长流程不锈钢企业高温炉窑协同处置危废工艺设想

郑锡瀚[1]，陈铁军[1]，潘料庭[2]，周仙霖[1]，黄学忠[2]，陈永亮[1]
（1. 武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院；b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点试验室，湖北 武汉 430081；2. 广西北港新材料有限公司，广西 北海 536000）

摘要：受新冠疫情的影响，全球钢铁市场低迷，导致钢铁企业普遍出现窑炉产能过剩的现象。钢铁企业有富余的能力调动高温窑炉协同处置企业内部所产生的固废、其他工业固废与城市危废，不仅能够减轻区域内环保压力，而且能够提高经济效益。本文以某公司现有的烧结机、高炉、炼钢炉窑、回转窑等典型长流程不锈钢企业的高温炉窑为例，提出钢铁高温炉窑协同处置危废技术的工艺设想，包括烧结机协同处理危废技术、高炉协同处理危废技术、回转窑处理含锌粉尘工艺技术、炼钢窑协同处理危废技术。在十四五新时期，通过开发有效的固废处置技术，促进长流程不锈钢企业清洁生产，推动区域循环经济联动，辅助提升钢铁企业的经济、社会和环境效益；同时，为我国危废处置行业提供一条低成本的处置途径。

关键词：钢铁工业；高温炉窑；协同处置；危险废弃物；十四五规划
中图分类号：TD98；TF089 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)06－0016－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.06.080

Scenarios for co-processing hazardous waste process of high-temperature furnaces for long-flow stainless steel enterprises

ZHENG Xihan[1], CHEN Tiejun[1], PAN Liaoting[2], ZHOU Xianlin[1], HUANG Xuezhong[2], CHEN Yongliang[1]
(1. *Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Hubei Province Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan* 430081, *Hubei, China*; 2. *Guangxi Beibu Gulf New Materials Co., Ltd., Beihai* 536000, *Guangxi, China*)

Abstract: Affected by the COVID-19 epidemic, the global steel market is in a downturn, which leads to the phenomenon of overcapacity of furnaces in steel enterprises. Iron and steel enterprises have the surplus capacity to mobilize high-temperature furnaces to cooperatively dispose solid wastes, other industrial solid wastes and urban hazardous wastes generated within enterprises, which can not only reduce the pressure of environmental protection in the region, but also improve economic benefits. In this paper, the existing high-temperature furnaces of long-flow stainless steel enterprises such as sintering machines, blast furnaces, steelmaking furnaces, rotary kilns and other typical long-flow stainless steel enterprises are taken as examples, and scenarios for co-processing hazardous waste process in steel high-temperature furnaces are put forward, including sintering machine co-processing hazardous waste technology, blast furnace co-processing hazardous waste technology, rotary kiln processing zinc-containing dust process technology, and steelmaking kiln co-processing hazardous waste technology. In the new period of the 14th Five-Year Plan, by developing effective solid waste disposal technology, the cleaner production of long-flow stainless steel enterprises will be promoted, the linkage of regional circular economy will be promoted, the economic, social and

收稿日期：2022－08－01；**修回日期**：2022－08－25
基金项目：湖北省教育厅科学研究计划资助项目(Q20191110)
作者简介：郑锡瀚(1995—)，男，博士研究生，从事二次资源综合利用方面的研究。
通信作者：陈铁军(1973—)，男，博士，教授，从事烧结球团、直接还原、复杂铁矿分选、二次资源综合利用方面的研究。

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

environmental benefits of iron and steel enterprises will be promoted, and a low-cost way for hazardous waste disposal industry in China will be provided.

Key words: iron and steel industry; high temperature furnace; co-processing; hazardous wastes; 14th Five-Year Plan

进入十四五新时期以来，我国大力发展双碳经济与资源循环经济，重点规划了对钢铁行业低碳环保发展，在愈发严格的环保与碳减排要求，钢铁企业需要承担高额的排污费、环保税与固危废处置费用，并且需要加快低碳清洁生产转型进程。此外，受新冠疫情的影响，钢铁市场需求弱化，导致我国钢铁产业产能过剩。为应对以上挑战，我国提出并鼓励发展工业炉窑协同处置危废工艺这一可行方法[1]。钢铁企业通过调动富余的产能从事固废处置产业，能够降低环保压力并提高经济效益。

