烟气循环与梯级富氧耦合烧结技术分析

李文林，刘 臣
（中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205）

摘要：为实现“碳达峰、碳中和”既定目标，高能耗钢铁行业全力推进碳减排工作，加快低碳前沿技术的研发与应用。本文聚焦长流程烧结工序，深究烟气循环烧结工艺与富氧烧结技术的细节问题，开发烟气循环与梯级富氧耦合烧结技术；依据气体特性合理选取烧结机风箱烟气 O_2 体积分数，在循环烟道支管内形成 1%～2% 的梯级富氧，将高 O_2 体积分数（18%～20%）的中高温气流介质供给烧结。该技术重点利用富氧弥补循环烟气中 O_2 体积分数不足的缺点，提高烧结料层中燃料的燃烧效率，实现低品质烧结烟气余热高效回收、固体燃料消耗降低和烧结矿产、质量提升等多种功能需求。

关键词：烟气循环烧结；梯级富氧；富氧气体；碳减排
中图分类号：TF046.4；X701 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2022）04－0099－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.04.060

Analysis on sintering technology of flue gas circulation coupled with step oxygen enrichment

LI Wenlin，LIU Chen
（*Zhongye Changtian International Engineering Co.，Ltd.，Changsha* 410205，*Hunan*，*China*）

Abstract：In order to achieve the established goal of “carbon peaking and carbon neutrality”，the high-energy steel industry has made every effort to promote carbon emission reduction and accelerate the R&D and application of low-carbon cutting-edge technologies. The long-process sintering process is focused on，the details of the flue gas cycle sintering process and oxygen enrichment sintering technology are deeply investigated，and the flue gas circulation and step oxygen enrichment coupling sintering technology are developed. According to the gas characteristics，the O_2 volume fraction of the sintering machine bellow flue gas is reasonably selected，and 1%～2% of step oxygen enrichment is formed in the circulating flue branch，and the medium and high temperature gas flow medium with a high O_2 volume fraction（18%～20%）is supplied to the sintering. This technology focuses on using oxygen enrichment to make up for the shortcomings of insufficient O_2 volume fraction in circulating flue gas，improve the combustion efficiency of fuel in the sintering material layer，and realize the efficient recovery of waste heat of low-quality sintered flue gas，the reduction of solid fuel consumption，sintered minerals，quality improvement and other functional requirements.

Key words：flue gas circulating sintering；step oxygen enrichment；oxygen enrichment gas；carbon emission reduction

铁矿烧结是钢铁生产过程中烟气污染物排放最严重的工序，其污染负荷占比近 40%，是钢铁领域减排的重点和难点[1]。在大力推行绿色低碳发展的重要时期，国家对烧结污染物治

收稿日期：2022－04－24；**修回日期**：2022－05－09
基金项目：湖南省科技成果转化及产业化计划资助项目（2020GK4055）；中冶集团 181 攻关计划自主项目（第一批）；中冶长天基础研究基金项目（2021JCYJ04）
作者简介：李文林（1979—），男，高级工程师，从事铁矿烧结球团方面的设计、研发工作。
通信作者：刘 臣（1989—），男，博士，从事铁矿烧结球团与熔融还原等方面的研究。

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

理的要求持续加强，2019年生态环境部、发改委等5部门正式发布了《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》，要求烧结球团的烟气颗粒物、SO_2、NO_x排放质量浓度分别不高于10、35、50 mg/Nm^3，相比之前的标准趋严75%以上[2-3]。鉴于此，国内烧结厂按照源头减量、过程控制及末端治理的一体化治理理念，采取烟气循环烧结、高配比富氢燃料烧结、活性炭脱硫脱硝等技术减少污染物的生成与排放，已取得显著减排效果[4-6]。

