节能环保与综合利用

含锌固废高效资源化回收试验与数值模拟

徐正萌[1]，栗克建[1]，罗宝龙[2]，罗 磊[2]，郭秀键[2]，尹在弘[3]
(1. 重庆科技学院 冶金与材料工程学院，重庆 411331；2. 重庆赛迪热工环保工程技术有限公司，重庆 401120；
3. 韩国国立昌原大学 纳米与先进材料工程学院，韩国 昌原 51140)

摘要：回转窑工艺被广泛应用于含锌固废的资源化处置，为进一步优化工艺，本文在对比高低 Cl 元素夹杂的两类含锌固废回转窑入炉料、尾渣和再生锌粉的成分、物相等特征的基础上，分析了回转窑的反应过程，并采用 CFD 数值模拟 Zn、Pb 蒸汽的运动路径。研究发现：两类含锌固废实际生产 Pb、Zn 的脱除率分别为 83.33%、67.69% 和 96.97%、84.38%，再生 Zn 粉纯度分别为 14.58% 和 41.49%，Cl 的脱除率分别为 96.64% 和 97.97%；数值模拟中，当通气速率为 10 m/s，绝热壁面温度为 1 200 ℃时，可实现 Pb、Zn 和含 Fe 窑渣的梯级分离，该方案有助于提升再生产品纯度，增加含锌固废的回收价值。

关键词：锌；除尘灰；回收利用；数值模拟；火法分离
中图分类号：TF55；X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)01－0001－07
doi：10.13403/j.sjqt.2023.01.001

Efficient resource recovery test and numerical simulation of zinc-containing solid waste

XU Zhengmeng[1], LI Kejian[1], LUO Baolong[2], LUO Lei[2], GUO Xiujian[2], YIN zaihong[3]
(1. *School of Metallurgy and Materials Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing* 411331, *China*; 2. *Chongqing CISDI Thermal & Environmental Engineering Co., Ltd., Chongqing* 401120, *China*; 3. *School of Nano & Advanced Materials Engineering, Changwon National University, Changwon* 51140, *Korea*)

Abstract: Rotary kiln process is widely used in the resource disposal of zinc-containing solid waste. In order to optimize the technique, in this paper, based on comparing and studying the composition and phase of incoming charge, tailings and recycled zinc powder of two enterprises, the reaction process of rotary kiln is analyzed. The results show that the removal rates of Pb and Zn produced from two kinds of inc-containing wastes are 83.33%, 67.69%, 96.97% and 84.38% respectively, the grades of purity of regenerated zinc powder are 14.58% and 41.49% respectively, the removal rates of Cl are 96.64% and 97.97% respectively. In numerical simulation, when the ventilation rate is 10 m/s and the temperature of insulated wall is 1 200 ℃, the step separation of Pb, Zn and Fe-containing kiln slag can be realized. This method is conducive to improve the purity of regenerated products and enhance the value of zinc-containing solid waste.

Key words: zinc; dust removal; recycle; numerical simulation; fire separation

我国钢铁生产主要以高炉炼铁、转炉炼钢和电炉炼钢为主，冶炼过程中产生的粉尘主要有高炉布袋灰、转炉灰和电炉除尘灰。这些粉尘含有较高质量分数的 Fe，Zn 和 Pb，也含有少量的 In、Au、Pt 等稀有贵金属元素[1－3]，具有较高的资源化回收价值。十四五规划鼓励使用废钢冶炼的短流程电炉炼钢，全国电炉炼钢比将从不足 15% 提升至 20% 以上。在电炉冶炼

收稿日期：2022－10－14；**修回日期**：2022－11－16
基金项目：重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN201901515)
作者简介：徐正萌(1998—)，男，硕士研究生，从事钢铁材料和模拟计算方面的研究。
通信作者：栗克建(1988—)，男，高级工程师，博士，从事钢铁材料和固废资源清洁提取技术方面的研究。

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

废钢过程中，易挥发杂质元素进入烟尘系统，经捕集器、烟道，最后在除尘器中被捕集，称为电炉除尘灰，每生产 1 t 钢将会产生 15 ~ 20 kg 该类除尘灰[4]，由于其 Pb、Zn 的质量分数较高，被列为危险废弃物[5]。行业中根据除尘灰中含 Zn 量的不同进行分类，质量分数超过 30% 称为高 Zn 粉尘，小于 15% 称为低 Zn 粉尘[6]。

