

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.02.005

铜渣与高炉灰共还原—磁选回收铁试验

高恩霞¹, 王宁¹, 蒋曼^{1,2}, 崔石岩³, 李传伟⁴, 闫平科¹

(1. 山东理工大学 资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100160;

3. 山东东华水泥有限公司, 山东 淄博 255144;

4. 莱钢集团矿山建设有限公司, 济南 271100)

摘要:以铁品位 35.59% 的山东某地的铜渣和山东、甘肃两地的四种高炉灰为原料, 进行共还原—磁选回收铁工艺试验, 研究了高炉灰作为共还原—磁选工艺还原剂的可行性。结果表明, 焙烧体系中仅加入高炉灰时, 铜渣与高炉灰共还原—磁选所得还原铁指标均较差; 当加入氟化钙时, 还原铁中铁品位和铁回收率均大于 90%, 指标较好, 实现了铜渣与高炉灰中铁资源的高效回收。高炉灰种类及用量、氟化钙用量、还原温度、还原时间及磨选条件均对还原铁指标有影响, 在铜渣: G1: 氟化钙质量比为 100: 30: 15、共还原温度 1 250 °C、共还原时间 60 min 的条件下焙烧, 然后在磨矿细度—74 μm 占 51.87%、磁场强度 80 kA/m 条件下磁选, 可获得铁品位和铁回收率分别为 92.06% 和 92.65% 的直接还原铁。该工艺可以为铜渣和高炉灰的综合利用提供参考。

关键词:共还原-磁选; 铜渣; 高炉灰; 直接还原铁

中图分类号:TF55

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2022)02-0027-07

Recovery of Iron from Copper Slag and Blast Furnace Ash by Co-reduction and Magnetic Separation

GAO En-xia¹, WANG Ning¹, JIANG Man^{1,2}, CUI Shi-yan³, LI Chuan-wei⁴, YAN Ping-ke¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China;

2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 100160, China;

3. Shandong Donghua Cement Co., Ltd., Zibo 255144, Shandong, China;

4. Laiwu Steel Group Mine Construction Co., Ltd., Ji'nan 271100, China)

Abstract: The feasibility to recover metal iron from copper slag and blast furnace ash by co-reduction followed by magnetic separation using blast furnace ash as reducing agent was verified. The process of recovering iron by co-reduction and magnetic separation was studied applying copper slag from Shandong province with iron grade of 35.59% and four kinds of blast furnace ash from Shandong and Gansu province as raw materials. The results show that indexes of the direct reduced iron (DRI) are poor when blast furnace ash is only added into roasting system, while with the presence of CaF_2 , co-reduction followed by magnetic separation can make full use of reducibility of carbon in blast furnace ash and realize the recovery of iron resources in copper slag and blast furnace ash, and both the iron grade and iron recovery of DRI are more than 90%. Reducing agent type and dosage, CaF_2 dosage, co-reduction temperature, co-reduction

收稿日期:2021-11-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52104259);山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QB192)

作者简介:高恩霞(1991-),女,讲师,博士

time, grinding fineness and magnetic field intensity have effects on indexes of DRI. DRI with Fe grade of 92.06% and Fe recovery of 92.65% is obtained under the conditions including roasting temperature of 1 250 °C, roasting time of 60 min, mass ratio of G1 and CaF_2 of 30% and 15%, respectively, grinding fineness of roasting product of $-74 \mu\text{m}$ of 51.87%, and magnetic field intensity of 80 kA/m. This process can provide a reference for comprehensive utilization of copper slag and blast furnace ash.

