钢铁企业含锌尘泥回转窑处置设计原理及工业实践

赵 婷[1]，张飞虎[2]，赵立华[1]，雷 杰[2]，魏汝飞[2]，龙红明[2]
（1. 湖南中冶长天节能环保技术有限公司，湖南 长沙 410205；2. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032）

摘要：钢铁企业产生的含锌尘泥主要是高炉、转炉、电炉除尘系统收集的除尘灰或湿式除尘产生的污泥，该含锌尘泥含有大量的锌元素等杂质，直接返回钢铁冶炼流程会影响高炉等设备的正常运行并造成锌资源浪费。回转窑工艺因成熟稳定、投资及运行成本低、原料适应性强，已成为处置含锌尘泥的主流工艺。随着“固废不出厂”等理念的深入推进，含锌尘泥回转窑处置技术也将在钢铁企业中得到广泛的应用。本文主要介绍某钢铁企业 1.5×10^5 t/a 含锌尘泥回转窑处置生产线的设计原理、工艺流程和实际运行情况。该生产线设计采用具有“低碳、稳定、协同、智能、环保”的新型回转窑处置技术，有效解决了回转窑易结圈问题、智能控制水平较高、原料的适用性广泛，且具有工序能源消耗低、锌回收率高、窑渣铁金属化率高等特点，可实现含锌尘泥的资源化综合利用。项目投产后，运行稳定，生产指标达到或超过设计要求，取得了良好的经济效益。

关键词：钢铁企业；含锌尘泥；回转窑；设计原理；工业实践
中图分类号：TF046.6；TF09 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)02－0115－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.032

Design principle and industrial practice of rotary kiln on zinc-containing dust sludge disposal in iron and steel enterprises

ZHAO Ting[1], ZHANG Feihu[2], ZHAO Lihua[1], LEI Jie[2], WEI Rufei[2], LONG Hongming[2]
(1. Hunan Zhongye Changtian Energy Conservation and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, Anhui, China)

Abstract: Zinc-containing dust sludge produced by iron and steel enterprises is mainly dust collected by dust removal system of blast furnace, converter and electric furnace or sludge produced by wet dust removal. The zinc-containing dust sludge contains a lot of impurities such as zinc, which will affect the normal operation of blast furnace and other equipment and cause waste of zinc resources. Due to its maturity and stability, low investment and operating costs, and strong adaptability to raw materials, the rotary kiln process have become the mainstream process for the disposal of zinc-containing dust sludge. With the in-depth promotion of the concept of "solid waste does not leave the factory", the disposal technology of zinc-containing dust sludge rotary kiln will also be widely used in iron and steel enterprises. The design principle, process flow and actual operation of disposal production line of a 1.5×10^5 t/a zinc-containing dust sludge rotary kiln in an iron and steel enterprise are mainly introduced. The production line is designed with a new rotary kiln disposal technology with "low carbon, stability, coordination, intelligence and environmental protection", which effectively solves the problem of easy ring forming of rotary kiln, high level of intelligent control, wide applicability of raw materials, and has such characteristics as low process energy consumption, high zinc recovery rate and high iron metallization rate of kiln slag, which can realize the comprehensive utilization of zinc-containing dust and sludge resources. After the project is put into

收稿日期：2022－10－11；**修回日期**：2022－12－23
基金项目：安徽省自然科学基金面上项目(2208085ME121)；安徽省自然科学基金杰青项目(2208085J19)
作者简介：赵 婷(1982—)，女，高级工程师，从事冶金环境治理方面的工艺设计与研究工作。
通信作者：魏汝飞(1985—)，男，副教授，博士生导师，从事低碳冶金与冶金固废资源利用方面的研究。

operation, it runs stably, the design requirements of the production indicators are met or exceeded, and good economic benefits are obtained.

Key words: iron and steel enterprises; zinc-containing dust sludge; rotary kiln; design principle; industrial practice

2023年我国粗钢产量达10.19亿吨，然而钢铁工业每年都产生上千万吨含锌尘泥，给社会和环境带来严重负担。含锌尘泥主要是钢铁冶炼过程中除尘系统收集的除尘灰或湿式除尘产生污泥，其主要化学成分是铁和碳，并含有部分如锌、铅、钾、钠氧化物等杂质。钢铁企业产生的含锌尘泥大多数都是通过返回烧结或直接售卖进行处理，但含锌及碱金属固废返回烧结再利用，这会造成锌、铅、钾、钠等有害元素在高炉流程中不断富集，给高炉冶炼及窑炉寿命均带来不利影响[1-5]。目前外售市场狭小，相关处置企业对含锌尘泥的需求量有限，而尘泥堆积存放会对环境造成严重的污染。同时，铁、碳、锌、钾、钠等有价元素是重要的二次资源，如果其不被回收利用会造成严重的资源浪费。因此采取适用的工艺处理含锌尘泥迫在眉睫。

