钢铁厂电炉灰和转炉 LT 灰消解特性研究

吴佩佩[1]，余志友[1]，杨聪聪[2]
(1. 宝武集团环境资源科技有限公司，上海 201900；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083)

摘要： 为了更好地利用钢铁厂含锌粉尘，本文结合现场转底炉生产工艺，研究了消解时间、物料水分、OG-LT 混合灰质量比以及消解方式等参数对钢铁厂电炉灰和 LT 灰中 *f*-CaO 消解程度的影响。结果表明：延长消解时间和增加水分对提高电炉灰、LT 灰的消解率有利，但是均不能使 *f*-CaO 消解完全；在确保物料流动性和生产顺行的前提下，当含水量为 15% 时，至少需消解 48 h 以上，电炉灰和 LT 灰中的 *f*-CaO 消解率才能达到 80% 以上；当 OG 泥和 LT 灰的质量比超过 2∶1 时，OG-LT 混合灰中的 *f*-CaO 消解率达到 70% 以上。生产现场可以采用落地加水放置以及提高 OG 泥在混合灰中比例的方式解决因 *f*-CaO 发生消解反应对生产带来的不利影响。此外，通过加水浸泡、机械活化等工艺也是提高含锌粉尘 *f*-CaO 消解率的重要措施。

关键词： 转底炉；电炉灰；LT 灰；氧化钙；消解率
中图分类号： TF08；X757 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)03－0027－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.03.036

Research on digestion characteristics of EAF and converter-LT dusts in iron and steel plants

WU Peipei[1], YU Zhiyou[1], YANG Congcong[2]
(1. Baowu Group Environmental Resources Technology Co., Ltd., Shanghai 201900, China; 2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: In order to make better use of zinc-containing dust in steel plants, effects such as digestion time, material moisture content, mass ratio of OG-LT mixed dust and digestion method on the degree of *f*-CaO digestion in EAF and converter-LT dusts in iron and steel plants are studied combined with the production process of on-site rotary hearth furnace. The results show that: prolonging digestion time and increasing moisture content are beneficial to improve the slaking rate of EAF and converter-LT dusts, but *f*-CaO cannot be completely digested. On the premise of ensuring the material fluidity and smooth peration of production, when the moisture content is 15%, it needs to be digested for at least 48 hours, and the slaking rate of *f*-CaO in EAF and converter-LT dusts can reach above 80%. When the mass ratio of OG mud to LT dust exceeds 2∶1, the slaking rate of *f*-CaO in OG-LT mixed dust reaches over 70%. The production site can solve the adverse effects of the digestion reaction of *f*-CaO on the production by placing it with water on the floor and increasing the proportion of OG mud in the mixed dust. In addition, such processes as water immersion and mechanical activation are also important measures to improve the *f*-CaO slaking rate of zinc-containing dust.

Key words: rotary hearth furnace; EAF dust; LT dust; calcium oxide; slaking rate

收稿日期： 2022－04－02；**修回日期：** 2022－05－16
基金项目： 湖南省重点研发计划资助项目(2022SK2075)
作者简介： 吴佩佩(1987—)，男，工程师，从事钢铁厂含锌粉尘综合利用方面的研究与应用工作。
通信作者： 余志友(1973—)，男，高级工程师，从事钢铁厂含锌粉尘综合利用方面的研究与管理工作。

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

钢铁工业是我国经济发展的重要基础产业，也是固废排放大户，在冶炼过程中会产生大量冶金粉尘。据统计，钢铁企业产生的各类粉尘总量一般为钢铁产量的8%~15%，而其中含锌粉尘约占20%~30%[1]。2022年，全国粗钢产量超10.13亿吨，以此推算，每年产生的含锌粉尘超过2 000万吨以上，如何合理处置含锌粉尘已经成为钢铁行业可持续发展的关键[2-3]。

目前处理含锌粉尘的方式中，因转底炉工艺具有适应性较好、可靠性高、易于操作和维护、对环境污染相对较小等优势，具有较大应用价值，更适合钢铁企业流程化生产[4-5]。在常规转底炉工艺中，通常将含锌粉尘、黏结剂和水混合均匀后进行压团或造球成型，经干燥后送入转底炉进行还原脱锌[6-8]。钢铁厂含锌粉尘按照生产工序可分为烧结灰、高炉尘泥、转炉尘泥、电炉粉尘等[9]。其中，电炉灰、LT灰等炼钢过程产生的干法除尘灰等含锌粉尘常含有大量的游离氧化钙(*f*-CaO)，约占其总钙元素质量分数的40%[10-11]。若*f*-CaO不经过消解预处理或者消解程度较低，则其会在含锌粉尘后续的造球或压块、生球/生团块转运以及生球/生团块干燥等过程中继续水化生成$Ca(OH)_2$，从而导致球团或团块出现体积膨胀，使得球团或团块的强度大幅降低甚至出现粉化等现象，这将严重影响转底炉的顺行以及还原产品的质量[12]。