Key words: co-reduction followed by magnetic separation; copper slag; blast furnace ash; direct reduced iron

铜渣是火法炼铜的副产物,在铜的生产过程中,每产出 1 t 铜会产生大约 2.2 t 铜渣^[1],2020 年我国精炼铜产量为 1 002.50 万 t,铜渣产生量超过 2 000 万 t,历史堆存量已达 1.2 亿 t^[2]。铜渣中含有丰富的铁资源,铁品位通常高达 30% 以上^[3],长期堆存不仅浪费资源,还占用土地,严重污染环境。对铜渣中铁物相分析结果表明,铜渣中大部分铁以铁橄榄石形式存在^[4],采用传统选矿工艺很难有效回收其中的铁。研究表明,采用直接还原—磁选工艺处理铜渣,在高温还原气氛中铁矿物被还原为金属铁,焙烧产物经磨矿—磁选可得到铁品位 90% 以上、铁回收率 88% 以上的直接还原铁^[5-8],实现铜渣中铁的有效回收。但目前铜渣直接还原—磁选工艺使用的还原剂一般是成本较高的煤,因此,寻找来源广泛、价格低廉的还原剂对促进铜渣资源化利用具有重要的意义。

高炉灰,又称高炉瓦斯灰,是高炉炼铁烟气中的微细粉尘经重力除尘器、旋风除尘器、布袋除尘器等除尘装置干法除尘后得到的固体废物,其中含有丰富的铁资源和碳资源。由于缺乏成熟的综合利用技术,目前主要堆积贮存,不仅占用土地,污染环境,还浪费宝贵资源。研究表明,高炉灰可以作为铁矿石直接还原—磁选工艺的还原剂^[9-11],其中的碳资源为直接还原提供还原气氛,同时还可回收其中的铁资源,实现高炉灰的资源化利用,但目前高炉灰作为还原剂应用于铜渣这种以铁橄榄石为主要铁矿物的固体废物的研究几乎没有。本文以铜渣为原料,还原剂为不同产地的高炉灰,进行铜渣与高炉灰共还原,再采用磁选从共还原产物中回收铁,获得铁品位和铁回收率均大于 90% 的直接还原铁。

1 试验原料、设备及方法

1.1 铜渣

铜渣取自山东省某地,化学成分(%): Fe_2O_3 50.84、 SiO_2 27.50、 Al_2O_3 5.68、 ZnO 3.58、

CaO 2.67、 Na_2O 2.34、 MgO 1.38、 K_2O 1.24、 SO_3 0.98、其他 3.79。图 1 为铜渣 XRD 图谱及矿物组成分析结果。

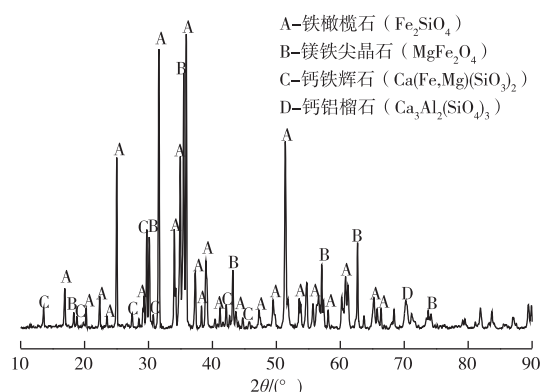


图 1 铜渣 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of copper slag

由铜渣的成分可知,铜渣中 Fe_2O_3 品位较高,达到 50.84%,铁品位 35.59%,具有回收价值, SiO_2 、 Al_2O_3 、 ZnO 和 CaO 含量也较高,分别为 27.50%、5.68%、3.58 和 2.67%,其他元素含量较少。由图 1 可知,铜渣中的铁主要以铁橄榄石和镁铁尖晶石的形式存在,脉石主要为钙铁辉石和钙铝榴石,但含量较少。

1.2 高炉灰

试验用高炉灰分别取自山东(G1、G2)和甘肃(G3、G4)两地的钢铁企业,4 种高炉灰工业性质及灰分的化学成分如表 1 所示。由表 1 可知,4 种高炉灰中的铁品位较高,均具有回收价值。4 种高炉灰的工业性质分析结果表明,其中均含有一定量的固定碳,可以作为铜渣与高炉灰共还原—磁选工艺的还原剂;但其中固定碳、挥发分和灰分的含量不同,尤其是灰分中各元素组成差异巨大,对共还原过程中铁矿物的还原和金属铁颗粒的长大有可能产生不同的影响,因此,有必要对 4 种高炉灰作为铜渣与高炉灰共还原—磁选回收铁的工艺参数进行研究。

