

高强度含锌粉尘内配碳球团制备工艺

李航宇¹, 王定政¹, 朱德庆², 杨金林¹, 马少健³

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004; 2. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083; 3. 河池学院, 广西 河池 546300)

摘要:为提高钢厂含锌粉尘的成球性能,制备出高强度含锌粉尘内配碳球团,本文开发了含锌粉尘预润湿—造球工艺。针对该工艺开展含锌粉尘内配碳球团制备工艺参数优化试验,探究润湿过程中粉尘的温度变化以及润湿对粉尘的化学成分、接触角等物理化学性质的影响,并考察润湿条件、造球水分、造球时间、黏结剂用量对生球和干球抗压强度、爆裂温度的影响。研究结果表明,在最优工艺参数下,制备出的生球落下强度达19.1次/(0.5 m),抗压强度可达78 N/P,爆裂温度为518 ℃,干球的落下强度达19.6次/(1 m),抗压强度为155 N/P。随后在还原温度为1 200 ℃、还原时间为50 min的条件下对该含锌粉尘内配碳干球进行直接还原,最终可制备出铁品位为73.6%、铁金属化率为90.7%、抗压强度为1 164 N/P、残锌质量分数仅为0.07%的还原球团,该含锌粉尘金属化球团可直接作为高炉原料。

关键词:含锌粉尘; 内配碳球团; 球团性能; 参数优化; 直接还原

中图分类号:TF046.6;X757

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)02-0063-09

doi:10.13403/j.sjqt.2025.02.026

Preparation process of carbon-burdened pellets in high-strength zinc-containing dust

LI Hangyu¹, WANG Dingzheng¹, ZHU Deqing², YANG Jinlin¹, MA Shaojian³

(1. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;
2. School of Resources Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
3. Hechi University, Hechi 546300, Guangxi, China)

Abstract: In order to improve the pelletizing performance of zinc-containing dust in steel mills and produce carbon-burdened pellets in high-strength zinc-containing dust, a pre-wetting-pelletizing process for zinc-containing dust is developed. In this paper, the test of the process parameter optimization for the production of carbon-burdened pellets in zinc-containing dust is carried out, the temperature change of dust during wetting and the influence of wetting on the physical and chemical properties of dust including chemical composition and contact angle are explored, and the effects of wetting conditions, pelletizing moisture, pelletizing time and binder dosage on the compressive strength and bursting temperature of fresh pellet and dry bulks are investigated. The results show that under the optimal process parameters, the fresh pellet falls with a falling strength of 19.1 times/(0.5 m), a compressive strength of 78 N/P, a bursting temperature of 518 ℃, and dry pellet falls with a falling strength of 19.6 times/(1 m) and a compressive strength of 155 N/P. Subsequently, under the conditions of reduction temperature of 1,200 ℃ and reduction time of 50 min, the carbon-burdened dry pellets in the zinc-containing dust are directly reduced, and finally the reducing pellets with an iron grade of 73.6%, an iron metallization rate

收稿日期: 2024-06-28; 修回日期: 2024-09-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52304282)

作者简介: 李航宇(2000—),男,硕士研究生,从事矿物资源利用与开发研究。

通信作者: 王定政(1993—),男,博士,讲师,硕士研究生导师,从事转底炉生产工艺优化研究。

of 90.7%, a compressive strength of 1 164 N/P and a residual zinc mass fraction of only 0.07% could be produced, which could be directly used as raw materials for blast furnaces.

Key words: zinc-containing dust; carbon-burdened pellets; pellet performance; parameter optimization; direct reduction

随着钢铁工业的高速发展, 钢铁生产过程中产生的尘泥量也日益增加。根据国家发展与改革委员会发布的钢铁行业运行情况, 我国 2023 年粗钢产量为 101 908 万 t。一般钢铁企业的尘泥产量为粗钢产量的 8%~12%, 而含锌尘泥的产量为粗钢产量的 3%~4%^[1-2]。因此, 我国 2023 年含锌尘泥的产量约为 3 057 万 t~4 076 万 t。钢厂产生的含锌尘泥种类较多, 主要包括烧结尘泥、高炉瓦斯泥、高炉布袋灰、转炉尘泥以及电炉粉尘等^[3]。这些尘泥因富含铅、锌等重金属, 其回收利用难度极大。当前, 这些尘泥的堆存不仅占据大量土地资源, 且在雨水冲刷下, 潜在地威胁着土壤和地下水资源^[4]。同时, 我国锌、铁的资源储量不足, 数据显示, 2023 年中国锌矿储量仅为 4 607.86 万 t, 且铁矿石对外依存度常年居高。因此解决含锌粉尘大量堆存问题并回收其中的锌、铁等有价值金属, 既有巨大的经济效益又有显著的环境效益^[5]。

