赤泥磁化焙烧—磁选提铁试验研究

刘明霞，胡超杰，姬志杰，张汉泉
（武汉工程大学 资源与安全工程学院，湖北 武汉 430205）

摘要：为了实现赤泥中铁资源的高效回收，本文以广西某地拜耳法赤泥为原料，比较“磁化焙烧—弱磁选”和“强磁抛尾—精矿焙烧—弱磁选”两种方案下焙烧温度、焙烧时间和CO体积分数对弱磁选提铁行为的影响。结果表明：经1 440 kA/m强磁抛尾预处理后，在焙烧温度为650 ℃、焙烧时间为50 min、总气体流量为500 mL/min、CO体积分数为30%条件下，赤泥经“磁化焙烧—弱磁选”处理，可获得铁品位为60.35%，回收率为76.31%的铁精矿，其综合产率和回收率分别为48.93%和60.83%。强磁选预富集作用明显，磁化焙烧则进一步将赤泥中弱磁性的铁矿物还原成强磁性的磁铁矿，便于弱磁选回收铁。

关键词：赤泥；强磁抛尾；磁化焙烧；弱磁选
中图分类号：TF52；TF82 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)02－0074－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.027

Experimental research on red mud magnetization roasting-magnetic separation iron extraction process

LIU Mingxia, HU Chaojie, JI Zhijie, ZHANG Hanquan
(*School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan* 430205, *Hubei, China*)

Abstract: In order to realize the efficient recovery of iron resources in red mud, taking the Bayer red mud from Guangxi as the material, the effects of calcination temperature, roasting time and CO volume fraction on the behavior of weak magnetic separation and iron extraction under the two schemes of "magnetization roasting-weak magnetic separation" and "high-intensity magnetic separation discarding tailings-concentrate roasting-weak magnetic separation" are compared. The results show that after pretreatment with 1 440 kA/m high-intensity magnetic separation discarding tailings, under the conditions of calcination temperature of 650 ℃, calcination time of 50 min, total gas flow of 500 mL/min and CO volume fraction of 30%, red mud is processed by "magnetization roasting-weak magnetic separation", the iron concentrate with iron grade of 60.35% and recovery rate of 76.31% can be obtained and its combined yield and recovery are 48.93% and 60.83%, respectively. The strong magnetic separation pre-enrichment is obvious, and the magnetization roasting further reduces the weakly magnetic iron minerals in the red mud to strongly magnetic magnetite, which facilitates the recovery of iron by weak magnetic separation.

Key words: red mud; high-intensity magnetic separation discarding tailings; magnetization roasting; weak magnetic separation

赤泥是氧化铝工业生产的固体废弃物，随着铝工业的快速发展而日益堆积。据统计，每生产1 t氧化铝，就会产生1～1.3 t的赤泥干粉，截止2020年，全球赤泥储量已超过40亿吨[1-2]。世界上绝大多数氧化铝厂都是以筑坝堆积的方式处理赤泥，不仅占用大量土地，造

收稿日期：2021－09－01；**修回日期**：2021－10－17
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资助项目(20QD66)；武汉工程大学第十一届研究生教育创新基金资助项目(CX2020363)
作者简介：刘明霞(1989—)，女，讲师，从事固体废弃物综合利用研究。
通讯作者：张汉泉(1971—)，男，教授，从事矿物加工、造块理论与工艺研究。

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

成资源浪费；同时，赤泥中的重金属和碱性物质也会渗透入地下，污染坝场周围的土壤和地下水资源，给人类生活带来巨大威胁，因此对于赤泥的安全处置或有效利用迫在眉睫[3-4]。然而，目前关于赤泥的利用，还是以生产建筑材料和环境修复等低值化利用为主，未能充分发挥赤泥的潜在价值[5-6]。

赤泥含有多种有价元素，尤其是采用拜耳法生产氧化铝的赤泥含有较高品位的铁元素，将赤泥中的铁分离提取出来不仅能够缓解赤泥堆存造成的环境污染问题，还能创造巨大的经济效益[7-8]。本文针对广西某地赤泥，分别进行“磁化焙烧—弱磁选”和“强磁抛尾—精矿焙烧—弱磁选”试验，通过比较两种工艺的磁精矿指标和物相分析，确立最佳工艺方案，可为从赤泥中回收铁的相关研究提供一定借鉴。