处理该类含 Pb、Zn 粉尘的方法主要为填埋法、湿法和火法[7-9]。直接填埋法虽能暂时解决炼钢粉尘堆积等问题，但是由于雨水冲蚀，重金属元素会流失到土壤中，破坏生态环境。湿法冶炼工艺可实现较高的锌浸出率，酸法过程中，高浓度硫酸条件下处理效果较好，但经济性差；盐酸处理生成含有氯离子废液，浪费资源、污染环境；碱法浸出过程中由于加入硫化物除杂，引起有害气体排放，污染环境；氨法浸出会产生氨气外放，且有铁酸锌等夹杂物无法处理的问题，降低了浸出效率[10-11]。火法是最直接和高效的方式，它利用 Pb、Zn 沸点低的原理，在高温下还原其氧化物，还原后的 Pb、Zn 单质在高温下变成蒸汽后随烟气流出，蒸汽中的单质再次氧化后变成固体粉末被收集，回转窑工艺是典型的火法工艺[12]。

张建良等[13]研究回转窑工艺，将干燥后的尘泥和无烟煤混合，使入炉料在回转窑内高温直接还原成团粒，将团粒经冷却后进行筛分，筛上物供高炉冶炼，而颗粒较小的部分用于烧结，锌蒸发后在集尘器中被铺集，作为炼锌原料循环利用，最终经回转窑工艺处理后的 Pb、Zn 脱除率分别为 60.5% 和 87.9%，且该方法得到的再生锌粉中含有 Cl、S、Fe 等杂质元素。目前亟需对工业回转窑工艺进行研究和技术升级，实现低碳、高效回收高附加值元素。通过前期研究发现，对于含 Cl、Pb、Zn 元素较多的除尘灰，可采用回转窑工艺，利用 Pb、Zn 氯化物沸点低的原理及各物相挥发温度、冷凝温度、密度不同等特性，采用“梯度控温冷凝沉降法[14]”实现 Pb、Zn 梯级分离。

本文针对回转窑处理工艺，利用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线荧光光谱分析(XRF)、X 射线衍射(XRD)、差热分析法(DTA)和计算流体动力学(CFD)等手段对国内两家钢厂产生的含锌除尘灰进行对比研究，总结回转窑中高温还原过程 ZnO 和 PbO 的还原挥发原理，并同时考虑 Cl 元素差异的影响，研究成果以期为含锌固废资源高效回收利用和回转窑工艺升级提供理论和数据参考。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验针对较低和较高 Cl 元素夹杂的 A、B 两类含锌固废进行对比分析，对 A、B 两厂回转窑现场的入炉料、尾渣和再生氧化锌粉进行分别取样，并采用 SEM、XRF、XRD 等对其原料形貌、成分和物相进行分析。

1.2 试验方法

(1) 回转窑火法提炼。将含 Zn 固废与适量的煤粉(还原剂)混匀，然后投入回转窑，点燃窑内烧嘴炉气产生高温和还原性气氛，在物料出口设置送风装置，控制送风速率和送气量。单质 Zn 由物料中的 Zn 氧化物还原生成，并在 900 ~ 1 000 ℃挥发随气流被吹出；吹出后的高温蒸汽经氧化、冷却后被收集起来即为再生 ZnO 粉；窑内残余的含 Fe 物料随回转窑转动从窑头排出，可作为富 Fe 料循环利用。回转窑工作示意如图 1 所示。

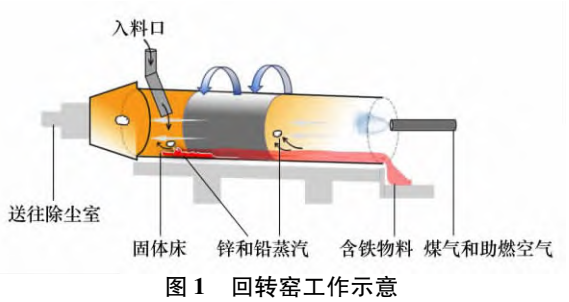


图 1 回转窑工作示意

Fig. 1 Schematic diagram of rotary kiln

(2) 样品检测方法。样品称重后，采用 DTA 对入炉料进行热力学分析，设备采用 ZRY-2P 热重分析仪，灵敏度为 10 μg。试验过程中，将粉末样品放入高纯 Al_2O_3 坩埚内，并用铂坩埚罩盖住试验坩埚。试验采用高纯 Ar 气保护，充气速率为 60 mL/min，升温速度为 10

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

℃/min。

（3）数值模拟。采用 Ansys Fluent 中的 Design Modeler 模块对回转窑模型进行建模[15-16]，模型如图 2 所示。模型设置 1 个直径为 6 cm 的入料口，1 个气体入口和直径为 20 cm 的含铁物料出口，以及直径为 14 cm 的粉尘出口。

