节能环保与综合利用

高铁赤泥钙化还原过程液相生成抑制机理

李 靖[1]，郑富强[1]，景 涛[1]，代友训[1]，王洪阳[2]，侯传兵[3]，陈 玉[3]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 安徽理工大学，安徽 淮南 232001；
3. 日照钢铁有限公司，山东 日照 276800）

摘要：高铁赤泥中赋存大量铁资源难以回收利用，钙化还原—磨选方法可实现赤泥中铁、铝组分的高效分离。针对高铁赤泥钙化还原过程中易形成液相，导致物料熔化和设备黏结的问题，本文提出分段式钙化还原—磨选技术路线，研究不同温度制度下，高铁赤泥钙化还原产物的形态、金属化率、微观结构、金属铁晶粒的生长规律和相关磨选指标。结果表明：采用分段钙化还原焙烧，可在低温阶段完成铁氧化物还原至金属铁和钙铝化合物形成的反应过程，在高温阶段完成金属铁颗粒的聚集长大过程，将低熔点物形成和高温焙烧分离进行，抑制液相生成。采用第一段 1 125 ℃焙烧 30 min、第二段 1 200 ℃焙烧 40 min 的分段焙烧制度，还原过程无明显液相生成，金属铁颗粒的平均粒度达到 21.52 μm。还原产物经磨选后，所获得的还原铁粉 TFe 质量分数和 Fe 回收率分别达到 92.84% 和 78.68%。本文研究成果可为高铁赤泥的资源化利用提供理论依据。

关键词：高铁赤泥；钙化还原；还原铁粉；液相形成；磨矿磁选
中图分类号：TF09 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)05－0088－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.079

Mechanism of inhibiting liquid phase formation in calcification reduction process of iron-rich red mud

LI Jing[1], ZHENG Fuqiang[1], JING Tao[1], DAI Youxun[1], WANG Hongyang[2], HOU Chuanbing[3], CHEN Yu[3]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 2. Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, Anhui, China; 3. Rizhao Steel Co., Ltd., Rizhao 276800, Shandong, China)

Abstract: It is difficult to recycle a large amount of iron resources in iron-rich red mud, and the calcification reduction-grinding method can realize the efficient separation of iron and aluminum components in red mud. In order to solve the problem that the liquid phase is easy to form during the calcification reduction process of iron-rich red mud, which leads to the melting of materials and the adhesion of equipment, a segmented calcification reduction-grinding technology route is proposed; the morphology, metallization rate, microstructure, growth law of metallic iron grains and related grinding indexes of calcification reduction products of iron-rich red mud under different temperature regimes are studied. The results show that the segmented calcification reduction roasting can complete the reaction process of iron oxide reduction to the formation of metallic iron and calcium-aluminum compounds at low temperature, and the aggregation and growth process of metallic iron particles at high temperature, and the formation of low melting point and high-temperature roasting can be separated to inhibit the formation of liquid phase. The first stage is roasted at 1 125 ℃ for 30 min and the second stage is roasted at 1 200 ℃ for 40 min, without obvious liquid phase formation during the reduction process, and the average particle size of

收稿日期：2024－05－09；**修回日期**：2024－07－17
基金项目：湖南省重点研发计划资助项目(2023SK2079)；2022 年长沙市“小荷”青年人才创新项目
作者简介：李 靖(1982—)，男，高级工程师，从事钢铁冶金方面的研究与应用。
通信作者：郑富强(1988—)，男，高级工程师，从事资源综合利用方面的研究与应用。

the metal iron particles reaches 21.52 μm. After grinding, the TFe mass fraction and Fe recovery rate of reduced iron powder are obtained up to 92.84% and 78.68%, respectively. The results can provide a theoretical basis for the resource utilization of iron-rich red mud.

Key words: iron-rich red mud; calcification reduction; reduced iron powder; liquid phase formation; grinding magnetic separation

赤泥是工业提取氧化铝时排出的工业固体废弃物，因氧化铁含量大，外观与赤色泥土相似，故被称为赤泥。采用拜耳法生产每吨氧化铝会产出 1 ~2 t 的赤泥。我国赤泥产生量已超过 1 亿吨/a，主要分布在山东、河南、河北等地区。赤泥中除了含有大量铁资源外，还含有比较高的铝、钠、重金属等成分，且各元素赋存形式复杂，难以通过经济有效的方式进行分离，综合利用率不足 10%。除小部分被回收利用外，其余均以堆存处置为主，累积堆存量已超过 10 亿吨[1]。由于具有强碱性，赤泥在堆存过程中不但极易造成环境污染，也造成了大量铁、铝资源的浪费。

