1。由表 1 可知：烧结固体燃料消耗(干基)、工序能耗由 2018 年的 51.23 kg/t、53.98 kgce/t 分别降至 2021 年上半年的 48.90 kg/t、45.77 kgce/t；蒸汽回收由 44.51 kg/t 提高至 87.66 kg/t；烧结机头烟气 SO_2、NO_x、颗粒物排放质量浓度(16% 基准氧，干态)分别达到 2.31、41.83、0.99 mg/Nm^3。

3 低碳减排技术的思考与展望

长期以来，广大烧结科技人员在烧结节能减排方面做了大量的研究探索工作，如基于铁矿石基础特性的优化烧结配矿技术[16]、复合造块技术、强化混匀制粒技术、厚料层烧结技术、低温烧结技术、均热烧结技术、热风烧结技术、烟气循环烧结技术、烧结烟气治理技术、烧结过程自动控制技术及烧结机设备大型化技术、返矿镶嵌技术[17-23]等，促进了烧结矿技术经济

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　烧结主要能耗、烟气污染物排放指标变化

Table 1　The diversification of main energy consumption and exhaust gas pollutant discharge index of sinter

时间	固体燃料消耗/（kg·t^{-1}）	煤气消耗/（m^3·t^{-1}）	蒸汽回收/（kg·. t^{-1}）	工序能耗/（kgce·t^{-1}）	机头SO_2排放质量浓度/（mg·Nm^{-3}）	机头NO_x排放质量浓度/（mg·. Nm^{-3}）	机头颗粒物排放质量浓度/（mg·. Nm^{-3}）	大气降尘量/（t·（km^2·月）$^{-1}$）
2018 年	51. 23	3. 34	44. 51	53. 98	20. 27	146. 99	7. 13	14. 11
2019 年	49. 08	3. 52	81. 31	48. 45	9. 44	81. 25	3. 49	9. 88
2020 年	48. 85	2. 92	73. 04	48. 00	5. 01	37. 82	2. 65	10. 19
2021 年 1 ~ 6 月	48. 90	3. 03	87. 66	45. 77	2. 31	41. 83	0. 99	11. 81

指标的大幅度提升，烧结工序节能减排工作也取得了长足的进步。但是，在“双碳”及超低排放的大背景下，烧结节能减排工作依然任重道远。笔者认为，推动烧结节能减排工作可从两个维度深入开展研究与应用工作：① 减少烧结燃料的消耗（如均热烧结、超厚料层烧结、富氢烧结技术等）和烧结显（潜）热的高效回收利用（如大烟道、冷却废气余能回收利用技术等）；② 烧结技术路线的优化（如微波点火与烧结技术等[24]）和关键技术的突破与应用（如烟气循环烧结、烟气 CO 利用及烧结智慧制造技术等）。

参考文献：

[1] 刘文强，李杰，朱金伟，等. 配碳量对烧结烟气排放规律的影响[J]. 烧结球团，2020，45（1）：61 – 66.
LIU Wenqiang，LI Jie，ZHU Jinwei，et al. Effect of carbon addition on emission of sintering flue gas[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45（1）：61 – 66.

[2] 何凯琳，杨本涛，叶恒棣，等. 烧结烟气 CO 脱除 Pt 催化剂的 SO_2 中毒与再生[J]. 烧结球团，2021，46（3）：72 – 79.
HE Kailin，YANG Bentao，YE Hengdi，et al. SO_2 poisoning and regeneration of Pt catalyst for CO removal from sintering flue gas[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46（3）：72 – 79.

[3] 廖继勇，郑浩翔，甘敏，等. 烧结烟气 CO 的产生及治理途径——末端治理技术[J]. 烧结球团，2021，46（2）：17 – 23.
LIAO Jiyong，ZHENG Haoxiang，GAN Min，et al. Generation and governance way of CO in sintering flue gas-end treatment technology[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46（2）：17 – 23.

[4] 石磊，李咸伟. 烧结烟气综合治理技术现状与展望[C]//第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集. 上海，2015.
SHI Lei，LI Xianwei. The current situation and outlook of sintering flue gas comprehensive control technology[C]//Proceedings of the 10th Annual China Iron and Steel Conference and the 6th Baosteel Annual Academic Conference. Shanghai，2015.

[5] 李和平，吴胜利，韩加友. “臭氧氧化 + 循环流化床”法烧结烟气净化技术的应用[J]. 烧结球团，2018，43（6）：1 – 6.
LI Heping，WU Shengli，HAN Jiayou. Application of sintering flue gas cleaning technology with method of “ozone oxidation and circuldting fluidized bed”[J]. Sintering and Pelletizing，2018，43（6）：1 – 6.

[6] OYAMA Nobuyuki，IWAMI Yuji，MACHIDA Satoshi，等. 烧结工艺使用气体燃料喷入技术减少 CO_2 排放[J]. 世界钢铁，2013（1）：16 – 22.
OYAMA Nobuyuki，IWAMI Yuji，MACHIDA Satoshi，et al. Reduction of CO_2 emissions with gas fuel injection technology in the sintering machines[J]. World Iron & Steel，2013（1）：16 – 22.

