赤泥铁精矿烧结-火法提铁的可行性研究①

林瑛[1], 高建军[2,3], 王锋[2,3], 武兵强[2,3], 吴巍[1]
(1.钢铁研究总院有限公司冶金工艺研究所, 北京 100081; 2.钢铁研究总院先进钢铁流程及材料国家重点实验室, 北京 100081; 3.北京钢研氢冶金技术研究院有限公司, 北京 100081)

摘 要: 提出了一种赤泥铁精矿烧结-火法提铁的创新技术路径。结果表明,高铝赤泥铁精矿烧结优化条件为:燃料比 12%、水分 18.5%~19.0%、碱度 R_2≈4.85(生石灰作为熔剂),所得烧结矿冶金性能可满足小型冶炼设备要求。通过向高铝冶炼终渣外配 17% CaO 进行改性,1 450 ℃时终渣黏度降至 0.61 Pa·s,实现渣铁高效分离,终渣可以用作预熔渣或者合成渣。与传统赤泥回收方法相比,该工艺流程短、成本低、处理量大,可为赤泥在固体废物熔炼炉或小型实验高炉中的资源化利用提供理论依据。

关键词: 赤泥铁精矿; 火法提铁; 烧结矿; 碱度; 黏度; 拜耳法; 高铝赤泥
中图分类号: TF631 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.036
文章编号: 0253-6099(2026)03-0238-06

Feasibility Study on Iron Extraction from Iron Concentrate of Red Mud by Sintering and Pyrometallurgical Process

LIN Ying[1], GAO Jianjun[2,3], WANG Feng[2,3], WU Bingqiang[2,3], WU Wei[1]
(1.*Metallurgical Process Research Institute, Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing* 100081, *China*; 2.*State Key Laboratory of Advanced Steel Processes and Products, Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing* 100081, *China*; 3.*Beijing Hydrogen Metallurgy Technology Research of CISRI Co., Ltd., Beijing* 100081, *China*)

Abstract: An innovative technical route consisting of sintering and pyrometallurgical processing technique was proposed to extract iron from an iron concentrate of red mud. The results show that under the following optimal sintering conditions for high-alumina iron concentrate, including fuel ratio of 12%, moisture content of 18.5%-19.0%, and basicity (R_2) of approximately 4.85 (with quicklime as flux), the obtained sinter has its metallurgical properties meet the requirements of small-scale smelting equipment. To improve the fluidity of final high-alumina slag from blast furnace smelting, 17% calcium oxide is added for modification, leading to the viscosity of the slag down to 0.61 Pa·s at 1 450 ℃. As a result, an efficient slag-iron separation can be actualized. Such slag can be used to prepare premelted slag or synthetic slag. Compared with conventional technique for iron recovery from red mud, this process is characterized by a short flow, low cost and large processing capacity. This research provides a theoretical basis for resource utilization of red mud by using solid waste smelting furnaces and laboratory-scale blast furnaces.

Key words: iron concentrate of red mud; pyrometallurgical iron extraction; sinter; basicity; viscosity; Bayer process; high-alumina red mud

赤泥是氧化铝生产过程中产生的固体废物,每生产 1 t 氧化铝,会产生 1~2 t 赤泥[1-2]。据统计,2024 年全国新增赤泥量约为 1.15 亿 t,目前全国赤泥总累计堆存量超过 15 亿 t。我国赤泥综合利用率低,仅 12%左右。目前赤泥主要用于土壤改良、废水吸附以及建筑用材等[3-6]。赤泥的主要化学成分为 Fe_2O_3、Al_2O_3、SiO_2、CaO、Na_2O 和 TiO_2 等,不同生产工艺产生的赤泥成分存在显著波动[7-10]。

世界上约 95%的氧化铝采用拜耳法生产,所产生的赤泥中 Fe_2O_3 含量较高,经磁选后 TFe 品位可超过

① **收稿日期**: 2025-12-10
作者简介: 林瑛(1981—),男,辽宁沈阳人,硕士,高级工程师,主要从事炼钢工艺及固废资源化利用。E-mail:linying23456@163.com
通信作者: 王锋(1982—),男,陕西渭南人,博士,正高级工程师,主要从事低碳冶金、固废资源化利用。E-mail:flywise@126.com

