文章编号：1004-0609(2010)12-2445-08

添加 $NaHCO_3$ 强化铝酸钠溶液分解析出一水软铝石

张 娟[1,2]，王 志[1]，郭占成[1,3]

(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；
3. 北京科技大学 循环与生态冶金教育部重点实验室，北京 100083)

摘 要：在铝酸钠溶液中添加晶种制备一水软铝石的过程中，利用 $NaHCO_3$ 强化分解，研究一水软铝石晶种和 $NaHCO_3$ 添加方式对分解过程和产物的影响。结果表明：添加 $NaHCO_3$ 可以促进铝酸钠溶液的分解，使相同条件下的分解率提高 3 倍，晶种系数 S_R 在 0~1.0 范围内铝酸钠溶液中 $NaHCO_3$ 添加量为 151.2 g/L 时，分解率均高于 80%。XRD 和热重结果表明：添加 $NaHCO_3$ 时，分解产物为一水软铝石和三水铝石，S_R 越大或 $NaHCO_3$ 起始添加速率越慢，一水软铝石含量越高；当 S_R=1.0 且 $NaHCO_3$ 添加速率为 0.21 g/(L·min)时，其含量可达到 80.4%(质量分数)；S_R 为 0~1.0 时，添加 $NaHCO_3$ 的产物是由一水软铝石和三水铝石相互镶嵌构成的附聚体，分解过程采用逐步加快 $NaHCO_3$ 添加速率的方式有利于得到砂状产物。

关键词：$NaHCO_3$；铝酸钠溶液；分解；一水软铝石
中图分类号：TF111.3 **文献标志码**：A

Boehmite precipitation from sodium aluminate solution intensified by adding $NaHCO_3$

ZHANG Juan[1,2], WANG Zhi[1], GUO Zhan-cheng[1,3]

(1. National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory Recycling and Ecologic Metallurgy, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Boehmite was precipitated with seeds from sodium aluminate solution intensified by $NaHCO_3$, and the influence of seed ratio (S_R) and adding $NaHCO_3$ methods on precipitation process and products was studied. The results show that $NaHCO_3$ can intensify the precipitation process of sodium aluminate solution and the precipitation ratio can be enhanced by 3 times under the same condition. When S_R is 0−1.0 and the amount of adding $NaHCO_3$ comes to 151.2 g/L, the precipitation ratio is all higher than 80%. XRD and TG results indicate that the products consist of boehmite and gibbsite, and increasing S_R or slowing down the initial rate of adding $NaHCO_3$ can improve the mass fraction of boehmite, which gets the value of 80.4% with S_R=1.0 and adding amount of $NaHCO_3$ of 0.21 g/(L·min). The boehmite and gibbsite particles are inlaid together to form aggregates with S_R of 0−1.0 and $NaHCO_3$. The sand products can be got by gradually increasing the amount of adding $NaHCO_3$ in the precipitation process.

Key words: $NaHCO_3$; sodium aluminate solution; precipitation; boehmite

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：2009-12-07；**修订日期**：2010-03-22
通信作者：王 志，副研究员；电话：010-62558489；E-mail：zwang@mail.ipe.ac.cn

在氧化铝生产工艺中，铝酸钠溶液的分解过程是十分重要的环节，决定氧化铝的粒度和强度等性质。传统工艺是由铝酸钠溶液中分解出的三水铝石焙烧制得氧化铝，如果用一水软铝石取代三水铝石可以满足节能与环保的需求[1−2]。焙烧一水软铝石生产氧化铝(ΔH=72 kJ/mol)比焙烧三水铝石生产氧化铝(ΔH=170 kJ/mol)可节省焙烧能耗的 60%；且一水软铝石经过焙烧直接转化为 γ-Al_2O_3，而焙烧三水铝石时更易生成 α-Al_2O_3，γ-Al_2O_3 比 α-Al_2O_3 吸氟性能好，有利于铝电解工业的环保；一水软铝石密度(3.05 g/cm^3)比三水铝石的密度(2.40 g/cm^3)大，故物料容积小，可降低输送费用[3]。

在铝酸钠溶液中加入晶种可分解出一水软铝石，但 48~72 h 后分解率只有 40%~50%，因为铝酸钠溶液分解一水软铝石时达到的表观平衡浓度远远高于相同条件下其溶解平衡浓度，而且分解过程中产生的游离碱会抑制反应的进行[4−6]。一水软铝石难以应用的另一个瓶颈是其粒度细，不易满足砂状氧化铝的要求[7]。通入 CO_2 会中和掉多余的游离碱从而提高分解率，但需要气−液传质的过程，CO_2 在溶液中传输速率慢会形成局部过高的过饱和度，导致产物粒度细化[8]。如果在反应过程中加入 $NaHCO_3$ 溶液，转变为液−液之间的反应，体系内过饱和度分布更均匀，$NaHCO_3$ 溶液既可以与游离碱发生中和从而提高分解率，又有利于控制成核和结晶。LI 等[9]在铝酸钠溶液中通过滴加 $NaHCO_3$ 制得了砂状氢氧化铝，在不加晶种时分解产物均为氢氧化铝，所以为了分解得到一水软铝石应充分利用晶种的诱导作用。且 $NaHCO_3$ 的添加速率会影响溶液的瞬时过饱和度，进而影响到分解率和结晶过程。因此，本文作者在铝酸钠溶液中添加一水软铝石晶种的同时利用 $NaHCO_3$ 强化分解，重点研究晶种系数和 $NaHCO_3$ 添加方式对分解过程和产物的影响。