[7] 李和平，聂慧远，韩凤光，等. 焦炉煤气强化烧结技术在梅钢的应用[J]. 烧结球团，2015，40（6）：1 – 3.
LI Heping，NIE Huiyuan，HAN Fengguang，et al. Application of intensified sintering technology with COG in Meisteel[J]. Sintering and Pelletizing，2015，40（6）：1 – 3.

[8] 韩凤光，许力贤，吴贤甫，等. 焦炉煤气强化烧结技术研究[J]. 烧结球团，2016，41（2）：12 – 16.
HAN Fengguang，XU Lixian，WU Xianfu，et al. Technical research on sintering intensification with coke oven gas injection[J]. Sintering and Pelletizing，2016，41（2）：12 – 16.

[9] 董辉，李磊，蔡九菊，等. 烧结矿余热竖罐式回收利用工艺流程[J]. 中国冶金，2012（4）：6 – 10.
DONG Hui，LI Lei，CAI Jiuju，et al. Process of waste heat recovery and utilization for sinter in vertical tank[J]. China Metallurgy，2012（4）：6 – 10.

[10] 蔡九菊，王建军，陈春霞，等. 钢铁企业余热资源的回收与

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

利用[J]. 钢铁,2007,42(6):1 -7.
CAI Jiuju, WANG Jianjun, CHEN Chunxia, et al. Recovery of residual-heat integrated steelworks[J]. Iron and Steel, 2007, 42(6):1 -7.

[11] 赵斌,张玉柱,仓大强,等. 立式烧结冷却机与余热发电工艺研究[J]. 烧结球团,2009,34(6):5 -10.
ZHAO Bin, ZHANG Yuzhu, CANG Daqiang, et al. Development of a vertical sinter cooler and waste heat generating process[J]. Sintering and Pelletizing, 2009, 34(6):5 -10.

[12] 孙俊杰,毕传光. 冷却竖炉内烧结矿运动行为模拟研究[J]. 梅山科技,2017(1):15 -18.
SUN Junjie, BI Chuanguang. Numerical simulation of movement behavior of sinter in shaft furnace[J]. Meishan KEJI, 2017(1):15 -18.

[13] 冯军胜,董辉,高建业,等. 烧结矿余热回收竖罐内气体流态的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(4):517 -521.
FENG Junsheng, DONG Hui, GAO Jianye, et al. Gas flow regime in vertical tank for sinter waste heat recovery[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2016, 37(4):517 -521.

[14] 冯军胜,董辉,曹峥,等. 烧结竖罐床层内的空隙率分布特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(1):8 -13.
FENG Junsheng, DONG Hui, CAO Zheng, et al. Voidage distribution properties of bed layer in sinter vertical tank[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(1):8 -13.

[15] 毕传光,孙俊杰. 竖式冷却回收烧结矿显热工艺在梅钢的应用[J]. 烧结球团,2018,43(4):69 -72.
BI Chuanguang, SUN Junjie. Application of process to recycle sensible heat of sinter using vertical cooling furnace in Meisteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4):69 -72.

[16] 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 -724.
WU Shengli, DAI Yuming, 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 -724.

[17] 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 Xiaohui. Principle and technology of optimizing ore blending in iron ore sintering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.

[18] 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. The technology enchiridion of sintering and pelletizing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.

[19] 龙红明. 铁矿粉烧结原理与工艺[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
LONG Hongming. The principle and technics of iron ore sintering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

[20] 廖继勇,何国强. 近五年烧结技术的进步与发展[J]. 烧结球团,2018,43(5):1 -11.
LIAO Jiyong, HE Guoqiang. Progress and development of sintering technologies during the last five years[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(5):1 -11.

[21] 刘建波,裴元东,张俊杰,等. 不同粒度返矿镶嵌烧结技术的研究及工业应用[J]. 烧结球团,2020,45(4):22 -26.
LIU Jianbo, PEI Yuandong, ZHANG Junjie, et al. Research on MEBIOS technology of different particle size and its application[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(4):22 -26.

[22] 王兆才,周志安,何国强,等. 基于返矿分流的烧结强化制粒技术研究[J]. 烧结球团,2018,43(4):12 -16.
WANG Zhaocai, ZHOU Zhian, HE Guoqiang, et al. Study on process of strengthening granulation based on sinter returns and BF returns shunting[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4):12 -16.

[23] 裴元东,吴胜利,熊军,等. 大粒度矿/返矿镶嵌烧结技术研究及其在首钢应用的分析[J]. 烧结球团,2014,39(2):1 -4;8.
PEI Yuandong, WU Shengli, XIONG Jun, et al. Research of mosaic embedding iron ore sintering technology with return fines and large particle size ores and its application in Shougang[J]. Sintering and Pelletizing, 2014, 39(2):1 -4;8.

[24] 王跃飞. 宝钢绿色烧结的创建与设想[J]. 宝钢技术,2019(1):1 -6.
WANG Yuefei. Establishment and assumption of green sintering in baosteel[J]. Baosteel Technology, 2019(1):1 -6.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net