热平衡分析表明铁矿烧结的热收入主要为固体燃料化学反应热，在烧结过程中碳燃料主要发生完全燃烧，局部微空间发生不完全燃烧，因此烧结烟气中含有7%~15%的CO_2、0.5%~1%的CO，污染物质量浓度远高于SO_2和NO_x，同时造成能源浪费。随着温室效应的加剧与极端天气频发，“双碳”目标倒逼国内钢铁工业愈加重视碳减排，烧结工序降耗减碳迫在眉睫，烟气循环烧结、富氧烧结及燃料分加等技术均有助于节能降耗。与此同时，烟气中CO作为一种参与空气质量(AQI)评价的主要污染物，已被《中华人民共和国环境保护法》纳入征税对象，其作为一种无色无味有毒气体，会损害人的心脏和神经系统，甚至造成致命伤害。因此，钢铁重镇河北唐山市颁布的《关于钢铁企业烧结机头一氧化碳执行排放限值的通知》中，规定自2018年7月1日起，全市钢铁企业烧结机机头CO排放质量浓度不超过6 000 mg/m^3(0.48%)[7-8]。

基于超低排放和“双碳”目标的强制性要求，为努力提高烧结烟气的治理水平与提升烧结矿产、质量和降低能耗，本文重点探究烟气循环烧结技术、富氧烧结技术进展，针对关键问题，开发基于烟气循环与梯级富氧相耦合的低碳烧结技术，借助富氧烧结的优势，弥补烟气循环烧结工艺中循环烟气的温度限制及其O_2体积分数不足的缺点，取长补短，强化燃料燃烧与烧结成矿。

1 烟气循环烧结工艺

烟气循环烧结工艺是将一部分烧结烟气返回至烧结机台车料面循环利用的烧结方法。国外烟气循环烧结技术主要包括：EOS工艺、LEEP工艺、EPOSINT工艺及区域性废气循环工艺[9-10]。当前烟气循环烧结技术在国内蓬勃发展，2013年我国第一套烟气循环系统在宁波钢铁480 m^{2}烧结机上正式投运，相继投入和在建的烧结烟气循环工程约20余套，中冶长天已制定烧结烟气循环设计标准，将循环烟气占比设计为20%~30%。

由于国内烧结原料复杂，烟气组成波动大，各大高校、科研院所等开展了大量针对性的烟气循环烧结基础研究，以确保技术的工业应用效果[11-13]。范振宇等[14]通过模拟烟气循环烧结试验，探究了循环烟气成分、体积分数及温度对烧结过程的影响，重点讨论其对烧结矿产、质量指标的影响。范晓慧等[15]深入分析了循环烟气在烧结过程的反应行为及其对烧结成矿的影响，总结了适宜的烟气循环比例、热风温度、水蒸气体积分数等烟气循环参数，开发了适合中国原料结构的烟气循环新工艺，力求在保障烧结指标的前提下提高烟气循环比例、高效节能减排。针对该技术的数值模拟，张小辉等[16]通过模拟计算对比分析烟气循环烧结的改善作用，可使料层最高温度在高度方向上更加稳定。诸多研究成果为我国烟气循环技术的推广和应用奠定了理论基础。本文依据循环烟气的温度和O_2体积分数对烧结指标的影响进行研究，对进入烧结料层的循环烟气温度上限和O_2体积分数下限进行精确控制。

1.1 循环烟气温度调控

采用700 mm×100 mm烧结杯开展烟气循环烧结试验，将烧结矿在垂直方向均分为4层，如图1所示[4,15]。循环烟气温度对烧结指标的影响如图2所示。由图2可知：随着烟气温度的逐渐升高，烧结矿的转鼓强度不断增大，这表明热风有利于强化烧结矿质量。然而，其它烧结指标以烟气温度200 ℃为界：当温度低于200 ℃时，垂直烧结速度、成品率、利用系数均得到改善，与常规烧结相比，循环150 ℃热风可显著提升第一、二层烧结矿的成品率和转

