

# NaOH 脱除氯化渣中钙硅杂质的机理及工艺优化<sup>①</sup>

张亚奇<sup>1</sup>, 贺永东<sup>1</sup>, 王黄河<sup>2</sup>, 梁飞龙<sup>2</sup>

(1.新疆大学材料科学与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2.新疆湘润新材料科技有限公司, 新疆 哈密 839000)

**摘要:** 为了探究硅钙的脱除行为并对工艺进行优化,以二氧化硅、氯化钙、氯化钠为原料模拟氯化渣成分,氢氧化钠为添加剂,转化钙硅离子形成高熔点固相,通过过滤分离氯化钠盐液中的高熔点固相,实现氯化钠盐液的资源再生和综合利用。通过热力学分析、动力学分析,以及 TG-DSC、XRD、ICP 和 SEM-EDS 等手段,对钙硅杂质在高温下的转化机理、脱除行为,以及 NaCl 的分离过程进行了系统研究。热力学分析结果表明:973~1 473 K 范围内,转化反应均能自发进行;利用 Kissinger 方法拟合得出高温下转化反应活化能为 296.21 kJ/mol,指前因子为  $8.46 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 。实验结果显示,当钙硅杂质与氢氧化钠质量比为 1:0.6 时,在 1 123 K 下通过过滤分离,钙去除率为 86.66%,硅去除率为 99.60%。

**关键词:** 热力学分析; 氢氧化钠; 钙硅杂质; 高温转化; 再生利用; 熔盐氯化渣; 氯化钠

中图分类号: TF111

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.021

文章编号: 0253-6099(2025)04-0115-07

## Mechanism and Process Optimization of Removing Calcium and Silicon Impurities from Chlorinated Slag by NaOH

ZHANG Yaqi<sup>1</sup>, HE Yongdong<sup>1</sup>, WANG Huanghe<sup>2</sup>, LIANG Feilong<sup>2</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Xiangrun New Materials Co., Ltd., Hami 839000, Xinjiang, China)

**Abstract:** To explore the removal mechanism of silicon and calcium and optimize the process, simulated chlorinated slag composed of silicon dioxide, calcium chloride and sodium chloride, was used as raw material in an experiment, with sodium hydroxide as an additive. The calcium and silicon ions were converted into high-melting-point solid phases, which were separated from the sodium chloride salt solution by filtration, thereby realizing regeneration and comprehensive utilization of the sodium chloride salt solution. Based on thermodynamic analysis, kinetic analysis, TG-DSC, XRD, ICP, SEM-EDS among other analysis measures, the conversion at high temperatures and removal mechanisms for calcium and silicon impurities, as well as the separation process of NaCl were all systematically explored. Thermodynamic analysis shows that a conversion can proceed spontaneously at temperatures ranging from 973 K to 1 473 K. Fitting with the Kissinger method shows that the activation energy of the conversion at high temperatures is 296.21 kJ/mol, and the pre-exponential factor is  $8.46 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ . The experimental results indicate that with calcium-silicon impurities and sodium hydroxide in a mass ratio of 1:0.6, separation by filtration at 1 123 K can lead to the removal rates of calcium and silicon up to 86.66% and 99.60%, respectively.

**Key words:** thermodynamic analysis; sodium hydroxide; calcium and silicon impurities; high-temperature conversion; recycling and utilization; molten salt chlorination slag; NaCl

新疆地区钛矿资源丰富<sup>[1]</sup>,但品位普遍较低。为了有效利用这些低品位钛矿,通常采用熔盐氯化工艺来制备四氯化钛<sup>[2-3]</sup>。然而,由于钛渣成分复杂,氯化

反应会生成高沸点的氯化物,这些氯化物会逐渐在熔盐中富集,导致熔盐物理化学性质发生变化,如流动性下降和氯化效率降低<sup>[4-5]</sup>。此外,每年产生大量氯化废

① 收稿日期: 2025-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(51861033); 新疆维吾尔自治区科技厅重点研发专项项目(2020B02007)

作者简介: 张亚奇(1997—),男,河南汝州人,硕士,主要研究方向为材料与化工、有色金属。E-mail: zyzq013567@163.com

通信作者: 贺永东(1965—),男,湖北黄冈人,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为有色金属。E-mail: hydongq@126.com

盐未能得到有效利用,处理成本高昂,成为工业生产中的一大难题。

熔盐氯化渣物相组成复杂,主要包含 NaCl、CaCl<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub> 等可溶性氯盐和不溶性杂质<sup>[6]</sup>。目前氯化渣的处理方法主要是水溶法和填埋法,这些方法处理粗放,未能回收有价值组分,且耗水量大,容易引发二次污染,未能从根本上解决问题。此外,废渣长期堆存不仅占用大量土地资源,还对地下水和土壤造成潜在的环境风险<sup>[7-8]</sup>。

