火法处理钢铁粉尘中有价元素研究现状及展望

邢 磊[1]，张良进[1]，杜培培[2]，李智慧[1]，龙 跃[1]
（1. 华北理工大学 a. 冶金与能源学院；b. 现代冶金技术教育部重点实验室，河北 唐山 063210；
2. 东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819）

摘要：针对国内外钢铁冶金粉尘的化学组成和各有价元素的赋存状态，本文比较了国内外提取钢铁冶金粉尘有价元素的工艺现状，并基于热力学基本原理，着重分析了火法处理工艺的影响因素及存在的问题。在此基础上，围绕钢铁冶金粉尘协同资源化问题，提出高效利用粉尘自身所含碳素资源，采用火法富集—湿法分离提取—尾渣资源化工艺是我国冶金行业未来实现钢铁冶金粉尘全量资源化的一条有效途径。

关键词：钢铁冶金粉尘；有价元素；火法富集；湿法分离提取；尾渣资源化；碳素资源
中图分类号：X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)03－0010－08
doi：10. 13403/j. sjqt. 2024. 03. 035

Research status and prospect of valuable elements in pyrotechnic treatment of iron and steel dust

XING Lei[1], ZHANG Liangjin[1], DU Peipei[2], LI Zhihui[1], LONG Yue[1]
(1. North China University of Technology a. School of Metallurgy and Energy; b. Key Laboratory of Modern Metallurgical Technology of the Ministry of Education, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: According to the chemical composition of iron and steel metallurgical dust and the occurrence state of each valuable element at home and abroad, the current process status of extracting valuable elements from iron and steel metallurgical dust at home and abroad is compared, and the influencing factors and existing problems of the pyrotechnic treatment process are analyzed based on the basic principle of thermodynamics. On this basis, focusing on the problem of synergistic resource utilization of iron and steel metallurgical dust, it is proposed that the efficient utilization of carbon resources contained in the dust itself, and the use of pyrotechnic enrichment-wet separation and extraction-recycling tailings process, is an effective way for China's metallurgical industry to realize the full resource utilization of iron and steel metallurgical dust in the future.

Key words: iron and steel metallurgical dust; valuable elements; pyrotechnic enrichment; wet separation and extraction; recycling tailings; carbon resources

钢铁冶金粉尘是冶金企业生产过程中烟气经处理后所得到的固体小颗粒废弃物[1-2]，直至今日，钢铁冶金粉尘利用的研究已在冶金资源回收领域占据重要地位。据国家统计局公布的数据，2022 年我国粗钢产量达到了 10. 18 亿 t，若按照每吨粗钢产生约 10% 的冶金粉尘计算，2022 年我国钢铁行业的粉尘产生量已超过 1 亿 t。国家发改委在《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指

收稿日期：2023－02－10；**修回日期**：2023－04－23
基金项目：国家自然科学联合基金资助项目(U20A20271)
作者简介：邢 磊(1994—)，男，博士研究生，从事冶金固废综合利用的研究。
通信作者：李智慧(1978—)，女，博士，副教授，从事冶金节能与资源优化研究。

导意见》中重点指出要大力推进大宗固废减量减害及资源化、无害化处理。为响应国家号召，实现钢铁冶金粉尘的全量化，冶金企业已着手于锌、铁、铅等有价金属及 Si、Ca、Mg 等碱金属资源的回收与循环利用[3-5]，以缓解钢铁冶金粉尘对周遭环境的污染及社会各界对有价资源的需求。

钢铁冶金粉尘中有价元素回收的目的在于以较低的成本，实现 Zn、Pb、Fe 等有价元素的高效分离、提取。处理方式的选择主要取决于有价元素以何种赋存状态与粉尘体系分离，有利于粉尘内有价元素进行回收的赋存状态主要可分为氧化物形式和无机盐形式，其中采用氧化物形式回收有价元素的工艺多为火法处理工艺，采用无机盐形式回收有价元素的工艺多为湿法处理工艺[6-8]。湿法处理工艺对粉尘含锌量要求较高，且对设备腐蚀较为严重，使得工艺发展缓慢，难以大规模应用，而火法处理工艺发展时间最长，工艺较为成熟，处理量较大，应用范围广泛[9]。目前我国钢铁企业处理冶金粉尘的方式主要为火法处理方式，其工艺碳热还原后能够将粉尘中的有价元素提取，仍面临残渣处理难度高、煤炭消耗量大及窑内结圈、结块等未得到根本性解决的难题。