目前赤泥综合利用的主要方法有两大类：第一类是作为路用材料或建筑陶瓷材料的整体利用方法[2-3]；第二类是通过选矿、湿法或火法冶金方法提取其中的铁、铝等有价组分[4-6]。赤泥作为建材整体利用的方法仅能部分解决赤泥堆存引起的环境污染问题，并不能有效回收其中的有价资源。由于我国铝土矿资源储量有限，对外依存度逐年升高，其中进口量的 50% 来自几内亚铝土矿。几内亚铝土矿中的主要物相是三水铝石，该矿具有高铁、中铝、低硅特点，在碱溶过程中赤铁矿、铝针铁矿、一水软铝石、金红石等因不易反应而最终进入渣相，致使产生的赤泥具有高铁、高铝和低硅的性质，这为高铁赤泥作为铁资源进行提取利用提供了原料基础[7]。赤泥提铁的研究主要集中在直接物理分选、磁化焙烧—磁选、还原熔分、钠化焙烧—磁选、钙化焙烧磁选等方面。直接物理分选可以将赤泥中铁氧化物进行部分富集，用作钢铁原料，但产生的大量低铁尾矿成为更难利用的固废[8]。磁化焙烧虽能将铁氧化物转变为磁性矿物通过磁选与脉石分离，但由于焙烧温度低，与铁紧密共存的铝组分不能得到很好的分离，导致铁精矿品质差[9]。还原熔分可直接获得铁水，但由于赤泥中铁含量低、铝含量高，势必导致生产过程能源消耗高、经济性差的问题[10]。钠化焙烧需要添加大量的钠盐，钠盐熔点低，在焙烧过程中极易造成结渣等问题，影响设备顺行，且钠盐的循环利用也使得流程加长，能源消耗增高[11-12]。钙化还原焙烧过程中引入钙盐不仅能提高焙烧产物中金属铁颗粒的尺寸，通过磁选分离获得还原铁粉，同时获得的富含钙 - 铝化合物尾矿可作为水泥原料使用，回收铁的同时兼顾了尾矿的综合利用。由于铁铝元素在铝针铁矿中紧密共生，因此需要较高的温度才能实现钙和铝元素的化合反应。而在高温下物料中易形成液相，会造成结渣和黏结设备的问题。因此，对赤泥钙化还原过程中液相生成的抑制调控至关重要。

本文以典型的高铁低硅赤泥为原料，采用钙化还原—磨选的方法实现其中铁资源的高效回收；针对高铁赤泥钙化还原过程中易形成液相的问题，提出分段式钙化还原—磨选技术路线，研究不同温度制度下高铁赤泥钙化还原产物液相生成、金属化率、微观结构、金属铁晶粒生长规律和相关磨选指标，以期为高铁赤泥的资源化利用提供理论及技术支撑。

1　试验原料与方法

1.1　原料性能

本研究所用的高铁赤泥原料主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知，高铁赤泥主要元素为铁和铝，其中 TFe 质量分数为 47.45%，Al_2O_3 质量分数为 11.58%。该原料的 TFe 含量低、Al_2O_3 和 Na_2O 含量高是限制其直接作为炼铁原料的主要原因。高铁赤泥的粒度如表 2 所示。由表 2 可知：高铁赤泥粒度较粗，主要分布在(0.045,0.075] mm 范围内，占比达到 42.33%，≤0.075 mm 粒级占比仅为 31.28%，远低于普通铁矿造球要求。高铁赤泥中 >0.045 mm 粒级中铁和铝元素的含量与其他

粒级相比偏析较严重，均低于其他粒级。<0.045 mm 的各粒级中铁和铝元素含量相差不明显。另外在各粒级范围内，铁元素和铝元素分布率规律相似，这说明在宏观层面，铁元素和铝元素在原料中分布一致，通过重选方法已难以再进一步分离铁和铝组分。

表 1 高铁赤泥的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of iron-rich red mud %

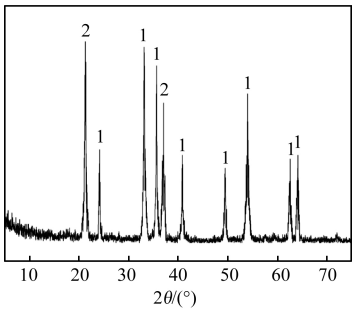
TFe	Al_2O_3	TiO_2	SiO_2	Na_2O	CaO	MgO
47.45	11.58	3.87	2.40	1.70	0.60	0.05

表 2 高铁赤泥粒度分布(质量分数)

