铁矿烧结减污降碳及协同处置固废新技术

康建刚[1,2]，杨本涛[1,2]，魏进超[1,2]，王兆才[1,2]，周浩宇[1,2]，范一权[3]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205；3. 武汉轻工大学，湖北 武汉 430023）

摘要： 碳中和、碳达峰背景下钢铁行业面临新的机遇和挑战，烧结工序作为钢铁长流程生产种的重要一环，降低其污染物排放总量、实现生产过程低碳化、扩展烧结功能实现高附加值是铁矿烧结技术进步的必然要求。本文回顾了传统的超低排放技术、烧结固体燃料供热模式及工业炉窑协同处置固废技术特点，重点介绍了低碳低成本深度净化新技术、高配比富氢燃料烧结新技术及烧结协同处置固废新技术，并展望了以上技术对实现烧结减污降碳及社会效益的应用前景。

关键词： 烧结；活性炭法；超低温SCR脱硝；CO催化氧化；富氢烧结；固废
中图分类号： X757 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)03－0020－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.03.035

New technology on reduction of pollution and carbon emissions and collaborative disposal of solid wastes in iron ore sintering

KANG Jiangang[1,2], YANG Bentao[1,2], WEI Jinchao[1,2], WANG Zhaocai[1,2], ZHOU Haoyu[1,2], FAN Yiquan[3]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 2. National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System, Changsha 410205, Hunan, China; 3. Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, Hubei, China)

Abstract: Under the background of carbon neutrality and carbon peaking, the iron and steel industry is facing new opportunities and challenges. As an important part of the long-process production of iron and steel, the sintering process is an inevitable requirement for the progress of iron ore sintering technology to reduce its total pollutant emissions, realize its low-carbon production process, expand its sintering function and achieve its high added value. The characteristics of the traditional ultra-low emission technology, the heating mode of sintering solid fuel and the technology of collaborative solid waste disposal in industrial furnace are reviewed. Then, the new technologies of low-carbon and low-cost deep purification, high-ratio hydrogen-rich fuel sintering and collaborative solid waste disposal in sintering are emphatically introduced, and the application prospect of the above technologies in realizing reduction of pollution and carbon emissions in sintering and the social benefits is prospected.

Key words: sintering; activated carbon method; ultra-low temperature SCR denitration; catalytic oxidation of CO; hydrogen-rich sintering; solid waste

随着“十四五规划”出台和碳达峰、碳中和“3060”战略目标的提出，我国经济进入了从“量”到“质”发展的新阶段。作为国民经济可持续发展的重要基础产业，我国钢铁工业仍然存在产能过

收稿日期： 2022－05－07；**修回日期：** 2022－06－21
基金项目： 国家重点研发计划重点专项资助项目(2021YFB3500600)；湖南省创新平台与人才计划资助项目(2020RC4027)
作者简介： 康建刚(1990—)，男，博士研究生，工程师，从事环保新材料制备及环保新技术开发等方面的研究工作。
通信作者： 杨本涛(1989—)，男，博士，高级工程师，从事冶金三废治理及资源化等方面的研究工作。

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

剩压力大、产业安全保障能力不足、绿色低碳发展水平有待提升、产业集中度偏低等问题，亟需技术转型。

烧结是钢铁冶炼过程中的重要环节，其成本约占钢铁工业总成本的30%~40%，能耗约占总能耗的8%~10%，碳排放量占钢铁总流程的11%~15%左右，SO_2、NO_x、粉尘等大气污染物排放占到20%~70%。因此，烧结的节能减排和技术升级对于整个钢铁行业的转型具有引领作用。近年来，烧结工艺节能减排的发展走上了快车道，部分钢铁企业配置了多污染物超低排放装置，污染物排放达到了超低排放要求，达到了国际领先水平；同时，重点钢铁企业烧结工序吨矿能耗(标煤)已从2000年初的70 kg/t降到45 kg/t左右，居国际先进水平；烧结控制水平也取得了长足的进步。然而，新时期下“双碳”目标的提出，对烧结技术的发展提出了更高要求，当前铁矿烧结的发展方向主要为“深度净化、节能减碳、功能升级”。