国内外在固废盐渣处理方面已有一定成果,如蒸发结晶法<sup>[9]</sup>、沉淀法<sup>[10]</sup>、萃取法及树脂吸附法<sup>[11]</sup>处理溶液中的氯化盐和金属杂质,但这些技术在工业化应用中仍面临挑战。国内研究机构开发了高温相转化法<sup>[12]</sup>,通过硅酸钠高温处理熔盐氯化废渣,避免冷却和水溶操作,直接分离出高质量 NaCl,虽为熔盐氯化渣的处理提供了新的思路,但存在引入 SiO<sub>2</sub> 杂质的情况。

本文基于前期研究成果<sup>[13-14]</sup>提出了一种新型高温清洁处理工艺,用于处理熔盐氯化渣。该工艺通过在高温条件下添加 NaOH,固化氯离子并形成含钙硅固相,随后再通过高温过滤分离,从而实现高质量氯化钠的回收和资源综合利用。运用热力学分析、动力学分析以及 TG-DSC、XRD、ICP 和 SEM 等多种手段,对杂质相的转化及其对 NaCl 分离的影响进行了系统研究。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

用纯试剂模拟熔盐氯化渣主要杂质相变和除杂研究。化学试剂氯化钠、无水氯化钙、二氧化硅和氢氧化钠均为分析纯试剂。

实验所用模拟渣根据某公司熔盐氯化渣进行配比。熔盐氯化渣的主要化学成分(质量分数)为:NaCl 51.09%,CaCl<sub>2</sub> 5.23%,SiO<sub>2</sub> 6.23%。熔盐氯化渣分布不均匀,内部中心质地脆硬且气孔较多,底部质地坚硬、气孔较少。

### 1.2 实验设备

使用热力学计算软件 FactSage 8.1 进行热力学分析,使用其中的 Equilib 和 Reaction 模块用于添加剂模拟计算和热力学反应。采用箱式马弗炉进行高温相变操作,实验温度 1 123~1 223 K。过滤设备为氧化铝蜂窝过滤器,孔径约 0.8 mm。

### 1.3 实验方法

由于原料物相复杂,不能很好地研究钙硅杂质的物相变化,采用模拟渣进行实验,根据工厂排盐成分进行配比,NaCl、CaCl<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub> 质量比为 8:1:1。

热力学分析:使用 FactSage 8.1 软件计算模拟渣中各物质反应的热力学,并模拟添加剂量和温度对实验的影响。同时采用 TG-DSC 分析反应过程中产生的变化,通过 Kissinger 方法计算活化能和指前因子,进一步对实验中可能发生的反应进行分析,目的是计算在不同温度、不同添加量条件下,组分与产品状态之间的化学反应,以明确产品的相变情况,确定条件是否适合固液分离。通过综合分析,确定适宜的相变实验条件,为后续工业化实验打下坚实基础。

高温相变实验:实验在马弗炉中进行,用纯试剂模拟熔盐氯化渣中的 CaCl<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub> 杂质。实验中,将定量混合的样品放入 100 mL 氧化铝陶瓷坩埚中,在设定温度下反应 1 h 后过滤分离,计算钙硅去除率。

### 1.4 分析方法

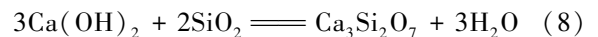
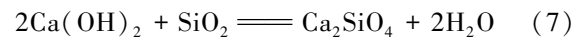
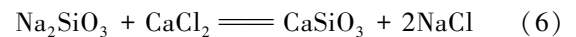
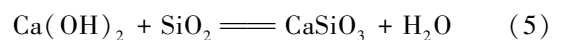
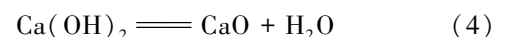
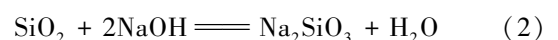
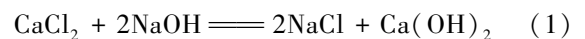
使用由新疆大学理化测试中心提供的 X 射线衍射分析仪和电感耦合等离子体发射光谱仪测试物相组成。

采用 NaOH 作为添加剂进行高温固相转化,将杂质转化为高熔点物质。同时,该过程还可固化氯离子,从而回收 NaCl,实现 NaOH 的循环利用。固液分离后,分析杂质元素含量,计算高温反应前后杂质去除率。

## 2 热力学与动力学分析

### 2.1 热力学分析

以 NaOH 为添加剂,熔盐氯化废渣中 CaCl<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub> 与添加剂之间可能发生的化学反应为:



反应(1)~(8)在不同温度下的吉布斯自由能变如图 1 所示。973~1 473 K 范围内,反应(1)~(8)的吉布斯自由能变均为负值,表明在该温度范围内反应(1)~(8)均能自发进行,其中反应(2)、(4)、(5)、(7)、(8)随着温度升高吉布斯自由能变显著降低,说明其在较高温度下反应会更加剧烈。温度高于 973 K 时,NaOH 在体系中将硅钙杂质转化为钙硅酸盐和钠硅酸盐,同时反应过程中还会有少量氧化钙生成,而氧化钙、钙硅酸盐和钠硅酸盐均为高熔点稳定物质,在高

温条件下,有望通过热力学反应实现钙、硅离子的转化和 NaCl 的有效回收。

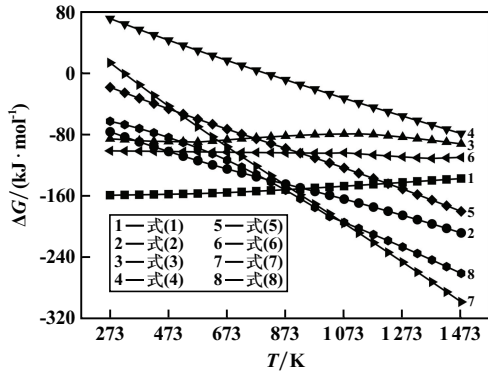


图1 反应(1)~(8)在不同温度下的吉布斯自由能变  
Fig.1 Gibbs free energy changes in reactions (1)~(8) at different temperatures

## 2.2 动力学分析

### 2.2.1 TG-DSC 分析

对模拟渣作热重分析,空气递入速率为 150 mL/min,不同升温速率下的 TG 和 DSC 曲线如图 2 所示。900 K 之前,TG 曲线显示样品质量几乎没有明显变化,表明该阶段没有显著挥发、分解或物质损失。DSC 曲线在 900 K 之前出现了多个较小的吸热峰,结合热力学分析,推测为氢氧化钠熔融,同时伴随反应(3)为主的反应发生。900 K 之后,TG 曲线显示样品质量开始显著

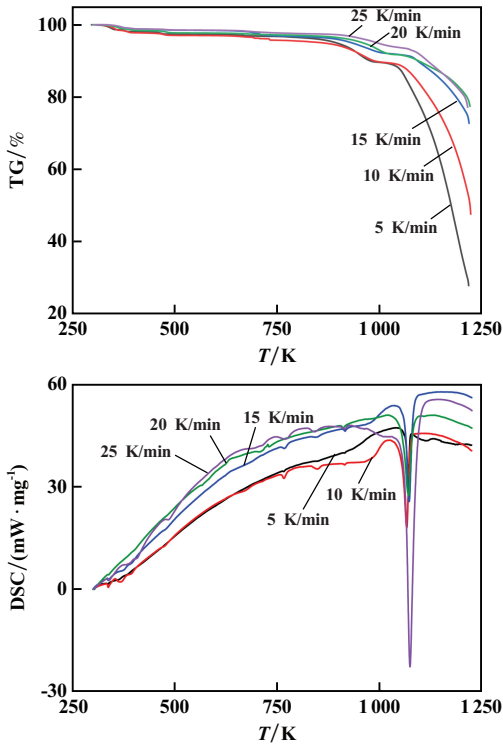


图2 不同升温速率下的 TG 和 DSC 曲线  
Fig.2 TG and DSC curves at different heating rates

下降,特别是超过 1 000 K 以后,表明发生了更为剧烈的物理和化学变化,从热力学角度看,此阶段发生了以反应(2)、(5)、(7)、(8)为主的反应,这些反应产生大量水蒸气并生成钙硅酸盐和钠硅酸盐。结合氯化钙和氯化钠的物化性能分析,1 074 K 和 1 045 K 附近分别为氯化钠和氯化钙熔点,熔融过程需要吸收大量热量,导致 DSC 曲线在 1 000~1 100 K 出现了显著的吸热峰。

### 2.2.2 Kissinger 方法

Kissinger 方程<sup>[15]</sup>(简称 K 法)是一种常见的微分处理方法,可以在不考虑反应机理的条件下计算活化能和指前因子。其方程式为:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{E}\right) - \frac{E}{RT_p} \quad (9)$$

式中: $T_p$  为最大失重率对应 TG 曲线斜率最大处的温度; $\beta$  为升温速率; $A$  为指前因子; $E$  为活化能; $R$  为摩尔气体常数。

Kissinger 方法的核心原理在于,不同升温速率会导致不同的  $T_p$ ,从而得到不同的  $\ln(\beta/T_p^2)$  值。将  $\ln(\beta/T_p^2)$  对  $1/T_p$  作图,并利用最小二乘法进行拟合,可以得到一条直线。该直线的斜率为  $-E/R$ ,截距为  $\ln(AR/E)$ 。根据拟合直线的斜率和截距,可以计算活化能  $E$  以及指前因子  $A$ 。Kissinger 方程拟合曲线如图 3 所示。