由于不同粉尘含锌量不完全相同, 所以处理工艺也不同^[6]。目前各钢厂主要采用直接还原技术处理含锌粉尘, 具体包括转底炉工艺和回转窑工艺^[7-9], 为减弱结炉或结窑现象, 一般需对粉尘进行造球或压团。造球是将细粒物料加入适量黏结剂和水后在造球机上通过滚动制成生球, 随后生球经脱水固结后得到干球。当采用回转窑工艺处理含锌粉尘球团时, 由于还原过程球团在窑内不断翻滚运动, 含锌粉尘球团会在还原过程中出现破裂、粉化, 进而发生结窑现象。所以需要制备出高强度的含锌粉尘含碳球团以减小球团在转运及还原过程的粉化率^[10]。含锌粉尘由于铁含

量较低, 比表面高所以其造球过程毛细水迁移速率低, 成球较难, 难以制备出高强度的球团。本文在对粉尘进行润湿预处理以提高其成球性能的基础上, 系统研究了含锌粉尘润湿—造球工艺, 确定适宜的润湿和造球制度及参数, 为后续的含锌粉尘内配碳球团直接还原提供优质原料。

1 原料特性及试验方法

1.1 原料特性

试验原料全部来源于某钢铁公司, 包括 3 种不同类型的含锌粉尘、干熄焦除尘灰(CDQ, 还原剂)以及一种国产膨润土(黏结剂)。含锌粉尘均通过干法除尘技术获取, 分别为转炉除尘灰(HZ)、高炉布袋灰(HB)以及钢厂环境除尘灰(HE)。3 种含锌粉尘主要化学成分如表 1 所示, 物理性能如表 2 所示, 膨润土的主要化学成分如表 3 所示。

由表 1 可知, HB 碳质量分数高达 20.4% 的, 在火法处理含锌粉尘的过程中能够充当还原剂, 这一特性赋予了它极高的回收利用价值。在 3 种含锌粉尘中, HB 锌质量分数高达 7.83%, 而 HE 锌质量分数虽为最低, 却也达到 1.36%。3 种粉尘的铁品位都较高, 其中 HZ 中铁品位达 56.1%。

由表 2 可知, 3 种含锌粉尘的比表面积均大幅超出了常规铁精矿球团生产所需的范围(1 500~1 900 cm²/g)。HE 成球性指数为 0.96 (>0.8), 具有优异的成球性能, HZ 和 HB 成球性指数分别为 0.66 与 0.68, 具有良好的成球性能。

由表 3 可知, 膨润土含有极少量的 Na 元素和 Fe 元素, 不会对润湿试验和还原试验结果造成影响。

表 1 含锌粉尘主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions and losses on ignition of zinc-bearing dusts

粉尘种类	TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	固定碳	Zn	烧损
HZ	56.1	26.6	1.6	0.3	6.2	0	3.16	3.1
HB	24.1	13.3	10.0	1.1	4.8	20.4	7.83	24.4
HE	19.8	14.9	6.2	3.6	23.8	0	1.36	16.6

表 2 含锌粉尘主要物理性能

Table 2 Main physical properties of zinc-bearing dusts

粉尘种类	堆密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	真密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比表面/($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	最大分子水/%	最大毛细水/%	成球性指数
HZ	0.71	2.61	3 329	14.35	36.23	0.66
HB	0.82	2.21	3 215	17.21	42.55	0.68
HE	0.47	2.19	3 869	21.63	44.25	0.96

表 3 膨润土主要化学成分及烧损(质量分数)

Table 3 Main chemical compositions and losses on ignition of bentonite

TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	烧损
3.94	52.56	14.71	9.49	1.82	3.16	1.12	10.62

1.2 试验方法

本次试验流程包括原料准备、润湿预处理、造球、干燥及焙烧还原等多个步骤。首先,按照预定的配料方案,将 3 种含锌粉尘(HZ、HB、HE)与干熄焦除尘灰混合均匀,随后加入适量的水进行润湿预处理。润湿试验在隔热箱中进行,当含锌粉尘在润湿水分达到 100% 且润湿时间为 24 h 后,测定其接触角,并评估润湿处理对粉尘亲水性的影响。在润湿水分为 16% 的条件下,测定不同润湿时间下含锌粉尘的料温和化合水含量增量。接触角的测定遵循参考文献[11]所述方法,而化合水含量的增量则通过测量粉尘经润湿、快速干燥(设定干燥温度为 150 ℃,料层厚度为 1 mm)后的重量变化来确定。

随后,将经过润湿处理的 3 种含锌粉尘(按照 63% HZ + 33% HB + 4% HE 的比例混合)、黏结剂和还原剂混合均匀,置入圆盘造球机进行造球。造球机的主要技术参数:圆盘直径为 1 000 mm、边高为 150 mm、倾角为 47°、圆盘转速为 28 r/min。制备完成的生球经过筛分后,选择直径为 10 ~ 18 mm 的球团进行落下强度、抗压强度和爆裂温度的测试,具体检测方法参照参考文献[12]。接着,将剩余生球放入恒温真空干燥箱中,于 105 ℃ 下干燥至恒重,生球经干燥固结后,其强度会有较大提升。因此,本文采用 1 m 落下强度和抗压强度评价干球的强度性能。