1　试验原料与方法

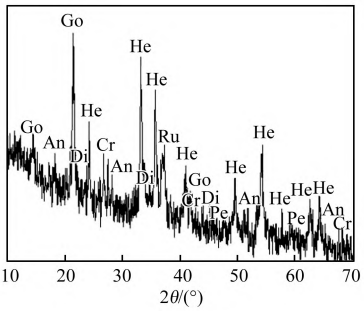
1.1　试验原料

试验原料为广西某地拜耳法生产氧化铝产生的赤泥，呈红色、粉末块状结构，颗粒较细，其 -0.075 mm 粒级占比达 80% 以上。其主要化学成分及物相组成如表 1、图 1 所示。由表 1 可知：赤泥中铁质量分数较高，属于高铁赤泥；杂质中 Al_2O_3 和 SiO_2 质量分数较高，分别达到 19.05% 和 4.89%。由图 1 可知：其主要含铁矿物为赤铁矿、钙铁榴石和针铁矿，杂质铝元素主要以水铝石形式存在，钛元素主要以石榴石和钙钛矿形式存在，其他黏土矿物主要为绿锥石。

表 1　赤泥的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical component and burning loss of red mud　　%

TFe	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	Na_2O	CaO	P_2O_5
41.21	19.05	4.89	5.54	2.91	0.62	0.23
SO_3	Cr_2O_3	ZrO_2	MnO	K_2O	Nb_2O_5	烧损
0.26	0.18	0.20	0.06	0.03	0.01	10 ~ 12



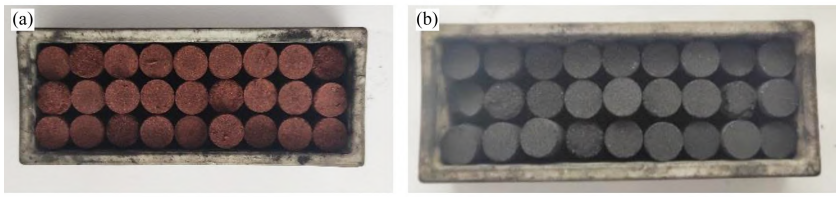
He—赤铁矿；An—钙铁榴石；Pe—钙钛矿；Di—水铝石；Go—针铁矿；Cr—绿锥石；Ru—金红石。

图 1　赤泥 XRD 图谱分析

Fig. 1　XRD pattern of red mud

1.2　试验方法

试验首先利用油压式液压机将矿粉压至∅10 mm × (10 ~ 15 mm)的团块，再将团块置于瓷舟内，并将瓷舟放入焙烧炉内进行气基还原焙烧，焙烧前、后团块如图 2 所示。本文采用两种焙烧方案，分别对赤泥直接进行“磁化焙烧—弱磁选”、“强磁抛尾—磁精矿磁化焙烧—弱磁选”试验，具体流程如图 3 所示。



(a) 焙烧前团块；(b) 700 ℃焙烧矿

图 2　赤泥焙烧前、后团块对比

Fig. 2　Comparison of red mud before and after roasting

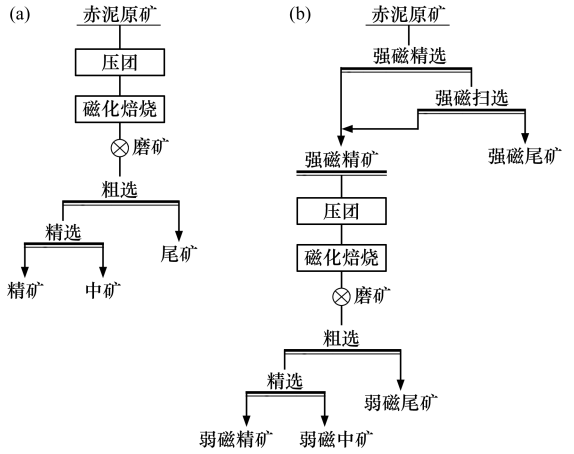
通过磁选工艺指标分析和物相分析对两种方案进行比较。试验所用焙烧炉为 GSL-1400X 型管式气氛炉，磁选设备为 XCSQ-50 × 70 型湿式强磁选机和 RK/CXG-∅50 型的磁选管。

