综述

钢铁企业含锌粉尘综合利用技术研究进展

张华超，马 丁，郎明松，夏永峰，郭秀键
（重庆赛迪热工环保工程技术有限公司，重庆 401122）

摘要：钢铁企业生产过程中产生的含锌粉尘具有产量大、粒度细、化学特性复杂等特点，且普遍带有毒性。此类粉尘若处置不当，不仅会威胁人体健康，还会引发严重的环境污染。然而，含锌粉尘中富含铁、碳、锌等有价元素，回收利用潜力巨大，是一种极为宝贵的二次资源。本文系统总结了钢厂含锌粉尘的形成机理及其物理化学特性，详细阐述了碳热还原工艺、湿法工艺及微波工艺的原理与特点，并对各工艺的研究进展与应用现状进行了梳理与分析。研究表明：含锌粉尘主要包括高炉粉尘、转炉粉尘和电炉粉尘，其理化特性较为复杂。其中，高炉粉尘中的锌元素主要以氧化锌形式存在，而转炉粉尘和电炉粉尘中的锌元素则主要以铁酸锌形式存在。微波工艺处理含锌粉尘具有加热均匀、清洁、高效等优点，可为钢铁企业处置冶金固废提供一种环境友好、可持续的技术路径。未来应重点关注含锌粉尘升温行为及介电性能影响因素的研究，深入探究不同添加剂、球团尺寸与形状、造球方式等因素对微波条件下含锌粉尘结构变化的影响，从而推动微波工艺的发展与应用。

关键词：高炉粉尘；转炉粉尘；电炉粉尘；碳热还原工艺；湿法工艺；微波工艺
中图分类号：TF09；X757 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)02－0001－14
doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.023

Research progress on comprehensive utilization technology of zinc-containing dust in iron and steel enterprises

ZHANG Huachao, MA Ding, LANG Mingsong, XIA Yongfeng, GUO Xiujian
(Chongqing CISDI Thermal & Environmental Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: The zinc-containing dust generated in the production process of iron and steel enterprises has such characteristics as large output, fine particle size, complex chemical properties, etc., and most of them are generally toxic. If this dust is not disposed of properly, it will not only threaten human health, but also cause serious environmental pollution. However, zinc-containing dust is rich in valuable elements such as iron, carbon, and zinc, and has great potential for recycling, making it an extremely valuable secondary resource. The formation mechanism and physical & chemical properties of zinc-containing dust in iron and steel enterprises are systematically summarized, the principles and characteristics of carbon carbothermal reduction process, wet process and microwave process are elaborated in detail, and the research progress and application status of each process are sorted out and analyzed. Research indicates that zinc-containing dust mainly includes blast furnace dust, converter dust, and electric furnace dust, and its physicochemical properties are relatively complex. Among them, zinc in blast furnace dust mainly exists in the form of zinc oxide, while zinc in converter dust and electric furnace dust mainly exists in the form of zinc ferrite. Microwave process treatment of zinc-containing dust has such advantages as uniform heating, cleanliness and high efficiency. It can provide an environmentally friendly and sustainable technical path for iron and steel enterprises to dispose of metallurgical solid waste. In the future, we should focus on the heating behavior and dielectric properties of zinc-containing dust, and further explore the influence of different additives, pellet sizes and shapes, pellet-making methods and other factors on the structural changes of zinc-

收稿日期：2025－05－13；**修回日期**：2025－06－03
基金项目：重庆市技术创新与应用发展项目(CSTB2024TIAD-KPX0070)
作者简介：张华超(1990—)，男，工程师，从事钢铁企业固废资源综合利用工业化设计及研究工作。

containing dust under microwave conditions, so as to promote the development and application of microwave technology.

Key words: blast furnace dust; converter dust; electric furnace dust; carbon carbothermal reduction process; wet process; microwave process

2025 年，我国粗钢产量约为 9.61 亿吨，占全球钢铁总产量的 50% 以上[1]。钢铁企业生产过程中会产生大量含锌粉尘，主要包括高炉粉尘、转炉粉尘和电炉粉尘。据统计，每生产 1 吨粗钢约产生 30 ~ 40 kg 含锌粉尘，据此推算，我国每年含锌粉尘产生量约为 3 000 万 ~ 4 000 万吨[2]。根据《中国矿产资源报告(2024)》，我国每年锌精矿产量为 296.5 万吨，锌消费量达 664 万吨。作为锌生产和消费大国，我国每年需进口大量锌精矿。而含锌粉尘中富含铁、碳、锌等有价元素，具有极高的回收利用潜力，是宝贵的二次资源。

含锌粉尘中含有锌、铅等重金属元素。其中，高炉粉尘和电炉粉尘还含有钾、钠等低沸点碱金属元素，而电炉粉尘中普遍含有铬、镉等重金属元素。含锌粉尘颗粒细小，易在空气中形成飘浮粉尘，极易被吸入人体，且粉尘普遍具有毒性，会对人体健康造成不同程度的损害。此外，含锌粉尘多呈碱性，在雨水作用下渗入土壤，易导致土壤中碱性金属含量升高，引发土壤性质改变及地下水源污染。尤其是电炉粉尘，已被各国定性为危险废物：《国家危险废物名录(2021 年版)》将其列为含锌废物(HW23 312 - 001 - 23)；美国《资源保护与回收法》(RCRA)将其列为特定来源的危险废物(RCRA K061)；欧盟《欧洲废物名录》也将其划为危险废物(EWC 10 02 07 *)。因此，若含锌粉尘得不到有效处置，势必造成严重的环境污染，严重威胁人体生命健康安全。同时，钾、钠、锌、铅等元素在钢铁生产过程中属于有害元素，若任其在各生产单元循环富集，也会严重影响钢铁工序的正常运行。

含锌粉尘的高效利用是冶金固废处置领域的重要发展方向，其处置不当所引发的环境问题将直接影响社会的发展与进步。因此，实现含锌粉尘的有效处置与资源化利用，已成为钢铁企业及全社会亟需应对的重大课题。本文通过分析钢厂各类含锌粉尘的形成机理、物理及化学特性，并对现有处置工艺及其应用现状进行比较，旨在为钢厂含锌粉尘的低碳、可持续和资源化利用提供参考与借鉴。

1 含锌粉尘的形成机理

高炉粉尘是高炉炼铁过程中产生的副产品，主要通过粗除尘和精除尘环节加以捕集。含尘高炉煤气进入除尘系统，部分细小颗粒粉尘随煤气上升过程中会相互碰撞，团聚形成粒度较大的颗粒粉尘，这些粉尘借助自身惯性，通过粗除尘装置从煤气流中分离；经粗除尘后，未发生团聚的细颗粒粉尘则可由精除尘装置进行捕集。有研究[3-4]表明，高炉煤气中粒度为 60 μm 以上的粗颗粒粉尘可采用旋风除尘器或重力除尘器脱除，60 μm 以下的细颗粒则可采用干式布袋除尘器收集。此外，对于粒度为 0.1 ~ 20 μm 的粉尘也可采用湿式除尘器进行处理，用喷雾洗涤塔或文丘里洗涤器进行喷雾吸附，含尘气体与水密切接触，液滴与小颗粒粉尘相互作用形成易于捕捉的大颗粒[5]。王树楷[6]的研究表明，高炉粉尘中重力灰和布袋灰的质量之比为(0.6 ~ 0.7)∶(0.3 ~ 0.4)，且重力灰中铁和碳的含量明显高于布袋灰。

转炉粉尘产生于转炉炼钢过程，主要采用干式除尘或湿式除尘进行捕集。含尘转炉烟气进入干式除尘系统后，首先在蒸发冷却器中喷淋降温。其中，粒度较大的粉尘受重力作用沉降，形成较粗的颗粒粉尘，未被沉降的细颗粒粉尘则由后段静电除尘设施捕集。湿式除尘则以文氏管为主要分离设备，最终收集得到转炉污泥。电炉粉尘主要采用干式除尘捕集，粉尘随电炉烟气排出，其中大颗粒粉尘在沉降燃烧室中受重力作用沉降，未被沉降的小颗粒粉尘由后段除尘系统捕集。

转炉粉尘与电炉粉尘的形成机制相似，均主要由钢液表面薄膜气泡破裂引起的钢液与钢渣喷溅所生成，二者之间的主要差异源于炼钢工艺的不同。以电炉炼钢工艺为例，其粉尘形成过程[7]如图 1 所示。钢液中气泡主要由[C]与[O]反应引起的“碳沸腾”产生，此外，[N]、[H]与[O]反

应也会生成少量气泡。气泡在钢液表面破裂后，形成两种类型的液滴：薄膜液滴和射流液滴[8]。气泡上升至钢液表面过程中，其表面覆盖的液相层逐渐变薄；当液相层厚度达到临界值时，气泡破碎，液相薄膜碎裂成微小液滴，即薄膜液滴。薄膜液滴的尺寸取决于气泡大小，其数量则与覆盖在气泡上的薄膜面积有关。气泡破裂瞬间，钢液表面破裂处会形成凹陷；液体在填充凹陷过程中产生向上的锐利射流，该射流使熔体分解为液滴，即射流液滴。射流液滴尺寸较大，难以随转炉烟尘被抽走，绝大多数回落至钢液中。