目前，我国正在大力推动环保技术的发展，不断出台生态环保产业发展的利好政策，环保产业将会迎来更大的发展前景。因此，长流程不锈钢企业积极响应国家政策与行业要求，抓住新机遇，开拓新的发展思路，完成现有的烧结机、高炉、炼钢炉窑、回转窑等高温炉窑协同处置危险废弃物(简称“危废”)的新方法、新工艺的开发，因地制宜发展发展环保产业。充分利用钢铁炉窑的富余产能与完善的环保配套设施，能够节省巨额的固危废处置生产线的建设费用，实现工业危废与城市危废低成本处置，缓解区域环保压力，提升企业效益，促进长流程不锈钢企业转型，实现清洁生产。

1　开发钢铁高温炉窑协同处置危废可行性

1.1　工艺优势

面对新时期的环保要求与挑战，我国危废处置能力不足的难题亟待解决。在很长一段时间内，我国处置工业危废与城市危废的主要处置方法为填埋和焚烧。实际上，填埋并不适用于处置危废，尽管该法具有处置成本低，操作方式简单，以及填埋废弃物能重新进行处置的优势，但是物理填埋占地面积过大，且填埋物的渗出液容易造成地下水污染、产生恶臭、滋生蚊虫等环境卫生问题[2]。焚烧工艺更适合处置能够提供热值的市政垃圾或有机固废，该工艺节约土地，能够充分回收热量应用于发热发电，并且通过垃圾分类，能够有效降低焚烧过程对环境的危害。然而这类垃圾中热值较高的成分多为有机物，其在焚烧过程中会产生二噁英、NO_x 等有害烟气与表面附着有重金属与二噁英的焚烧飞灰，造成大气污染[3]。

以上两种常规的处置方法存在二次污染、资源浪费以及高投资高运行费用等问题，因此，亟需寻求有效的低成本的固废资源化、无害化的处置方式。经研究发现[4]，利用钢铁高温炉窑协同处置危废技术能够实现固危废减量化、资源化、无害化。钢铁高温炉窑协同处置危废的原理为高温焚烧，但是相较于常规的垃圾焚烧技术具有以下先进性：

(1) 相较于新建专用焚烧厂，通过技术改造建设高温炉窑协同处置固危废产业可节约资金投入。

(2) 在 1 500 ~ 1 550 ℃的温度下对物料进行还原熔炼(垃圾焚烧的温度为 850 ℃以上)，可彻底分解危废中有毒有害成分。其中，有价金属资源化再利用，无利用价值的成分固定于渣相后用于建材生产。该做法可进一步实现危废资源化利用，极大程度降低对环境造成的二次破坏。

(3) 由于钢铁生产中各个工序的高温炉窑的生产状况差异大，导致烟气特性大不相同，所配备的烟气处理系统有所差异，因此整个钢铁工业所配备的烟气处理系统较之垃圾焚烧行业的适用性更广、包容性更强。

(4) 有效利用固危废中的有价金属或者热值成分，降低钢铁主业的生产成本。

因此，钢铁高温炉窑协同处置危废技术适用于城市危废与工业危废(特别是金属质量分数

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

高的危废或冶金固废），能够有效地资回收金属资源，充分利用可燃性固废的热值，代替部分生产原料，实现固废的资源化与无害化利用。

1.2 成本优势

1.2.1 降低投资压力

垃圾焚烧厂设备购买与生产车间的建设所需要的投资成本较高。目前我国垃圾焚烧厂主要的焚烧炉窑为机械炉排炉与循环流化床。其中焚烧炉窑的投资成本约为30万~70万元/吨；并且设备的运行成本（主要包括检修维护费用、水费、电费、药剂费等）约为100~120元/吨[5]。相较之下，利用现有的钢铁高温炉窑作为固危废处置设备，通过对生产车间与烟气系统进行优化改造后即可投入使用，节省了前期的主体炉窑与配套设施的建设、场地与人工等各方面的投资。