本文围绕烧结技术绿色低碳化，从深度减排、富氢烧结、协同处置固废三方面对当前烧结行业新技术进行综述，其中对超低温SCR脱硝、烧结CO催化氧化释热耦合SCR脱硝、高配比富氢燃料烧结、基于固废协同处置的低成本烧结等具有代表性的新技术进行了重点阐述，以期为新时期烧结技术的绿色低碳发展提供借鉴与参考。

1　深度减排新技术

面对超低排放的严苛要求，企业需要警惕不惜代价进入超低排放误区。同时，企业要考虑可持续发展，应满足资源节约型、环境友好型要求，即低资源能源消耗、高经济效益、低污染排放和低生态破坏。因此，开发低碳低成本、深度减排烟气净化新技术具有重要意义。

1.1　传统超低排放技术比较

1.1.1　两级活性炭法烟气净化技术

活性炭法是一种集除尘、脱硫、脱硝与除二噁英于一体的烟气净化技术，在国内外得以广泛应用。该技术通过活性炭层碰撞、遮挡及扩散捕集来实现除尘功能；利用活性炭吸附及催化特性使烟气中SO_2、水蒸气和氧反应生成H_2SO_4吸附在活性炭孔隙内，吸附饱和后经430 ℃左右加热再生释放出高质量浓度SO_2气体，再生活性炭循环使用，高质量浓度SO_2气体用于资源化[1]；利用活性炭以吸附为基础的催化还原NO_x特性可实现NO_x的高效脱除，活性炭对NO_x的吸附效果主要受其微孔大小影响，当微孔平均尺寸为0.7 nm时，吸附效果最好[2]；而二噁英物理吸附于活性炭孔隙内，高温解析时可分解脱除。

SO_2会与NH_3结合生成$(NH_4)_2SO_4$，并会抑制脱硝反应效率。因此，一般设置两级活性炭吸附层，一级吸附塔实现脱硫功能，二级吸附塔实现脱硝功能，但这也是导致活性炭法一次性投资较高的主要原因[3]。

1.1.2　半干/干法脱硫耦合SCR脱硝技术

半干/干法脱硫耦合SCR脱硝技术可分为石灰/消石灰半干法耦合SCR组合工艺和活性炭干法耦合SCR组合工艺。以上组合工艺可以充分发挥石灰/消石灰半干法或活性炭干法对SO_2高效去除和SCR对NO_x高效催化还原的叠加优势，相对两级活性炭法投资较低。其中，半干法能够实现SO_2高效脱除，但存在脱硫副产物难资源化、二噁英无法去除的不足；活性炭法能深度协同脱除SO_2、二噁英、粉尘、重金属及其他有机污染物，并能实现SO_2资源化[4]。

此外，以上两种组合工艺均存在脱硝运行成本高的不足，这是因为目前商业化的SCR脱硝技术适用温度为180~350 ℃，而待脱硝烟气烟温低(100~150 ℃)，脱硝时需消耗大量煤气将烟气加热到反应所需温度。

1.1.3　技术对比

综合两级活性炭法脱硫脱硝技术、半干法脱硫耦合SCR脱硝组合工艺和干法脱硫耦合SCR脱硝组合工艺，从技术原理、副产物资源化利用、运行成本及投资成本等几个方面进行了比较，具体见表1。由表1可知：活性炭在吸附脱硫的基础上，在NH_3参与下还可以实现SCR脱硝，同时对粉尘、重金属、二噁英具有较好的协同脱除能力，且能实现SO_2资源化，是一种优势突出的净化技术；另外，双级活性炭法初始投资成本最高，但同时具有最低的运行成本。工程实践表明，活性

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

表 1 几种超低排放技术对比

Table 1 Comparison of various ultra-low emission technologies

项目	两级活性炭法	活性炭 + SCR	半干法 + SCR
脱硫脱硝技术原理	活性炭脱硫、活性炭脱硝	活性炭脱硫，NH_3-SCR 脱硝	石灰/消石灰脱硫，NH_3-SCR 脱硝
多污染物协同	能	能	不能
SO_2 资源化	能	能	不能
运行成本	低	较低	高
投资成本	高	较低	低

炭法尤其是双级活性炭法，长期运行后经济效益显著。

1.2 低碳低成本深度净化新技术

当前，不论是双级活性炭工艺还是半干/干法脱硫耦合升温 SCR 脱硝工艺，均能较好实现烟气超低排放的要求，但同时污染物脱除成本高的问题也不容忽视，且升温 SCR 技术带来了巨量的煤气消耗，产生的碳排放与当今“双碳”政策背道而驰，因此，开发低碳低成本深度净化新技术是新形势下的必然要求。