表 1 试验用高炉灰性质分析

Table 1 Property analysis of test blast furnace ash

/%

高炉灰	固定碳	挥发分	水分	灰分										
				Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	ZnO	SO ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	其他	小计
G1	22.88	5.33	2.84	31.51	7.57	8.78	7.11	3.69	2.53	2.26	1.75	2.14	1.61	68.95
G2	16.87	4.93	1.89	43.66	6.57	9.48	4.20	2.97	1.83	1.94	1.88	2.11	1.68	76.31
G3	17.63	4.22	1.29	47.01	3.64	8.88	8.37	1.99	2.56	0.72	1.88	0.23	1.59	76.86
G4	28.09	0.98	0.81	47.86	5.05	8.64	4.49	0.45	1.06	0.74	0.77	0.57	0.51	70.12

1.3 试验设备

试验所用设备主要有 RK/BK 三辊四筒智能棒磨机和 CXG-99 磁选管和 SX-10-13 马弗炉。

1.4 试验方法

按比例将铜渣、高炉灰与氟化钙(需要时)混匀后装入石墨黏土坩埚,再在表面覆盖一定质量的同种高炉灰,并盖上坩埚盖,放入已升至指定温度后的马弗炉中,经过指定时间后取出,自然冷却得到焙烧产物,焙烧产物经磨矿—磁选得到直接还原铁(简称还原铁,DRI)。以还原铁的铁品位和铁回收率作为评价指标,其中铁回收率的计算考虑铜渣、高炉灰及表面覆盖的高炉灰中的铁,计算公式如下:

$$R = \frac{m_4 \times \beta}{m_1 \times \alpha_1 + (m_2 + m_3) \times \alpha_2}$$

式中,R 为还原铁的铁回收率(%);m₁ 为铜渣质量(g);m₂ 为高炉灰质量(g);m₃ 为表面覆盖的高炉灰质量(g);m₄ 为还原铁质量(g);α₁ 为铜渣中铁品位(%);α₂ 为高炉灰中铁品位(%);β 为还原铁的铁品位(%)。

2 试验结果与讨论

2.1 高炉灰对还原铁指标的影响

铁矿物直接还原过程的研究结果表明,还原剂种类及用量^[12]、添加剂种类及用量^[13]、还原温度^[14]、还原时间^[15]等还原条件均对还原铁的铁品位和铁回收率有影响,尤其是还原剂种类及用量对还原铁指标的影响最大。为研究还原剂对铜渣与高炉灰共还原—磁选工艺的影响,在还原温度 1 250 ℃、还原时间 60 min、磨矿细度—74 μm 占 51.87%,弱磁选磁场强度为 80 kA/m 的条件下,进行高炉灰种类及用量对还原铁指标的影响研究,试验结果如图 2 所示。

由图 2 可知,在 4 种高炉灰的试验用量范围内,共还原—磁选工艺所得还原铁中铁品位均大于 70%,且不同高炉灰对还原铁指标的影响差异巨大。

图 2a 中,当 G1 用量由 10% 增加至 30% 过程中,还原铁品位由 85.59% 升高至 90.62%,铁回收率由 58.01% 升高至 75.89%;继续增加 G1 用量达

到 50% 时,还原铁品位略有降低,但仍保持在 90% 左右,铁回收率也仅升高了 2.37 个百分点,变化较小;继续增加 G1 用量至 60%,还原铁的铁回收率增幅仍较小,但铁品位急剧降低,仅为 86.44%,指标变差。由此可知,以 G1 为还原剂时,还原铁的铁品位指标尚可,但铁回收率过低,当 G1 用量为 30% 时,其铁品位和铁回收率分别为 90.62% 和 75.89%,未达到预期目标。

图 2b 中,随还原剂 G2 用量的增加,铁回收率逐渐升高,还原铁中铁品位逐渐降低,当 G2 用量为 10% 时,还原铁的铁品位较高,为 87.94%,但此时铁回收率低,仅为 62.51%;当 G2 用量为 60% 时,还原铁的铁回收率达到 92.63%,升高了 30.12 个百分点,但此时铁品位仅为 82.54%,降低了 5.40 个百分点;因此,以 G2 为还原剂时铁品位与铁回收率不可兼得,当 G2 用量为 10% 时,还原铁中铁品位较高,但铁回收率过低,未达到预期目标。

