

铜渣含碳球团制备及还原焙烧试验

李 勇, 郭秀键, 马 丁, 罗 磊, 罗宝龙

(重庆赛迪热工环保工程技术有限公司, 重庆 401122)

摘要: 煤基直接还原工艺是铜渣处理利用的主要发展方向之一。本文在对铜渣基础特性进行分析的基础上,开展了铜渣含碳球团的制备和焙烧还原试验,通过单因素试验优化了生球成球性能,以正交试验分析焙烧还原过程的主要影响因素及规律,并确定最佳焙烧工艺参数。结果表明:铜渣含有较高的Fe以及Zn、Cu等有价元素,回收价值较高;铜渣压球使用复合黏结剂,生球强度指标更高;焙烧温度对金属化率和脱锌率的影响最为显著。确定的最佳工艺参数:铜渣压球采用复合黏结剂(6%有机黏结剂+2%无机黏结剂),生球烘干温度为160℃,烘干时间为80min,配碳量 $[w(C)/w(O)] = 1.1$,焙烧温度为1225℃,焙烧时间为40min,此时铜渣含碳球团生球落下强度为6.9次/(0.5m),抗压强度约为70.7N/P,烘干后球团水分 $< 1.5\%$,焙烧球团强度为599.4N/P,金属化率为75.2%,脱锌率为93.8%。

关键词: 铜渣; 煤基直接还原; 含碳球团; 球团制备; 焙烧还原; 正交试验

中图分类号: TF046.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)05-0053-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.05.078

Test on preparation and roasting reduction of carbon-containing pellet with copper slag

LI Yong, GUO Xiujian, MA Ding, LUO Lei, LUO Baolong

(Chongqing CISDI Thermal & Environmental Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: Coal-based direct reduction technology is one of the main development directions of copper slag treatment and utilization. Based on the analysis on the basic characteristics of copper slag, a test on preparation and roasting reduction of carbon-containing pellet with copper slag is carried out, the pelletizing performance of fresh pellet is optimized by single factor test, the main influencing factors and laws of the roasting reduction process are analyzed by orthogonal tests, and the optimal roasting process parameters are determined. The results show that the copper slag contains high Fe, Zn, Cu and other valuable elements with high recovery value. The pressured pellet with copper slag uses composite binder, and the strength index of the fresh pellet is higher. The roasting temperature has the most significant effect on the metallization rate and dezincification rate. The optimal process parameters are determined: the pressured pellet with copper slag is made of composite binder (6% organic binder + 2% inorganic binder), the drying temperature of the fresh pellet is 160℃, the drying time is 80min, the carbon content $[w(C)/w(O)] = 1.1$, the roasting temperature is 1225℃, and the roasting time is 40min. At this time, the pellet falls with a falling intensity of 6.9 times/(0.5m) of carbon-containing pellet with copper slag, the compressive strength is about 70.7 N/P, the moisture of the pellet after drying is $< 1.5\%$, the strength of the roasted pellet is 599.4 N/P, the metallization rate is 75.2%, and the dezincification rate is 93.8%.

Key words: copper slag; coal-based direct reduction; carbon-containing pellet; pellet preparation; roasting reduction; orthogonal test

收稿日期: 2025-02-18; 修回日期: 2025-03-17

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展项目(CSTB2024TIAD-KPX0070)

作者简介: 李 勇(1987—),男,高级工程师,从事冶金含铁固废处理技术方面的工作。

铜渣是指火法炼铜过程中产生的炉渣。不同的铜冶炼工艺,铜渣的成分差异较大,其中 Fe 元素是第一高含量, $w(\text{FeO})$ 范围在 33%~65%, $w(\text{Fe}_3\text{O}_4)$ 介于 3%~29%, $w(\text{CuO})$ 从 0.33% 至 2.9% 不等^[1-4]。铜渣的主要特点:铁含量较高, $w(\text{TFe})$ 为 29%~44%, 远高于 29.1% 的铁矿石平均工业品位,此外还含有 Cu、Zn、Pb 等有价金属。因此,铜渣具有较可观的回收利用价值^[3-5]。然而,当前对于铜渣中的铁利用率却不足 1%^[6]。大部分铜渣被堆存在渣场,不仅占用土地、污染环境,而且造成资源的巨大浪费。因此,开发铜渣处理利用工艺,有效回收铜渣中的铁等有价元素,实现铜渣的资源化综合利用,是当前铜冶炼行业可持续发展的重要途径之一^[6-8]。

