

添加剂活化赤泥磁化焙烧-弱磁选回收铁^①

郝娇¹, 毛润¹, 胡超杰¹, 张汉泉^{1,2}, 刘明霞^{1,2}

(1. 武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430205; 2. 武汉工程大学 磷资源开发利用教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430073)

摘要: 为查明添加剂对赤泥磁化焙烧-弱磁选回收铁的影响, 以某高铁高铝赤泥为研究对象, 研究了焙烧、磁选制度对铁回收率的影响。结果表明, 白云石和磷石膏对铁的回收无明显作用, 而硫酸钠活化作用明显。较佳实验条件为: 硫酸钠用量 10%、焙烧温度 650 °C、焙烧时间 90 min、总气体流量 500 mL/min、CO 体积分数 30%、焙砂磨矿细度 -0.045 mm 粒级占比 65%、磁场强度 68.8 kA/m, 此时可获得 TFe 品位和回收率分别为 60.65% 和 94.01% 的磁铁精矿。热力学分析结果表明, 在研究温度范围内, 白云石与磷石膏均有利于铁橄榄石的分解, 而对铁尖晶石的分解不起作用, 硫酸钠则可同时促进二者的分解。

关键词: 赤泥; 添加剂; 活化; 磁化焙烧; 弱磁选; 赤泥选铁

中图分类号: TD98

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.021

文章编号: 0253-6099(2023)02-0091-06

Magnetizing Roasting with Additive Activation and Low Intensity Magnetic Separation for Iron Recovery from Red Mud

HAO Jiao¹, MAO Run¹, HU Chaojie¹, ZHANG Hanquan^{1,2}, LIU Mingxia^{1,2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Engineering Research Center of Phosphorus Resources Development and Utilization of Ministry of Education, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, Hubei, China)

Abstract: In order to investigate the influence of additive on iron recovery from red mud by using a process consisting of magnetizing roasting and low intensity magnetic separation, a kind of red mud containing high content of iron and aluminum was taken for experiments. It is found that addition of dolomite and phosphogypsum won't bring any effect to iron recovery, but sodium sulfate can bring an obvious activation effect. In the experiment, the roasting process ran at 650 °C for 90 min, with the addition of sodium sulfate at an amount of 10%, with total gas flow at a rate of 500 mL/min and CO at a volume fraction of 30%. And then, the obtained calcine, after being ground to a fineness of -0.045 mm 65%, was subjected to a magnetic separation with magnetic intensity of 68.8 kA/m, yielding an iron concentrate with 60.65% TFe grade at 94.01% recovery. The subsequent thermodynamic analysis showed that at the temperature within the tested range, both dolomite and phosphogypsum were conducive to the decomposition of iron olivine rather than iron spinel, while sodium sulfate could work for both.

Key words: red mud; additive; activation; magnetizing roasting; low intensity magnetic separation; iron recovery from red mud

赤泥是氧化铝工业排放的大宗强碱性尾渣, 当前以堆存、海洋填埋或制备建材、制作环境改良剂等低值化利用为主, 占用土地的同时还存在环境风险^[1-3]。赤泥中含有丰富的 Fe、Al、Si、Ti 等有价值组分及 Sc、Y、La、Se 等稀有稀散元素, 被称为“隐形的矿山”, 是非常宝贵的二次资源^[4]。因此, 实现赤泥的高值化利用意义

重大。由于赤泥中铁含量较高, 针对赤泥回收铁的研究较多, 回收方法包括选矿法、冶炼法及联合法等, 目前以还原焙烧-磁选法应用较为普遍^[5-6]。

还原焙烧-磁选法是在还原气氛下, 使赤泥中主要含铁物相(Fe₂O₃)发生磁化还原或直接还原反应, 转化为磁性较强的磁铁矿或海绵铁, 再以磁选法回收铁

① 收稿日期: 2022-11-04

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51974204); 武汉工程大学科学基金(20QD66); 武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2021465)

作者简介: 郝娇(1995—), 女, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要研究方向为矿物加工与固废资源利用。