1.2.1 超低温 SCR 脱硝技术

目前，商业 SCR 催化剂以 V-W-Ti 体系为主，催化剂在一定的温度条件下，以氨为还原剂，可以有效脱除烟气中的 NO_x。根据适用温度分类，催化剂可分为高温、中温和低温 3 种，但目前低温催化剂的适用温度为 180 ~ 280 ℃，难以与现有烟气良好匹配。

针对烧结烟气温度低的特点，研究人员开展了超低温 SCR 脱硝催化剂研究，MnO_x 具有多变的化学价态，在超低温脱硝中展示出良好的性能，实验室条件下，该催化剂在 80 ℃时 NO_x 转化率最高可达 98.2%[5]。将 Mn 与其他金属组合(如 Co、Cu、Ni、Ti 等)制备成复合催化剂，可在 150 ℃以内实现近 100% 的 NO_x 转化率[6-7]。此外，针对 V-W-Ti 体系催化剂，增加钒的质量分数可以降低适用温度[8]。YU 等[9-10]发现 CrO_x 的催化能力与材料的酸性和氧化还原性有关，并制备了一种约 3 nm 的超细 CrO_x 材料，不仅具有优异的选择性和抗硫中毒性能，在 125 ℃时 NO 的转化率超过 90%。中冶长天研发团队通过沉积耦合的方法，合成了稀土基催化剂，并通过硫酸盐化反应后，其抗水耐硫性能大幅提升，在湿度为 10%、含氧量为 16%、SO_2 质量浓度为 35 mg/m^3、NO_x 质量浓度为 400 mg/m^3、氨氮比为 1∶1、空速为3 500 h^{-1}的烟气条件下，140 ℃时脱硝率为 81%，180 ℃时脱硝率为 96%，如图 1 所示。

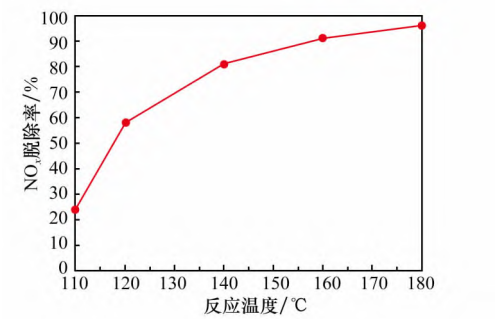


图 1 稀土基脱硝催化剂的低温催化性能

Fig. 1 Low temperature catalytic performance of rare earth based denitration catalyst

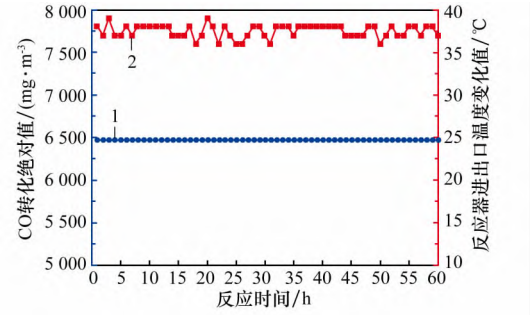
1.2.2 烧结 CO 催化氧化释热耦合 SCR 脱硝技术

烧结烟气除含有 SO_2、NO_x、粉尘等常规污染物外，还含有大量 CO，其质量浓度在 4 000 ~ 10 000 mg/Nm^3。1 mol CO 完全氧化转化成 CO_2 会放出 283 kJ 的热量，经计算 5 000 mg/Nm^3 的 CO 完全转化可以使烟气温度升高约 45 ℃。因此，若充分利用烧结烟气中的 CO，可以有效减少额外能源的使用，升温后烟气即可达到 180 ~ 200 ℃，从而满足现有较为成熟的低温 SCR 催化剂使用需求[11]。

目前，市场上并无大型的用于工业复杂烟气 CO 氧化催化剂供应商，市售的催化剂大多为霍加拉特剂或其改良配方，主要成分为氧化铜和氧化锰，虽然霍加拉特催化剂在干燥环境下催化效果明显，但是湿润环境会使其失活，因此并不适用于含水量在 10% 左右的工业烟气。近期，本文作者团队研发的高分散具有低温活性的耐硫抗水 CO 氧化催化剂，如图 2 所示。由图 2 可知，在 SO_2 质量浓度为 35 mg/m^3、湿度为 10%、CO 质量浓