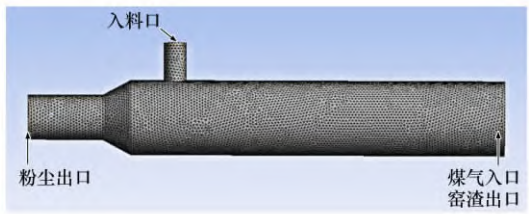


图 2　Design Moderler 对回转窑模型建模示意

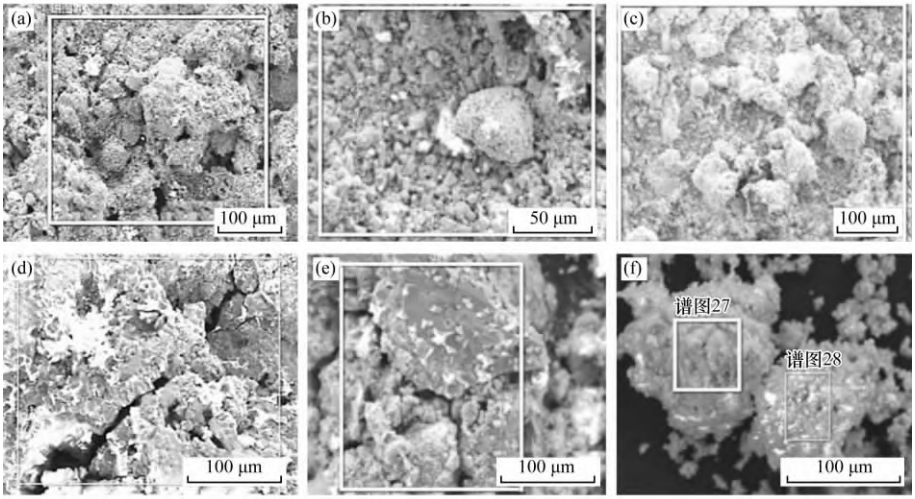
Fig. 2　Design Moderler model of rotary kiln

在数值模拟过程中，采用了标准 k-epsilon 湍流模型、基于压力的求解器、瞬态求解方式等；在固体水和水蒸气的基础上，设置 Fe_3O_4、ZnO 和 PbO 的相关材料参数；采用标准壁面函数模拟回转窑耐热砖的温度分布情况，计算时间步长为 0.000 1，计算次数为 20 000，入料口速度为 3 m/s；采用 CFD 数值模拟技术预测和分析微流控通道内的多相流问题；采用 Lee 蒸发冷凝模型模拟 PbO 和 ZnO 的蒸发现象，忽略化学反应过程中的能量变化，Lee 冷凝因子设置为 10[17-21]。

2　试验结果与讨论

2.1　原料分析

本文采用分别代表国内较低和较高 Cl 元素夹杂的 A、B 两类含锌固废进行回转窑现场取样对比，两类含锌固废回转窑现场的入炉料、尾渣和再生氧化锌粉采用 SEM、XRF、XRD 等对其原料形貌、成分和物相进行分析，结果分别如图 3、表 1 与图 4 所示。



（a）、（b）、（c）A 类入炉料、尾渣和再生锌粉；（d）、（e）、（f）B 类入炉料、尾渣和再生锌粉

图 3　A、B 两类含锌固废入炉料、尾渣和再生氧化锌粉 SEM 分析

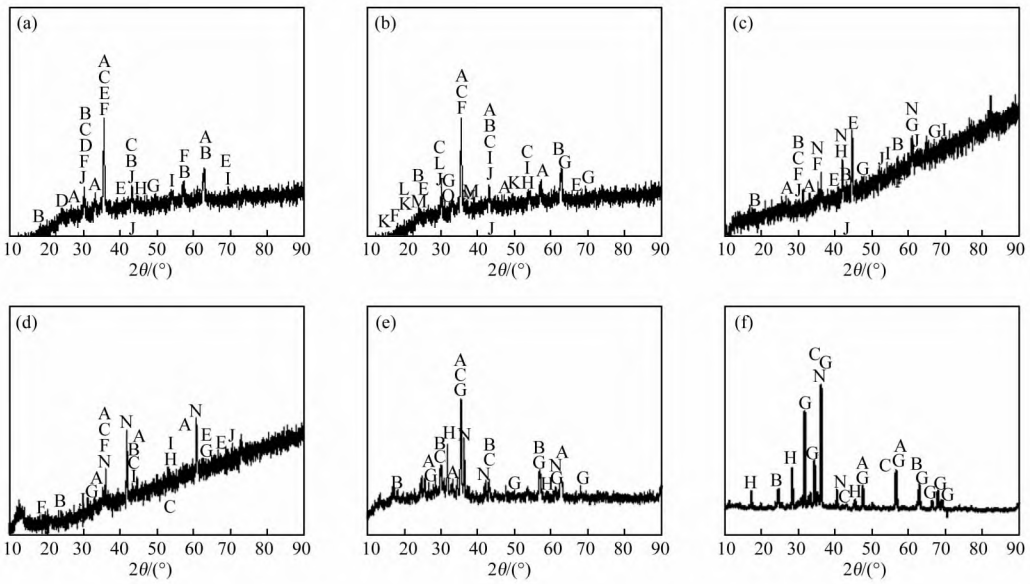
Fig. 3　SEM analysis results of furnace charge, tailing slag and recycled zinc oxide powder of type A and B