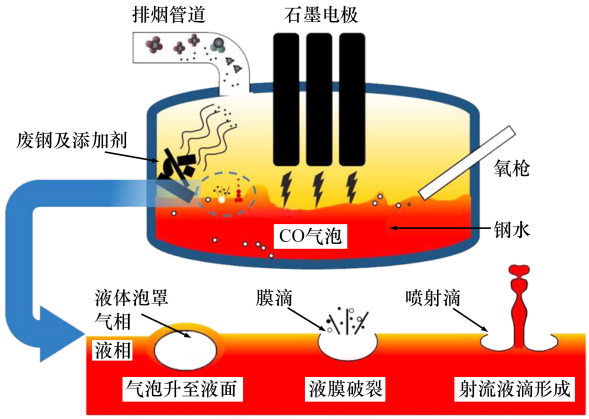


图 1　电炉粉尘的形成过程

Fig. 1　Formation process of electric furnace dust

2　含锌粉尘的理化性质

2.1　物理特性

高炉粉尘外观呈灰黑色，密度小、流动性较好，溶于水后呈弱碱性，其颗粒细小，属于微米级，外观呈不规则的立体几何形状。粉尘中的碱金属和碱土金属易与水发生反应，因此具有一定的腐蚀性和毒性。粉尘粒度分布不均匀，主要由细颗粒部分(1～10 μm)和较粗部分(10～100 μm)组成，其中 90% 的颗粒粒度小于 50 μm[9]。WU 等[10]与徐进[11]的研究表明，高炉粉尘的粒度为 10～150 μm，以 50～70 μm 范围内的颗粒为主，平均表观密度为 3.4621 g/cm^3。通过湿式除尘收集的高炉污泥呈灰黑色泥浆状，含水率为 20%～60%，难以脱水，平均粒度和堆密度普遍小于高炉粉尘。尽管高炉粉尘的粒度存在一定差异，但其颗粒粒度普遍小于 100 μm，分散性良好，仅有极少数颗粒之间出现黏结团聚现象。

转炉粉尘外观呈红褐色或深棕红色，密度小、比表面积大，溶于水后呈弱碱性，颗粒细小，呈球形，属于亚微米级，多由细小颗粒团聚而成[12]。WANG 等[7]研究表明，转炉粉尘颗粒的粒度分布在 1～10 μm 范围内，并主要集中在 1～10 μm 和 10～100 μm 两个区域，呈双峰分布。李翔[13]基于 LT 法收集的转炉粗颗粒粉尘和细颗粒粉尘进行分段研究，进一步验证了上述结论：粒度为 50～70 μm 粗灰占比为 66.93%，细灰占比为 13.13%；粒度为 30～50 μm 的粗灰占比为 6.07%，细灰占比为 34.13%；粒度小于 30 μm 的粗灰占比为 2.84%，细灰占比为 24.14%。粒度小于 70 μm 的转炉粉尘总体占比超过 70%，其中粗灰的粒度主要集中于 50～70 μm 区间，细灰的粒度则主要在 50 μm 以下。此外，粗灰的堆密度(约 1.472 g/cm^3)明显高于细灰(约 0.784 g/cm^3)。通过对转炉粉尘颗粒形貌及横截面的表征分析发现，颗粒以单质铁为核心，外围分布有铁氧化物和铁酸锌，而锌主要富集于颗粒外层[14]。转炉粉尘的粒径大小受化学成分波动影响较大，其粒度分布范围也显著受到除尘方式的影响。

电炉灰外观呈红褐色或暗红色，密度小、比表面积范围较广，颗粒尺寸非常细小，溶解后普遍呈碱性。多项研究[15-20]表明，电炉粉尘由多个细小颗粒团聚而成，单个细小颗粒的粒度主要分布在 0.1～10 μm 范围内；大于 10 μm 的大颗粒则由细小颗粒团聚形成，粉尘中 90% 的颗粒粒度小于 10 μm。WANG 等[21]对电炉粉尘颗粒的分布频率及形貌进行了表征分析，结果表明：90% 的粉尘颗粒粒度小于 9.77 μm，50% 小于 4.07 μm，10% 小于 2.12 μm；其微观结构特征为粒度小于 10 μm 的不规则形状、高度多孔的聚集体。然而，也有研究[22]指出，大多数单个颗粒粒度小于 20 μm，其中一小部分为氧化锌单晶体，大部分为富含锌的炉渣相和钢相的球形颗粒。DA SILVA 等[23]研究了电炉粉尘颗粒的形态，发现细小颗粒主要为圆球形，形状规则且分布均匀；大颗粒的形成机制：细小颗粒从液态金属和炉渣中喷出后，以氧化物或气相金属形式成核沉积，随后相互吸引形成更大的团聚体。不同电炉粉尘样品的粒度

区间分布虽有所差异，但普遍呈现“双峰”分布特征，这主要是由于电炉粉尘中铁、锌元素含量不同，导致其微观结构不均匀，其粒度主要分布在0.12~50 μm区间。

2.2 化学特性

高炉粉尘、转炉粉尘和电炉粉尘的具体成分如表1所示。由表1可知，转炉粉尘中铁元素含量显著高于高炉粉尘和电炉粉尘；高炉粉尘中碳元素和钾元素含量较高；电炉粉尘中锌元素含量明显高于前两者。据统计[24-26]，高炉粉尘的含锌量在0~9%之间，转炉粉尘为0~15%，电炉粉尘为3%~15%。相比之下，国外电炉粉尘的含锌量普遍高于20%，主要原因是其炼钢原料中废钢比例远高于国内，而废钢中本身含有一定量的锌元素，在冶炼过程中进入电炉粉尘。此外，不同除尘工艺也会影响含锌粉尘的化学成分。例如，采用LT法处理转炉粉尘时，蒸发冷却器收集的粗颗粒转炉粉尘中铁含量低于后段静电除尘捕集的细颗粒粉尘，而前者中钙、镁氧化物含量明显高于后者。这主要是由于喷淋过程中，碱土金属氧化物更易吸水，促使小颗粒团聚为大颗粒粉尘。此外，部分含锌粉尘中还含有镉、铋、铟等贵金属元素，具有极高的回收价值[27]。

各类含锌粉尘均在高温工艺条件下产生，且生产工艺和原料各不相同，因此其中元素的赋存状态也存在差异[28]。高炉粉尘、转炉粉尘及电炉粉尘中主要元素的物相组成如表2所示。总体而言，含锌粉尘中的锌元素主要以ZnO和$ZnFe_2O_4$形式存在，铁元素主要以Fe_2O_3和Fe_3O_4形式存在。其中，高炉粉尘中的锌以ZnO物相为主，而转炉粉尘和电炉粉尘中的锌则以$ZnFe_2O_4$物相为主，该物相结构较为稳定。高炉粉尘和电炉粉尘中的钾、钠元素以KCl和NaCl形式存在，铅元素以PbO或$PbCl_2$形式存在，所形成的金属氯化物在高温还原条件下极易挥发进入废气中。

3 处置技术

3.1 碳热还原工艺

碳热还原工艺是处理含锌粉尘最为成熟的方法。该工艺以碳为还原剂，在高温条件下还原锌氧化物和铁氧化物。反应生成的金属锌挥发进入烟气，随后被再次氧化为氧化锌而富集；铁氧化物则被还原为金属铁。根据铁还原产物的不同，碳热还原工艺可分为直接还原和熔融还原两大类。

表1 典型含锌粉尘的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of typical zinc-containing dust %

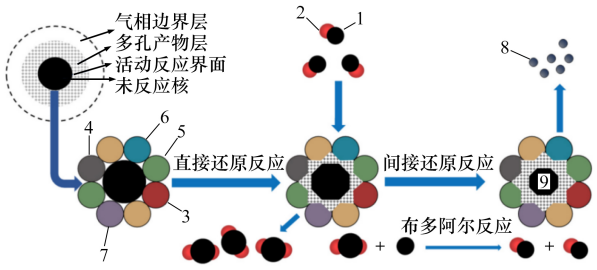
粉尘名称	样品序号	Fe	Zn	C	Ca	Mn	Mg	Si	K	Pb	Al	参考文献
高炉粉尘	1	36.80	1.49	21.70	5.38	—	0.71	5.21	0.87	0.59	2.33	[29]
	2	30.90	0.94	25.23	3.21	—	1.64	3.29	—	—	1.08	[30]
	3	43.60	0.40	20.50	5.57	—	0.42	3.03	—	—	1.54	[11]
转炉粉尘	1	53.89	3.63	—	5.99	—	1.14	—	0.42	—	0.05	[12]
	2	55.10	6.26	—	4.11	—	1.75	—	0.52	—	0.38	[8]
	3	57.64	3.10	—	4.27	0.57	0.78	1.63	—	0.04	0.21	[31]
电炉粉尘	1	42.30	9.72	—	5.38	2.67	1.60	1.91	1.61	0.19	0.45	[32]
	2	26.39	20.88	—	7.45	2.23	0.79	2.24	2.11	1.96	0.35	[33]
	3	36.69	23.95	—	4.35	4.44	—	1.74	—	1.24	—	[34]