通信作者: 刘明霞(1989—), 女, 湖北仙桃人, 博士, 讲师, 主要从事矿物加工与提取冶金研究。

的方法^[7-8]。碱/碱土金属盐类添加剂有助于焙烧过程物相转化,促进铁的磁选分离。例如,碳酸钠、硫酸钠、氟化钙等有助于赤泥直接还原焙烧-磁选回收海绵铁^[9];生石灰、钙镁碳酸盐等有利于赤泥磁化焙烧回收磁铁矿等^[10-11]。硫酸钠是经多个研究证实的对直接还原过程有显著促进作用的物质,白云石是主要成分为钙镁碳酸盐的实际矿物,磷石膏是主要成分为硫酸钙的化工废渣,为了进一步探究添加剂在磁化焙烧-磁选过程中的作用,同时从实际廉价矿物或固体废物代替现有添加剂的角度出发,探索以废治废的可能性,本文以白云石、磷石膏、硫酸钠这3种物质为添加剂,研究添加剂对赤泥磁化焙烧效果的影响。

1 实验原料与方法

1.1 实验原料

实验原料为山东某氧化铝厂赤泥,经烘干、研磨、筛分,筛下原料(-0.85 mm)即为本实验样品,其化学成分及物相分析结果见表1及图1。

表1 赤泥主要化学成分(质量分数) %

TFe	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	S
42.64	4.79	3.82	15.47	1.29	0.20	2.85	0.04	0.17	0.05

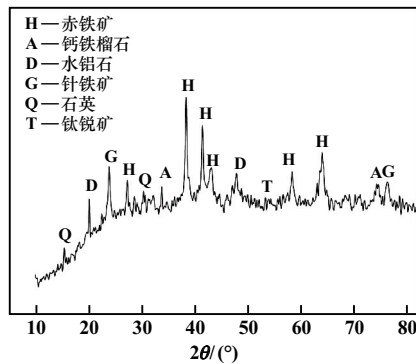


图1 赤泥物相分析结果

由表1和图1可知,赤泥中铁品位高达42.64%,主要以赤铁矿和针铁矿形式存在;铝含量次之,铝、硅主要以水铝石及石英形式存在,属于高铁高铝低硅型赤泥。

所选用添加剂分别为乌龙泉白云石、兴发集团磷石膏、分析纯硫酸钠。其中,白云石中CaO、MgO含量分别为30.32%、21.22%,磷石膏中CaO、SO₂含量分别为31.25%、44.85%,推算白云石和磷石膏纯度分别为98.70%和96.00%。

1.2 实验方法

焙烧用管式气氛炉及组件示意图见图2。实验操

作如下:将赤泥与白云石、磷石膏、硫酸钠分别按比例混匀,加10%水湿润,经油压机压成10 mm×10 mm柱状团块,烘干。将团块整齐放入刚玉坩埚,置于气氛炉炉膛中部。设定气氛炉相关参数,先以N₂排尽炉膛内空气,炉温升至设定温度并稳定后,开始通入一定比例的CO/N₂混合气体,进行焙烧实验;烧至设定焙烧时间,停止通入CO气体,并继续通N₂保护样品冷却至室温。收集焙烧产品备用。弱磁选实验所用设备为磁选管,磁场强度为68.8 kA/m,分别收集磁选精矿与尾矿,烘干、称重,用于样品分析。

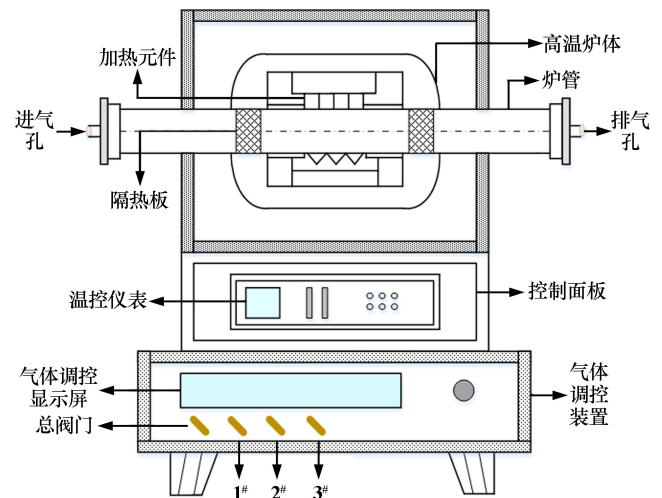


图2 管式气氛炉及其组件示意

2 实验原理

矿物在焙烧过程中的物相转化与调控是影响铁矿物还原与晶体长大、进而决定其分离回收效果的关键因素。由于赤泥成分复杂,本文仅对磁化焙烧体系中主要含铁矿物可能发生的反应进行热力学计算,初步研究添加剂的作用原理,结果列于表2。分别绘制4种添加剂反应体系的 $\Delta G-T$ 关系图,如图3所示。

