

## 硫酸钠在亚熔盐介质中的过饱和性

丁 健<sup>1,2</sup>, 丁爱娟<sup>3</sup>, 马淑花<sup>2</sup>, 郑诗礼<sup>2</sup>, 张 懿<sup>2</sup>

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110819;

2. 中国科学院 过程工程研究所, 北京 100190;

3. 河北省石油化工设计院 苏州分院, 苏州 215011)

**摘要:** 采用激光浊度法对亚熔盐法粉煤灰提铝清洁工艺中硫酸钠在亚熔盐介质中的过饱和性进行了研究。结果表明: 对亚熔盐介质进行真空蒸发时, 其中的硫酸钠达到平衡浓度时即从体系中结晶析出, 表明硫酸钠在亚熔盐介质中几乎无过饱和性。此外, 杂质二氧化硅与碳酸钠对硫酸钠在铝酸钠溶液中的过饱和性具有一定影响, 二氧化硅杂质会使硫酸钠析晶点碱浓度提高到 20 g/L 左右; 碳酸钠会使硫酸钠析晶点碱浓度降低至 15 g/L 左右。同时, 对析出晶体的物相分析表明: 杂质二氧化硅的存在会使析出晶体向钠硅渣转变, 而杂质碳酸钠的存在会使析出晶体向碳钠矾复盐转变。

**关键词:** 硫酸钠; 亚熔盐; 过饱和性; 粉煤灰

中图分类号: TF09

文献标志码: A

## Supersaturation of sodium sulfate in sub-molten salt

DING Jian<sup>1,2</sup>, DING Ai-juan<sup>3</sup>, MA Shu-hua<sup>2</sup>, ZHENG Shi-li<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Suzhou Branch, Hebei Petrochemical Design Institute, Suzhou 215011, China)

**Abstract:** The supersaturation of sodium sulfate in sub-molten salt during the process of extracting alumina from fly ash by sub-molten method was investigated by laser-turbidity method. The results show that during the process of vaporization, when the concentration of sodium sulfate in sub-molten salt exceeds the limit of solubility, it will be deposited out in solid form. There is not an obvious supersaturation phenomenon for the sodium sulfate in vaporization process. The impurities of silica and sodium carbonate have certain influences on the supersaturation of sodium sulfate in sub-molten salt. The silicon impurity increases the crystallization alkali concentration of sodium sulfate by 20 g/L. On the other hand, the sodium carbonate decreases the crystallization alkali concentration of sodium sulfate by 15 g/L. Meanwhile, the results of X ray diffraction analyses indicates that the SiO<sub>2</sub> changes the crystal from crystalline precipitated to sodium-silicon residue, while the addition of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> changes crystals to the burkeite.

**Key words:** sodium sulfate; sub-molten salt; desulfurization; fly ash

粉煤灰是煤炭燃烧后产生的固体废弃物之一, 目前累计堆存量已经达到 20 亿 t<sup>[1-2]</sup>。近年来, 我国内蒙古西部、山西北部等地出现的特色资源高铝粉煤灰中

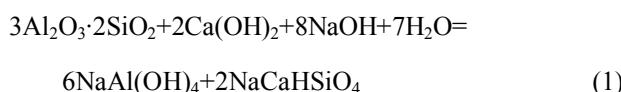
氧化铝含量普遍偏高, 有些甚至可高达 50%, 相当于中等品位的铝土矿, 且年产量约为 6000 万 t<sup>[3-4]</sup>, 这对铝土矿资源极为短缺的我国来说, 是一种非常宝贵的

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAF03B01)

收稿日期: 2014-01-20; 修订日期: 2014-07-20

通信作者: 马淑花, 副研究员, 博士; 电话: 010-82544857; E-mail: shma@home.ipe.ac.cn

非传统含铝资源。因此,开发利用粉煤灰生产氧化铝新工艺具有重要的意义。中科院过程工程研究所成功研发了亚熔盐法粉煤灰提铝新技术,取得了较好的处理效果,氧化铝提取率可达90%以上,展示了良好的应用前景<sup>[5]</sup>。亚熔盐法处理粉煤灰原理如下式所示:



这样,在经过亚熔盐法处理后,粉煤灰中的氧化铝和二氧化硅分别进入到液相和固相,实现氧化铝的提取和铝硅的高效分离。

在氧化铝生产过程中,硫杂质对生产过程的危害极大。如以铝土矿为原料的氧化铝生产过程中,硫的存在会造成在氧化铝生产过程中的多种不良危害,如硫在生产流程中的积累造成碱耗增大,对设备腐蚀严重,生成结疤造成设备堵塞、影响生产正常运行,降低产品产率,影响产品品位等<sup>[6-10]</sup>。由于粉煤灰中尤其是循环流化床粉煤灰中杂质硫元素含量高<sup>[11]</sup>,其在粉煤灰提取氧化铝过程中的影响不能忽略,因此,如何脱硫也是粉煤灰提取氧化铝工艺中的重要环节。而关于硫杂质在亚熔盐法粉煤灰提铝工艺过程中的行为,DING等<sup>[12]</sup>对NaOH-Al(OH)<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O四元体系进行了相图研究,至于硫的其他行为,尤其是硫酸钠在该体系中的过饱和性尚未见报道。本文作者以亚熔盐法处理山西某地循环流化床高铝粉煤灰后所得的反应料液为研究对象,利用真空蒸发的方法借助激光浊度仪研究硫酸钠在苛性比为12的铝酸钠体系中的结晶过饱和性同时对氧化铝生产过程中主要杂质二氧化硅和碳酸钠对硫酸钠过饱和性的影响规律也进行了系统研究,考察了由杂质引起的析出晶体物相变化。

## 1 实验

### 1.1 主要原料

通过对亚熔盐法处理粉煤灰工艺物质流动规律的研究,得知粉煤灰中的硫主要以硫酸钠的形式进入到脱铝渣中,经洗涤后进入到脱铝渣洗液中。因此,本研究以脱铝渣洗液为研究对象,采用真空蒸发的方法,借助激光浊度仪,对硫酸钠的过饱和性进行研究。所有实验用含有硫酸钠的铝酸钠溶液均采用纯试剂配制得到,主要成分比例则与脱铝渣洗液的化学组成相同,如表1所列。

本研究中所有实验初始碱浓度均为Na<sub>2</sub>O 300 g/L, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浓度为4.83 g/L,必要时以Al(OH)<sub>3</sub>的形式加入Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,以Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O的形式加入SiO<sub>2</sub>,然后对溶液进行真空蒸发。

表1 脱铝渣洗液的化学成分

Table 1 Compositions of raw material

Component	Content/(g·L <sup>-1</sup> )
Na <sub>2</sub> O	300.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41.13
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.83

### 1.2 实验装置与分析仪器

硫酸钠真空蒸发过程中,硫酸钠析晶点出现的位置采用激光浊度仪进行分析确定。该实验装置图如图1所示。

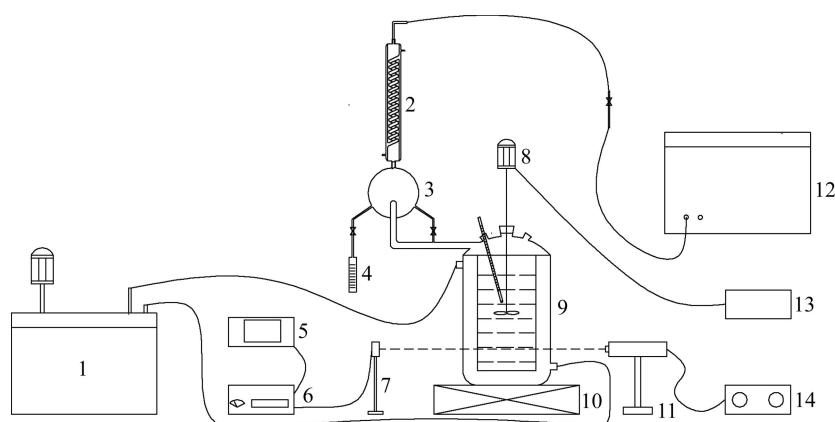


图1 真空蒸发结晶实验装置

Fig. 1 Vacuum evaporation crystallization apparatus: 1—Super thermostatic bath; 2—Condenser pipe; 3—Reflux controller; 4—Condensate water measuring cylinder; 5—Paperless recorder; 6—Laser power meter; 7—Laser detector; 8—Stirrer; 9—Crystallizer; 10—Lifting platform; 11—Laser generator; 12—Circulating water vacuum pump; 13—Speed controller; 14—Laser power