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

度为 7 000 mg/m^3、含氧量为 16%、反应温度为 160 ℃、空速为 5 000 h^{-1}的条件下，CO 转化率可达到 90% 以上，在存在设备散热的情况下，实际监测到的烟气温度升温约 37 ℃，升温效应可观，体现出良好的潜热利用前景。



1—CO 转化绝对值；2—反应器进出口温度变化值。

图 2　CO 催化氧化性能及放热效应

Fig. 2　CO catalytic oxidation performance and exothermic effect

2　富氢烧结新技术

钢铁工业约占全国 CO_2 排放总量的 15% 左右[12]，而烧结工序 CO_2 排放量占钢铁长流程排放总量的 7%～10%[13]。由于烧结工序能耗主要以固体燃料消耗为主，占整体能耗的 75%～80%，因此，优化燃碳技术对于烧结减碳具有重要意义。

2.1　传统固体燃料供热模式

目前，烧结主要采用碳基固体燃料供热，但其控制条件较为严格：① 含碳量控制要求严格。含碳量过高会使烧结炉内形成还原气氛，出现 FeO，铁酸钙液相被钙铁橄榄石液相和硅酸盐液相取代，影响烧结效果，过少则不能提供充足热量；② 挥发分堵塞料层。煤粉中的挥发分会在料层下部凝结，降低烧结料层透气性，导致炉内温度传导不均匀，影响烧结效果；③ 蓄热效应。在抽风烧结过程中，气体在向下运动时不断升温，到达燃烧带后温度达到最高，这使得下层物料获得了更多的热量，导致料层上下受热不均匀，温差最高可达 120 ℃以上；④ 冷却速度不易控制。理想的冷却速度应低于 100 ℃/min，高温（>1 200 ℃）保持时间在 1.5～2.0 min 为最佳。目前，使用纯固体燃料的烧结料表层冷却速度为 158 ℃/min，高温保持时间仅为 1.17 min，而下层烧结料冷却速度只有 71 ℃/min，高温保持时间却长达 4.33 min[14]。

2.2　气固复合燃料供热原理分析

与碳系固体燃料相比，气固复合燃料则是在点火后将气体燃料喷入料面，以减少固体燃料配比。在抽风系统的作用下，形成了表层固体燃料＋点火煤气供热，中上层气固复合燃料供热，下层固体燃料＋蓄热的新型供热模式，具体如图 3 所示。

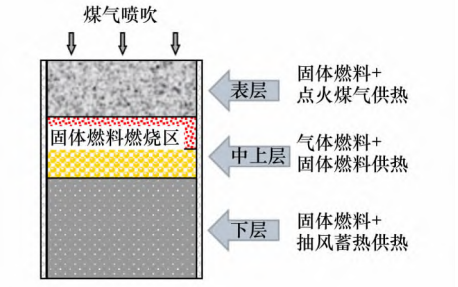


图 3　气固燃料复合供热烧结机理

Fig. 3　The sintering mechanism of gas-solid fuel composite heating

气固复合燃料供热可加速烧结的热传导过程，可有效解决上层热量不足、下层热量过剩的问题，实现均热烧结，有效提高燃料热效率。此外，烧结利用氢系燃气替代部分固体燃料，还能实现烧结过程 CO_2、NO_x 显著减排。该技术已在日本、我国韶钢及中天钢铁等企业应用，应用实例及相关指标见表 2。实践结果表明，该技术应用后，炉内返矿量、转鼓强度、低温还原粉化率均有所改善，显著提升了经济效益[15]。

表 2　气固复合燃料供热应用实例

Table 2　Application examples of gas-solid composite fuel heating

应用地点	建成时间	喷加气体	热量置换率	能耗降低量(标煤)/kg
日本	2009	天然气	1∶2.8	1.65
梅钢	2013	焦炉煤气	1∶2.6	1.48
韶钢 5 号烧结机	2017	CTRF-1 型燃气	1∶3.5	1.99
常州中天钢铁	2020	CTRF-2 型燃气	1∶6.5	2.53

