文章编号:1004-0609(2010)08-1629-07

# 晶种对铝酸钠溶液耦合分解行为的影响

王 志<sup>1</sup>, 张 娟<sup>1,2</sup>, 杨 柳<sup>1,2</sup>, 郭占成<sup>1</sup>, 郑诗礼<sup>1</sup>, 张 懿<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 过程工程研究所 湿法冶金清洁生产技术国家工程实验室,北京 100190;2. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

摘 要:采用铝酸钠溶液耦合分解的方法制备一水软铝石,即在碳酸化分解的条件下加入一水软铝石晶种进行铝 酸根聚合结晶过程诱导,研究晶种对耦合分解率和产物中一水软铝石含量的影响。结果表明:耦合分解产物为三 水铝石与一水软铝石的混合物,改变晶种属性能够调控耦合分解率和产物组成,晶种的主要作用是促进一水软铝 石的诱导结晶。随着晶种系数(*S*)在 0.1~0.8 范围内的增加,分解率随之降低;当晶种系数*S* 由 0.1 增加到 0.4 时, 一水软铝石在产物中的质量分数急剧增加至 76%左右;当 *S* > 0.4 后,一水软铝石的质量分数不再发生明显变化, 且随着晶种粒度的减小,分解率有所提高,6.5 h 后,分解率均达到 90%左右,但产物中一水软铝石含量却随之降 低。经过机械活化后的晶种,活性增强,使分解率和一水软铝石含量均有所提高。 关键词:铝酸钠溶液;耦合分解;晶种;分解率;一水软铝石

中图分类号:TQ133.1 文献标志码:A

# Effects of seed on coupling-precipitation behavior from sodium aluminate solution

WANG Zhi<sup>1</sup>, ZHANG Juan<sup>1,2</sup>, YANG Liu<sup>1,2</sup>, GUO Zhan-cheng<sup>1</sup>, ZHENG Shi-li<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology,

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

2. Graduate University, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The boehmite was prepared from sodium aluminate solution by coupling-precipitation, the carbonization and seed precipitation were adopted to induce the reaction and crystallization of aluminate ions. The effects of seed on precipitation rate and mass fraction of boehmite were investigated. The results indicate that the products are constituted by boehmite and gibbsite. The seeds can influence the precipitation rate and composition of alumina hydrates, especially have obvious effects on the induced crystallization of boehmite. With increasing the seed coefficient *S* in the range of 0.1-0.8, the precipitation rate decreases. However, the mass fraction of boehmite increases dramatically with seed coefficient changing from 0.1 to 0.4, and gets the maximum value of 76%. When the seed coefficient is more than 0.4, it has no obvious change. As the seed diameters decreases the precipitation rate increases while the mass fraction of boehmite decreases. After 6.5 h, the precipitation rate reaches 90% approximately. The activity of seed is enhanced by mechanical activation, which results in the increases of precipitation rate and the mass fraction of boehmite. **Key words:** sodium aluminate solution; coupling-precipitation; seed; precipitation rate; boehmite

我国铝土矿主要是中低品位的一水硬铝石,这就 决定氧化铝生产方法主要是流程复杂的烧结法和混联 法,其平均生产能耗约是国外拜耳法的 2~4 倍,导致 我国氧化铝的生产成本较高,所以,非常有必要研究 氧化铝生产工艺的节能技术<sup>[1]</sup>。

铝酸钠溶液的分解是氧化铝生产工艺中最重要的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50704030);中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KGCX2-YW-321-2) 收稿日期:2009-09-04;修订日期:2010-01-20 通信作者:王 志,副研究员,博士;电话:010-62558489;E-mail:zwang@mail.ipe.ac.cn 工序之一,该工序决定着生产周期、产物的晶型、形 貌及粒径等特征,主要存在问题是分解时间长、分解 率低和产物晶型难以有效调控。工业生产中三水铝石 作为主要分解产物提供给后续的焙烧环节<sup>[2]</sup>,如果用 一水软铝石取代三水铝石可以实现焙烧过程 60%的节 能,因为三水铝石(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O)含有 3 个结晶水,每 脱水产出 1 mol氧化铝所需热量为 170 kJ,而一水软 铝石(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O 或 AlOOH)只含有 1 个结晶水,焙烧 得到 1 mol氧化铝所需热量为 72 kJ<sup>[3-4]</sup>。JOANNE 等<sup>[5]</sup> 研究认为以澳洲氧化铝生产水平,焙烧一水软铝石以 代替三水铝石可实现工艺节能 12%左右。