本文结合现场转底炉生产工艺，系统地研究了消解时间、物料水分、OG-LT混合灰质量比以及消解方式等参数对钢铁厂电炉灰和LT灰中*f*-CaO消解程度的影响。本研究旨在查明电炉灰、LT灰等含*f*-CaO的含锌粉尘的消解特性及其影响因素，探究强化钢铁厂电炉灰和转炉LT灰消解效果的措施和手段，这对提高含锌粉尘的造块强度，降低返球率，以及保障转底炉工艺的顺行，提高转底炉产量和产品质量、降低生产成本具有重要的现实意义。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

1.1.1 含锌粉尘的化学成分

试验用含锌粉尘包括电炉除尘灰(电炉灰)、LT灰、OG泥、现场消解后的电炉除尘灰和OG-LT混合灰(OG泥与LT灰的混合比例为2∶1)等，均由宝武集团上海转底炉生产基地提供。电炉灰产自钢铁厂电炉冶炼的除尘灰，OG泥与LT灰均产自钢铁厂转炉炼钢工序，OG泥为转炉煤气湿法回收系统产出的污泥，LT灰为转炉干式除尘灰。各含锌尘泥主要化学成分如表1所示。由表1可知，电炉灰、LT灰、OG泥的CaO质量分数分别为10.86%、10.20%和7.10%。其中，OG泥由于与水接触反应时间较长而不存在*f*-CaO，而干法除尘得到的电炉灰和LT灰中的*f*-CaO的质量分数较高。

表1 各含锌粉尘主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions of zinc-containing dust %

含锌粉尘	TFe	FeO	C	Zn	S	Cl	CaO
电炉灰	40.16	19.37	1.75	7.89	0.48	0.61	10.86
LT灰	56.38	45.67	2.34	4.42	0.20	0.31	10.20
OG泥	59.46	73.58	2.24	3.12	0.05	0.05	7.10
电炉灰(现场消解后)	39.91	19.75	1.49	7.97	0.46	0.61	10.92
OG-LT混合灰(现场消解后)	56.46	45.13	2.01	4.03	0.18	0.29	9.48

1.1.2 含锌粉尘的物相分析

为了查明含锌粉尘中Ca元素的赋存状态，本研究采用化学物相法对未消解和生产现场消解后的电炉灰、LT灰中钙元素的赋存状态进行了分析，结果分别见表2、3。由表2、3可知，电炉灰中含有4.52%的*f*-CaO，约占其总钙元素分布率的40.73%；LT灰中含有4.48%的*f*-CaO，约占其总钙元素分布率的43.96%。现场的消解工艺和条件尚不能使含锌粉尘中的*f*-CaO完全消解，消解后的电炉灰和OG-LT混合灰的*f*-CaO质量分数分别约为3.86%和1.45%，分别约占其总钙元素分布率的35.35%和15.30%。现场消解后的电炉灰中

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

f-CaO 质量分数仅比未消解电炉灰 *f*-CaO 质量分数低 0.66%，从侧面说明电炉灰的活性较低，消解性能较差。此外，现场消解后的 OG-LT 混合灰中的 *f*-CaO 质量分数明显低于电炉灰，这是由于加入 OG 泥对 LT 灰中的 *f*-CaO 质量分数产生了稀释作用。

表 2　消解前不同含锌粉尘中 Ca 元素赋存状态

Table 2　Occurrence state of calcium in different zinc-containing dust before digestion

含锌粉尘	分析类型	*f*-CaO	$CaCO_3$	CaF_2	$CaSiO_3$	$CaSO_4$
电炉灰	钙质量分数/%	4.52	2.50	0.93	2.39	0.62
	钙分布率/%	40.73	23.05	8.55	22.00	5.67
LT 灰	钙质量分数/%	4.48	3.91	0.84	0.76	0.21
	钙分布率/%	43.96	38.29	8.26	7.43	2.06

表 3　现场消解后不同含锌粉尘中 Ca 元素赋存状态

Table 3　Occurrence state of calcium in different zinc-containing dust after digestion