分析仪器: 采用美国 Perkin-Elmer 公司 Optima 5300DV 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES) 分析溶液的化学成分; 用荷兰 Panalytical 公司的 X'Pert PRO MPD 型多功能 X 射线衍射仪(XRD) 分析析出晶体物相组成。

### 1.3 实验方法

首先将水浴温度设置为 80 °C, 待温度达到 80 °C 时, 将制备好的同样为 80 °C 的含有硫酸钠的铝酸钠溶液倒入结晶器中, 以 200 r/min 的转速搅拌料液, 直到结晶器测温处的温度计显示的温度稳定在 80 °C 时, 打开真空抽滤泵, 控制真空度在 70%~90% 范围内, 以保证溶液始终处于稳定沸腾的状态。当系统达到稳定时打开激光发射器和无纸记录仪。调整激光发射器和激光接收器的位置, 使得激光穿过澄清的溶液后落在激光接收器接收屏中心处。此时, 打开无纸记录仪开始本次实验的记录。无纸记录仪记录整个结晶析出的过程, 每 2 s 采集一次信号值并记录下来, 得到的数据导出后作图, 结合实验过程中目测及实验数据采集情况分析确定析晶点处溶液的碱浓度。

## 2 结果与分析

### 2.1 硫酸钠在铝酸钠溶液中的过饱和性

硫酸钠在亚熔盐介质中的过饱和性研究首先在  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaOH}\text{-H}_2\text{O}$  三元系中进行。料液在真空蒸发过程中每隔一段时间从取样口中快速取样并测定各个点的碱浓度,  $\text{Na}_2\text{O}$  浓度随时间变化情况如图 2 所示, 激光输出信号曲线如图 3 所示。

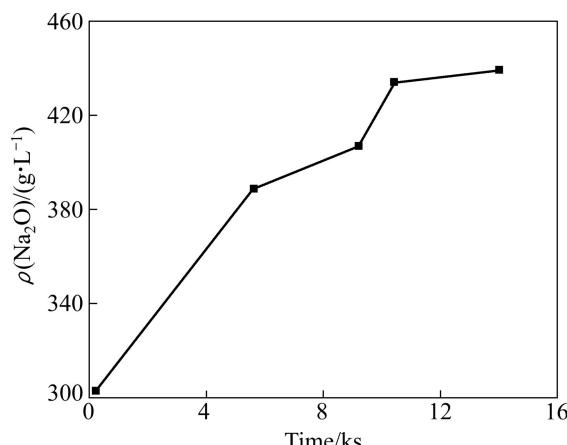


图 2 料液真空蒸发过程中  $\text{Na}_2\text{O}$  浓度随时间的变化

Fig. 2 Chang of  $\text{Na}_2\text{O}$  concentration with time during vacuum vaporation of feed solution process