图 2c 中,以 G3 为还原剂时,随 G3 用量的增加,还原铁中铁品位和铁回收率的变化规律与 G2 为还原剂时相同,当 G3 用量为 10% 时,还原铁中铁品位较高,达到 86.71%,但此时铁回收率仅有 58.31%;当 G3 用量为 60% 时,还原铁的铁回收率达到 91.97%,升高了 33.66 个百分点,但此时铁品位仅为 72.65%。在 G3 用量 10% 时可得到铁品位较高的还原铁,指标较好,但仍未达到预期目标。

图 2d 中,以 G4 为还原剂时,随 G4 用量的增加,还原铁中铁品位先升高后降低,铁回收率逐渐升高;当 G4 用量为 10% 时,还原铁中铁品位为 90.39%,铁回收率较低,仅为 41.60%;增加 G4 用量至 20% 时,还原铁的铁品位和铁回收率分别升高了 1.67 和 12.81 个百分点,铁品位达到 92.06%,铁回收率仍较低,仅为 54.41%;继续增加 G4 用量至 60% 时,铁回收率达到 92.21%,但此时铁品位仅为 78.07%,降低了 13.99 个百分点;当 G4 用量为 20% 时,可得到铁品位 92.06% 的还原铁,但铁回收率未达到预期目标。