近年来，冶金工作者们持续致力于优化钢铁冶金粉尘的处理工艺，在碳热还原反应热力学基础上，通过改变工艺参数，提升了钢铁冶金粉尘中有价元素的提取率，降低了处理过程中有毒有害副产品的危害。付筱芸等[8]利用转底炉工艺处理单一冶金粉尘，不仅提高了金属收得率，脱碱率也达到了 85% 以上；JAAFAR 等[10]采用火法焙烧与湿法浸出相结合的方法，不仅降低了生产能耗，还提高了锌的提取率。虽然目前提取冶金粉尘中有价组分的工艺与技术已达到一定水平，但随着全球煤炭资源的不断减少，冶金粉尘种类、数量的不断增加以及“双碳”目标的提出，亟需一种绿色、高效、低碳的新技术来缓解钢铁冶金粉尘的处理问题。为此，提出在不外加碳源的情况下，根据钢铁冶金粉尘各自的成分特性，构建钢铁冶金粉尘间的协同搭配体系，形成钢铁冶金粉尘全量资源化的新思路，对解决钢铁冶金粉尘激增及煤炭资源消耗、CO_2 排放量大等问题具有重要意义。

1　钢铁冶金粉尘的基本特性

1.1　来源与物化特性

钢铁冶金粉尘来源于钢铁产业的各道工艺流程，主要包括焦化、烧结、炼铁、炼钢、轧钢等工序。由于原料条件及工序手段的不同，粉尘的基本性质也存在较大差异，主要体现在物理特性、化学组成及有价元素的赋存状态等方面。根据钢铁冶金粉尘各自的基本特性，选择适宜的还原分离条件回收其中有价元素，有助于其全量资源化利用。

钢铁冶金粉尘外观一般呈红褐色或黑灰色，这主要取决于粉尘中有价金属种类及含量的高低，平均粒度在 20 ~ 80 μm，并且研究发现粒度越小有价元素含量越高[11-12]。表 1、2[13-15] 为国内外典型钢铁冶金粉尘主要化学成分。由表 1、2 可见，各类粉尘中含有丰富的 Zn、Fe、Pb、Cr 等有价元素和较多碱金属、碱土金属元素（如 Si、Ca、Mg 等），以及不易监测到的贵重金属元素（如 Ag、Bi、In 等）。另外，经调查研究发现，国外有关烧结工序的粉尘数据稀少，且钢铁冶金粉尘中 Zn、Pb、Cr 含量较高，这主要是由于国外使用大

表 1　国内典型钢铁粉尘主要化学成分（质量分数）

Table 1　Main chemical composition of typical domestic iron and steel dust　　%

冶金粉尘	Zn	Fe	Pb	Cr	Ni	SiO_2	CaO	MgO
烧结机头灰	<0.10	15.00 ~ 34.00	6.80 ~ 19.00	—	—	4.40 ~ 6.30	7.00 ~ 9.00	1.20 ~ 1.60
高炉重力灰	<0.10	35.00 ~ 55.00	~0.01	—	—	4.80 ~ 11.77	3.10 ~ 8.10	0.20 ~ 1.10
高炉布袋灰	2.50 ~ 17.00	18.00 ~ 36.00	0.03 ~ 0.60	—	—	4.00 ~ 9.37	2.00 ~ 9.00	~1.20
转炉粉尘	1.00 ~ 4.00	20.00 ~ 50.0	~6.00	—	—	3.00 ~ 6.00	~10.00	~8.00
电炉粉尘	2.50 ~ 36.60	4.00 ~ 52.00	0.50 ~ 4.00	0.09 ~ 5.02	—	2.00 ~ 4.55	~9.00	1.00 ~ 15.42
不锈钢粉尘	0.10 ~ 0.80	17.99 ~ 57.00	—	5.08 ~ 8.80	0.19 ~ 4.15	4.52 ~ 7.10	11.32 ~ 19.30	2.92 ~ 3.34

表2 国外典型钢铁粉尘主要化学成分(质量分数)

Table 2 Main chemical composition of typical foreign steel dust %

冶金粉尘	Zn	Fe	Pb	Cr	Ni	SiO_2	CaO	MgO
高炉粉尘	3.00~10.00	3.50~9.50	—	—	—	1.00~3.00	2.00~3.00	1.00
转炉粉尘	1.40~9.40	25.00~61.00	0.07~1.80	4.00~6.00	~0.20	1.00	3.00~8.80	0.20~5.00
电炉粉尘	14.00~35.00	9.00~45.00	2.00~8.00	0.20~11.00	—	3.00~6.00	3.00~10.00	2.00~4.00
不锈钢粉尘	0.28~4.64	15.80~33.50	—	2.18~18.56	0.40~2.92	4.15~5.60	14.00~15.01	1.01~2.60