最后,将干燥后的球团放入刚玉坩埚中,马弗炉在升温及整个还原反应过程中保持无氧条件。在马弗炉升温前,坩埚随炉一同升温。待炉温升

至指定温度时,将约 100 g 的干球放入炉内坩埚中进行还原反应。反应结束后,在无氧条件下将坩埚冷却至室温,得到最终的金属化球团。

为观察金属化球团微观形貌,本文采用光学显微镜对还原球团进行微观图片采集,在进行图片采集前,采用环氧树脂将样品镶嵌固定,并采用自动磨片机对其进行磨片、抛光处理直至其表面达到光学显微镜观测所需的平滑度与清晰度。

2 试验结果与分析

2.1 润湿对含锌粉尘物理化学性能的影响

2.1.1 润湿对粉尘中化合水含量的影响

在润湿水分为 14% 的条件下,探究润湿时间对三种含锌粉尘中化合水含量增量的影响,试验结果见图 1。由图 1 可知,润湿时间对 3 种含锌粉尘中化合水含量的增量有显著影响,在润湿初期(5 min 内),3 种含锌粉尘中化合水含量的增长速率都较大。这可能是因为粉尘颗粒在接触水后迅速与水反应,形成化合水。随着润湿时间的增加,化合水含量的增长速率逐渐降低。当润湿时间达到 15 min 时,3 种粉尘中的化合水含量都已趋于

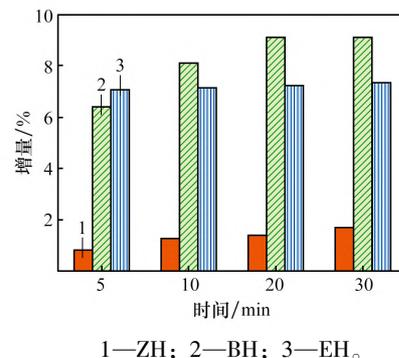


图 1 含锌粉尘中化合水含量增量与润湿时间的关系 (润湿水分为 14%)

Fig. 1 Plots of increment of contents of bound water in zinc-bearing dusts versus wetting time (wetting with 14% moisture)

稳定。这表明在 15 min 后, 粉尘颗粒对水分的吸收达到了饱和状态。在相同的润湿条件下(14% 的润湿水分), HZ、HB 和 HE 粉尘中化合水的最高质量分数分别为 1.7%、7.4% 和 9.1%。这表明不同粉尘对水分的吸收能力和形成的化合水含量存在显著差异, 其中 HE 粉尘中的化合水含量最高。HZ 中的氧化钙含量略高于 HB, 但润湿过程中 HZ 中化合水含量的增量却明显低于 HB。这揭示了 HZ 中的钙元素可能主要以铁酸钙或钙铁橄榄石等化合物的形式存在, 而非以游离氧化钙的形式存在。而这些化合物对水分的吸收能力可能较弱, 因此导致 HZ 中化合水含量的增量较低。

2.1.2 润湿对粉尘物料温度的影响

在含锌粉尘的润湿过程中, 游离氧化钙与水发生反应: $\text{CaO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) = \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$ ^[13], 该反应的焓变和标准吉布斯自由能变与温度的关系见图 2。润湿过程含锌粉尘的温度变化见图 3。由图 2 可知, 该反应的焓变(ΔH^θ)和标准吉布斯自由能变(ΔG^θ)均远低于零, 因此在含锌粉尘加水润湿的过程中, 物料温度会有所升高。此外, 由图 3 可知, 当润湿水分为 14% 时, HZ、HB 和 HE 3 种含锌粉尘的料温最高分别能达到 42、72、98 °C, 且 HB 中游离氧化钙的消解速率明显高于 HZ 和 HE。润湿时间达到 30 min 后, 3 种含锌粉尘的料温仍能维持在 42 °C 以上, 这意味着在后续的造球过程中, 粉尘仍保持着较高的料温。因此, 含锌粉尘的成球过程与球团干燥固结过程可以同时进行, 且较高的料温有助于生球强度的提高和爆裂温度的上升, 从而改善生球的整体性能。

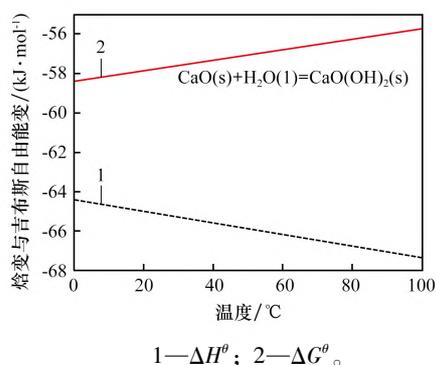
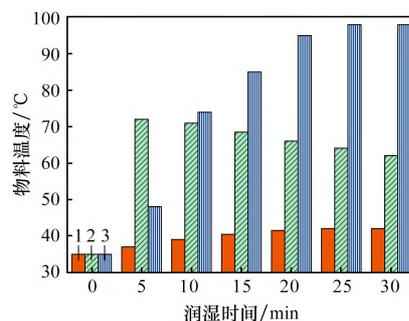


图 2 化学反应 ΔH^θ 、 ΔG^θ 与温度的关系

Fig. 2 Correlation of ΔG^θ and ΔH^θ with temperature



1—HZ; 2—HB; 3—HE。

图 3 润湿过程含锌粉尘的温度变化(润湿水分为 14%)

