

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.12.006

低品位富铁铝土矿烧结熟料浸出行为

何毅¹, 周龔¹, 王奕博², 潘晓林², 于海燕²

(1. 中国有色金属建设股份有限公司, 北京 100029;

2. 东北大学 冶金学院, 沈阳 110819)

摘要:随着我国铝土矿品位的逐年降低,拜耳法很难满足氧化铝生产要求,烧结法的优势日益突出,而熟料浸出是烧结法生产氧化铝的关键工序,直接影响氧化铝浸出率、碱耗、赤泥沉降性能等技术经济指标。因此,本研究以低品位富铁铝土矿烧结熟料为原料,系统考察浸出工艺参数对熟料浸出性能的影响及其机理。结果表明,浸出液分子比、苛碱浓度、碳酸浓度和浸出温度、时间、液固比均能影响熟料浸出性能;矿石中氧化铁含量提高能够降低烧结熟料氧化铝浸出率,但降低幅度不大;在分子比 1.25、苛碱浓度 40 g/L、碳酸浓度 25 g/L、浸出温度 80 °C、浸出时间 20 min、液固比 5 的最佳浸出条件下,低品位富铁铝土矿烧结熟料 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率可分别达到 85% 和 95% 以上。

关键词:低品位铝土矿;熟料;浸出;氧化铝;烧结法

中图分类号:TF821 文献标志码:A 文章编号:1007-7545(2024)12-0043-07

Leaching of Sintering Clinker from Low-grade and Iron-rich Bauxite

HE Yi¹, ZHOU Yan¹, WANG Yibo², PAN Xiaolin², YU Haiyan²

(1. China Nonferrous Metal Industry's Foreign Engineering & Construction Co., Ltd., Beijing 100029, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: As the bauxite grade in China decreases year by year, it is difficult for Bayer method to meet the requirements of alumina production, while the advantages of sintering method are becoming increasingly prominent. Clinker leaching is a key process in the production of alumina by the sintering method, which directly affects the technical and economic indicators such as alumina leaching rate, alkali consumption and red mud settling performance. Therefore, the effects of the leaching parameters on the leaching rates of Al_2O_3 and Na_2O during the leaching process were studied using the sintering clinker from low-grade and iron-rich bauxite. The results show that molecular ratio, caustic concentration, carbonate concentration of leaching solution, leaching temperature, time, and liquid-solid ratio can all affect the leaching performance of clinker; the increase of iron oxide content in bauxite can reduce the alumina leaching rate of sintered clinker, but the reduction is not significant. The leaching rate of Al_2O_3 and Na_2O in the sintering clinker can reach over 85% and 95%, respectively, under the optimum leaching conditions including molecular ratio of 1.25, caustic concentration of 40 g/L, carbonate concentration of 25 g/L, leaching temperature of 80 °C, leaching time of 20 min and liquid-solid ratio of 5.

Key words: low-grade bauxite; clinker; leaching; alumina; sintering process

收稿日期:2024-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(22078055)

作者简介:何毅(1982-),男,本科,经济师;通信作者:潘晓林(1981-),男,博士,教授,博士生导师

近年来,我国铝工业发展迅猛,氧化铝产量占全球的55%以上^[1]。然而,我国高品质铝土矿严重不足,铝土矿资源储量仅为6.76亿吨,而我国铝土矿进口量从2015年的5580万吨增长到2022年的12547万吨,对外依存度逐年攀升,生产占比已达到65%以上^[2]。这种被动局面严重影响我国铝工业的高质量发展,究其根本是因为我国的铝土矿类型为一水硬铝石型,其铝硅比目前已普遍在4以下,矿石资源缺口不断扩大,按照同期国内铝土矿储量,静态可采年限为14年,远低于全球平均102年的水平^[3]。

因此,提高我国低品位铝土矿的利用效率,构建战略性矿产资源安全保障体系,是我国铝工业可持续发展面临的重大问题。碱石灰烧结法是目前大规模工业化处理低品位铝资源的主要方法^[4-5],其中的浸出工序是提高氧化铝生产效率的关键,因此研究氧化铝在浸出过程的行为至关重要。乔晓静等^[6]以铝土矿低钙石灰烧结熟料为原料,通过单因素试验进行研究分析,最终氧化铝浸出率可达87.3%;LE等^[7]将铝土矿和碱溶液的混合浆液进行微波焙烧,并用稀碱溶液常压浸出,铝的提取率能达到97%;郑欢等^[8]以高铝粉煤灰碱石灰低钙烧结熟料为原料,考察浸出温度及时间、液固比、碱液浓度等因素对氧化铝浸出率的影响。以上均是针对低铁熟料开展的浸出行为研究,随着我国铝土矿质量的降低,矿石中的氧化铁含量升高,导致熟料中烧结过程和浸出过程跟常规碱石灰烧结法发生较大的变化^[9]。