Table 2 Particle size distribution of iron-rich red mud %

粒级/mm	产率/%	Fe		Al_2O_3	
		品位	分布率	品位	分布率
>0.15	26.40	39.42	21.93	10.34	23.57
(0.075,0.15]	42.33	50.84	45.35	11.48	41.96
(0.045,0.075]	19.55	50.26	20.71	13.97	23.58
≤0.045	11.73	48.61	12.01	10.75	10.88
合计	100.00	—	100.00	—	100.00

高铁赤泥的 XRD 图谱如图 1 所示。由图 1 可见，高铁赤泥中主要物相为赤铁矿和铝针铁矿。高铁赤泥 SEM 微观结构分析如图 2 所示。由图 2 可见，原料中颗粒之间相互独立，除少量连生体外，无明显的包裹形态，其中最大粒径为 250 μm 以上。铁元素在各颗粒中分布较为均匀，无明显富集现象。大部分铝元素与铁元素紧密共存分布在铝针铁矿颗粒中，仅极少量颗粒中有铝元素富集。硅元素和铝元素赋存紧密。从微观结构和主要元素赋存状态可知，该赤泥原料铁和铝元素难以通过物理分选方法分离。



1—赤铁矿；2—铝针铁矿。

图 1 高铁赤泥的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD of iron-rich red mud

1.2 试验方法

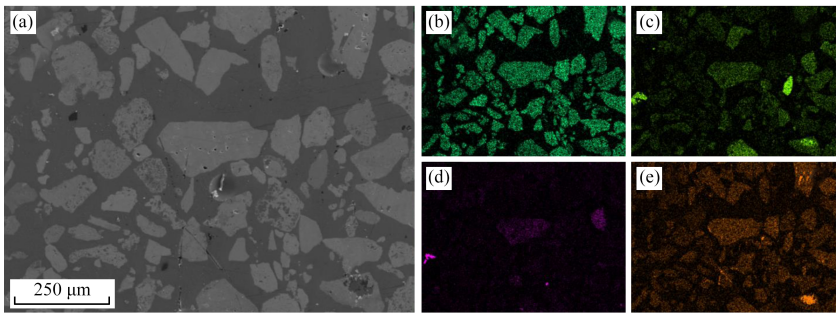
试验将高铁赤泥原料和提前充分消化的氧化钙混匀，设置氧化钙添加量为 18%，将其压制成 ∅20 mm×8 mm 的团块，将团块置于 105 ℃烘箱中干燥。还原焙烧试验在高温还原炉中进行。为保障充分且持久的还原气氛，试验采用焦粉作为还原剂，在设定温度下将干燥的团块和过量焦粉置于刚玉坩埚中还原，还原结束后将坩埚在惰性气氛保护下冷却至室温。采用还原团块进行性能检测和磨矿磁选试验。

2 结果与讨论

2.1 高铁赤泥钙化还原焙烧反应行为

2.1.1 焙烧产物形态变化规律

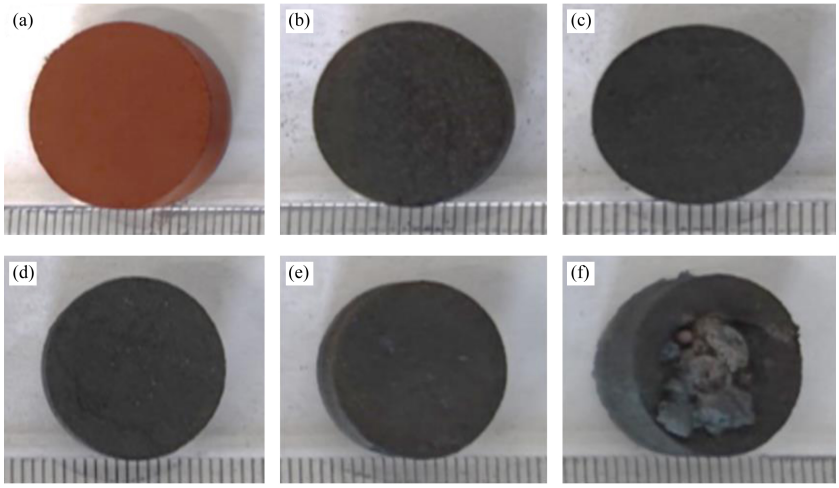
在焙烧时间为 60 min 条件下，得到不同温度下还原焙烧产物的形貌图如图 3 所示。由图 3 可见，还原焙烧前，高铁赤泥因主要物相为赤铁矿和铝针铁矿，压团块外观呈红色。当还原焙烧温度在 1 100~1 175 ℃范围时，还原焙烧产物呈灰黑色，团块形态无明显变化，且无液相生成。当