2　结果与讨论

2.1　磁化焙烧—弱磁选试验

赤泥原矿的粒度较细，矿粉间的透气性差，

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



（a）磁化焙烧—弱磁选试验；（b）强磁抛尾－焙烧－弱磁选试验

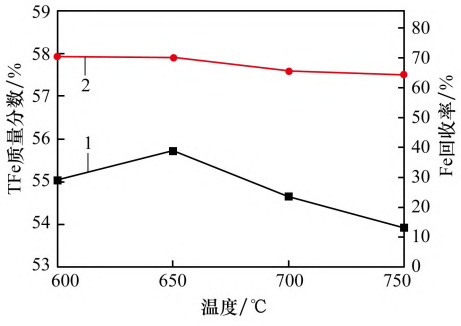
图 3 两种焙烧方案试验流程

Fig. 3 Flowsheets of two roasting tests

不利于赤泥与 CO 的接触[9]。将赤泥制备成团块置于管式炉中焙烧，能够增大 CO 与赤泥的接触几率。本文保持磨矿时间为 1 min，粗选磁场强度为 84.40 kA/m，精选磁场强度为 68.80 kA/m 不变，考察焙烧温度、焙烧时间、CO 体积分数对赤泥中铁回收效果的影响。

2.1.1 焙烧温度

在焙烧时间为 50 min，CO 体积分数为 30%，总气体流量为 500 mL/min 的条件下考察焙烧温度对焙烧产物磁选分离效果的影响，结果如图 4 所示。由图 4 可知：在焙烧温度为 650 ℃时，赤泥铁精矿的全铁质量分数最高为 55.73%，此时回收率为 69.92%，继续升高温度，TFe 质量分数和回收率开始下降，且下降幅度较大。这可能是由于温度过高，产生少量



1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

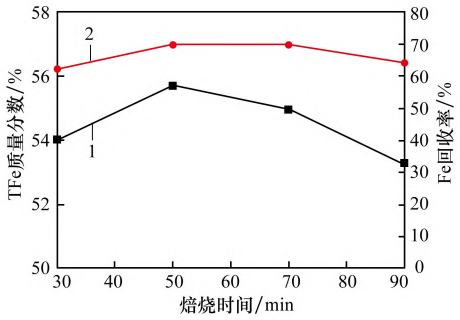
图 4 焙烧温度的影响

Fig. 4 Effect of roasting temperature

与脉石矿物连生的浮氏体，进入到精矿中，导致 TFe 质量分数和回收率开始下降[10]。

2.1.2 焙烧时间

在焙烧温度为 650 ℃，CO 体积分数为 30%，总气体流量为 500 mL/min 的条件下考察焙烧时间对焙烧产物磁选分离效果的影响，结果如图 5 所示。由图 5 可知：在焙烧时间为 10 min 时，铁精矿全铁质量分数为 54.01%，回收率仅为 62.15%；当延长焙烧时间到 50 min 后，精矿品位达到 55.73%，回收率升至 69.92%，继续延长焙烧时间，TFe 质量分数与回收率均呈下降趋势。这是由于当焙烧时间为 10 min 时，反应进程太短，CO 还未来得及与团块内部的赤泥接触反应，导致还原度较低；当焙烧时间超过 50 min 以后，会有少量浮氏体生成，夹带着杂质进入到铁精矿中，致使 TFe 质量分数和回收率下降[11]。