因此,本研究以低品位富铁铝土矿通过碱石灰烧结法获得的高铁含量熟料为原料,在常压下采用稀碱溶液浸出烧结熟料,系统考察浸出液浓度和浸出工艺参数对Al₂O₃和Na₂O浸出率的影响,获得最佳熟料浸出条件,从而为低品位富铁铝土矿的高效处理提供指导。

1 试验

1.1 原料

试验原料为低品位富铁铝土矿经碱石灰烧结法试验得到的烧结熟料。采用日本理学公司ZSX Primus II型X射线荧光光谱仪测定铝土矿和烧结熟料的化学成分及相应含量,结果如表1所示。采用德国布鲁克公司D8 Advance型X射线衍射仪测定烧结熟料的物相组成,XRD图谱如图1所示。

由表1可知,低品位富铁铝土矿的主要化学成分为Al₂O₃、Fe₂O₃和SiO₂,质量分数分别为33.59%、

25.87%和23.35%,铝硅比(A/S)为1.44;烧结熟料的主要化学成分为Al₂O₃、Fe₂O₃、SiO₂、CaO和Na₂O,其中Al₂O₃、CaO和Na₂O的质量分数分别为20.38%、32.03%和13.38%。由图1可知,烧结熟料的主要物相为铝酸钠(Na₂O·Al₂O₃)、原硅酸钙(2CaO·SiO₂)、钛酸钙(CaO·TiO₂)和铁酸钠(Na₂O·Fe₂O₃)。

表1 铝土矿和烧结熟料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of bauxite and

类型	sintered clinker					/%
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	
铝土矿	33.59	25.87	23.35	0.95	0.02	3.61
烧结熟料	20.38	15.70	14.17	32.03	13.38	2.19

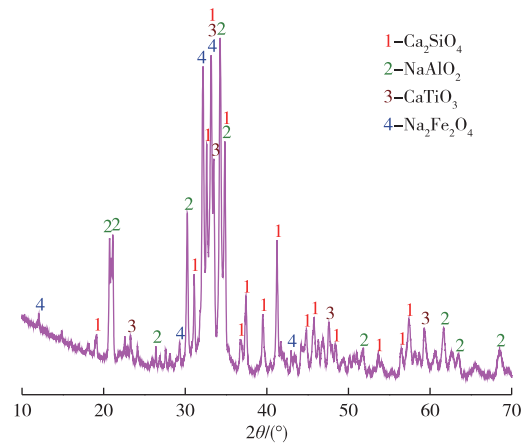


图1 烧结熟料XRD谱

Fig. 1 XRD pattern of sintered clinker

1.2 试验方法

将三口圆底烧瓶固定在预设温度的恒温水浴锅中,同时安装搅拌器和冷凝回流装置,根据浸出调整液体积和烧结熟料质量的比值(液固比,mL/g),向烧瓶中加入调整液和熟料,浸出反应一定时间后停止搅拌。将浸出液进行过滤,滤渣经过80℃热水洗涤6~8次,洗净渣上的附碱直至pH呈中性,烘干磨细后采用XRF光谱仪测定化学成分^[10]。为了数据可靠性,每个条件进行三次试验,以三次测定值的平均值作为试验结果。

烧结熟料的Al₂O₃浸出率(η_{AO})和Na₂O浸出率(η_{NO})计算公式如下:

$$\eta_{AO} = \frac{(A/C)_{熟料} - (A/C)_{浸出渣}}{(A/C)_{熟料}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_{NO} = \frac{(N/C)_{熟料} - (N/C)_{浸出渣}}{(N/C)_{熟料}} \times 100\% \quad (2)$$

式中,(A/C)_{熟料}为烧结熟料中Al₂O₃和CaO质量分数的比值;(A/C)_{浸出渣}为浸出渣中Al₂O₃和CaO

质量分数的比值; $(N/C)_{\text{熟料}}$ 为烧结熟料中 Na_2O 和 CaO 质量分数的比值; $(N/C)_{\text{浸出渣}}$ 为浸出渣中 Na_2O 和 CaO 质量分数的比值。