目前对含锌尘泥的主要处理方法主要有物理法、湿法和火法工艺，其中火法工艺的应用更为广泛，而回转窑和转底炉处理工艺是两种主流的火法工艺[6-7]。回转窑工艺利用锌沸点低和高温易挥发的物理特性，通过碳热还原提取含锌粉尘中的有价金属元素，同时使锌被还原后高温挥发，从而实现富集回收。回转窑工艺具有工艺成熟、投资及运行成本低、原料适应性强等优点，是一种比较理想的处理含锌尘泥的工艺[8]。但传统的回转窑工艺也存在着环保不达标、能耗高、智能化水平低等问题，如：① 粉料直接入窑，易产生扬尘；② 生产所需还原剂及热量除自含碳外完全依赖配煤或焦粉；③ 配料及次氧化锌打包采用人工作业，效率低且劳动环境差；④ 回转窑烟气余热未回收利用，浪费能源；⑤ 依靠人工巡检手持测温及人工看火等操作方式来控制窑温及清理窑内结圈[9]。此外，由于钢铁企业的含锌尘泥具有含铁量高(约30%~50%)的特点，采用传统回转窑处置技术容易结圈[10]，严重的几天就需要停窑检修清理，不仅造成回转窑难以稳定运行并影响了生产效率，也容易损坏耐火材料，缩短回转窑的使用寿命，因此传统的回转窑工艺无法实现钢铁企业对含锌尘泥清洁、安全、高效的处理要求。在此背景下，中冶长天研发了具有“低碳、稳定、协同、智能、环保”新型回转窑处置技术[11]，该技术能有效解决回转窑易结圈问题，智能控制水平较高、原料的适用性广泛，且具有工序能源消耗低、锌回收率高、窑渣铁金属化率高等特点，可实现含锌尘泥的资源化综合利用。

本文通过对某钢铁企业的原料情况进行分析，研究回转窑工艺的过程反应机理，对反应过程进行理论计算并得到最优原料配比方案，阐述实际工程所采用的工艺流程及其特点，以期为相关项目建设和钢铁企业含锌尘泥处理提供借鉴与参考。

1 设计基础

1.1 原料及燃(辅)料

1.1.1 原料

生产原料为炼钢散装灰、高炉干法灰和高碳除尘粉等，它们来源于厂内各生产工序，通过管道或吸排罐车气力输送至各原料贮仓暂存，原料的化学成分如表1所示。由表1可以看出，高炉干法灰和高碳除尘灰中的碳质量分数较高，其分别为26.01%和80.57%，可以用来作为还原剂还原粉尘中的有价金属元素；炼钢散装灰和高炉干法灰中的铁氧化物的含量很高，主要以Fe_2O_3的形式存在，其质量分数分别为70.44%和46.8%，同时炼钢灰、高炉灰和高碳除尘灰中都还含有少量的锌、钠、钾和铝等金属元素。

按照混合料中碳和氧的物质的量比为1∶1、0.69∶1和0.6∶1的原则确定三种原料的配比方案(1#方案3种原料的配比分别为68.91%、21.05%和10.04%，2#方案3种原料的配比分别为72.00%、20.00%和8.00%，3#方案3种原料的配比分别为65.00%、35.00%和0%)。3种不同配比下混合料的化学成分及每日生产所需供应量如表2所示。由表2可以看出，混合料中主要为碳、铁氧化物和锌氧化物，铁氧化物和锌氧化

表 1　原料的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of raw materials　　%

原料名称	C	TFe	Fe_2O_3	FeO	ZnO	SiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	PbO	Al_2O_3
炼钢散装灰	1.02	52.20	70.44	3.72	2.57	0.91	11.44	1.01	0.36	0.49	0.06	0.11
高炉干法灰	26.01	38.54	46.80	7.43	3.94	5.65	1.82	1.59	0.29	0.19	0.22	3.19
高碳除尘灰	80.87	3.41	3.73	1.03	0.24	3.42	1.94	0.19	0.36	0.06	0.00	2.74

表 2　不同配比混合料的供应量和化学成分

Table 2　The chemical composition of mixtures and raw material supply of different proportions