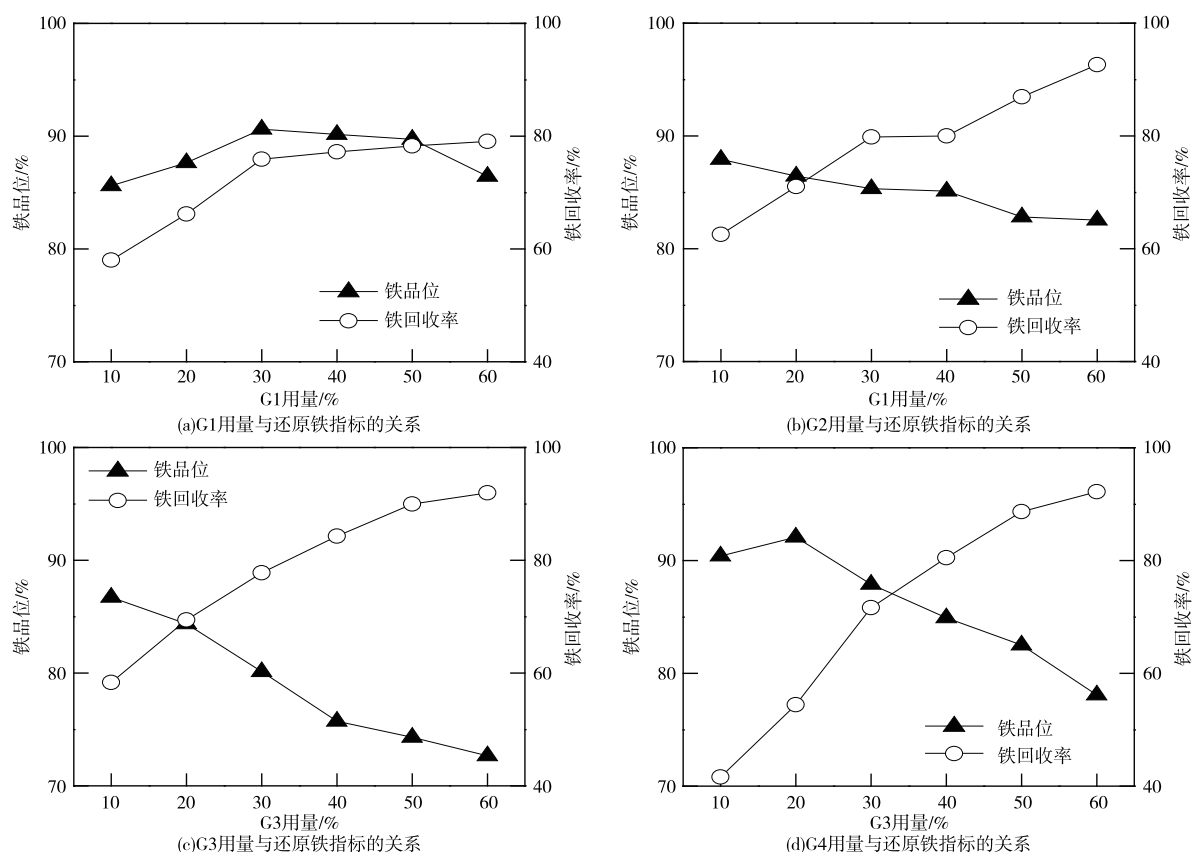


图2 高炉灰种类及用量对还原铁指标的影响

Fig. 2 Effects of type and dosage of blast furnace ash on index of DRI

将4种高炉灰用于铜渣与高炉灰共还原—磁选工艺的最佳用量及所得还原铁指标进行对比,结果如表2所示。由表2可知,在最佳用量下,4种高炉灰为还原剂所得的还原铁指标差异较大,且最佳用量也不同。其中,以G1和G4为还原剂时可获得铁品位大于90%的还原铁,以G2和G3为还原剂时可获得铁品位大于86%的还原铁,但所得还原铁的铁回收率均较低,G1为还原剂时还原铁的铁回收率最高,但仅为75.89%,未达到预期目标。

表2 四种高炉灰最佳用量及还原铁指标

Table 2 Optimum dosage of four kinds of blast furnace ash and index of DRI /%

高炉灰种类	最佳用量	还原铁指标	
		铁品位	铁回收率
G1	30	90.62	75.89
G2	10	87.94	62.51
G3	10	86.71	58.31
G4	20	92.06	54.41

研究表明,氟化钙在铁矿石直接还原过程中可以促进铁矿物的还原和金属铁颗粒的长大^[16-17],优

化还原铁指标。因此,后续以还原铁指标较好的G1为还原剂,加入氟化钙进行工艺优化,以期获得较好指标的还原铁。

2.2 氟化钙对还原铁指标的影响

以G1为还原剂时,氟化钙用量对铜渣和高炉灰共还原—磁选所得还原铁指标的影响结果如图3所示,其中G1用量30%,还原温度1250℃,还原时间60min,磨矿细度—74μm占51.87%,弱磁选磁场强度80kA/m。由图3可知,加入氟化钙后,铜渣与高炉灰共还原—磁选工艺可获得铁品位和铁回收率均超过90%的直接还原铁,该工艺能够实现其中铁资源的综合回收。此外,从图3还可以看到,在试验范围内,随氟化钙用量的增加,还原铁的铁品位略有增加,铁回收率增加明显。与不添加氟化钙相比,加入15%的氟化钙后所得还原铁中,铁品位升高到92.06%,铁回收率升高了16.76个百分点,升至92.65%,达到预期目标;继续增加氟化钙用量,还原铁中铁品位和铁回收率增幅较小。综合考虑,确定氟化钙用量为15%,此时还原铁中铁品位和铁回收率分别为92.06%和92.65%。

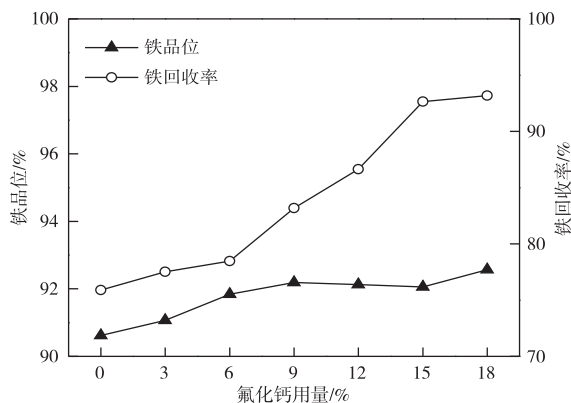


图3 氟化钙用量对还原铁指标的影响

Fig. 3 Effects of CaF_2 dosage on index of DRI

2.3 还原温度对还原铁指标的影响

还原温度对还原铁指标的影响试验结果见图4,其中G1用量为30%,还原温度1250℃,还原时间60min,磨矿细度-74 μm 占51.87%,弱磁选磁场强度为80 kA/m。由图4可知,升高共还原温度,铁品位和铁回收率均上升。当还原温度由1150℃升高到1250℃时,铁回收率由79.64%增加到92.65%,铁品位由89.09%增加到92.06%。继续升高温度,铁回收率和铁品位增幅较小。因此,最佳共还原温度取1250℃。