当前,铜渣处理利用工艺主要有:①磁选法:将铜渣直接磨矿,使强磁性矿物解离,然后磁选回收铁。但是,由于铜渣中的铁主要赋存形式是弱磁性矿物铁橄榄石,加之铜铁硅矿物紧密共生、细粒嵌布不均匀,因此,磁选效果不好,产品铁品位和回收率不高^[9-11]。高温氧化法:将铜渣高温熔融改性,在氧化性气氛中使铁硅酸盐相中的铁组分富集到磁铁矿相中,然后磁选回收铁。此法可有效解决铁橄榄石弱磁性而磁选效果不理想等问题,实现铁的选择性富集与分离,但实现温度较高,处理成本相对较高^[12-16]。②还原法:又可细分为气基、煤基两大类。直接还原是以气体还原剂对铜渣进行还原,还原后的产物为金属 Fe 和玻璃态 SiO_2 。该工艺生产成本高,不适于大规模工业生产^[17-18]。煤基直接还原是以煤等还原剂,使铜渣球团在高温条件下直接还原,铜渣中的铁橄榄石及磁铁矿转变成金属铁,金属铁颗粒与渣相呈现物理镶嵌关系,易于通过磨矿实现金属铁的解离,从而可通过磁选回收金属铁^[19-22]。

我国能源结构“多煤少油缺气”,煤炭资源丰富,因此,煤基直接还原法应成为铜渣处理利用工艺的重点研究方向。煤基直接还原工艺的典型工业化代表是转底炉、回转窑等。回转窑工艺成熟、运行简单、投资少,但存在结圈问题,作业率相对较低;转底炉工艺成熟,金属化率和脱锌率较高,原料适应性广,产品指标稳定,但热效

率有待提高^[23-27]。综上,煤基直接还原工艺是铜渣处理技术的未来主要发展方向之一。

本文结合典型的转底炉煤基直接还原工艺路线特点,对铜渣基础特性进行研究,开展铜渣含碳球团制备试验,通过单因素试验重点考察球团制备过程中的主要影响因素及作用规律,并在密闭弱氧化性气氛下开展焙烧还原试验,通过正交分析确定最佳焙烧还原条件,以期为铜渣直接还原处理工艺路线制定和工业化方案设计提供指导。

1 试验原料及方法

1.1 原料特性

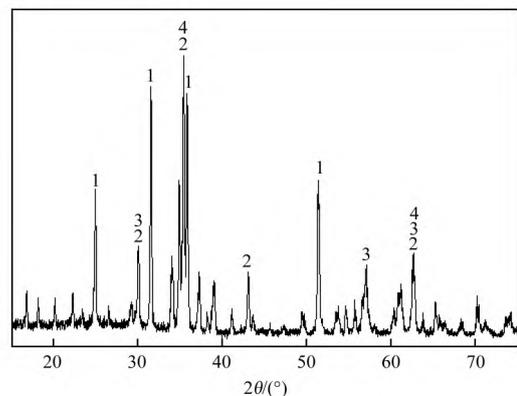
试验用铜渣来自国内某闪速熔炼铜企业,主要成分如表 1 所示。由表 1 可知,铜渣 $w(\text{TFe})$ 为 40.1%,与国内贫铁矿品位相当,但基本以 FeO 形态存在,其次含有较多的 SiO_2 、Zn,此外还有少量的 Cu、K、Na、Pb 等元素。采用 XRD 对铜渣进行物相组成分析,结果如图 1 所示。

表 1 铜渣主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of copper slag %

TFe	FeO	SiO_2	Zn	Cu	Pb	K_2O	Na_2O
40.1	42.0	31.4	1.9	0.3	0.5	1.2	0.4

由图 1 可知,铜渣中 Fe 的主要物相为铁橄榄石($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$)和磁铁矿(Fe_3O_4),Zn 的主要赋存形态为铁酸锌($\text{ZnO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$),Si 的主要形态是与 Fe 结合生成铁橄榄石。



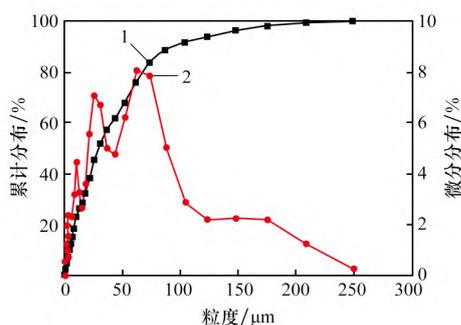
1— Fe_2SiO_4 ; 2— Fe_3O_4 ; 3— ZnFe_2O_4 ;
4— $\text{Zn}(\text{Al}_{0.5}\text{Fe}_{1.5})\text{O}_4$ 。

图 1 铜渣的 XRD 分析结果

Fig. 1 XRD analysis result of copper slag

图 2 是采用激光粒度分析方法确定的铜渣粒

度分布组成, 其中 $< 74 \mu\text{m}$ 的粒度质量分数为 83.85%。



1—累计分布; 2—微分分布。

图 2 铜渣的粒度分布

Fig. 2 Particle size distribution of copper slag

1.2 试验方法

试验流程包括配料、混合、压球、烘干和焙烧等环节(图 3)。首先将铜渣、煤粉、黏结剂等原料按预定比例进行配料, 每批次配料量为 3 kg, 加水 360 g, 并在混合机中搅拌混匀 5 min, 然后将混合料送至压球机挤压成球, 筛选出尺寸合格球团(32 mm × 25 mm × 18 mm), 按设定试验条件烘干生球, 再将烘干后的球团进行还原焙烧, 将焙烧后的球团移至通有氮气的密闭炉管中冷却至室温。