量废钢作为炼钢原料，且以短流程生产为主。而我国钢铁生产过程仍以长流程为主，废钢使用量较少，致使我国钢铁冶金粉尘中Zn、Pb、Cr含量相对较低，Fe含量相对较高。

1.2 有价元素赋存状态

通过研究钢铁冶金粉尘中典型有价元素的赋存状态(表3)[16-18]，发现Zn、Pb主要以氧化锌(ZnO)、铁酸锌($ZnFe_2O_4$)和氧化铅(PbO)的形式存在。其中，$ZnFe_2O_4$属于尖晶石类物质，体系内的氧离子呈紧密堆积状态，具有相当好的晶格稳定性，常温常压下难溶于酸、碱及铵盐溶液，分解温度较高(在300~1 000 ℃范围内，$ZnFe_2O_4$的自由能均为负值)，因此一般的处理工艺难以对其进行有效处理。另外，发现Cr、Ni在国内钢铁冶金粉尘中主要以$FeCr_2O_4$和Fe_2NiO_4的形态存在，而在国外钢铁冶金粉尘中还会以$(FeMg)(CrFe)_2O_4$、NiO、$(NiFe)Fe_2O_4$等赋存状态存在，这主要是因为我国钢铁冶金粉尘中Fe含量相对较高，致使Cr、Ni更易与Fe形成稳定的化合物。此外，Fe在国内外钢铁冶金粉尘中的赋存状态较为丰富，主要以磁铁矿(Fe_3O_4)、赤铁矿(Fe_2O_3)、浮氏体(FeO)以及与Zn、Cr、Ni等金属元素共存的赋存状态存在。

表3 国内外钢铁粉尘中典型有价元素主要赋存状态

Table 3 Typical valuable elements in iron and steel dust at home and abroad

元素	国内	国外
Zn	ZnO、$ZnFe_2O_4$	ZnO、$ZnFe_2O_4$
Cr	$FeCr_2O_4$	$FeCr_2O_4$、$(FeMg)(CrFe)_2O_4$
Ni	$NiFe_2O_4$	NiO、$(NiFe)Fe_2O_4$
Pb	PbO	PbO
Fe	Fe_2O_3、Fe_3O_4、$ZnFe_2O_4$、FeO、$MgFe_2O_4$、$FeCr_2O_4$	Fe_2O_3、Fe_3O_4、$ZnFe_2O_4$、FeO、$(FeMg)(CrFe)_2O_4$、$(NiFe)Fe_2O_4$、$FeCr_2O_4$

1.3 碳素资源分布情况

碳在钢铁冶金粉尘中主要以焦炭和未燃烧煤粉的形式存在[19]，除可以作为稳定热源外，还可作为良好的还原剂，因此钢铁冶金粉尘体系中原有的碳同样也是重要的二次资源。钢铁冶金粉尘中除具有丰富的金属元素外，还含有不等量的碳素资源，其在钢铁冶金粉尘中的分布情况如表4所示[20-22]。

表4 钢铁粉尘中碳素资源分布情况(质量分数)

Table 4 Distribution of carbon resources in steel dust %

高炉粉尘	转炉粉尘	电炉粉尘	不锈钢粉尘
11.98~53.4	0.70~1.52	1.00~5.00	0.45~8.51

2 火法处理工艺

2.1 火法处理工艺热力学基本原理

根据钢铁冶金粉尘的基本特性归纳出火法工艺中典型有价元素发生的碳热还原反应，利用FactSage8.2热力学软件中的Reaction模块，计算各反应式在非标准状态下的吉布斯自由能(ΔG^{θ})及焓变(ΔH)，各还原反应的方程式、ΔH及开始还原温度如表5所示。

结合直接还原理论与表5可看出，火法处理工艺中的碳热还原反应可分为两类，一类是反应物与配加的碳直接反应的直接还原过程[如方程式(1)、(2)、(4)、(5)等]，另一类则是反应物与一氧化碳(配加的碳反应生成的CO)反应的间接还原过程[如方程式(3)、(12)]，碳热还原反应总的结果以消耗配加的碳为主。根据各反应式开始还原温度可知，Zn、Cr、Fe的还原一般是逐级分解，最终获得有价金属，而Ni、Pb的还原相对较为简便。需要注意的是，还原得到的Zn，自生成时由于反应环境温度较高，已达到它的沸点(907 ℃)，故其会直接汽化成金属蒸汽。另外，

表 5　各碳热还原反应的焓变(△H)及还原反应开始温度

Table 5　Enthalpy change(△H) of each carbon thermal reduction reaction and the starting temperature of the reduction reaction