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

2.3 高配比富氢燃料烧结新技术

为进一步降低烧结过程碳排放，叶恒棣等[16]开发了高配比富氢燃料烧结新技术。该技术大大降低了焦粉配比，并研究对比了使用焦炉煤气和天然气作为气体燃料喷入对烧结料面的影响，结果见表3。由表3可以看出，无论是使用焦炉煤气还是天然气，降低配碳比后，烧结矿质量指标变化幅度不大，烧结质量不受影响。但使用热值更高的天然气作为富氢燃料时，烧结速度明显加快，利用系数显著提高。

表3 焦炉煤气与天然气添加对烧结矿质量的影响

Table 3 Effect of coke oven gas and natural gas on sinter quality

项目	焦粉配比(质量分数)/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率(质量分数)/%	转鼓强度(质量分数)/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})
焦炉煤气	5.60	23.22	70.70	65.37	1.38
	5.30	24.05	71.84	68.40	1.44
	5.15	23.51	69.01	66.30	1.35
	5.00	23.50	70.65	67.47	1.38
天然气	4.62	26.71	72.87	61.73	1.63
	4.22	26.99	72.80	62.93	1.62
	3.62	26.14	72.30	62.67	1.60

此外，采用焦炉煤气和天然气对烧结减碳、降耗、NO_x减排及经济效益的影响见表4。由表4可知，采用高配比富氢燃料不仅有效降低了碳排放量，还有效减少了烟气中NO_x排放量，其中天然气的碳减排量和能耗降低量最为明显。结合已有研究可知，添加焦炉煤气时，烧结配碳量可从5.6%降至5.0%，由此可实现净减碳比约为10.2%，最终实现吨矿成本下降3.84元，吨矿工序能耗(标煤)降低约4.86 kg；而添加天然气时，烧结配碳量可从4.62%下降至3.60%，实现净减碳比约为21.20%，最终实现吨矿成本下降5.28元，吨矿工序能耗(标煤)降低约为7.58 kg[16]。

表4 焦炉煤气与天然气添加的技术与经济指标

Table 4 Technical and economic indicators of adding coke oven gas and natural gas

气体种类	热值/(kJ·m^{-3})	配碳(标煤)(质量分数)/%	净减碳比	NO_x减排质量浓度(mg·m^{-3})	能耗降低量(标煤)/kg	经济指标/元
焦炉煤气	17 220	5.0	10.2%	60.7	4.86	3.84
天然气	34 146	3.6	21.2%	111.0	7.58	5.28

3 协同处置固废新技术

随着我国城镇化、工业化的快速发展，我国有机固废和工业固废激增，其堆存不仅污染生态环境，还占用大量土地，成为制约社会可持续发展的重要因素。同时，城市固废、冶金固废除了具有污染属性，还具有较好的资源属性，为典型的低品质冶金原料。

3.1 工业炉窑处置冶金、市政固废现状

城市有机固废具有较高的热值，热解后产生的衍生燃料热值约为18～30 MJ/kg，与传统的固体燃料接近，可作为工业炉窑替代燃料。德国、瑞士、日本等发达国家利用水泥窑协同处置城市固废已经有30多年历史，国内的北京水泥厂、海螺水泥、越堡水泥等企业已成功利用水泥窑协同处置生活垃圾和城市污泥，但水泥窑城市固废消纳能力十分有限、二次污染治理水平有待提升。

钢铁工业产生含铁粉尘及其他大量有价元素，如Zn、Ca等，循环使用可实现钢铁固废的减量、资源化利用与无害化处置。以含铁粉尘为例，钢铁厂内部处理技术主要有钢铁系统直接内循环法、转底炉单独处理法和回转窑单独处理法。其中，钢铁系统直接内循环法只注重难处理冶金粉尘中铁元素的回收，而重/碱金属仍循环在钢铁系统

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

内，严重影响了高炉顺行和产品品质；转底炉和回转窑单独处理法均存在富集能耗高、生产效率低、运行成本高、设备运行不畅、含铁产品质量不佳及有价组元回收率低等问题，均未实现处理冶金粉尘高效综合利用[17]。

3.2　烧结协同处置冶金、市政固废适配分析

与水泥生产行业相比，我国是世界上钢铁生产规模最大的国家，协同处置城市固废技术却未得到充分发展。钢铁生产过程中，大量化石燃料的燃烧产生高温气氛，实现物质或能量的转换。同时，析出的污染物经处理后达标排放，具备协同处置城市固废的各项条件。