由图3(a)可知,无添加剂时,在研究温度范围内,式(1)~(4)可自发进行,表明赤铁矿极易被还原、分解为FeO、Fe₃O₄(见表2式(1)~(2)),其反应进行的难易程度为Fe₃O₄<FeO;FeO与SiO₂、Al₂O₃又进一步发生固相反应形成铁橄榄石、铁铝尖晶石(式(3)~(4)),这2种矿物的存在会造成磁选过程铁的损失,影响铁精矿质量。式(5)~(6)的 ΔG 与温度呈正相关,且在研究温度范围内始终大于0,可见,无添加剂体系中CO难以单独还原分解铁橄榄石与铁尖晶石^[12]。

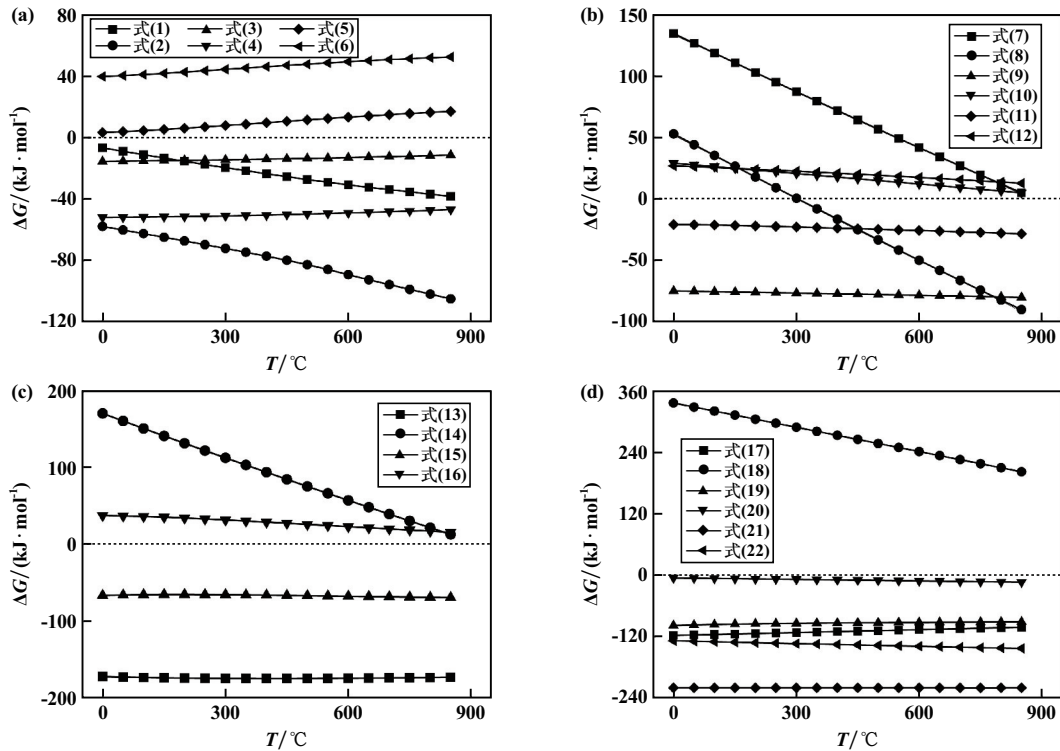
由图3(b)可知,白云石作添加剂时,随着反应温度升高,MgCO₃分解产生MgO,而CaCO₃分解反应无

法发生(式(7)~(8))。因此,在本实验温度范围内,因无 CaO 产生,式(9)~(10)无法发生,仅式(11)代表的铁橄榄石分解反应可发生;式(12)的 $\Delta G > 0$, 反应无