(a) 高铁赤泥微观形貌。元素分布：(b) Fe；(c) Al；(d) Si；(e) O

图 2 高铁赤泥的 SEM 图

Fig. 2 SEM of iron-rich red mud



（a）还原前。还原焙烧温度/℃：（b）1 100；（c）1 125；（d）1 150；（e）1 175；（f）1 200

图 3　温度对高铁赤泥还原产物形态影响

Fig. 3　Effect of temperature on morphology of reduction products of iron-rich red mud

还原焙烧温度达到 1 200 ℃时，还原焙烧团块表面有较明显的膨胀现象，且团块表面有明显冷凝后的液相，表明还原焙烧过程中有液相生成，其冷却过程中在团块边缘形成鼓包。液相的形成虽然有利于金属铁颗粒尺寸的长大，但是在回转窑实际生产过程中，高温段形成的液相随物料在向窑头运行中温度下降，液相冷凝造成窑内结圈，从而影响正常生产。因此，在还原焙烧过程中除了要促使金属铁颗粒尺寸的长大，同时还要避免液相的大量生成。

2.1.2　焙烧产物金属化率变化规律

在焙烧时间为 60 min 条件下，得到还原焙烧温度对产物金属化率的影响如图 4 所示。由图 4 可见，随着焙烧温度的升高，还原产物的金属化率逐渐增高。当焙烧温度从 1 100 ℃升高至 1 125 ℃时，还原产物的金属化率从 82.85% 显著增加至 89.74%，当还原温度继续升高时，还原产物金属化率升高不明显。当焙烧温度超过 1 150 ℃时，还原焙烧产物的金属化率超过 91%。升高还原焙烧温度虽能提高产物金属化率，但当金属化率提高至 91% 以上时，高铁赤泥中仍有部分铁氧化物难以被完全还原。

2.1.3　焙烧产物物相转变规律

不同还原温度下焙烧产物 XRD 图谱如图 5 所示。由图 5 可见，各温度下还原焙烧产物中主要物相为金属铁和七铝酸十二钙。随着还原焙烧温度升高，金属铁衍射峰逐渐减弱，而七铝酸十二钙的衍射峰有所增强。这是因为焙烧温度的升高

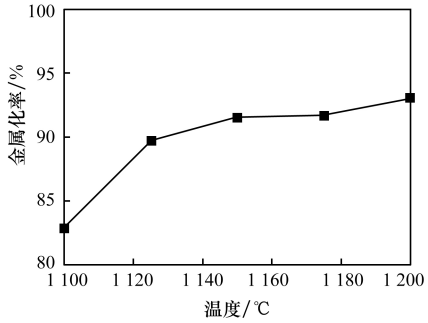
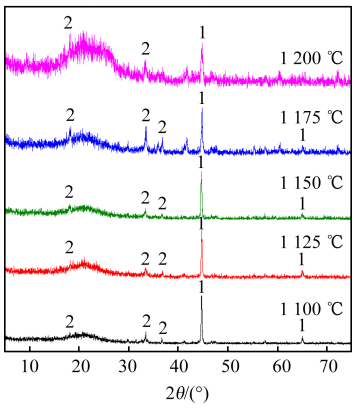


图 4　温度对高铁赤泥钙化还原焙烧产物金属化率的影响

Fig. 4　Effect of temperature on metallization ratio of reduction products of iron-rich red mud



1—金属铁（Fe）；2—七铝酸十二钙（$12CaO·7Al_2O_3$）。

图 5　温度对高铁赤泥钙化还原焙烧产物物相的影响

Fig. 5　Effect of temperature on mineral phases of reduction products of iron-rich red mud

促使 CaO 与 Al_2O_3 反应生成钙铝化合物，但由于其结晶度较差时，X 衍射背景峰杂乱，金属铁衍射峰相对强度减弱。当焙烧温度达到1 200 ℃时，还原焙烧产物中金属铁和七铝酸十二钙的衍射峰均有所减弱，此时在 18°～25°处的“馒头峰”明显增强，这是由于温度过高导致还原焙烧产物中生成了大量无定型的液相产物。

2.1.4 *焙烧产物微观结构演变规律*

焙烧温度对高铁赤泥钙化还原产物中金属铁颗粒尺寸的影响如图 5 所示。由图 5 可见，1 100 ℃还原焙烧产物中金属铁颗粒的尺寸较小，以独立小颗粒弥散状分布为主。随着温度升高至 1 125～1 150 ℃时，独立的金属铁颗粒之间相互连接，发生明显的聚集行为，颗粒尺寸有所增大。当焙烧温度达到 1 175～1 200 ℃时，金属铁颗粒主要以独立的类球形颗粒存在。采用 ImagePro 软件对金属铁颗粒尺寸进行统计分析如图5(f)所示。由图5(f)可知，当焙烧温度超过 1 150 ℃时，金属铁颗粒的粒度显著增大，当焙烧温度为1 200 ℃时，还原焙烧产物中金属铁颗粒的尺寸达到 20.36 μm。然而，根据 1 200 ℃下还原产物的形态可知，在此温度下还原产物中已明显产生较多液相。在实际生产过程中，液相过多会造成设备结渣严重，影响生产顺行。