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

鼓强度，对第三、四层烧结矿质量的改善效果减弱；而当温度高于 200 ℃时，3 项烧结指标均呈下降趋势，这表明高温烟气会对烧结产生不利影响，是根据理想气体状态方程［$V_1T_2 = V_2T_1$，T_1、T_2 为气体温度(℃)，V_1、V_2 为温度变化前后气体体积(m^3)］，在等压条件下气体受热体积膨胀，导致通过料层的气体量减少，如表 1 所示，200 ℃烟气将膨胀 1.73 倍。因此，循环烟气温度应控制在 200 ℃左右。

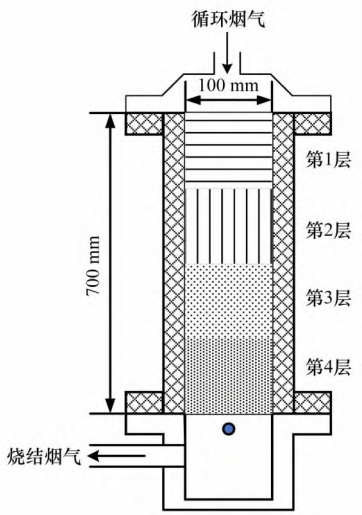


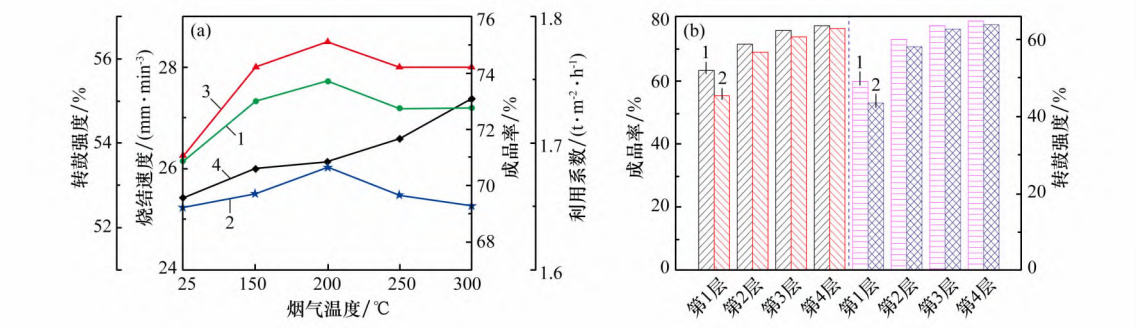
图 1　烟气循环烧结试验设备示意

Fig. 1　Schematic of equipment for sinter pot tests with flue gas circulating

表 1　高温烟气的体积变化

Table 1　Volume change of flue gas at high temperature

项目	烟气温度/℃	风量体积/($m^3 \cdot h^{-1}$)	相对膨胀率/%
吨矿所需风量(标况)	0	1 200	1
吨矿所需风量(工况，1 个大气压)	50	1 420	1.18
	100	1 639	1.37
	150	1 859	1.55
	200	2 079	1.73
	250	2 299	1.92
	300	2 519	2.10



(a)　烧结指标变化趋势；(b)　不同料层烧结矿质量对比

1—垂直烧结速度；2—成品率；3—利用系数；4—转鼓强度；5—常规；6—150 ℃热风。

图 2　循环烟气温度对烧结指标的影响

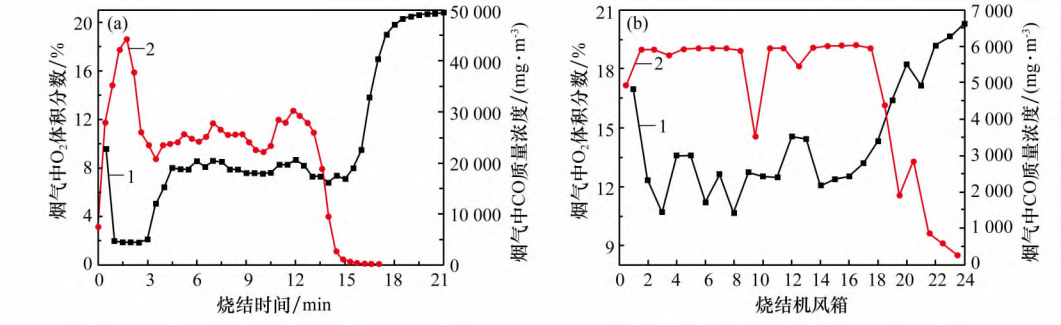
Fig. 2　Effect of circulating flue gas temperature on sintering indexes