项目	化学反应方程式	△H	开始还原温度/℃	序号
Zn	$3ZnFe_2O_{4(s)} + C_{(s)} = 2Fe_3O_{4(s)} + 3ZnO_{(s)} + CO_{(g)}$	△$H>0$	685	1
	$ZnFe_2O_{4(s)} + C_{(s)} = 2FeO_{(s)} + ZnO_{(s)} + CO_{(g)}$		659	2
	$ZnO_{(s)} + CO_{(g)} = Zn_{(l)} + CO_{2(g)}$		937	3
	$ZnO_{(s)} + C_{(s)} = Zn_{(l)} + CO_{(g)}$		969	4
Cr	$FeCr_2O_{4(s)} + C_{(s)} = Fe_{(s)} + Cr_2O_{3(s)} + CO_{(g)}$		910	5
	$FeCr_2O_{4(s)} + 4C_{(s)} = Fe_{(s)} + 2Cr_{(s)} + 4CO_{(g)}$		1 182	6
	$Cr_2O_{3(s)} + 3C_{(s)} = 2Cr_{(s)} + 3CO_{(g)}$		1 242	7
Ni	$NiO_{(s)} + C_{(s)} = Ni_{(s)} + CO_{(g)}$		437	8
Pb	$2PbO_{(s)} + C_{(s)} = 2Pb_{(s)} + CO_{2(g)}$		1 250	9
Fe	$Fe_3O_{4(s)} + C_{(s)} = 3FeO_{(s)} + CO_{(g)}$		664	10
	$FeO_{(s)} + C_{(s)} = Fe_{(s)} + CO_{(g)}$		724	11
	$FeO_{(s)} + CO_{(g)} = Fe_{(s)} + CO_{2(g)}$		554	12

反应(1)～(12)的△$H>0$，说明反应正向为吸热反应，升高温度有助于反应的正向进行，提高碳源的利用率及有价元素的还原程度。

随着对碳热还原反应的深入研究，以及火法处理工艺不断演变，火法处理工艺基本流程已发展至如图 1 所示[23-24]。由图 1 可知，整个处理流程大致可分为两个部分：一部分为汽化富集阶段，主要位于反应器的中上部，钢铁冶金粉尘中 Zn、Pb、In 等有价元素，经还原反应生成金属蒸汽，后以氧化物的形式从烟气中脱除；另一部分为固化脱除阶段，主要位于反应器中下部，钢铁冶金粉尘中 Fe、Ni、Cr 等有价元素，经还原反应后固化于金属化球团或渣中。

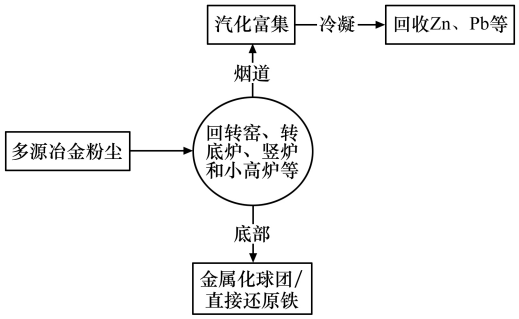


图 1　火法处理工艺示意

Fig. 1　Schematic diagram of the fire treatment process

2.2　火法处理工艺影响因素

近年来，基于热力学原理的研究基础，冶金工作者开始关注到有价元素回收影响因素的相关研究。经过冶金工作者多年的研究，总结出其影响因素主要包括还原温度、还原时间、配碳量、碱度、气压等，衡量工艺回收有价元素效率的指标主要为金属化率及有价金属脱除率[25-27]。其中，配碳量对有价元素的还原是至关重要的，一方面是因为配碳量对混合料燃烧起主要作用，另一方面是因为只有当反应体系内有足够多的碳含量时，才能快速将反应物还原，获取高的金属化率及有价元素脱除率。因此，许多冶金工作者针对配碳量对有价元素回收的影响展开了深入研究。

康芷源[28]从理论上计算了锌、铁氧化物还原的碳素消耗量：当含碳球团中铁氧化物为 Fe_2O_3，锌氧化物为 ZnO 时，Fe_2O_3 全部用 C 来直接还原的碳素消耗量(即 Fe_2O_3 直接还原最高消耗量)为 0.321 4 kg(C)/kg(Fe)，根据适宜的直接还原度，计算出含碳球团中 Fe_2O_3 至 Fe 过程的最低碳素消耗量为 0.218 kg(C)/kg(Fe)[或 0.68 mol(C)/mol(O)]，ZnO 至 Zn 的碳素消耗量为 0.184 6 kg(C)/kg(Zn)。另外，发现直接还原度越低，碳素消耗量越低。唐恩[29]通过调控不锈钢粉尘体系的配碳比，发现配碳比较低或过高时，形成的粒铁均较少，较低时是由于还原不充分，较高时是由于还原剂大量过剩，未气化的碳粉对金属相的聚集起阻碍作用，只有当配碳比适量时，压块内部的还原势会逐渐增强，金属氧化物得到充分还原，金属相析出量

才会增大。张建良等[30]通过实验研究也指出，在含碳球团的还原焙烧过程中，当体系内的碳氧原子比大于1时，铁、铅、锌等氧化物可完全被还原，结合含碳量较高的粉尘制备团块，可以有效降低外配碳源的加入量。由此可以看出，合理调配碳素资源有利于钢铁冶金粉尘内有价元素的回收，再结合含碳量高的冶金粉尘进行协同处理，更有利于钢铁冶金粉尘的全量资源化。