2 结果与讨论

2.1 浸出液浓度对熟料浸出的影响

在浸出温度 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 、浸出时间 30 min 、液固比 4 的浸出工艺参数下,考察不同浸出液浓度(分子比、苛碱浓度、碳碱浓度)对烧结熟料浸出率的影响,熟料中 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率及变化趋势如图2所示。

由图2(a)可知,随着浸出液分子比的提高,熟

料中 Al_2O_3 浸出率呈现先增大后减小的趋势,当分子比为 1.25 时, Al_2O_3 浸出率最大,为 82.15% ; Na_2O 浸出率变化不大,均保持在 94% 以上。在苛碱浓度一定的情况下,提高分子比相当于降低浸出液的氧化铝浓度,当分子比由 1.25 提高至 1.40 时, Al_2O_3 浸出率由 82.15% 降低至 80.02% ,可见提高分子比对 Al_2O_3 浸出率存在不利的影响,分子比越高,浸出过程中溶液的未饱和度越低,使反应速度变缓,导致 Al_2O_3 浸出率降低。分子比作为浸出液浓度的重要参数,其数值直接影响熟料浸出效果的好坏,一般在保证氧化铝充分浸出的情况下,保持分子比在 $1.20\sim 1.30$ 较为适宜。

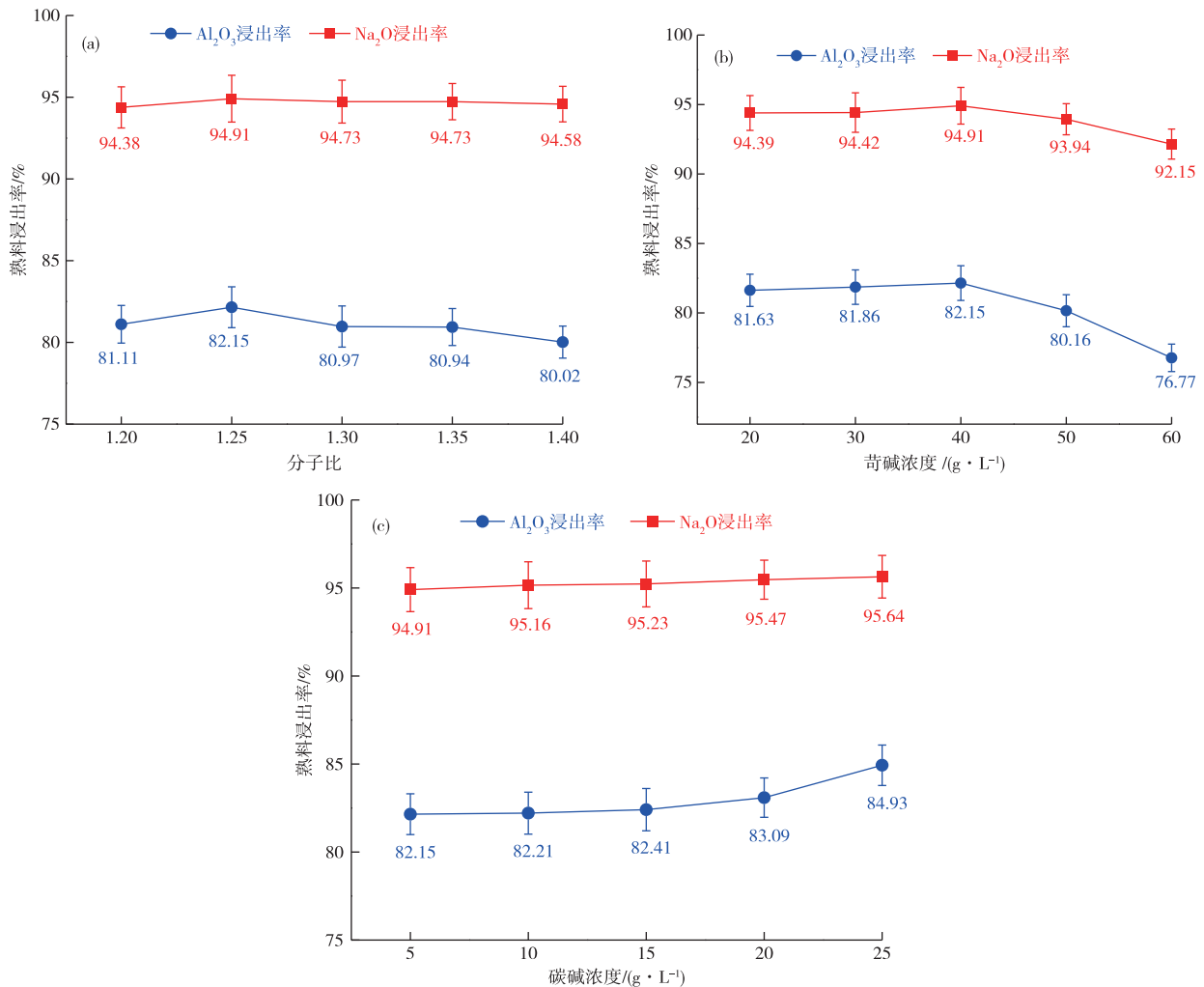


图2 不同浸出液分子比(a)、苛碱浓度(b)及碳碱浓度(c)条件下 Al_2O_3 和 Na_2O 的浸出率

Fig. 2 Leaching rates of Al_2O_3 and Na_2O with different molecular ratios (a), caustic concentrations (b), and carbonate concentrations (c) of leaching solution

由图2(b)可知,随着浸出液苛碱浓度的提高,熟料中 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率均呈现先增大后减小的趋势,当苛碱浓度为 40 g/L 时, Al_2O_3 和 Na_2O 浸