表2 含锌粉尘主要元素的物相组成

Table 2 Phase constituents of key elements in zinc-containing dust

粉尘名称	Fe	Zn	K	Na	Pb	C	Cr	参考文献
高炉粉尘	Fe、Fe_3O_4、Fe_2O_3、FeO	ZnS、ZnO、$ZnFe_2O_4$	KCl	NaCl	—	C	—	[11,35]
转炉粉尘	Fe、Fe_3O_4、Fe_2O_3、FeO	ZnO、$ZnFe_2O_4$	—	—	—	C	—	[12-13]
电炉粉尘	Fe_3O_4、Fe_2O_3	ZnO、$ZnFe_2O_4$	KCl	NaCl	PbO、$PbCl_2$	—	CrO、$FeCr_2O_4$	[36-37]

熔融还原工艺的还原温度更高，可使电炉灰中几乎所有金属氧化物熔化，实现渣铁的有效分离。含锌粉尘在碳热还原过程中的反应机理如图 2 所示，主要化学反应如式(1)～(10)所示。



1—C；2—O；3—Fe_2O_3；4—Fe_3O_4；5—FeO；6—ZnO；7—$ZnFe_2O_4$；8—Zn；9—金属相及渣相。

图 2　碳热还原过程的反应机理

Fig. 2　The reaction mechanism of the carbothermal reduction process

直接还原反应：

$$ZnO(s)+C(s)=Zn(g)+CO(g) \quad (1)$$

$$ZnFe_2O_4(s)+4C(s)=Zn(g)+2Fe(s)+4CO(g) \quad (2)$$

$$3Fe_2O_3(s)+C(s)=2Fe_3O_4(s)+CO(g) \quad (3)$$

$$Fe_3O_4(s)+4C(s)=3FeO(s)+4CO(g) \quad (4)$$

$$FeO(s)+C(s)=Fe(s)+CO(g) \quad (5)$$

间接还原反应：

$$ZnO(s)+CO(g)=Zn(g)+CO_2(g) \quad (6)$$

$$ZnFe_2O_4(s)+4CO(g)=Zn(g)+2Fe(s)+4CO_2(g) \quad (7)$$

$$3Fe_2O_3(s)+CO(g)=2Fe_3O_4(s)+CO_2(g) \quad (8)$$

$$Fe_3O_4(s)+CO(g)=3FeO(s)+CO_2(g) \quad (9)$$

$$FeO(s)+CO(g)=Fe(s)+CO_2(g) \quad (10)$$

3.1.1　回转窑工艺

在众多火法冶金技术中，全球约 80% 的电炉粉尘采用 Waelz 工艺处理。该工艺经过 3～4 h 的焙烧，脱锌率可达 90%[38-39]。Waelz 工艺将电炉粉尘与还原剂、助熔剂均匀混合并制成复合球团，从窑尾送入 Waelz 窑内，逐渐加热至 1 100～1 200 ℃。在高温下，锌氧化物和铅氧化物被还原，以蒸汽形式挥发进入烟气，从而实现与炉料的分离[40]。随后，这些气体被氧化，以氧化物形式(即 Waelz 锌氧化物)被收集。焙烧料中的部分钾、钠等碱金属则以氯化物形式随锌氧化物一同被除尘系统捕集；无尘烟气经净化处理，去除其中的二噁英、镉等污染物后达标排放。与此同时，焙烧料在窑头出料前，部分金属铁在高温条件下被氧化，最终形成 Waelz 窑渣[41]。Waelz 窑工艺流程[42]如图 3 所示。

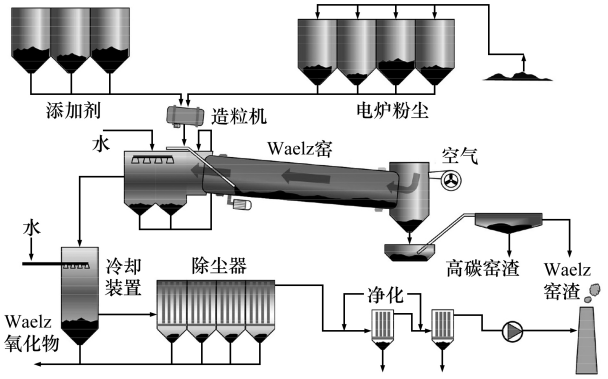


图 3　Waelz 工艺流程

Fig. 3　Process flow diagram of Waelz

Waelz 窑工艺具有工艺成熟、安装简便、原料适应性强等优点，已成为处理电炉粉尘的主流方法。然而，其缺点也十分明显：窑壁易形成结圈、操作难度大、能源效率低等问题长期存在，且当电炉粉尘含锌量低于 15% 时，该工艺的经济效益较差[43]。球团在窑内运动过程中不可避免会发生碰撞并产生粉化。其中，低熔点化合物(如硫化物、硫酸盐及卤化物等)在高温条件下极易熔化成液相，所形成的液体会加剧对炉衬的侵蚀，并与粉料相互作用，在炉衬上形成结瘤。这些结瘤会阻碍物料在窑内的运动，在不利的热条件和流动条件下，导致颗粒物累积，并与液相共同作用，在窑壁周边形成固体结块沉积，最终发展为结圈。

此外，操作不当会导致窑内出现局部高温，进一步加剧结圈的形成。窑内结圈会严重影响正常生产，降低作业效率。结圈的形成虽可控制，但难以完全避免。目前，主要控制手段包括：一是控制粉料入窑，降低窑内粉化率，减少结圈概率；二是严格规范操作制度，控制窑内温度分布，避免局部高温的出现。Waelz 窑工艺通常以焦粉或煤粉作为还原剂，为窑内理化反应提供所需的碳素和热量，每千克原料的热值普遍为 6 278.78～7 115.95 kJ，碳的利用率约为 75%，因此窑渣中残炭含量普遍偏高。

3.1.2 转底炉工艺

国内钢铁企业主要采用长流程炼钢，产生的含锌粉尘以高炉粉尘和转炉粉尘为主，锌含量普遍偏低，因此多数钢厂选择采用转底炉工艺处理厂内含铁含锌尘泥。经过 20～30 min 的处理，脱锌率普遍可达 90% 以上，直接还原铁(DRI)的金属化率最高可达 86.2%[44-45]。

转底炉工艺将含锌粉尘与还原剂、黏结剂按比例配料混合并制成球团，球团经干燥后通过布料设备均匀布设于转底炉炉床上。布料后，球团随炉床运动，首先经过约 1 000 ℃的加热区进行干燥预热，随后进入约 1 250 ℃的高温区域，快速发生还原反应，生成热态直接还原铁，最后经冷却设备降温后得到低温 DRI。与此同时，挥发性金属以卤化物或氧化物形式随高温烟气从转底炉排出，高温烟尘经余热回收降温后在收尘系统中被捕集，最终获得氧化锌粉。转底炉工艺产生的 DRI 可供高炉或转炉炼钢使用，氧化锌粉则可外售给锌冶炼企业。转底炉工艺流程[46]如图 4 所示。

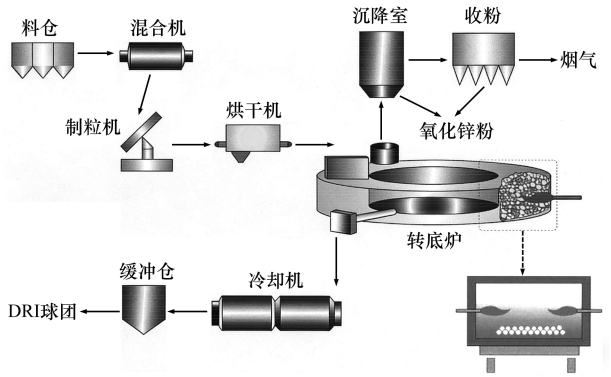


图 4 转底炉工艺流程

Fig. 4 Process flow diagram of rotary hearth furnance

转底炉工艺具有操作简便、工艺成熟、副产品价值高等优点，适用于处理钢铁企业产生的低锌粉尘。该工艺在一个生产周期内即可同时获得金属化球团和氧化锌粉，无需二次处理，显著提高了生产效率。此外，球团与炉床之间相对静止，减少了焙烧过程中球团粉化的概率。然而，转底炉工艺对入炉原料的要求较为严格：球团含锌量宜低于 5%，碱度需控制在 2 左右。含锌量过高不仅会影响 DRI 的品质，还会破坏炉内耐火材料。具体而言，氧化锌在转底炉内被还原为锌单质，受炉内压力影响，锌蒸气极易渗入耐火材料内部，随后被氧化为氧化锌，并与耐火材料中的 SiO_2、Al_2O_3 等反应生成低熔点化合物，从而加剧对耐火材料的侵蚀。同时，高温下挥发的锌蒸气还会破坏金属化球团的渣相，使其内部结构变得疏松多孔，降低球团强度；球团含锌量越高，DRI 的强度越低。合理控制球团碱度有助于形成适宜的渣系结构，使球团在高温下生成一定液相，填充因碳消耗及氧化物还原而产生的内部孔隙，从而使球团结构致密，提高其强度。