1 实验

1.1 试剂和设备

实验所用试剂均为分析纯，晶种为国内某氧化铝厂提供的工业级一水软铝石。分解槽为自制外套超级恒温水浴锅的反应釜，容积约为 1 L，蠕动泵为 BL100 YZ15 PreFluid 流量型。

1.2 实验方法

在氢氧化钠溶液中加入一定量的氢氧化铝，加热并搅拌直至完全溶解，然后将溶液真空抽滤，除去不溶性杂质后，放入容器中待用。将 200 mL 实验所需浓度的铝酸钠溶液加入到分解槽中，搅拌速度为 200 r/min，待溶液升到预定温度后，加入一水软铝石晶种，并且用蠕动泵开始加入浓度为 84 g/L 的 $NaHCO_3$ 溶液，具体分解条件见表 1，分解过程中改变添加 $NaHCO_3$ 速率的方式如图 1 所示。每加入 60 mL $NaHCO_3$ 溶液后就从分解槽中移取 15 mL 样品，进行固液分离，液相采用滴定的方法检测溶液中氧化铝和碱的含量，固相充分洗涤后烘干，进行检测分析，$NaHCO_3$ 溶液的添加总量均为 360 mL。

晶种系数 S_R 是指添加一水软铝石晶种的量折合

表 1 铝酸钠溶液分解的实验条件

Table 1 Experimental conditions for sodium aluminate solution precipitation

Experiment No.	$\rho(Al_2O_3)$/(g·L^{-1})	M_R 1)	S_R	θ/℃	R_m 1)/(g·L^{-1}·min^{-1})	t/h
0	101.7	1.5	1.0	90	0.00	6
1	101.7	1.5	0.0	90	0.42	6
2	101.7	1.5	0.2	90	0.42	6
3	101.7	1.5	0.4	90	0.42	6
4	101.7	1.5	0.6	90	0.42	6
5	101.7	1.5	0.8	90	0.42	6
6	101.7	1.5	1.0	90	0.42	6
7	102.5	1.5	1.0	90	0.21	12
8	102.5	1.5	1.0	90	0.42	6
9	102.5	1.5	1.0	90	0.84	3
10	102.5	1.5	1.0	90	Increase(0.21→0.42→0.84)	7
11	102.5	1.5	1.0	90	Decrease(0.84→0.42→0.21)	7

1) M_R=$n(Na_2O)$/$n(Al_2O_3)$ in solution, R_m is adding velocity of $NaHCO_3$.

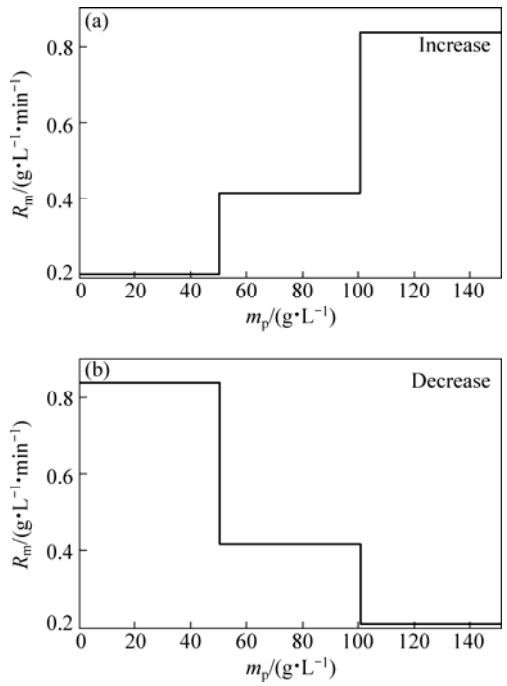

图 1　改变添加 $NaHCO_3$ 速率的方式

Fig.1　Method of changing addition rate of $NaHCO_3$

成 Al_2O_3 的含量与原液中 $A1_2O_3$ 含量的比。分解过程中由于 $NaHCO_3$ 的加入使溶液的体积不断发生变化，所以分解率按下式计算：

$$\eta=100(m_0-m_t)/m_0 \quad (1)$$

式中：η 为铝酸钠溶液分解率，%；m_0 为分解前铝酸钠溶液中氧化铝的质量，g；m_t 为分解后铝酸钠溶液中氧化铝的质量，g。

为了有效衡量 $NaHCO_3$ 溶液的添加量，引入参数 m_p(单位体积铝酸钠溶液中加入的 $NaHCO_3$ 质量，g·L^{-1})和 R_m($NaHCO_3$ 溶液的添加速率，即单位时间加入单位体积铝酸钠溶液中的 $NaHCO_3$ 质量，g/(L·min))。