法进行。由此可知,白云石的加入可一定程度上置换出铁氧化物,利于铁的还原与分选^[13],但不能促进铁尖晶石的分解。

表 2 实验体系中可能发生的反应及吉布斯自由能

添加剂类别	反应式序号	反应方程式	$\Delta G / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
无添加剂	(1)	$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) = 2\text{FeO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	$\Delta G = -7.65 - 0.037T$
	(2)	$3\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) = 2\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	$\Delta G = -55.97 - 0.056T$
	(3)	$\text{FeO}(\text{s}) + \text{SiO}_2(\text{s}) = \text{FeSiO}_3(\text{s})$	$\Delta G = -15.57 + 0.0048T$
	(4)	$\text{FeO}(\text{s}) + \text{Al}_2\text{O}_3(\text{s}) = \text{FeAl}_2\text{O}_4(\text{s})$	$\Delta G = -52.291 + 0.0061T$
	(5)	$\text{FeSiO}_3(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) = \text{Fe}(\text{s}) + \text{SiO}_2(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	$\Delta G = -5.57 + 0.017T$
	(6)	$\text{FeAl}_2\text{O}_4(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) = \text{Fe}(\text{s}) + \text{Al}_2\text{O}_3(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	$\Delta G = -115.57 + 0.048T$
白云石	(7)	$\text{CaCO}_3(\text{s}) = \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	$\Delta G = 133.273 - 0.152T$
	(8)	$\text{MgCO}_3(\text{s}) = \text{MgO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g})$	$\Delta G = 51.702 - 0.168T$
	(9)	$\text{FeSiO}_3(\text{s}) + \text{CaO}(\text{s}) = \text{FeO}(\text{s}) + \text{CaSiO}_3(\text{s})$	$\Delta G = -74.41 - 0.0061T$
	(10)	$\text{FeAl}_2\text{O}_4(\text{s}) + \text{CaO}(\text{s}) = \text{FeO}(\text{s}) + \text{CaAl}_2\text{O}_4(\text{s})$	$\Delta G = 29.221 - 0.0283T$
	(11)	$\text{FeSiO}_3(\text{s}) + \text{MgO}(\text{s}) = \text{FeO}(\text{s}) + \text{MgSiO}_3(\text{s})$	$\Delta G = -20.06 - 0.0092T$
	(12)	$\text{FeAl}_2\text{O}_4(\text{s}) + \text{MgO}(\text{s}) = \text{FeO}(\text{s}) + \text{MgAl}_2\text{O}_4(\text{s})$	$\Delta G = 27.45 - 0.0166T$
磷石膏	(13)	$\text{CaSO}_4(\text{s}) + 4\text{CO}(\text{g}) = \text{CaS}(\text{s}) + 4\text{CO}_2(\text{g})$	$\Delta G = -172.8 - 0.00065T$
	(14)	$\text{CaSO}_4(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) = \text{CaO}(\text{s}) + \text{SO}_2(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g})$	$\Delta G = 167.909 - 0.184T$
	(15)	$\text{FeSiO}_3(\text{s}) + \text{CaS}(\text{s}) = \text{FeS}(\text{s}) + \text{CaSiO}_3(\text{s})$	$\Delta G = -64.723 - 0.00457T$
	(16)	$\text{FeAl}_2\text{O}_4(\text{s}) + \text{CaS}(\text{s}) = \text{FeS}(\text{s}) + \text{CaAl}_2\text{O}_4(\text{s})$	$\Delta G = -38.912 - 0.0267T$
硫酸钠	(17)	$\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{s}) + 4\text{CO}(\text{g}) = \text{Na}_2\text{S}(\text{s}) + 4\text{CO}_2(\text{g})$	$\Delta G = -117.316 + 0.0189T$
	(18)	$\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{s}) + \text{CO}(\text{g}) = \text{Na}_2\text{O}(\text{s}) + \text{SO}_2(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g})$	$\Delta G = 336.742 - 0.158T$
	(19)	$\text{FeSiO}_3(\text{s}) + \text{Na}_2\text{S}(\text{s}) = \text{FeS}(\text{s}) + \text{Na}_2\text{SiO}_3(\text{s})$	$\Delta G = -96.473 + 0.0076T$
	(20)	$\text{FeAl}_2\text{O}_4(\text{s}) + \text{Na}_2\text{S}(\text{s}) = \text{FeS}(\text{s}) + \text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4(\text{s})$	$\Delta G = -4.828 - 0.0098T$
	(21)	$\text{FeSiO}_3(\text{s}) + \text{Na}_2\text{O}(\text{s}) = \text{FeO}(\text{s}) + \text{Na}_2\text{SiO}_3(\text{s})$	$\Delta G = -219.47 - 0.00014T$
	(22)	$\text{FeAl}_2\text{O}_4(\text{s}) + \text{Na}_2\text{O}(\text{s}) = \text{FeO}(\text{s}) + \text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4(\text{s})$	$\Delta G = -127.823 - 0.0175T$