2.2 高铁赤泥分段钙化还原焙烧反应行为

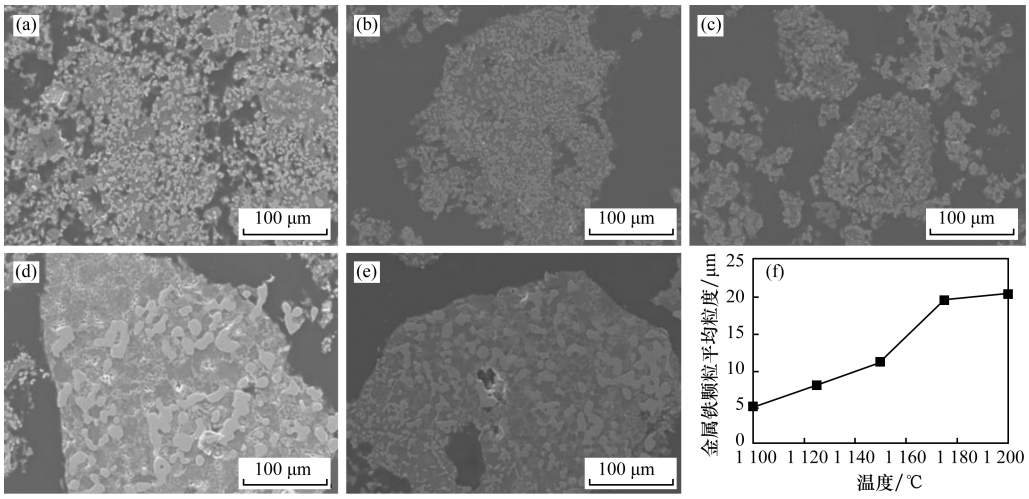
高铁赤泥还原过程形成的FeO是液相的主要成分之一。赤铁矿及(铝)针铁矿中的 Fe 均为 +3 价，赤铁矿在还原过程中首先被还原为磁铁矿，而(铝)针铁矿也被还原分解为磁铁矿和氧化铝。然后磁铁矿的还原历程为 $Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$。当还原焙烧产物中有 FeO 生成时，FeO 会与高铁赤泥中的 SiO_2 反应生成低熔点的铁橄榄石，也与 Al_2O_3、CaO 及 SiO_2 等反应生成低熔点化合物。铁氧化物还原为金属铁，必须经历 FeO 生成阶段，而金属铁快颗粒聚集长大需要高温环境。因此，如果要抑制还原焙烧过程中液相的生成，铁氧化物还原至金属铁的阶段需在低于低熔点固溶体的熔化温度下进行，待铁氧化物完成还原成金属铁后，再通过升高物料温度，实现金属铁颗粒的聚集长大。

2.2.1 *焙烧产物形态变化规律*

配钙高铁赤泥团块经一段 1 125 ℃还原焙烧 30 min，此时还原焙烧产物中的铁氧化物被还原为金属铁。在二段直接采用更高温度进行还原焙烧 40 min，得到焙烧产物的形貌如图 7 所示。由图 7 可见，当第二段还原焙烧温度达到 1 200 ℃时，还原焙烧产物中无液相生成。这说明分段还原焙烧可有效抑制还原过程中液相的形成。第二段高温焙烧过程中主要存在金属铁颗粒长大及钙铝化合物生成两个独立反应。

2.2.2 *焙烧产物微观结构演变规律*

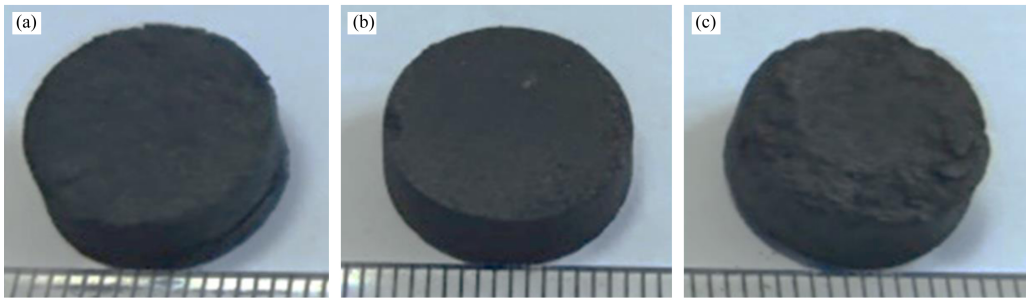
高铁赤泥分段钙化还原焙烧产物微观结构及金属铁颗粒平均粒径如图8所示。由图8可知，