出率均最大,分别为 82.15% 和 94.91% 。当苛碱浓度由 40 g/L 提高至 $50\sim 60\text{ g/L}$ 时, Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率大幅度降低,这是由于溶液中 $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 的

分解导致了二次反应的发生,分解后的含钙物质与 Al_2O_3 和 Na_2O 结合,造成反应损失增加,此时浸出体系中已形成了非晶相含铝固相^[11]。另外铝酸钠溶解过程属于化学反应,需要考虑工业生产中苛碱浓度对熟料浸出效果的影响,保持苛碱浓度在 40 g/L 左右较为适宜。

由图 2(c)可知,随着浸出液碳碱浓度的提高,熟料中 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率均呈现逐渐增大的趋势,当碳碱浓度为 25 g/L 时, Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率均最大,分别为 84.93% 和 95.64%。当碳碱浓度由 5 g/L 提高到 15 g/L 时, Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率变化较小,说明碳碱浓度在较低时对浸出率的影响不大;

若继续提高碳碱浓度至 25 g/L 以上,或将生成 CaCO_3 ,从而增加传质阻力,降低 Al_2O_3 浸出率^[12]。由于碳碱在浸出过程中容易分解硅酸盐,导致 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的分解,使二次反应加重,造成氧化铝的损失,因此保持碳碱浓度在 25 g/L 左右较为适宜。

2.2 浸出工艺参数对熟料浸出的影响

在分子比 1.25、苛碱浓度 40 g/L、碳碱浓度 25 g/L 的浸出液浓度下,考察不同浸出工艺参数(浸出温度、浸出时间、液固比)对烧结熟料浸出率的影响,熟料中 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率及变化趋势如图 3 所示。