1.2　循环烟气中 O_2 体积分数控制

烧结杯烟气和烧结机风箱烟气中 O_2 体积分数变化如图 3 所示。由图 3 可知，烧结杯烟气中 O_2 体积分数在点火保温段迅速降低，点火保温结束后 O_2 体积分数有所提高并在烧结过程中保持相对稳定，体积分数为 8%～10%，相应的 CO 质量浓度为 25 000 mg/m^3 左右，是质量浓度很高的气态污染物。相似地，在稳定烧结阶段(4～14 号风箱)，风箱烟气中 O_2 体积分数为 9%～14%，体积分数偏高是因台车漏风率高，在临近烧结完成阶段(15～24 号风箱)，烟气中 O_2 体积分数迅速回升至 20% 左右。烟气中 O_2 体积分数高，反之 CO 体积分数低，可见风箱中 CO 质量浓度为 6 250 mg/m^3 左右，依然属于高浓度污染物，其减排日益重视。

若单将烧结烟气作为循环气体介质，其 O_2 体积分数低于空气中 O_2 体积分数，如表 2 所示，循环气体中 O_2 体积分数对烧结指标影响明显。随着 O_2 体积分数的降低，各项烧结指标逐渐恶化，特别是当 O_2 体积分数低于 18% 时，各项烧结指标均较差，转鼓强度降至 45.89% 和 44.89%，明显低于常规烧结的 50.34%。因此，

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



(a) 烧结杯烟气组分；(b) 烧结机风箱烟气组分

1—O_2 体积分数；2—CO 质量浓度。

图 3 烧结杯与烧结机释放烟气中 O_2 与 CO 体积分数变化

Fig. 3 Content variation of O_2 and CO in flue gas released from sintering cup and machine

表 2 O_2 体积分数对烧结指标的影响

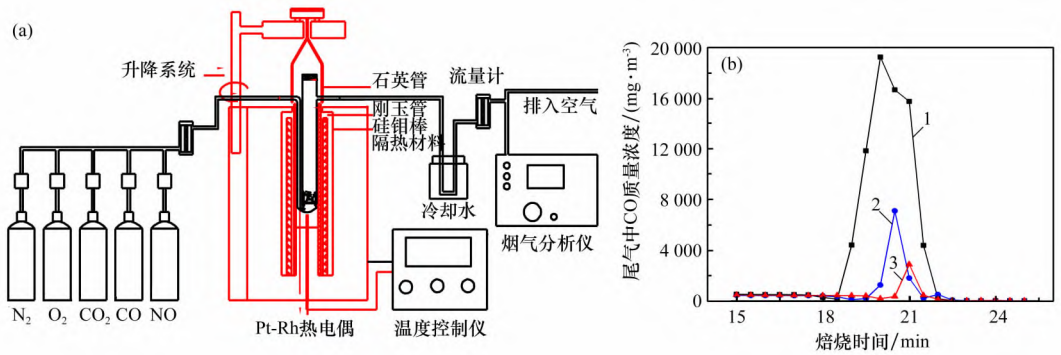
Table 2 Effect of O_2 content on sintering indexes

氧气体积分数/%	垂直烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})
21	21.67	81.47	50.34	1.420
18	20.87	81.15	49.50	1.353
15	20.28	77.73	45.89	1.274
12	20.13	76.07	44.89	1.250