表 1　A、B 两类含锌固废入炉料、尾渣和再生氧化锌粉的 XRF 分析（质量分数）

Table 1　XRF analysis results of furnace charge, tailing slag and recycled zinc oxide powder of type A and B　%

物料名称	Fe_2O_3	ZnO	PbO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO	TiO_2	Cr_2O_3	Cl
A 类入炉料	64.09	0.65	0.06	7.46	3.42	1.81	1.18	0.63	0.25	0.04	1.10
B 类入炉料	50.07	6.85	0.33	7.47	3.15	1.94	1.03	0.50	—	0.05	11.84
A 类尾渣	75.94	0.21	0.01	5.34	4.23	2.28	1.39	0.40	0.22	0.03	0.07
B 类尾渣	75.92	1.07	0.01	8.65	6.12	3.09	0.95	0.63	0.13	0.07	0.24
A 类锌粉	27.02	14.58	0.30	3.47	2.12	1.54	0.56	0.27	0.17	0.02	6.36
B 类锌粉	10.08	41.49	2.42	0.79	0.28	0.31	0.35	0.10	0.02	0.01	20.24

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



(a)、(c)、(e) A 类的入炉料、尾渣和再生氧化锌粉；(b)、(d)、(f) B 类的入炉料、尾渣和再生氧化锌粉

A—Fe_2O_3；B—Fe_3O_4；C—FeO(OH)；D—$CaCO_3$；E—$CaSiO_3$；F—$ZnFe_2O_4$；G—ZnO；H—PbO；

I—KCl；J—NaCl；K—$FeCl_3$；L—$ZnCl_2$；M—$PbCl_2$；N—FeO；O—$Pb_2Cl_2CO_3$。

图 4 A、B 两类入炉料、尾渣和二次产物铅锌的 XRD 物相分析结果

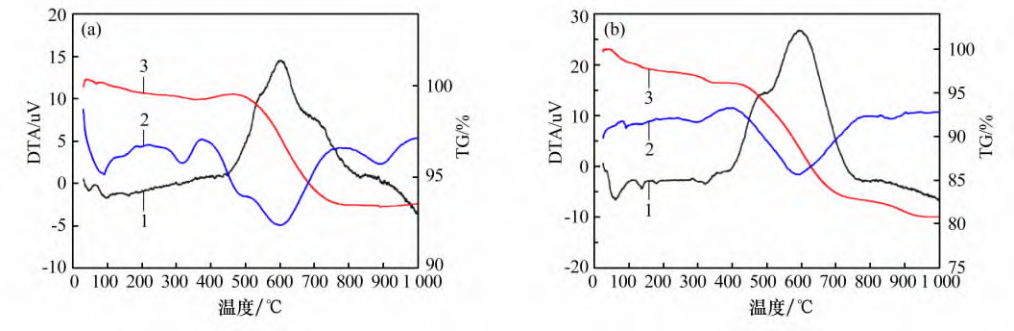
Fig. 4 XRD phase analysis results of furnace charge, tailing slag and secondary products of type A and B

由图 3 可知，A、B 两类入炉料和再生氧化锌粉的团聚现象比较严重。由表 1 可知：两类入炉料中都含有大量的 Fe 和 Zn 氧化物，少量的 PbO，A 类入炉料和再生锌粉中 Fe、Pb、Zn、Cl 元素质量分数分别为 64.09%、0.06%、0.65% 和 1.10%；B 类入炉料和再生锌粉中 Fe、Pb、Zn、Cl 元素质量分数分别为 50.07%、0.66%、6.85%、11.84%。计算可知 A 类 Pb、Zn、Cl 的脱除率分别为 83.33%、67.69% 和 96.64%，再生 Zn 粉的纯度为 14.58%；B 类 Pb、Zn、Cl 的脱除率分别为 96.97%、84.38% 和 97.97%，再生 Zn 粉的纯度为 41.49%。由图 2 可知：两种入炉料的物相组成为 Fe_3O_4、Fe_2O_3、FeO(OH)、$CaCO_3$、$CaSiO_3$、$ZnFe_2O_4$、ZnO、PbO，以及钠盐和钾盐；B 类入炉料中的 Cl 质量分数较高，主要为 $ZnCl_2$、$PbCl_2$、$FeCl_3$；两种窑渣的主要物相组成为 Fe_3O_4、Fe_2O_3、FeO、$CaCO_3$ 和 $CaSiO_3$，Cl 元素以 NaCl 和 KCl 的形式存在；再生 Zn 粉的主要物相组成为 ZnO、铁氧化物，B 类再生 Zn 粉中还含有 $Pb_2Cl_2CO_3$。