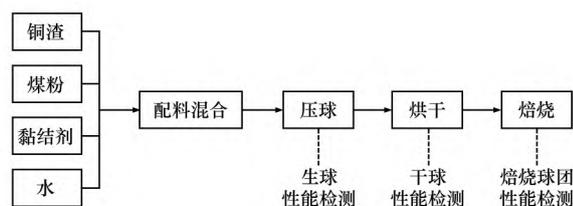


图 3 试验流程

Fig. 3 Experimental procedure

试验压球设备采用对辊压球机, 生球烘干采用鼓风机干燥箱, 球团还原焙烧采用高温电阻炉, 用电加热 PID 控制实现炉内恒温, 炉膛密闭并设进出气孔, 可调控炉膛气氛。

含碳球团制备过程考察指标包括球团落下强度、抗压强度、烘干残留水分等, 根据铁精矿和冶金粉尘含碳球团制备试验的相关研究^[28-30], 球团性能的主要影响因素有黏结剂的种类及添加量、混合料的配碳量、成球压力等, 球团烘干强度主要和烘干温度和时间密切相关, 因此, 铜渣含碳球团制备试验将重点围绕黏结剂、配碳量、成球压力、烘干温度与时间等因素开展, 以期获取合

理的工艺参数。

生球、干球性能检测包括对烘干前含湿球团(生球)和烘干后球团(干球)的落下强度和抗压强度的测试。焙烧球团性能检测内容包括抗压强度测试、Fe 和 Zn 等元素成分分析等。强度测试值为 10 个球团试样的测定平均值。

2 含碳球团制备试验

2.1 黏结剂对球团质量的影响

用于含碳球团成球的黏结剂, 可分为无机类和有机类。无机黏结剂价格便宜, 但会带入非铁原料而降低产品品位, 添加量不宜过多。有机黏结剂价格高, 但具有低温成球强度好、高温易挥发等特点, 通常是含碳球团成球首选^[28-30]。

原料铜渣和煤粉质量配比为 1:0.3, 以不同黏结剂进行压球试验, 结果见表 2。

表 2 不同黏结剂对球团强度的影响

Table 2 Influence of different binders on pellets performance

编号	黏结剂配比 (质量分数) /%		落下强度/ [次·(0.5 m) ⁻¹]		抗压强度/ (N·P ⁻¹)	
	有机	无机	生球	干球	生球	干球
Q1	3.0	—	2.1	2.7	59.6	128.1
Q2	4.5	—	3.3	4.7	71.7	147.0
Q3	6.0	—	3.8	6.4	63.8	201.1
Q4	—	3	1.8	1.7	26.1	29.9

参考铁矿球团工程设计规范及类似球团工程实践对成球质量的要求, 合格生球和干球的落下强度应 > 5 次/(0.5 m), 生球抗压强度 > 40 N/P, 干球抗压强度 > 150 N/P。由表 3 可知: 有机黏结剂的成球效果优于无机黏结剂, 但总体而言, 使用单一的有机或无机黏结剂的成球效果均不太理想, 不满足后续工艺需要。因此, 铜渣压球不宜使用单一的有机或无机黏结剂。因此, 进一步探讨复合黏结剂压球试验, 结果见表 3。

将表 3 中的 Q5、Q6、Q7 试验组与表 2 中的 Q3 比较可发现, 相较于使用单一有机黏结剂, 当无机黏结剂的用量由 1% 增加到 3% 时, 生球和干球的强度均明显提高。Q6、Q8 和 Q9 的对比表明, 当无机黏结剂用量不变时, 减少有机黏结剂的用量, 球团的强度急剧降低, 说明有机黏结剂的主

要作用不可或缺, 其与无机黏结剂须合理配比才能达到理想效果。Q7 的生球和干球团强度稍好于 Q6, 但无机黏结剂用量偏高, 不利于最终产品品位, 因此, 综合考虑生产对球团强度和产品品位的要求, 建议采用 Q6 组方案: 即有机黏结剂用量为 6%, 无机黏结剂用量为 2%, 此时生球落下强度可达约 6.9/次·(0.5 m), 生球抗压强度约 70.7 N/P, 烘干后干球落下强度约 11.2/次(0.5 m), 抗压强度约 204.3 N/P, 满足后续工序要求。

表 3 复合黏结剂对球团强度的影响

Table 3 Influence of composite binders on pellets performance

编号	黏结剂配比 (质量分数) /%		落下强度 / [次·(0.5 m) ⁻¹]		抗压强度 / (N·P ⁻¹)	
	有机	无机	生球	干球	生球	干球
	Q5	6.0	1	4.3	6.8	41.4
Q6	6.0	2	6.9	11.2	70.7	204.3
Q7	6.0	3	11.8	13.2	86.0	285.5
Q8	3.0	2	2.8	2.5	37.8	78.5
Q9	4.5	2	3.8	5.1	67.8	108.7

2.2 配碳量对球团强度的影响

配碳量以 $w(C)/w(O)$ 比值表征, 其中 $w(C)$ 为煤粉中的固定碳质量分数, 试验用煤粉的固定碳为 59.56%, $w(O)$ 为铜渣原料中 Fe、Pb、Zn 三种金属氧化物的氧元素质量分数, 试验检测结果如表 4 所示。