(a) 无添加剂; (b) 白云石为添加剂; (c) 磷石膏为添加剂; (d) 硫酸钠为添加剂

图 3 赤泥磁化焙烧过程主要反应 $\Delta G-T$ 关系

由图3(c)可知,反应式(13)和式(15)可自发进行,反应式(14)和式(16)无法发生。可见,磷石膏作添加剂时,CO分解磷石膏产生CaS而非CaO,CaS可进一步促进铁橄榄石的分解,而对铁尖晶石的分解不起作用^[14]。

由图3(d)可知,以硫酸钠为磁化还原焙烧体系添加剂时,硫酸钠在CO作用下自发分解为Na₂S(式(17))而非Na₂O(式(18));Na₂S促进铁橄榄石及铁铝尖晶石分解的反应均可自发进行(式(19)~(20))。因此,添加硫酸钠有利于复杂含铁氧化物中铁的分解,改善铁还原热力学条件,有利于铁的还原与分选。

3 结果与分析

3.1 添加剂种类的影响

在焙烧温度600℃、焙烧时间50min、气体总流速500mL/min、CO体积分数30%、磨矿细度-0.045mm粒级占比65%条件下,研究了添加剂种类对赤泥磁化焙烧-弱磁选的影响,添加剂白云石、磷石膏、硫酸钠用量分别为10%、10%、6%,结果见图4。

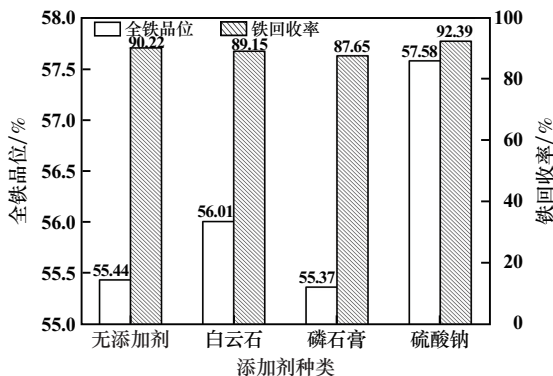


图4 添加剂种类对铁精矿指标的影响

由图4可知,无添加剂时,铁精矿全铁品位和回收率分别为55.44%和90.22%;白云石作添加剂时,铁精矿品位略有上升,为56.01%,回收率下降至89.15%;磷石膏对铁回收率降低效果更甚;硫酸钠为添加剂时,两个指标均呈上升趋势,分别比无添加剂条件下提升2.14和2.17个百分点。由此可知,白云石与磷石膏均对磁化焙烧-磁选行为无明显促进作用,这是因为赤泥原矿中SiO₂含量仅为3.82%,白云石与磷石膏对铁橄榄石的分解效果影响不明显,甚至因为分解产物残留在焙砂中,降低了铁回收率;硫酸钠则能活化赤泥磁化焙烧行为,促进铁的磁选回收,这与热力学计算结果相一致。

3.2 焙烧温度的影响

以硫酸钠为活化剂,用量为6%,在焙烧时间50min、气体总流速500mL/min、CO体积分数30%、

磨矿细度-0.045mm粒级占比65%条件下,考察了焙烧温度对赤泥磁化焙烧-弱磁选的影响,结果见图5。

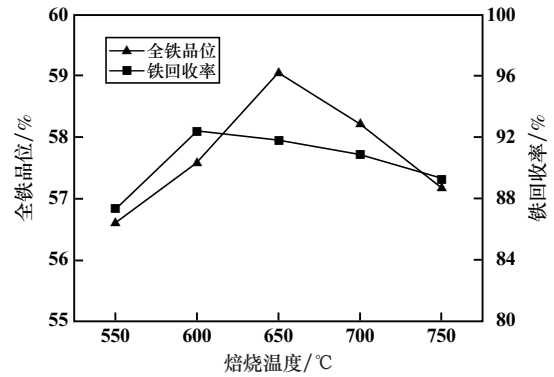


图5 焙烧温度对铁精矿指标的影响

由图5可知,随着焙烧温度升高,铁精矿品位和回收率均先升高后降低,在研究温度范围内波动明显,表明温度的影响较大,需严格控制。焙烧温度650℃时效果较佳,可得全铁品位及回收率分别为58.65%及91.80%的铁精矿。继续升高温度,由于温度过高,发生过还原,精矿中全铁品位下降^[15-16]。