2.2 窑内反应分析

为探究两类入炉料在回转窑中的反应过程，采用 DTA 分析升温过程发生的化学反应、反应温度和吉布斯自由能等[22-23]，结果见图 5 和表 2。结合图 5 与表 2 可知：在 25～400 ℃时，A、B 入炉料质量分别减少 0.63%、3.70%，ΔH 分别为 −112.49、−137.61 J/g，该部分为入炉料中的结晶水蒸发引起的质量减少；在 400～700 ℃时，曲线呈现明显剧烈下降趋势，A、B 入炉料质量分别减少 4.55%、12.51%，ΔH 分别为 378.43、970.46 J/g，该部分为入炉料中的煤粉燃烧、单质 Fe 氧化反应、PbO 和部分氯化物挥发引起的质量减少，同时 DTA 曲线表现出明显放热峰；在 700～1 000 ℃时，A、B 入炉料质量分别减少 0.34%、2.71%，ΔH 均为 71.73 J/g，该部分为入炉料中氯化物的挥发引起的质量减少。两种入炉料在不同温度区间的热重变化如表 3 所示。由表 3 可知，Cl 元素质量分数高将会使得除尘灰中的 Pb、Zn 等元素挥发量增大，从而造成 B 入炉料在 400～700 ℃时失重明显高于 A，且 PbO 和 ZnO 先于 Fe 氧化物被还原。

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



(a) A 类入炉料；(b) B 类入炉料

1—DTA；2—DTG；3—TG。

图 5　两种含 Zn 混合料的 DTA 分析结果

Fig. 5　DTA analysis results of two Zn-containing mixtures

(注：TG 曲线代表热重，DTG 曲线为 TG 曲线的微分)

表 2　主要的化学反应

Table 2　Major chemical reactions

化学反应方程式	反应温度/℃	吉布斯自由能(ΔG^0)/(J·mol^{-1})
$C(s)+CO_2(g)=2CO(g)$	699	169 358.41 − 174.17T
$ZnFe_2O_4(s)+C(s)=2FeO(s)+ZnO(s)+CO(g)$	685	19 575.41 − 20.42T
$Fe_3O_4+C(s)=3FeO(s)+CO(g)$	664	176 538 − 223.96T
$Fe_3O_4+CO(g)=3FeO(s)+CO_2(g)$	572	196 100 − 209.25T
$ZnO(s)+C(s)=Zn(l)+CO(g)$	969	240 505.61 − 193.57T
$ZnO(s)+CO(g)=Zn(l)+CO_2(g)$	937	140 810 − 116.34T
$Zn(l)=Zn(g)$	904	107 278 − 91.12T
$FeO(s)+C(s)=Fe(s)+CO(g)$	724	165 386.48 − 165.76T
$FeO(s)+CO(g)=Fe(s)+CO_2(g)$	554	−17 490 + 21.13T
$PbO(l)+CO(g)=Pb(l)+CO_2(g)$	900	116 285.5 − 100.75T
$Pb(l)+3Fe_2O_3=2Fe_3O_4+PbO(l)$	900	49 420.3 − 57.487T
$Pb(s)=Pb(g)$	500	191 355.8 − 103.08T
$2ZnO(s)=2Zn+O_2$	904	940 964.7 − 409.45T
$2PbO(s)=2Pb+O_2$	500	814 098.1 − 392.27T

表 3　两种含 Zn 入炉料的 DTA 峰区分析结果

Table 2　DTA peak region analysis results of two Zn-containing mixtures

温度/℃	A 类入炉料(20.68 mg)		B 类入炉料(16.74 mg)	
	热重变化(TG)/mg	热值(ΔH)/(J·g^{-1})	热重变化(TG)/mg	热值(ΔH)/(J·g^{-1})
25 ~ 400	−0.09	−112.49	−0.62	−137.61
450 ~ 700	−0.94	+378.43	−2.56	+970.46
700 ~ 1 000	−0.07	+52.25	−0.54	+115.09

综合以上结果，除尘灰的物相分布主要为 Fe_3O_4、Fe_2O_3、FeO(OH)、$CaCO_3$、$CaSiO_3$、$ZnFe_2O_4$、ZnO、PbO、$ZnCl_2$、$PbCl_2$、$FeCl_3$、以及钠盐和钾盐。对于低 Cl 和高 Cl 的固废原料，回转窑工艺实现的 Pb、Zn 平均回收效率仅为 90.15% 和 76.04%，再生氧化锌粉的平均纯度为 28.04%，再生产品纯度不高，还有待提升。因此，本研究将进一步通过计算机数值模拟，探索提升方案。