1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

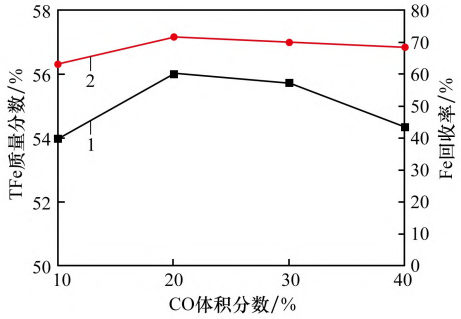
图 5 焙烧时间的影响

Fig. 5 Effect of roasting time

2.1.3 CO 体积分数

在焙烧温度为 650 ℃，焙烧时间为 50 min，总气体流量为 500 mL/min 的条件下考察 CO 体积分数对焙烧产物磁选分离效果的影响，结果如图 6 所示。由图 6 可知，当 CO 体积分数由 10% 增加到 20% 时，精矿的 TFe 质量分数由 53.98% 提升至 56.02%，回收率则由 63.11% 上升至 71.68%。这是由于在这个区间内，CO 体积分数未达到还原氧化铁的最佳饱和度，增加 CO 体积分数，TFe 质量分数和回收率还持续上升；当 CO 体积分数超过 20% 以后，TFe 质量分数和回收率就会开始下降，因此确定 20% 为最佳 CO 体积分数氛围。

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



1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

图 6　CO 体积分数的影响

Fig. 6　Effect of CO volume fraction

综合赤泥原矿直接磁化焙烧—弱磁选的试验结果，在焙烧温度为 650 ℃，焙烧时间为 50 min，CO 体积分数为 20% 时，铁精矿的 TFe 质量分数和回收率最佳，分别为 56.02% 和 71.68%，这与工业化生产的标准相比仍相差甚远。这可能是赤泥中 Al 和 Si 在焙烧过程中，与 Fe_3O_4 发生了固相反应，抑制了铁的还原[12]。因此需要对赤泥进行预先处理，提高原矿中TFe质量分数，降低杂质质量分数，优化工艺流程[13]。

由于赤泥组分嵌布关系复杂，焙烧过程易发生 Fe、Al 类质同象替换。采用物理选矿法进行预处理，赤泥中的铁可以得到富集，一定程度上也能降低 Al 的质量分数。如：李光辉等[14]通过强磁选预处理工艺，使高铝褐铁矿中的 Al_2O_3 由 8.13% 降至 7.36%，便于后期的 Fe、Al 分离；王建月等[15]用强磁选预富集技术处理拜耳法赤泥，可将原矿 TFe 质量分数由 39.42% 预富集至 52.89%，后期再通过深度还原—弱磁选工艺即可实现铁矿物的回收。由此可知，强磁抛尾预处理技术可能有利于赤泥还原焙烧—弱磁选回收铁。

2.2　强磁抛尾—焙烧—弱磁选试验

本文进行 3 组强磁选试验，通过调节磁场强度和磁选方式考察精矿的品位和回收率。将块状赤泥原矿粉碎至 −0.425 mm，经湿式强磁选机抛尾后得到强磁精矿和强磁尾矿两个产品，对两个产品进行化学分析，结果如表 2 所示。

表 2　强磁预处理试验结果

Table 2　Effect of high-intensity magnetic pretreatment

试验编号	磁场强度/($kA\cdot m^{-1}$)	磁选方式	产品	产率(质量分数)/%	TFe 质量分数/%	Fe 回收率(质量分数)/%
1#	1 600	一次粗选	强磁精矿	53.54	45.09	57.26
			强磁尾矿	46.46	38.78	42.74
2#	1 440	一粗一扫	强磁精矿	81.88	44.12	84.45
			强磁尾矿	18.12	36.72	15.55
3#	1 440	一次粗选	强磁精矿	75.19	44.23	78.28
			强磁尾矿	24.81	37.20	21.72

由表 2 可知，原料经过强磁选预处理后全铁品位有所增加，试验所选择的磁场强度和磁选方式对强磁精矿品位影响不大，但回收率的影响较大。综合工艺、经济成本因素以及强磁精矿回收率，拟选用第三组强磁精矿作为焙烧原矿开展后续磁化焙烧—磁选试验，其化学成分及物相分析结果如表 3 和图 7 所示。