1.3　固相检测方法

晶型分析采用 Dmax−2400 型 X 射线衍射分析仪(日本理学公司)，分解产物的质量损失率采用 ZRY−2P 热重分析仪测定(上海天平仪器厂)，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)，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)。

2　结果与讨论

2.1　$NaHCO_3$ 对铝酸钠溶液分解率的影响

在不同晶种系数 S_R 下研究添加 $NaHCO_3$ 对铝酸钠溶液分解率的影响，其结果如图 2 所示。由图 2(a)可知(实验编号为表 1 中的样品 0 和 6)，$NaHCO_3$ 可以显著地提高分解率，在 S_R=1.0 分解 6 h 后，分解率达到 87.9%，比相同条件下没有添加 $NaHCO_3$ 时提高了 3 倍。由图 2(b)可以得出(实验编号为表 1 中的样品 1~6)，恒定 $NaHCO_3$ 的添加速率 R_m 为 0.42 g/(L·min)，晶种系数 S_R 在 0~1.0 范围内，$NaHCO_3$ 对分解率的影响是不同的。当 $NaHCO_3$ 添加量 m_p 不高于 50.4 g/L 时，S_R 越大，分解率越高，但当 $NaHCO_3$ 添加量 m_p 到 75.6 g/L 时出现了转折；S_R 为 0~0.2 时，分解率急剧升高，从 10%提高到 50%左右，而其他 S_R 下的分解率仍以平稳的速率增加。当 $NaHCO_3$ 添加量 m_p 为 100.8 g/L 时，不同 S_R 下的分解率接近，之后，随着 $NaHCO_3$ 的继续加入，分解率也以相近的速率增加，在 $NaHCO_3$ 添加量 m_p 到 151.2 g/L 时，分解率均高于 80%。

铝酸钠溶液的分解过程本质上是一个反应结晶的过程，反应是指液相中离子间的相互转化，宏观上表

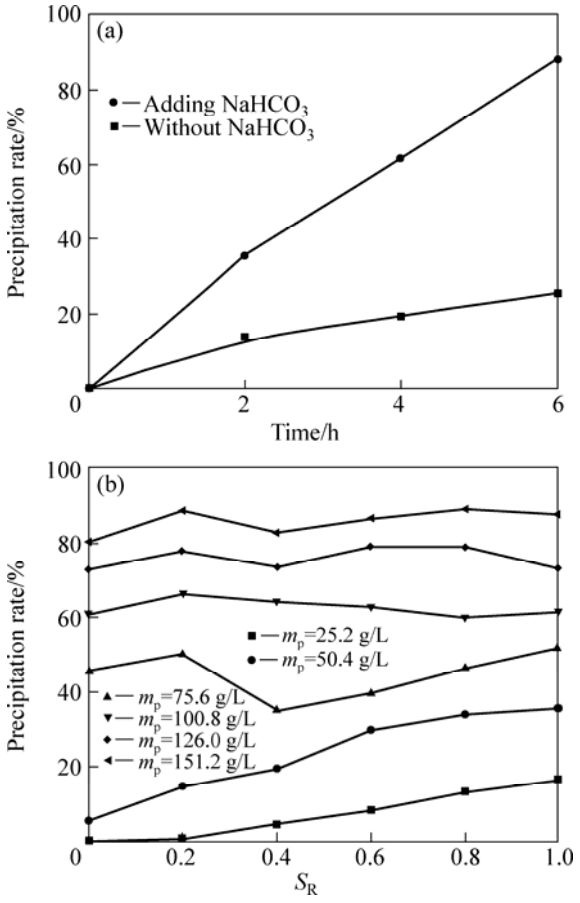

图 2　不同晶种系数下添加 $NaHCO_3$ 对铝酸钠溶液分解率的影响

Fig.2　Effects of adding $NaHCO_3$ on precipitation rate of sodium aluminate solution with different seed ratios: (a) S_R=1.0; (b) S_R=0−1.0

现为分解率没有变化，结晶是指铝酸根离子完成从液相到固相的转化，宏观表现为分解率的升高和固体产物质量的增加[10]。加入的 $NaHCO_3$ 首先会参与反应过程，中和溶液中的游离碱，使过饱和度升高，进而影响结晶过程，所以添加 $NaHCO_3$ 可以使分解率显著提高。

对于 S_R=0~0.2 的分解过程，当没有加晶种或晶种添加量很少时，初始时溶液中反应占主导，结晶过程几乎没有进行，因为铝酸钠溶液与固相晶体间的界面张力大，导致晶核难以自发生成，溶液中的氧化铝浓度只有很小的变化[11]。随着 $NaHCO_3$ 的加入，溶液过饱和度升高，铝酸钠溶液处于极其不稳定状态，此时瞬间析出大量晶体，结晶中心大大增加，而且新析出的物质形状不规则且比表面积大，具有很强的活性和吸附能力[12]，新析出晶种的催化作用体现在使溶液快速分解，分解率甚至超过了开始 S_R 大的反应。这就是 S_R 为 0~0.2 时，分解率开始较低后来急剧升高的原因。