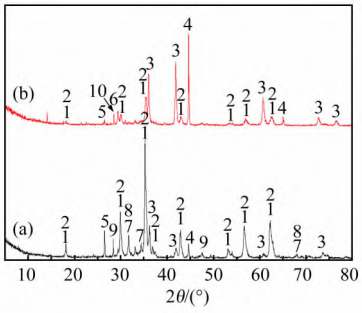
含锌粉尘	分析类型	*f*-CaO	$CaCO_3$	CaF_2	$CaSiO_3$	$CaSO_4$
电炉灰	钙质量分数/%	3.86	3.99	0.79	1.28	1.00
	钙分布率/%	35.35	36.54	7.23	11.72	9.16
OG-LT 混合灰	钙质量分数/%	1.45	7.18	0.32	0.38	0.15
	钙分布率/%	15.30	75.74	3.38	4.01	1.57

同时，对现场消解后的电炉灰和 OG-LT 混合灰的主要物相进行分析，结果见图 1。由图 1 可知：现场消解后的电炉灰内仍可检测到明显的 CaO 衍射峰，这说明 *f*-CaO 未被完全消解；电炉灰中的载钙物相主要为 *f*-CaO 和碳酸钙系物相，还有一定量的 CaO 与 Mg 形成(Ca，Mg)O 固溶体，由于 MgO 在消解反应中活性比 CaO 低，这可能是造成电炉灰 *f*-CaO 活性偏低的原因之一。

相比而言，现场消解后的 OG-LT 混合灰中未检测到游离的 CaO 物相衍射峰，而 $CaCO_3$ 的衍射峰较明显，这可能是因为 OG-LT 混合灰中的 *f*-CaO 质量分数小于 2%，已经低于衍射仪检测下限，导致无法准确检测出该物相，同时也说明 LT 中的 *f*-CaO 的消解速率相对电炉灰更快。

1.2　试验方法

试验研究了电炉灰和 LT 灰中 *f*-CaO 消解放热和物料升温特性，具体测试方法：每次称取 3 kg



(a)　现场消解后的电炉灰；

(b)　现场消解后的 OG-LT 混合灰

1—磁铁矿(Fe_3O_4)；2—铁酸锌($ZnFe_2O_4$)；3—浮氏体(FeO)；4—金属铁(Fe)；5—碳(C)；6—碳酸钙($CaCO_3$)；7—氧化锌(ZnO)；8—氧化钙(CaO)；9—硫化亚铁(FeS)；10—硫化亚锌(ZnS)。

图 1　现场消解后电炉灰和 OG-LT 混合灰的 XRD 物相分析

Fig. 1　XRD phase analysis of EAF and OG-LT dusts after digestion from steel mills

初始料温为 20 ℃的电炉灰或 LT 灰，分别添加 20 ℃的水，将原料水分调至 10%、15% 和 17.5%，混匀后装入隔热箱中，通过在隔热箱中插入的测温仪实时记录料温变化。

同时，试验还研究了消解时间、消解水分、配比、消解方式等因素对电炉灰、LT 灰和 OG-LT 混合灰消解情况的影响。其试验流程：每次称取 3 kg 干燥后的上述物料，按设定物料含水量配加一定质量的水，然后混匀、打散后放置消解一定时间，待消解结束时，对含锌粉尘进行缩分取样得到 100 ~ 200 g 消解后物料；再将物料铺平置于玻璃蒸发皿上，并放入 100 ℃的真空干燥箱中烘至恒重；对烘干后的消解物料进行制样，然后进一步缩分、取样并化验 *f*-CaO 的质量分数。

此外，为强化电炉灰和 LT 灰的消解，本文还研究了浸泡消解、强力混合机械活化和润磨机械活化等方式对电炉灰和 LT 灰消解情况的影响。相应的试验步骤：① 浸泡消解：将电炉灰或 LT 灰分别与水按质量比 1∶2 进行配矿、搅拌均匀后进行浸泡消解，分别考察了浸泡消解时间和水温对两种物料消解程度的影响，消解结束后，迅速用抽滤机对试验样品进行过滤得到滤饼；② 机械活化：电炉灰或 LT 灰中按一定含水量配加相应质量的水，快速混匀后分别装入立式强力混合机或实

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

验室小型润磨机中，在强力混合或润磨过程中进行消解并得到相应的消解物料。上述试验得到消解后的物料通过缩分、取样、真空干燥、制样、再缩分取样得到若干等份，分别用于化学分析等。电炉灰或 LT 灰中 f-CaO 的消解率(D) 可通过公式(1) 计算:

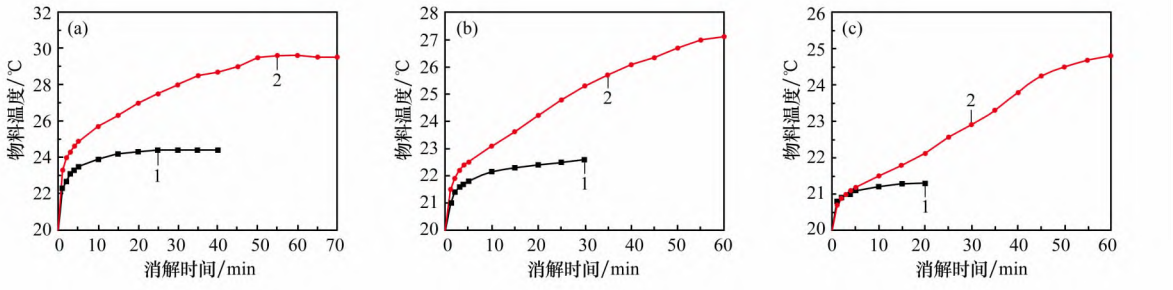
$$D = \frac{w_0 - w_1}{w_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: w_0 为电炉灰或 LT 灰消解前的游离钙质量分数,%; w_1 为电炉灰或 LT 灰消解后的残余游离钙质量分数,%。

2 结果与讨论

2.1 电炉灰与 LT 灰消解升温特性

在不同水分条件下(10%、15% 和 17.5%) 的电炉灰和 LT 灰的消解升温特性如图 2 所示。



水分(质量分数) /%: (a) 10; (b) 15; (c) 17.5

1—电炉灰; 2—LT 灰。

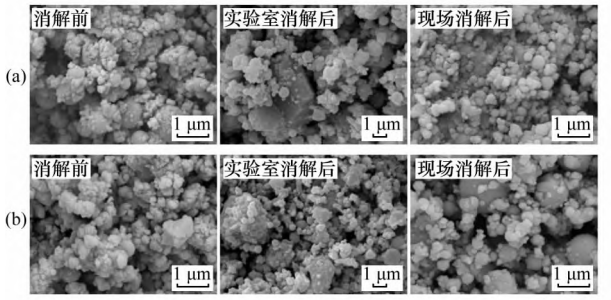
图 2 含锌粉尘在不同消解水分下的升温特性

Fig. 2 Temperature rising characteristics of zinc-containing dust during digestion under different moisture conditions

由图 2 可知，电炉灰和 LT 灰各自分别在不同的水分条件下的升温规律均基本相同。电炉灰在消解初期物料升温较快，15 min 后料温曲线趋于平缓。这可能是由于电炉灰中仅有少量的 f-CaO 有较高的活性，易与水反应，在混合初期放出大量热，而剩余的 f-CaO 活性较低，放热较为缓慢。LT 灰在消解过程中始终处于升温状态，消解时间为 60 min 时温度曲线仍处于上升的趋势，这说明物料此时仍未消解完全。总而言之，电炉灰和 LT 灰中 f-CaO 的活性均较差，消解速率较慢; 但相比而言，LT 灰中 f-CaO 的活性优于电炉灰。

同时，随着物料水分的提高，物料温度的上升幅度减小。这是由于等质量电炉灰或 LT 灰中 f-CaO充分消解释放的热量是一定的。但是温度上升既是混合料热容的反映，也与含水量密切相关。一般来说，水的比热容远高于矿物的比热容，水在物料温度升高的同时也会吸收大量 f-CaO 消解产生的热量。因此，仅通过温度上升来判断电炉灰、LT 灰的消解情况并不合理，温度上升慢可能是消解水分高的缘故，也有可能是粉尘本身 f-CaO 的活性低、消解速率慢。因此，两种物料的消解程度仍需通过测定其 f-CaO 质量分数来加以判定。

图 3 所示为电炉除尘灰和 LT 灰消解前后的微观颗粒形貌。由图 3 可知，实验室消解后的含锌粉尘与生产现场消解的含锌粉尘的微观颗粒形貌基本保持一致。电炉除尘灰和 LT 灰消解前后的颗粒粒径均未发生明显变化，平均粒度在几个微米，但消解后颗粒趋于球化，棱角减少，分布更加分散。这可能是因为黏附在大颗粒上的小颗粒中的 f-CaO 与水反应并剧烈放热，从而造成颗粒间的黏附发生解体。但是由于两种含锌粉尘的 f-CaO 的活性均较差，所以大颗粒内部的 f-CaO 未得到消解,因此整体来看消解前后的单体大颗粒的微观