除原料要求外，工艺方面也有严格规定：烘干后球团含水率应小于 1%，且需严格控制造球质量。造球质量越高，返料率越低，生产率越高，金属化球团品质也越有保障；含水率过高时，球团进入转底炉后在高温下易发生爆裂，严重影响产品质量。通过严格执行转底炉的作业制度和配料制度，可获得高品质的金属化球团和氧化锌粉。就设备本身而言，受炉内气氛向球团传热的限制，炉床上只能布设 1～1.5 层球团，这极大限制了转底炉的利用率。转底炉工艺通常以焦粉或含锌粉尘自身携带的碳作为还原剂，并辅以高热值燃气提供理化反应所需热量，每千克原料的热值普遍为 4 604.44～5 441.61 kJ，碳利用率约为 90%，因此 DRI 中的残炭含量远低于 Waelz 窑渣。

3.1.3 电炉熔融还原工艺

电炉熔融还原工艺以电炉为核心设备，利用电炉对物料进行加热并还原其中的氧化物，该工艺主要用于处理电炉粉尘[47]。工艺流程如图 5 所示[48]。由图 5 可见，含锌粉尘与还原剂、添加剂混合造粒后，通过装料器送入电炉中进行熔融还原反应。电炉内温度可达 1 400 ℃左右，锌、铅等挥发性金属在此区域被还原，随后被氧化，并与氯化物一同随烟气进入燃烧室进一步充分氧化。燃烧室内收集的大颗粒烟尘返回电炉回用，细颗粒烟尘则经冷却器降温后，由布袋除尘器收集，得到氧化锌粉。熔融还原生成的金属铁在高温下熔化为铁水，与炉渣分层后分别从出铁口和出渣口排出。所得熔融铁水可供转炉或电炉炼钢使用，而高温炉渣在缓慢冷却条件下形成的结晶炉渣，可用作建筑材料的骨料。

采用电炉熔融还原工艺处理电炉粉尘时，仅

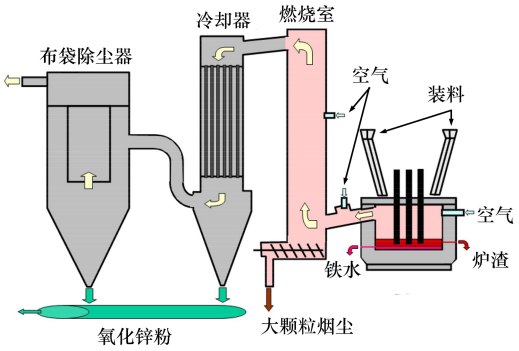


图 5　电炉熔融还原工艺流程

Fig. 5　Process flow diagram of smelting reduction by electric furnance

使用电能加热，减少了碳素燃料的消耗，从而降低烟气量和杂质含量，有利于提高氧化锌粉中锌的品位。熔融还原产生的高温铁水可通过铁水罐输送至转炉或电炉炼钢使用，减少热量损失，提升冶炼效率。此外，炉内气体温度高(超过 1 250 ℃)，可完全分解电炉粉尘中的二噁英及其他有机物。炉渣中有害物质残留量低，重金属浸出率极低，炉渣具有广泛的利用前景。然而，该工艺也存在明显不足：高温烟气的热能未得到充分利用，且以电能作为热源的成本较高。

综上，回转窑工艺(Waelz 工艺)和转底炉工艺属于典型的直接还原工艺，而电炉熔融还原工艺则是具有代表性的熔融还原工艺。前者产出直接还原铁产品，后者得到熔融铁水。回转窑工艺和转底炉工艺经过多年发展，均已具备工艺成熟、设备运行稳定、生产效率高、生产环境可控等优点。目前，回转窑已形成年处理能力为 5 万 ~ 20 万吨的系列化产品，转底炉则形成了 10 万、20 万、25 万、30 万吨的系列化产品。国际上普遍采用回转窑工艺处理电炉粉尘；近年来，国内对该工艺进行了一系列升级优化，加之其投资及运行成本远低于转底炉工艺，陆续有钢铁企业采用回转窑技术处理厂内含锌尘泥，以实现脱锌提铁的目标。转底炉工艺主要用于处理低锌粉尘(如高炉粉尘、转炉粉尘等)，其产出的氧化锌粉及金属化球团附加值极高，因此尽管投资及运行成本较高，仍被大多数钢铁企业所采纳。电炉熔融还原工艺的反应温度高于前两者，所得液态铁杂质更少，炉渣处理方式也更为多样。然而，该技术存在能耗高、生产操作复杂等缺点，极大限制了其推广应用。

3.2　湿法工艺

湿法工艺处理含锌粉尘的基本原理是利用金属氧化物可溶于酸、碱、盐等溶液的特性，在常温或非高温条件下，将有价金属从混合物中分离进入浸出液。含有价金属的浸出液经净化处理后，通过电解方式使锌等金属从溶液中富集回收，浸出渣则经处理后达标排放。在含锌粉尘湿法处理工艺中，技术较为成熟的包括 ZINCEX、Chaparral、Terra Gaia 及 EZINEI 等工艺[49-52]。

酸浸法、碱浸法及铵浸法的反应原理主要基于 ZnO 作为两性氧化物的特性。常见浸出剂及浸出原理[34]如图 6 所示。以硫酸为代表的酸性浸出法，利用溶剂中的 H^+ 与含锌粉尘中的锌氧化物及铁氧化物发生反应，所得含锌浸出液通过电解富集得到锌单质。含锌粉尘中的锌元素以 ZnO 和 $ZnFe_2O_4$ 形式存在，其中 ZnO 中的锌在弱酸条件下即可被浸出；而 $ZnFe_2O_4$ 是一种结构稳定的尖晶石，难溶于稀酸，其中的锌浸出较为困难。碱浸法利用氢氧根离子(OH^-)与含锌粉尘中的锌氧化物反应，再经电解富集得到锌单质，常用碱浸溶剂为氢氧化钠溶液。该法对氧化锌浸出效果显著，但对铁酸锌溶解仍较困难。铵浸法则利用铵根离子(NH_4^+)水解形成的氨水($NH_3 \cdot H_2O$)，与氧化锌选择性生成锌氨络合物，而铁氧化物在氨溶剂中不发生络合配位，从而实现氧化锌的选择性分离提取，最终通过萃取、蒸发、蒸馏、电解等方式制得锌单质或氧化锌[53-54]。