表 4 配碳量对球团性能的影响

Table 4 The effect of carbon content on pellets performance

编号	$w(C)/w(O)$	落下强度 / [次·(0.5 m) ⁻¹]		抗压强度 / (N·P ⁻¹)	
		生球	干球	生球	干球
		C1	1.1	6.4	7.4
C2	1.2	5.2	6.7	62.6	233.7
C3	1.3	6.8	11.4	54.3	241.0

由表 4 可知, 含碳球团中配碳量变化时, 含碳球团的强度指标变化不大。在不同 $[w(C)/w(O)]$ 工况下, 生球落下强度均大于 5 次/(0.5 m), 干球落下强度基本都大于 7 次/(0.5 m), 抗压强度 > 230 N/P, 可满足后续工艺要求。这说明 $w(C)/w(O)$ 在 1.1 ~ 1.3 区间内的波动对球团强

度性能的影响不显著。因此, 铜渣球团的配碳量须结合进一步的还原焙烧试验确定, 侧重于从提高焙烧还原金属化率和脱锌率等方面考虑。

2.3 成球压力对球团性能的影响

不同压力下球团的成球率及生球强度检测值如表 5 所示。

表 5 不同压力下的成球率和生球强度

Table 5 Pelletization efficiency and green pellet strength under various pressures

编号	压力 / MPa	成球率 / %	生球落下强度 / [次·(0.5 m) ⁻¹]	生球抗压 强度 / (N·P ⁻¹)
Z1	14	79.4	6.5	67.7
Z2	12	84.7	6.1	60.5
Z3	8	87.0	4.6	48.1

由表 5 可知, 压力增加, 生球落下强度和抗压强度均会改善, 但成球率有所下降, 这是由于挤压力过大时, 会造成球团内部晶粒相互挤压, 形成的内应力超过固结力, 导致球团破裂粉化的可能性增加。当压力由 8 MPa 增至 14 MPa 时, 成球率由 87% 降低至 79.4%。综合考虑实际生产对球团的性能及成球率需求, 压球机压力建议选择 12 MPa。

2.4 烘干温度与时间对球团强度的影响

以有机黏结剂为主制备铜渣含碳球团, 当烘干温度 > 170 °C 时, 球团烘干粉化率过大(超过 50%), 因为有机黏结剂在高温下分解反应, 失去黏结作用, 导致球团松散破裂。因此, 试验烘干温度确定为 [100, 160] °C 的范围内。

选择 120、160 °C 两种温度开展生球烘干试验。不同烘干温度下, 球团落下强度及抗压强度与烘干时间的关系如图 4 所示。

由图 4(a) 可见, 起初随着烘干时间的增加, 球团落下强度开始明显增大, 在约 80 min 时达到峰值, 随后继续烘干, 干球的落下强度逐渐减小。两种烘干温度(120 °C、160 °C) 下的影响规律基本一致, 且绝对值差距不大。由图 4(b) 可知: 随着烘干时间的延长, 球团抗压强度呈现先升后降的状态, 峰值出现在 60 ~ 80 min 区间。两种烘干温度下的规律曲线基本一致, 不过, 烘干温度越低, 抗压强度反而相对偏高, 这是因为在较高的烘干温度环境下, 球团表面水分迅速蒸发, 球团内部

水分受热汽化并向表面扩散,球团径向水分梯度加剧,导致球团内外收缩速率差异大,从而形成更多的空隙或裂纹,宏观表现即为球团抗压强度降低。由此可明确,为了保证球团落下强度和抗压强度,烘干时间不宜超过80 min。

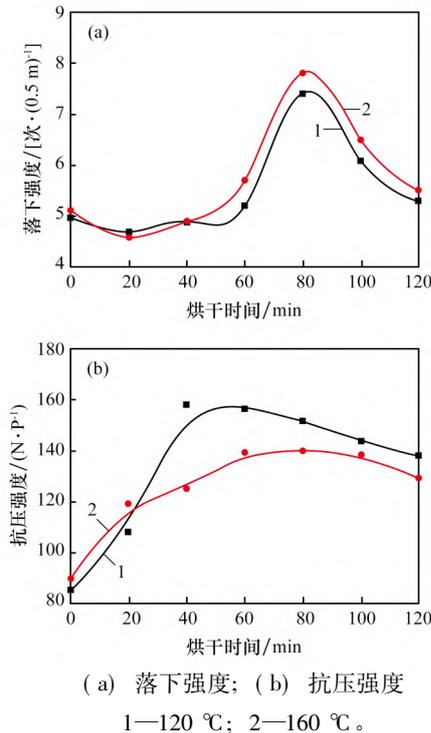


图4 不同烘干温度下球团强度与烘干时间的关系

Fig. 4 The relationship between pellet strength and drying time at different temperatures