(a) 电炉除尘灰; (b) LT 灰

图 3 电炉灰与 LT 灰消解前后的微观颗粒形貌对比

Fig. 3 Particle morphology of EAF dust and LT dust before and after digestion

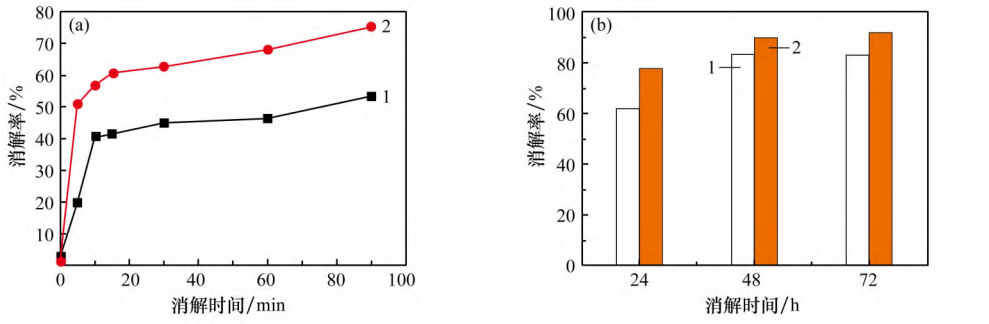
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

形貌基本未发生明显的变化。对比电炉灰和 LT 灰消解前后的微观颗粒形貌可知，LT 灰消结后的小颗粒物料的含量明显更多，物料颗粒间黏附程度更小，颗粒表面更为光滑，这也证明了 LT 灰的消解程度高于电炉灰。

2.2　不同消解参数的影响研究

2.2.1　消解时间的影响

针对单一电炉灰和单一 LT 灰，在水分为 15% 的条件下，分别考察消解时间对其 *f*-CaO 的消解率的影响，结果如图 4 所示。



(a)　短时间消解趋势；(b)　长时间消解趋势

1—电炉灰；2—LT 灰。

图 4　消解时间对电炉灰和 LT 灰消解率的影响

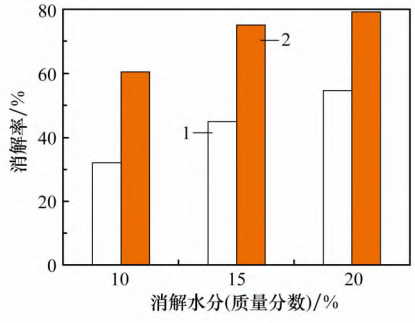
Fig. 4　Influence of digestion time on the digestion rate of EAF and LT dusts

由图 4(a) 可见，在 15% 水分的条件下，消解初期电炉灰和 LT 灰 *f*-CaO 的消解率迅速增加；消解 20 min 后，两种含锌粉尘的 *f*-CaO 的消解率曲线增长的趋势均变缓；当消解时间为 90 min 时，电炉灰的消解率仅为 45% 左右，而 LT 灰的消解率能达约 71%。由图 4(b) 可见，在 15% 水分条件下，即使消解 24 h，电炉灰 *f*-CaO 的消解率也仅为 61.97%，而 LT 灰的 *f*-CaO 的消解程度与 90 min 相比，增加至 77%。即使将消解时间提高至 48 ~ 72 h，电炉灰和 LT 灰的 *f*-CaO 也不能完全消解，前者的消解率可达到 83% 左右，后者则可达到 91% 左右。

因此，延长消解时间对提高电炉灰、LT 灰 *f*-CaO的消解率有利，在消解水分为 15% 条件下，两种含锌粉尘至少需消解 48 h 以上，消解率才能达到 80% 以上。但是由于目前转底炉生产线物料被消解的设计时间最多为 30 min，无法达到 24 h 或者48 h。因此，后续试验的消解时间固定为 30 min。

2.2.2　消解水分的影响

在消解时间为 30 min 条件下，研究不同含水量对电炉灰和 LT 灰 *f*-CaO 的消解率的影响，结果如图 5 所示。当水分为 10% 时，电炉灰 *f*-CaO 的消解率为 32%，LT 灰消解率为 59%：当水分由 10% 增加到 20% 时，电炉灰和 LT 灰 *f*-CaO 的消解率均明显增加，前者达到 55%，后者则达到了 80%。这意味着现有消解工艺，通过优化消解时间和消解水分，均无法使两种物料完全消解，尤其电炉灰的消解程度较低，还需采用其他强化措施。此外，由于含锌粉尘的原料较细，当物料中的含水量超过 15% 时，颗粒间黏性显著增强，物料间的流动性会严重变差，在生产线上容易造成粘堵。



1—电炉灰；2—LT 灰。

图 5　消解水分对电炉灰和 LT 灰消解率的影响

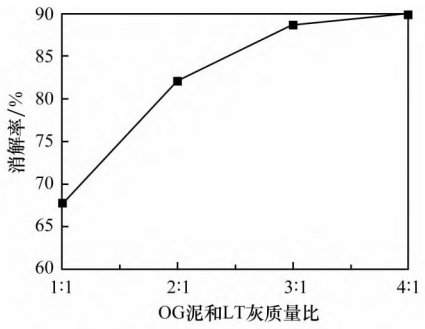
Fig. 5　Influence of digestion moisture contents on the digestion rate of EAF and LT dusts