2.3 火法处理工艺应用现状

依据多源冶金粉尘的基本特性、碳热还原热力学原理及影响因素的研究，火法工艺可分为直接还原法、熔融还原法、氯化法及微波法等。其中，直接还原法是用于处理冶金粉尘最广泛的处理工艺，锌的金属收得率均达到了95%以上，表6列出了利用直接还原法处理冶金粉尘的主要工艺及优缺点[26,31]。

目前，我国在钢铁冶金粉尘处理方面主要采用威尔兹(Waelz)、转底炉(RHF)工艺，这是由于我国钢铁冶金粉尘中的锌含量较低所导致。宝钢湛江、山东莱钢、首钢京唐等多家钢厂均以转底炉工艺回收冶金粉尘中的有价元素。相较于国内，国外钢铁冶金粉尘中除含锌量较高外，还含有较多的重金属(如Pb、Ni、Gr等)，在转底炉的基础之上，延伸出了许多先进的直接还原处理工艺(如Fastmet、DRyIron、COMET等)。此外，对于含锌较高的钢铁冶金粉尘，国外还研发出一种在熔融条件下将钢铁冶金粉尘中有价元素还原、富集、分离的熔融还原工艺。与直接还原工艺相比，该工艺的优势在于采用非焦煤还原剂、流程短、更环保、直接还原铁中的杂质元素更少，但由于该工艺在高温下进行，所以导致工艺过程能耗与成本升高[32-33]。

随着全球冶金粉尘全量化理念的提出，单纯利用火法处理冶金粉尘已不能满足要求，因为火法处理难以实现冶金粉尘中全部有价元素的选择性分离、提取。因此，提出了在火法处理的基础上加入湿法提取的火法—湿法联合处理工艺，即采用两段式的处理方式[34]。第一段利用火法对冶金粉尘进行预处理，锌以氧化锌的形式进行回收，同时铁酸锌也分解为氧化锌和氧化铁；第二段则利用湿法，不仅可提取锌、铁元素，还可提取冶金粉尘中的铅、铬、钾等有价元素[35]。该工艺已在云南省旧市鸡的固废物炼铁烟尘资源化综合利用工程得到应用。但通过分析、比较国内外从冶金粉尘中提取有价元素的工艺现状，存在的问题主要有：① 大量耗费煤炭资源，钢铁冶金粉尘内碳素资源得不到高效利用；② 火法处理过程中能耗与成本较高；③ 炉内结圈问题严重，严重影响设备使用寿命；④ 冶金粉尘中有价元素脱除不彻底，贵重金属(如Ag、Bi、In等)得不到有效回收。

3 钢铁冶金粉尘协同资源化发展趋势

随着冶金固废全量化进程的不断推进，全球对金属资源需求量的不断增加及煤炭、天然气等资源的持续消耗，钢铁冶金粉尘的处理已然达到了100%利用的紧要关头，为缓解钢铁冶金粉尘所

表6 直接还原法处理冶金粉尘主要代表工艺及优缺点

Table 6 Main representative process of direct reduction method for treating metallurgical dust and its advantages and disadvantages

代表工艺	还原剂	产物	优点	缺点
Waelz	煤、焦炭微风、天然气及含碳回复材料等	Waelz渣	处理量大(8万~10万吨/年)、技术成熟，运行简单	加工时间长、不能经济的处理锌质量分数低于10%的粉尘
RHF		直接还原铁(DRI)	原燃料适应性好、运行成本低	产品中脉石及硫含量较高、热效率较低
Fastmet			产品可加工为热成型铁(HBI)	DRI中硫含量较高、能耗较高
DRyIron			DRI中脉石含量低且P与S的残留水平可控	易发生结圈
COMET			运营成本及DRI中脉石、硫含量较低	生产率较低、原料处理时间长
ITmk3		生铁块	CO_2排放小、节能	副产品成分变化影响铁的回收
Hi-QIP(优质铁粒工艺)		铁卵石	处理量大、设备寿命长	铁卵石中硫含量较高、还原温度高

带来的污染问题及全球资源匮乏的现状，基于目前火法—湿法联合处理工艺的研究基础及钢铁冶金粉尘协同资源化存在的问题，本文提出一种未来可实现钢铁冶金粉尘协同资源化的新思路，即火法富集—湿法分离提取—尾渣资源化工艺思路如图 2 所示。传统处理工艺通过外加配碳，针对含量较高的部分有价元素进行回收，相比之下，该工艺思路突出不外加配碳的方式，充分利用钢铁冶金粉尘原有的碳素资源。此外，采用低共熔溶剂梯级提取钢铁冶金粉尘中脱除不彻底的有价元素，打破了湿法、火法相衔接工艺存在的技术瓶颈与壁垒，既可以避免粉尘中碳素资源的浪费、降低生产能耗及成本、提高有价元素品位，又可实现不同工序粉尘中赋存的 Zn、K、Na 等碱金属及 Cr、Pb、Ni 等有价元素的协同梯级提取，有助于推动钢铁冶金粉尘协同资源化技术的实现。