进一步考察不同烘干温度下球团含水量与烘干时间的关系,见图5所示。

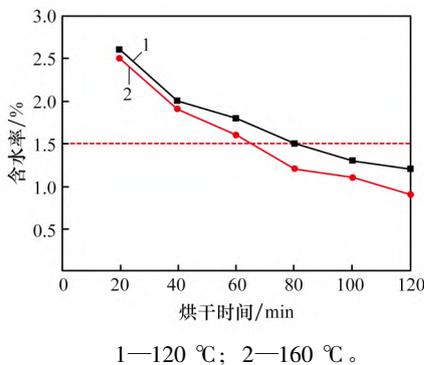


图5 不同烘干温度下球团含水量与烘干时间的关系

Fig. 5 The relationship between moisture of pellets and drying time at different temperatures

根据生产经验,生球烘干后的预期残留水分<1.5%。由图5可知:在生球烘干温度为160 ℃,

烘干时间 ≥ 65 min时,球团残留水分<1.5%;在烘干温度为120 ℃时,烘干时间 ≥ 80 min后,球团残留水分才降低至1.5%以下,且温降曲线均慢于160 ℃,烘干效率偏低。

综上,在充分保证烘干后球团残留水分达到目标(<1.5%)的前提下,同时实现良好的球团强度指标,满足较高的烘干效率,铜渣含碳球团生球烘干温度为160 ℃,烘干时间为80 min。

3 含碳球团还原焙烧试验

采用3因素3水平的正交试验方案,研究 X [配碳量 $w(C)/w(O)$: 1.1、1.2、1.3]、 Y (焙烧温度: 1200、1225、1250 ℃)、 Z (焙烧时间: 35、40、45 min) 3个因素对焙烧球团强度、金属化率、脱锌率等指标的影响规律^[31-33]。每次试验装料量3 kg,还原剂为煤粉,采用复合黏结剂(有机黏结剂6%+无机黏结剂2%)方案,试验设计方案及结果如表6所示。

由表6可知,不同的焙烧条件得到的焙烧球团强度差别不大,均位于400~600 N/P范围,但金属化率和脱锌率差异较大,分别在0.1%~79.5%与48.1%~97.9%。由于焙烧球团 $w(\text{TFe})$ 均较低(<47%),另需进一步磨矿提纯,表6中球团强度均已基本满足排料和磨矿工序需求(>400 N/P),因此不再作为主要考察目标。而金属化率、脱锌率的提高有助于提升产品品位和产出率,直接决定产线的经济效益。表6中,产品金属化率、脱锌率指标较好的试验组有C2、C3、C6、C9,金属化率均大于75%,脱锌率均大于88%。

进一步对产品指标开展极差分析,计算结果见表7。

由表7可知,各因素对焙烧球团强度影响程度的顺序依次为配碳量、焙烧温度、焙烧时间,最优方案为 $X_1Y_2Z_1$;对球团金属化率影响程度依次为焙烧温度、配碳量、焙烧时间,最优方案为 $X_3Y_3Z_3$;对球团脱锌率影响程度依次为焙烧温度、配碳量、焙烧时间,最优方案为 $X_3Y_3Z_2$ 。可见,配碳量对球团强度的影响最大,焙烧温度对金属化率和脱锌率的影响最显著。

各因素不同水平对焙烧球团金属化率和脱锌率的影响趋势见图6所示。

表 6 正交实验方案及结果

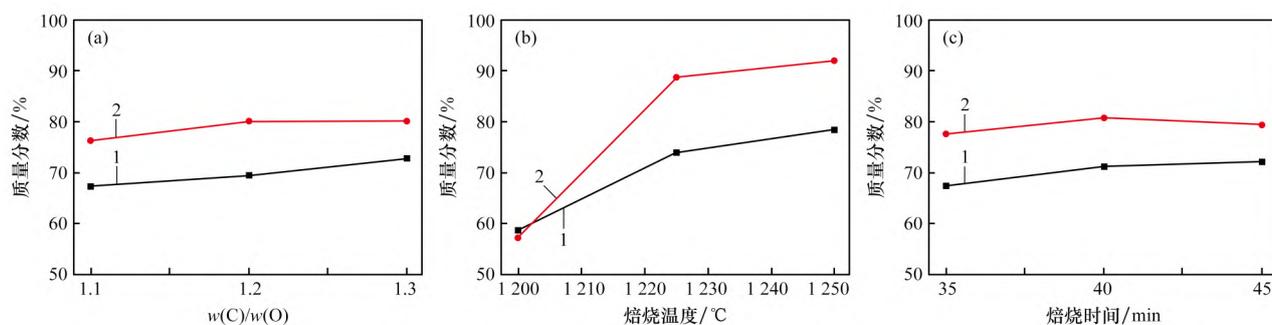
Table 6 Orthogonal experiment plan and results