方案编号	供应量/($t \cdot d^{-1}$)			化学成分(质量分数)/%											$n(C)/n(O)$
	炼钢散装灰	高炉干法灰	高碳除尘灰	C	Fe_2O_3	FeO	ZnO	PbO	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SiO_2	Al_2O_3	
1#	235.65	72.00	34.34	14.89	58.16	4.39	2.69	0.19	8.13	1.08	0.34	0.38	2.33	1.13	1.00
2#	259.20	72.00	28.80	11.02	61.39	4.52	2.80	0.15	8.59	1.12	0.34	0.40	2.21	1.00	0.69
3#	234.00	126.00	—	9.77	61.69	5.10	3.08	0.12	7.88	1.22	0.33	0.38	2.66	1.25	0.60

注：表中 n 表示物质的量，mol。

物主要以 Fe_2O_3 和 ZnO 的形式存在，故混合料中的碳主要用于还原 Fe_2O_3 和 ZnO。

1.1.2　燃(辅)料

设计采用的燃(辅)料为废焦粉，作为补充碳源及还原剂。废焦粉由管道或吸排罐车气力输送至焦粉仓暂存。由于钢铁厂内的高炉煤气量比较充足，设计采用高炉煤气作为补热燃料(用量为 $1.0\times10^4\sim1.5\times10^4$ Nm^3/h，压力约为 6 kPa，低位热值为 787.6 kJ/m^3)，通过中央燃烧器对回转窑进行供热。

1.2　反应原理

回转窑结构如图 1 所示。由图 1 可见：该回转窑有一定的倾斜度，分为干燥段、预热段、反应段、冷却段 4 段。混合料经进料系统进入，随着回转窑的转动从窑尾向窑头运动；在运动的过程中，混合料与窑体内的热烟气充分接触，当温度达到 907 ℃时，尘泥中的锌元素被原料中的碳还原成锌蒸汽而进入气相，其在气相中又与空气中的氧反应生成 ZnO 并随着热烟气从窑尾排出，并被除尘器富集回收；随着温度逐渐上升，原料中的铁氧化物与含碳物料充分接触，发生逐级还原反应，最终被还原成金属铁，而处理后的窑渣从窑头排出。作业时回转窑内部发生固相反应如式(1)～(8)所示，气相反应如式(9)～(11)所示。

$$C + 1/2O_2 = CO \quad (1)$$

$$CO_2 + C = 2CO \quad (2)$$

$$ZnO + C = Zn + CO \quad (3)$$

$$ZnO + CO = Zn + CO_2 \quad (4)$$

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

$$FeO + CO = Fe + CO_2 \quad (6)$$

$$Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO_2 \quad (7)$$

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

$$CO + 1/2O_2 = CO_2 \quad (9)$$

$$Zn + 1/2O_2 = ZnO \quad (10)$$

$$Zn + O_2 + CO = ZnO + CO_2 \quad (11)$$

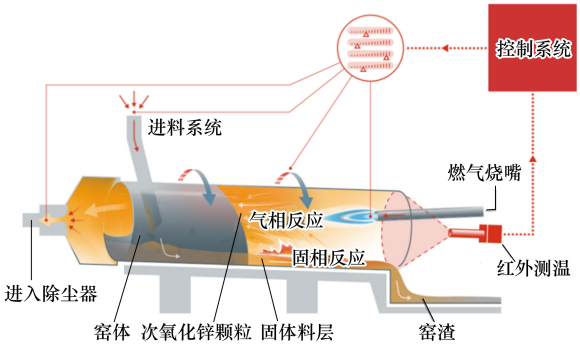
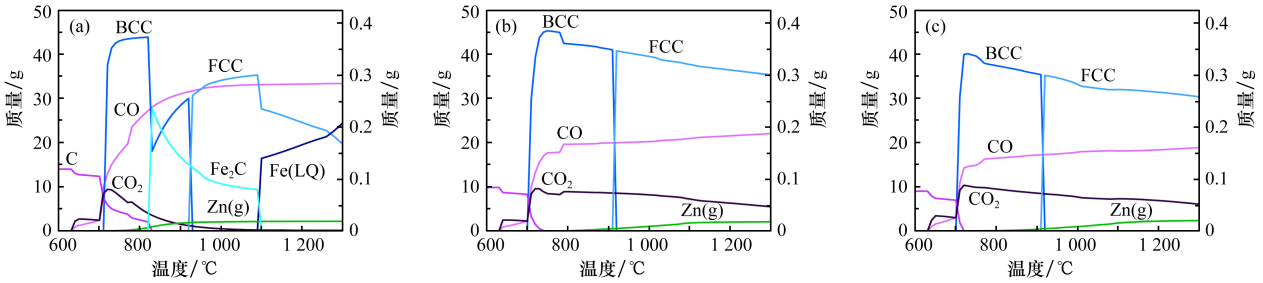