当 S_R 为 0.4~1.0 时，添加的一水软铝石晶种能够满足结晶需求，此时晶种成为结晶核心，铝酸根离子吸附在晶种的活性点上，然后经过重新排列，组成一水软铝石晶格，晶种越多可以提供的活性点位也越多，所以分解率越高[7]。$NaHCO_3$ 的作用在于中和游离碱，提高结晶推动力，进而促进分解过程的进行。足量的晶种抑制了二次成核的形成，新析出晶种的催化作用不是主导的，所以随着 $NaHCO_3$ 的不断加入分解率以平稳的速度增加。

由此可知，在铝酸钠溶液反应结晶的过程中，$NaHCO_3$ 促进反应进而影响结晶，而一水软铝石晶种（包括分解前加入的晶种和分解中新析出的晶种）改变结晶速率进而影响反应，加入的 $NaHCO_3$ 和晶种共同作用决定铝酸钠溶液的分解率。

恒定晶种系数 S_R=1.0，改变 $NaHCO_3$ 的添加方式也会影响铝酸钠溶液的分解过程，添加方式包括在分解过程中恒定和改变 $NaHCO_3$ 的添加速率两种。图 3 所示为在不同 $NaHCO_3$ 添加方式下的分解率(实验编号为表 1 中的 11)。结果表明，在恒定 $NaHCO_3$ 添加速率 R_m 时添加速率越慢分解率越高，添加速率为 0.21 g/(L·min)时的分解率比 0.84 g/(L·min)时的高 7%，因为 $NaHCO_3$ 的添加量 m_p 均到 151.2 g/L 时，添加速率为 0.21 g/(L·min)、0.84 g/(L·min)所用的时间分别是 12 和 3 h，时间越长导致分解率越高。分解过程中逐步加快或减慢 $NaHCO_3$ 添加速率时，在不同添加阶段内同样也是慢添加时分解率高，二者所需时间均为 7 h，最后分解率也接近。因此，晶种系数相同时铝酸钠溶液分解率与 $NaHCO_3$ 的添加量有直接关系，而 $NaHCO_3$ 的不同添加方式对分解率的影响本质上是由于分解时间不同造成的。

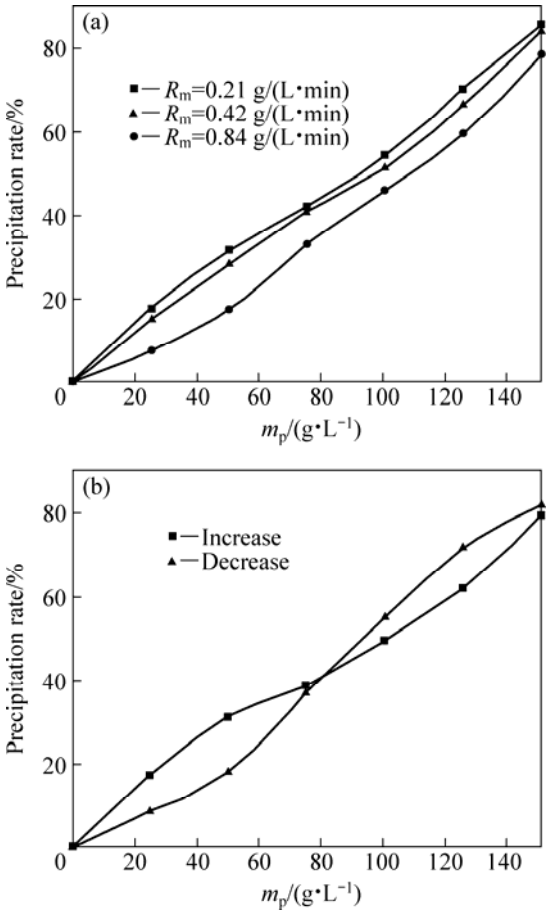

图 3 $NaHCO_3$ 添加方式对铝酸钠溶液分解率的影响

Fig.3 Effects of adding $NaHCO_3$ methods on precipitation ratio of sodium aluminate solution: (a) Constant R_m; (b) Changing R_m

2.2 $NaHCO_3$ 对固相产物组成的影响

图 4 所示为加与不加 $NaHCO_3$ 时产物的 XRD 谱。由图 4 可知，在不加 $NaHCO_3$ 时，分解产物为一水软铝石，与晶种的晶型没有明显差异；而添加 $NaHCO_3$ 时，产物中既有一水软铝石又有三水铝石。因为 $NaHCO_3$ 会使溶液过饱和度升高，在过饱和度高的体系下三水铝石更容易分解、析出[7]。