1.2.2 节约原料成本

根据华安证券统计，截至2021年，国际市场上的铁矿石与煤矿价格持续走高，现货市场上澳大利亚PB粉价格上涨至每吨1 490元；主焦煤价格则为每吨1 800元，这就导致钢铁生产成本大幅升高。另外，钢铁工业耗能巨大，其中烧结工序能耗（折标煤）约为48.08 kg/t；球团工序能耗（折标煤）约为24.35 kg/t。面对如此大的供需压力，钢铁企业的钢铁产量容易受到严重的影响，因此，需要加快固废的资源化发展进程，缓解原料压力。对于钢铁行业，可利用成本较低的城市生活垃圾，以及各行各业的有机固体废弃物作为替代燃料，并收集回收废旧钢铁制品代替废钢投入炼钢炉窑，降低钢铁工业对铁矿原料的依赖。

1.2.3 固废处置成本与收益

（1）降低危废处置成本。长期以来，钢铁工业产生的危废主要委托有处置资质的单位进行处理，需要投入巨额财力与大量人工物力。根据山东省设定的工业危废处置收费标准，剧毒性危废的处置价格为3 200~9 000元/吨；含重金属类污泥或废液的处置费价格为2 000元/吨；无机污泥的处置费价格为1 700元/吨。若是直接倾倒或填埋，则需要向相关部门缴纳排污费、环保税与固危废处置费用等。

（2）提高协同处置固危废经济效益。参考南宁市某危废处置单位的处置收费标准：危废的焚烧处置价格为4 000元/吨；物化处置价格为4 000元/吨；固化处置价格为2 000元/吨；剧毒类危废另议。

基于此，利用钢铁炉窑协同处置周边地区所产生的固危废，具备较高的经济收益。

1.3 技术可行

目前，欧美、日本等发达国家的钢铁工业拥有成熟先进的工艺技术，已成功开发并应用了高炉喷吹废塑料技术、含锌粉尘处理技术、焦炉处理废塑料技术等[6]。国外的钢铁企业不断探索新工艺，由固废产出企业向固废消纳企业转变。

相较之下，我国的协同处置危废技术开发与应用起步相对较晚。随着国家对环保监管的日趋严格，国内钢铁企业已将危废处置与原料燃料需求相结合，积极开展固废综合利用技术的开发，推动炉窑协同处置固危废技术在我国的应用发展。

2 钢铁高温炉窑协同处置固废技术适用分析

2.1 炉窑适用性分析

钢铁炉窑协同处置固废技术的技改成本较低，该技术不仅能在短时期内缓解我国危废处置能力不足的现状，还可以回收危废中的金属元素与热值[7]。然而钢铁生产过程对设备生产状况和产品把控严格，其对外来杂质的承受限度有限；此外，其要求适用的炉窑具备冶炼温度高，且具有氧化性或者还原性气氛条件与宽松的造渣制度，以及完善的污染处理系统。目前可实现协同处置危废的钢铁炉窑主要有烧结机、高炉、炼钢炉窑和回转窑。

2.2 固废适用性分析

钢铁炉窑协同处置危废必须以不影响生产与不造成二次污染为前提，从而进行处置工艺的设计。据此，适合钢铁工业炉窑进行无害化或资源化利用处理的危废应该满足如下条件[8]：

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

不得具备爆炸性、放射性或是剧烈反应性的危废；不含影响生产顺行或产品质量的有害成分；不含对炉窑设备具有较强的腐蚀性的物质；能够提供热源或钢铁生产所需的金属元素。

（1）工业危废。不锈钢产品经过铁前、炼钢、热轧、固溶、冷轧等多道工序进行生产，生产过程中各工序流程所排放的固危废种类多且量大。另外，随着区域工业化发展进程加快，各行业也会产出大量的工业危废。根据《国家危险废物名录》（2021 年），得到钢铁冶金危废与其他行业工业危废如表 1 所示。据相关部门统计，广西的冶金固危废的历年产生量与累积贮存量常年居高。原因在于冶金固危废大多为危废且种类繁多，物化特性复杂，其处置需要不同的技术与相关生产资质，这就导致冶金固危废缺乏合理的消纳方式，而发展钢铁高温炉窑协同处置技术能够有效地资源化利用各类冶金固废。

表 1　钢铁冶金危废与其他行业工业危废

Table 1　Metallurgical hazardous waste from the steel industry and industrial hazardous waste from other industries