图 1　回转窑的结构

Fig. 1　Structure of rotary kiln

1.3　回转窑工艺反应过程的理论计算

热力学平衡计算后，不同配比条件下混料中 Fe、C、Zn、CO、CO_2 的质量分数随温度的变化情况如图 2 所示。由图 2 可以看出，温度转变区分为 3 个，即金属氧化物、BCC(体心立方)、FCC(面心立方)。当温度低于 700 ℃时，3 种配比下，C 的质量分数都在逐渐减少；随着温度的继



$n(C)/n(O)$：(a) 1.00；(b) 0.69；(c) 0.60

图 2 不同配比下 Fe、C、Zn、CO、CO_2 质量分数变化的理论计算

Fig. 2 Content changes of Fe, C, Zn, CO and CO_2 under different proportions calculated theoretically

(注：图中 LQ 为液相；g 为气相)

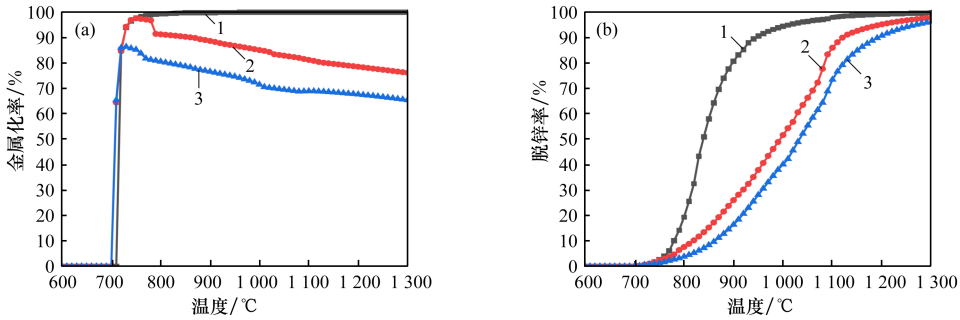
续升高，体系进入 BCC 相，C 的质量分数快速下降，CO 的质量分数快速上升，但当 $n(C)/n(O)$ 为 1.00 时，CO 的质量分数上升速率更快且值更高，同时 Zn 质量分数也在逐渐上升，即锌氧化物开始被还原；随着温度升高至 920 ℃，BCC 相转变为 FCC 相，当 $n(C)/n(O)$ 为 1.00 时，Zn 质量分数基本趋于平缓，已基本完成还原，而当 $n(C)/n(O)$ 为 0.69 和 0.6 时，Zn 的质量分数还在略微上升，即还没反应完全；当 $n(C)/n(O)$ 为 1.00 时，随着温度的升高，Fe 质量分数快速上升，即金属氧化物开始发生还原反应。当温度达到 1 100 ℃时，金属铁以铁碳合金的形式开始变为液相，此时液相的主要成分是 96.35% 的 Fe 和 3.65% 的 C，由于 C 元素的出现，金属铁的熔点降低，其在 1 100 ℃就开始熔化。从这一点来看，为避免回转窑结圈，需要控制 Fe 元素的质量分数，以防 Fe 品位太高导致结圈严重。

通过理论计算，得到不同配比下原料的脱锌率(脱锌率是指通过高温将原料中的锌元素脱除的质量百分比)和窑渣的金属化率(金属化率是指窑渣中金属铁占总铁的质量百分比)随温度的变化情况如图 3 所示。由图 3 可以看出，当反应温度达到 700 ℃时，3 种配比下金属化率和脱锌率都急剧上升，即铁氧化物和锌氧化物开始发生还原反应，随着温度的继续升高，金属化率逐渐达到峰值。由于 $n(C)/n(O)$ 更高，还原剂的含量更高，更有利于还原反应的进行，因此 $n(C)/n(O)$ 为 1.00 时金属化率和脱锌率明显高于其他两种配比，且反应所需时间更短，结果更为稳定。

2 工艺流程及特点

2.1 工艺流程

工程设计采用“智能配料 + 强混造球 + 回转窑还原 + 余热利用 + 表面冷却 + 布袋收锌”工艺处理含锌尘泥。含锌物料经过回转窑还原挥发系统，Zn 最终以 ZnO 粉的形式进入烟气处理系统，回收后的次氧化锌可作为副产品外售，处理后的含铁窑渣的含锌低，可返回烧结配料使用。



(a) 金属化率；(b) 脱锌率

$n(C)/n(O)$：1—1.00；2—0.69；3—0.60。

图 3 不同配比下的金属化率和脱锌率的理论计算

Fig. 3 Rate of metallization and zinc removal under different proportions calculated theoretically