钢铁冶炼中，烧结、高炉和焦炉均可实现废物消纳，而烧结具有独特的优势：① 原料适应性强。烧结工艺本身配料物质配比波动大，对原料的适应性强，加之烧结产能比较大，对有害元素的耐受性高；② 烧结温度高。高温有利于有害物质析出，提高废物及能源利用率；③ 烟气治理容量大。容量大可避免其他废弃物引入所造成的烟气污染物质量浓度波动不会对现有系统造成显著影响。

大量科研工作者对烧结过程协同处置冶金及市政固废展开了研究。HAN 等[18-19]发现，在 500 ℃下碳化的生活垃圾热值为 25.47 MJ/kg，可以作为替代燃料，当其替代率为 20% 时，对烧结矿的质量影响不大。烧结处理垃圾焚烧飞灰可以降低二噁英质量分数，并固化重金属，是一种极具前景的飞灰处理工艺，但将其以粉末的形式加入反而会增加烟气中的二噁英质量浓度[20]。GAN 等[21]将粉煤灰制成球状添加到烧结工艺中，二噁英的降解率最高可达 96.61%。此外，灰分中 K、Na 盐会造成炉内结瘤和腐蚀，需要在入炉前进行水洗预处理，需要进行相同预处理的还包括一些含铁高盐的固废；对于一些含锌量高的固废，如高炉和电炉含锌粉尘，则需要火法还原脱锌预处理，在烟气中回收次氧化锌后还原物料进入烧结，实现复杂成分固废烧结协同处置。

3.3　基于固废协同处置的低成本烧结新技术

冶金和市政固废依据其物质、能源属性分析可分为 4 类：① 高铁、高钙、低盐、低锌固废；② 含铁高盐固废/市政飞灰；③ 含铁高锌固废；④ 有机固废及部分工业危废。其中，第①类固废有害成分较低，达到直接加入烧结机要求，但其粒度和水分一般不能满足要求。对于粒度小于 0.5 mm 粒级固废，需采用预制粒方案；粒度大于 8 mm 粒级固废，需进行破碎预处理；当水分大于 10% 时，需干燥处理。第②类固废含有较多钾、钠、氯，直接回用会导致烧结炉箅条腐蚀和电除尘堵塞，需基于其易溶于水的特征，采用水洗、压滤处理后得到的滤料再返回烧结，而水洗产生高盐废水进入后续处理环节。第③类固废，直接回用烧结会导致烧结矿中含锌量增加，最终导致高炉运行不畅，需通过与还原剂混合，经过造球或者直接粉状进行火法还原脱锌，通过烟气中回收次氧化锌，剩余的还原物料再进入烧结。第④类固废具有较高的热值，可通过燃烧或热解处理，热量或热解气用于烧结使用，获得的残渣通过配料后进入烧结，产生的飞灰通过水洗脱氯预处理后再进入烧结。综上，构建以烧结机为核心的钢铁企业固废与市政固废协同处置中心，整体思路如图 4 所示。

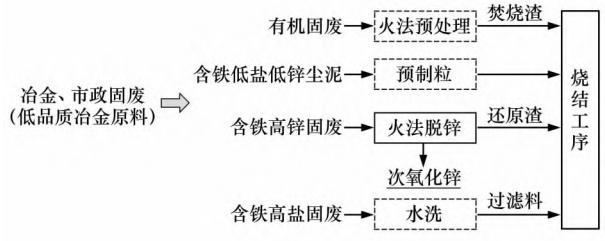


图 4　基于固废协同处置的低成本烧结工序优化路径

Fig. 4　Low-cost optimization path of sintering process based on solid waste co-processing

4　结　论

(1) 铁矿烧结污染物减量在实现深度减排的同时，应重点关注技术经济效益、能耗指标、生态效益等属性。两级活性炭法烟气净化技术、超低温 SCR 脱硝技术、CO 催化氧化释热耦合 SCR 脱硝技术是当前实现废物资源化、治污降耗、非常规污染物脱除及潜热利用的先进技术手段。