所属行业	危废名称	来源及产生工序	危废类别	固废类别
钢铁行业	炼钢尘	炼钢工序除尘器收集	HW17	重金属铬含量超标
	含油污泥	轧钢工序废水处理	HW08	易燃，含铬汞等重金属，含有机污染物
	含酸污泥	轧钢工序、固溶工序废水处理	HW17	腐蚀性，六价铬含量超标
	含 Cr 污泥	轧钢工序废水处理	HW21	六价铬含量超标
其他行业	有色冶炼废物	有色金属冶炼、加工产业	HW48	重金属含量超标
	锌冶炼浸出渣	锌金属冶炼行业产出	HW48	锌铅金属含量超标
	铝灰渣	铝金属冶炼行业产出	HW48	重金属含量超标
	废矿物油	石化工业、设备运行维护	HW08	危废，易燃，含有机污染物
	表面处理废物	金属表面处理及热处理加工	HW17	铬含量超标
	染料、涂料废物	涂料、油墨、颜料生产过程中产生的废水处理污泥	HW12	铬含量超标或含有机污染物

（2）城市固废。居民生活、农业生产与医疗服务等过程中皆会产生大量的废试剂包装（包括塑料包装、木制包装、布制包装等）、废钢铁制品（废油桶、废油漆桶等）、废活性炭、医疗废物、焚烧飞灰[9]等。特别是近年来，受新冠疫情的影响，我国每年的医疗废物产生量与日俱增，除了部分感染性或具毒性的医疗废物需要利用特殊手段进行处置外，大约 80%～90% 的一般医疗废物能够作为燃料，其经过消毒后可利用高温炉窑进行协同处置[10]。根据《国家危险废物名录》（2021 年），得到常见的城市危废如表 2 所示。

表 2　常见的城市危废

Table 2　Common municipal hazardous wastes

危废名称	来源	危废类别	固废类别
医疗废物（塑料类）	医疗服务行业	HW01	感染性、损伤性、病理性、化学、药物性废物
废试剂包装	化学试剂产生的废包装	HW49	易燃
废油	机械运行维护	HW08	易燃，含有机污染物
焚烧飞灰	生活垃圾焚烧	HW18	含有二噁英（PCDD/Fs）、碱重金属等有害污染物
废油漆桶等铁制品	车辆维修行业、建筑行业	HW08	含有机污染物
废活性炭	固体废物焚烧过程中废气处理、化工行业生产的废活性炭	HW18、HW49	易燃，含有机污染物

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

3 钢铁高温炉窑协同处置危废技术路线探索

3.1 烧结机协同处置危废技术

烧结机协同处置危废技术主要应用于处置轧钢油泥(HW08)、钢材表面处理含酸污泥(HW17)、含铬废物和磷化渣(HW21),该技术能够高效回收利用其中的铁、铬、碳等有价元素[11],具体技术路线如图 1 所示。然而需要注意的是,在高温条件下,酸性污泥会逸出高温的酸性蒸汽,导致设备被腐蚀,因此,必须要调控好尘泥固废的配加量。目前,山东莱钢永锋钢铁、韶钢、威钢、水钢、首钢等国内大部分钢铁企业都将烧结机头除尘灰与机尾除尘灰等含铁尘泥配入烧结料中进行资源化利用。该技术将铬渣中的 Cr^{6+} 解毒还原为 Cr^{3+},实现铬渣无害化与资源化利用[12]。废除尘灰袋、含油棉纱、保温棉、废油管、废油、废含油滤纸、废含油滤布等软质可燃固废在经过搅碎后,可作为燃料使用。烧结工序具有完整的烟气净化系统,可处理复杂多样的烟气污染物,能够处理城市固危废(包括铁质量分数较高的危废、可燃性固废、部分焚烧飞灰),以及环境治理产生的废活性炭、废催化剂等工业固废[13]。