45%。若将赤泥磁选所得铁精矿(简称赤泥铁精矿)作为主要含铁原料,配入烧结工序,并采用固体废物熔炼炉或小高炉进行还原提铁,可形成一条跨行业的赤泥高效资源化技术路线。与之前处理方法相比,该路线具备流程短、成本低、同时回收铁和铝、大宗消纳赤泥的显著优势。然而,将高比例赤泥铁精矿用于烧结及冶炼,面临的核心技术难点是赤泥铁精矿高 Al_2O_3 含量问题:高 Al_2O_3 含量会导致熔化温度升高、液相黏度增大、烧结矿强度下降;渣的黏度高,影响渣铁分离[11]。

本文针对赤泥铁精矿烧结-冶炼提铁全流程,重点研究高铝渣改性问题,降低高铝渣黏度,改善烧结矿性能,旨在开发一条高效、经济、可行的赤泥铁资源回收与高值化利用新途径。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

主要烧结原料为拜耳法赤泥铁精矿、石灰石粉、生石灰和焦粉,其化学成分如表 1 所示。焦粉的固定碳含量为 85%。

表 1　主要烧结原料化学成分(质量分数)

Table 1　Composition of raw materials for sintering　　%

原料	TFe	FeO	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	TiO_2	P	S	烧损	水分
赤泥铁精矿	49.50	0.58	—	0.76	2.23	0.07	11.49	3.94	0.074	0.038	—	10.4
石灰石粉	0	0	—	47.16	3.57	4.01	0.78	0	0	0	41.07	—
生石灰	—	—	—	79.98	2.56	4.71	1.79	0.189	—	—	6.81	—
焦粉	0	0	5.16	4.30	48.24	1.98	35.60	0.042	0.71	—	—	—

1.2　试验方案设计

主要探索赤泥铁精矿用于烧结工序的可行性,研究燃料配比(焦粉用量)、熔剂种类与配比、混合料水分含量对烧结过程的影响。烧结杯试验配料方案见表 2。

表 2　烧结杯试验配料方案

Table 2　Batching scheme for sintering cup test

试验方案	配料/kg				燃料配比/%	混合料水分/%
	赤泥	生石灰	石灰石粉	焦粉		
1	25.09	0	5.50	3.40	11.11	17.92
2	25.09	0	5.50	3.40	11.11	21.43
3	20.00	5.07	0	1.75	6.98	21.55
4	21.50	4.68	0	2.60	9.93	19.02
5	21.50	4.68	0	2.91	11.92	18.88
6	21.50	4.68	0	2.91	11.92	18.40
7	21.50	4.68	0	2.91	11.92	18.22

注:所有配料中 FeO 含量均为 12%±3%。

1.3　试验方法

1.3.1　模拟计算的方法

采用 FactSage 软件(FACT 氧化物数据库)模拟赤泥铁精矿添加 CaO 后的液相生成行为。设定体系为:100 g 赤泥铁精矿分别添加 0、5、10、15 g 纯 CaO,使用 Phase Diagram 和 Equilib 模块计算 1 100~1 500 ℃下的相组成与液相区变化,分析开始烧结温度(液相比例达到 5%)、最佳烧结温度(液相比例约 40%)及完全熔融温度(全部为液相)。

1.3.2　烧结杯试验方法

烧结杯试验装置由点火器、烧结杯、抽风室、除尘器和抽风机组成,其中,烧结杯尺寸为 Φ 200 mm×700 mm,烧结点火负压为 6.0 kPa,点火温度为(1 000±50 ℃),烧结负压为 10.0 kPa。烧结矿被倒出后,在 2.0 m 高的落下装置中进行 3 次落下试验,并测定成品率及粒度组成;将 10~40 mm 的烧结矿按一定粒度比例取样,按照 ISO 转鼓试验要求,进行强度指标检验。