工艺流程从各种含锌尘泥原料接受与贮存开始，至 ZnO 粉尘进成品仓和含铁窑渣进转运站（送烧结）为止，生产系统包括原料准备系统、回转窑还原系统、烟气处理系统、炉渣冷却系统，主要生产工序包括原料储存及配料、混合与造球、回转窑还原、窑渣处理、返粉洗氯、余热利用、烟气降温及收尘。回转窑提锌生产线工艺流程如图 4 所示。工艺流程包括如下 8 个主要步骤：

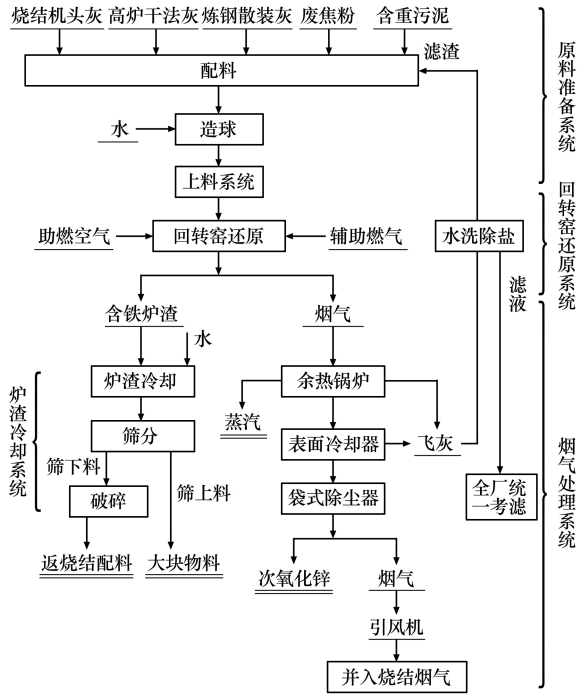


图 4　回转窑提锌生产线工艺流程

Fig. 4　Process flow chart of zinc extraction production line of rotary kiln

（1）原料储存及配料。采用管道气力输送系统或吸排罐车通过管道将炼钢散装灰、烧结机头灰、高炉干法灰、高碳除尘灰、废活性炭粉及废焦炭粉等原料及辅料分别送至各自储仓中暂存（共 8 个）；含重污泥等含锌物料自卸至 2 个地下储仓。各种原辅料根据预先设定的比例，通过各储仓下的皮带秤给料机定量给料输送，重污泥等含锌物料通过仓底计量皮带计量后输送，所有物料汇总至配料胶带输送机被转运至混合及造球工序。

（2）混合与造球。为改善物料在窑中的流动性、黏附性、粒径均匀度和透气性，缓解回转窑结圈，设计采用强混和圆盘造粒的方案。原料储存及配料工序的原（辅）料及返粉滤饼经胶带输送机被转运至强力混合机；物料先在强力混合机内混合，然后经胶带输送机被送至圆盘造粒机进行造球，混合、造球过程均需加入一定量的水；造球后的球状物料被胶带输送机送至回转窑还原工序。

（3）回转窑还原。混合造粒后的物料经皮带输送至回转窑窑尾沉降室上部，通过下料管溜入回转窑。回转窑中物料在向前流动的过程中，经预热、干燥、升温、高温煅烧（1 100 ~ 1 300 ℃）等工序，在还原气氛下，含锌物质被还原并挥发形成 Zn 蒸汽。Zn 蒸汽与 O_2 结合生成氧化锌，Pb、Bi、Sn、In 等金属与 Zn 一起挥发生成多金属氧化物（次氧化锌），随烟气进入烟气系统。窑渣由窑头的出渣口掉落，进入窑渣处理工序。

（4）窑渣处理。窑渣通过窑头排出，在冲渣溜槽中通水粒化后进入到水淬池，冷却之后的窑渣由桥式起重机抓斗捞出，控水后的水淬渣通过抓斗被转运至筛分中转仓，通过仓底的振动筛分机进行筛分，筛上物进入锤式破碎机破碎，破碎后的水淬渣与筛下物一起由胶带输送机转运至相应转运站，再通过胶带输送机被转运至厂内烧结工序。

（5）返粉洗氯。余热锅炉和表面冷却器各个灰斗收集的除尘灰通过埋刮板输送机被送至水洗槽，加水搅拌水洗，水洗后物料通过泵送至压滤机进行压滤，得到含氯较低的滤饼和含氯较高的滤液。滤饼通过压滤机仓底的拖料皮带秤计量并被输送返回至混合及造球工序，滤液自流入滤液储槽暂存，通过泵及管道送厂区统一处理。

（7）余热利用。回转窑窑尾的 500 ~ 600 ℃的高温烟气经过余热锅炉本体被冷却至 300 ~ 400 ℃，吸收的显热产生 1.0 MPa 的低压饱和蒸汽。余热锅炉底部积灰由灰斗收集，再由埋刮板机输送至返粉洗氯工序。