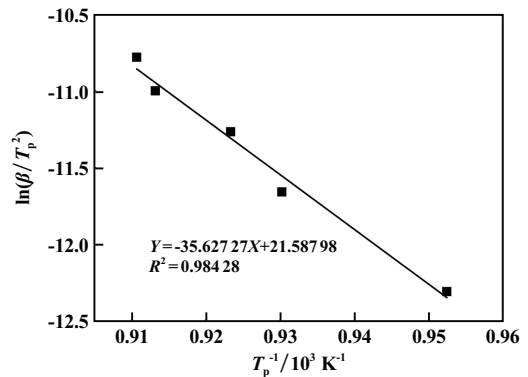


图3 Kissinger 方程拟合曲线  
Fig.3 Fitting curve of Kissinger equation

通过 Kissinger 方法的拟合分析得出,转化反应的活化能为 296.21 kJ/mol,指前因子为  $8.46 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 。在由氯化钙、氯化钠、二氧化硅和氢氧化钠组成的高温熔盐体系中,活化能和指前因子共同决定了反应的动力学特性。较高的活化能表明反应需要较高的热能输入,特别是反应(2)、(5)、(7)、(8),这涉及到 Si—O 键的断裂和重新排列,需克服较高的键能障碍。而指前因子较大说明在高温下,反应物分子之间的有效碰

撞频率较高,熔盐的高温环境增强了分子的动能和流动性,从而加快了反应速率。整体来看,尽管反应过程需要克服较高的能量屏障,但高温条件下的频繁有效碰撞能够促进反应的高效进行。

Kissinger 方法拟合结果也验证了热力学和 TG-DSC 分析的结论,即温度高于 973 K 后,反应(2)、(5)、(7)、(8)更加剧烈,会大量产生钙硅酸盐和钠硅酸盐。

### 3 钙硅杂质在高温下的相变与脱除行为

采用反应热力学分析氯化盐渣中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{NaCl}$  与添加剂  $\text{NaOH}$  反应的可能性,同时对反应过程的 TG-DSC 进行分析,并通过 Kissinger 法计算反应活化能和指前因子,随后采用纯试剂进行高温相变实验,模拟熔盐体系。通过改变实验条件,研究钙硅的高温固相转变和固液分离,考察不同实验条件对钙硅离子去除率的影响。通过实验确定去除杂质的适宜条件。

#### 3.1 相变温度对钙硅杂质脱除过程的影响

原料中  $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  含量均为 10%,杂质与氢氧化钠的质量比为 1:0.2,不同反应温度下所得滤渣 XRD 图谱如图 4 所示。从图 4 可以看出,在相同添加剂条件下,不同反应温度下,滤渣中硅主要以  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  形式存在,钙主要以  $\text{CaO}$  形式存在,结合热力学分析,说明发生了反应(1)、(3)、(4)、(5), $\text{NaOH}$  消耗  $\text{SiO}_2$  和  $\text{CaCl}_2$ ,生成  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , $\text{Ca}(\text{OH})_2$  继续消耗  $\text{SiO}_2$  生成  $\text{CaSiO}_3$ ,剩余的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  在高温下分解为  $\text{CaO}$ 。XRD 显示在 1 173 K 时, $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  结晶度好,且发现有  $\text{CaSiO}_3$  的物相,表明该温度下反应更加充分完整,也可能是因为氢氧化钙在高温脱水过程中更容易发生团聚<sup>[16-17]</sup>,使得  $\text{CaO}$  将  $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  包裹,从而导致 XRD 衍射峰变弱。

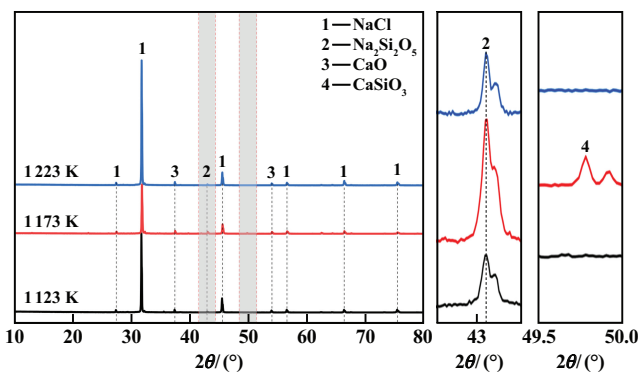
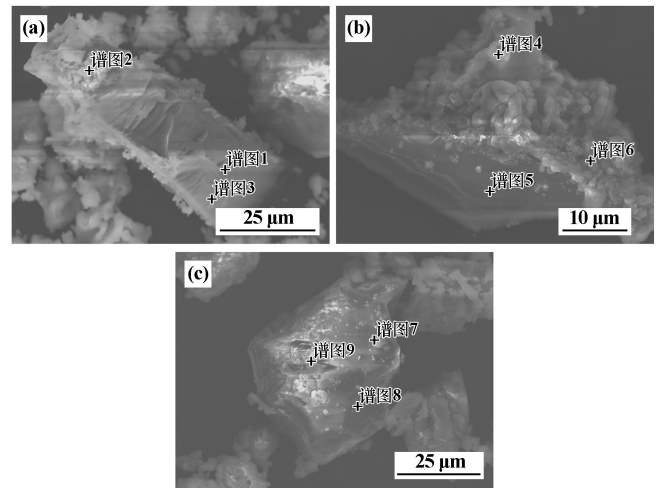