焙烧温度/℃：(a) 1 100；(b) 1 125；(c) 1 150；(d) 1 175；(e) 1 200；(e) 1 200。(f) 金属铁颗粒平均粒度

图 6 温度对高铁赤泥钙化还原焙烧产物微观结构及铁颗粒粒度影响

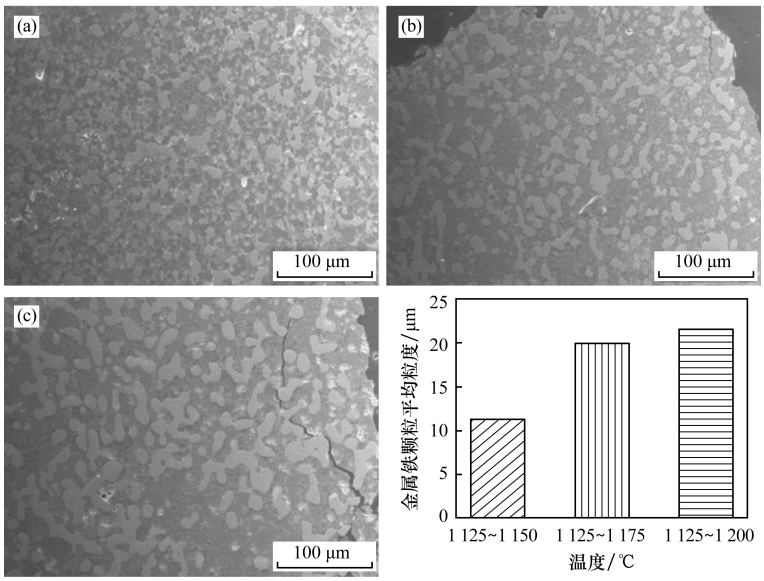
Fig. 6 Effect of temperature on microstructure and iron particle size of reduction products of iron-rich red mud



焙烧温度/℃：（a）1 150；（b）1 175；（c）1 200

图 7　第二段温度对高铁赤泥钙化还原焙烧产物形态影响

Fig. 7　Effect of the second stage temperature on morphology of reduction products of iron-rich red mud



焙烧温度/℃：（a）1 150；（b）1 175；（c）1 200。（d）金属铁颗粒平均粒度

图 8　分段温度制度对高铁赤泥钙化还原焙烧产物微观结构及铁颗粒粒度的影响

Fig. 8　Effect of stage roasting temperature system on microstructure and iron particle size of reduction products of iron-rich red mud

随着分段钙化还原焙烧中第二段还原焙烧温度的提高，还原焙烧产物中微细的金属铁颗粒相互连接并聚集长大现象更加明显，金属铁颗粒尺寸明显增大。当第二段焙烧温度到达 1 175 ℃时，还原焙烧产物中金属铁颗粒尺寸已达到 19. 85 μm。当第二段焙烧温度升高至 1 200 ℃时，还原焙烧产物中金属铁颗粒尺寸长大至 21. 52 μm。因此，在第一段采用较低焙烧温度，可抑制还原焙烧过程中液相的形式，而提高第二段焙烧温度，可促使第一段已经被还原的微细金属铁颗粒开始聚集长大，且此过程中无液相形成。

2. 3　高铁赤泥钙化焙烧制度对磨选指标的影响

高铁赤泥钙化还原效果决定后续磨选过程中还原铁粉的品位及铁回收率。在磨矿细度 < 0. 045 mm 粒级质量分数为 90. 37%、磁场强度为 1 000 Gs 条件下，得到不同钙化还原制度下还原焙烧产物的磨选指标如图 9 所示。由图 9 可见，采用一段 1 125 ℃焙烧 30 min、二段 1 150 ℃焙烧 40 min 还原产物的磁选结果与直接 1 150 ℃焙烧 60 min 还原产物的磁选结果在同一水平，此结果表明通过两段还原焙烧可有效缩短二段高温还原焙烧时间。直接采用 1 200 ℃焙烧 60 min 还原产物磁选获得还原铁粉的 TFe 质量分数为 92. 65%，Fe 回收率为 76. 58%。而采用第一段 1 125 ℃焙烧30 min、第二段 1 200 ℃焙烧 40 min 焙烧制度下的还原产物磁选后，获得的还原铁粉 TFe 质量分数和 Fe 回收