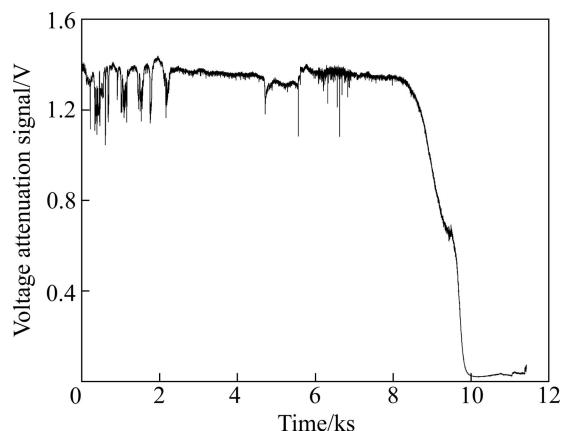


图 3 激光输出信号曲线

Fig. 3 Curve of laser output signal

由图 2 可以看出, 随着真空蒸发时间的延长, 溶液中  $\text{Na}_2\text{O}$  浓度随之增大, 前期碱浓度增大较快, 但当  $\text{Na}_2\text{O}$  浓度增大到 390 g/L 后, 碱浓度增长缓慢。由图 3 可知, 在蒸发的前期, 输出信号随时间变化不大, 在 8317 s 左右出现急速下降, 且输出信号从开始下降到最后保持稳定的时间间隔很短。结合图 2 和 3 可以看到, 在该条件下, 硫酸钠在  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-NaOH}\text{-H}_2\text{O}$  三元系中析晶点为  $\text{Na}_2\text{O}$  浓度 402 g/L 处。将该值与该温度下的硫酸钠在氢氧化钠溶液中溶解度曲线<sup>[12]</sup>(图 4 中曲线)进行对比可以看出, 该溶液析晶点的位置基本与该温度下硫酸钠在氢氧化钠溶液中溶解度曲线重合, 即没有出现明显的过饱和现象。也就是说, 该三元体系下硫酸钠的过饱和区间非常狭小, 在真空蒸发情况下, 只要溶液中硫酸钠浓度达到理论溶解度值硫酸钠就能从溶液中析出。

在上述基础上继续对硫酸钠在  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Al(OH)}_3\text{-NaOH-H}_2\text{O}$  四元碱液中的过饱和性进行研究。对苛性

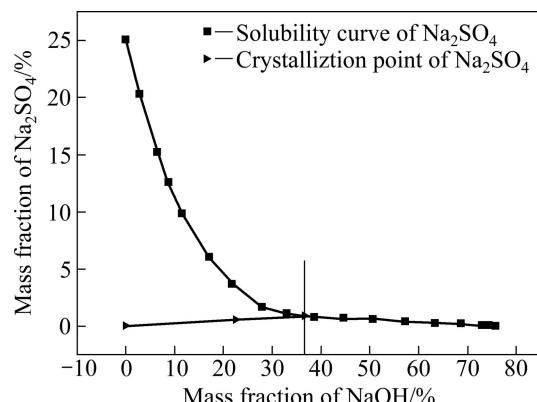


图 4  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  析晶点与溶解度曲线对比

Fig. 4 Comparison of crystallization and solubility of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

比为 12 的铝酸钠溶液真空蒸发得到碱浓度随时间变化如图 5 所示, 该过程中激光输出信号曲线如图 6 所示。

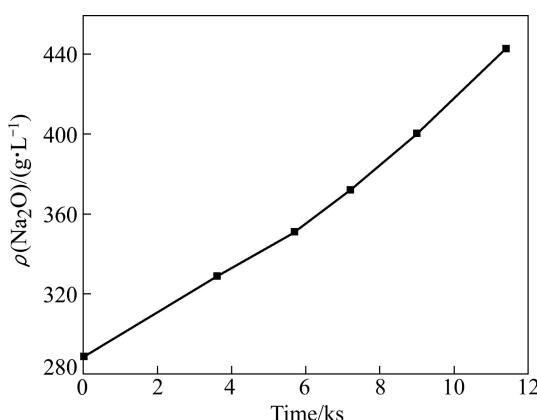


图 5 四元系蒸发过程中碱浓度随时间变化曲线

Fig. 5 Change of  $\text{Na}_2\text{O}$  concentration with time for quaternary system during evaporation

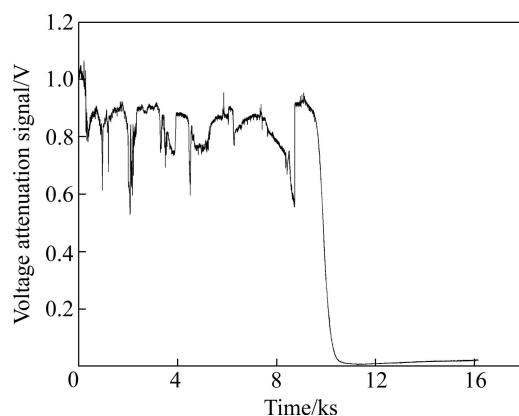


图 6 四元系蒸发过程中激光输出信号曲线

Fig. 6 Curve of laser output signal for quaternary system during evaporation

通过比对图 5 与 6 可以得出, 该条件下硫酸钠在  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-Al(OH)}_3\text{-NaOH}\text{-H}_2\text{O}$  四元系中析晶点处碱浓度为  $405.69 \text{ g/L}$ , 与上述三元系的  $402 \text{ g/L}$  非常接近, 因此可以认为, 氢氧化铝的加入对硫酸钠在该体系的析晶点并没有显著影响。由此确定硫酸钠在苛性比为 12 的铝酸钠溶液中也没有出现明显的过饱和现象, 即在对铝酸钠溶液进行真空蒸发过程中, 当硫酸钠达到其饱和浓度时即从溶液中结晶析出。因此, 在实际生产中可以不考虑硫酸钠过饱和现象对实际操作的影响。