1986年, MISRA 和 SIVAKUMAR<sup>[6]</sup>最先在铝酸 钠溶液中添加晶种于 115~145 温度下制备出一水软 铝石,之后国内外学者对此做了相关研究。SKOUFADIS 等<sup>[7-8]</sup>和 PANIAS 等<sup>[9–11]</sup>通过研究温度、铝酸钠溶液浓 度、晶种系数对一水软铝石分解率的影响,建立分解 动力学模型,认为铝酸钠溶液中游离碱的存在是阻碍 一水软铝石结晶析出的主要原因,而大量添加晶种的 方法可以促使其结晶。DASH 等<sup>[12]</sup>研究指出当铝酸钠 溶液铝酸钠溶液中氧化铝与苛性碱的质量比为 1.1 或 1.0,且温度不小于 85 时可分解出一水软铝石,通 过添加有机物可以降低一水软铝石析出的温度。但一 水软铝石的析出存在着分解时间长、分解率低、添加 晶种量大等问题,且所得一水软铝石粒度细小,成为 在氧化铝生产中一水软铝石得以应用的瓶颈。

铝酸钠溶液的碳酸化分解过程通过加入 CO<sub>2</sub> 促进 分解,使分解率可以在 2~3 h 后达到 90%左右,但因 在分解动力学上较其他的铝氧水合物具有优势,产物 主要是三水铝石<sup>[5,13]</sup>。DASH 等<sup>[12]</sup>指出晶种可以诱导 一水软铝石的分解结晶,且溶液的分解率与晶种系数 呈二次方的关系。因此,可以利用碳酸化分解与晶种 分解相结合的方法来改善铝酸钠溶液的分解过程,以 提高分解率和调控结晶产物,但未见相关研究报道。 本文作者通过碳酸化分解与晶种分解过程反应结晶耦 合的方法制备一水软铝石<sup>[14]</sup>,即在碳酸化分解的条件 下加入一水软铝石晶种进行铝酸根离子聚合反应与生 长基元结晶诱导,重点研究晶种特征(晶种系数、晶 种粒度、晶种活化)对耦合分解率及产物组成的影响, 为实现一水软铝石分解的量化调控提供了实验依据。

## 1 实验

### **1.1** 实验试剂和装置 实验所用试剂均为分析纯,一水软铝石晶种为未

结晶完全的纯一水软铝石(国内某氧化铝厂提供,工业级)。反应装置如图1所示。



#### 图1 实验装置示意图

**Fig.1** Schematic diagram of experiment apparatus: 1 — Electromotor; 2—Sampling hole; 3—Reactor ; 4—Thermostat water bath

#### 1.2 实验方法

将一定浓度的 NaOH 溶液加热至 110 , 再加入 一定量的 Al(OH)<sub>3</sub> 继续加热,使溶液温度维持在 110~120 ,直至 Al(OH)<sub>3</sub>完全溶解,然后把溶液真 空抽滤,将除去杂质的铝酸钠溶液放入容器中待用。

将实验所需浓度、分子比的铝酸钠溶液移入反应 器中,当溶液升至所需温度后,加入预热到该温度的 晶种。在充分搅拌的条件下,通入 CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 的混合 气体 (CO<sub>2</sub> 浓度为 38%,通气速率是 200 mL/min), 并开始计时。在反应过程中,每隔一定时间从取样孔 中移取 10~15 mL 的反应溶液,并迅速用离心机进行 固液分离,分离后的液相采用酸碱滴定和 EDTA 络合 滴定的方法进行苛碱、全碱和氧化铝含量分析。当反 应达到终点停止通气,继续搅拌 10 min 后将固液分 离,然后将固相产物充分洗涤,在 105 下烘干 48 h, 进行检测分析。

晶种粒度的分级是将原始晶种用孔径为 150 μm、 74 μm、48 μm 的标准筛进行湿筛,取筛上物待用。晶 种的机械活化是将原始晶种置于球磨机中研磨 3 min, 再把活化后的晶种进行粒度分级。

铝酸钠溶液分子比 *R* 是指 Na<sub>2</sub>O 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的物质 的量比。晶种系数 *S* 指将添加的一水软铝石晶种的量 折合成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量与铝酸钠原液中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的比 值。一水软铝石质量分数 w(AlOOH)为一水软铝石质 量与产物总质量的比。铝酸钠溶液分解率( $\eta_{Al,O_3}$ ):

$$\gamma_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1 - \frac{\rho_{\text{m}} \times \rho_{\text{T}}}{\rho_{\text{a}} \times \rho_{\text{T}}'} \times 100\% \tag{1}$$