图 5 所示为不同晶种系数下添加 $NaHCO_3$ 对产物的质量损失率及组成的影响。由图 5(a)可知，一水软铝石和三水铝石的质量损失率分别为 15.0%和 34.6%，而添加 $NaHCO_3$ 时，产物的质量损失率介于二者之间，且晶种系数 S_R 越大，其产物的质量损失率越低。图 5(b)所示为根据质量损失率计算出的产物组成，可以得出，一水软铝石含量随着 S_R 的增大而升高。当 S_R=0 时，产物为三水铝石；当 S_R=1.0 时，一水软铝石含量

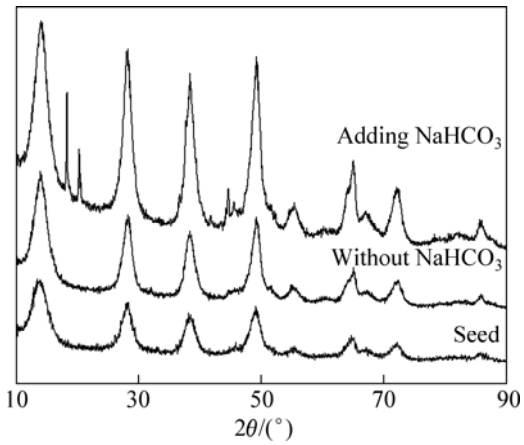

图 4　固体产物的 XRD 谱

Fig.4　XRD patterns of solid products

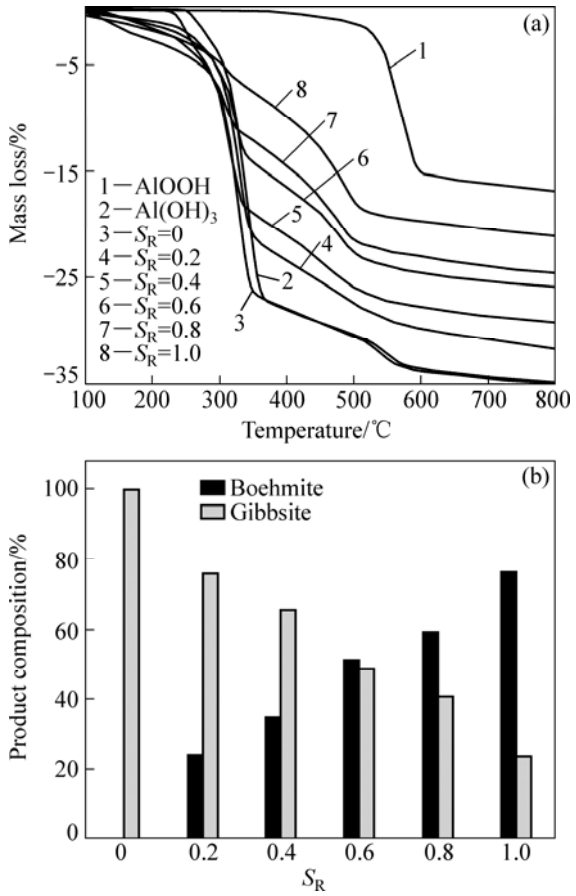

图 5　不同晶种系数下 $NaHCO_3$ 对产物质量损失率及组成的影响

Fig.5　Effect of $NaHCO_3$ on mass loss (a) and products composition (b) at different seed ratios

为 80%左右。如前文所述晶种添加量不足时，$NaHCO_3$ 的加入使铝酸钠溶液变得极不稳定，使大量三水铝石晶核生成，因为三水铝石从铝酸钠溶液中析出的活化能为 50~59 kJ/mol，而一水软铝石的活化能却高达 89 kJ/mol，导致晶种系数越小分解析出的三水铝石越多[5,13]。再者，晶种添加量越多提供的结晶中心也越多，可以把更多的生长基元诱导成为一水软铝石，所以一水软铝石含量随着 S_R 的增大而升高。

图 6 所示为 S_R=1.0 时改变 $NaHCO_3$ 添加方式产物的质量损失率和组成。结果表明，$NaHCO_3$ 的添加方式也会影响产物中一水软铝石的含量。当恒定 $NaHCO_3$ 添加速率 R_m 时，添加越慢，产物中一水软铝石含量越多，逐步加快和减慢 $NaHCO_3$ 添加速率时，产物组成也不同。但逐步加快 $NaHCO_3$ 添加速率和恒定速率为 0.21 g/(L·min)时产物组成接近，一水软铝石含量分别为 78.2%和 80.4%；逐步减慢 $NaHCO_3$ 添加速率和恒定速率为 0.84 g/(L·min)时，产物组成接近，一水软铝石含量分别为 75.0%和 74.4%，说明产物中一水软铝石和三水铝石的组成比例在一定程度上取决于起始阶段 $NaHCO_3$ 的添加速率，起始添加速率越慢，产物中一水软铝石含量越高。起始时 $NaHCO_3$ 添加速率越快，溶液的相对过饱和度越高，虽然有一水软铝