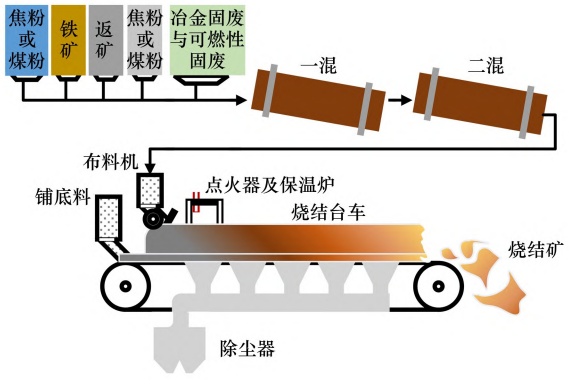


图 1 烧结机协同处置危废技术路线

Fig. 1 Technology route for sintering machine co-processing hazardous waste

3.2 高炉协同处置危废技术

目前,国内外发展较为成熟的高炉协同处置危废技术是高炉喷吹技术与煤/废塑料共焦化技术[14-15]。以高炉喷吹塑料为例,在不影响高炉顺行与铁水品质的前提下,将废塑料(或是废布料、废橡胶、废纸制品、废木制品等可燃性固废)干燥破碎造粒后,代替部分煤粉作为燃料与还原剂,自风口区喷吹进高炉进行处置[16],具体技术路线如图 2 所示。研究表明[17],废塑料的着火点较之煤更低。在高炉中,废塑料更易于燃烧,并且能够释放出大量的还原性气体与化学能参与矿石反应,同时废塑料有助于降低煤粉的着火点,起到一定的助燃作用。据此,在高炉喷吹煤粉的同时配加适量的可燃性固废,是能够减低对煤的依赖性、节约炼铁成本的可行之法,同时是处置可燃性固危废的高效经济之法。需要注意的是:① 可燃性固废在喷吹进高炉之前,需要进行破碎、造粒或焦化等预处理,否则会堵塞风口、影响燃烧效率、甚至影响高炉顺行;② 需要调配好入炉固危废与煤粉的比例与废塑料的粒度。另外可以将适量废油桶、油漆桶、喷漆瓶、松动剂等铁质废弃物破碎后加入到高炉铁水沟中,回收金属。

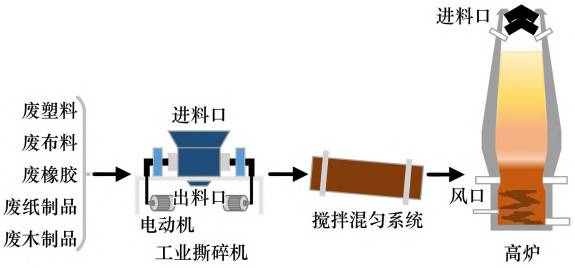


图 2 高炉协同处置危废技术路线

Fig. 2 Technology route for blast furnace co-processing hazardous waste

3.3 直接还原回转窑协同处置危废技术

区别于石灰回转窑与水泥回转窑以固化重金属离子及其他有毒物质为最终目的[18],直接还原回转窑协同处置危废技术的原理是将回转窑进行技术改造成直接还原回转窑,用于还原回收固废中的锌金属。还原脱锌后直还窑渣经破碎磁选后,磁性部分可返回烧结配料,非磁性部分用于建材生产,具体技术路线如图 3 所示。目前,某公司已运行该项技术,用于处置高炉布袋除尘灰与含锌尾矿废渣[19]。对比表 3 中含锌粉尘与直还窑渣的成分后发现,直接还原回转窑具有较强的 Fe 还原能力,以及较为显

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

著的回收 Zn、Pb 金属的能力，有利于处置含锌量较高的含铁尘泥。相对于烧结系统、炼钢系统等钢铁主业设备，直接还原回转窑对钢铁生产任务和钢铁品质影响较小，对外来杂质的承受限度更高，在协同处置过程中能够接收的固废种类更多，比如医疗废物、可燃性废弃物(有机废料、含油废物)、染料与涂料废物、有色金属冶炼行业产生的固废或尾矿、废催化剂等危废，以及市政污泥、生活垃圾等。

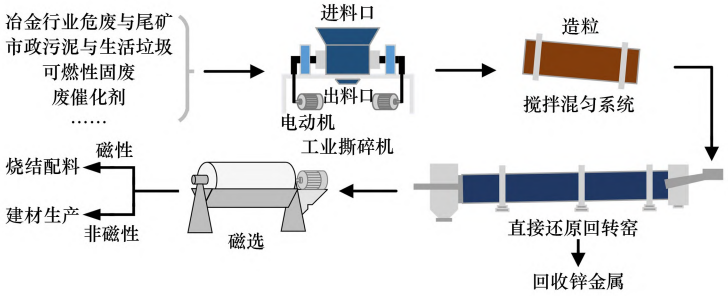


图 3　直接还原回转窑协同处置危废技术路线

Fig. 3　Technology route for direct reduction rotary kiln co-processing hazardous waste

表 3　直接还原回转窑处置含锌粉尘前后的化学成分对比(质量分数)