式中: $\rho_{ax}$ ,  $\rho_{m}$ 分别为铝酸钠溶液分解前、后的氧化铝

1631

浓度,g/L; $\rho_T$ 、 $\rho'_T$ 分别为铝酸钠溶液分解前、后的全碱浓度,g/L。

#### 1.3 固相检测

晶型分析采用 Dmax-2400 型 X 射线衍射分析仪 (日本理学公司),形貌分析采用 JSM 6700F 冷场发射 电子扫描显微镜(日本电子公司),粒度分析采用 LS13320 型激光粒度分析仪(美国贝克曼-库尔特公 司),分解产物中一水软铝石质量分数采用 ZPR-2Y 热 重分析仪测定(上海天平仪器厂)。

## 2 结果与讨论

#### 2.1 晶种系数对耦合分解的影响

铝酸钠溶液分解过程界面能高,自发结晶受到限制,晶种诱导可以强化目标产物的结晶<sup>[3]</sup>,为了探究 耦合分解中一水软铝石晶种的作用,首先考察晶种添 加量对分解过程及产物的影响。在铝酸钠溶液浓度  $\rho_{Al_2O_3}=104 \text{ g/L}、分子比 R = 1.48 时,不同晶种系数下$ 的分解率如图 2 所示。



图 2 晶种系数对分解率的影响

Fig.2 Effects of seed coefficient on precipitation rate: (a) S=0;(b) t=90

由图 2 可以看出,在通入二氧化碳的情况下,铝酸钠溶液的分解速率很快,即使不加晶种(*S*=0)反应 5 h 后分解率仍可达到 80%以上。加入晶种后,不同晶种系数对分解率的影响也不同,分解前期,铝酸钠溶液分解速率与晶种系数的变化没有相对应的规律;分解中后期,随着晶种系数的增大,铝酸钠溶液分解率逐渐降低。

碳酸化分解过程中会形成很高的过饱和度,而且 由于反应造成的过饱和度降低也会得到补偿,所以在 不加晶种时铝酸钠溶液也可以快速分解。加入一水软 铝石晶种后,晶种成为结晶核心,从而三水铝石的结 晶受到抑制,且添加的晶种越多,对一水软铝石的诱 导越有利,相反对三水铝石的抑制作用越明显。由于 三水铝石在动力学上比一水软铝石具有优势[5],所以 整体耦合分解率也受到抑制。因此,随着晶种系数的 增加,分解率逐渐降低。在单纯的一水软铝石晶种分 解过程中,分解率随着晶种系数的增加而增加<sup>[3,7]</sup>,与 本研究耦合分解的结果截然不同,单纯晶种分解过饱 和度较小,一水软铝石是主要产物,晶种越多,生长 机会越多,分解率随之升高,但在耦合分解过程中, 通入的二氧化碳会形成很强烈的推动力,较高的过饱 和度使反应快速进行, 晶种不再是唯一的促进分解的 因素,在此环境下一水软铝石和三水铝石竞争生长。 由此可见, 通入的二氧化碳和加入的晶种对耦合分解 过程都起到促进的作用,但二氧化碳对分解率起主导 作用,而晶种更多的体现在对一水软铝石的诱导和对 三水铝石的抑制上。

产物的 XRD 谱如图 3 所示。由图 3 可看出,在 14.26°、27.87°、38.32°和 49.67°处都有衍射峰,这些



#### 图 3 不同晶种系数下产物的 XRD 谱

**Fig.3** XRD patterns of product under different seed coefficients: (a) *S*=0; (b) *S*=0.4; (c) *S*=0.8

峰为一水软铝石的特征衍射峰,说明产物中有一水软 铝石存在。同时,在 18.84°和 20.33°处都有很强的衍 射峰,此为三水铝石的衍射峰,说明产物中也含有三 水铝石。可见耦合分解产物为一水软铝石和三水铝石 的混合物,二者具体的质量分数可通过热重分析仪来 测定。

测定的分解产物中一水软铝石的含量如图 4 所 示。由图 4 可知,未添加晶种时产物中也含有一水软 铝石,但含量很低,不到 2%(质量分数)时,加入晶种 后,当 *S* 由 0.1 变化到 0.4 时,一水软铝石在产物中的 含量急剧增加;当 *S*=0.4 时,一水软铝石的质量分数 达到最大值 76%;当 *S* > 0.4 后,一水软铝石的质量分 数不再有明显的变化。