循环烟气中 O_2 体积分数不宜低于 18%。

2 富氧烧结技术

一般而言，烧结厂应用的富氧烧结技术是通过富氧提高冷空气的氧气体积分数(22%~26%)，富氧率为 1%~5%，以解决烧结料层上部燃料燃烧不充分、热量分布不均及降温速度快的问题，从而改善烧结矿质量，降低固体燃耗、返矿率[17-19]。采用竖式管炉开展不同氧气体积分数条件下的焦粉颗粒的焙烧试验，试验装置和结果如图 4 所示。试验中，焦粉粒度为 +1 mm，气体流量为 0.5 m^3/h，研究结果表明：氧气体积分数提高可促进燃料充分燃烧，尾气中 CO 体积分数明显降低，完全燃烧释放充分热量，提升料层最高温度，显著改善烧结矿产量与质量(表 2)。



(a) 管炉焙烧示意；(b) CO 质量浓度变化趋势

O_2 体积分数/%：1—21；2—18；3—15。

图 4 O_2 体积分数对燃料燃烧的影响(管炉焙烧)

Fig. 4 Effect of O_2 content on fuel combustion (Tube furnace roasting)

典型的富氧烧结工艺流程如图 5 所示。针对富氧烧结，莫斯科钢铁学院与顿涅茨克钢铁研究院的试验研究结果表明：当 O_2 体积分数为 42% 时，垂直烧结速度提高 20%，产量提高

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

48%。苏联耶拉基耶夫冶金工厂的工业试验结果表明：应用富氧烧结后，烧结生产率增加 8.4%，增产 80%~85%[20]。国内酒钢、梅钢等应用富氧烧结的效果表明：烧结过程的氧化气氛增强，确保燃料的充分燃烧，降低烧结矿的 FeO 质量分数，提升烧结矿的还原性能，当富氧率为 4.0% 时，烧结矿强度提高 1.52%，固体燃料消耗下降 0.303 kg/t，FeO 质量分数降低约 1.0% 左右。因富氧量大、成本高的原因，国内烧结厂并未推广应用富氧烧结技术，但富氧烧结的先进理念值得借鉴。