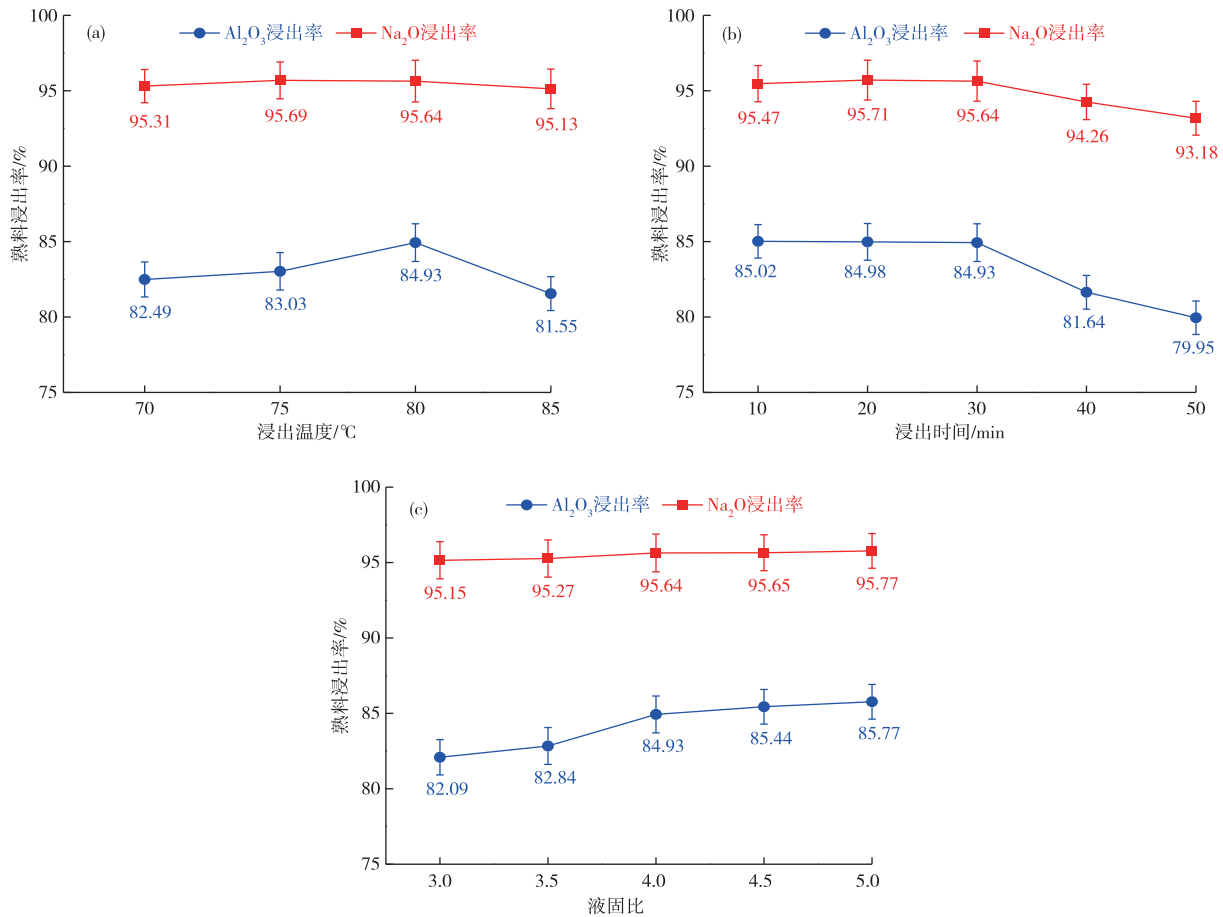


图 3 不同浸出温(a)、浸出时间(b)及液固比(c)条件下 Al_2O_3 和 Na_2O 的浸出率
 Fig. 3 Leaching rates of Al_2O_3 and Na_2O with different leaching temperatures (a), leaching times (b), and liquid-solid ratios (c)

由图 3(a)可知,随着浸出温度的升高,熟料中 Al_2O_3 浸出率呈现先增大后减小的趋势,当浸出温度为 80 °C 时, Al_2O_3 浸出率最大,为 84.93%; Na_2O 浸出率变化不大,均保持在 95% 以上。浸出液中 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的溶解在反应初期即可完成,此后,温度过高只会促进二次反应的进行,导致 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$

大量分解,造成反应损失增加,同时也增加生产能耗和企业运营成本;温度过低则会增大浸出液黏度,增加 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 向溶液扩散的阻力,直接影响后续浸出料浆的沉降,间接加重浸出二次反应^[12]。因此,保持浸出温度为 80 °C 较为适宜。

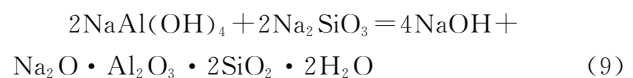
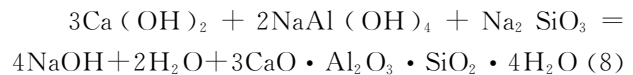
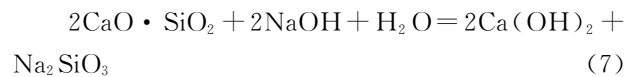
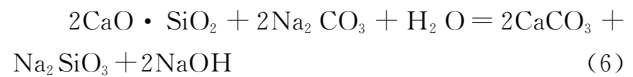
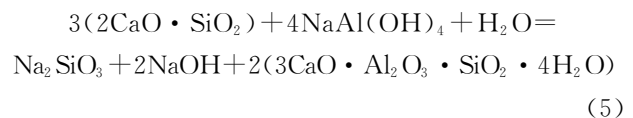
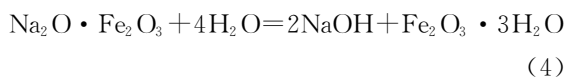
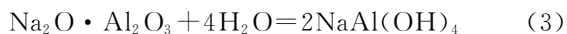
由图 3(b)可知,随着浸出时间的延长,熟料中

Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率均呈现先平稳后减小的趋势,当浸出时间为 10~30 min 时, Al_2O_3 浸出率变化较小,均保持在 85% 左右。 Al_2O_3 浸出率在浸出时间 10 min 时就能达到 85%, 呈现出较好的浸出效果,一旦超过 30 min, 浸出率则明显降低。可见延长时间虽然能让液固相充分接触,使浸出反应更加完全,但 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 在浸出液中的稳定性也随着时间的增加变得越来越差,二次反应程度随之加剧,最终导致 Al_2O_3 浸出率降低,同时影响工业生产效率和设备产能^[11]。因此,保持浸出时间为 20 min 较为适宜。

由图 3(c) 可知,随着熟料浸出液固比的增加, Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率均呈现逐渐增大的趋势,当液固比为 4~5 时, Al_2O_3 浸出率的增大程度变缓,保持在 85% 左右, Na_2O 浸出率保持在 95% 左右。从动力学角度考虑, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的溶解主要受扩散控制,在浸出液体积一定的情况下,液固比越大,相当于有足够的碱与固相反应,使 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 溶解度增大,促进浸出反应的进行,但同时也会造成单位体积溶液的熟料浸出量减小,降低生产效率,导致浸出液循环量成本增加;液固比越小,液固界面间的传质速率则明显降低,甚至影响后续浸出料浆的沉降^[8]。因此,保持液固比为 4~5 较为适宜。

2.3 烧结熟料浸出机理

在氧化铝生产过程中,铝土矿烧结熟料一般采用稀碱溶液进行溶解浸出,使熟料中 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 溶入浸出液, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 水解形成 NaOH 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 沉淀, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 和 $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ 等转为浸出渣沉淀,从而实现氧化铝与其他杂质的分离,熟料浸出过程的主要反应(一次反应)^[4]如式(3)和(4)所示。同时,铝土矿烧结熟料中 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的含量一般在 20% 以上, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 在浸出过程中易与碳酸钠、氢氧化钠等发生一系列副反应(二次反应),造成氧化铝损失,二次反应^[4]如式(5)~(9)所示。



据相关文献可知^[4],在浸出反应初期, $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 就被稀碱溶液快速分解成 $\text{NaAl}(\text{OH})_4$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 能与 $\text{NaAl}(\text{OH})_4$ 直接作用,按照式(5)反应生成水化石榴石($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)。同时, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 也能被碳酸钠和氢氧化钠分解,按照式(6)和(7)反应生成 CaCO_3 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,然后按照式(8)和(9)反应生成 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和水合铝硅酸钠($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。可见 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 在铝酸钠溶液中易产生化学反应作用而被分解,生成水化石榴石、钠硅渣等含铝不溶物进入赤泥废渣中,造成 Al_2O_3 和 Na_2O 的损失。因此,有效控制浸出液浓度和浸出工艺参数以减弱甚至消除二次反应十分重要。烧结熟料浸出过程中物相的转变机制如图 4 所示。

由于我国铝土矿品位的持续走低,使得其氧化铁含量不断升高,成为了影响氧化铝生产的新因素。因此,本研究以低品位富铁铝土矿烧结熟料为原料,考察高铁熟料的氧化铝浸出行为。通过与低铁熟料浸出结果对比可知^[6],高铁熟料的 Al_2O_3 浸出率小于低铁熟料,说明氧化铁含量对铝土矿烧结熟料提铝过程存在一定程度的影响。虽然高铁铝土矿中富余的 Fe_2O_3 能在烧结过程中反应生成更多的 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$,但同时更多的 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 也会熔化包裹住 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,从而降低浸出液中铝酸钠的浓度并影响 Al_2O_3 浸出率,但 Al_2O_3 浸出率依旧保持在 85% 以上。