## 2.2 二氧化硅杂质对硫酸钠过饱和性的影响

在传统氧化铝生产过程中二氧化硅杂质是体系中难以避免的杂质<sup>[13-14]</sup>。在亚熔盐法粉煤灰提铝清洁工

艺中也不例外, 在脱铝渣洗液中二氧化硅含量一般在  $2 \text{ g/L}$  左右。因此, 二氧化硅杂质对硫酸钠在亚熔盐介质中过饱和性的影响不可忽视, 有必要研究体系中不同初始  $\text{SiO}_2$  浓度对硫酸钠过饱和性的影响。

对初始  $\text{SiO}_2$  浓度分别为  $0$ 、 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.0$  和  $2.5 \text{ g/L}$  的与前述相同成分的铝酸钠溶液进行真空蒸发, 采用与前述相同的研究方法, 获得了不同初始  $\text{SiO}_2$  浓度下析晶点处的  $\text{Na}_2\text{O}$  浓度变化规律, 其结果如图 7 所示。

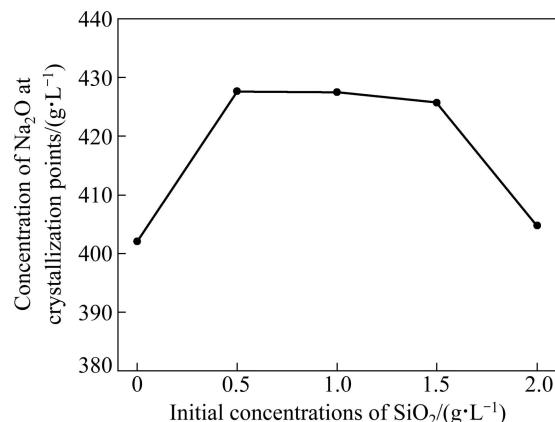
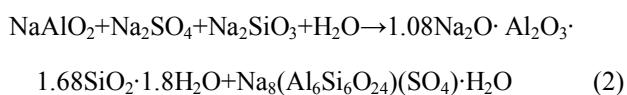


图 7 不同初始  $\text{SiO}_2$  浓度时析晶点处的碱浓度

Fig. 7 Concentration of  $\text{Na}_2\text{O}$  at crystallization point at different initial concentrations of  $\text{SiO}_2$

由图 7 可以看出, 二氧化硅杂质对硫酸钠在亚熔盐介质中的过饱和性具有一定影响, 二氧化硅杂质的存在显著提高了硫酸钠在亚熔盐介质中的过饱和度。当初始  $\text{SiO}_2$  浓度低于  $2.0 \text{ g/L}$  时, 硫酸钠析晶点处的  $\text{Na}_2\text{O}$  浓度由  $400 \text{ g/L}$  升高到了  $425 \text{ g/L}$  左右。但当初始  $\text{SiO}_2$  浓度高于  $2.0 \text{ g/L}$  时, 硫酸钠在亚熔盐介质中的过饱和性又有所降低, 析晶点处  $\text{Na}_2\text{O}$  浓度变为  $400 \text{ g/L}$  左右。这是由于二氧化硅浓度太高时, 硅酸钠与硫酸钠发生了反应, 析出的晶体由无水硫酸钠变成了溶解度更小的钠硅渣, 由图 8 中不同初始  $\text{SiO}_2$  浓度下析出晶体的 XRD 谱也证明了这一点。由图 8 可以看出, 当初始  $\text{SiO}_2$  浓度低于  $2.0 \text{ g/L}$  时, 析出晶体物相均为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; 当初始  $\text{SiO}_2$  浓度为  $2.0 \text{ g/L}$  处时, 析出晶体仍为无水硫酸钠, 但其衍射谱反应出的晶体晶型已经不同于之前的晶体; 而初始  $\text{SiO}_2$  浓度达到  $2.5 \text{ g/L}$  时, 析出晶体已经变成钠硅渣  $1.08\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot1.68\text{SiO}_2\cdot1.8\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4)\cdot\text{H}_2\text{O}$ , 此时析出晶体的反应式可表述如式(2)所示。