3.3 焙烧时间的影响

在硫酸钠用量6%、焙烧温度650℃、总气体流量500mL/min、CO体积分数30%、磨矿细度-0.045mm粒级占比65%条件下,考察了焙烧时间对赤泥磁化焙烧-弱磁选的影响,结果见图6。

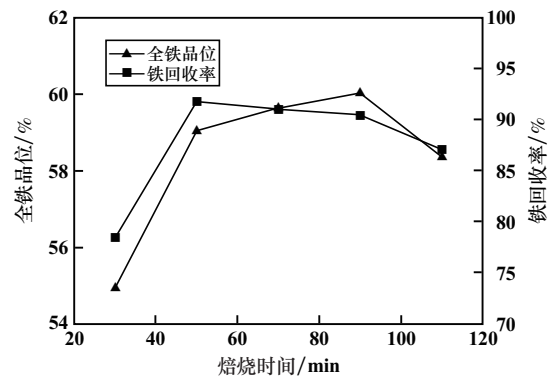


图6 焙烧时间对铁精矿指标的影响

由图6可知,随着焙烧时间延长,铁精矿全铁品位与回收率呈先上升后降低的趋势。焙烧时间50min时,铁精矿回收率达到最高;继续延长焙烧时间至90min,铁品位持续升高而回收率仅略微降低;之后继续延长焙烧时间,两个指标均明显下降。较佳焙烧时间为90min。

3.4 CO体积分数的影响

在硫酸钠用量6%、焙烧温度650℃、焙烧时间90min、总气体流量500mL/min、磨矿细度-0.045mm

粒级占比 65% 条件下, 考察了 CO 体积分数对赤泥磁化焙烧-弱磁选的影响, 结果见图 7。

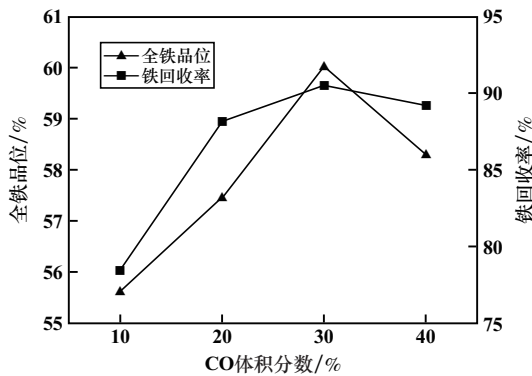


图7 CO 体积分数对铁精矿指标的影响

由图7可知, 随着焙烧过程 CO 体积分数升高, 铁精矿全铁品位及回收率均呈先升高后降低的趋势, CO 体积分数 30% 时效果较好。

3.5 添加剂用量的影响

在焙烧温度 650 °C、焙烧时间 90 min、总气体流量 500 mL/min、CO 体积分数 30%、磨矿细度 -0.045 mm 粒级占比 65% 时, 考察了添加剂硫酸钠用量对赤泥磁化焙烧-弱磁选的影响, 结果见图 8。

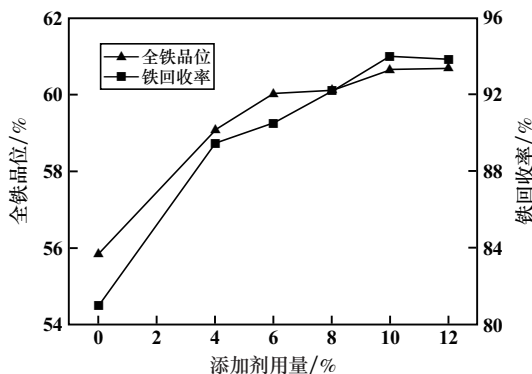


图8 添加剂用量对铁精矿指标的影响

由图8可知, 随着硫酸钠用量增加, 铁精矿全铁品位与回收率均持续稳定上升, 并在硫酸钠用量 10% 时达到最佳, 所得铁精矿全铁品位及铁回收率分别为 60.65% 及 94.01%; 继续增加硫酸钠用量, 两个指标基本保持不变。硫酸钠的最佳用量为 10%。这是由于在 CO 氛围中, 钠盐能将铁橄榄石、铁铝尖晶石等含铁脉石矿物中的铁置换出来, 有利于铁的磁选回收^[17]。