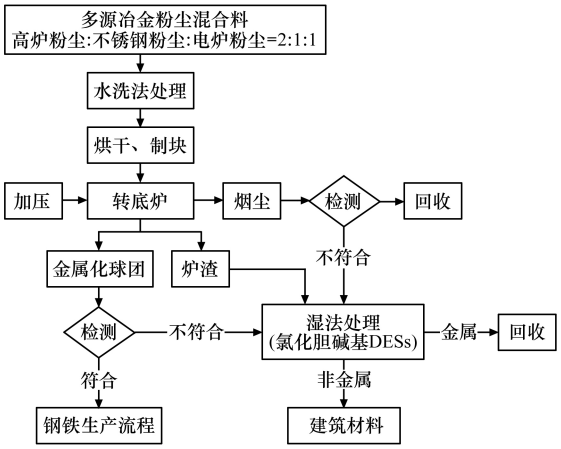


图 2　钢铁冶金粉尘协同资源化新思路

Fig. 2　New iron and steel metallurgical dust co-resourcing ideas

结合图 2，以高炉粉尘、不锈钢粉尘与电炉粉尘(2∶1∶1)的混合料为例，混合体系内碳质量分数约为 13%~18%，工艺技术路线：① 将高炉粉尘与不锈钢粉尘混合均匀，利用水洗法去除原料中的 K、Na 等杂质元素；② 将水洗后原料风干，结合一定量的黏结剂制备成一定尺寸的团块；③ 将制备好的团块放入转底炉内，保持一定压力氛围进行高温冶炼；④ 冶炼后得到金属化球团和炉渣，满足回用要求的金属化球团(铁品位不低于传统铁矿石的铁品位)用于烧结工序或高炉冶炼，不满足回用要求的金属化球团及炉渣进行湿法梯级处理；另外，经高温冶炼富集后的烟尘(富含 Zn、Pb、Bi 等有价元素的烟尘)，经除尘器收集后，有价元素品位满足回收要求的直接进行回收，不满足回收要求的烟尘则进行湿法梯级处理；⑤ 利用清洁、高效的低共熔溶剂对不满足回收要求的金属化球团、炉渣、烟尘湿法梯级处理，利用低共熔溶剂梯级分离、靶向提取球团、炉渣、烟尘中的 Zn、Cr、Fe、Ni 等有价元素，如利用氯化胆碱基的尿素提取 CrO_3、丙二酸提取 NiO 等，提取后的 Zn、Cr、Ni 等金属产物可作为各行业的原材料，提取得到的 Fe 则可直接回用到钢铁生产流程当中去；⑥ 转底炉所产生的高热值煤气可用于供暖、发电，提取有价元素后剩余的 DESs 可重复使用，而且熔剂本身无毒无害，因此不会污染环境。

4　结语与展望

钢铁冶金粉尘因具有来源广泛、产生量大、成分复杂、污染范围广、安全隐患高等特点，使得近几十年来政府、企业和科研院所一直关注钢铁冶金粉尘的处理问题，随着“双碳”、“可持续发展”与“全量化”观念的提出，研究者们发现充分利用钢铁冶金粉尘自身含有的多种有价元素，是我国未来实现钢铁冶金粉尘全量化的主要方向。

鉴于当前钢铁冶金粉尘处理的发展形势，在前人的研究基础上，结合钢铁冶金粉尘的基本特性及热力学原理，提出钢铁冶金粉尘体系协同搭配处理，高效利用粉尘本身含有的碳素资源，通过研发新型低共熔溶剂实现梯级、高效提取粉尘中难提取的有价元素，可实现钢铁冶金粉尘在钢铁企业内自消纳的技术方案。火法富集—湿法分离提取—尾渣资源化的联合处理工艺将会成为我国处理钢铁冶金粉尘的重要方向，不仅符合国家可持续发展战略及冶金行业向低碳发展转型的相关要求，还能够推动我国冶金行业的循环经济，改善人民生活环境，带来更好的经济效益、环境效益及社会效益。

参考文献：

[1] RIEGER J, SCHENK J. Residual processing in the european steel industry: A technological overview[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2019, 5(3): 295 – 309.