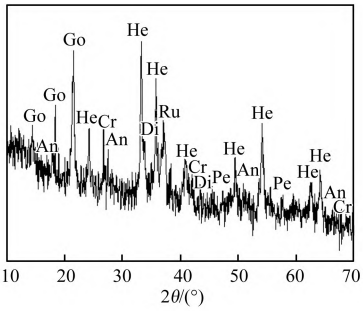
分别对比表 3 与表 1、图 7 与图 1 可知，经过强磁抛尾以后，赤泥中的 TFe 质量分数上升，含铁物相赤铁矿和针铁矿衍射峰强度明显增强，杂质 Al_2O_3、SiO_2 和 TiO_2 的质量分数有所下降。以强磁精矿为原料，固定磨矿时间为 1 min，粗选磁场强度为 84.40 kA/m，精选磁场强度为 68.80 kA/m，再次探究焙烧温度、焙烧时间、

表 3　强磁选精矿的主要化学成分(质量分数)

Table 3　Main chemical component of the iron concentrate obtained from high intensity magnetic separation　　%

TFe	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	Na_2O	CaO	P_2O_5
44.23	17.27	4.02	4.80	2.24	0.82	0.19
SO_3	Cr_2O_3	ZrO_2	MnO	K_2O	Nb_2O_5	—
0.22	0.25	0.17	0.07	0.05	0.01	—

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



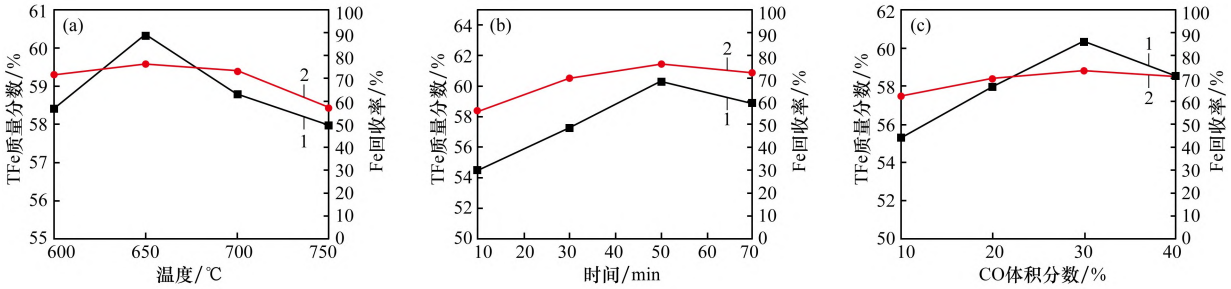
He—赤铁矿；An—钙铁榴石；Pe—钙钛矿；Di—水铝石；Go—针铁矿；Cr—绿锥石；Ru—金红石

图 7 强磁选精矿 XRD 图谱

Fig. 7 XRD pattern of the iron concentrate obtained from high intensity magnetic separation

CO 体积分数对强磁精矿还原焙烧产物磁选分离效果的影响，结果如图 8 所示。

由图 8 可知，经过强磁抛尾以后的磁精矿最佳焙烧制度：焙烧温度为 650 ℃，焙烧时间为 50 min，总气体流量为 500 mL/min，CO 体积分数为 30%，此时弱磁选铁精矿的 TFe 质量分数为 60.35%，Fe 回收率为 76.31%。与方案一相比，新方案的铁精矿的 TFe 质量分数和 Fe 回收率大幅上升，可能是经过抛尾预富集处理后，赤泥中的铝、硅质量分数相对降低，更利于氧化铁的还原。



（a）焙烧温度；（b）焙烧时间；（c）CO 体积分数

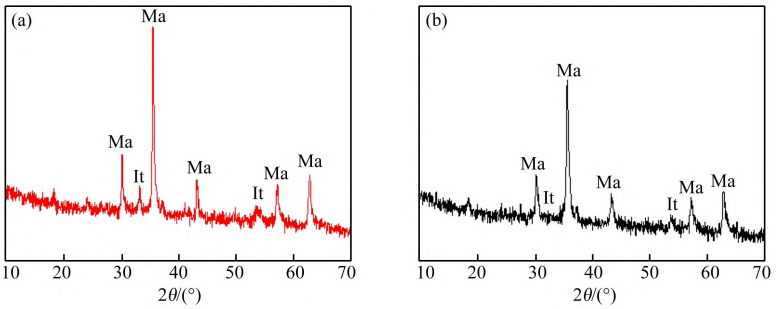
1—TFe 质量分数；2—Fe 回收率。

图 8 强磁抛尾—焙烧—弱磁选试验结果

Fig. 8 Results of high-intensity magnetic separation-magnetic roasting-low intensity magnetic separation