对比无添加剂与添加 10% 硫酸钠所得铁精矿指标可知, 加入 10% 硫酸钠后铁精矿全铁品位及回收率分别提升 4.81 及 13.01 个百分点。由此可知, 硫酸钠对赤泥磁化焙烧-弱磁选活化作用明显, 且其用量影响较大。

3.6 磨矿细度的影响

在硫酸钠用量 10%、焙烧温度 650 °C、焙烧时间 90 min、总气体流量 500 mL/min、CO 体积分数 30% 条件下, 考察了磁选磨矿细度对铁精矿指标的影响, 结果见图 9。

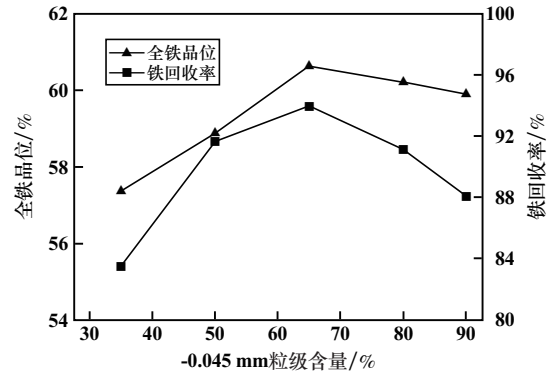


图9 磨矿细度对铁精矿指标的影响

由图9可知, 随着磨矿细度增加, 铁精矿全铁品位及回收率呈先升高后降低趋势, 且在 -0.045 mm 粒级占比 65% 时达到最佳值, 分别为 60.65% 及 94.01%。这是由于磁选矿浆体系中颗粒较粗时, 单体解离度低, 含铁矿物与脉石分离困难, 铁精矿品位及回收率指标均不理想; 随着 -0.045 mm 粒级占比增加, 矿物单体解离度增加, 有利于分选过程; 而若磨矿细度过细, 则会出现“泥化”及机械夹带现象, 导致磁铁矿比磁化系数降低, 不利于铁矿物颗粒的捕获与分离, 使铁精矿回收率和品位降低^[18-19]。因此确定磨矿细度为 -0.045 mm 粒级占比 65%。

4 结 论

1) 气基还原焙烧条件下赤泥中简单铁氧化物易还原, 而产生的铁橄榄石、铁尖晶石等复杂含铁氧化物难以分解, 造成分选效果不佳; 碱性添加剂对赤泥磁化焙烧有活化作用, 白云石与磷石膏均有利于铁橄榄石的分解, 硫酸钠对铁橄榄石及尖晶石分解均有促进作用。

2) 对于高铝低硅型赤泥, 硫酸钠作为添加剂时活化效果明显。在硫酸钠用量 10%、焙烧温度 650 °C、焙烧时间 90 min、总气体流量 500 mL/min、CO 体积分数 30%、磨矿细度 -0.045 mm 粒级占比 65% 条件下, 可从全铁品位 42.64% 的赤泥中获得品位和回收率分别为 60.65% 和 94.01% 的铁精矿。

参考文献:

- [1] 罗先进, 杨小全. 干法赤泥堆场周边的安全影响区域分析[J]. 轻金属, 2021(8): 10-13.