(2) 铁矿烧结过程减碳是钢铁长流程生产降碳的重要一环，传统固体燃料供热存在诸多问题，高配比富氢燃料烧结新技术在保证烧结矿质量的

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

同时，净减碳比突出，吨矿成本、吨矿能耗大幅降低，是实现烧结绿色低碳进步的有效技术手段。

(3) 铁矿烧结对原料适应性强，且均配置了较完善的尾气处理系统，针对低品质冶金、市政固废处理难的问题，低成本固废协同处置烧结新技术，可降低烧结工序成本，同步实现工业产能与城市发展共融共生，大幅提升钢铁工业的竞争力。

参考文献:

[1] 康建刚,李俊杰,魏进超. 基于生命周期评价的烧结烟气净化工艺碳足迹分析[J]. 烧结球团,2017,42(6):11-15.
KANG Jiangang, LI Junjie, WEI Jinchao. Research on carbon footprint assessment of sintering flue gas purification process based on life cycle assessment [J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(6):11-15.

[2] YAN Z,LIU L,ZHANG Y,et al. Activated semi-coke in SO_2 removal from flue gas: selection of activation methodology and desulfurization mechanism study [J]. Energy & Fuels,2013,27(6):3080-3089.

[3] 叶恒棣,李俊杰. 活性炭法烟气多污染物深度净化技术[J]. 烧结球团,2021,46(6):97-99.
YE Hengdi, LI Junjie. Advanced purification technology of multi-pollutant in flue gas by activated carbon method [J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(6):97-99.

[4] 闫晓淼,李玉然,朱廷钰,等. 钢铁烧结烟气多污染物排放及协同控制概述[J]. 环境工程技术学报,2015,5(2):85-90.
YAN Xiaomiao, LI Yuran, ZHU Tingyu, et al. Review of emission and simultaneous control of multiple pollutants from iron-steel sintering flue gas [J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2015,5(2):85-90.

[5] 汤常金,孙敬方,董林. 超低温(<150 ℃) SCR 脱硝技术研究进展[J]. 化工学报,2020,71(11):4873-4884.
TANG Changjin, SUN Jingfang, DONG Lin. Recent progress on elimination of NO_x from flue gas via SCR technology underultra-low temperatures (<150 ℃) [J]. CIESC Journal,2020,71(11):4873-4884.

[6] XU Q, FANG Z, CHEN Y, et al. Titania-Samarium-Manganese composite oxide for the low-temperature selective catalytic reduction of NO with NH_3 [J]. Environmental Science & Technology,2020,54(4):2530-2538.

[7] GAO G, SHI J W, FAN Z, et al. MnM_2O_4 microspheres (M = Co, Cu, Ni) for selective catalytic reduction of NO with NH_3: comparative study on catalytic activity and reaction mechanism via in-situ diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy [J]. Chemical Engineering Journal,2017,325:91-100.

[8] INOMATA Y, HATA S, MINO M, et al. Bulk vanadium oxide versus conventional V_2O_5/TiO_2: NH_3-SCR catalysts working at a low temperature below 150 ℃ [J]. Acs Catalysis,2019,9(10):9327-9331.

[9] ZHANG Y, ZHANG H, ZHOU L, et al. DRIFT study on Cr_2O_3-SO_4^{2-}/TiO_2 catalyst for low temperature selective catalytic reduction of NO with NH_3 [J]. Chemical Research in Chinese Universities,2014,30(2):279-283.

[10] YU S, XU S, SUN B, et al. Synthesis of CrO_x/C catalysts for low temperature NH_3-SCR with enhanced regeneration ability in the presence of SO_2 [J]. Rsc Advances,2018,8(7):3858-3568.

[11] 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.

[12] 姚同路,吴伟,杨勇,等. "双碳"目标下中国钢铁工业的低碳发展分析[J]. 钢铁研究学报,2022,34(6):505-513.
YAO Tonglu, WU Wei, YANG Yong, et al. Analysis on low-carbon development of China's steel industry under "dual-carbon" goal [J]. Journal of Ironand Steel Research,2022,34(6):505-513.

[13] 刘含笑,吴黎明,赵琳,等. 钢铁行业 CO_2 排放特征及治理技术分析[J]. 烧结球团,2022,47(1):38-47.
LIU Hanxiao, WU Liming, ZHAO Lin, et al. Analysis on CO_2 emission characteristics and treatment technologies in iron and steel industry [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):38-47.