编号	X(配碳量)	Y(焙烧温度)/℃	Z(焙烧时间)/min	焙烧球团主要指标					
				w(TFe)/%	w(MFe)/%	w(Zn)/%	球团强度/(N·P ⁻¹)	金属化率/%	脱锌率/%
C1	1(1.1)	1(1 200)	1(35)	45.44	22.76	0.99	529.1	50.1	48.1
C2	1(1.1)	2(1 225)	2(40)	46.19	34.73	0.13	599.4	75.2	93.8
C3	1(1.1)	3(1 250)	3(45)	46.12	35.98	0.24	594.7	78.0	88.7
C4	2(1.2)	1(1 200)	2(40)	45.84	27.10	0.83	421.4	59.1	58.8
C5	2(1.2)	2(1 225)	3(45)	46.78	33.87	0.31	426.9	72.4	85.2
C6	2(1.2)	3(1 250)	1(35)	45.38	35.44	0.04	400.3	78.1	97.9
C7	3(1.3)	1(1 200)	3(45)	44.17	29.24	0.67	426.6	66.2	65.0
C8	3(1.3)	2(1 225)	1(35)	44.80	33.38	0.61	529.7	74.5	87.4
C9	3(1.3)	3(1 250)	2(40)	45.53	36.20	0.26	423.0	79.5	89.7

表 7 指标极差分析

Table 7 Index range analysis

极差分析	项目	因素		
		X[w(C)/w(O)]	Y(焙烧温度)/℃	Z(焙烧时间)/min
焙烧球团强度/(N·P ⁻¹)	K ₁	574.4	459.0	486.4
	K ₂	416.2	518.7	481.3
	K ₃	459.8	472.7	482.7
	极差 R _j	158.2	59.6	5.1
金属化率/%	K ₁	67.8	58.5	67.6
	K ₂	69.9	74.0	71.3
	K ₃	73.4	78.5	72.2
	极差 R _j	5.63	20.1	4.63
脱锌率/%	K ₁	76.9	57.3	77.8
	K ₂	80.6	88.8	80.8
	K ₃	80.7	92.1	79.6
	极差 R _j	3.8	34.8	2.97



(a) 配碳量; (b) 焙烧温度; (c) 焙烧时间

1—金属化率; 2—脱锌率。

图 6 各因素对金属化率和脱锌率的影响

Fig. 6 Influence of various factors on the metallization rate and zinc removal rate

由图6可知:① $w(C)/w(O)$ 对金属化率、脱锌率的影响均较小,从减少碳素资源消耗、降低工序能耗的角度出发,配碳量以 $w(C)/w(O) = 1.1$ 为宜。② 金属化率总体上与焙烧温度成正比,但当温度超过 $1\ 225\ ^\circ\text{C}$ 后,温度对金属化率和脱锌率的改善作用明显减弱,这是因为此时球团表面开始过烧,生成熔融相,阻碍了热量向球团内部的进一步传递,影响球团内部还原反应的继续进行。因此,出于保证金属化率、节省能耗的目的,焙烧温度宜取 $1\ 225\ ^\circ\text{C}$ 。③ 焙烧时间对金属化率和脱锌率的影响规律略有不同,即时间越长,金属化率越高,而脱锌率呈现先上升后下降的趋势。延长焙烧时间,意味着单位时间产能下降、能耗增加,致使经济性降低。因此,焙烧时间应在保证产品金属化率、脱锌率等指标最佳的前提下尽可能地短,最优值为 $40\ \text{min}$ 。

综上所述,兼顾焙烧球团产品金属化率、脱锌率指标、工序能耗、经济性等多方面的综合最优化,建议最优焙烧条件(即 C2 试验组):配碳量 $[w(C)/w(O)]$ 为 1.1 ,焙烧温度为 $1\ 225\ ^\circ\text{C}$,焙烧时间为 $40\ \text{min}$,此时焙烧产品焙烧球团强度为 $599.4\ \text{N/P}$,金属化率为 75.2% ,脱锌率为 93.8% 。

4 结 论

(1) 铜渣 TFe 含量较高,还有一定量的 Zn、Cu 等有价元素,具有较高的回收价值。铜渣中 Fe 的主要物相为铁橄榄石 ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) 和磁铁矿 (Fe_3O_4), Zn 主要赋存形态是铁酸锌 ($\text{ZnO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)。

(2) 铜渣压球采用复合黏结剂较好,当有机黏结剂用量为 6% ,无机黏结剂用量为 2% 时,生球落下强度与抗压强度分别可达 $6.9\ \text{次}/(0.5\ \text{m})$ 与 $70.7\ \text{N/P}$ 。

(3) 当铜渣含碳球团生球烘干温度为 $160\ ^\circ\text{C}$,烘干时间为 $80\ \text{min}$ 时,可在充分保证球团残留水分满足 $<1.5\%$ 的工艺目标时,同时实现良好的球团强度指标和较高的烘干效率。

(4) 焙烧温度对金属化率和脱锌率的影响最显著。在产品指标、能耗、经济性等综合指标最优化情况下,其最佳焙烧条件 $w(C)/w(O)$ 为 1.1 ,焙烧温度为 $1\ 225\ ^\circ\text{C}$,焙烧时间为 $40\ \text{min}$,

此时焙烧产品焙烧球团强度为 $599.4\ \text{N/P}$,金属化率为 75.2% ,脱锌率为 93.8% 。

参考文献:

- [1] 郭秀键,倪晓明,马丁,等.铜渣处理与综合利用[J].有色冶金设计与研究,2017,38(2):23-26.
GUO Xiujian, NI Xiaoming, MA Ding, et al. Copper slag treatment and comprehensive utilization [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2017, 38(2): 23-26.
- [2] 任鸿九.有色金属熔池熔炼[M].北京:冶金工业出版社,2001.
REN Hongjiu. Non-ferrous metal bath melting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [3] 常化强,张延安,牛丽萍,等.铜渣贫化技术的研究进展[C]//第十七届(2013年)全国冶金反应工程学术会议论文集(上册).太原:中国金属学会,2013:459-464.
CHANG Huaqiang, ZHANG Ting'an, NI Liping, et al. Research progress on copper slag impoverishment technology [C]//Proceedings of the 17th (2013) National Conference on Metallurgical Reaction Engineering (Volume 1), Taiyuan: Chinese Society for Metals, 2013: 459-464.
- [4] 张延安,王坤,豆志河,等.铜渣贫化及其高值化利用[J].铜业工程,2024(3):85-96.
ZHANG Ting'an, WANG Kun, DOU Zhihe, et al. Dilution process of copper slag and its high-value utilization [J]. Copper Engineering, 2024(3): 85-96.
- [5] 薛超龙,李慧,梁精龙,等.铜渣资源回收的研究现状及展望[J].中国冶金,2022,32(2):108-114.
XUE Chaolong, LI Hui, LIANG Jinglong, et al. Research status and prospects of copper slag resource recovery [J]. China Metallurgy, 2022, 32(2): 108-114.
- [6] 李书钦,裴德健,汪大亚,等.铜渣梯级高效资源化利用的研究综述[J].中国资源综合利用,2022,40(3):122-125.
LI Shuqin, PEI Dejian, WANG Daya, et al. Research review on cascade efficient resource utilization of copper slag [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022, 40(3): 122-125.
- [7] 王鑫.铜渣提铁综合利用试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
WANG Xin. Researcher on the experimental study on comprehensive utilization of extracting iron from copper

- slag. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [8] 唐超凡,张荣良. 铜渣高价值化利用研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(5): 117-123.
TANG Chaofan, ZHANG Rongliang. Research progress on high-value utilization of copper slag[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(5): 117-123.
- [9] 宫嘉辰,潘建,赵景富,等. 从铜冶炼渣中提取部分有价金属的研究进展[J]. 铁合金, 2024, 55(4): 24-27.
GONG Jiachen, PAN Jian, ZHAO Jingfu, et al. Research progress on extraction of valuable metals from copper smelting slag[J]. Ferro-Alloys, 2024, 55(4): 24-27.
- [10] 孙雪玮,王杨,胡建杭. 利用熔融分步还原法优化铜渣贫化效果及渣型结构[J]. 材料导报, 2019, 33(S2): 505-511.
SUN Xuewei, WANG Yang, HU Jianhang. The dilution effect and slag shape structure of copper slag optimized by melting step reduction method[J]. Materials Reports, 2019, 33(S2): 505-511.
- [11] 周亮. 贫化铜渣氯化-熔融还原回收金属铁的实验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
ZHOU Liang. Experimental study on recovery of metallic iron from depleted copper slag by chlorination-molten reduction Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [12] 李磊,胡建杭,王华. 铜渣熔融还原炼铁过程研究[J]. 过程工程学报, 2011, 11(1): 65-71.
LI Lei, HU Jianhang, WANG Hua. Study on smelting reduction ironmaking of copper slag[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(1): 65-71.
- [13] 徐露,库建刚,林存键,等. 从铜渣中回收铁的研究进展[J]. 现代化工, 2016, 36(2): 26-29, 31.
XU Lu, KU Jiangang, LIN Cunjian, et al. Progress in iron recovery from copper slags[J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(2): 26-29, 31.
- [14] 叶雪均,秦华伟,杨俊彦,等. 从某混合铜渣中回收铜铁的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(3): 46-49.
YE Xuejun, QIN Huawei, YANG Junyan, et al. Experimental research of comprehensive recovery of copper and iron from a mixed copper slag[J]. Mining Research and Development, 2013, 33(3): 46-49.
- [15] 曹洪杨,王继民,张力,等. 添加剂对铜渣改性过程中磁铁矿相析出与长大的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(6): 6-10.
CAO Hongyang, WANG Jimin, ZHANG Li, et al. Effect of additives on precipitation and growing of magnetite during modifying progress of copper smelting slag[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2013(6): 6-10.
- [16] 杨涛,胡建杭,王华,等. 铜电炉冶炼贫化渣焙烧富集 Fe_3O_4 [J]. 过程工程学报, 2011, 11(4): 613-619.
YANG Tao, HU Jianhang, WANG Hua, et al. Concentration of Fe_3O_4 in roasted slag from copper impoverishment smelting[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(4): 613-619.
- [17] 刘慧利,胡建杭,王华,等. 铜渣氢气还原过程中的物相转变[J]. 过程工程学报, 2012, 12(2): 265-270.
LIU Huili, HU Jianhang, WANG Hua, et al. Phase transformation during the reduction process of copper-containing slag with hydrogen[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2012, 12(2): 265-270.
- [18] 姜平国,闫永播,刘金生,等. 铜渣在 CO_2 -CO混合气体中焙烧实验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(1): 28-33.
JIANG Pingguo, YAN Yongbo, LIU Jinsheng, et al. A study on the roasting of copper slag in CO_2 -CO mixed gas[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9(1): 28-33.
- [19] 王爽,倪文,王长龙,等. 铜尾渣深度还原回收铁工艺研究[J]. 金属矿山, 2014(3): 156-160.
WANG Shuang, NI Wen, WANG Changlong, et al. Study of deep reduction process for iron recovery from copper slag tailings[J]. Metal Mine, 2014(3): 156-160.
- [20] 高恩霞,姜涛,崔石岩,等. 铜渣与高炉灰共还原-磁选工艺回收铁试验研究[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(6): 118-124.
GAO Enxia, JIANG Tao, CUI Shiyan, et al. Optimization of iron recovery from copper slag and blast furnace dust by co-reduction followed by magnetic separation[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(6): 118-124.
- [21] 李晓波,许浩,李国栋,等. 某冶炼铜渣综合回收铜铁的实验研究[J]. 矿产综合利用, 2024(4): 123-127.
LI Xiaobo, XU Hao, LI Guodong, et al. Experimental research on recovery copper and iron from copper smelting slags by direct reduction roasting-magnetic separation[J]. Multipurpose Utilization of Mineral