- [2] 毛润,张鹏飞,胡超杰,等.拜耳法赤泥磁化焙烧理论与实践问题探讨[J].矿冶工程,2021,41(6):38-42.
- [3] WANG L, SUN N, TANG H H, et al. A review on comprehensive utilization of red mud and prospect analysis[J]. Minerals, 2019,9(6):362.
- [4] SAMAL S. Utilization of red mud as a source for metal ions—A review[J]. Materials, 2021,14(9):2211.
- [5] 黄蒙蒙,李宏煦,刘召波,等.低铁拜耳法赤泥中回收铁的实验研究[J].矿冶工程,2017,37(1):92-95.
- [6] DING W, XIAO J H, PENG Y, et al. Iron extraction from red mud using roasting with sodium salt[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2019,42(3):153-161.
- [7] Agrawal S, Dhawan N. Investigation of mechanical and thermal activation on metal extraction from red mud[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2021,27(2-3):00246.
- [8] 宁凌峰,何德文,陈伟,等.赤泥中硫酸选择性浸出铁、钕及动力学研究[J].矿冶工程,2019,39(3):81-84.
- [9] 黄柱成,蔡凌波,张元波,等. Na_2CO_3 和 CaF_2 强化赤泥铁氧化物还原研究[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(3):838-844.
- [10] LU F H, SU X D, HUANG F, et al. Co-treatment of spent pot-lining and red mud for carbon reutilization and recovery of iron, aluminum and sodium by reductive roasting process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020,51:1564-1575.
- [11] LIU Y J, ZOU K S, YANG G, et al. Recovery of ferric oxide from Bayer red mud reduction roasting-magnetic separation process[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2016,31(2):404-407.
- [12] Agatzini L S, Oustadakis P, Tsakiridis P E, et al. Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,157(2-3):579-586.
- [13] 王海峰,王芹.高铁赤泥还原磁化焙烧的热力学分析[C]//2008年全国冶金物理化学学术会议专辑(上册).2008:96-99.
- [14] 李建锡,余苏,马丽萍,等.磷石膏预分解的热分析研究[J].环境工程学报,2009,3(10):1861-1864.
- [15] 李慧春,沈忠,梁秀艳.镜铁矿粉回回转窑磁化焙烧-磁选试验研究[J].矿冶工程,2021,41(6):89-92.
- [16] CUI Z, LIU Q, ETSSELL T H. Magnetic properties of ilmenite, hematite and oil sand minerals after roasting[J]. Minerals Engineering, 2002,15(12):1121-1129.
- [17] 万军营,陈铁军,周仙霖,等.高铁赤泥强化赤泥直接还原试验研究[J].烧结球团,2020,45(6):10-15.
- [18] 赵瑞超.东鞍山铁矿石磨矿特性基础研究[D].沈阳:东北大学资源与土木工程学院,2017.
- [19] 柳晓,高鹏,吕扬,等.高铁赤泥悬浮磁化焙烧-弱磁选提铁工艺[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(3):414-421.

引用本文:郝娇,毛润,胡超杰,等.添加剂活化赤泥磁化焙烧-弱磁选回收铁[J].矿冶工程,2023,43(2):91-96.

(上接第90页)

- [2] 罗立群, Mustafa S, Niyonzima J C, 等.含铅锌难选铁矿石的矿物学及铅锌杂质产出特征[J].中国有色金属学报,2021,31(1):181-193.
- [3] Mikhail K, Alexander F, Svetlana A. Recovery of magnetite-hematite concentrate from iron ore tailings[J]. E3S Web of Conferences, 2021,247:01042.
- [4] Ravisankar V, Venugopal R, Bhat H. Investigation on beneficiation of goethite-rich iron ores using reduction roasting followed by magnetic separation[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2019,128(3):175-182.
- [5] GAO P, SUN Y S, REN D Z, et al. Growth of metallic iron particles during coal-based reduction of a rare earths-bearing iron ore[J]. Mining, Metallurgy and Exploration, 2013,30(1):74-78.
- [6] LUO L Q, HUANG H, YU Y F. Characterization and technology of fast reducing roasting for fine iron materials[J]. Journal of Central South University, 2012,19(8):2272-2278.
- [7] 张小龙,韩跃新,李艳军,等.綦江菱-赤混合型铁矿石磁化焙烧动力学研究[J].金属矿山,2018(2):70-75.
- [8] LUO L Q, ZHANG X X, WANG H Y, et al. Comparing strategies for iron enrichment from Zn- and Pb-bearing refractory iron ore using reduction roasting-magnetic separation[J]. Powder Technology, 2021,393:333-341.
- [9] 张晓雪,罗立群,郑波涛,等.铁矿石碳热还原过程中铅锌及含铁物相的演变规律[J].矿冶工程,2021,41(6):21-25.
- [10] ZHANG Z L, SUN Y, CHEN R, et al. Non-isothermal reduction kinetics of roasted high alumina iron ore pellets[J]. Metallurgical Research and Technology, 2020,117(5):1-5.
- [11] 魏晨曦,罗立群,郑波涛,等.含铅锌难选赤褐铁矿还原焙烧及铅锌杂质同步脱除效果研究[J].中国矿业,2019,28(12):161-166.
- [12] 李刚,丁成义,宣森炜,等.铁酸钙与赤铁矿非等温还原动力学[J].工程科学学报,2018,40(11):1317-1324.
- [13] 叶恒棣,郑富强,胡兵,等.氢系燃料非高炉炼铁技术现状及发展趋势[J].烧结球团,2022,47(1):10-17.

引用本文:罗立群,雷严明,魏晨曦,等.含铅锌难选赤褐铁矿还原焙烧及动力学[J].矿冶工程,2023,43(2):86-90.