2.3 物相转变分析

对方案一(焙烧温度为 650 ℃、焙烧时间为 50 min、CO 体积分数为 20%)、方案二(焙烧温度为 650 ℃、焙烧时间为 50 min、CO 体积分数为 30%)的弱磁选精矿分别进行物相分析，结果如图 9 所示。



（a）方案一；（b）方案二

Ma—磁铁矿；It—钛铁矿。

图 9 磁化焙烧—弱磁选铁精矿 XRD 图谱

Fig. 9 XRD pattern of the iron concentrate obtained from magnetization roasting and low intensity magnetic separation

由图 9 可知，经过磁化焙烧弱磁选以后，赤泥中的赤铁矿和针铁矿转化为磁铁矿进入到精矿中，此外精矿中还有部分钛铁氧化物的存在[16-17]。与直接磁化焙烧—弱磁选工艺相比，强磁抛尾后再经磁化焙烧—弱磁选所得精矿中磁铁矿的衍射峰强度更高，钛铁氧化物的衍射峰相对强度变化不明显，说明强磁抛尾预处理对产品弱磁选分离有促进效果。

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

3　最优方案

通过比较两种方案的铁精矿指标和物相分析结果，确定强磁抛尾—磁化焙烧—弱磁选工艺提铁效果更佳。最优试验条件：强磁抛尾磁场强度为 1 440 kA/m，气基焙烧时间为 50 min，总气体流量为 500 mL/min，CO 体积分数为 30%，焙烧温度为 650 ℃。在此条件下，经过“一粗一精”弱磁选后所得精矿 TFe 质量分数和 Fe 回收率分别为 60.35% 和 76.31%，综合产率和回收率分别为 48.93% 和 60.83%。整个工艺的数质量流程图如图 10 所示。

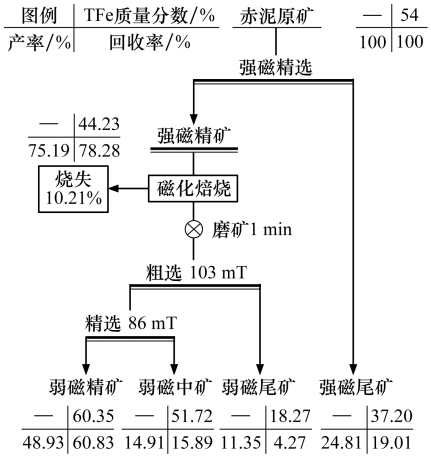


图 10　强磁抛尾—精矿焙烧—弱磁选试验数质量流程

Fig. 10　Quantity and quality flow chart of high-intensity magnetic tailing jetting-concentrate roasting-low intensity magnetic separation test

4　结　论

（1）试验原料为高铁高铝赤泥，铁主要以赤铁矿和针铁矿形式存在，铝主要以水铝石的形式存在。原料粒度较细，－0.038 mm 粒级占比为 50% 左右，易结块，焙烧前需压团处理。

（2）物相分析结果显示，强磁抛尾后精矿中的赤铁矿和针铁矿相比原矿质量分数大幅度提升，焙烧后得到的弱磁选精矿中磁铁矿衍射峰强度与直接焙烧—磁选得到的产品相比有明显提高。

（3）综合两种方案，最终选择方案二为最佳方案。在强磁抛尾磁场强度为 1 440 kA/m，气基焙烧时间为 50 min，总气体流量为 500 mL/min，CO 体积分数为 30%，焙烧温度为 650 ℃条件下，得到 TFe 质量分数为 60.35%，Fe 回收率为 76.31% 的铁精矿，其综合产率和回收率分别为 48.93% 和 60.83%。

参考文献：

[1] 周发星. 赤泥中有价金属提取与综合利用进展[J]. 中国金属通报,2019(10):274－275.
ZHOU Faxing. Progress in extraction and comprehensive utilization of valuable metals from red mud[J]. China Metals Bulletin,2019(10):274－275.