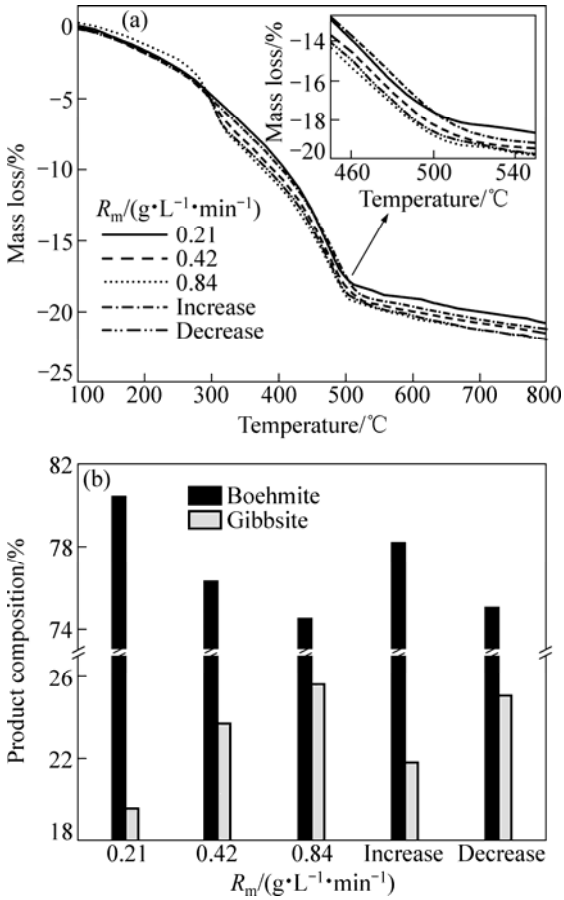

图 6　$NaHCO_3$ 添加方式对产物损失率及组成的影响

Fig.6　Effects of adding $NaHCO_3$ methods on mass loss (a) and products composition (b)

石晶种存在，但由于溶液过饱和度过高和三水铝石在热力学上的优越性[7, 14]，导致三水铝石成核、析出，而且过饱和度越高析出的三水铝石越多。之后，析出的三水铝石又可以作为晶种和一水软铝石晶种共同诱导结晶，所以起始时 $NaHCO_3$ 添加速率越快，产物中三水铝石含量越多。反之，起始时 $NaHCO_3$ 添加速率越慢，产物中一水软铝石含量越多。

2.3 产物的粒度及形貌

图 7 所示为添加 $NaHCO_3$ 对产物粒度分布的影响。由图 7 可知，没有添加 $NaHCO_3$ 时产物是由晶种中粒径小于 10 μm 的颗粒附聚长大到 60 μm 左右，而添加 $NaHCO_3$ 的产物中增加了大量粒径大于 100 μm 的颗粒。SEYSSIECQ 等[15−16]指出颗粒粒度大于一定值后会停止附聚，但升高过饱和度或温度可以促进附聚的发生。在分解过程中加入 $NaHCO_3$ 会使溶液过饱和度升高，促进附聚的进行，因此有利于粒径大于 100 μm 颗粒的形成。

表 2 所列为改变 $NaHCO_3$ 添加方式时产物的粒度分布。由表 2 可以得出，$NaHCO_3$ 添加方式对产物粒度分布有显著的影响。在反应过程中恒定 $NaHCO_3$ 添加速率 R_m 时，添加越慢，产物平均粒径越大，逐步加快 $NaHCO_3$ 添加速率比逐步减慢时的产物平均粒径大 50 μm 左右，因为逐步减慢 $NaHCO_3$ 添加速率时，产物中粒径小于 10 μm 的颗粒急剧增多。通过粒度分布数据可知，产物的粒度分布也主要取决于 $NaHCO_3$ 起始时的添加速率，起始添加速率越快，产物粒径越细。因为起始时溶液的自身过饱和度就较高，再快速加入 $NaHCO_3$，使过饱和度更高，形成大量细小晶粒，同时这些晶粒在附聚成松散的大颗粒后容易因机械搅拌、液流冲击、颗粒间磨蚀等作用而破坏，所以导致产物存在大量粒径小于 10 μm 的颗粒。反之，如果采用逐步加快 $NaHCO_3$ 加入速率的方式，则开始时细粒子可以充分附聚，随着反应的进行和分解率的升高溶液中可以作为晶种的颗粒体在增多，此时再提高过饱和度则有利于颗粒长大成为牢固稳定的砂状产物。张樵青[17]在碳分过程中按照先慢后快的制度通 CO_2 制得了粗粒氢氧化铝。可见 $NaHCO_3$ 滴加方式和 CO_2 通气制度在影响产物粒度方面具有相似的规律。