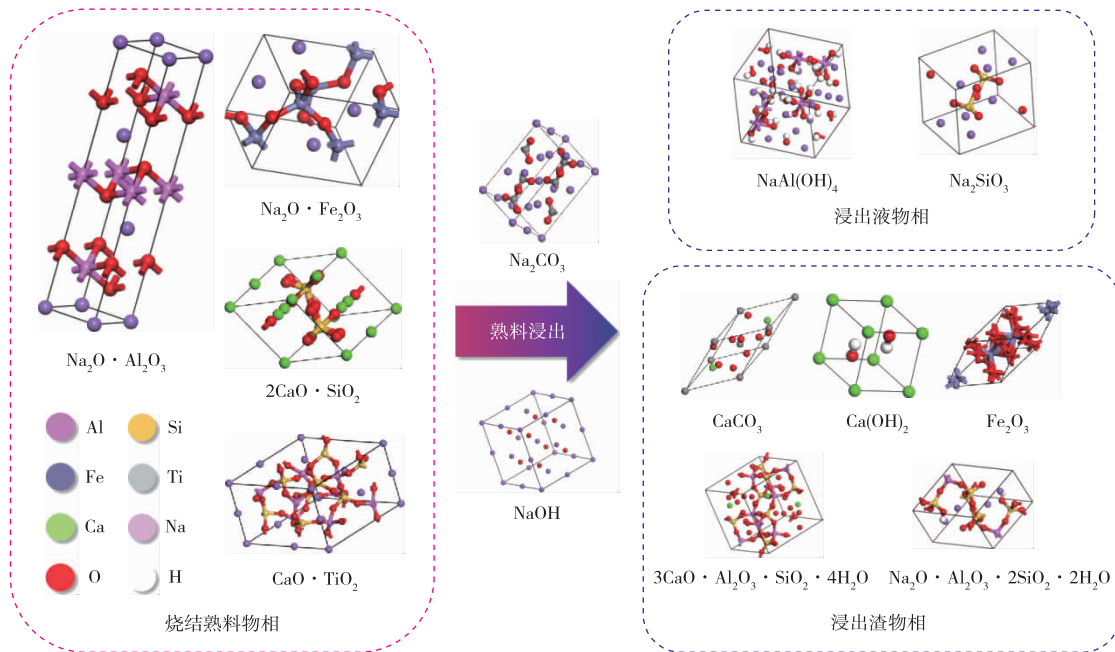


图 4 烧结熟料浸出过程中物相的转变机制

Fig. 4 Transformation mechanism during the sintered clinker leaching process

3 结论

1) 当浸出液分子比为 1.2~1.4、苛碱浓度为 20~60 g/L 时,随着分子比和苛碱浓度的提高,熟料中 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率均呈现先增大后减小的趋势;当碳碱浓度为 5~25 g/L 时,随着碳碱浓度的提高,熟料中 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率均逐渐增大的趋势。

2) 当浸出温度为 70~85 °C,随着浸出温度的升高,熟料中 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率均呈现先增大后减小的趋势;当浸出时间为 10~50 min 时,随着浸出时间的延长,熟料中 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率均呈现先平缓后减小的趋势;当液固比为 3~5 时,随着液固比的增加,熟料中 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率均呈现逐渐增大的趋势。

3) 最佳浸出液浓度和浸出工艺参数为:分子比为 1.25、苛碱浓度 40 g/L、碳碱浓度 25 g/L,浸出温度 80 °C、浸出时间 20 min,液固比 5。在此条件下,熟料中 Al_2O_3 和 Na_2O 浸出率分别为 85.77% 和 95.77%。

4) 铝土矿中氧化铁含量对烧结熟料氧化铝浸出性能有一定影响,但影响不大;熟料中的 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 发生的二次反应造成 Al_2O_3 和 Na_2O 的损失,有效控制浸出液浓度和浸出工艺参数以减弱甚至消除二次反应十分重要。

参考文献

[1] LI Y, PAN X L, LV Z Y, et al. Multi-element comprehensive utilization of high-silicon bauxite by roasting pretreatment and two-stage leaching [J]. Minerals Engineering, 2022, 187: 107805. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107805.

[2] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2023[M]. 北京:地质出版社,2023:5-8. Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. China mineral resources 2023 [M]. Beijing: Geology Press,2023:5-8.

[3] 孙莉,肖克炎,娄德波. 中国铝土矿资源潜力预测评价[J]. 地学前缘,2018,25(3):82-94. SUN L, XIAO K Y, LOU D B. Mineral prospectivity of bauxite resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2018,25(3):82-94.