Table 3　Comparison of the composition before and after in the direct reduction rotary kiln processing zinc-containing dust　　%

项目	TFe	FeO	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	P	Zn	Pb	Cr
高炉布袋除尘灰	16. 08	3. 95	4. 69	3. 13	9. 62	5. 25	0. 001	6. 86	0. 28	0. 46
直还窑渣	12. 45	13. 41	19. 26	1. 68	26. 36	6. 00	0. 015	0. 59	0. 005	0. 89

3. 4　炼钢炉窑协同处置危废技术

以 RKEF 工艺(回转窑还原—矿热炉冶炼工艺)为例，将某公司轧钢工序、固溶工序所产生的酸洗污泥与炼钢电炉除尘灰等金属质量分数较高的尘泥转移至 RKEF 工艺进行处置，将其冶炼成镍铁合金，实现镍铬资源的资源化利用，具体技术路线如图4 所示。RKEF 工艺能够协同处置周边企业所产生的固废包括含酸污泥、含铬污泥等，城市的市政污泥、废钢铁制品、可燃性固体废弃物等。此外，宝武集团开发了利用转炉协同处置造船厂废油漆涂料桶与废活性炭的技术，在将废油漆桶残留物中的有机物、极微量元素和重金属分解转化的同时不影响产品品质[20]。

4　结论与展望

通过利用现有钢铁高温炉窑进行协同资源化处理，对实现钢铁企业可持续发展目标具有

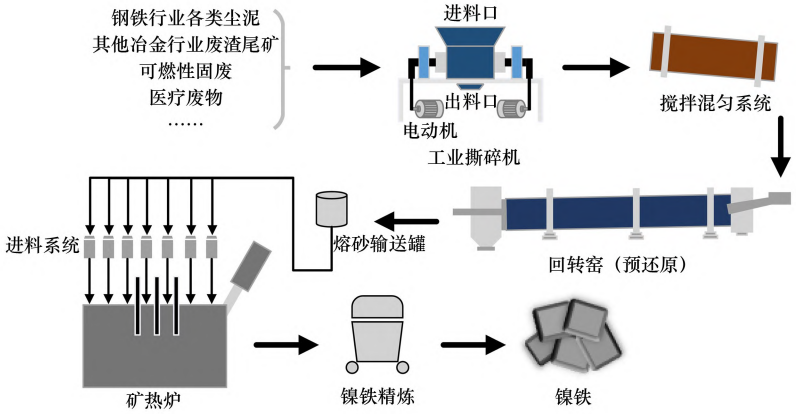


图 4　RKEF 工艺协同处置危废技术路线

Fig. 4　Flow chart of the RKEF process for the co-processing of hazardous waste

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

重要的意义。本文具体结论如下。

（1）发展钢铁高温炉窑协同处置危废技术是循环经济的重要领域，有利于推动长流程不锈钢企业“减量化、资源化、无害化”的绿色转型，促进区域循环经济联动，催动钢铁工业炉窑产能，提升钢铁企业经济效益、社会效益和环境效益。

（2）为危废低成本安全处置提供了新的途径，通过不锈钢企业高温炉窑进行协同资源化处理，可以快速提高我国危废无害化与资源化处理能力，有效缓解我国危废处置能力不足问题。

（3）发展钢铁炉窑协同处置工艺对社会环境的维护也能够产生积极的影响，从根源上杜绝跨省转移或倾倒危废等环境污染问题发生。

参考文献：

[1] 杜玉颖. 医药危废在工业窑炉中共处置的热化学反应和污染物排放特性的研究和应用[D]. 杭州：浙江大学，2015.
DU Yuying. Research and application on thermal chemical reactions and pollutant emission characteristics for co-disposal of pharmaceutical industry hazardous wastes in boilers and industrial furnances[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2015.

[2] 杨艳，安瑾，陆飞鹏. 危废填埋场渗滤液处理新工艺及工程案例[J]. 中国化工贸易，2019，11(28)：152.
YANG Yan，AN Jin，LU Feipeng. New technology and engineering case of leachate treatment in hazardous waste landfill[J]. Practical Application，2019，11(28)：152.