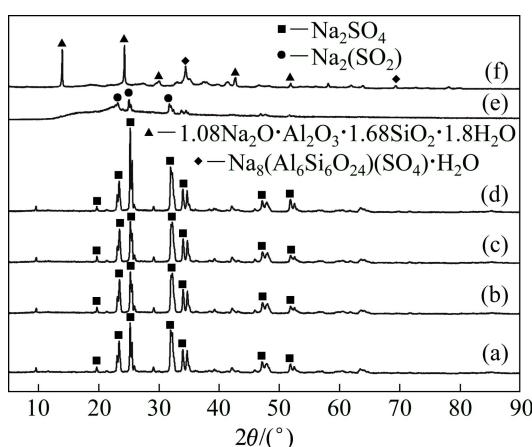


图 8 不同初始  $\text{Si}_2\text{O}$  浓度下析出晶体的 XRD 谱

Fig. 8 XRD patterns of crystallization precipitated under different initial concentrations of  $\text{SiO}_2$ : (a)  $\rho(\text{SiO}_2)=0 \text{ g/L}$ ; (b)  $\rho(\text{SiO}_2)=0.5 \text{ g/L}$ ; (c)  $\rho(\text{SiO}_2)=1.0 \text{ g/L}$ ; (d)  $\rho(\text{SiO}_2)=1.5 \text{ g/L}$ ; (e)  $\rho(\text{SiO}_2)=2.0 \text{ g/L}$ ; (f)  $\rho(\text{SiO}_2)=2.5 \text{ g/L}$

### 2.3 碳酸钠对硫酸钠过饱和性的影响

与二氧化硅类似, 碳酸钠也是氧化铝生产过程中不可避免的杂质<sup>[15-16]</sup>。而亚熔盐介质中碳酸钠的存在对于真空蒸发过程中硫酸钠的过饱和性影响规律还不明了, 因此, 需要研究碳酸钠对硫酸钠过饱和性的影响, 着重研究不同初始碳酸钠浓度时该体系中硫酸钠析晶点处的碱浓度变化情况。

将初始  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度分别为 1.5、2.5、5.0、7.5 和 9.5 g/L 与前述相同成分的铝酸钠溶液进行真空蒸发, 采用与前述相同的研究方法, 获得了不同溶液析晶点处的  $\text{Na}_2\text{O}$  浓度变化规律, 其结果如图 9 所示。

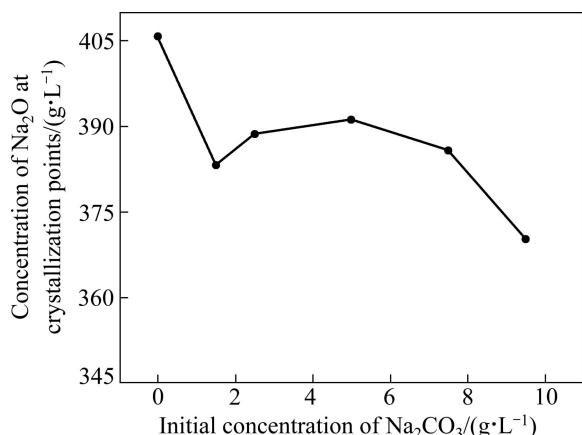


图 9 不同初始  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度时析晶点处的碱浓度

Fig. 9 Concentration of  $\text{Na}_2\text{O}$  at crystallization point at different initial concentrations of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

从图 9 可知, 碳酸钠的存在明显降低了硫酸钠的过饱和度, 当体系中的初始  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度小于等于 7.5 g/L 时, 溶液析晶点位置有所提前, 平均析晶点碱浓度由原来的 400 g/L 减小到了 385 g/L 左右; 当体系中初始  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度增大到 9.5 g/L 后析晶点变为 370 g/L, 该浓度与其他浓度相比进一步降低, 说明随着碳酸钠含量的增加, 碳酸钠对硫酸钠的过饱和性影响更为显著。这是由于当体系中有杂质碳酸钠存在时, 蒸发排盐过程中碳酸钠与硫酸钠会生成溶解度更小的水溶性复盐碳纳矾  $\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$  结晶析出。图 10 所示为不同初始  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下析出晶体的 XRD 谱也证明碳纳矾的生成。由图 10 可看出, 当体系中初始  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度由 0 升高至 1.5 与 2.5 g/L 时, 析出晶体的物相组成即由无碳酸钠时的硫酸钠变为  $\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$  复盐; 继续升高体系中初始碳酸钠浓度至 5 g/L 时, 析出晶体中除了碳纳矾复盐外, 还出现了无水碳酸钠; 当体系中初始碳酸钠浓度达到 9.5 g/L 时, 由 XRD 谱可以看出, 无水碳酸钠的衍射峰强度已经强于碳纳矾复盐, 证明此时析出晶体中应主要为碳酸钠结晶。