[2] 齐川. 赤泥中有价金属提取的进展[J]. 轻金属,2019(6):6－10;49.
QI Chuan. Progress in the extraction of valuable metals from red mud[J]. Light metals,2019(6):6－10;49.

[3] 刘松辉,管学茂,冯春花,等. 赤泥安全堆存和综合利用研究进展[J]. 硅酸盐通报,2015,34(8):2194－2200.
LIU Songhui,GUAN Xuemao,FENG Chunhua,et al. Research progress on safe stockpiling and comprehensive utilization of red mud[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society,2015,34(8):2194－2200.

[4] 薛生国,晓飞,孔祥峰,等. 赤泥碱性调控研究进展[J]. 环境科学学报,2017,37(8):2815－2828.
XUE Shengguo,LI Xiaofei,KONG Xiangfeng,et al. Journal of environmental sciences,2017,37(8):2815－2828.

[5] 南湘莉,张延安,刘燕,等. 我国主要赤泥种类及其对环境的影响[J]. 过程工程学报,2009(9):459－464.
NAN Xiangli,ZHANG Yan′an,LIU Yan,et al. Main red mud species in China and their effects on environment[J]. Journal of Process Engineering,2009(9):459－464.

[6] KUMAR A,SARAVANAN T J,BISHT K,et al. A review on the utilization of red mud for the production of geopolymer and alkali activated concrete[J]. Construction and Building Materials,2021,302:124170.

[7] 顾汉念,郭腾飞,马时成,等. 赤泥中铁的提取与回收利用研究进展[J]. 化工进展,2018,37(9):3599－3608.
GU Hannian,GUO Tengfei,MA Shicheng,et al. Progress in chemical industry and engineering,2018,37(9):3599－3608.

[8] KHAIRUL M A,ZANGANEH J,MOGHTADERI B. The Composition,recycling and utilization of Bayer red mud[J]. Resources,Conservation & Recycling,2019,141:483－498.

[9] 孙永峰,董风芝,刘炯天,等. 拜耳法赤泥选铁工艺研究[J]. 金属矿山,2009(9):176－178.
SUN Yongfeng,DONG Fengzhi,LIU Jiongtian,et al. Research

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

on iron separation from red mud by bayer process[J]. Metal Mine,2009(9):176 – 178.

[10] RAI S, NIMJE M. J, CHADDHA M J, et al. Recovery of iron from bauxite residue using advanced separation techniques[J]. Minerals Engineering,2019,134:222 – 231.

[11] 张淑敏,袁帅,韩跃新,等. 气基还原焙烧—弱磁选回收赤泥中铁矿物试验[J]. 金属矿山,2018(6):179 – 182.
ZHANG Shumin, YUAN Shuai, HAN Yuexin, et al. Experimental study on recovery of iron from red mud by gas-based reduction roasting-low intensity magnetic separation[J]. Metal Mine,2018(6):179 – 182.

[12] LI P, LIU Z, YAN H, et al. Recover iron from bauxite residue (red mud)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2019,252:042037.

[13] 邵国强,谢朝晖,闫冬,等. 强磁选和流态化磁化焙烧联合工艺回收赤泥中的铁[J]. 中国粉体技术,2019,25(6):1 – 6.
SHAO Guoqiang, XIE Zhaohui, YAN Dong, et al. Recovery of iron from red mud by combined high intensity magnetic separation and fluidized magnetization roasting[J]. China powder technology,2019,25(6):1 – 6.

[14] 李光辉,刘牡丹,姜涛,等. 高铝铁矿石工艺矿物学特征及铝铁分离技术[J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(5):1165 – 1171.
LI Guanghui, LIU Mulan, JIANG Tao, et al. Process mineralogy of high alumina iron ore and its Separation technology[J]. Journal of central south university (science and technology),2009,40(5):1165 – 1171.