[3] 唐娜，李馥琪，罗伟锽，等. 废物焚烧及工业金属冶炼烟气中二噁英的排放水平及同系物分布[J]. 安全与环境学报，2018，18(4)：1496－1502.
TANG Na，LI Fuqi，LUO Weikeng，et al. Concentrations and congener distributions of PCDD/Fs in the flue gas from combustion and metallurgical processing[J]. Journal of Safety and Environment，2018，18(4)：1496－1502.

[4] LI Guanghui，WANG Jian，RAO Mingjun，et al. Coprocessing of stainless-steel pickling sludge with laterite ore via rotary kiln-electric furnace route：enhanced desulfurization and metal recovery[J]. Process Safety and Environmental Protection，2020，142：92－98.

[5] 陈伟锋，陈美珠，雷泽辉. 生活垃圾焚烧厂建设费用的探讨[J]. 工会博览·理论研究，2009(6)：171.
CHEN Weifeng，CHEN Meizhu，LEI Zehui. Discussion on construction cost of domestic waste incineration plant[J]. A View of Labour Unions，2009(6)：171.

[6] BABICH A，SENK D，KNEPPER M，et al. Conversion of injected waste plastics in blast furnace[J]. Ironmaking & Steelmaking，2016，43(1)：11－21.

[7] 杜玉颖. 医药危废在工业窑炉中共处置的热化学反应和污染物排放特性的研究和应用[D]. 杭州：浙江大学，2015.
DU Yuying. Research and application on thermal chemical reactions and pollutant emission characteristics for co-disposal of pharmaceutical industry hazardous wastes in boilers and industrial furnaces[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2015.

[8] 胡文琦. 钢铁冶炼炉协同处置企业危废可行性研究[J]. 区域治理，2020(33)：161.
HU Wenqi. Feasibility study on the co-processing of hazardous waste in iron and steel smelting furnaces[J]. Regional Governance，2020(33)：161.

[9] PEI Silu，LI Yaojian，PAN Shuyuan，et al. Addressing environmental sustainability of plasma vitrification technology for stabilization of municipal solid waste incineration fly ash[J]. Journal of Hazardous Materials，2020，398：122959.

[10] 曹云霄，于晓东，单淑娟，等. 我国医疗废物处理处置污染防治政策演进、存在问题分析及建议[J]. 环境工程学报，2021，15(2)：389－400.
CAO Yunxiao，YU Xiaodong，SHAN Shujuan，et al. Pollution prevention policy on medical waste treatment and disposal in China：evolvement，problem analysis and suggestions[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2021，15(2)：389－400.

[11] 安家荣，苟金鑫，王诗航，等. 含油污泥处理后残渣用于烧结砖试验[J]. 油气田地面工程，2016，35(11)：9－12.
AN Jiarong，GOU Jinxin，WANG Shihang，et al. The experiment on sintered brick using the residual of treated oily sludge[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering，2016，35(11)：9－12.

[12] JI Zhiyun，HUANG Binbin，GAN Min，et al. Dioxins control as co-processing water-washed municipal solid waste incineration fly ash in iron ore sintering process[J]. Journal of Hazardous Materials，2022，423：127138.

[13] WONG Guojing，FAN Xiaohui，JI Zhiyun，et al. Resource utilization of municipal solid waste incineration fly ash in iron ore sintering process：A novel thermal treatment[J]. Journal of Cleaner Production，2020，263：121400.

[14] 邢相栋，王莎，张秋利，等. 高炉喷吹废塑料与兰炭混合燃烧及动力学[J]. 钢铁研究学报，2019，31(3)：258－264.
XING Xiangdong，WANG Sha，ZHANG Qiuli，et al. Mixed combustion and kinetics of waste plastics injected into blast furnace and anthracite[J]. Journal of Iron and Steel Research，2019，31(3)：258－264.

（下转第138页）

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

cycling,2021,173:105740.

[2] SAXENA S,TEMBHURKAR A R. Impact of use of steel slag as coarse aggregate and wastewater on fresh and hardened properties of concrete[J]. Construction and Building Materials,2018,165:126 - 37.

[3] 赵计辉,阎培渝. 钢渣的体积安定性问题及稳定化处理的国内研究进展[J]. 硅酸盐通报,2017,36(2):477 - 84.
ZHAO Jihui, YAN Peiyu. Domestic research progress on volume stability and stabilization treatment of steel slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2017,36(2):477 - 84.

[4] ZHUANG S,WANG Q. Inhibition mechanisms of steel slag on the early-age hydration of cement[J]. Cement and Concrete Research,2021,140:106283.