图 4 不同反应温度下所得滤渣 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of filter residues obtained at different reaction temperatures

各反应温度下所得滤渣 SEM 形貌见图 5,其中各

谱图微区 EDS 分析结果如表 1 所示。



(a) 1 123 K; (b) 1 173 K; (c) 1 223 K

图 5 不同反应温度下所得滤渣 SEM 形貌

Fig. 5 SEM images of filter residues obtained at different reaction temperatures

表 1 图 5 中各谱图微区 EDS 分析结果

Table 1 EDS analysis of each region of spectrum in Fig. 5

谱图编号	各区域元素含量(原子分数)/%				
	O	Na	Si	Cl	Ca
1	74.01	3.34	14.48	1.88	6.30
2	44.29	15.33	4.54	16.36	19.48
3	70.91	7.03	13.16	3.31	5.58
4	23.27	42.33	1.78	28.18	4.44
5	31.04	10.94	13.41	5.21	39.41
6	33.10	5.43	8.89	16.11	36.46
7	42.52	26.81	10.95	14.93	4.79
8	68.79	2.52	18.64	1.07	8.99
9	72.65	1.31	17.71	0.47	7.86

1 123 K 下,样品表面呈现较为松散的结构,显得粗糙且不均匀。谱图 1 和谱图 3 区域具有较高的 O 和 Si 含量,表明这些区域主要由  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  和  $\text{CaO}$  组成,结构相对稳定。谱图 2 区域中 Na、Ca 含量较高,说明该区域以  $\text{NaCl}$  和  $\text{CaSiO}_3$  为主,富集的  $\text{NaCl}$  和  $\text{CaO}$  将  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  包裹,在 XRD 图上表现出衍射峰信号弱。

1 173 K 下,样品微观结构表现出更高的致密性和显著的分层特征。谱图 4 区域中 Na 和 Cl 含量较高,而 O 和 Si 含量较低,表明该区域以  $\text{NaCl}$  为主。谱图 5 区域中 Ca 和 Si 含量显著增加,结合 XRD 分析结果,说明产生了  $\text{CaO}$  和  $\text{CaSiO}_3$ ,使该区域的结构稳定。谱图 6 区域中 Ca 和 O 含量依然很高,表明  $\text{CaO}$  在该区域集中分布,且谱图 6 区域可以看到明显的堆叠团聚形貌,这也说明氧化钙确实会发生团聚。

1 223 K 下,谱图 8 和谱图 9 区域具有极高的 O 和 Si 含量,几乎完全由  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  构成,表现出较高致密性和均匀性。结合 XRD 分析结果,大颗粒为  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ 。谱图 7 区域多为大颗粒表面的附着物,其主要元素为 Na 和 Cl,这也再次印证  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  被 NaCl 和 CaO 包裹,导致 XRD 衍射峰强度弱。

各温度下的 SEM-EDS 分析结果验证了 XRD 分析结果, CaO 会发生团聚形成大颗粒物质,夹杂部分 NaCl,包裹  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ,这种现象使颗粒体积增大,更有利于过滤除杂操作。

不同温度下所得滤液的 XRD 图谱如图 6 所示。相同添加剂条件下,反应温度对滤液物相影响不大。滤液中主要物相为 NaCl,未检测到明显的钙硅化合物的衍射峰。这也表明添加剂氢氧化钠能实现杂质与氯化钠的分离。

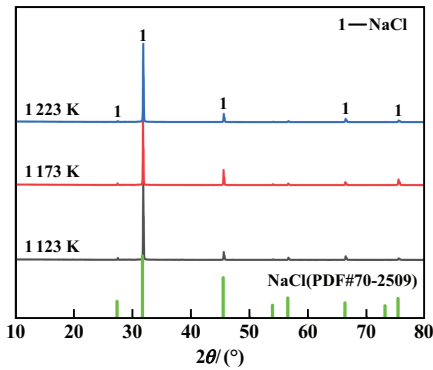


图 6 不同温度下所得滤液 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of filtrate obtained at different temperatures