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

2.3 数值模拟

PbO 和 ZnO 在分解温度、密度等物理性质方面存在较大差异，同时随着回转窑内部温度的升高，Pb、Zn 等氧化物被还原成气态单质，$ZnCl_2$ 和 $PbCl_2$ 均能在 1 000 ℃左右全部分解，得到 Pb、Zn 单质；随着气流、温度梯度的影响，Pb、Zn 单质与 O_2 结合为颗粒状的 PbO 和 ZnO，在重力的作用下实现 Pb、Zn 分离。传统回转窑工艺无法直观地观测到 Pb、Zn 蒸汽团的运动规律，因此，本文采用 CFD 数值模拟软件模拟 B 类入炉料中的 Pb、Zn 元素在回转窑升华段(25 ~ 35 m，1 100 ~ 1 250 ℃)的蒸发冷凝机制和蒸汽的运动行为。

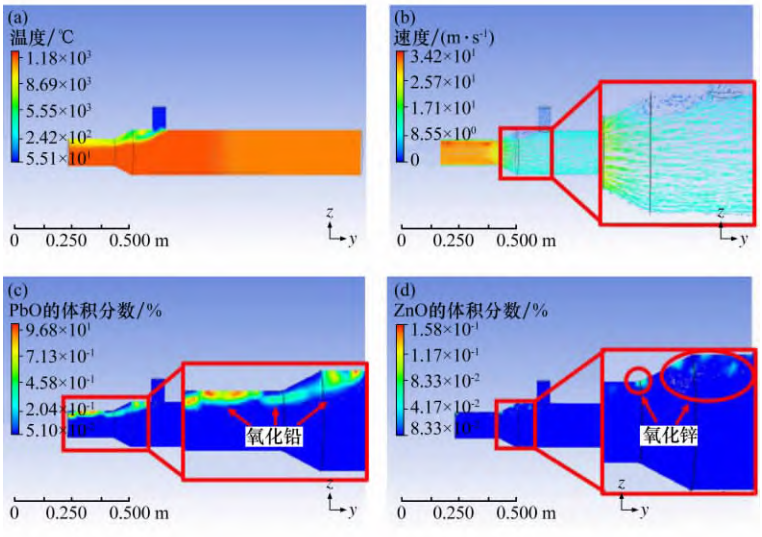
由于 B 类入炉料的物相比较复杂，为简化模拟过程和直观观察 Pb、Zn 蒸汽团运动轨迹，将 Fe_4O_3、ZnO 和 PbO 的质量分数分别设置为 60%、20% 和 20%；在数值模拟过程中仅考虑 Fe、Zn、Pb 的氧化物。在 CFD 模拟软件中采用多相流模型 VOF 和 Lee 蒸发冷凝模型[24]进行数值模拟，其化学成分设置如表 4 所示。

模拟计算发现当设置进气速度为 10 m/s，壁面温度为 1 200 ℃且为绝热壁面时，回转窑内部温度从窑头到窑尾呈现总体上升的趋势，见图6(a)。由于模拟过程中仅考虑反应物相变过程中的能量变化，不考虑物料在回转窑中的吸热和放热过程，因此在入料口有温度异常现象；混和物料从入料口投入速度为 3 m/s，速度云图见图 6(b)。PbO 和 ZnO 被还原成 Pb、Zn 蒸汽和 CO_2，但由于其密度比空气小，高温 Pb、Zn 蒸汽处于回转窑上端，与 O_2 结合生成 PbO 和 ZnO，在温度梯度的作用下，Pb、Zn 不断团聚结合成为大颗粒，在重力的作用下，由于 Pb、Zn 元素存在密度、冷凝温度等差异，PbO 和 ZnO 颗粒加速降落至粉末出口附近，实现梯度沉降，最终未挥发的富含 Fe 废料随回转窑转动排出回转窑，实现 Pb、Zn、Fe 梯级分离见图 6(c)与 6(d)。

表 4 多相流模型中的化学成分设置

Table 4 Component settings in the multiphase flow model

物相名称	入炉料部分物相质量分数/%	多相流模型中物相质量分数/%
Fe_3O_4	45.39	60
ZnO	1.96	20
Zn	0	0
PbO	0.13	20
Pb	0	0



(a) 温度云图；(b) 蒸汽运动路线；(c) ZnO 分布；(d) PbO 分布

图 6 回转窑分离 Pb、Zn 元素的数值模拟结果

Fig. 6 Numerical simulation results of separation of lead and zinc in rotary kiln

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

3 结 论

(1) 高低 Cl 元素夹杂的两类含锌固废回转窑，入炉料的主要物相组成为 Fe 氧化物、$CaCO_3$、$CaSiO_3$、$ZnFe_2O_4$、ZnO、PbO，高 Cl 固废中还含有 $ZnCl_2$、$PbCl_2$、$FeCl_3$ 等；窑渣的物相组成为 Fe 氧化物、$CaCO_3$ 和 $CaSiO_3$ 等；再生 Zn 粉中主要有 ZnO、铁氧化物。

(2) A、B 两类含锌固废的 Pb、Zn 的脱除率分别为 83.33%、67.69% 和 96.97%、84.38%，再生 Zn 粉的纯度分别为 14.58% 和 41.49%，Cl 的脱除率分别为 96.64% 和 97.97%。

(3) 数值模拟结果表明当通气速率为 10 m/s，绝热壁面温度为 1 200 ℃时，可实现 Pb、Zn 和含 Fe 窑渣的分离，该方案有助于提升再生产品纯度和有价元素梯级分离，有望进一步提升含锌固废的回收价值。

参考文献:

[1] 殷磊明. 煅烧含锌粉尘回转窑结圈的研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学,2017.
YIN Leiming. Research on ring formation in rotary kiln for calcination of dust containing zinc[D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology,2017.