[2] 刘诗诚,岳昌盛,吴龙,等. 钢铁冶金粉尘的特点及处置技术分析[J]. 工业安全与环保,2018,44(12):67 – 70.
LIU Shicheng,QIU Changsheng,WU Long,et al. Analysis of the characteristics and disposal technology of metallurgical dust[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2018,44(12):67 – 70.

[3] DE BUZIN P J W K,HECK N C,VILELA A C F. Eaf dust:An overview on the influences of physical,chemical and mineral features in its recycling and waste incorporation routes[J]. Journal of Materials Research and Technology,2017,6(2):194 – 202.

[4] 王静松,李岩,冯怀萱,等. 钢铁产业集聚区难处理尘泥处理与全量资源化利用进展[J]. 工程科学学报,2021,43(12):1737 – 1749.
WANG Jingsong,LI Yan,FENG Huaixuan,et al. Progress in treating difficult-to-handle dust and sludge and full-scale resource utilization in an iron and steel industry cluster[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(12):1737 – 1749.

[5] 曾丹林,马亚丽,王光辉,等. 钢铁厂含铁粉尘综合利用研究进展[J]. 烧结球团,2011,36(6):45 – 49.
ZENG Fanlin, MA Yali, WANG Guanghui, et al. Research advancement of comprehensive utilization of iron-bearing dust in iron and steel plants[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(6):45 – 49.

[6] 胡兵,甘敏. 预还原烧结法综合利用钢铁厂粉尘试验研究[J]. 烧结球团,2018,43(6):38 – 42.
HU Bing,GAN Min. Experimental study on comprehensive utilization of dust in steel plants with pre-reduction sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(6):38 – 42.

[7] 刘百臣,魏国,沈峰满,等. 钢铁厂尘泥资源化管理与利用[J]. 材料与冶金学报,2006(3):231 – 233;237.
LIU Baichen, WEI Guo, SHEN Fengman, et al. Comprehensive utilization and management of dust and sludge as resource in iron and steel plants[J]. Journal of Materials and Metallurgy,2006(3):231 – 233;237.

[8] 付筱芸,王碧侠,刘欢,等. 钢铁厂含锌粉尘处理技术和锌的回收[J]. 热加工工艺,2019,48(2):10 – 13.
FU Xiaoyun, WANG Bixia, LIU Huan, et al. Treatment technology of zinc containing dust and recovery of zinc in steel-making plant[J]. Hot Working Technology,2019, 48(2):10 – 13.

[9] ZHANG Y B, LIU B B, XIONG L, et al. Recycling of carbonaceous iron-bearing dusts from iron & steel plants by composite agglomeration process(CAP)[J]. Ironmaking & Steelmaking,2017,44(7):532 – 543.

[10] JAAFAR I, GRIFFITHS A J, HOPKINS A C, et al. An evaluation of chlorination for the removal of zinc from steelmaking dusts [J]. Minerals Engineering, 2011, 24(9):1028 – 1030.

[11] WANG Z Y, LI Q J, YANG F X, et al. Experimental study on stainless steel dust by reduction and enrichment for preparation raw material of powder metallurgy[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2021, 74(1):119 – 127.

[12] 赵海泉,齐渊洪,史永林. 不锈钢粉尘的物理化学特性分析[J]. 钢铁研究学报,2017,29(2):105 – 110.
ZHAO Haiquan, QI Yuanhong, SHI Yonglin. Analysis of physical and chemical characteristics of stainless steel dust[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2017, 29(2):105 – 110.

[13] 陈砚雄,冯万静. 钢铁企业粉尘的综合处理与利用[J]. 烧结球团,2005(5):45 – 49.
CHEN Yanxiong, FENG Wanjing. On the centralized treatment and comprehensive utilization of metallurgical dust[J]. Sintering and Pelletizing,2005(5):45 – 49.

[14] OMRAN M, FABRITIUS T, HEIKKINEN E P. Selective zinc removal from electric arc furnace (EAF) dust by using microwave heating[J]. Journal of Sustainable Metallurgy,2019,5(3):331 – 340.

[15] 谢泽强,郭宇峰,陈凤,等. 钢铁厂含锌粉尘综合利用现状及展望[J]. 烧结球团,2016,41(5):53 – 56;61.
XIE Zeqiang, GUO Yufeng, CHEN Feng, et al. Research status and prospect of comprehensive utilization of zinc-bearing dust in iron and steel plants[J]. Sintering and Pelletizing,2016,41(5):53 – 56;61.

[16] DORONIN I E, SVYAZHIN A G. Thermodynamic study of carbon reaction with steel-smelting dust components [J]. Metallurgist,2013,57(1):41 – 48.

[17] BINNEMANS K, JONES P T, FERNANDEZ A M, et al. Hydrometallurgical processes for the recovery of metals from steel industry by-products: a critical review[J]. Journal of Sustainable Metallurgy,2020,6(4):505 – 540.