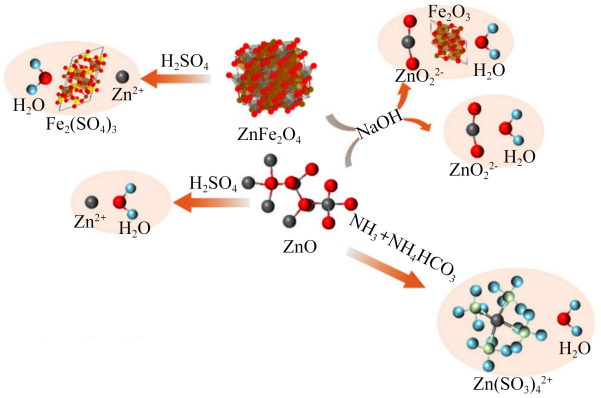


图 6　常见浸出剂及浸出原理

Fig. 6　Common leaching agents and leaching principle

低浓度的浸出液只适宜提取氧化锌中的锌元素，对铁酸锌中的锌元素浸出较难，需采取高浓度、高温、高压等手段才能去除铁酸锌中的锌元素，这对设备的要求更高。国内外研究人员为此开展了大量研究，提出将高温焙烧和湿法浸出相结合的方法处理含锌粉尘。XIA 等[55]通过氢氧化钠焙烧处置电炉粉尘，先在 400 ℃条件下，将质量比为 4∶1 的氢氧化钠与铁酸锌混合物焙烧 30 min，再利用 4 mol/L 的 NaOH 在 90 ℃条件下浸出 90 min，电炉粉尘的浸出率可达 95%。ZHAO 等[56]对铁酸锌中锌回收行为进行了研究，发现铁酸锌中约 75%~80% 的锌在与氢氧化钠颗粒直接熔融并溶解在碱性浸出液中后可以被提取出来。WANG 等[57]以高炉污泥为原料，采用“铵浸 + 硫酸酸浸”的联合工艺方法浸出其中的锌、铋等元素，其中锌的回收率为 70%，铋的回收率为 72%。CHAIRAKSA-FUJIMOTO 等[58-59]对电炉粉尘在不同温度、不同 CaO 量条件下 $ZnFe_2O_4$ 转化为 ZnO 的情况进行了研究，并得出转化过程中 CaO 添加的最佳条件：处理温度为 900 °C，处理时间为 1 h，Ca/Fe 的物质的量之比为 1.1∶1；随后采用 NaOH 溶剂对 CaO 处理后的电炉粉尘进行碱性浸出，经 CaO 处理后粉尘中提取出的锌明显更多，铁和钙以 $Ca_2Fe_2O_5$ 和 $Ca_3Fe_2(OH)_{12}$的形式留在浸出渣中。MIKI 等[60]使用氯化铵溶液对经 CaO 处理后的粉尘进行锌与铁、钙的选择性浸出研究，结果表明：在温度为 70 ℃、2 mL 氯化铵、固液比为 1/300、保温 2 h 后，电炉粉尘中的大部分锌被提取，铁以 $Ca_2Fe_2O_5$ 的形式留在残渣中。XIE 等[61-62]先对钙焙烧 - 氨浸工艺从铁酸锌中提取锌进行研究，得出在 $CaO/ZnFe_2O_4$ 物质的量之比为 2.4∶1、焙烧温度为 1 230 ℃、焙烧时间为 2 h 的条件下，锌浸出率可达 90.41%；随后对含锌粉尘钙焙烧—氨浸工艺中锌的相变及提取进行了更深入的研究，表明在 1 250 ℃、氧化钙质量分数为 60% 的条件下，粉尘中铁酸锌的转化能够完成，锌的回收率可达 86.12%。蒋刘东等[63]通过对比火法工艺、湿法工艺以及火湿法联合工艺处理炼钢粉尘，认为通过氧化钙焙烧炼钢粉尘重构铁酸锌，可实现粉尘中铁、锌的选择性分离。WANG 等[64]通过试验研究了 $CaCO_3$ 对高炉粉尘自还原提取锌的影响，结果表明：在 1 000 ℃还原高炉灰时，添加 10% 的 $CaCO_3$，还原 25 min，锌的去除率可达 98.82%，并进一步研究表明，$CaCO_3$ 可强化难还原的 $ZnFe_2O_4$ 还原分解为 ZnO 和低价铁的氧化物。

综上，相较于火法工艺，湿法工艺具有能耗低、投资小、选择性强的优势，其浸出液经电解后可获得高附加值的锌单质产品。然而，由于铁酸锌性质稳定，低浓度浸出液难以将其有效分解，需借助高浓度、高温、高压等强化手段才能打破铁酸锌参与反应的壁垒。高浓度浸出液对设备要求更高，且反应后产生大量的液体危险废物，处置不当极易造成二次污染。铵浸法的浸出效率较低，并在生产过程中产生有害气体。通过低温焙烧或钙化焙烧对含锌粉尘进行预处理，再在低浓度浸出液条件下选择性浸出锌，可实现锌元素的高效分离。然而，该联合工艺存在流程长、操作复杂等问题，且在浸出液及浸出渣的二次处置过程中，存在污染环境的风险，故难以推广及应用。

3.3 微波工艺

微波的频率范围为 0.3~300 GHz，对应波长为 1~1 000 mm，属于一种低频电磁波。在该频率范围内，微波可分为三个主要频段：特高频(0.3~3 GHz)、超高频(3~30 GHz)和极高频(30~300 GHz)[65-66]。微波加热与传统加热存在本质区别。微波加热涉及电磁能向热能的转换，微波能量通过分子与电磁场的相互作用直接传递给材料，穿透材料并使其内部整体产热，实现体积加热，从而使被加热物质均匀受热。而传统加热则依靠传导、对流和热辐射，将外部热源的能量传递至材料表面，热量由外向内逐层传递，温度沿厚度方向呈梯度下降[67-69]。除体积加热外，微波加热还具有选择性、高效性、及时性、无污染以及非接触等优点。基于这些优势，微波技术已被广泛应用于污泥处理、污染土壤修复、医疗废物处理、材料加工、食品加工等众多物理与化学领域[70-72]。不同电磁波的频谱如表 3 所示。

随着微波技术的发展，其加热均匀、高效节能、无污染等特点引起了国内外研究者的广泛关

表 3　从低频（无线电波）到高频（伽马射线）的电磁频谱

Table 3　Electromagnetic spectrum from low frequency（radio）to high frequency（gamma-ray）

项目	波长/m	频率/GHz	等效温度范围/K
无线电波	$1.0\times10^{-3}\sim3.0\times10^{7}$	$3.0\times10^{-8}\sim300.0$	$2.9\times10^{-7}\sim2.9$
微波	0.1～1.0（特高频）	0.3～3.0	$2.9\times10^{-3}\sim2.9\times10^{-2}$
	$1.0\times10^{-2}\sim0.1$（超高频）	3.0～30.0	$2.9\times10^{-2}\sim2.9\times10^{-1}$
	$1.0\times10^{-3}\sim1.0\times10^{-2}$（极高频）	30.0～300.0	$2.9\times10^{-1}\sim2.9$
红外线	$7.0\times10^{-7}\sim1.0\times10^{-3}$	$300.0\sim4.3\times10^{5}$	2.9～4 140.0
可见光	$4.0\times10^{-7}\sim7.6\times10^{-7}$	395.0～750.0	3 813.0～7 245.0
紫外线	$1.0\times10^{-8}\sim4.0\times10^{-7}$	$7.5\times10^{4}\sim3.0\times10^{7}$	7 245.0～289 800.0
X 射线	$1.0\times10^{-11}\sim1.0\times10^{-8}$	$3.0\times10^{4}\sim3.0\times10^{7}$	$2.9\times10^{5}\sim2.9\times10^{8}$
γ 射线	$<1.0\times10^{-11}$	$>3.0\times10^{7}$	$>2.9\times10^{8}$

注。STANDISH 等[73-74]率先采用微波加热对含碳金属球团的还原行为进行了研究，指出利用微波加热的均匀特性可克服传统球团焙烧过程中存在的“冷中心”现象。随后，他们以马弗炉和微波加热炉为设备，在 1 000 ℃下对比了传统加热还原与微波加热还原铁矿石的效果，结果表明：在相同条件下微波加热优于传统还原工艺，微波加热仅需约 15 min 即可达到传统加热还原的水平。上述研究验证了微波加热还原金属氧化物的可行性，并表明微波加热能有效促进碳热还原反应的进行。

彭开玉等[75]以 C 和 SiC 为还原剂，研究了微波场下冶金含锌尘泥的脱锌过程，结果表明：微波处理脱锌反应迅速、效果显著，所得氧化锌纯度可达 97.7%。周云等[76-77]研究了含锌尘泥在微波场中的升温特性，采用频率 2.45 GHz、功率 0～7 kW 的微波加热设备进行加热还原，发现含锌尘泥对微波具有较强的吸收能力，升温速率与微波功率成正比，增大单位质量物料的微波辐射面积可提高升温速度。随后，他们对电炉粉尘在微波场下的脱锌过程进行了研究，结果表明：在无保护气氛条件下，微波碳热还原电炉粉尘的脱锌率可达 80% 左右，且脱锌率随配煤量、煤粉粒度及微波功率的增加而提高。

陈晨等[78]研究了微波加热含锌粉尘的物相形貌特征及还原过程，结果表明：含锌粉尘与煤粉均具有较强的微波吸收能力，加热 20 min 后金属化率均可达 80% 以上，且铁氧化物的还原率越高，脱锌率越高。马星宇[79]研究了微波协同处理高炉与转炉除尘灰以回收有价元素，发现在还原温度为 1 100 ℃、还原时间为 20 min、料层高度为 2 cm、水分质量分数为 6% 的条件下，锌脱除率达 99.346%，且收集到的冷凝物中仅有少量 KCl 挥发。ZHANG 等[80]采用真空微波辅助碳热还原法研究了含锌粉尘中锌的去除与还原，结果表明：在 1 150 ℃、C/O 质量比为 1.2、系统压力为 100 Pa、微波输出功率为 1 100 W 条件下还原 20 min，锌去除率可达 94.64%，铁金属化率达 99.68%。WANG 等[21]研究了微波辅助碳热还原法从电炉粉尘中回收锌的影响因素及机理，结果表明：在还原温度为 1 100 ℃、还原时间为 60 min、C/Zn 物质的量之比为 5∶1的条件下，锌去除率可达 95.45%。