（8）烟气降温及收尘。被余热锅炉降温后的烟气进入表面冷却器，经过冷却管道，烟气温度由 300 ~ 400 ℃降低至 160 ~ 180 ℃。冷却器底部的积灰通过灰斗收集，再由埋刮板机输送至返粉洗氯工序。经表面冷却器冷却后的烟气进入布袋收尘器，收集的富集氧化锌粉尘，经气力输送至 ZnO 产品储仓，由仓底螺旋输送机被送至吨袋包装机装袋，袋装的次氧化锌产品在产品仓库暂存外售。除尘后的烟气可与烧结、球团工序产生的

烟气协同处理，达到国家超低排放标准。

2.2 工艺特点

（1）原料智慧配料及上料。各种除尘灰原料均通过管道或吸排罐车气力输送至相应的储仓(带称重装置)，预留含重污泥等原料的地仓接口。根据控制系统预先设定的比例，各种原料通过计量称精准计量后进行配料。相比以往铲车或抓斗上料，原料的配料更精准，对原料中Fe、Zn、C等元素质量分数进行稳定控制，有利于控制窑温、减少结圈并确保含铁窑渣及次氧化锌产品的质量稳定。

采用密闭定量给料机及密封式胶带输送机，且各下料点都设有通风罩及抽风管，避免了粉状物料扬尘外溢。

（2）入窑原料采用扰动造球与原料定尺寸技术。传统回转窑处置含锌粉尘采用粉料直接入窑方式，该方法在回转窑翻滚过程中会有大量粉尘进入烟气，降低次氧化锌产品的品位。同时，粉料入窑也是导致回转窑易结圈的原因之一。因此，本文通过开发采用扰动造球与原料定尺寸技术来解决上述难题。相关研究表明，造球粒度偏大会导致原料的脱锌效率降低，而偏小则解决不了粉料的扬尘和易结圈问题。通过扰动制粒将最佳的粒度范围设定为3～8 mm。实践表明，通过改变传统散料入窑方式，有效缓解了粉料进窑扬尘、结窑、堵管的问题，且粒状物料进窑受热均匀，反应充分。

（3）低成本及低碳智慧烧窑技术。利用钢铁厂低热值煤气对回转窑供热(用量为1×10^4～1.5×10^4 Nm^3/h)，采用原料中固定碳作为金属还原剂，利用废活性炭粉、废焦粉作为补碳原料，无需加入新焦粉，减碳同时降低了综合能源消耗及运行成本。

采用多点热电偶与红外热成像仪的回转窑三维温度场可视化测温技术，实现窑内温度的可视化，通过控制原料及燃(辅)料配比及煤气调节阀实时控制煤气量，精准控制窑温实现智慧烧窑。采用新型全膜式壁结构的余热锅炉，相比传统余热锅炉，可减轻高温粉尘堵管问题，产出约8 t/h的蒸汽(压力为1.0 MPa)可并入厂区蒸汽管网，实现余热利用。

（4）返粉水洗工艺。采用返粉水洗工艺，提高次氧化锌产品的含锌品位并解决K、Na、Cl等有害元素在系统中循环富集导致堵管等问题。余热锅炉及表面冷却器灰斗收集的粉尘被送至水洗槽水洗后，再送至压滤机进行压滤，其在滤液送厂区被统一处理，滤饼计量后可送至混合与造球工序。

（5）水淬除雾及自动抓渣工艺。针对冲渣岗位粉尘大、雾气多等特点，设有浊循环冷却塔进行冲渣水降温并对冲渣口的含尘蒸汽做特殊抑尘设计，该技术可大大改善现场环境。设计自动抓渣系统，实现中控室操作，提高自动化水平并减少劳动强度。

（6）次氧化锌产品气力输送及自动打包工艺。通过布袋收尘器收集次氧化锌产品后，采用气力输送设备将其送至称重仓，通过自动打包机将产品装入吨袋，可直接外售。相对传统人工打包方式，提高了生产效率、改善了作业环境。

（7）项目排放烟气采用专利技术“多工序烟气活性炭法整体深度净化技术”，与烧结、球团烟气协同处理，不仅节省投资，且尾气达到国家超低排放标准。

3 生产实践

在某钢铁企业传统回转窑工艺的基础上，新建一条15万吨/年的含锌尘泥回转窑处置生产线。该工程于2022年3月一次性投产成功。该工程采用新型回转窑处置技术，相比传统技术，该回转窑有效解决了回转窑易结圈问题，且智能控制水平较高、原料的适用性广，具有工序能源消耗低、锌回收率高、窑渣铁金属化率高、清洁生产等特点，可实现含锌尘泥的资源化综合利用。