Fig.4 Effect of seed coefficient on mass fraction of boehmite

铝酸钠溶液的分解过程都可以分为生长基元的形 成和生长基元转变为铝氧水合物两个阶段。从 20 到 90 时,三水铝石和拜耳石从过饱和铝酸钠溶液中 的析出具有相同的分解机理,只是由于生长基元结合 的方式不同<sup>[15]</sup>,所以结晶产物的组成取决于分解环境 对生长基元的改变。铝酸钠溶液在强推动力的作用下 主要为自发分解,且在本研究条件下,三水铝石的结 晶在热力学上是优于一水软铝石的[16-17],所以不加晶 种时分解产物主要是三水铝石。加入晶种后,铝酸根 离子有两种去向:一是形成新相的三水铝石,属于均 相成核;二是在晶种诱导下成为一水软铝石,属于异 相成核。晶种越多,可以为一水软铝石提供越多的生 长基点,更多的含铝基元被诱导生成一水软铝石。另 一方面,在铝酸钠溶液分解过程中,铝酸根离子经过 脱水、缩合、释放 OH-等反应才能转化为铝氧水合物, 分解方程式可表示为式(2):

 $Al(OH)_{4}^{-} \longrightarrow Al(OH)_{3} + AlOOH + H_{2}O + OH^{-}$ (2)

随着反应的进行,铝酸钠溶液中游离的 OH 逐渐 增多,OH 吸附在一水软铝石表面使得晶种带负电荷, 铝酸根离子也带负电荷。由于电荷间的排斥作用,生 长基元难以在晶种表面固化,随着晶种添加量的增加, 晶种单位面积上吸附的 OH 分散减少,排斥作用变弱, 生长基元更容易长入晶格。所以,随着晶种系数的增 加,产物中一水软铝石的含量增加。

不同晶种系数下所得产物的粒径分布如图 5 所 示。由图 5 可看出,随着晶种系数的增加,产物粒径 分布向左移动,平均粒径逐渐减小。分解过程是成核、 破裂、附聚、长大共同作用的结果。晶种添加量越多, 颗粒之间的碰撞就越频繁,从而影响到一水软铝石的 附聚长大;且在分解过程中,新析出的晶核作为粘结 剂将晶种粒子团聚在一起,晶种添加量越大,作为粘 结剂的新生晶核不足。所以,晶种系数越大,产物平 均粒径越小。



图 5 不同晶种系数下产物的粒度分布

**Fig.5** Grain size distribution of products under different seed coefficients

图 6 所示为不同晶种系数下产物的 SEM 像。从 图 6 可以看出,不添加晶种时,碳酸化分解产物大都 为六方形的三水铝石,是由晶粒组成的团聚体。添加 晶种时,产物是由四方形的一水软铝石和六方形的三 水铝石组成的团聚体,这也同 XRD 谱和热重的分析 结果一致,颗粒大小在 40 μm 左右。

#### 2.2 晶种粒径对耦合分解的影响

由上述研究可知, 晶种对铝酸钠溶液分解结晶过 程有很大的影响, 能诱导溶质分子结晶析出。不同粒 径的晶种有自身的理化特性, 因此, 有必要对不同粒 径晶种对耦合分解过程的影响进行研究。

在晶种系数 S=0.4、铝酸钠溶液浓度  $\rho_{Al,O_3}$ =103



#### 图 6 不同晶种系数下产物的 SEM 像

Fig.6 SEM images of products under different seed coefficients: (a) S=0; (b) S=0.2; (c), (d) S=0.4

g/L、分子比 *R*=1.52 的条件下,不同粒度晶种对分解 率的影响如图 7 所示。从图 7 可以看出,在不同粒径 晶种的诱导下,分解趋势大致相同,铝酸钠溶液快速 分解,6.5 h 后,分解率达到 90%左右。随着晶种粒度 的减小,铝酸钠溶液的分解率有所升高。因为晶种粒 径越小,比表面积越大,单位质量晶种的活性点也越 多,一水软铝石依靠晶种上的活性区域结晶,在晶种 表面会形成新的晶核,活性区域越多,结晶速率越快 <sup>[7,18]</sup>,所以分解率随着晶种粒径的减小而增加。但