2.2.3　OG 泥和 LT 灰协同消解

一般来说，现场 OG 泥的水分约为 35% ~ 50%，因此本研究设想采用 OG 泥本身自带的物理水对 LT 灰进行消解。试验设定 OG 泥水分为 35%，消解时间为 30 min，考察 OG 泥与 LT 灰质量对混合料 *f*-CaO 消解的影响，结果如图 6 所示。

随着 OG 泥与 LT 灰质量比的增加，LT 灰中

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



1—电炉灰；2—LT 灰。

图 6 OG 泥与 LT 灰配比对 OG 泥和 LT 灰协同消解效果的影响

Fig. 6 Effect of ratio of OG mud and LT dust on synergistic digestion performance of OG mud and LT dust

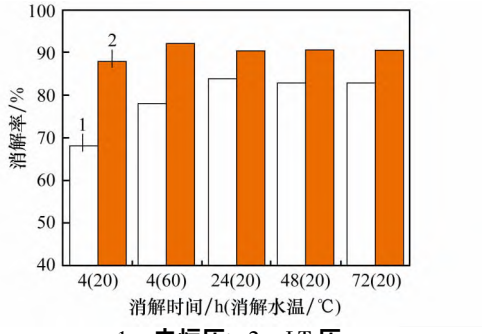
f-CaO的消解率随之增加，这可能与混合料的物理含水量增加有关。当 OG 泥与 LT 灰的质量比为 4∶1时，混合料的 *f*-CaO 的消解率达到 90% 左右；另一方面，当 OG 泥与 LT 灰质量比增加时，意味着 LT 灰配比的减少，即混合料 *f*-CaO 的质量分数也在减少，降低了消解的难度。

2.3 强化电炉灰和 LT 灰消解试验

由前述试验结果可知，电炉灰和 LT 灰中 *f*-CaO的活性均较差，尤其在现有消解工艺条件下，电炉灰的消解率不足 50%，LT 的消解率不足 85%，无法有效地满足转底炉工艺造块对原料的要求。基于此，本文进一步探究了浸泡消解和机械活化消解等强化措施对电炉灰和 LT 灰中 *f*-CaO 消解的影响。

2.3.1 浸泡消解

图 7 为(电炉灰、LT 灰)与水按质量比为 1∶2 时，不同浸泡消解时间和水温条件下两种物料消解情况。



1—电炉灰；2—LT 灰。

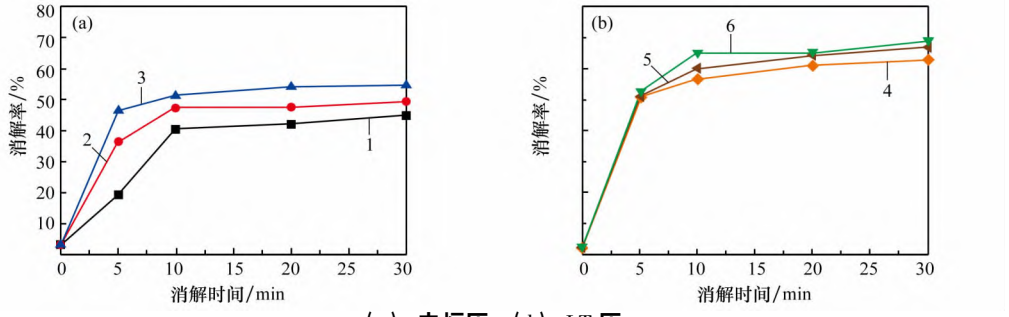
图 7 不同浸泡消解时间和水温条件下含锌粉尘中 *f*-CaO 的消解情况

Fig. 7 Digestion results of *f*-CaO in zinc-containing dust under different soaking time and water temperature conditions

由图 7 可知，在环境水温为 20 ℃条件下浸泡消解 4 h 后，电炉灰与 LT 灰中 *f*-CaO 的消解率分别可达 68% 与 87%；若在相同消解时间条件下，将水温提高到 60 ℃，电炉灰与 LT 灰消解率可分别提高至 78% 与 92%；当维持水温为 20 ℃时，消解时间延长到 24 h，电炉灰和 LT 灰的消解率分布可达 82% 和 91%。可见，采用浸泡的方式能够显著促进电炉灰和 LT 灰中 *f*-CaO 的消解，但即使浸泡消解时间延长到 72 h，电炉灰和 LT 灰仍有 18% 和 8% 的*f*-CaO未消解，说明这部分的 *f*-CaO 活性极低，对于后续压团的影响较小。