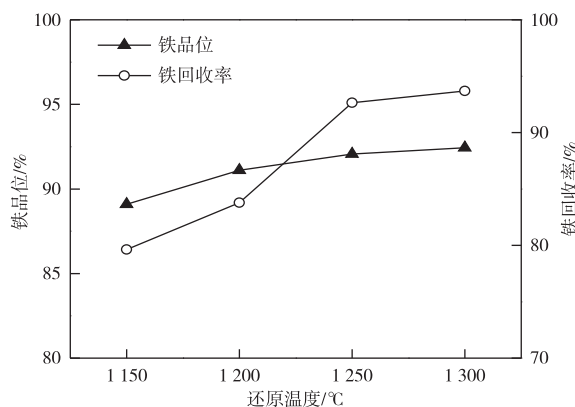


图4 共还原温度对还原铁指标的影响

Fig. 4 Effects of co-reduction temperature on index of DRI

2.4 还原时间对还原铁指标的影响

在还原剂G1用量30%、氟化钙用量15%、还原温度1250℃、磨矿细度-74 μm 占51.87%、弱磁选磁场强度80 kA/m的条件下,研究了还原时间对还原铁指标的影响,结果如图5所示。由图5可知,延长共还原时间,铁回收率和铁品位均呈先快速增加再逐渐平稳的趋势。还原时间为20min时,铁

回收率和铁品位分别仅为66.50%、83.14%;当还原时间延长至60min时,铁品位升高了8.92个百分点,达到92.06%,铁回收率大幅提高了26.15个百分点,达到92.65%,共还原效果较好,达到预期效果;继续延长还原时间,还原铁的铁品位和铁回收率增幅较小。因此,确定最佳还原时间为60min。

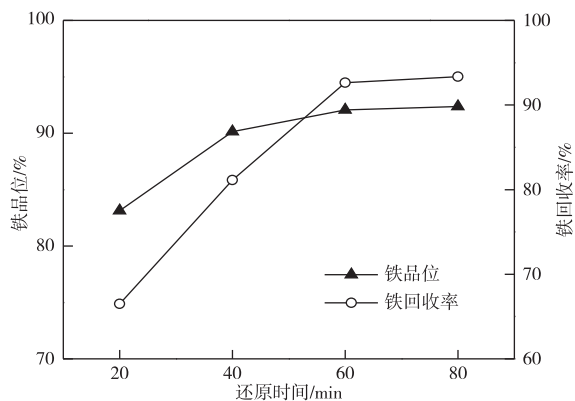


图5 共还原时间对还原铁指标的影响

Fig. 5 Effects of co-reduction time on index of DRI

2.5 磨矿细度对还原铁指标的影响

在还原剂G1用量30%、氟化钙用量15%、还原温度1250℃、还原时间60min、弱磁选磁场强度为80 kA/m的条件下考察磨矿细度对还原铁指标的影响,试验结果如图6所示。从图6可以看出,增加磨矿细度(即增加-74 μm 占比),铁品位逐渐增加,但铁回收率逐渐降低。磨矿细度由34.83%升高至51.87%过程中,铁品位由87.32%提高了4.74个百分点,至92.06%,但铁回收率降低了2.46个百分点,由95.11%降至92.65%;当磨矿细度继续增加至59.35%时,铁品位仅增加了0.68个百分点,但铁回收率降低了3.72个百分点,至88.93%。综合考虑,确定最佳的磨矿细度为-74 μm 占51.87%。