图 7 晶种粒度对分解率的影响

Fig.7 Effects of grain size of seed on precipitation rates

是各粒度下差别并不是很明显,粒度对分解率的影响 没有单纯晶种分解时显著<sup>[11]</sup>,说明在耦合分解过程中 晶种对分解率的影响不大,通入的二氧化碳对分解速 度和程度起决定作用。

不同粒度晶种分解的产物组成如表1所列。由表 1可以看出,晶种粒径越小,产物中一水软铝石含量 越少,三水铝石含量越多。因为晶种粒径越小,分解 率越高,在分解率高、过饱和度大的条件下,三水铝 石容易分解析出<sup>[11]</sup>,细晶种对三水铝石的抑制作用变 弱,一水软铝石含量相对减少。由此可见,一水软铝 石晶种粒径越小,越有利于三水铝石的结晶,由于三 水铝石在动力学上的优越性,分解率也相应提高,随 着晶种粒径的减小,分解率有所升高。

#### 表1 不同粒径晶种分解产物的组成

Grain size of seed/μm	Mass fraction	Mass fraction
	of AlOOH,	of Al(OH) <sub>3</sub> ,
	w(AlOOH)/%	$w(Al(OH)_3)/\%$
48-74	68.5	31.5
74-150	70.0	30.0
> 150	74.0	26.0

#### 2.3 晶种活化对耦合分解的影响

晶种表面的大量活性位有可能被杂质所包覆,通 过沸水加热、热活化和超声活化等活化的方式能够提 高晶种的活性,从而加快分解率<sup>[19-20]</sup>。

在晶种系数 *S*=0.4、铝酸钠溶液浓度  $\rho_{Al_2O_3}$ =103 g/L、分子比 *R*=1.52 时,经过机械活化的晶种对分解 率的影响如图 8 所示。由图 8 可看出,相同粒度分布 下,机械活化后的晶种分解率略高于未活化晶种的,







晶种活化后使原先被杂质包覆的可结晶位得以释放, 更易于生长基元进入晶格,从而加快分解。活化晶种 粒径越小,分解率越高,和未活化的晶种具有相同的 规律。但是,通过活化的方法没有显著提高分解率, 再次说明在铝酸钠溶液耦合分解的条件下,晶种并不 是决定分解率的关键因素。

图9所示为晶种活化后产物的组成。由图9可以 看出,使用机械活化后的晶种比同粒度下没有活化的 能获得更高的一水软铝石质量分数。这是由于经过机 械活化后的晶种表面含有更多的活性位,更有利于一 水软铝石在晶种上的生长,晶种的诱导作用进一步得 到体现<sup>[21]</sup>。活化后的晶种对分解率的促进作用和对一 水软铝石的诱导作用得到强化,所以分解率和一水软 铝石含量都有所提高。



图 9 晶种活化对一水软铝石质量分数的影响

Fig.9 Effect of activated seed on mass fraction of boehmite

# 3 结论

 1) 耦合分解过程中晶种会影响到分解率和产物 组成,但其作用更多的表现在对一水软铝石的诱导结 晶上。随着晶种系数 S 在 0.1~0.8 范围内的增加,分 解率随之降低;当 S 由 0.1 变化到 0.4 时,一水软铝石 在产物中的质量分数急剧增加,并达到最大值 76%; 当 S> 0.4 后,一水软铝石的质量分数不再有明显的变 化。