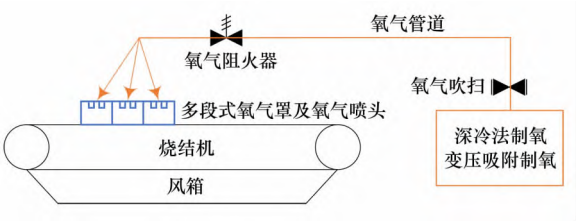


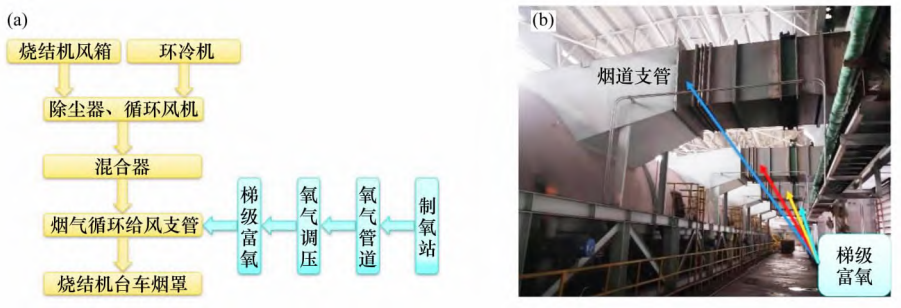
图 5　富氧烧结流程示意

Fig. 5　Schematic diagram of oxygen-rich sintering process

3　烟气循环与梯级富氧耦合烧结技术

3.1　技术原理

烟气循环与梯级富氧耦合烧结技术是基于烟气循环烧结工艺，科学选取中、高比例烧结机烟气循环至烧结料层作为中高温气流介质，以此减少烟气排放量，降低尾气脱硫脱硝处理成本，回收利用部分烟气显热和 CO 潜热；高效耦合富氧烧结技术，通过在循环烟道支管中补充环冷热废气、工业 O_2 来提高烧结气流介质的 O_2 体积分数，实现 O_2 体积分数的梯级分布与料层热量均匀分布，以此促使燃料快速燃烧，提高燃料燃烧效率和碳素利用率，加快烧结速度与提升烧结温度。该技术利用富氧气体提升循环烟气 O_2 体积分数和调控烟气温度，将温度适宜、高 O_2 体积分数的多组分气流介质注入烧结料层，实现低品质烧结烟气余热高效回收、烧结燃耗降低和烧结产质量提升等多种功能需求，具体工艺流程如图 6 所示。



(a)　耦合烧结工艺流程图；(b)　烟气循环烟道支管

图 6　烟气循环与梯级富氧耦合烧结工艺

Fig. 6　Sintering process of flue gas circulation coupled with stepped oxygen enrichment

3.2　富氧气体介质来源

环冷机废气梯级循环利用技术路线如图 7 所示。由图 7 可知：在环冷机中，低于 100 ℃ 的低温热废气循环至中温烧结矿区实现串级利用，提高了中温取热段的废气温度，使中温废气温度介于 100~300 ℃。由于在烟气循环工艺中热风温度不宜过低且不宜高于 200 ℃，综合分析，环冷机中温废气最适合作为富氧气体介质(21%)与循环烟气耦合返回烧结料面，保证循环气流介质温度在 200 ℃ 左右，但会限制最大烧结烟气循环量。

钢铁厂内部富余高体积分数 O_2 也被认为是富氧气体介质来源之一，以此可提升最大烧结烟气循环量。某钢铁厂 1#烧结机(400 m^2) 已配置烟气循环工艺，因导致烧结矿产量降低而停滞，现建立两座变压吸附制氧机，考虑采用烟气循环耦合梯级富氧烧结技术重新激活烟气循环工艺。已知烧结吨矿所需总风量为 1 200 m^3/t，利用系数为 1.25 t/(m^2·h)，循环烟气含氧量为 17%，吸附制氧含氧量为80%，经计算，富氧

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

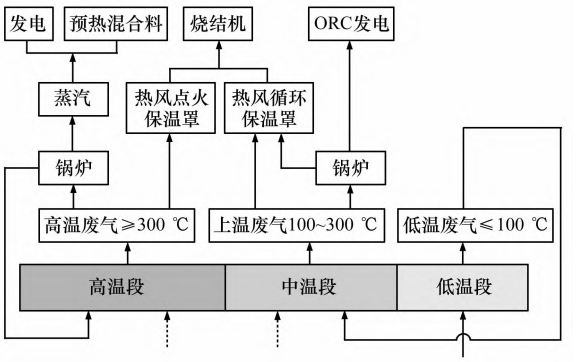


图7 环冷机废气梯级循环利用技术路线

Fig. 7 Technical route of cascade recycling of waste gas of ring chillers

量随富氧面积的变化如表3所示。由表3可知，选择烧结机前1/3或1/2区域进行富氧，富氧率为1%~2%，所需变压吸附制样量为3 175~9 524 m^3/h。

3.3 碳减排效果分析

烧结工序采用烟气循环烧结工艺(市场占比为15%)，回收利用烧结烟气和冷却废气的部分余热，使固体燃料消耗(标煤)减少1~2 kg/t，按烧结矿年产量为8亿吨计算，其CO_2减排为40~75万吨/年。

当烟气循环与梯级富氧耦合烧结技术开发成熟且成功应用，因烟气余热回收利用和燃料能源高效利用的叠加效应，预期固体燃料消耗(标煤)减少3~4 kg/t。截至2050年，将新技术的市场占比提高至30%~50%，烧结矿产能不变，则CO_2减排能力变为230~500万吨/年；将新技术的市场占比提高至100%，则CO_2减排能力变为750~1 000万吨/年。由此可知，烟气循环与梯级富氧耦合烧结技术的碳减排效果显著，高度契合双碳目标下绿色低碳技术追求。