Fig. 3 Variation of temperature of zinc-bearing dusts in the wetting process(wetting with 14% moisture)

2.1.3 润湿对粉尘亲水性的影响

物料的亲水性是评价其与水相互作用能力的重要指标, 通常通过接触角来衡量。接触角越小, 表示物料表面被水润湿的能力越强, 即亲水性越好^[14]。为探究含锌粉尘在润湿前后亲水性的变化, 采用 Washburn 动态法来测定 3 种含锌粉尘在充分润湿前后的相对润湿接触角, 测定结果如表 4 所示。

表 4 3 种含锌粉尘润湿前后接触角

Table 4 Contact angles before and after wetting of three types of zinc-containing dusts (°)

粉尘种类	润湿前接触角	润湿后接触角
HZ	62.03	53.61
HB	50.76	43.49
HE	58.40	49.70

由表 4 可知, 3 种含锌粉尘在润湿后接触角均显著减小。经过润湿处理, 粉尘的亲水性得到了改善, 颗粒表面被水润湿的能力得到增强。在成球过程中, 颗粒间的毛细力将因表面润湿性的提高而增加, 有助于颗粒间的紧密结合, 从而提高成球后所得生球的强度。因此, 含锌粉尘在润湿后, 其亲水性得到了改善, 颗粒间的毛细力增加, 这将有利于提升成球后生球的强度。此结果对于优化含锌粉尘的成球工艺和提高生球质量具有重要意义。

2.1.4 润湿对含锌粉尘球团性能的影响

为确定最佳润湿时间, 在造球时间为 14 min、造球水分为 13.6%、膨润土用量为 1.5%、CDQ 粉用量为 10%、润湿水分为 14% 条件下, 探究随

润湿时间延长含锌粉尘生球及干球性能的变化,试验结果如图4所示。

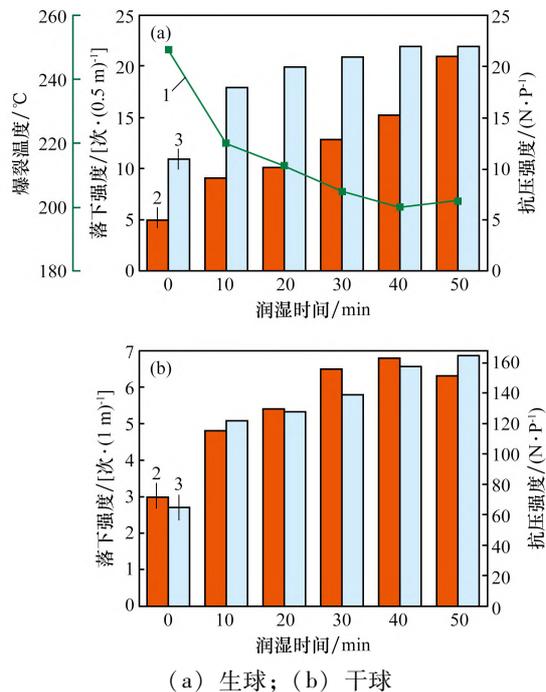


图4 润湿时间对含锌粉尘生球及干球性能的影响

Fig. 4 Effects of wetting time on the properties of green pellets and dry pellets

从图4的数据分析可知,含锌粉尘生球及干球的落下强度和抗压强度均随润湿时间的增长而呈现显著增大的趋势,特别是在0~10 min的润湿时间区间内,其增幅尤为显著。具体来说,当润湿时间从0 min延长至10 min时,生球的落下强度由5.0次/(0.5 m)提升至9.1次/(0.5 m),抗压强度则由11 N/P增加至18 N/P;而对于干球,其落下强度从3.0次/(1 m)提升至4.9次/(1 m),抗压强度则从65 N/P增加到122 N/P。经过润湿预处理后,含锌粉尘颗粒表面的亲水性得到改善,使得造球过程中颗粒间的毛细力增强,进而促进

了球团结构的紧密化^[14-16]。

然而,随着润湿时间的进一步增长,虽然球团的强度仍在增加,但生球的孔隙率会逐渐降低。这可能导致在干燥过程中球团内部的水蒸气难以有效迁移至球团外部,使得球团内部蒸气压过高,从而降低生球的爆裂温度。因此,综合考虑生球和干球的强度以及爆裂温度,确定含锌粉尘生球和干球最适宜的润湿时间为10 min。

在确定含锌粉尘生球和干球最适宜的润湿时间为10 min后,继续考察润湿水分对含锌粉尘生球及干球性能的影响,结果如表5所示。

由表5可知,当润湿时间为10 min时,降低润湿水分会使生球和干球的抗压强度和落下强度略微降低,但能有效提高生球的爆裂温度。润湿水分过高时,会使得生球层间水分分布不均匀,进而影响球团的各项性能。因此,球团较优的润湿水分为10%。

2.2 含锌粉尘含碳球团制备工艺参数对球团性能的影响

在润湿时间为10 min,润湿水分为10%的条件下,将含锌粉尘混合料进行润湿预处理,并将其与还原剂和膨润土混匀后进行造球,通过调整膨润土用量、造球水分、造球时间和CDQ粉添加量,探究对生球及干球性能的影响。