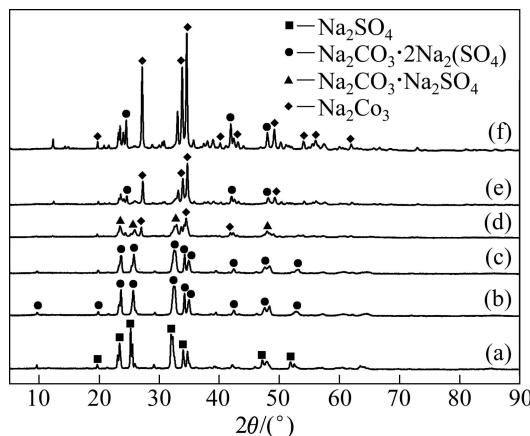


图 10 不同初始  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  浓度下析出晶体的 XRD 谱

Fig. 10 XRD patterns of crystallization precipitated at different initial concentrations of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ : (a)  $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)=0 \text{ g/L}$ ; (b)  $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)=1.5 \text{ g/L}$ ; (c)  $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)=2.5 \text{ g/L}$ ; (d)  $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)=5.0 \text{ g/L}$ ; (e)  $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)=7.5 \text{ g/L}$ ; (f)  $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3)=9.5 \text{ g/L}$

结合图 7 和 9 还可以看出, 二氧化硅和碳酸钠虽然对硫酸钠的过饱和性均具有较强的影响, 但二者作用结果不同, 二氧化硅的存在显著增加硫酸钠的过饱和浓度, 而碳酸钠则大幅降低硫酸钠的过饱和浓度。杂质引入后, 不同析晶产物的析出规律差异是造成这种变化的主要原因。一方面, 二氧化硅的存在使析晶

产物向钠硅渣转变，而铝硅酸钠在铝酸钠溶液中的溶解度是随着溶液浓度的升高而增大<sup>[17]</sup>，从而间接增加了硫酸钠的过饱和度；另一方面，碳酸钠的存在使析晶产物向溶解度更低的碳纳矾转变，而碳纳矾本身溶解度是随溶液浓度的升高而降低的。由图10中还可看出，初始Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>浓度为1.5 g/L时，析晶产物就已由Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>转变为碳纳矾复盐，从而显著降低硫酸钠的过饱和度。

### 3 结论

- 1) 硫酸钠在亚熔盐介质中的真空蒸发过程不存在明显的过饱和现象，当硫酸钠在体系中达到其饱和溶解度时就会结晶析出。
- 2) 二氧化硅杂质的存在会显著提高硫酸钠在亚熔盐介质中的过饱和度，可使析晶点处碱浓度提高到20 g/L左右。
- 3) 碳酸钠的存在可降低硫酸钠在体系中的过饱和度，使得析晶点处碱浓度降低15 g/L左右。
- 4) 杂质二氧化硅使析晶产物向钠硅渣转变，而杂质碳酸钠使析晶产物向碳纳矾复盐转变。