除微波加热碳热还原外，各国研究者也在探索其他基于微波技术处理含锌粉尘的方法。VEREŠ 等[9]对比了常规酸浸与微波辅助酸浸处理高炉污泥的脱锌效率，结果表明：在同等条件下，微波加热的锌回收率比传统浸出高出 10%～20%。MA 等[81]研究了不同浸出剂的氨浸体系下从高炉粉尘中提取锌的效果，发现硫酸铵效果尤为显著，在总氨浓度为 5 mol/L、氨与铵盐配比为 1∶1、固液比为 1∶5、温度为 45 ℃、浸出时间为 60 min 的条件下，锌提取率高达 86.48%。AL-HARAHSHEH 等[82]研究了电炉粉尘与 PVC 的微波处理，结果表明：利用微波能量在 2～3 min 内对两者进行热处

理，当电炉粉尘与 PVC 质量比为 1∶2时，锌回收率可达 99% 以上。ALTARAWNEH 等[83]研究了电炉粉尘与 PVC 微波热处理的相关基础机制，结果表明：PVC 可作为含锌粉尘回收的添加剂，在 235 ℃热解条件下，能将 ZnO 和 $ZnFe_2O_4$ 中的锌选择性转化为 $ZnCl_2$，同时使铁以稳定的 Fe_2O_3 形式存在。YE 等[84]以废弃橡木刨花热解所得生物炭为还原剂，对比了传统加热与微波辅助加热对电炉粉尘中金属元素的还原行为，结果表明：微波辅助还原后产物的铁金属化率达 94.7%，远高于传统加热方式下的 67.6%。

综上，与传统加热方式相比，微波加热在处理含锌粉尘过程中无需额外添加碳素原料即可提供反应所需热量，减少了 CO_2 排放，为火法冶金固废处置领域提供了一种高效环保的替代方案。同时，微波辅助碳热还原通过非热效应优化了物料的孔隙结构及反应路径，使加热更加均匀，设备热损失更低。该方法对脱锌反应具有促进和催化作用，并可降低还原反应温度，为含锌粉尘的资源化利用提供了更高效的解决方案。此外，微波处理工艺还可选用 PVC、生物炭等作为还原剂，拓宽了还原剂的选择范围，为含锌固废处置提供了新思路。

4 结论与展望

（1）高炉粉尘与转炉粉尘属于低锌高铁的冶金固体废物，主要采用转底炉技术进行处理，获得高附加值的氧化锌粉以及高质量的金属化球团。随着我国产业结构变化，电炉钢比例将会增高，电炉粉尘的产生量增大，粉尘中含锌量势必增高，转底炉技术将很难进行处置。回转窑技术处理电炉粉尘具有工艺成熟、生产效率高的优点，易结圈、操作难度大的问题短时间内仍难以解决。此外，碳热还原工艺需在 1 000 ℃以上的高温条件下进行，消耗大量含碳原料或高热值煤气，反应工艺能耗高、CO_2 排放量大。

（2）湿法工艺较碳热还原工艺具有低能耗、低投资、产品附加值高的优势，主要用于处理高锌低铁的电炉粉尘。为提高电炉粉尘中锌的浸出率，需采取高浓度、高温、高压等技术手段，该过程会产生大量的液体危废。通过氢氧化钠焙烧和钙化处理等预处理手段对锌的浸出率有一定程度的提高，然而，湿法直接浸出工艺锌的浸出效率低、设备腐蚀严重、工艺流程复杂、极易造成二次污染等问题，限制了其应用推广。

（3）微波加热为钢厂含锌粉尘处置提供了一种清洁高效的方法，含锌粉尘中铁和锌的化合物对微波的吸收能力强，能有效地将微波能转化成电能。加热过程中无需额外添加碳素原料就能产生反应所需的热量。还原剂的选择性更广，可以采用 PVC、生物炭等作为还原剂。微波加热是体加热，加热均匀、反应更快速，能有效提高锌的脱除率和铁的金属化率。总之，微波加热处理含锌粉尘技术潜力巨大，可为钢铁企业含锌尘泥治理提供环境友好、可持续的技术方法。

（4）建议对不同含锌粉尘的升温行为和介电性能的影响因素进行研究，并对不同添加剂、球团尺寸形状、造球方式等影响因素进行试验，探究分析不同含锌粉尘在微波条件下的结构变化，选择经济、高效的技术方案，实现含锌粉尘的脱锌提铁。这样既能减少二氧化碳、废浸出液、废渣等有害物质的排放，又能实现含锌粉尘的资源化利用。

参考文献：

[1] ZHANG J S, ZHANG Y Z, LONG Y, et al. Characterization of physical and chemical properties of multi-source metallurgical dust and analysis of resource utilization pathways[J]. Metals, 2024, 14(12): 1378.

[2] WANG D Z, ZHU D Q, PAN J, et al. A high-efficiency separation process of Fe and Zn from zinc-bearing dust by direct reduction[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(10): 1559 – 1572.

[3] GORACHEV I K. Development, refinement, production, and introduction of fabric filters for purification of industrial waste gases[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 1998, 34(11): 744 – 745.

[4] 邹永安. 高炉煤气布袋除尘技术的发展与展望[J]. 四川冶金, 2008, 30(5): 55 – 57; 64.
ZOU Yongan. Development and prospect of the bag-type dust removing technology for blast furnace gas[J]. Sichuan Metallurgy, 2008, 30(5): 55 – 57; 64.

[5] 何鸿福. 单文氏管洗涤器在南钢 5 号高炉煤气处理系统上的应用[J]. 炼铁,2001,20(增刊 1):68 – 69.
HE Hongfu. Application of single venturi scrubber in gas treatment system of No. 5 blast furnace in Nangang[J]. Ironmaking,2001,20(S1):68 – 69.

[6] 王树楷. 瓦斯灰回收有色金属及再资源化[J]. 资源再生,2009(10):48 – 50.
WANG Shukai. Recovery and recycling of non-ferrous metal from the ash gas[J]. Resource Recycling, 2009(10):48 – 50.

[7] WANG J,ZHANG Y Y,CUI K K,et al. Pyrometallurgical recovery of zinc and valuable metals from electric arc furnace dust:A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,298:126788.

[8] 薛阳. 炼钢炉尘钙化 – 氯化复合活化与氧压硫酸浸出法回收锌及尾渣高值利用[D]. 北京:北京科技大学,2024.
XUE Yang. Zinc recovery from steelmaking dust by calcification-chlorination composite activation method and oxygen pressure sulfuric acid leaching method and high-value utilization of tailings[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2024.

[9] VEREŠ J,JAKABSKÝ Š,LOVAS M. Zinc recovery from iron and steel making wastes by conventional and microwave assisted leaching[J]. Acta Montanistica Slovaca,2011,16(3):185 – 191.

[10] WU S L, CHANG F, ZHANG J L, et al. Kinetics and reduction behavior of self-reducing briquettes containing blast furnace dust[C]//8th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. Cham: Springer,2017:591 – 601.

[11] 徐进. 高炉粉尘飞行熔融还原过程多相传输行为的基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2021.
XU Jin. Fundamental study on multiphase transport behaviors of blast furnace dust during flight smelting reduction process[D]. Shenyang: Northeastern University,2021.

[12] ZHENG Z H,XIONG G,LIU X,et al. Characterization of steelmaking zinc-containing converter dust[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020,782(2):022047.

[13] 李翔. 转炉除尘灰冷固球团气硬性黏结机制及除尘系统结垢研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
LI Xiang. Nonhydraulic bonding mechanism of cold-bonded BOF dust pellets and agglomeration in cleaning system[D]. Chongqing:Chongqing University,2021.

[14] KELEBEK S, YÖRÜK S, DAVIS B. Characterization of basic oxygen furnace dust and zinc removal by acid leaching[J]. Minerals Engineering,2004,17(2):285 – 291.

[15] TSAKIRIDIS P E,OUSTADAKIS P,KATSIAPI A,et al. Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD). Part II: Downstream processing and zinc recovery by electrowinning[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 179(1/2/3): 8 – 14.

[16] XANTHOPOULOS P, AGATZINI-LEONARDOU S, OUSTADAKIS P, et al. Zinc recovery from purified electric arc furnace dust leach liquors by chemical precipitation[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2017,5(4):3550 – 3559.

[17] TRIFUNOVIC V, MILIC S, AVRAMOVIC L, et al. Investigation of hazardous waste a case study of electric arc furnace dust characterization[J]. Hemijska Industrija,2022,76(4):237 – 249.

[18] MATSUKEVICH I, KULINICH N, ROMANOVSKI V. Direct reduced iron and zinc recovery from electric arc furnace dust[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology,2022,97(12):3453 – 3458.

[19] HUANG J D,YANG X. Unveiling the power of $MgCl_2$ in extracting zinc from electric arc furnace dust[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025, 215: 108085.

[20] BURMISTROV I,KISELEV N,KHAYDAROV T,et al. Composite high-k films based on polyethylene filled with electric arc furnace dust and MWCNT with permittivity synergetic effect[J]. Coatings,2023,13(4):672.