2.2.1 膨润土用量对生球和干球性能的影响

当造球水分为13.5%,造球时间为16 min,CDQ用量为10%,黏结剂为膨润土,膨润土用量对含锌粉尘生球和干球性能的影响如图5所示。由图5可知,当不添加任何黏结剂时,含锌粉尘生球和干球已具备合格的强度。生球的落下强度为9.2次/(0.5 m),抗压强度为26 N/P,爆裂温度为478℃,干球的落下强度为10.5次/(1 m),

表5 润湿水分对含锌粉尘生球及干球性能的影响

Table 5 Effects of wetting moisture on the properties of zinc-bearing dusts green and dry pellets

润湿水分 (质量分数)/%	生球性能			干球性能	
	落下强度/ [次·(0.5 m) ⁻¹]	抗压强度/ (N·P ⁻¹)	爆裂强度/℃	落下强度/ [次·(1 m) ⁻¹]	抗压强度/ (N·P ⁻¹)
10	7.8	15	350	4.6	118
12	8.1	15	290	4.7	121
14	9.1	18	220	4.9	122

抗压强度为 103 N/P; 当膨润土用量增加至 1% 时, 生球和干球的性能得到显著提升。生球的落下强度增加至 19.1 次/(0.5 m), 抗压强度达到 78 N/P, 爆裂温度提升至 518 °C, 干球的落下强度提升至 19.6 次/(1 m), 抗压强度为 155 N/P。这些结果表明, 使用适量的膨润土作为黏结剂能够显著提高生球和干球的强度性能。然而, 继续增加膨润土用量, 生球和干球各项性能的提升幅度开始明显下降。过高的膨润土用量不仅不能进一步提升球团的性能, 反而会增加球团的硅含量, 降低球团的铁品位^[17]。因此, 综合考虑生球和干球的性能以及球团的铁品位, 确定适宜的膨润土用量为 1%。

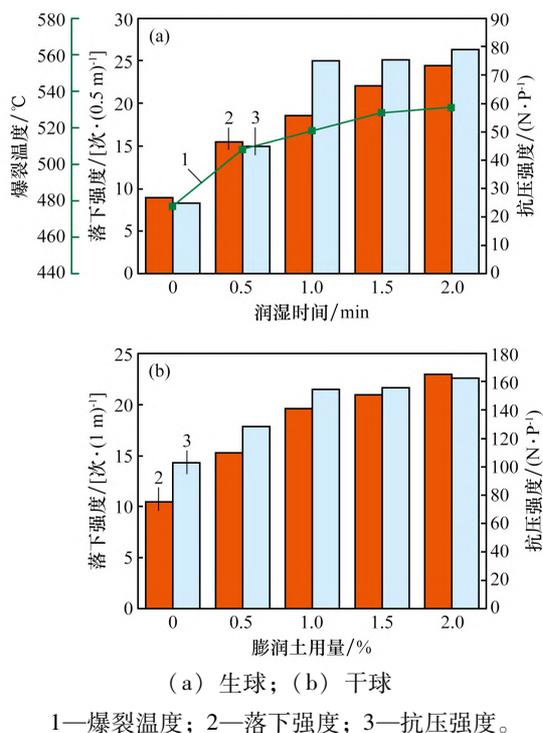
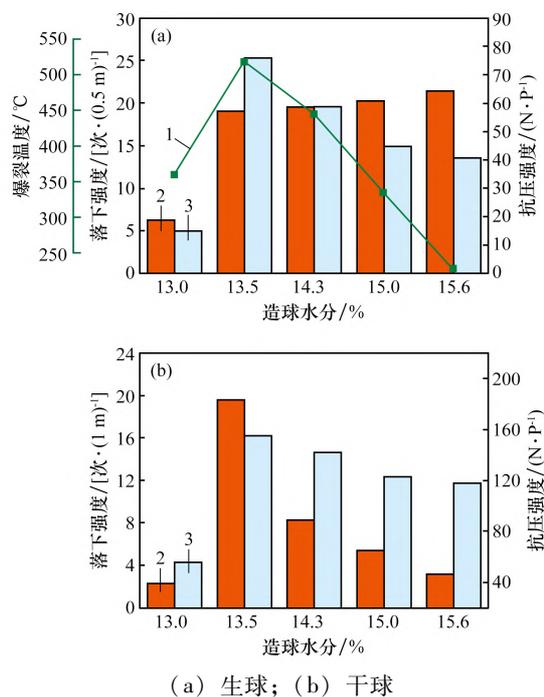


图5 膨润土用量对含锌粉尘生球及干球性能的影响
Fig. 5 Effects of bentonite dosage on the properties of zinc-bearing dusts green pellets and zinc-bearing dusts dry pellets

2.2.2 造球水分对生球和干球性能的影响

在润湿水分为 10%、润湿时间为 10 min、膨润土用量为 1%、造球时间为 16 min、CDQ 用量为 10% 的条件下考察造球水分对含锌粉尘生球与干球性能的影响, 结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 当造球水分低于 13.5% 时, 生球和干球的结构不够紧密, 导致它们的落下强度