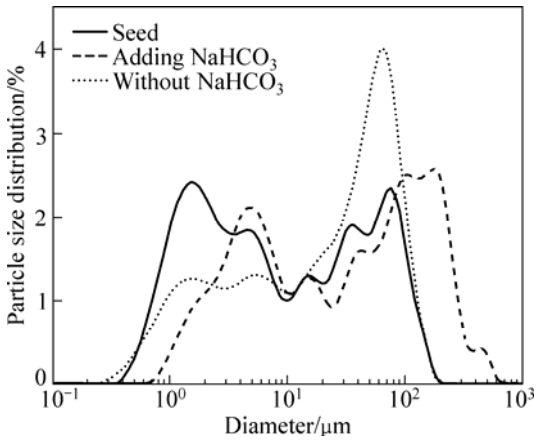

图 7 添加 $NaHCO_3$ 对产物粒度分布的影响

Fig.7 Effects of adding $NaHCO_3$ on particle size distribution of products

图 8 所示为添加 $NaHCO_3$ 时产物的 SEM 像，均是由单晶构成的附聚体。由图 8(a)和(d)可知，与空白试验相比，添加 $NaHCO_3$ 时，单晶粒度有所长大，因为 $NaHCO_3$ 使溶液过饱和度升高，而过饱和度是晶体生长的推动力。图中(b)、(c)和(d)为恒定 $NaHCO_3$ 添加速率 R_m 为 0.42 g/(L·min)时不同晶种系数 S_R 下产物的形貌，因为新形成晶核的数量和一水软铝石含量不同，所以产物形貌也有差异。S_R=0 时，产物均为三水铝石，附聚体粒度集中分布在 50 μm 左右；随着 S_R 的增大，产物中一水软铝石含量增加；当 S_R=0.2 时，可以看到晶粒多是六棱柱的三水铝石，只有少数四棱柱的一水软铝石，而且晶体表面有小晶核形成，说明晶核确实是在晶体表面形成的[7]。而当 S_R=1.0 时，附聚体主要是由小颗粒的一水软铝石组成的，三水铝石进一步得到抑制。综上所述，用 $NaHCO_3$ 强化铝酸钠溶液分解

表 2 $NaHCO_3$ 添加方式对产物粒度分布的影响

Table 2 Effect of adding $NaHCO_3$ methods on particle size distribution of products

R_m/(g·L^{-1}·min^{-1})	Particle size distribution/%					Mean diameter/μm
	0−10 μm	10−30 μm	30−45 μm	45−100 μm	＞100 μm	
0.21	22.54	5.33	5.78	18.80	47.54	117.43
0.42	28.24	7.08	5.29	16.37	43.01	102.46
0.84	33.73	18.73	6.11	12.70	28.75	76.17
Increase	24.23	8.41	7.61	20.31	39.44	106.27
Decrease	45.85	11.56	7.23	15.41	19.95	50.22

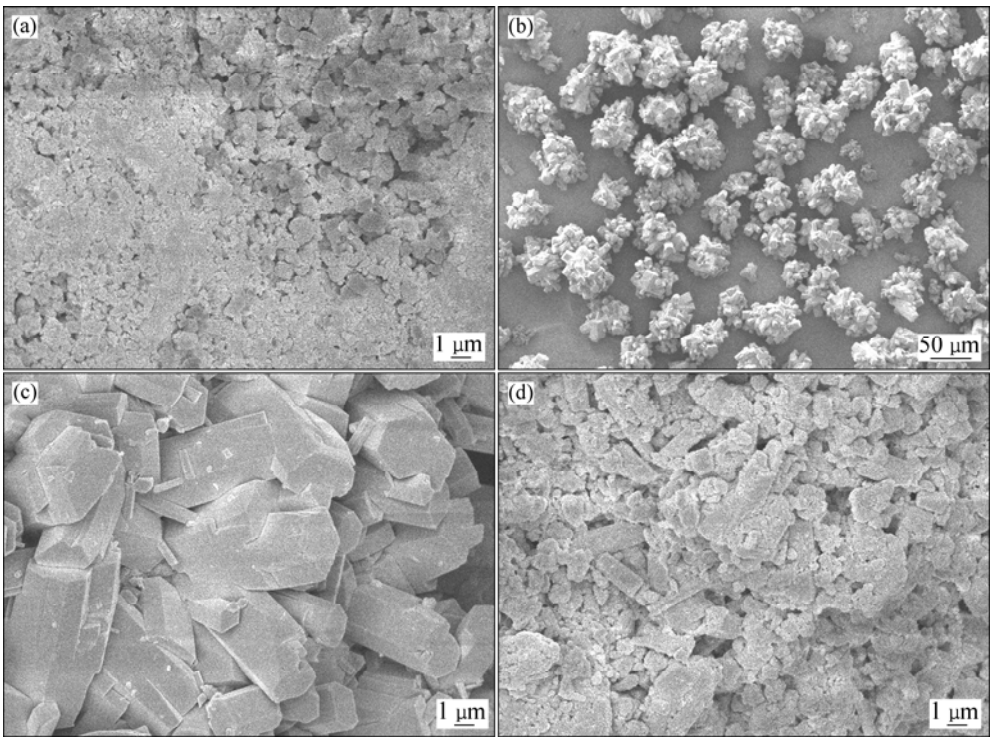

图 8　产物的 SEM 像

Fig.8　SEM images of products: (a) S_R=1.0, R_m=0; (b) S_R=0, R_m=0.42 g/(L·min); (c) S_R=0.2, R_m=0.42 g/(L·min); (d) S_R=1.0, R_m=0.42 g/(L·min)