率分别为 92.84% 和 78.68%。结果表明，采用第二段升温促使金属铁颗粒长大的方式对保证还原铁粉 TFe 含量和提高 Fe 回收率具有促进作用。

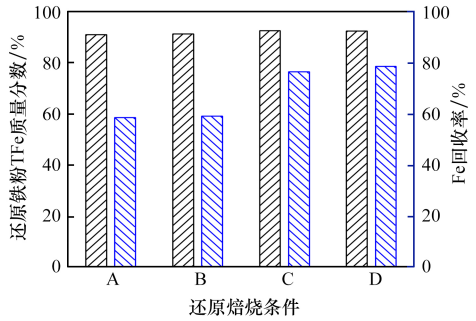


图 9 还原焙烧制度对磨选指标的影响

Fig. 9 Effect of reduction roasting system on the index of reduced iron powder

（注：A—1 150 ℃、60 min；B—1 125 ℃、30 min + 1 150 ℃、40 min；C—1 200 ℃、60 min；D—1 125 ℃、30 min + 1 200 ℃、40 min。）

2.4 高铁赤泥分段钙化还原抑制焙烧产物中液相生成的机理

采用常规直接高温钙化还原焙烧时，铁氧化物的还原反应、铝和钙的化合反应均在同一高温条件下进行。在高温还原条件下，铁氧化物被还原为亚铁时，亚铁易与其他脉石组分形成低熔点化合物，低熔点化合物在高温条件下易形成液相，最终导致反应体系物料相互黏结和黏附在反应器内壁。分段钙化还原焙烧通过控制还原过程温度场分布，避免亚铁在高温条件下参与反应，从而抑制液相的大量生成，其机理示意如图 10 所示。由图 10 可见，在较低温度下铁氧化物首先被还原为金属铁，铝和钙组分化合成为七铝十二钙，在此过程中虽然会因亚铁的逐渐增加形成低熔点化合物，但由于温度较低，低熔点物不会形成大量液相，而当亚铁进一步还原至金属铁后，低熔点化合物量减少；然后，在较高温度下焙烧可实现微细粒金属铁颗粒的聚集和长大，使其粒度达到磨选分离要求。

3 结 论

（1）高铁赤泥主要元素为铁和铝，其中 TFe、Al_2O_3 质量分数分别为 47.45%、11.58%，0.075 ~ 0.150 mm 粒级质量分数达到 42.33%。高铁赤泥中主要物相为赤铁矿和铝针铁矿，在各粒级范围内，铁元素和铝元素分布率规律相似，铁元素在各颗粒中分布较为均匀，无明显富集现象，大部分铝元素与铁元素紧密共存分布在铝针铁矿颗粒中，其铁和铝元素难以通过物理分选方法分离。

（2）在高铁赤泥常规钙化还原过程中，铁氧化物被还原为金属铁并聚集长大，铝和钙组分化合成为七铝酸十二钙。还原温度的升高虽然有助于提高还原产物的金属化率和增加金属铁颗粒的粒度，但在还原温度达到 1 200 ℃时，虽然金属铁颗粒平均粒径达到 20.36 μm，铁氧化物被还原至亚铁阶段时，其易与非铁组分形成低熔点化合物，在高温还原过程中易形成液相，导致物料黏结，影响生产过程顺行。

（3）分段钙化还原焙烧在温度较低阶段完成铁氧化物还原至金属铁和钙铝化合物形成的反应过程，在高温阶段完成金属铁颗粒的聚集长大过程，避免亚铁在高温条件下参与反应，从而抑制液相的大量生成。采用第一段 1 125 ℃焙烧 30 min、第二段 1 200 ℃焙烧 40 min 的分段焙烧制度，还原过程无明显液相生成，金属铁颗粒平均粒度达到21.52 μm，还原产物经磨选后，所获得

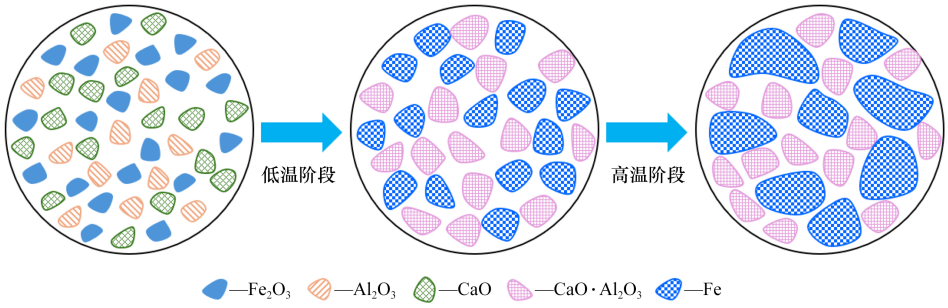


图 10 分段钙化还原焙烧的机理示意

Fig. 10 Schematic diagram of the mechanism of fractional calcification reduction roasting

的还原铁粉 TFe 质量分数和 Fe 回收率分别达到 92.84% 和 78.68%。分段式钙化还原焙烧可通过控制还原过程的温度场分布实现。

参考文献：

[1] 于目深,王旭江,孙德强,等. 赤泥资源化利用现状研究[J]. 中国矿业,2022,31(6):1 – 9.
YU Mushen, WANG Xujiang, SUN Deqiang, et al. Study on the current situation of red mud resource utilization [J]. China Mining Magazine,2022,31(6):1 – 9.