[4] 毕诗文,于海燕. 氧化铝生产工艺[M]. 北京:化学工业出版社,2006:222-255. BI S W, YU H Y. Aluminum production process[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2006:222-255.

[5] BAI G H, TENG W, WANG X G, et al. Alkali desilicated coal fly ash as substitute of bauxite in lime-soda sintering process for aluminum production [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010,20(Suppl. 1):169-175.

[6] 乔晓静,张念炳. 铝土矿低钙烧结熟料的浸出性能研究[J]. 湿法冶金,2014,33(2):152-154.

- QIAO X J, ZHANG N B. Leaching of alumina from low calcium lime sintering clinker of bauxite [J]. *Hydrometallurgy of China*, 2014, 33(2):152-154.
- [7] LE T Q X, JU S H, LU L M, et al. A novel process and its mechanism for recovering alumina from diasporic bauxite[J]. *Hydrometallurgy*, 2016, 169:124-134.
- [8] 郑欢,冯晓兰,赵博,等.高铝粉煤灰碱石灰低钙烧结熟料的浸出[J].*洁净煤技术*, 2021, 27(3):275-280.
- ZHENG H, FENG X L, ZHAO B, et al. Leaching of high alumina fly ash sintered clinker with low lime dosage [J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27 (3): 275-280.
- [9] 宋涛,陈献梅.高铁沉积型铝土矿的选矿技术研究[J].*矿冶*, 2017, 26(3):19-23, 45.
- SONG T, CHEN X M. Processing technology study on beneficiation of the high ferrous sedimentary bauxite[J]. *Mining and Metallurgy*, 2017, 26(3):19-23, 45.
- [10] 杨再明,吕中阳,潘晓林,等.低钙石灰烧结法处理粉煤灰高效提取氧化铝研究[J].*有色金属(冶炼部分)*, 2020(9):64-68, 96.
- YANG Z M, LYU Z Y, PAN X L, et al. Extraction of alumina from desiliconized fly ash by low-calcium lime sinter process [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2020(9):64-68, 96.
- [11] LV Z Y, PAN X L, PEI J N, et al. Hydrothermal preparation of lightweight calcium silicate powder from alumina-leaching residue of low-calcium sintering red mud [J]. *Ceramics International*, 2022, 48 (22): 33835-33847.
- [12] 熊平,刘战伟,魏杰.赤泥与高硫铝土矿协同焙烧回收氧化铝[J].*有色金属工程*, 2021, 11(8):61-67.
- XIONG P, LIU Z W, WEI J. Recovery of alumina from red mud and high sulfur bauxite by synergistic roasting[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021, 11(8):61-67.

(上接第 42 页)

- [15] LI Y, HU M, WANG T Y. Weld image recognition algorithm based on deep learning [J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2020, 34(8):2052004. DOI:10.1142/s0218001420520047.
- [16] SZAJNA A, KOSTRZEWSKI M, CIEBIERA K, et al. Application of the deep CNN-based method in industrial system for wire marking identification[J]. *Energies*, 2021, 14(12):3659. DOI:10.3390/en14123659.
- [17] WANG Y C, YU B, ZHANG X Y, et al. Automatic extraction and evaluation of pavement three-dimensional surface texture using laser scanning technology [J]. *Automation in Construction*, 2022, 141:104410. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104410.
- [18] CHEN K, FAIRAG F, AL-MAHDI A. Preconditioning techniques for an image deblurring problem[J]. *Numerical Linear Algebra with Applications*, 2016, 23(3):570-584.
- [19] BEDINI L, DEL CORSO G M, TONAZZINI A. Preconditioned edge-preserving image deblurring and denoising[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2001, 22(10): 1083-1101.
- [20] PANIGRAHY C, SEAL A, MAHATO N K. Quantitative texture measurement of gray-scale images: fractal dimension using an improved differential box counting method[J]. *Measurement*, 2019, 147: 106859. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.106859.
- [21] DURDAĞ D, AYHAN DURDAĞ G, PEKŞEN E. Inversion of self-potential data using generalized regression neural network [J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2022, 57(4):589-608.
- [22] ATIF S M, KHAN S, NASEEM I, et al. Multi-kernel fusion for RBF neural networks[J]. *Neural Processing Letters*, 2023, 55(2):1045-1069.