[2] 郝阳,鹏峰,李晋岩,等. 我国炼钢固废利用现状与发展趋势[J]. 中国钢铁业,2020(3):34-38.
HAO Yang,PENG Feng,LI Jingyan,et al. China's status quo and development trend of utilization of steelmaking solid waste[J]. China Steel,2022(3):34-38.

[3] 李威,谭炳富,栗克建,等. 钢铁厂含锌固废资源循环利用研究现况及发展态势[J]. 有色冶金节能,2021,2(1):8-12.
LI Wei, TAN Bingfu, LI Kejian, et al. Research status and development trend of zinc-containing solid waste resources recycling in iron and steel plants[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy,2021,2(1):8-12.

[4] LORENA Alcaraz, ANA Urbieta, MARÍA Eugenia Rabanal, et al. Photocatalytic activity of electric-arc furnace flue dusts[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020,9(2):1261-1272.

[5] 姜晓波,王雅宁,邱利民. 二氧化碳凝华及升华初步实验研究[J]. 低温工程,2019(3):29-34.
JIANG Xiaobo,WANG Yaning,QIU Limin. Preliminary experiment investigation on carbon dioxide desublimation and sublimation process[J]. Cryogenics,2019(3):29-34.

[6] 谢学荣,鲁健,汪磐石. 宝钢污泥粉尘资源综合利用技术[J]. 宝钢技术,2019(3):7-10.
XIE Xuerong,LU Jian,WANG Panshi. Baosteel comprehensive utilization technology of sludge and dust resources[J]. Baosteel Technology,2019(3):7-10.

[7] 彭兵,张传福,彭及,等. 电弧炉粉尘的治理[J]. 矿产综合利用,2000,8(4):33-37.
PENG Bing, ZHANG Chuanfu, PENG Ji, et al. Treatment of electric furnace dust[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2000,8(4):33-37.

[8] 郭天立,未立清. 二次锌资源回收行业的发展方向分析[J]. 中国有色冶金,2010(6):56-59.
GUO Tianli,WEI Liqing. Analysis on the development direction of secondary zinc resource recovery industry[J]. China Nonferrous Metallurgy,2010(6):56-59.

[9] 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(1):1-15.
JIANG Liudong,LI Pingping,DU Chuanming,et al. Research development of zinc separation and recovery from steelmaking dust[J]. China Nonferrous Metallurgy,2022(1):1-15.

[10] 欧阳东. 广钢电炉粉尘分析及治理利用探讨[J]. 炼钢,2004,20(6):23-26.
OUYANG Dong. Discussion and analysis on EAF dust control and utilization[J]. Steelmaking,2004,20(6):23-26.

[11] 王冬斌,梁精龙,李惠,等. 冶金含锌粉尘中回收氧化锌的工艺综述[J]. 中国有色冶金,2018,47(6):39-43.
WANG Donbin,LIANG Jinglong,LI Hui,et al. A review of recovery of zinc oxide from metallurgical zinc dust[J]. China Nonferrous Metallurgy,2018,47(6):39-43.

[12] 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.

[13] 张建良,李洋,袁骧. 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 & Steel. 2018,53(6):1-10.

[14] 栗克建,朱茜,李艳,等. 一种炼钢粉尘资源回收过程中铅锌氯化物分离方法:201911166868.8[P]. 2020-03-31.
LI Kejian,ZHU Qian,LI Yan,et al. The invention relates to a method for separating lead and zinc chloride in the recovery process of steelmaking dust resources:201911166868.8[P]. 2020-03-31.

(下转第 14 页)

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

Science of Sintering,2010,42(3):269 – 281.

[5] 张树华,冯红云,史先菊. 除尘灰配矿烧结性能研究[J]. 武钢技术,2015,53(1):4 – 6.
ZHNAG Shuhua,FENG Hongyun,SI Xianju. Study of the performance with sintering dust[J]. Wuhan Iron and Steel Corporation Technology,2015,53(1):4 – 6.

[6] 王建明,陈建平,李海云,等. 烧结配加高炉除尘灰的工业试验[J]. 山西冶金,2013,36(6):13 – 14.
WANG Jianming, CHEN Jianping, LI Haiyun, et al. Industry experiment of sinter bearing blast furnace gasdust[J]. Shanxi Metallurgy,2013,36(6):13 – 14.