2.6 磁场强度对还原铁指标的影响

在还原剂G1用量30%、氟化钙用量15%、还原温度1250℃、还原时间60min、磨矿细度-74 μm 占51.87%的条件下,进行磁场强度对还原铁指标的影响试验,试验结果见图7。由图7可知,在一定范围内,随磁场强度的增大,还原铁中铁品位逐渐降低,铁回收率先逐渐增加后基本不变。在磁场强度由40 kA/m升高至80 kA/m过程中,还原铁中铁品位由94.43%降低至92.06%;继续增加磁场强度至160 kA/m,铁品位降低了1.47个百分点,为90.59%,但仍保持在90%以上。在磁场强度由40 kA/m升

高至 80 kA/m 过程中,铁回收率由 88.93% 增加至 92.65%,增加了 3.72 个百分点,再继续增加磁场强度,铁回收率增幅较小,保持在 93% 左右。因此,确定最佳磁场强度为 80 kA/m。

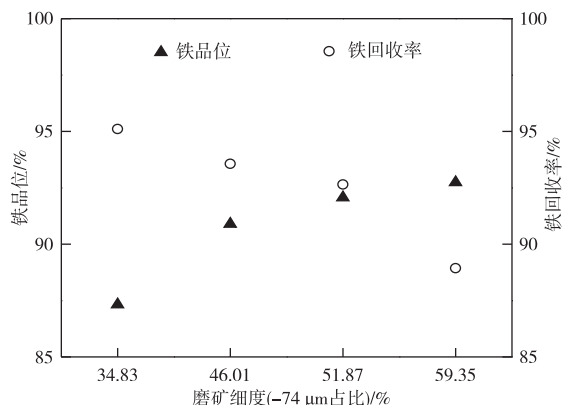


图 6 磨矿细度对还原铁指标的影响

Fig. 6 Effects of grinding fineness on index of DRI

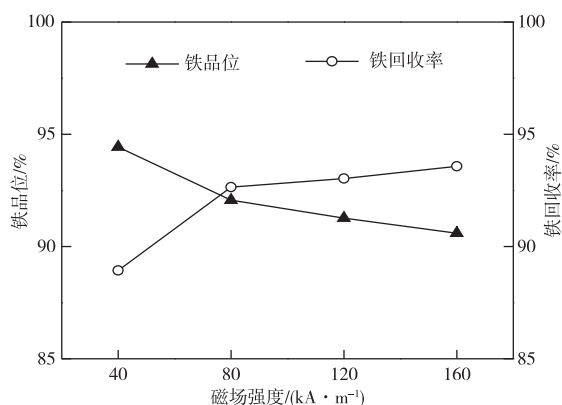


图 7 磁场强度对还原铁指标的影响

Fig. 7 Effects of magnetic field intensity on index of DRI

3 结论

1) 高炉灰种类及用量对铜渣与高炉灰共还原—磁选工艺有影响,不同种类的高炉灰的最佳用量及所得还原铁指标差异较大,G1 为还原剂时的还原铁指标较好,G2、G3、G4 为还原剂时效果较差,且在试验用量范围内均未达到预期目标。

2) 以 G1 为还原剂时,焙烧体系中加入氟化钙可以明显提高还原铁指标。

3) 在 G1 用量 30%、氟化钙用量 15%、还原温度 1 250 ℃、还原时间 60 min、磨矿细度—74 μm 占 51.87%、磁场强度 80 kA/m 的条件下,可得到铁品位 92.06%、铁回收率 92.65% 的还原铁,实现铜渣和高炉灰中铁资源的有效回收。