[21] WANG K,LU C Y,WEI T D,et al. Influencing factors and mechanisms of zinc recovery from electric arc furnace dust via microwave-assisted carbothermic reduction[J]. Metals,2025,15(4):437.

[22] BAKKAR A. Recycling of electric arc furnace dust through dissolution in deep eutectic ionic liquids and electrowinning[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014,280:191 – 199.

[23] DA SILVA M C,BERNARDES A M,BERGMANN C P, et al. Characterisation of electric arc furnace dust generated during plain carbon steel production[J].

Ironmaking & Steelmaking,2008,35(4):315 – 320.

[24] 王会刚. 含锌电炉粉尘锌的高效选择性提取及有价金属元素综合利用基础研究[D]. 北京:北京科技大学,2018.
WANG Huigang. Fundamental study on the efficient selective extraction of zinc and comprehensive utilization of valuable metallic elements from zinc-containing electric arc furnace dust[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2018.

[25] AHMAD S, SAJAL W R, GULSHAN F, et al. Thermodynamic analysis of caustic-roasting of electric arc furnace dust[J]. Heliyon,2022,8(10):e11031.

[26] XIAO X, ZHANG S F, ZHANG H, et al. Extraction of rare and high-valued metals from blast furnace dust [C]//Rare Metal Technology 2020. Cham: Springer, 2020:305 – 315.

[27] ZHANG R, GUO Z, ZHU D, et al. Co-disposal study of zinc-containing slag and dust based on coal-based rotary kiln direct reduction method[J]. J. Iron Steel Res,2022, 35:219 – 231.

[28] ZHANG J S, ZHANG Y Z, LONG Y, et al. Multi-source ferrous metallurgical dust and sludge recycling: Present situation and future prospects[J]. Crystals, 2024, 14(3):273.

[29] 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.

[30] 陈书文,田晨,李杰. 高炉瓦斯灰锌铁分离及其动力学研究[J]. 烧结球团,2017,42(5):39 – 43.
CHEN Shuwen, TIAN Chen, LI Jie. Study on the separation experiments and kinetics of zinc and iron in blast furnace gas ash[J]. Sintering and Pelletizing, 2017,42(5):39 – 43.

[31] 张建松,张玉柱,龙跃,等. 转炉除尘灰碳热还原试验研究[J]. 烧结球团,2022,47(6):76 – 83;131.
ZHANG Jiansong, ZHANG Yuzhu, LONG Yue, et al. Experimental research on carbothermal reduction of converter fly ash[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(6):76 – 83;131.

[32] 都日苏拉,王哲,郭占成. 电炉粉尘含碳球团熔态还原特性及其机理[J]. 江西冶金,2023,43(4):273 – 280;351.
DU Risula, WANG Zhe, GUO Zhancheng. Melting state reduction characteristics and mechanism of carbon-containing pellets from electric furnace dust[J]. Jiangxi Metallurgy,2023,43(4):273 – 280;351.

[33] NEMCHINOVA N V, PATRUSHOV A E, TYUTRIN A A. Pyrometallurgical technology for extracting iron and zinc from electric arc furnace dust[J]. Applied Sciences, 2023,13(10):6204.

[34] MAŁECKI S, GARGUL K, WARZECHA M, et al. High-performance method of recovery of metals from EAF dust: Processing without solid waste[J]. Materials,2021, 14(20):6061.

[35] NAYAK N P. Characterization of blast furnace flue dust: An assessment for its utilization[J]. Materials Today: Proceedings,2022,50:2078 – 2083.

[36] 彭兵,彭及. 不锈钢电弧炉粉尘的物理化学特性及形成机理探讨[J]. 北方工业大学学报,2003,15(1):34 – 40.
PENG Bing, PENG Ji. Physical and chemical characteristics of dust from electric arc furnace stainless steelmaking and mechanism of its formation[J]. Journal of North China University of Technology,2003,15(1): 34 – 40.

[37] MORCALI M H, YUCEL O, AYDIN A, et al. Carbothermic reduction of electric arc furnace dust and calcination of Waelz oxide by semi-pilot scale rotary furnace[J]. Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy,2012,48(2):173 – 184.

[38] SUETENS T, KLAASEN B, VAN ACKER K, et al. Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy efficiency[J]. Journal of Cleaner Production,2014,65:152 – 167.

[39] STROHMEIER G, BONESTELL J E. Steelworks residues and the Waelz kiln treatment of electric arc furnace dust [J]. Iron & Steel Engineer,1996,73(4):87 – 90.

[40] 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.

[41] CORONADO M, ANDRÉS A, CHEESEMAN C R. Acid gas emissions from structural clay products containing secondary resources: Foundry sand dust and Waelz slag [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 115: 191 – 202.

[42] MAGER K, MEURER U, WIRLING J. Minimizing dioxin

and furan emissions during zinc dust recycle by the Waelz process[J]. JOM,2003,55(8):20 – 25.

[43] KIRANKUMAR T,ROY G G. A review on processing of electric arc furnace dust (EAFD) by pyro-metallurgical processes[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals,2022,75(5):1101 – 1112.

[44] SUETENS T, KLAASEN B, ACKER K V, et al. Exergy based comparison of the Waelz kiln process and RHF for the treatment of EAF dust[C]//International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking, Scanmet IV. Lulea:Swerea MEFOS,2012:521 – 530.

[45] 李林,野田悦郎,徐萌,等. 电炉粉尘资源化转底炉工艺试验研究[C]//中国金属学会. 第十四届中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社,2023:184 – 189.
LI L, NODA E, XU M, et al. Process test research of rotary hearth furnace for resource utilization of electric arc furnace dust[C]//The Chinese Society for Metals. Beijing: The 14th China Iron and Steel Annual Conference,2023:184 – 189.

[46] MASSON N, BRIOL P. A brief summary of zinc oxide processing methods available for the Bongara deposit [J]. PBSIM & BFS Consulting Engineering,2017,1:1 – 11.

[47] MICHIO, NAKAYAMA, SANAT, et al. New EAF dust treatment process:ESRF[J]. Iron & Steel Review,2018, 61(9):122 – 127.

[48] SUN X, HWANG J Y, HUANG X D. The microwave processing of electric arc furnace dust[J]. JOM, 2008, 60(10):35 – 39.

[49] ZHAO Y C, STUCKI S, LUDWIG C, et al. Impact of moisture on volatility of heavy metals in municipal solid waste incinerated in a laboratory scale simulated incinerator[J]. Waste Management,2004,24(6):581 – 587.

[50] VAN HERCK P, VANDECASTEELE C, SWENNEN R, et al. Zinc and lead removal from blast furnace sludge with a hydrometallurgical process[J]. Environmental Science & Technology,2000,34(17):3802 – 3808.

[51] ZHAO Y C, STANFORTH R. Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000,80(1/2/3):223 – 240.

[52] JARUPISITTHORN C, PIMTONG T, LOTHONGKUM G. Investigation of kinetics of zinc leaching from electric arc furnace dust by sodium hydroxide[J]. Materials Chemistry and Physics,2003,77(2):531 – 535.

[53] RUIZ O, CLEMENTE C, ALONSO M, et al. Recycling of an electric arc furnace flue dust to obtain high grade ZnO [J]. Journal of Hazardous Materials,2007,141(1):33 – 36.

[54] LUO X G, WEI C, LI X B, et al. The use of carbon-dioxide to enhance the solvent extraction of zinc from ammonia leaching solutions of blast furnace dust[J]. Hydrometallurgy,2020,197:105458.

[55] XIA D K, PICKLES C A. Caustic roasting and leaching of electric arc furnace dust[J]. Canadian Metallurgical Quarterly,1999,38(3):175 – 186.

[56] ZHAO Y C, STANFORTH R. Extraction of zinc from zinc ferrites by fusion with caustic soda[J]. Minerals Engineering,2000,13(13):1417 – 1421.

[57] WANG Y, YANG Y, LI G, et al. Research on zinc and bismuth recovery from blast furnace sludge[J]. Inorganic Chemicals Industry,2007,39:42 – 44.

[58] CHAIRAKSA-FUJIMOTO R, INOUE Y, UMEDA N, et al. New pyrometallurgical process of EAF dust treatment with CaO addition[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials,2015,22(8):788 – 797.

[59] CHAIRAKSA-FUJIMOTO R, MARUYAMA K, MIKI T, et al. The selective alkaline leaching of zinc oxide from Electric Arc Furnace dust pre-treated with calcium oxide [J]. Hydrometallurgy,2016,159:120 – 125.

[60] MIKI T, CHAIRAKSA-FUJIMOTO R, MARUYAMA K, et al. Hydrometallurgical extraction of zinc from CaO treated EAF dust in ammonium chloride solution[J]. Journal of Hazardous Materials,2016,302:90 – 96.

[61] XIE Z Q, JIANG T, CHEN F, et al. Phase transformation and zinc extraction from zinc ferrite by calcium roasting and ammonia leaching process[J]. Crystals, 2022, 12(5):641.