采用 ICP 分析了不同温度下所得滤液中钙、硅含量及其去除率,结果如图 7 所示。反应温度从 1 123 K 提升至 1 173 K 时,滤液中 Ca 含量从 3.5% 降至 1.2%,温度进一步提高至 1 223 K 时,Ca 含量反而上升至 2.8%,导致去除率下降至 68.34%。1 123~1 223 K 范围内,随着温度升高,滤液中 Si 含量逐渐减少。这些结果表明,温度对硅去除的影响更显著,而 1 173 K 时钙去除率达到峰值。综合考虑工艺效率与经济性,适宜的反应温度为 1 173 K,此时 Ca 去除率为 86.66%,Si 去除率为 99.60%。

### 3.2 添加剂用量及脱除效果

使用热力学计算软件 FactSage 8.1 中的 Equilib 模块,在 1 173 K 下进行添加剂模拟计算,同时结合试验优选适宜的添加剂用量。1 173 K 时氢氧化钠添加量模拟计算结果和实验结果的对比如图 8 所示。模拟计算结果显示,杂质与氢氧化钠的质量比为 1:0.6 时,生成的熔融 NaCl 质量达到最大,同时钙、硅去除效果好。

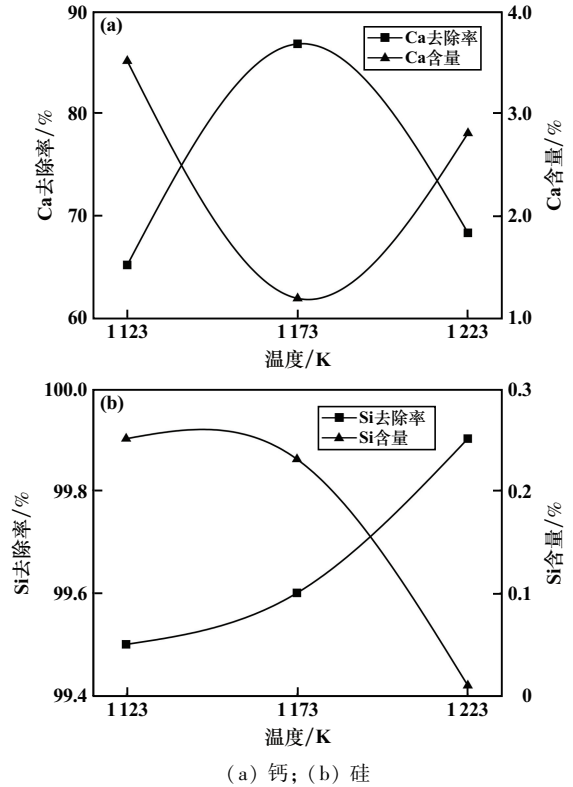


图 7 不同温度下所得滤液中钙、硅含量及去除率

Fig.7 Contents and removal rates of Ca and Si in filtrate obtained at different temperatures

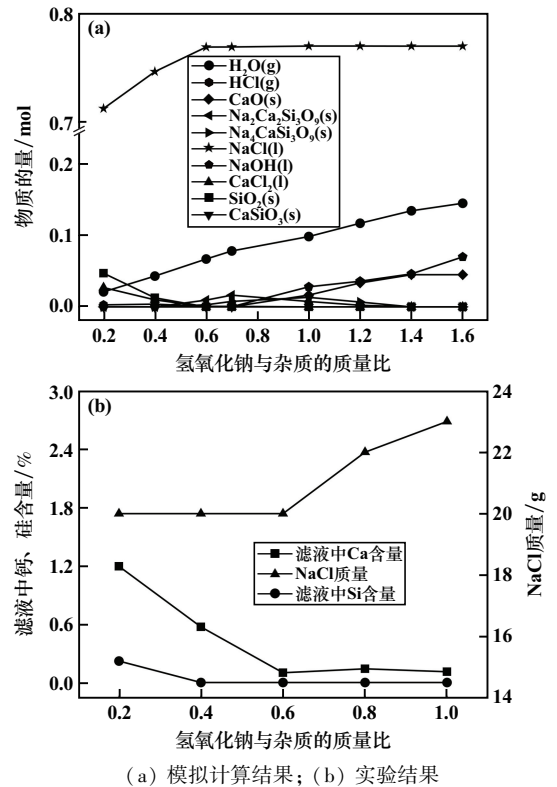


图 8 1 173 K 时氢氧化钠添加量模拟计算结果和实验结果对比  
Fig.8 Comparison of simulation calculation and experimental results of NaOH addition amount at 1 173 K

实验结果进一步验证了在不同添加剂用量下滤液中钙、硅含量和生成 NaCl 的质量变化规律。随着添加剂用量增加,滤液中钙硅含量显著降低,表明钙、硅离子得到了有效分离。同时,生成的 NaCl 质量逐渐增加,说明加入 NaOH 显著降低了熔盐的黏度,增强了流动性<sup>[18]</sup>,从而使过滤过程更顺畅。