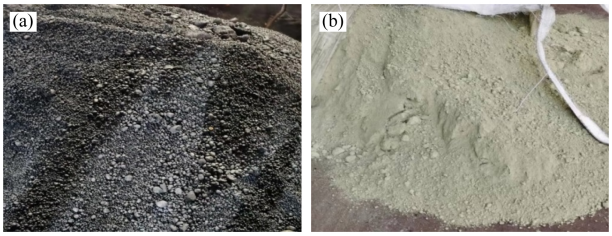
3.1 生产原料及产品质量

（1）生产原料。根据该钢铁企业含锌尘泥的产生情况，对原料配比进行调整，设计该回转窑生产线处理原料炼钢散装灰、高炉干法灰分别占比约为60%、40%。原料处理量(干基)约为15 t/h，入窑混合料的Zn、Fe质量分数约为3%、42%。

（2）产品质量。① 含铁窑渣[图5(a)]：产量约为11.11 t/h（约8万吨/年），含铁品位约为61%（金属化率＞50%），残锌量约为0.3%～

0.6%；② 次氧化锌[图 5(b)]：产量为 17 ~ 18 t/d(约 5 300 t/a)，含锌品位约为 35%；③ 蒸汽：产量约为 8 t/h(压力为 1.0 MPa)。

(3) 生产情况。该工程自 2022 年 3 月投产以来运行正常(图 6)，年处理含锌尘泥约为 11.5 万吨，性能及经济技术指标均超过设计值；且生产过程较为稳定，停窑检修次数较少，结圈情况较类似项目有明显改善。



(a) 含铁窑渣；(b) 次氧化锌产品

图 5　产品图片

Fig. 5　Pictures of the products



图 6　回转窑提锌生产线

Fig. 6　Arching of pallet on lower track

3.2　生产问题及改进措施

(1) 造球机粉尘及氨逃逸问题。由于除尘灰原料粒度很小，造球过程中容易产生扬尘，且加水造球时有氨气产生，导致现场作业环境差。现场技改增加了造球盘的通风罩，设置活动观察门，将除尘尾气并入环境除尘器的主管道，改造后现场的环境大大改善。

(2) 窑头冒烟问题。当生产出现结窑等异常工况时，窑头会冒黑烟。现场技改增加了窑头通风罩，将烟气并入环境除尘器的主管道，解决了非正常生产时窑头的冒烟问题。

4　结　语

(1) 理论计算结果表明：当焙烧温度超过 700 ℃时，原料的脱锌率及窑渣中铁的金属化率都急剧上升，并随温度的升高金属化率逐渐达到峰值；当 $n(C)/n(O)$ 为 1.00 时金属化率和脱锌率更高，且反应时间有所缩短。

(2) 实际工程设计采用了一系列技术改进：智能配料、扰动造球与原料定尺寸技术；低成本及低碳智慧烧窑技术；返粉水洗技术；水淬除雾及自动抓渣技术。技术改进有效解决了回转窑易结圈问题，且智能控制水平较高、原料适用性广，具有工序能源消耗低、锌回收率高、窑渣铁金属化率高、清洁生产等特点，可实现含锌尘泥的资源化综合利用。实际生产数据表明，工程投产后系统运行稳定，连续稳定生产超过 4 个月，所得窑渣含铁品位 >60%、含锌量 <0.6%、次氧化锌含锌品位约为 35%，各项指标均达到或优于设计指标。

(3) 根据实际生产情况，工程技改解决了造球机粉尘及氨逃逸、窑头冒烟等环保问题。未来可探索进一步提升窑渣铁的品位和金属化率，以及与其他固废的协同处理可能性。本文所述新型回转窑处置技术有也望为钢铁产业的可持续发展和环境保护事业做出更大贡献。

参考文献：

[1] 刘颖超,朱红芳,王艾军. 高炉高效排锌工艺研究[J]. 江西冶金,2020,40(4):6 - 9.
LIU Yingchao, ZHU Hongfang, WANG Aijun, et al. Research on high-efficiency zinc removal process in blast furnace[J]. Jiangxi Metallurgy,2020,40(4):6 - 9.

[2] 邢华清,王斌,王聪渊. 高炉有害元素控制技术[J]. 河北冶金,2011(8):46 - 48.
XING Huaqing,WANG bin,WANG Congyuan. Control of harmful elements in blast furnace[J]. Hebei Metallurgy, 2011(8):46 - 48.

[3] 魏晨曦,罗立群,郑波涛. 铅锌在高炉炼铁中的循环过程与影响评析[J]. 现代化工,2020,40(3):30 - 35.
WEI Chenxi, LUO Liqun, ZHENG Botao. Circulation process of lead-zinc in blast furnace ironmaking and evaluation on their influences[J]. Modern Chemical Industry,2020,40(3):30 - 35.