[14] 李文琦. 优化烧结料层透气性和温度场的研究[D]. 长沙: 中南大学,2012.
LI Wenqi. Investigation on optimizing permeability and temperature field of sintering bed [D]. Changsha: Central South University,2012.

(下转第82页)

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

LI Qiang. Study on separate adding technology of fine grained fuels in sintering process [J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(2):9 – 12.

[10] 闫小卫. 烧结燃料分加工艺优化试验研究 [J]. 山东冶金,2017,39(3):23 – 25.
YAN Xiaowei. Experimental study on separated addition process optimization of sintering fuel [J]. Shandong Metallurgy,2017,39(3):23 – 25.

[11] 冯根生,吴胜利,赵佐军. 改善厚料层烧结热态透气性的研究 [J]. 烧结球团,2011,36(1):1 – 5.
FENG Gensheng,WU Shengli,ZHAO Zuojun. Research on improving hot permeability of deep bed sintering [J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(1):1 – 5.

[12] 薛方,熊军,石江山,等. 湿熄焦的分加对烧结生产的影响研究 [J]. 烧结球团,2019,44(2):9 – 12.
XUE Fang,XIONG Jun,SHI Jiangshan,et al. Study on effect of separate addition of wet quenched on sintering production [J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(2):9 – 12.

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

(上接第26页)

[15] 叶恒棣,周浩宇,王业峰,等. 分层供热富氢烧结关键技术探索与研究 [J]. 钢铁,2021,56(12):134 – 141.
YE Hengdi, ZHOU Haoyu, WANG Yefeng, et al. Exploration and research on key technologies of multi-layer heat supplying and H_2-rich sintering [J]. Iron and Steel,2021,56(12):134 – 141.

[16] 叶恒棣,周浩宇,王兆才,等. 高配比富氢燃料烧结技术研究及展望 [J]. 烧结球团,2020,45(5):1 – 7.
YE Hengdi, ZHOU Haoyu, WANG Zhaocai, et al. Research and prospect of high proportion hydrogen-rich fuel sintering technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2020,45(5):1 – 7.

[17] 李威,谭炳富,栗克建,等. 钢铁厂含锌固废资源循环利用研究现状及发展态势 [J]. 有色冶金节能,2021,37(1):8 – 12.
LI Wei,TAN Bingfu,LI Kejian,et al. Research status and development trend of zinc-containing solid waste recycling in iron and steel plants [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy,2021,37(1):8 – 12.

[18] HAN J,HUANG Z,QIN L,et al. Refused derived fuel from municipal solid waste used as an alternative fuel during the iron ore sinter process [J]. Journal of Cleaner Production,2021,278:1 – 8.

[19] GAN M,FAN X,JI Z,et al. Application of biomass fuel in iron ore sintering: influencing mechanism and emission reduction [J]. Ironmaking & Steelmaking,2015,42(1):27 – 33.

[20] GHOULEH Z,SHAO Y. Turning municipal solid waste incineration into a cleaner cement production [J]. Journal of Cleaner Production,2018,195:268 – 279.

[21] YAN D,PENG Z,YU L,et al. Characterization of heavy metals and PCDD/Fs from water-washing pretreatment and a cement kiln co-processing municipal solid waste incinerator fly ash [J]. Waste Management,2018,76:106 – 116.

(上接第62页)

[11] NERI F,TIRRONEN V. Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis [J]. Artificial intelligence review,2010,33(1):61 – 106.

[12] STORN R,PRICE K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal global optimization,1997,11(4):341 – 359.

[13] 葛延峰,金文静,高立群,等. 多种群并行的自适应差分进化算法 [J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(4):481 – 483.
GE Yanfeng,JIN Wenjing,GAO Liqun,et al Multi population parallel adaptive differential evolution algorithm [J]. Journal of Northeast University,Natural Science Edition,2011,32(4):481 – 483.

[14] 郑威迪,李志刚,贾涵中,等. 基于改进型鲸鱼优化算法和最小二乘支持向量机的炼钢终点预测模型研究 [J]. 电子学报,2019,47(3):700 – 706.
ZHENG Weidi, LI Zhigang, JIA Hanzhong, et al. Research on steelmaking end point prediction model based on improved whale optimization algorithm and least squares support vector machine [J]. Acta electronica Sinica,2019,47(3):700 – 706.

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