氢氧化钠添加量对钙、硅含量及去除率的影响如图 9 所示。随着氢氧化钠添加量增加,过滤后样品中钙、硅去除率逐步上升。较高的钙、硅去除率意味着获得了更高质量的可回收熔盐。然而,增加氢氧化钠添加剂用量也伴随着成本上升。为平衡熔盐质量与成本,实验确定适宜的杂质与氢氧化钠质量比为 1:0.6。该条件下,不仅能够获得较高的钙、硅去除率,同时确保收集到的氯化钠质量优良,整体回收率得到了提升。

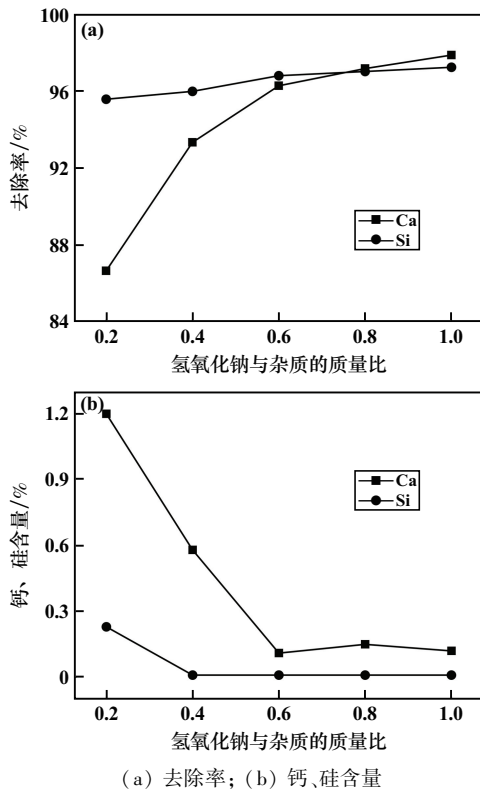


图9 NaOH添加量对钙、硅含量及去除率的影响

Fig.9 Effect of NaOH dosage on content and removal rates of Ca and Si

依据本次实验,在新疆湘润新材料科技有限公司进行产业化应用,钙硅元素脱除率分别达到了 88.4% 和 95%,氯化钠回收率达 60%,产业化结果证明该工艺有效解决了钙硅元素脱除困难的问题。

## 4 结论

开发并验证了一种基于氢氧化钠高温相变的新工

艺,能够高效去除熔盐氯化渣中的钙硅杂质并回收高纯度 NaCl。热力学分析结果表明,在 973~1 473 K 范围内,转化反应均能自发进行。Kissinger 方法拟合分析结果表明,反应活化能为 296.21 kJ/mol,指前因子为  $8.46 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 。XRD、SEM-EDS 和 ICP 分析结果发现,杂质以  $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$  和 CaO 形式被有效分离,而且  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  高温脱水形成的 CaO 可以发生团聚。实验结果显示,1 173 K、杂质与氢氧化钠质量比 1:0.6 时,钙和硅去除率分别达到 86.66% 和 99.60%。

## 参考文献(References):

- [1] 姚震,邓锋. 中国钛矿资源产业演变与发展趋势探讨[J]. 金属矿山, 2018(6):61-64.  
YAO Zhen, DENG Feng. Discussion on the evolution and development trend of titanium resources industry in China[J]. Metal Mine, 2018(6):61-64.
- [2] 刘佳媛. 熔盐氯化生产四氯化钛工艺研究[J]. 现代矿业, 2019, 35(5):221-225.  
LIU Jiayuan. Research on the process of titanium tetrachloride production by molten salt chlorination[J]. Modern Mining, 2019, 35(5):221-225.
- [3] 马昕,师家安. 大型熔盐氯化炉生产实践[J]. 有色金属设计, 2022, 49(1):40-44.  
MA Xin, SHI Jia'an. Production practice of large salt chlorinators[J]. Nonferrous Metals Design, 2022, 49(1):40-44.
- [4] 安建国. 熔盐氯化生产工艺及现实意义[J]. 世界有色金属, 2017(12):29.  
AN Jianguo. The production process and the practical significance of molten salt chlorination technology[J]. World Nonferrous Metals, 2017(12):29.
- [5] 刘长河,李俊强. 熔盐氯化反应机理的研究[J]. 钛工业进展, 2011, 28(6):33-37.  
LIU Changhe, LI Junqiang. Research on reaction mechanism of melting salt chlorination[J]. Titanium Industry Progress, 2011, 28(6):33-37.
- [6] 路辉,王浩,杨仁牧,等.  $\text{TiCl}_4$  熔盐氯化炉熔盐体系恶化原因分析及稳定控制措施探究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014, 42(2):16-22.  
LU Hui, WANG Hao, YANG Renmu, et al. Analysis of deterioration cause and investigation on the stability control measures of molten salt system in  $\text{TiCl}_4$  molten salt chlorinator[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2014, 42(2):16-22.
- [7] CHEN F, LIU C L, WEN Y K, et al. The conversion of calcium-containing phases and their separation with NaCl in molten salt chlorinated slags at high temperature[J]. Sustainability, 2022, 14(1):293.
- [8] CHEN F, WEN Y K, GUO Y F, et al. The transition of Mg-containing phases and recovery of NaCl in molten salt chloride slags at high temperature[J]. Materials, 2022, 15(17):5983.
- [9] 刘昌林,侯盛东,阳露波,等. 熔盐氯化渣资源化处理方法: CN105883911A[P]. 2016-08-24.