- Resources,2024(4):123-127.
- [22] 陈得贵,雷鹏飞,吴振中.铜渣金属化球团熔分试验研究[J].甘肃冶金,2024,46(4):78-82.
CHEN Degui, LEI Pengfei, WU Zhenzhong. Experimental study on melting and splitting of metallized pellets of copper slag [J]. Gansu Metallurgy, 2024, 46(4): 78-82.
- [23] 赵杰.转底炉处理铜渣工艺研究[J].世界有色金属,2018(16):8-9.
ZHAO Jie. Process research of copper-slag treatment by RHF [J]. World Nonferrous Metals, 2018(16): 8-9.
- [24] 曹志成.铜渣转底炉直接还原回收铁锌工艺及机理研究[D].北京:北京科技大学,2019.
CAO Zhicheng. Study on process and mechanism of recovery of iron and zinc from copper slag by rotary hearth furnace direct reduction [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019.
- [25] 聂溪莹,肖绎.模拟回转窑工艺研究铜渣中Fe、Pb、Zn的提取[J].工业加热,2015,44(2):71-74.
NIE Xiying, XIAO Yi. Studying on the extraction of Fe, Pb, Zn from the copper slag by simulation of the rotary kiln process [J]. Industrial Heating, 2015, 44(2): 71-74.
- [26] 刘占华,陈文亮,丁贵银,等.铜渣转底炉直接还原回收铁锌工艺研究[J].金属矿山,2019(5):183-187.
LIU Zhanhua, CHEN Wenliang, DING Yingui, et al. Study on recovery of iron and zinc from copper slag by direct reduction process in rotary hearth furnace [J]. Metal Mine, 2019(5): 183-187.
- [27] 马鹏,吴红星,宗红星,等.采用RKEF技术从铜渣尾料中提取铁合金[J].中国冶金,2024,34(7):122-128.
MA Peng, WU Hongxing, ZONG Hongxing, et al. Ferroalloys extraction by RKEF technology from copper slag tailings [J]. China Metallurgy, 2024, 34(7): 122-128.
- [28] 唐岚,甘万贵.冶金尘泥制备金属化球团成型试验研究[J].烧结球团,2013,38(1):46-49.
TANG Lan, GAN Wangui. Experimental study on producing and shaping metallized pellet with metallurgical dust and sludge [J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(1): 46-49.
- [29] 杨涛,雷杰,任晓健,等.转底炉用含碳球团制备及生产工艺优化[J].钢铁,2023,58(4):157-166.
YANG Tao, LEI Jie, REN Xiaojian, et al. Preparation and production process optimization of carbon-bearing pellets for rotary bottom furnace [J]. Iron & Steel, 2023, 58(4): 157-166.
- [30] 吴胜利,张风杰,张建良,等.钢厂含锌粉尘基本物性及其成球性能研究[J].环境工程,2015,33(7):90-95.
WU Shengli, ZHANG Fengjie, ZHANG Jianliang, et al. Basic characteristics and balling performance of zinc-bearing dust in steel plant [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(7): 90-95.
- [31] 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.
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.
- [32] 徐健祥,齐凤升,李宝宽,等.厚料层转底炉含铁尘泥直接还原模拟[J].中国冶金,2021,31(10):94-101.
XU Jianxiang, QI Fengsheng, LI Baokuan, et al. Direct reduction simulation of iron-bearing dust in thick-layer rotary hearth furnace [J]. China Metallurgy, 2021, 31(10): 94-101.
- [33] 林启立.转底炉处理含碳球团还原的基础研究[D].重庆:重庆大学,2017.
LIN Qili. Study on the reduction of carbon-bearing pellet of RHF treatment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。