(a) 生球; (b) 干球
1—爆裂温度; 2—落下强度; 3—抗压强度。

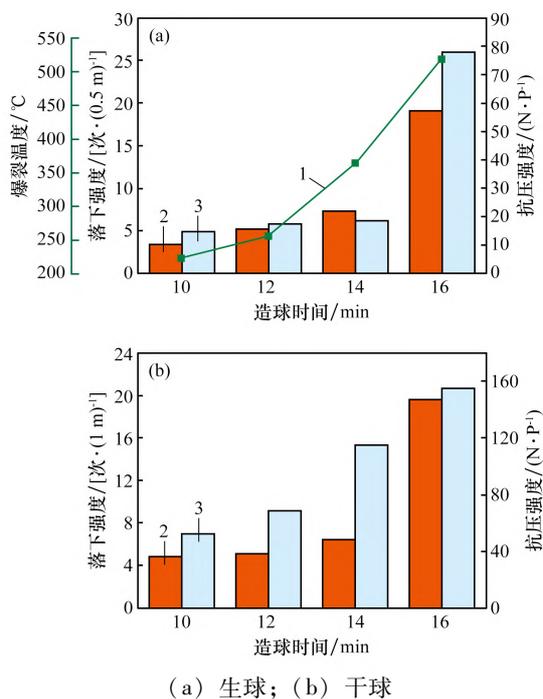
图6 造球水分对生球及干球性能的影响

Fig. 6 Effect of moisture on the properties of zinc-bearing dusts green pellets and zinc-bearing dusts dry pellets

和抗压强度都过低。较低的水分含量限制了生球内部毛细水的含量, 进而影响了生球的可塑性。随着造球水分的适当增加, 生球内的毛细水含量也相应增加, 生球的可塑性增强^[18]。当造球水分达到 13.5% 时, 生球和干球的性能达到一个较优的水平, 显示出良好的落下强度、抗压强度和爆裂温度。然而, 当造球水分高于 13.5% 时, 虽然生球的落下强度会进一步增大, 但其抗压强度和爆裂温度却开始降低。这主要是因为过高的生球水分会导致在脱水干燥过程中球团内部蒸汽压变大, 球团受到水蒸气的冲击作用增强, 从而降低了生球的爆裂温度。尤其是, 当造球水分高于 15.6% 时, 造球过程中会出现严重的黏盘现象, 这不仅影响生产效率, 而且此时生球的爆裂温度过低, 无法满足生产要求。综上所述, 确定适宜的造球水分为 13.5%。

2.2.3 造球时间对生球和干球性能的影响

在膨润土用量为 1%, 造球水分为 13.5%, CDQ 用量为 10% 条件下。不同造球时间对生球与干球性能的影响如图 7 所示。



1—爆裂温度; 2—落下强度; 3—抗压强度。

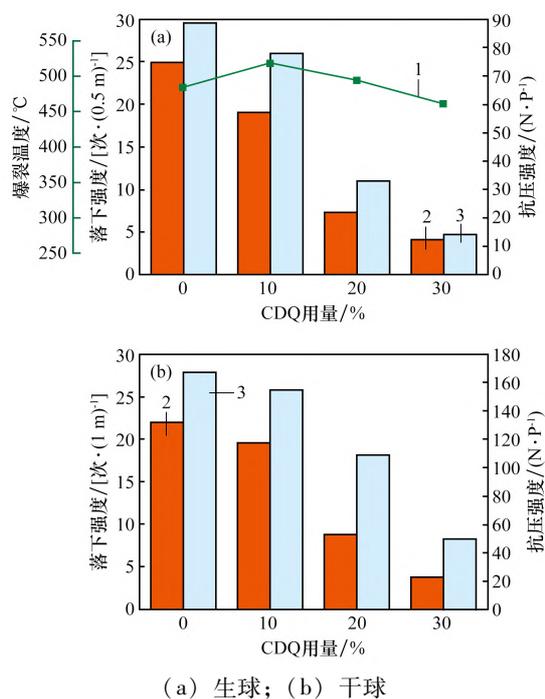
图7 造球时间对生球及干球性能的影响

Fig. 7 Effect of pelletizing time on the properties of zinc-bearing dusts green pellets and zinc-bearing dusts dry pellets

由图7可知,造球时间对含锌粉尘生球与干球性能具有显著影响。随着造球时间的延长,生球在圆盘内滚动过程中产生的机械力有助于球团内部颗粒的紧密排列,使球团结构更加致密,从而提高了球团的强度。随着造球时间的增加,生球和干球的各项性能均不断提高。生球的结构稳定性增强,使其能够更有效地抵抗水蒸气冲击,进而提高了爆裂温度。当造球时间延长至16 min时,生球和干球的落下强度和抗压强度均达到较高水平,生球的爆裂温度也提高至518 °C,显示出优异的性能。继续延长造球时间虽然可能会进一步提高球团的性能,但也会增加能耗并降低生产效率。因此,在综合考虑性能、能耗和生产效率的基础上,确定适宜的造球时间为16 min。