### REFERENCES

- [1] YAO Z T, XIA M S, SARKER P K, CHEN T. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China[J]. Fuel, 2014, 120: 74–85.
- [2] HE Yi, LUO Qing-ming, HU Hua-long. Situation analysis and countermeasures of China's fly ash pollution prevention and control[C]/The 7th International Conference on Waste Management and Technology. Beijing: Procedia Environmental Sciences, 2012: 690–696.
- [3] DAI Shi-feng, ZHAO Lei, PENG Su-ping, CHOU Chen-lin, WANG Xi-bo. Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 81: 320–332.
- [4] QI Li-qiang, YUAN Yong-tao. Characteristics and the behavior in electrostatic precipitators of high-alumina coal fly ash from the Jungar power plant, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192: 222–225.
- [5] YANG Quan-cheng, MA Shu-hua, ZHANG Ran, ZHENG Shi-li. Recovery of alumina from circulating fluidized bed combustion Al-rich fly ash mild hydro-chemical process[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(4): 1187–1195.
- [6] 毕诗文. 氧化铝生产工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 96–103.
- [7] BI Shi-wen. Technology of alumina production[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 96–103.
- [8] 阿布拉曼夫 B. 碱法综合处理含铝原料的物理化学原理[M]. 陈谦德, 唐贤柳, 黄际芬, 李小斌, 译. 长沙: 中南工业大学出版社, 1988: 178–182.
- [9] ABLAMOFF B. Physical and chemical principles of comprehensive treatment of aluminum-containing raw materials by basic process[M]. CHEN Qian-de, TANG Xian-lin, HUANG Ji-fen, LI Xiao-bin, transl. Changsha: Central South University of Technology Press, 1988: 178–182.
- [10] 刘桂华, 高君丽, 李小斌, 徐双. 拜耳法高压溶出液中铁浓度变化规律的研究[J]. 矿冶工程, 2007, 27(5): 38–40.
- [11] LIU Gui-hua, GAO Jun-li, LI Xiao-bin, XU Shuang. Study on variation rule of iron in the aluminate solution after digestion process at high temperature by bayer process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2007, 27(5): 38–40.
- [12] 陈文汨, 陈学刚, 郭金权, 黄伟光, 胡小莲. 拜耳液中铁的行为研究[J]. 轻金属, 2008, 4: 14–18.
- [13] CHEN Wen-mi, CHEN Xue-gang, GUO Jin-quan, HUANG Wei-guang, HU Xiao-lian. Research on the behavior of iron in bayer liquor[J]. Light Metals, 2008, 4: 14–18.
- [14] 胡小莲, 陈文汨. 采用湿式氧化法脱除铝酸钠溶液中的硫的研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(10): 2911–2916.
- [15] HU Xiao-lian, CHEN Wen-mi. Desulfurization from sodium aluminate solution by wet oxidation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(10): 2911–2916.
- [16] 丁爱娟, 郑诗礼, 马淑花, 郭奋, 王月娇. 循环流化床锅炉粉煤灰中硫的赋存状态研究[J]. 矿产综合利用, 2013, 2: 58–62.
- [17] DING Ai-juan, ZHENG Shi-li, Ma Shu-hua, GUO Fen, WANG Yue-jiao. Study on occurrence of sulfur in fly ash from circulating fluidized bed boiler[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2013, 2: 58–62.
- [18] DING Ai-juan, WANG Yue-jiao, MA Shu-hua, ZHENG Shi-li, GUO Fen. Phase diagram for Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-NaOH-H<sub>2</sub>O system and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solubility in sodium aluminate solution with caustic ratios of 12 and 15 at 80 °C[J]. Journal of Chemical and Engineering Data, 2013, 58(4): 964–968.
- [19] 杨重愚. 轻金属冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [20] YANG Chong-yu. Metallurgy of light metals[M]. Beijing:

- Metallurgical Industry Press, 1991.
- [14] 王利涛. 拜耳法高浓度铝酸钠溶液深度脱硅工艺研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.  
WANG Li-tao. Study on technology of deep desilication in sodium aluminate solution with high alumina concentration produced by bayer process[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [15] 王 磊, 陆 玉, 毛 鹏, 王加文. 拜耳法生产流程中碳酸钠浓度升高的原因分析及对策[J]. 冶金丛刊, 2011, 1: 14–15.  
WANG Lei, LU Yu, MAO Peng, WANG Jia-wen. Reasons about rising of sodium carbonate in bayer process and measures[J]. Metallurgical Collections, 2011, 1: 14–15.
- [16] 王利娟, 蒋 涛, 杨会宾. 氧化铝生产过程中结疤的生成及防治技术的探索[J]. 轻金属, 2011, 2: 11–15.  
WANG Li-juan, JIANG Tao, YANG Hui-bin. The research of scaling growing and prevention in the alumina process[J]. Light Metals, 2011, 2: 11–15.
- [17] 杨桂丽, 娄世彬. 拜耳法种分母液蒸发过程中钠盐析出规律的试验研究[J]. 轻金属, 2006, 9: 18–21.  
YANG Gui-li, LOU Shi-bin. Experiment studies on the precipitation of sodium salt during the evaporation process of Bayer spent liquor[J]. Light Metals, 2006, 9: 18–21.

(编辑 李艳红)