[62] XIE Z Q, LI G, GUO Y F, et al. Mineral phase reconstruction and separation behavior of zinc and iron from zinc-containing dust[J]. Materials, 2023, 16(9): 3481.

[63] 蒋刘东,李萍萍,杜传明,等. 炼钢粉尘中锌分离和回收的研究进展[J]. 中国有色冶金,2022,51(6):81 – 90.

JIANG Liudong, LI Pingping, DU Chuanming, et al. Research development of zinc separation and recovery from steelmaking dust[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022,51(6):81 – 90.

[64] WANG W A, LI X M, HE Y, et al. Effect of $CaCO_3$ on volatilization of self-reduced zinc from blast furnace dust [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022,29(9):1404 – 1411.

[65] SUN J, WANG W L, YUE Q Y. Review on microwave-matter interaction fundamentals and efficient microwave-associated heating strategies[J]. Materials, 2016,9(4): 231.

[66] EL KHALED D, NOVAS N, GAZQUEZ J A, et al. Microwave dielectric heating: Applications on metals processing[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,82:2880 – 2892.

[67] MOTSHEKGA S C, PILLAI S K, SINHA RAY S, et al. Recent trends in the microwave-assisted synthesis of metal oxide nanoparticles supported on carbon nanotubes and their applications[J]. Journal of Nanomaterials, 2012,2012:691503.

[68] SONG Z L, JING C M, YAO L S, et al. Microwave drying performance of single-particle coal slime and energy consumption analyses[J]. Fuel Processing Technology, 2016,143:69 – 78.

[69] WANG W L, ZHAO C, SUN J, et al. Quantitative measurement of energy utilization efficiency and study of influence factors in typical microwave heating process [J]. Energy, 2015,87:678 – 685.

[70] MENÉNDEZ J A, ARENILLAS A, FIDALGO B, et al. Microwave heating processes involving carbon materials [J]. Fuel Processing Technology, 2010,91(1):1 – 8.

[71] HAQUE K E. Microwave energy for mineral treatment processes: A brief review[J]. International Journal of Mineral Processing, 1999,57(1):1 – 24.

[72] 李圣辉. 含锌铅电炉粉尘微波直接还原工艺及机理研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2012.
LI Shenghui. Study on direct reduction process and mechanism of dust of EAF containing zinc and lead by microwave[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012.

[73] STANDISH N, WORNER H. Microwave application in the reduction of metal oxides with carbon[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1990, 25(3):177 – 180.

[74] STANDISH N, HUANG W. Microwave application in carbothermic reduction of iron ores[J]. ISIJ International, 1991,31(3):241 – 245.

[75] 彭开玉,周云,李辽沙,等. 微波场下冶金含锌尘泥的脱锌效果[J]. 矿产综合利用,2005,26(6):8 – 11.
PENG Kaiyu, ZHOU Yun, LI Liaosha, et al. The zinc-removal efficiency from metallurgical dust under the action of microwave field[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2005,26(6):8 – 11.

[76] 周云,彭开玉,王世俊,等. 含锌冶金尘泥在微波场中的升温特性[J]. 钢铁研究,2006,34(2):58 – 60.
HOU Yun, PENG Kaiyu, WANG Shijun, et al. Characteristics of temperature increasing of metallurgical Zinc-bearing dust and sludge in microwave field[J]. Research on Iron and Steel, 2006,34(2):58 – 60.

[77] 周云,彭开玉,李辽沙,等. 电炉含锌粉尘在微波场下脱锌的试验研究[J]. 金属矿山,2006(2):82 – 84.
ZHOU Yun, PENG Kaiyu, LI Liaosha, et al. Experimental research of zinc removal from dust of EAF in microwave field[J]. Metal Mine, 2006(2):82 – 84.

[78] 陈晨,周云,薛玉权,等. 微波加热含锌粉尘的物相形貌特征及还原过程研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版),2013,30(4):368 – 373.
CHEN Chen, ZHOU Yun, XUE Yuquan, et al. Research on phase morphology and reduction process of dust containing zinc heated by microwave[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2013,30(4):368 – 373.

[79] 马星宇. 微波协同处理高炉和转炉除尘灰回收有价元素研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2021.
MA Xingyu. Study on recovery of valuable elements from dust removal of blast furnace and converter by microwave synergistic treatment[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2021.

[80] ZHANG W J, DONG T, ZHU D Q, et al. Improving zinc reduction and removal from pellets of zinc-bearing dusts via vacuum microwave-assisted carbothermal reduction process[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024,192:896 – 906.

[81] MA A Y, ZHANG L B, PENG J H, et al. Extraction of zinc from blast furnace dust in ammonia leaching system[J]. Green Processing and Synthesis, 2016,5(1):23 – 30.

(下转第53页)

2019:57 – 64.
GUO Yuhao, JIANG Zhaohui, PAN Dong, et al. FeO content detection of sinter based on infrared thermal image with multiclass and heterogeneous characteristics [C]//Proceedings of the 2019 China Automation Congress (CAC2019). Beijing: Chinese Association of Automation, 2019:57 – 64.

[14] DU S, WU M, CHEN L F, et al. Operating performance improvement based on prediction and grade assessment for sintering process[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(10):10529 – 10541.

[15] 张振,唐珏,储满生,等. 基于 EEMD 和机器学习的烧结矿 FeO 成分长短期综合预报[J]. 钢铁, 2023, 58(8):32 – 40.
ZHANG Zhen, TANG Jue, CHU Mansheng, et al. Long short term comprehensive prediction of sinter FeO components based on EEMD and machine learning[J]. Iron and Steel, 2023, 58(8):32 – 40.

[16] 方怡静,蒋朝辉,黄良,等. 基于知识与 AW-ESN 融合的烧结过程 FeO 含量预测[J]. 自动化学报, 2024, 50(2):282 – 294.
FANG Yijing, JIANG Zhaohui, HUANG Liang, et al. FeO content prediction in sintering process based on fusion of data-knowledge and AW-ESN[J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(2):282 – 294.

[17] TAN K K, LI Z Z, HAN Y, et al. Research and application of coupled mechanism and data-driven prediction of blast furnace permeability index[J]. Applied Sciences, 2023, 13(17):9556.

[18] EJEGWA P A, WANZENKE T D, OGWUCHE I O, et al. A robust correlation coefficient for fermatean fuzzy sets based on Spearman's correlation measure with application to clustering and selection process[J]. Journal of Applied Mathematics and Computing, 2024, 70(2):1747 – 1770.

[19] ZHENG K F, WANG X J, WU B, et al. Feature subset selection combining maximal information entropy and maximal information coefficient[J]. Applied Intelligence, 2020, 50(2):487 – 501.

[20] WEN X Y, LI W B. Time series prediction based on LSTM-attention-LSTM model[J]. IEEE Access, 2023, 11:48322 – 48331.

[21] AL-SELWI S M, HASSAN M F, ABDULKADIR S J, et al. RNN-LSTM: From applications to modeling techniques and beyond: Systematic review[J]. Journal of King Saud University: Computer and Information Sciences, 2024, 36(5):102068.

[22] LANDI F, BARALDI L, CORNIA M, et al. Working memory connections for LSTM[J]. Neural Networks, 2021, 144:334 – 341.

[23] HUSSAIN H, TAMIZHARASAN P S, RAHUL C S. Design possibilities and challenges of DNN models: A review on the perspective of end devices[J]. Artificial Intelligence Review, 2022, 55(7):5109 – 5167.

[24] ALDAHDOOH A, HAMIDOUCHE W, FEZZA S A, et al. Adversarial example detection for DNN models: A review and experimental comparison[J]. Artificial Intelligence Review, 2022, 55(6):4403 – 4462.

[25] HU Q, GUO Y J, XIE X F, et al. Test optimization in DNN testing: A survey[J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 2024, 33(4): 1 – 42.

[26] 张智峰,刘小杰,李欣,等. 基于 MIV-GA-BP 模型预测烧结矿 FeO 含量[J]. 中国冶金, 2022, 32(10): 75 – 81.
ZHANG Zhifeng, LIU Xiaojie, LI Xin, et al. Prediction of FeO content in sinter based on MIV-GA-BP model[J]. China Metallurgy, 2022, 32(10):75 – 81.

(上接第 14 页)

[82] AL-HARAHSHEH M, KINGMAN S, AL-MAKHADMAH L, et al. Microwave treatment of electric arc furnace dust with PVC: Dielectric characterization and pyrolysis-leaching[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 274: 87 – 97.

[83] ALTARAWNEH S. Unravelling the underpinning mechanisms associated with the microwave treatment of electric arc furnace dust with polyvinyl chloride: An electromagnetic and kinetic investigation[D]. Nottinghamshire: University of Nottingham, 2023.

[84] YE Q, PENG Z W, LI G H, et al. Microwave-assisted reduction of electric arc furnace dust with biochar: An examination of transition of heating mechanism[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(10): 9515 – 9524.