[15] 王健月,崔卫华,张以河,等. 拜耳法赤泥中铁的强磁选预富集—深度还原—弱磁选试验[J]. 金属矿山,2016(1):60 – 64.
WANG Jianyue, CUI Weihua, ZHANG Yihe, et al. Experimental study on preconcentration, deep reduction and low intensity magnetic separation of iron in bayer process red mud[J]. Metal Mine,2016(1):60 – 64.

[16] 曾超,何维. 赤泥物相的X射线粉末衍射Rietveld法定量分析研究[J]. 冶金分析,2014,34(8):1 – 6.
ZENG Chao, HE Wei. Quantitative analysis of red mud phase by X-ray powder diffraction rietveld method[J]. Metallurgical analysis,2014,34(8):1 – 6.

[17] 刘世丰,刘世鸿,曾建民. 热处理赤泥的物相及粒径和比表面积[J]. 矿产综合利用,2020(5):169 – 178.
LIU Shifeng, LIU Shihong, ZENG Jianmin. Phase, particle size and specific surface area of heat-treated red mud[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2020 (5): 169 – 178.

(上接第66页)

[4] 刘立广,陈生利. 韶钢6号高炉提高块矿比攻关实践[J]. 南方金属,2019,230(5):37 – 39.
LIU Liguang, CHEN Shengli. The practice of improving ratio of lump ore for BF 6# at SGIS[J]. Southern Metals, 2019, 230(5):37 – 39.

[5] 孟德尚,王佳兴. 华西北钢热球团矿烘干块矿生产实践[C]//2008年河北冶金学会炼铁技术暨学术年会. 石家庄:河北省冶金学会,2008,223 – 224.
MENG Deshang, WANG Jiaxing. Production practice of drying lump ore in hot pellet mine of West North Steel[C]//Iron making technology and academic annual meeting of Hebei Metallurgical Society in 2008. Shijiazhuang: Hebei Metallurgical Society,2008,223 – 224.

[6] CLIXBY G. Influence of softening and melting properties of burden properties of burden materials on blast furnace operation[J]. Ironmaking and Steelmaking,1986(13):169.

[7] LJUNG A L, STAFFANLUNDSTR M T, DANIEL B, et al. Influence of air humidity on drying of individual iron ore pellets[J]. Drying Technology: An International Journal, 2011, 29(9 – 12):1101 – 1111.

[8] TSUKERMAN T, DUCHESNE C, HODOUIN D. On the drying rates of individual iron oxide pellets[J]. International Journal of Mineral Processing,2007,83(3 – 4):99 – 115.

[9] 潘姝静,宋彦坡,彭小奇,等. 链箅机球团矿干燥过程多场耦合数值模拟[J]. 钢铁研究,2012(6):11 – 15.
PAN Shujing, SONG Yanpo, PENG Xiaoqi, et al. Numerical simulation for coupled multi – field transfer on pellet drying process in travelling grate[J]. Research on Iron and Steel, 2012(6):11 – 15.

[10] 李洋,李伯全,张西良,等. 球团干燥过程的数学建模与数值模拟研究[J]. 烧结球团,2018,43(4):36 – 42.
LI Yang, LI Boquan, ZHANG Xiliang, et al. Mathematical modeling and numerical simulation of pellet drying process[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):36 – 42.

[11] 郭建慧,李伯全,谢鸥. 基于Fluent的球团干燥过程仿真分析[J]. 信息技术,2015(2):22 – 25.
GUO Jianhui, LI Boquan, XIE Ou. Analysis of the pellet layer the process of drying based on Fluent[J]. Information Technology,2015(2):22 – 25.

[12] 潘姝静. 链箅机球团矿干燥过程多场耦合数值模拟与优化[D]. 长沙:中南大学,2012.
PAN Shujing. Numerical simulation and optimization for coupled multi – field transfer on the iron ore pellets drying process in the grate[D]. Changsha: Central South University,2012.

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