[18] 陈孝琦,郑立春,何淑雅,等. 不锈钢粉尘碳热还原产物金属颗粒形貌和尺寸[J]. 材料与冶金学报,2021,20(1):9 – 16.

CHEN Xiaoqi, ZHENG Lichun, HE Shuya, et al. Morphology and size of the metallic particles generated via carbothermic reduction of stainless steel dust[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2021, 20(1): 9 – 16.

[19] 刘纲,干勇,李士琦,等. 高炉含锌粉尘还原性影响因素分析[J]. 中国冶金,2019,29(10):20 – 25;35.
LIU Gang, GAN yong, LI Shiqi, et al. Analysis of reducing factors of zinc-bearing blast furnace dust[J]. China Metallurgy, 2019, 29(10): 20 – 25;35.

[20] 李晰哲,储满生,李花兵,等. 基于热压块的不锈钢粉尘还原实验[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(4):490 – 495.
RI Sokchol, CHU Mansheng, LI Huabing, et al. Reduction experiment of stainless steel dust based on hot briquetting[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(4): 490 – 495.

[21] ZHANG D C, LIU R L, WANG H, et al. Recovery of zinc from electric arc furnace dust by alkaline pressure leaching using iron as a reductant[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(9): 2701 – 2710.

[22] 冯琦,王强,彭锋. 含镍、铬不锈钢尘泥资源化利用探讨[J]. 中国冶金,2018,28(6):71 – 74.
FENG Qi, WANG Qiang, PENG Feng. Investigation on resource utilization of stainless steel sludge containing nickel and chromium[J]. China Metallurgy, 2018, 28(6): 71 – 74.

[23] 臧永港,黄润,杨婧飘,等. 含锌电炉粉尘水浸处理 – 真空碳热还原工艺[J]. 中国冶金,2022,32(9):134 – 141.
ZANG Yonggang, HUANG Run, YANG Jingpiao, et al. Water leaching treatment-vacuum carbothermic reduction process of zinc-bearing electric furnace dust[J]. China Metallurgy, 2022, 32(9): 134 – 141.

[24] STEER J, GRAINGER C, GRIFFITHS A, et al. Characterisation of BOS steelmaking dust and techniques for reducing zinc contamination[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2014, 41(1): 61 – 66.

[25] LIN X L, PENG Z W, YAN J X, et al. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 1079 – 1100.

[26] YANG C C, PAN J, ZHU D Q, et al. Pyrometallurgical recycling of stainless steel pickling sludge: a review[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2019, 26(6): 547 – 557.

[27] ZOU C, WU H, ZHAO J X, et al. Effects of dust collection from converter steelmaking process on combustion characteristics of pulverized coal[J]. Powder Technology, 2018, 332: 70 – 78.

[28] 康芷源. 处理含锌粉尘的转底炉料层温度分布特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
KANG Zhiyuan. Research on the bed temperature distribution of RHF treatment on zinc-bearing wastes [D]. Chongqing: ChongqingUniversity, 2015.

[29] 唐恩. 转底炉处理含铁固废制备粒铁的基础研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2019.
TANG En. Fundamental research to obtain nugget iron from iron-bearing solid waste through rotary hearth furnace[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2019.

[30] 张建良,李洋,袁骧,等. 中国钢铁企业尘泥处理现状及展望[J]. 钢铁,2018,53(6):1 – 10.
ZHANG Jianliang, LI Yang, YUAN Xiang, et al. Present situation and prospect of dust treatment in chinese iron and steel enterprises[J]. Iron and Steel, 2018, 53(6): 1 – 10.

[31] WEI R F, ZHANG F H, WANG X Y, et al. A novel approach for the resource utilization of zinc-bearing dust and sludge via the blast furnace main trough[J]. Waste Management, 2023, 172: 127 – 139.

[32] YANG C, SHE X F, WANG R Y, et al. Melting and separation behaviors of electric arc furnace dust pellets under iron bath conditions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(1): 347 – 360.

[33] LIU X L, LIU Z J, ZHANG J L, et al. Recovery of iron and zinc from blast furnace dust using iron-bath reduction [J]. High Temperature Materials and Processes, 2019, 38: 767 – 772.

[34] 杨春善,任明欣. 日照钢铁固废尘泥处理实践[J]. 钢铁,2019,54(4):83 – 91;98.
YANG Chunshan, REN Mingxin. Practice of waste dust mud treatment in rizhao steel[J]. Iron and Steel, 2019, 54(4): 83 – 91;98.

[35] 马星宇,彭军,张芳,等. 高炉粉尘有价元素提取的技术现状分析[J]. 中国铸造装备与技术,2021,56(1):53 – 60.
MA Xingyu, PENG Jun, ZHANG Fang, et al. Analysis on the technology status of extraction of valuable elements from blast furnace dust[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2021, 56(1): 53 – 60.