1.3.3　烧结矿分析

采用 X 射线衍射仪(Bruker D8 Advance)分析矿物组成;按 ISO 4695:2021 测定赤泥铁精矿还原性;采用熔滴炉测定软熔滴落性能。

1.3.4　炉渣性质测试

使用旋转黏度计(RTW-10)测定渣样黏度;采用高温显微镜(Leitz)测定熔化温度,通过观测形态变化确定熔点。

2　试验结果与讨论

2.1　赤泥铁精矿烧结的可行性研究

2.1.1　热力学模拟

根据表 1 的成分,用 FactSage 软件模拟赤泥铁精矿中不同 CaO 添加量下的液相生成比例,结果如图 1 和图 2 所示。其中液相比例(%)=(液相质量/系统总质量)×100%。由图 1 可知,随着 CaO 添加量增加,相同温度下混合矿液相比例显著提高;CaO 添加量 15%时,在约 880 ℃下混合矿中约有 50%的液相,满足烧结过程对初始液相黏结的基本要求。1 000 ℃时,CaO 添加量从 10%提高到 15%时,混合矿液相比例约提高了 2.5 倍。

由图 2 知,CaO 添加量 0~20%时,混合矿开始烧结温度呈下降趋势;CaO 添加量大于 30%后,混合矿开始烧结温度回升。最佳烧结温度与开始烧结温度的变化趋势相似,最佳区间为 CaO 添加量 14%~24%。

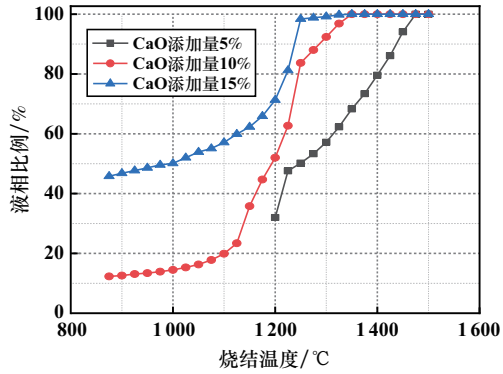


图 1 不同 CaO 添加量下烧结温度对液相生成量的影响

Fig. 1 Effect of sintering temperature on liquid phase formation with varying CaO additions

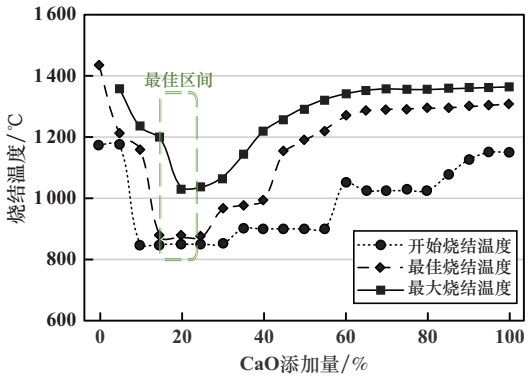


图 2 不同 CaO 添加量对烧结温度的影响

Fig. 2 Effect of CaO additions on sintering temperature

模拟结果表明,向赤泥铁精矿中添加适量的 CaO,烧结形成的液相面积和烧结温度可以满足工艺要求。加入一定量的 CaO 改变了混合矿体系,形成了低熔点化合物,为后续烧结杯试验提供了理论依据。后续烧结杯试验工艺中,CaO 添加量为 15%~30%(以生石灰形式加入)。

2.1.2 烧结杯试验

基于热力学模拟,按照表 2 的试验方案进行烧结杯试验,以探索高比例赤泥铁精矿烧结的可行性。初期试验结果表明,采用石灰石粉作为熔剂并搭配 11.11%的燃料配比(方案 1),石灰石分解吸热导致反应过程热量严重不足,烧结时间长达 62 min 且成矿性差。通过提高混合料水分至 21.43%(方案 2)来改善制粒与传热,但未能补偿基础热量的缺乏,成矿性未获改善。这一结果明确了使用生石灰替代石灰石作为熔剂的必要性,生石灰能提供有效的 CaO 并释放消化热。然而,在方案 3 中燃料投入过低,未能形成有效的烧结矿,基于此,系统地提高了燃料配比(方案 4~7),当燃料配比提升至 11.92%时,成功获得了合格的烧结矿,烧结时间显著缩短至 31.5 min,成品率达71.91%,转鼓强度为 55.85%。后续对水分微调(方案 6~7),所得指标与方案 5 相近,但稳定性稍差。

根据烧结杯的试验结果,方案 1 可以成矿,但烧结时间太长。改良工艺参数后的方案 2~4 均未成矿,方案 5~7 可以成矿。

进一步对比方案 1、5、6、7 的烧结矿化学成分,结果见表 3。

表 3 烧结矿化学成分(质量分数)