2.3.2 机械活化

试验在消解水分为 15% 条件下，研究了强力混合和润磨预处理等消解方式、不同消解时间对电炉灰和 LT 灰中 *f*-CaO 消解程度的影响，结果如图 8 所示。



(a) 电炉灰；(b) LT 灰

1—常规；2—强混；3—润磨；4—常规；5—强混；6—润磨。

图 8 不同消解方式对含锌粉尘 *f*-CaO 消解率的影响

Fig. 8 Influence of different digestion methods on the digestion rate of *f*-CaO in Zinc-containing dust

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

由图 8 可知：在固定消解时间为 30 min 条件下，电炉灰和 LT 灰分别采用常规静置消解的方式，*f*-CaO 的消解率仅为 45% 和 62%；采用强力混合强化消解的方式，*f*-CaO 的消解率可分别提升至 47% 和 65%；采用润磨强化消解的方式，*f*-CaO 的消解率分别可达 55% 和 68%。可见，采用强力混合或润磨工艺均可促进电炉灰和 LT 灰中 *f*-CaO 的消解。同强力混合相比，润磨工艺可通过机械力破坏含锌粉尘中钝化的 *f*-CaO 外壳，提高其反应活性，因而电炉灰和 LT 灰通过润磨的消解程度更高。此外，与电炉灰相比，由于 LT 灰本身活性较高，改变消解方式对其消解的影响较小。

3　结　论

(1) 钢铁厂电炉灰和 LT 灰中 *f*-CaO 的活性均较差，消解速率较慢，LT 灰中 *f*-CaO 的消解能力明显优于电炉灰。

(2) 在现有消解工艺条件下，优化各种消解条件，也均无法实现两种物料中的 *f*-CaO 有效地消解，即使延长消解时间至 24 h，电炉灰的消解率仍不足 70%，LT 的消解率仍不足 80%。

(3) 采用 OG 泥与 LT 灰协同消解、浸泡消解、机械活化等新方法均有助于提高电炉灰和 LT 灰中的 *f*-CaO 消解率和消解速率。尤其是通过 OG 泥与 LT 灰的质量比为 4∶1 进行协同消解的方式，混合料的 *f*-CaO 的消解率达到 90% 左右；通过浸泡 + 提高水温的方式，消解电炉灰的消解率可达 82%，LT 灰则可达 90% 左右。

参考文献：

[1] 佘雪峰，薛庆国，董杰吉，等. 钢铁厂典型粉尘的基本物性与利用途径分析[J]. 过程工程学报，2009，9(S1)：7－12.
SHE Xuefeng，XUE Qingguo，Dong Jieji，et al. Analysis of basic physical properties and utilization ways of typical dust in steel plants[J]. The Chinese Journal of Process Engineering，2009，9(S1)：7－12.

[2] 陈青月，潘建，朱德庆，等. 不锈钢尘泥球团预还原－熔炼回收有价金属[J]. 中国有色金属学报，2022，32(9)：2726－2740.
CHEN Qingyue，PAN Jian，ZHU Deqing，et al. Recovery of valuable metals from stainless steel dust and mud pellets by prereduction-smelting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2022，32(9)：2726－2740.

[3] 潘建，段真，朱德庆，等. 不锈钢尘泥球团煤基直接还原动力学[J]. 钢铁研究学报，2022，34(10)：1067－1077.
PAN Jian，DUAN Zhen，ZHU Deqing，et al. Direct reduction kinetics of stainless steel dust and mud pellets on coal base[J]. Journal of Iron and Steel Research，2022，34(10)：1067－1077.

[4] 彭程，范建峰. 转底炉处理赤泥工艺技术[J]. 中国冶金，2019，29(3)：53－56.
PENG Cheng，FAN Jianfeng. Technology for ren mud treated in rotary hearth furnace process[J]. China Metallurgy，2019，29(3)：53－56.

[5] 王飞，毛瑞，茅沈栋. 转底炉对转炉污泥的处理[J]. 钢铁，2019，54(12)：111－116.
WANG Fei，MAO Rui，MAO Shendong. Utilization of converter sludge by rotary hearth furnace[J]. Iron & Steel，2019，54(12)：111－116.

[6] ZHU Deqing，LI Siwei，PAN Jian，et al. Migration and distributions of zinc，lead and arsenic within sinter bed during updraft pre-reductive sintering of iron-bearing wastes[J]. Powder Technology，2019，342：864－872.