[2] 董红军,陈忠平,刘琼,等. 堆积型铝土矿赤泥混凝技术路用研究与应用[J]. 轻金属,2023(2):15 – 21.
DONG Hongjun, CHEN Zhongping, LIU Qiong, et al. Research and application of red mud concrete technology for road application of accumulation-type bauxite[J]. Light Metals,2023(2):15 – 21.

[3] 张宁,王梦雅,王川,等. 赤泥基注浆加固材料制备与性能研究[J]. 现代隧道技术,2023,60(1):270 – 280.
ZHANG Ning, WANG Mengya, WANG Chuan, et al. Study on the preparation and performance of red mud-based grouting reinforcement materials[J]. Modern Tunnelling Technology,2023,60(1):270 – 280.

[4] 杜云鹏,童雄,谢贤,等. 赤泥中钪等有价金属资源综合利用现状及展望[J]. 中国稀土学报,2023,41(2):256 – 271.
DU Yunpeng, TONG Xiong, XIE Xian, et al. Current status and prospect of comprehensive utilization of valuable metal resources such as scandium in red mud [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2023,41(2):256 – 271.

[5] 叶鑫,赵爱春,刘宸嘉,等. 赤泥中有价金属的回收工艺研究进展[J]. 湿法冶金,2023,42(3):229 – 235.
YE Xin, ZHAO Aichun, LIU Chenjia, et al. Research progress on recovery of valuable metals from red mud [J]. Hydrometallurgy of China,2023,42(3):229 – 235.

[6] 刘金瑞,李慧,梁精龙,等. 赤泥中提取有价金属元素的研究进展[J]. 矿产综合利用,2022(3):107 – 112.
LIU Jinrui, LI Hui, LIANG Jinglong, et al. Progress on extraction of valuable metals elements from red mud [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2022 (3):107 – 112.

[7] 郑富强,戴妍妮,胡兵,等. 高铁低硅赤泥钠化还原的物相转变及铁分离特性[J]. 硅酸盐通报,2024,43(1):209 – 218.
ZHENG Fuqiang, DAI Yanni, HU Bing, et al. Phase transformation and iron separation characteristics of high iron and low silicon red mud using sodium reduction [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(1):209 – 218.

[8] 张谌虎,石开仪,陈鹏,等. 回收某赤泥中铁的选矿试验研究[J]. 矿业研究与开发,2020,40(7):156 – 159.
ZHANG Chenhu, SHI Kaiyi, CHEN Peng, et al. Beneficiation experiment study on recovery of iron from red mud[J]. Mining Research and Development,2020, 40(7):156 – 159.

[9] 肖军辉,邹凯,钟楠岚,等. 拜耳法赤泥钙盐氯化还原焙烧—弱磁选提铁[J]. 中国矿业大学学报,2023,52(3):585 – 595.
XIAO Junhui, ZOU Kai, ZHONG Nanlan, et al. Iron extraction from bayer red mud using chloridizing reduction roasting-Low intensity magnetic separation with calcium salts[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2023,52(3):585 – 595.

[10] 朱忠南,吕国志,李晓飞,等. 高铁赤泥熔融还原过程中钠铝硅的行为研究[J]. 有色金属科学与工程,2023,14(6):773 – 780.
ZHU Zhongnan, Lü Guozhi, LI Xiaofei, et al. Study on the behavior of sodium, aluminum and silicon in the melting reduction of high-iron red mud[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2023,14(6):773 – 780.

[11] 武兵强,高建军,万新宇,等. 赤泥铁精粉直接还原实验研究[J]. 矿冶工程,2022,42(6):139 – 141.
WU Bingqiang, GAO Jianjun, WAN Xinyu, et al. Experimental study on direct reduction of iron concentrate powder[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2022, 42(6):139 – 141.

[12] 李家林. 某拜耳法赤泥直接还原选铁试验[J]. 现代矿业,2022,38(8):154 – 156.
LI Jialin. Experiments of iron selection in a red mud from bayer process by direct reduction[J]. Modern Mining, 2022,38(8):154 – 156.