Table 3 Chemical composition of sinter %

试验方案	TFe	CaO	SiO_2	R_2	MgO	Al_2O_3	R_4
1	43.16	8.26	3.47	2.38	0.86	10.77	0.64
5	40.55	14.94	3.08	4.85	0.93	10.30	1.19
6	40.55	14.94	3.08	4.85	0.93	10.30	1.19
7	40.55	14.94	3.08	4.85	0.93	10.30	1.19

注:所有配料中 FeO 含量均为 12%±3%;R_2 和 R_4 分别为二元碱度和四元碱度,无量纲。

分别测定方案 1、5、6、7 所得烧结矿的转鼓指数、垂直烧结速度、成品率、烧损,结果如表 4 所示。方案 1、5、6、7 的粒度检测结果见表 5。

表 4 烧结试验结果

Table 4 Sintering test results

试验方案	转鼓指数/%	垂直烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	烧损/%
1	73.67	11.29	76.71	13.91
5	55.85	22.22	71.91	9.50
6	54.67	28.23	71.80	9.36
7	54.73	31.46	77.98	9.74

注:烧结的固体燃料消耗约为 121 kg/t。

表 5 烧结矿粒度组成

Table 5 Size distribution of sinter

试验方案	粒级(mm)产率/%					
	+40	25~40	16~25	10~16	5~10	-5
1	1.19	8.37	17.65	24.55	24.95	23.29
5	0.57	4.06	18.48	23.47	25.33	28.09
6	0.46	5.79	20.23	22.20	23.12	28.20
7	0.86	4.53	20.14	24.33	28.13	22.02

上述试验结果表明,方案 5 所得烧结矿化学成分、转鼓指数、垂直烧结速度、成品率等关键指标基本满足烧结矿的一般质量要求,证明了以高比例拜耳法赤泥

铁精矿为主要铁源进行烧结在技术上是可行的。

基于优化方案 5 及验证方案 6、7,确定赤泥铁精矿烧结的优化工艺参数为:碱度 $R_2 \approx 4.85$ ($R_4 \approx 1.19$)、混合料水分控制在 18.5%~19.0%、燃料配比 12%(干基)、使用生石灰作熔剂。生石灰的使用显著改善了混合料的成球性,并有助于降低固体燃耗(相比石灰石粉方案)。

固体燃耗(约 121 kg/t)相对较高,未来可考虑从降低料层厚度、优化燃料粒度、优化配碳量和水分、改善制粒效果等方面改良工艺参数。混合料中 FeO 含量控制在 12%左右有助于形成足够的液相以保证强度,但需注意高 FeO 含量可能对烧结矿还原性产生负面影响,需在强度与还原性之间寻求平衡。

根据方案 5 所得烧结矿的成分,预测渣中 Al_2O_3 含量高达 32.05%,远超常规高炉渣允许上限(17%),需通过外配 CaO 进行改性。方案 5 预测的冶炼终渣化学成分见表 6,炉渣黏度试验中 CaO 外配添加量设计(相对于基础炉渣质量)见表 7。

表 6　方案 5 预测的冶炼终渣化学成分(质量分数)

Table 6　Chemical composition of final smelting slag from scheme 5　　%

Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	TiO_2	Na_2O
32.05	41.10	2.67	13.77	8.79	1.63

表 7　炉渣黏度试验中 CaO 外配添加量设计

Table 7　Addition of CaO in slag viscosity test

试验编号	CaO 添加量/%
1#	18.16
2#	17.07
3#	15.95
基础组	14.81
4#	13.64
5#	12.43
6#	11.19
7#	9.91
8#	8.59
9#	7.24

2.2　冶金性能与炉渣行为的适用性评估

2.2.1　矿物组成的分析

对方案 5 所得烧结矿进行 XRD 分析,结果如图 3 所示。烧结矿中主要的含铁矿相是 FeO 和 Fe_3O_4,这与配料中的碳含量较高有关。脉石主要以钙铝黄长石($Ca_2Al_2SiO_7$)和三钙铝化合物形式存在,烧结黏结液相的主要组分是 CaO、Al_2O_3、SiO_2 形成的化合物,钙铝黄长石与其他氧化物(如 SiO_2、CaO 或 Na_2O)共存时,形成低共熔混合物,显著降低其实际熔点,最低可以降到约 900 ℃,是高铝赤泥铁精矿烧结的核心低熔点物相。相比于传统铁矿烧结(以铁酸钙为主),高铝赤泥铁精矿中 Al_2O_3 含量高,烧结时可抑制铁酸钙形成。