时，产物中不论三水铝石和一水软铝石组成比例如何，二者均会相互镶嵌在一起组成附聚体。

3　结论

1) 在铝酸钠溶液中添加晶种制备一水软铝石的过程中利用 $NaHCO_3$ 强化分解，$NaHCO_3$ 与游离碱发生中和进而促进分解。相同条件下，添加 $NaHCO_3$ 使分解率提高了 3 倍，晶种系数 S_R 在 0~1.0 范围内 $NaHCO_3$ 添加量为 151.2 g/L 时分解率均高于 80%，恒定 S_R=1.0 时，$NaHCO_3$ 添加速率越慢分解率越高。

2) $NaHCO_3$ 强化分解的产物为一水软铝石和三水铝石，二者的含量组成取决于 S_R 和 $NaHCO_3$ 起始阶段的添加速率。S_R(0~1.0)越大或 $NaHCO_3$ 起始添加速率越慢，产物中一水软铝石含量越高。当 S_R=1.0 且 $NaHCO_3$ 添加速率为 0.21 g/(L·min)时，一水软铝石含量可达到 80.4%。

3) $NaHCO_3$ 的添加促进了粒径大于 100 μm 颗粒的形成，$NaHCO_3$ 添加方式也会影响产物的粒度分布。起始添加速率越快产物粒度越细，而采用逐步加快 $NaHCO_3$ 添加速率的方式有利于得到砂状产物。产物是由一水软铝石和三水铝石相互镶嵌在一起组成的附聚体。

REFERENCES

[1] 毕诗文, 于海燕. 氧化铝生产工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 162−186.
BI Shi-wen, YU Hai-yan. The technology of alumina production[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 162−186.

[2] 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.

[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]. Hydrometallury, 2007, 88: 121−126.

[4] MISRA C, SIVAKUMAR T J. Boehmite production by precipitation from sodium aluminate solution at elevated temperatures: US 4595581[P]. 1986−06−17.

[5] SKOUFADIS C, PANIAS D, PASPALIARIS I. Kinetics of boehmite precipitation from supersaturated sodium aluminate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2003, 68: 57−68.

[6] PANIAS D, ASIMIDIS P, PASPALIARIS I. Solubility of

boehmite in concentrated sodium hydroxide solutions: model development and assessment[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59: 15−29.

[7] JOANNE L, CHRIS V, MELISSA L, GRETA B. Boehmite and Gibbsite precipitation[J]. Light Metals, 2005: 203−207.

[8] WACHI S, JONES A G. Mass transfer with chemical reaction and precipitation[J]. Chemical Engineering Science, 1991, 46(4): 1027−1033.

[9] LI Yan, ZHANG Yi-fei, YANG Chao, ZHANG Yi. Precipitating sandy aluminium hydroxide from sodium aluminate solution by the neutralization of sodium bicarbonate[J]. Hydrometallurgy, 2009, 98: 52−57.

[10] 陈启元. 有色金属基础理论研究——新方法与新进展[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 88−159.
CHEN Qi-yuan. Basic theories study of nonferrous metals——New methods and new developments[M]. Beijing: Scientific Press, 2005: 88−159.

[11] 谢雁丽. 铝酸钠溶液晶种分解[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 20−22.
XIE Yan-li. Seeded precipitation of sodium aluminate solution[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003: 20−22.

[12] 任云翔. 提高碳分氢氧化铝质量的探讨与实践[J]. 世界有色金属, 2002(2): 16−19.
REN Yun-xiang. An approach to improve quality of aluminium hydroxide in carbonating decomposition step and its practice[J]. World Nonferrous Metals, 2002(2): 16−19.

[13] AUDET D R, LAROCQUE J E. Development of a model for prediction of productivity of alumina hydrate precipitation[J]. Light Metals, 1989: 21−26.

[14] 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-min, 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.

[15] SEYSSIECQ I, VEESLER S, BOISTELLE R, LAMERANR J M. Agglomeration of gibbsite $Al(OH)_3$ crystals in Bayer liquors: Influence of the process parameters[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(12): 2177−2185.

[16] SEYSSIECQ I, VEESLER S, MANGIN D, KLEIN J P, BOISTEKKE R. Modelling gibbsite agglomeration in a constant supersaturation crystallizer[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(23): 5565−5578.

[17] 张樵青. 关于细种碳分工艺学的研究[J]. 轻金属, 1991(3): 7−11.
ZHANG Jiao-qing. Study on fine seeded carbonating process[J]. Light Metals, 1991(3): 7−11.

（编辑 李艳红）