- LIU Changlin, HOU Shengdong, YANG Lubo, et al. Resource utilization treatment methods for molten salt chlorination slag: CN105883911A[P]. 2016-08-24.
- [10] 张衡,刘昌林,阳露波.一种利用熔盐氯化渣制备镁砂的方法: CN110668476A[P]. 2020-01-10.  
ZHANG Heng, LIU Changlin, YANG Lubo. A method for preparing magnesia sand using molten salt chlorinated slag: CN110668476A[P]. 2020-01-10.
- [11] 刘松利,张雪峰,方民宪,等.利用钛渣氯化废弃物提取氧化钪的方法: CN102796876A[P]. 2012-11-28.  
LIU Songli, ZHANG Xuefeng, FANG Minxian, et al. The method of extracting scandium oxide from titanium slag chlorination waste: CN102796876A[P]. 2012-11-28.
- [12] 陈凤,郑富强,王帅,等.一种高温相转化法处理熔盐氯化废渣的方法: CN111892068A[P]. 2020-11-06.  
CHEN Feng, ZHENG Fuqiang, WANG Shuai, et al. A method for treating waste residue from molten salt chlorination by high-temperature phase conversion: CN111892068A[P]. 2020-11-06.
- [13] DONG Z W, GUO X Y, XIA Y, et al. Removing  $Ti_3Si_3$  phase in Ti alloy via desilication of upgraded titania slag using low-temperature alkali leaching[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023,33(5):1572-1582.
- [14] FENG Y, WANG J G, WANG L N, et al. Decomposition of acid dissolved titanium slag from Australia by sodium hydroxide[J]. Rare Metals, 2009,28(6):564-569.
- [15] WENDLANDT W W. Reaction kinetics by differential thermal analysis: A physical chemistry experiment[J]. Journal of Chemical Education, 1961,38(11):571.
- [16] GU Y S, CHENG Y X, SHEN Z J, et al. Study on non-isothermal reaction and sintering kinetics of  $Ca(OH)_2$  particle cluster dehydration with temperature distribution modification[J]. Chemical Engineering Journal, 2024,488:151015.
- [17] XU M, HUAI X L, CAI J. Agglomeration behavior of calcium hydroxide/calcium oxide as thermochemical heat storage material: a reactive molecular dynamics study[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017,121(5):3025-3033.
- [18] WANG D, CHU J L, LI J, et al. Anti-caking in the production of titanium dioxide using low-grade titanium slag via the NaOH molten salt method[J]. Powder Technology, 2012,232:99-105.
- 引用本文:张亚奇,贺永东,王黄河,等. NaOH脱除氯化渣中钙硅杂质的机理及工艺优化[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):115-121.  
ZHANG Yaqi, HE Yongdong, WANG Huanghe, et al. Mechanism and process optimization of removing calcium and silicon impurities from chlorinated slag by NaOH[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(4):115-121.

## 《矿冶工程》征订启事

《矿冶工程》(双月刊)由长沙矿冶研究院有限责任公司、中国金属学会主办,面向国内外公开发行人。本刊是中国期刊方阵“双效期刊”、全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、CACJ中国应用型核心期刊,是集学术性和技术性于一体的综合性刊物,已被中国知网(CNKI)、万方数据库、重庆维普资讯、长江文库等全文收录,是国外多家知名检索机构的检索对象。

《矿冶工程》读者对象是采矿、选矿、冶金、材料、地质、化工等系统的有关生产人员、院校师生和管理人员。主要栏目为采矿、选矿、冶金、材料、矿冶行业企业管理等,内容新颖,是开拓、激发创造力的良师益友。

《矿冶工程》编辑部承接彩色、黑白及文字广告业务,欢迎各企事业单位来电来函联络。

《矿冶工程》真诚欢迎新、老订户向全国各地邮局订阅本刊,也可直接向编辑部订阅。邮发代号:42—58,大16开,定价20元/册,全年6册共120元。

地 址:湖南省长沙市麓山南路966号  
邮 编:410012  
电 话:(0731)88657070/88657176/88657173  
传 真:(0731)88657186

E-mail: kuangyegongchengzz@163.com

联 系 人:黄小芳  
开户名称:矿冶工程杂志(长沙)有限公司  
开户银行:工商银行长沙左家垅支行  
账 号:1901013009201095502  
网 址: <http://www.kygz.com>