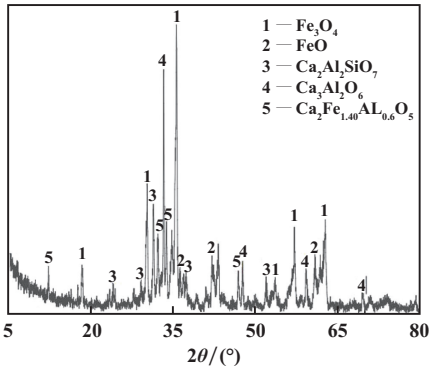


图 3　烧结矿 XRD 图谱

Fig. 3　XRD pattern of sinter

2.2.2　还原性与熔滴性能分析

烧结矿冶金性能分析结果见表 8。由表 8 可知,烧结矿还原性达 86.17%,其 $T_{10\%}$(开始软化温度)为 1 020 ℃,$T_{40\%}$(软化终了温度)为 1 318 ℃,T_s(熔化开始温度)为 1 320 ℃,T_d(滴落温度)为 1 419 ℃。ΔT_1(软化区间)为 298 ℃,ΔT_2(滴落区间)为 99 ℃,整体性能可满足小高炉或固废熔炼炉冶炼要求。

表 8　烧结矿冶金性能分析结果

Table 8　Analysis results of metallurgical properties of sinter

还原性/%	$T_{10\%}$/℃	$T_{40\%}$/℃	ΔT_1/℃	T_s/℃	ΔP/kPa	T_d/℃	ΔT_2/℃	ΔH/mm	S/(kPa·℃)
86.17	1 020	1 318	298	1 320	12.6	1 419	99	40	784

2.2.3　预测终渣的性能分析

根据方案 5,经过计算得到预测终渣(Al_2O_3 含量 32.05%)。预测终渣的熔化温度和黏度-熔化温度曲线分别见图 4 和图 5。由图 4 可知,预测终渣完全熔化温度为 1 450 ℃,熔化温度较高。由图 5 可知,预测终渣的黏度在 1 325 ℃之后开始显著下降,1 400 ℃时,黏度小于 1 Pa·s,达到可流动状态。之后随着熔化温度升高,渣的黏度变化不大。

2.2.4　改性后渣的性能分析

根据表 7 中 CaO 的添加量,计算渣的熔化温度和黏度变化情况,结果分别如图 6 和图 7 所示。在冶炼渣中,CaO 添加量为 17.07% 时,熔化温度最低,为 1 425 ℃;CaO 添加量低于 13.6%时,熔化温度升高至 1 475 ℃以上;说明加入适量的 CaO 可以降低渣的熔点。

根据 2#试验的成分,进行了制样,并对其黏度和流动指数进行检测。1 450 ℃时,渣的黏度为 0.61 Pa·s,流动指数为 6.67,流动性良好。在渣中加入 17%的 CaO 后,其流动性可以满足固废炉或者小高炉冶炼的要求。