[4] 张武刚. 新钢高炉锌负荷现状及控制措施探讨[J]. 江西冶金,2019,39(3):28 - 32.
ZHANG Wugang. Discussion on the current situation of blast furnace zinc load in Xinsteel and its solutions[J]. Jiangxi Metallurgy,2019,39(3):28 - 32.

[5] 王子宏,阮志勇,墙蔷,等. 钢厂含锌尘泥锌铁火法分离研究[J]. 烧结球团,2021,46(5):86-92;98.
WANG Zihong, RUAN Zhiyong, QIANG Qiang, et al. Research on pyrometallurgical separation zinc and iron from zinc-bearing dust in steel plant[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):86-92;98.

[6] 郭培民,潘聪超,庞建明,等. 冶金炉窑共处置危险废物[M]. 北京:冶金工业出版社,2015.
GUO Peimin, PAN Congchao, PANG Jianming, et al. Hazard waste co-treatment in metallurgical furnace[M]. Beijing:Metallurigical Industry Press,2015.

[7] 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.

[8] 王天才. 回转窑处理钢铁含锌粉尘关键技术探析[J]. 中国资源综合利用,2019,37(7):181-184.
WANG Tiancai. Analysis on key technology of treating steel containing zinc dust in rotary kiln[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(7): 181-184.

[9] 王勇,万忠炎. 几种不同类型的回转窑温度检测方法[J]. 山东冶金,2008,30(4):68-69.
WANG Yong, WAN Zhongyan. Several different types of temperature detection methods for rotary kilns[J]. Shandong Metallurgy,2008,30(4):68-69.

[10] 熊果,刘欣,周云花,等. 含锌转炉炼钢泥的理化特性分析研究[J]. 烧结球团,2021,46(3):93-98.
XIONG Guo, LIU Xin, ZHOU Yunhua, et al. Analytical research on physicochemical property of zinc-containing dust from converter steelmaking process[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(3):93-98.

[11] 沈维民,叶恒棣,张志波,等. 钢铁工业含锌尘泥回转窑处置技术的应用进展[J]. 烧结球团,2024,49(1):9-17;55.
SHEN Weimin, YE Hengdi, ZHANG Zhibo, et al. Progress in application of disposal technology for zinc-containing dust sludge rotary kiln iron and steel industry[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(1):9-17;55.

(上接第114页)

[4] 张文辉,张建良,王伟,等. 神东烟煤中CaO在高炉喷吹中的作用及有价矸石排放减量化研究[J]. 煤炭加工与综合利用,2021(1):78-80;84.
ZHANG Wenhui, ZHANG Jianliang, WANG Wei, et al. The role of CaO in blast furnace injection and the reduction of valuable gangue emissions in Shendong bituminous coal[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization,2021(1):78-80;84.

[5] 王凯. 高炉内煤粉燃烧的数值模拟与参数优化[D]. 秦皇岛:燕山大学,2018.
WANG Kai. Numerical simulation and parameter optimization of pulverized coal combustion in blast furnace[D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2018.

[6] 李永清,张小辉,张家元,等. 喷吹方式对煤粉燃尽率的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(7):2432-2439.
LI Yongqing, ZHANG Xiaohui, ZHANG Jiayuan, et al. Effect of injection method on burnout rate of pulverized coal[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition),2014,45(7):2432-2439.

[7] 高栋栋. 现代高炉喷吹煤粉燃烧行为的数值模拟[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2013.
GAO Dongdong. Numerical simulation of combustion behavior of modern blast furnace injection pulverized coal[D]. Anshan: Liaoning University of Science and Technology,2013.

[8] 陈天,程树森. 高炉煤粉燃烧[C]//2017年全国高炉炼铁学术年会论文集(下). 北京:中国金属学会,2017:589-595.
CHEN Tian, CHENG Shusen. Blast furnace pulverized coal combustion[C]//Proceedings of the 2017 National Blast Furnace Ironmaking Annual Conference (Part II). Beijing:The Chinese Society for Metals,2017:589-595.

[9] 陈天,程树森. 高炉回旋区喷吹煤粉三维模拟[J]. 过程工程学报,2018,18(2):265-273.
CHEN Tian, CHENG Shusen. Three-dimensional simulation of pulverized coal injection in blast furnace gyration zone[J]. Chinese Journal of Process Engineering,2018,18(2):265-273.

[10] 王子侃. 高炉喷吹中煤粉燃烧过程的数值模拟[D]. 武汉:武汉科技大学,2015.
WANG Zikan. Numerical simulation of pulverized coal combustion process in blast furnace injection[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.