表3 高体积分数氧气理论流量

Table 3 Theoretical flow of high concentration oxygen m^3/min

富氧面积/m^2	占比	理论风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	富氧率/%	循环烟气量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	变压吸附制氧量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
133	1/3	20 0000	1	196 825	3 175
			2	193 651	6 349
200	1/2	30 0000	1	295 238	4 762
			2	290 476	9 524

4 结 论

总体而言，烟气循环技术在国内大型烧结机上的应用率低，富氧烧结技术的应用更是鲜有案例。为积极应对“碳达峰、碳中和”的要求，钢铁行业必须加大低碳技术的推广应用，将促使烟气循环与梯级富氧耦合烧结技术等绿色低碳创新技术迅速发展，市场潜力巨大。

烟气循环与梯级富氧耦合烧结技术，既集成烟气循环烧结与富氧烧结技术优点，又借助富氧烧结解决烟气循环烧结工艺的弊端，实现富氧气体提升循环烟气O_2体积分数和调控烟气温度双重效果，实现低品质烧结烟气余热高效回收、烧结燃耗降低和烧结产、质量提升等多种功能需求。此技术其可作为拟建烧结烟气净化降低投资和运行成本以及已建烟气净化改造增产的手段，助力钢铁行业高水平实现绿色低碳烧结。

参考文献:

[1] 范晓慧,甘敏,季志云,等. 复合气体介质烧结的节能减排技术开发与应用[J]. 钢铁,2020,55(8):62-69.
FAN Xiaohui, GAN Min, JI Zhiyun, et al. Development and application of techniques for energy conversation and emission reduction during sintering process based on multiple-component gases medium[J]. Iron and Steel,2020,55(8):62-69.

[2] 邢奕,张文伯,苏伟,等. 中国钢铁行业超低排放之路[J]. 工程科学学报,2021,43(1):1-9.
XING Yi, ZHANG Wenbo, SU Wei, et al. Research of ultra-low emission technologies of the iron and steel industry in China[J]. Chinese Journal of Engineering,2021,43(1):1-9.

[3] 周茂军,张代华. 宝钢烧结烟气超低排放技术集成与实践[J]. 钢铁,2020,55(2):144-151.
ZHOU Maojun, ZHANG Daihua. Technology integration and practice of ultra-low emission of sintering flue gas in Baosteel[J]. Iron and Steel,2020,55(2):144-151.

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

[4] 刘臣. $SO_2/NO_x/CO_x$ 在铁矿石烟气循环烧结过程中的行为研究[D]. 长沙: 中南大学,2013.
LIU Chen. Research on behavior of $SO_2/NO_x/CO_x$ in the process of flue gas circulation sintering of iron ores[D]. Changsha: Central South University,2013.

[5] JI Zhiyun, GAN Min, FAN Xiaohui, et al. Characteristics of $PM_{2.5}$ from iron ore sintering process: Influences of raw materials and controlling methods[J]. Journal of Cleaner Production,2017,148: 12 – 22.

[6] JI Zhiyun, ZHOU Haoyu, FAN Xiaohui, et al. Insight into the application of hydrogen-rich energy in iron ore sintering: Parameters optimization and function mechanism[J]. Process Safety and Environmental Protection,2020,135: 91 – 100.

[7] 王兆才,刘臣,李继淦,等. 烧结烟气 CO_x 的生成机理及减排措施[J]. 烧结球团,2021,46(1): 14 – 22.
WANG Zhaocai, LIU Chen, LI Jigan, et al. Generation mechanism and emission reduction measures of CO_x[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(1): 14 – 22.