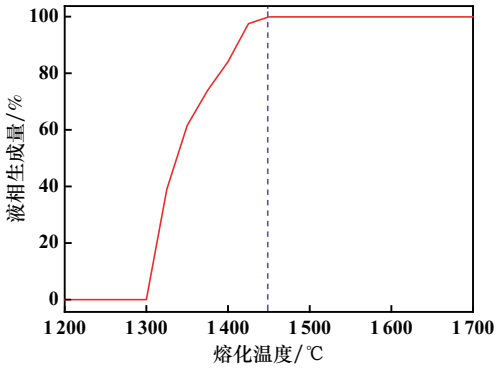


图 4 预测终渣的熔化温度

Fig. 4 Melting temperature of final predicted slag

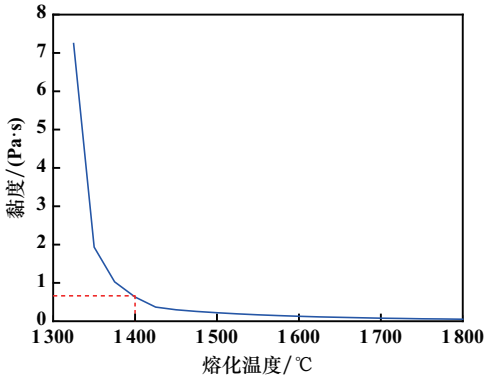


图 5 预测终渣的黏度-熔化温度曲线

Fig. 5 Viscosity-melting temperature curve of final predicted slag

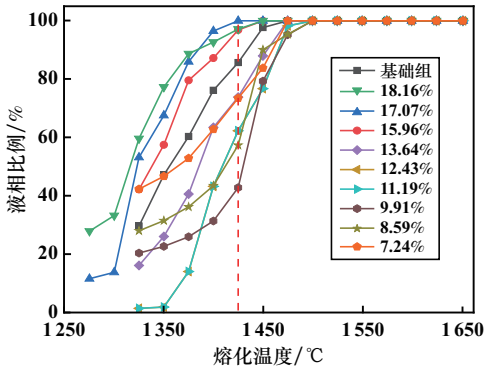


图 6 不同 CaO 添加量渣的熔化温度

Fig. 6 Melting temperature of slag with different CaO additions

加入 CaO 提高了体系的碱度(CaO/SiO_2),在高碱度和高 Al_2O_3 含量下形成了一定量的 $Ca_2Al_2SiO_7$,$Ca_2Al_2SiO_7$与其他氧化物形成低共熔混合物,改变了原来渣的物相,破坏了原来渣中高熔点 Al—O 网络结构。这些因素共同作用导致炉渣熔点和黏度降低,流动性提高。向高 Al_2O_3 终渣(Al_2O_3 含量约 32%)中外配约 17%CaO(相对于基础渣质量),可将其熔化温度降至 1 425 ℃,并在 1 450 ℃时获得良好的流动性($\eta \approx$ 0.61 Pa·s),可以解决赤泥铁精矿 Al_2O_3 含量高导致黏度高的问题。

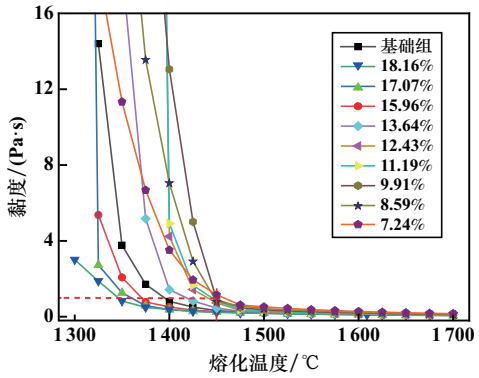


图 7 不同 CaO 添加量渣的黏度-熔化温度曲线

Fig. 7 Viscosity-melting temperature curves of slag with different CaO additions

2.2.5 改性炉渣在工业应用中的可行性分析

2#试验终渣的化学成分见表 9。由表 9 可知,2#试验终渣成分与钢铁冶炼用合成渣、预熔渣的成分比较接近,可以考虑作为合成渣或者预熔渣,使赤泥铁精矿烧结-火法提铁的终渣得到充分利用,避免二次污染和渣中铝元素的浪费。

表 9 2#试验终渣的化学成分(质量分数)

Table 9 Chemical composition of final slag from Scheme 2# %

Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	TiO_2	Na_2O
29.84	44.68	2.86	12.97	8.14	1.51

赤泥磁选-烧结-还原提铁的技术路线具备工业化应用潜力。该技术路线对消纳赤泥作用显著,可高效回收赤泥中多种有益元素,减少赤泥对环境的二次污染。与湿法冶炼工艺相比,该工艺流程更短;与磁选工艺相比,该工艺可以同时回收铁和铝;同时该工艺能耗比还原焙烧低,渣可以二次利用,能有效减少资源损耗。

3 结论

1) 确立了以高比例赤泥铁精矿为主要铁源、采用“烧结-冶炼”火法提铁的可行工艺路线。烧结优化条件为:燃料比 12%、水分 18.5%~19.0%、碱度 $R_2 \approx 4.85$(使用生石灰作熔剂),在此条件下所得烧结矿冶金性能满足小型冶炼设备要求。