参考文献

- [1] GORAI B, JANA R K, PREMCHAND. Characteristics and utilisation of copper slag: A review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2003, 39(4): 299-313.
- [2] 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 Z C. 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.
- [3] 王林松, 高志勇, 杨越, 等. 铜渣综合回收利用研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5237-5250.
WANG L S, GAO Z Y, YANG Y, et al. Research progress on comprehensive recovery and utilization of copper slag [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(10): 5237-5250.
- [4] 刘凤霞, 李国栋. 铜尾渣直接还原焙烧—磁选回收铁的试验[J]. 矿山机械, 2019, 47(11): 45-48.
LIU F X, LI G D. Test of recovering iron from copper tailings by direct reduction roasting and then magnetic separation[J]. Mining & Processing Equipment, 2019, 47(11): 45-48.
- [5] GUO Z Q, ZHU D Q, PAN J, et al. Effect of Na₂CO₃ addition on carbothermic reduction of copper smelting slag to prepare crude Fe-Cu alloy [J]. JOM, 2017, 69(9): 1688-1695.
- [6] 叶子青, 黄自力, 石家力, 等. 碳热还原法从铜渣中回收铁钼合金[J]. 金属矿山, 2020, 49(11): 106-112.
YE Z Q, HUANG Z L, SHI J L, et al. Recovery of ferromolybdenum alloy from the copper slag by carbothermic reduction method[J]. Metal Mine, 2020, 49(11): 106-112.
- [7] 刘占华, 陈文亮, 丁银贵, 等. 铜渣转底炉直接还原回收铁锌工艺研究[J]. 金属矿山, 2019, 48(5): 183-187.
LIU Z H, CHEN W L, DING Y G, et al. Study on recovery of iron and zinc from copper slag by direct reduction process in rotary hearth furnace[J]. Metal Mine, 2019, 48(5): 183-187.
- [8] 邱廷省, 周丽萍, 李国栋. 铜冶炼渣直接还原焙烧—磁选回收铜、铁试验研究[J]. 金属矿山, 2020, 49(9): 202-207.
QIU T S, ZHOU L P, LI G D. Experimental of copper and iron recovery from copper smelting slag by direct reduction roasting and magnetic separation[J]. Metal Mine, 2020, 49(9): 202-207.
- [9] 胡天洋, 孙体昌, 寇珏, 等. 高炉灰为还原剂对海滨钛磁铁矿直接还原焙烧磁选—钛铁分离的影响[J]. 工程科

- 学学报,2016,38(5):609-616.
- HU T Y, SUN T C, KOU J, et al. Effect of blast furnace dust as a reductant on direct reduction roasting for separating titanium and iron in seaside titanomagnetite[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016,38(5):609-616.
- [10] HU T Y, SUN T C, KOU J, et al. Effects and mechanisms of fluorite on the co-reduction of blast furnace dust and seaside titanomagnetite [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2017,24(11):1201-1210.
- [11] 崔石岩,张明慧,孙永峰,等.高炉灰与赤泥共还原—磁选回收铁试验研究[J].金属矿山,2020,49(3):102-107.
- CUI S Y, ZHANG M H, SUN Y F, et al. Research on recovery of iron from blast-furnace ash and Bayer red mud by co-reduction followed by magnetic separation[J]. Metal Mine, 2020,49(3):102-107.
- [12] 高恩霞,孙体昌,于春晓,等.煤种对钛磁铁矿直接还原—磁选钛铁分离的影响[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(5):716-720.
- GAO E X, SUN T C, YU C X, et al. Effects of coal types on the separation of iron and titanium in titanomagnetite by direct reduction-magnetic separation[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016,37(5):716-720.
- [13] LI X H, KOU J, SUN T C, et al. Effects of calcium compounds on the carbothermic reduction of vanadium titanomagnetite concentrate[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(3):301-309.
- [14] 张浩,王广,张诗瀚,等.铜渣直接还原动力学[J].有色金属科学与工程,2019,10(1):28-33.
- ZHANG H, WANG G, ZHANG S H, et al. Direct reduction kinetics of copper slag[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019,10(1):28-33.
- [15] GENG C, SUN T C, MA Y W, et al. Effects of embedding direct reduction followed by magnetic separation on recovering titanium and iron of beach titanomagnetite concentrate[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2017,24(2):156-164.
- [16] ZHAO Y Q, SUN T C, WANG Z. Extraction of iron from refractory titanomagnetite by reduction roasting and magnetic separation[J]. ISIJ International, 2020, 61(1):93-99.
- [17] ZHAO Y Q, SUN T C, LI Z Y, et al. Measurement and characterisation of metallic iron particles on coal-based reduction and magnetic separation of refractory titanomagnetite[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2021,38(1):141-150.