2.2.4 还原剂添加量对生球和干球性能的影响

在进行高炉冶炼时,含锌粉尘球团需要配碳以提高粉尘中有害元素的脱除效率。在已经确定膨润土用量为1%,造球水分为13.5%,造球时间为16 min的条件下,探究了CDQ添加量对生球与干球性能的影响,试验结果如图8所示。



1—爆裂温度; 2—落下强度; 3—抗压强度。

图8 CDQ用量对生球及干球性能的影响

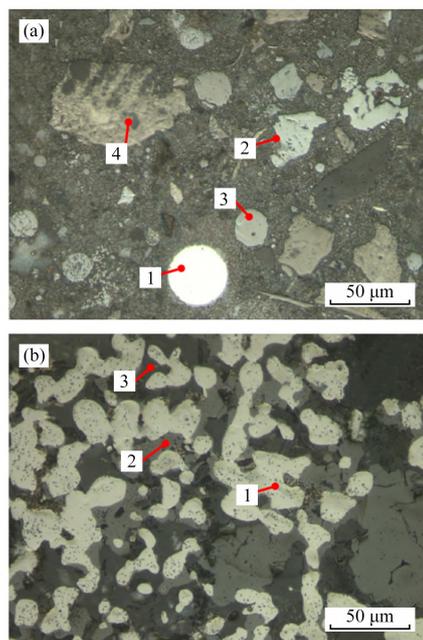
Fig. 8 Effect of CDQ dosage on the properties of zinc-bearing dusts green pellets and zinc-bearing dusts dry pellets

由图8可知,CDQ添加量的变化对生球和干球性能有显著影响。由于CDQ的主要成分为石墨颗粒,且粒度较粗,随着CDQ含量的增加,生球和干球的强度逐渐降低。这是因为较粗的颗粒在球团内部形成了较弱的结合点,降低了球团的整体强度。适量的CDQ添加量能略微提高生球的爆裂温度,改善球团内部的孔隙结构,提高了生球在受热过程中的稳定性,从而提高了爆裂温度。尽管CDQ的添加会降低生球和干球的强度,但在一定范围内,生球及干球仍能维持较高的强度。这意味着在实际生产中,可以通过调整CDQ的添加量来平衡有害元素脱除效率和球团强度之间的关系。综上所述,确定适宜的CDQ添加量为10%。

3 含锌粉尘含碳干球还原试验

在确定了最优工艺参数(润湿水分为10%、润湿时间为10 min、膨润土用量为1%、造球时间为16 min、造球水分为13.5%、CDQ用量为10%)后,进行含锌粉尘内配碳球团的制备,并采用直接还原工艺对含锌粉尘内配碳球团进行还原。

在还原过程中,选择 1 200 ℃ 的还原温度和 50 min 的还原时间可得到高质量的还原球团,其铁品位、金属化率、残锌质量分数分别为 73.6%、90.7%、0.07%。表明球团中的铁氧化物已大部分被还原为金属铁,且大部分锌已被还原脱除。此外,该还原球团的抗压强度为 1 164 N/P,可满足高炉炼铁的需要。含锌粉尘干球和还原后球团的光学显微镜图像如图 9 所示。



(a) 干球; (b) 还原球团

1—Fe; 2— Fe_2O_3 ; 3— Fe_3O_4 ; 4— MgFe_2O_4 ;
5— $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 。

图 9 含锌粉尘干球与还原球团光学显微结构

Fig. 9 Optical micrograph of zinc-bearing dusts dry pellets and reduced pellets

由图 9 可知,干球的结构相对紧密,孔洞较少,铁元素主要存在于 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 MgFe_2O_4 和 Fe 中。其中 Fe_3O_4 、 MgFe_2O_4 和部分 Fe_2O_3 以集合体的形式存在,粒度大小介于 20 ~ 50 μm 之间。

当干球经过还原后得到还原球团。在这个过程中,金属铁晶粒不断生长长大,其粒度甚至可达 50 μm 。这些铁晶粒之间以及与脉石相之间的连结更为紧密,表明还原过程不仅改变了化学成分,还增强了球团的结构稳定性。

此外,还原球团中的大部分含铁、锌、铅氧化物已经被成功还原,但仍有少量 MgFe_2O_4 和 $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 等化合物存在。这是因为 MgFe_2O_4 和

$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 在 1 200 ℃ 的条件下,难以被固体碳或一氧化碳还原,因此它们在还原球团中得以保留。通过对含锌粉尘的干球进行还原处理,可以得到铁品位高、结构稳定的还原球团,可为后续的冶炼过程提供优质原料。

4 结论

(1) 含锌粉尘经过润湿后接触角会减小,粉尘的亲水性得到了改善,有助于在后续的造球过程中形成更紧密、更稳定的球团。在 14% 的润湿水分下润湿 10 min 后,生球和干球的强度均得到显著提升。

(2) 在润湿水分质量分数为 10%、润湿时间为 10 min、膨润土质量分数为 1%、造球时间为 16 min、造球水分质量分数为 13.5%、CDQ 质量分数为 10% 的最佳润湿及造球条件下,制备出的生球和干球均表现出优异的性能。在还原温度为 1 200 ℃、还原时间为 50 min 的条件下,对该条件下制备的干球进行还原,最终可得到铁品位为 73.6%、金属化率为 90.7%、残锌质量分数为 0.07%、抗压强度为 1 164 N/P 的优质还原球团。