2）高铝赤泥铁精矿烧结的黏结相为 CaO、Al_2O_3、SiO_2 形成的低共熔氧化物(如钙铝黄长石),而传统铁矿烧结的黏结相为铁酸钙体系。

3）通过向高铝终渣(Al_2O_3 含量约 32%)外配约 17%的 CaO 进行改性,可将其在 1 450 ℃时的黏度降至 0.61 Pa·s,实现良好的渣铁分离。改性后的终渣成分接近合成渣或预熔渣,具备高值化利用潜力,避免了二次污染。

参考文献(References):

[1] 熊浩,张涣清,杜禹芃,等. 赤泥的资源化利用研究进展[J]. 中国井矿盐, 2023,54(3):24-26.
XIONG Hao, ZHANG Huanqing, DU Yujiao, et al. Reviews of research on the use of red mud as a resource[J]. China Well and Rock Salt, 2023,54(3):24-26.

[2] 陈吉忠,马幸,梁婉. 赤泥资源化利用最新研究进展及展望[J]. 中国资源综合利用, 2023,41(3):105-111.
CHEN Jizhong, MA Xing, LIANG Wan. Latest research progress and prospect of red mud resource utilization[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023,41(3):105-111.

[3] 张晨霞. 烧结赤泥对磷酸镁水泥力学性能的影响及重金属固化效果研究[J]. 新型建筑材料, 2019,46(5):50-53.
ZHANG Chenxia. Influence of red mud on mechanical property of magnesium phosphate cement and solidification effect of heavy metals[J]. New Building Materials, 2019,46(5):50-53.

[4] 戴剑,陈平,刘荣进,等. 利用赤泥研制铁铝酸盐水泥及掺钡活化研究[J]. 非金属矿, 2018,41(4):90-92.
DAI Jian, CHEN Ping, LIU Rongjin, et al. Preparation of ferroaluminate cement with red mud and the activation of barium doped clay[J]. Non-Metallic Mines, 2018,41(4):90-92.

[5] 王晓,张磊,罗忠涛,等. 赤泥对道路硅酸盐水泥性能和矿物组成的影响[J]. 建筑材料学报, 2017,20(5):774-779.
WANG Xiao, ZHANG Lei, LUO Zhongtao, et al. Effect of red mud on properties and mineral composition of portland cement for road[J]. Journal of Building Materials, 2017,20(5):774-779.

[6] 任孟杰,郭焱. 利用拜耳法赤泥和氟化钙污泥制备烧结砖块[J]. 环境工程学报, 2017,11(8):4797-4802.
REN Mengjie, GUO Yan. Using Bayer red mud and calcium fluoride sludge to make co-fired bricks[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017,11(8):4797-4802.

[7] 李彬,王枝平,曲凡,等. 赤泥中有价金属的回收现状与展望[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019,44(2):1-10.
LI Bin, WANG Zhiping, QU Fan, et al. Present situation and prospect of recovery of valuable metals from red mud[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 44(2):1-10.

[8] WANG L, CHEN L, TSANG D C W, et al. Mechanistic insights into red mud, blast furnace slag, or metakaolin-assisted stabilization/solidification of arsenic-contaminated sediment[J]. Environment International, 2019,133:105247.

[9] DAVRIS P, BALOMENOS E, PANIAS D, et al. Selective leaching of rare earth elements from bauxite residue (red mud), using a functionalized hydrophobic ionic liquid[J]. Hydrometallurgy, 2016,164:125-135.

[10] 杨慧,房辉,程志远,等. 赤泥资源化综合利用研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2023,41(6):109-115.
YANG Hui, FANG Hui, CHENG Zhiyuan, et al. Research progress on comprehensive resource utilization of red mud[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023,41(6):109-115.

[11] 潘建,马雯卓,朱德庆,等. Al_2O_3 对铁矿烧结球团及高炉冶炼的影响[J]. 钢铁研究学报, 2021,33(10):1095-1108.
PAN Jian, MA Wenzhuo, ZHU Deqing, et al. Effect of Al_2O_3 on sintering, pelletizing and blast furnace smelting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021,33(10):1095-1108.

引用本文:林瑛,高建军,王锋,等. 赤泥烧结-火法提铁的可行性研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):238-243.

LIN Ying, GAO Jianjun, WANG Feng, et al. Feasibility study on iron extraction from iron concentrate of red mud by sintering and pyrometallurgical process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):238-243.