[7] 闫天明,彭犇. 水洗除尘灰配入烧结对成矿性能的影响[J]. 中国资源综合利用,2020,38(7):29 – 32;43.
YAN Tianming,PENG Ben. Research on the influence of water washing dedusting ash combined with sintering process on metallogenic performance[J]. China Resources Comprehensive Utilization,2020,38(7):29 – 32;43.

[8] LANZERSTORFER C,BAMBERGER S,BIRGIT P K. Recycling of blast furnace dust in the iron ore sintering process: investigation of coke breeze substitution and the influence on off-gas emissions[J]. ISIJ International,2015,55(4):758 – 764.

[9] 王艺慈,罗果萍,柏京波,等. F、K、Na 对烧结固相反应影响的研究[J]. 钢铁,2008,43(7):12 – 15.
WANG Yici,LUO Guoping,BAI Jingbo,et al. Study on the influence of F,K,Na on the solid phase reaction of sintering[J]. Steel,2008,43(7):12 – 15.

[10] 罗果萍,吴胜利,贾晓斌,等. K、Na 对白云鄂博铁精矿烧结液相流动特性的影响[J]. 钢铁研究学报,2013,10(25):10 – 13.
LUO Guoping,WU Shengli,JIA Xiaobi,et al. Effect of K and Na on sinter liquid phase fluidity of Baiyunebo iron ore concentrates[J]. Journal of Iron and Steel Research,2013,10(25):10 – 13.

[11] WU S, ZHANG G, CHEN S, et al. Influencing factors and effects of assimilation characteristic of iron ores in sintering process[J]. ISIJ International,2014,54(3):582 – 588.

[12] WU S,LI H,ZHANG W,et al. Effect of thermodynamic melt formation characteristics on liquid phase fluidity of iron ore in the sintering process[J]. Metals,2019,9(4):404.

[13] ZHANG G L,WU S L,CHEN S G,et al. Influence of gangue existing states in iron ores on the formation and flow of liquid phase during sintering[J]. International Journal of Minerals Metallurgy Materials,2014,21(10):962 – 968.

(上接第7页)

[15] SUN D,XU J,CHEN Q. Modeling of the evaporation and condensation phase-change problems with fluent[J]. Numerical Heat Transfer Part B Fundamentals,2014,66(4):326 – 342.

[16] 胡忠新. 工业管内高温高压流体多相流动特性研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.
HU Zhongxin. Study on multiphase flow characteristics of high temperature and high pressure fluid in the industrial pipeline[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2021.

[17] QU Xiaohua,SUI Hui,TIAN Maocheng,et al. CFD simulation of steam-air jet condensation[J]. Nuclear Engineering & Design,2016,297:44 – 53.

[18] NARASIMHA M, BRENNAN M S, HOLTHAM P N, et al. Numerical simulation of magnetite segregation in a dense medium cyclone[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(10):1034 – 1047.

[19] 吴亮. 含固体颗粒的两相流界面变化的数值研究-DEM-VOF 方法的实现[D]. 天津:天津大学,2018.
WU Liang. Development of a DEM-VOF model for the turbulent free-surface flows with particle[D]. Tianjin: Tianjin University,2018.

[20] LI Shuqian,WANG Ping,LU Tao,et al. CFD based approach for modeling steam-water direct contact condensation in sub-cooled water flow in a tee junction[J]. Progress in nuclear energy,2015,85:729 – 746.

[21] VYSKOCIL Ladislav,SCHMID Josef,MACEK Jiri,et al. CFD simulation of air-steam flow with condensation[J]. Nuclear Engineering and Design,2014,279:147 – 157.

[22] 陈卓,郑睿琦,堵伟桐,等. 含锌粉尘协同处置含铬尘泥的碳热还原试验[J]. 钢铁,2021,56(11):148 – 159.
CHEN Zhuo,ZHENG Ruiqi,DU Weitong,et al. Experiment on co-processing of chromium-containing sludge with zinc-bearing dust by carbothermic reduction method[J]. Iron & Steel,2021,56(11):148 – 159.

[23] 王浩翔,王炜,李宏玉,等. PbO 对高炉原燃料冶金性能影响的分析[J]. 中国冶金,2021,31(7):6 – 12.
WANG Haoxiang,WANG Wei,LI Hongyu,et al. Analysis of PbO on metallurgical properties of blast furnace raw fuel[J]. China Metallurgy,2021,31(7):6 – 12.

[24] 陈威,张立峰. 结晶器内多相流动和卷渣定量化统计的大涡模拟研究[R]. 重庆:冶金工业出版社,2022:38 – 39.
CHEN Wei,ZHANG Lifeng. Development and application of hign temperature continuously quenching technology at the end of thick slab continuous caster[R]. Chongqing: Metallurgical Industry Press. 2022:38 – 39.

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