参考文献:

- [1] 毛瑞,张建良,刘征建,等. 钢铁流程含铁尘泥特性及其资源化[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(3):774-785.
MAO Rui, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Characteristic and resource utilization technique of dust and sludge containing iron from steel production process [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(3): 774-785.
- [2] 张念,冯君从. 未来十年我国精锌资源需求预测[J]. 市场经济与价格,2016(4):57-58.
ZHANG Nian, FENG Juncong. Forecast of China's refined zinc resource demand in the next decade [J]. Market Economics and Prices, 2016(4): 57-58.
- [3] 张玉柱,寇鑫林,田铁磊,等. 钢铁尘泥脱锌工艺的研究进展与展望[J]. 钢铁,2023,58(6):1-11.
ZHANG Yuzhu, KOU Xinlin, TIAN Tielei, et al. Research progress and prospect of dezincing process of iron and steel dust and mud [J]. Iron & Steel, 2023, 58(6): 1-11.

- [4] 杨冬伟,郭键柄,张琪,等. 钢铁厂含锌粉尘的危害与处理技术[J]. 甘肃冶金,2017,39(4):82-85.
YANG Dongwei, GUO Jianbing, ZHANG Qi, et al. Harm and treatment technology of zinc dust in iron and steel plant[J]. Gansu Metallurgy, 2017, 39(4): 82-85.
- [5] 彭开玉,周云,李辽沙,等. 冶金含锌尘泥资源化的现状与展望[J]. 中国资源综合利用,2005,23(6):8-12.
PENG Kaiyu, ZHOU Yun, LI Liaosha, et al. The present situation and development of comprehensive utilization of zinc-borne dust in steel and iron plants [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2005, 23(6): 8-12.
- [6] 时越,金永龙,李宝成. 钢铁含锌固废处置工艺[J]. 河北冶金,2019(S1):77-79.
SHI Yue, JIN Yonglong, LI Baocheng. Disposal technology of zinc-containing solid waste of iron and steel [J]. Hebei Metallurgy, 2019(S1): 77-79.
- [7] 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.
- [8] 张鲁芳. 我国转底炉处理钢铁厂含锌粉尘技术研究[J]. 烧结球团,2012,37(3):57-60.
ZHANG Lufang. Study on treatment of Zn-containing dust of iron and steel plants by rotary hearth furnace process in China [J]. Sintering and Pelletizing, 2012, 37(3): 57-60.
- [9] 李生忠. 钢铁厂含锌尘泥处理直接还原转底炉的设计与应用[J]. 工业炉,2015,37(1):24-28.
LI Shengzhong. Design and application of direct reduction rotary hearth furnace for treatment of zinc-bearing dust in iron and steel plant[J]. Industrial Furnace, 2015, 37(1): 24-28.
- [10] 郑锡瀚,陈铁军,万军营,等. 中国转底炉处理含锌尘泥生产中含碳球团粉化原因解析[J]. 钢铁研究学报,2024,36(5):560-567.
ZHENG Xihan, CHEN Tiejun, WANJunying, et al. An investigation into causes of degradation of carbon-containing pellet in production of zinc-containing dust sludge treated in rotary hearth furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(5): 560-567.
- [11] 储鸿,崔正刚. 粉体接触角的测定方法[J]. 化工时刊,2004,18(10):44-47.
CHU Hong, CUI Zhenggang. Determination to the contact angle of the small particles[J]. Chemical Industry Times, 2004, 18(10): 44-47.
- [12] 何国强. 难处理赤铁精矿制备氧化球团的基础及技术研究[D]. 长沙:中南大学,2011.
HE Guoqiang. Fundamental and technological investigation on production of oxide pellets from refractory hematite concentrates [D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [13] LANDERS J, GOR G Y, NEIMARK A V. Density functional theory methods for characterization of porous materials[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 437: 3-32.
- [14] NATH G, RAY B. Effect of the angle of wedge-shaped hydrophilic patterns on drop evaporation and contact line behaviour: A lattice Boltzmann study [J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 48: 104235.
- [15] QIU G Z, JIANG T, FA K Q, et al. Interfacial characterizations of iron ore concentrates affected by binders[J]. Powder Technology, 2004, 139(1): 1-6.
- [16] 侯恩俭,朱德俊. 配加粉尘对铁精矿生球爆裂温度的影响规律[J]. 烧结球团,2019,44(3):34-38.
HOU Enjian, ZHU Dejun. Law of influence of dust addition on decrepitation temperature of iron ore concentrate green balls [J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(3): 34-38.
- [17] FORSMO S P E, FORSMO S E, SAMSKOG P O, et al. Mechanisms in oxidation and sintering of magnetite iron ore green pellets[J]. Powder Technology, 2008, 183(2): 247-259.
- [18] FORSMO S P E, APELQVIST A J, BJÖRKMAN B M T, et al. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder[J]. Powder Technology, 2006, 169(3): 147-158.