[8] 程扬,李杰,朱金伟,等. 烧结烟气 CO 减排研究动态[J]. 矿产综合利用,2022(2): 22 – 25.
CHENG Yang, LI Jie, ZHU Jinwei, et al. Research process of CO emission reduction in sintering flue gas[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2022(2): 22 – 25.

[9] 李惠莹,王浩,金保昇. 浅谈烟气循环烧结工艺的发展现状及趋势[J]. 烧结球团,2018,43(1): 61 – 65.
LI Huiying, WANG Hao, JIN Baosheng. Development status and trend of flue gas recirculation sintering process[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(1): 61 – 65.

[10] LI Guanghui, LIU Chen, RAO Mingjun, et al. Behavior of SO_2 in the process of flue gas circulation sintering (FGCS) for iron ores[J]. ISIJ International,2014,54(1): 37 – 42.

[11] 胡兵,贺新华,王兆才,等. 烟气循环烧结过程风氧平衡[J]. 钢铁,2014,49(9): 15 – 20.
HU Bing, HE Xinhua, WANG Zhaocai, et al. Wind and oxygen balance based on flue gas circulation sintering process[J]. Iron and Steel,2014,49(9): 15 – 20.

[12] 景涛,周志安,周晓青,等. 基于风氧平衡的烧结机烟气循环新技术的研究[C]//2014 年全国冶金能源环保生产技术会. 武汉: 中国金属学会,2014: 69 – 75.
JING Tao, ZHOU Zhian, ZHOU Xiaoqing, et al. Research on flue gas circulation sintering process based on wind and oxygen balance[C]//2014 National Metallurgical Energy Environmental Protection Production Technology Conference. Wuhan: China Metal Society,2014: 69 – 75.

[13] 王兆才,周志安,胡兵等. 烧结烟气循环风氧平衡模型[J]. 钢铁,2015,50(12): 53 – 59.
WANG Zhaocai, ZHOU Zhian, HU Bing, et al. Wind-oxygen balance model of flue gas circulation in sintering[J]. Iron and Steel,2015,50(12): 53 – 59.

[14] 范振宇. 烟气循环烧结的基础研究[D]. 长沙: 中南大学,2011.
FAN Zhenyu. A fundamental investigation on flue gas circulation sintering[D]. Changsha: Central South University,2011.

[15] FAN Xiaohui, YU Zhiyuan, GAN Min, et al. Appropriate technology parameters of iron ore sintering process with flue gas recirculation[J]. ISIJ International, 2014, 54(11): 2541 – 2550.

[16] ZHANG Xiaohui, FENG Peng, XU Jiarui, et al. Numerical research on combining flue gas recirculation sintering and fuel layered distribution sintering in the iron ore sintering process[J]. Energy,2020,192: 116660.

[17] 沈小峰. 梅钢富氧烧结技术的研究与应用[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊),2009(10): 238.
SHEN Xiaofeng. Research and Application of oxygen-enriched sintering in Meishan Iron and Steel Cooperation[J]. Sme Management and Technology,2009(10): 238.

[18] 刘晓文,黄从俊. 铁矿粉富氧烧结试验研究[J]. 粉末冶金工程,2016,26(5): 38 – 42.
LIU Xiaowen, HUANG Congjun. Experimental study on oxygen enriched sintering of iron ore powder[J]. Powder Metallurgy Industry,2016,26(5): 38 – 42.

[19] 王涛,鲁逢霖,胡容. 酒钢富氧烧结技术的研究与应用[C]//2011 年全国冶金节能减排与低碳技术发展研讨会. 唐山: 中国金属学会,2011: 226 – 228.
WANG Tao, LU Fenglin, HU Rong. Research and application of oxygen-enriched sintering in JISCO[C]//National Symposium on Energy saving, Emission reduction and Low-carbon Technology development in Metallurgy. Tangshan: China Metal Society,2011: 226 – 228.

[20] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社,2014: 810 – 811.
JIANG Tao. Production technical manual of sintering and pelletizing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014: 810 – 811.

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