[5] 黄伟,邱鹏,唐刚,等. 钢渣混合土基层材料制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报,2019,38(10):37 - 42;65.
HUANG Wei, QIU Peng, TANG Gang, et al. Preparation and properties of steel slag mixed soil base material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2019,38(10):37 - 42;65.

[6] 李超,陈宗武,谢君,等. 钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J]. 材料导报,2017,31(3):86 - 95;122.
LI Chao,CHEN Zongwu,XIE Jun,et al. Research progress of steel slag asphalt concrete technology and its application[J]. Materials Reports,2017,31(3):86 - 95;122.

[7] 张强,胡力群,刘兴成. 多掺量钢渣开级配沥青混合料性能研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(2):493 - 500.
ZHANG Qiang,HU Liqun,LIU Xingcheng. Study on the properties of open-grade asphalt mixture with multi-content steel slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramass, 2020, 39(2): 493 - 500.

[8] 刘星,李小华,曾智,等. 新型轻质钢渣加气混凝土的实验研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(9):2782 - 2788.
LIU Xing,LI Xiaohua,ZENG Zhi,et al. Experimental study on new lightweight steel slag aerated concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2020,39(9):2782 - 2788.

[9] 郭家林,赵俊学,黄敏. 钢渣综合利用技术综述及建议[J]. 中国冶金,2009,19(2):35 - 38.
GUO Jialin,ZHAO Junxue,HUANG Min. Review and suggestions on comprehensive utilization technology of steel slag[J]. China Metallurgy,2009,19(2):35 - 38.

[10] 韩天,于佳丽,吴燕开. 硫酸钠激发钢渣粉活性改良水泥土试验研究[J]. 科学技术与工程,2019,19(7):231 - 238.
HAN Tian, YU Jiali, WU Yankai. Experimental study on improved cement soil with active improvement of steel slag powder by sodium sulfate[J]. Science Technology and Engineering,2019,19(7):231 - 238.

[11] 张同生,刘福田,王建伟,等. 钢渣安定性与活性激发的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2007,26(5):980 - 984.
ZHANG Tongsheng, LIU Futian, WANG Jianwei, et al. Research progress on stability and active excitation of steel slag[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2007, 26(5):980 - 984.

[12] 赵旗. 碱激发粉煤灰/钢渣胶凝材料的制备及其性能研究[D]. 西安:长安大学,2021.
ZHAO Qi. Preparation and properties of alkali-excited fly ash/steel slag cementitiousmaterials[D]. Xi'an:Chang'an University,2021.

(上接第22页)

[15] 白婕. 废塑料配煤炼焦的实验研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2016.
BAI Jie. The study on the yield and performance of products from coking with used plastic and coal blending[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning,2016.

[16] 侯明. 高炉喷吹废塑料下的废旧塑料综合利用新方法[J]. 资源节约与环保,2021(5):119 - 120.
HOU Ming. A new method for comprehensive utilization of waste plastics under blast furnace injection of waste plastics[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2021(5):119 - 120.

[17] 贾利军,王冰,孟淑敏. 高炉喷吹废塑料工艺技术探讨[J]. 工业炉,2015,37(2):19 - 22.
JIA Lijun, WANG Bing, MENG Shumin. Study on process technology of injecting waste plastic in BF[J]. Industrial Furnace,2015,37(2):19 - 22.

[18] 李冰岩. 水泥熟料回转窑燃烧效率软测量研究[D]. 长春:长春工业大学,2017.
LI Bingyan. Research on soft sensor for rotary kiln combustion efficiency in cement clinker[D]. Changchun:Changchun University of Technology,2017.

[19] 潘料庭. 红土镍矿回转窑直接还原镍铁工艺设计与实践[J]. 铁合金,2015(2):15 - 19.
PAN Liaoting. Process design and practice on direct reduction ferronickel by laterite nickel ore rotary kiln[J]. Ferro Alloys, 2015(2):15 - 19.

[20] 夏盛,童敏,封羽涛. 钢厂协同处置城市固体废弃物的实践与探索[J]. 广州化工,2017,45(18):138 - 140.
XIA Sheng,TONG Min,FENG Yutao. Practice and exploration on co-processing of municipal solid waste by steel mill[J]. Guangzhou Chemical Industry,2017,45(18):138 - 140.

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