2)随着晶种粒度的减小,分解率略有提高,6.5 h 后,分解率均达到90%左右,但产物中一水软铝石含 量却随之降低,细晶种对三水铝石的抑制作用变弱。

 3) 晶种经过机械活化后,被杂质包覆的可结晶位 得以释放,对分解率的促进作用和对一水软铝石的诱 导作用都得到强化,所以使分解率和一水软铝石含量 均有所提高。

#### REFERENCES

- 毕诗文,于海燕. 氧化铝生产工艺[M]. 北京: 化学工业出版 社, 2006: 78-90.
   BI Shi-wen, YU Hai-yan. Alumina production process [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 78-90.
- [2] 张伦和,何静华,张 颖. 我国氧化铝工业现状及发展对策
  [J]. 轻金属, 2006(2): 1-3.
  ZHANG Lun-he, HE Jing-hua, ZHANG Ying. Status and countermeasure of alumina industry in China [J]. Light Metal, 2006(2): 1-3.
- [3] DASH B, TRIPATHY B C, BHATTACHARYA I N, DAS S C, MISHRA C R, PANI B S. Effect of temperature and alumina/caustic ratio on precipitation of boehmite in synthetic sodium aluminate liquor [J]. Hydrometallurgy, 2007, 88: 121–126.
- [4] FILIPPOU D, PASPALIARIS I. From Bayer process liquors to boehmite and then to alumina: an alternative route for alumina production[J]. Light Metals, 1993: 119–123.
- [5] JOANNE L, CHRIS V, MELISSA L, GRETA B. Boehmite and Gibbsite precipitation[J]. Light Metals, 2005: 203–207.
- [6] MISRA C, SIVAKUMAR T J. Boehmite production by precipitation from sodium aluminate solution at elevated temperatures: US 4595581[P]. 1986–06–17.
- [7] SKOUFADIS C, PANIAS D, PASPALIARIS I. Kinetics of boehmite precipitation from supersaturated sodium aluminate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2003, 68: 57–68.
- [8] SKOUFADIS C, PANIAS D, PASPALIARIS I. Parameters of boehmite precipitation from supersaturated sodium aluminate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2003, 68: 77–88.
- [9] PANIAS D. Role of boehmite/solution interface in boehmite precipitation from supersaturated sodium aluminate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2004, 74: 203–212.
- [10] PANIAS D, KRESTOUL A. Effect of synthesis parameters on precipitation of nanocrystalline boehmite from aluminate solutions[J]. Powder Technology, 2007, 175(33): 163–173.
- [11] PANIAS D, ASIMIDIS P, PASPALIARIS I. Solubility of boehmite in concentrated sodium hydroxide solutions: model development and assessment [J]. Hydrometallurgy, 2001, 59: 15–29.
- [12] DASH B, TRIPATHY B C, BHATTACHARYA I N, DAS S C, MISHRA C R, MISHRA B K. Precipitation of boehmite in

sodium aluminate liquor[J]. Hydrometallurgy, 2009, 95: 297-301.

[13] 李小斌,陈 滨,周秋生,刘桂华,彭志宏,刘祥民. 铝酸钠 溶液碳酸化分解过程动力学[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5): 850-853.

LI Xiao-bin, CHEN Bin, ZHOU Qiu-sheng, LIU Gui-hua, PENG Zhi-hong, LIU Xiang-min. Kinetics of carbonation decomposition of sodium aluminate solution [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(5): 850–853.

- [14] 王 志,郭占成.用铝酸钠溶液生产一水软铝石: CN 200710065124[P]. 2007-10-03.
   WANG Zhi, GUO Zhan-cheng. Method for boehmite precipitation from supersaturated sodium aluminates solutions by carbonation decomposition: CN 200710065124 [P]. 2007-10-03.
- [15] van STRATEN H A, SCHOONEN M A, VERHEUL R C S, de BRUYN P L. Precipitation from supersaturated aluminate solutions[J]. Colloid and Interface, 1985, 106(1): 175–185.
- [16] 李小斌,刘祥民,苟中入,彭志宏,刘桂华,周秋生,丁安平, 李 明,刘业翔. 铝酸钠溶液碳酸化分解的热力学[J]. 中国 有色金属学报,2003,13(4):1005-1010.
  LI Xiao-bin, LIU Xiang-ming, GOU Zhong-ru, PENG Zhi-hong, LIU Gui-hua, ZHOU Qiu-sheng, DING An-ping, LI Ming, LIU Ye-xiang. Thermodynamics of carbonization of aluminate solution [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 1005-1010.
- [17] BARNES M C, ADDAI-MENSAH J, GERSON A. The kinetics of desilication of synthetic spent Bayer liquor seeded with cancrinite and cancrinite/sodalite mixed-phase crystals[J]. Journal of Crystal Growth, 1999, 200(2): 251–264.
- [18] ZENG J S, YIN Z L, CHEN Q Y. Intensification of precipitation of gibbsite from seeded caustic sodium aluminate liquor by seed activation and addition of crown ether[J]. Hydrometallurgy, 2007, 89: 107–116.
- [19] BLANKS K A. Novel synthesis of gibbsite by laser-stimulated nucleation in supersaturated sodium aluminate solutions[J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 220(4): 572–578.
- [20] CHEN Q Y, Y1N J G, Y1N Z L. Effect of mechanically activated seeds on the agglomeration process of supersaturated sodium aluminate liquors[J]. Light Metals, 2007: 157–161.
- [21] MA Shu-hua, ZHENG Shi-li, XU Hong-bin, ZHANG Yi. Spectra of sodium aluminate solutions[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17(4): 853–857.

(编辑 李艳红)