[7] GUO Zhengqi，ZHAN Ruoning，SHI Yue，et al. Innovative and green utilization of zinc-bearing dust by hydrogen reduction：Recovery of zinc and lead，and synergetic preparation of Fe/C micro-electrolysis materials[J]. Chemical Engineering Journal，2023，456：141157.

[8] ZHU Deqing，WANG Dingzheng，PAN Jian，et al. A study on the zinc removal kinetics and mechanism of zinc-bearing dust pellets in direct reduction[J]. Powder Technology，2021，380：273－281.

[9] WANG Xin，PAN Jian，ZHU Deqing，et al. Oxidized pellets production from stainless steel solid wastes：induration characteristics and harmful elements migration behavior[J]. Journal of Materials Research and Technology，2022，19：2516－2525.

[10] WANG Dingzheng，ZHU Deqing，PAN Jian，et al. Integration of preparation of K，Na-embedded activated carbon and reduction of Zn-bearing dusts[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2022，32(3)：627－636.

(下转第 105 页)

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

lets from GF88 hematite concentrate [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(6):61 – 68.

[11] WANG R R,ZHANG J L,LIU Z J,et al. Effects of magnesium olivine on the mineral structure and compressive strength of pellets [J]. Ironmaking & Steelmaking,2020,47(2):100 – 105.

[12] 路明,陈小艳,王兴锋,等. 高硅磁精粉球团矿预热焙烧工艺制度优化研究 [J]. 烧结球团,2022,47(3):59 – 65.
LU Ming,CHEN Xiaoyan,WANG Xingfeng,et al. Research on optimization of preheating roasting process system for high silicon magnetic powder pellet [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(3):59 – 65.

[13] 徐晨阳,张建良,刘征建,等. 有机复合黏结剂特性表征及对球团矿性能的影响 [J]. 钢铁研究学报,2021,33(11):1154 – 1160.
XU Chenyang,ZHANG Jianliang,LIU Zhengjian,et al. Characterization of organic composite binder and its effect on pellet properties [J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(11):1154 – 1160.

[14] 李英魁. 焙烧工艺对球团矿还原性能的影响 [J]. 河北冶金,2017(1):11 – 14.
LI Yingkui. Influence of roasting process on reduction performance of pellets [J]. Hebei Metallurgy,2017(1):11 – 14.

[15] 郭宇峰,刘阔,刘雅婧,等. 铁矿球团还原膨胀机理及影响因素的研究进展 [J]. 钢铁,2021,56(4):9 – 15.
GUO Yufeng,LIU Kuo,LIU Yajing,et al. Research progress on reduction and expansion mechanism and influencing factors of iron ore pellets [J]. Iron & Steel,2021,56(4):9 – 15.

[16] 沈茂森,吕志义,康文革,等. 白云鄂博铁球团矿异常还原膨胀的机理 [J]. 中国冶金,2021,31(3):17 – 21;29.
SHEN Maosen,LÜ Zhiyi,KANG Wenge,et al. Mechanism of abnormal reduction and expansion of baiyan obo iron pellets [J]. China Metallurgy,2021,31(3):17 – 21;29.

(上接第 13 页)

[25] 文霄,刘迎云,关永兵. 湘南某铅锌矿区重金属赋存形态分析 [J]. 安全与环境工程,2013,20(5):42 – 45.
WEN Xiao,LIU Yingyun,GUAN Yongbing. Speciation analysis of heavy metals in a lead-zinc mine in southern Hunan [J]. Safety and Environmental Engineering,2013,20(5):42 – 45.

[26] 孙叶芳,谢正苗,徐建明,等. TCLP 法评价矿区土壤重金属的生态环境风险 [J]. 环境科学,2005,26(3):152 – 156.
SUN Yefang,XIE Zhengmiao,XU Jianming,et al. Assessment of toxicity of heavy metal contaminated soils by toxicity characteristic leaching procedure [J]. Environmental Science,2005,26(3):152 – 156.

(上接第 33 页)

[11] 朱德庆,侯明洲,杨聪聪,等. 复合黏结剂提高含锌尘泥团块干燥热稳定性能研究 [J]. 烧结球团,2022,47(3):73 – 82.
ZHU Deqing,HOU Mingzhou,YANG Congcong,et al. Study on improving thermal stability of Zinc-containing dust and mud mass with composite binder [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(3):73 – 82.

[12] 赵丹丹,吴传文. 适用于转底炉处置含铁、锌粉尘的消解工艺 [J]. 现代冶金,2021,49(1):59 – 61.
ZHAO Dandan,WU Chuanwen. Suitable for rotary hearth furnace disposal of iron,zinc dust digestion process [J]. Modern Metallurgy,2021,49(1):59 – 61.

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