

含硅杂质对铝酸钠溶液分解过程的影响及 相互作用机理

吴争平, 尹周澜, 陈启元, 梁 成

(中南大学 化学化工学院, 化学工程与技术博士后流动站, 长沙 410083)

摘 要: 研究了二氧化硅对铝酸钠溶液分解过程的分解率、产品粒度及形貌的影响。根据实验结果用基于密度泛函的 Dmol3 程序计算 SiO_3^{2-} 以各种不同方式位于氢氧化铝(001)和(100)面时的总能量和电子结构等, 用晶体生长习性计算程序 Morphology 分析各体系的平衡形态及生长习性。实验结果表明: 在一定的分解时间范围内, 硅能抑制铝酸钠溶液种分分解, 对分解产物氢氧化铝的晶体形貌有影响, 其(100)面的显露有所增加。理论计算结果表明: SiO_3^{2-} 的存在明显改变氢氧化铝(001)和(100)表面的电子结构, SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)和(100)表面上时, 靠近(001)面的 O 原子多的体系稳定性低。平衡形态及生长习性计算结果表明: SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)表面上时, 各体系长大晶粒的体积均小于无 SiO_3^{2-} 体系中(001)的晶粒体积; 而 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(100)表面上时, 各体系长大晶粒的体积比均大于 SiO_3^{2-} 体系中(100)的晶粒体积。

关键词: 铝酸钠溶液; 含硅杂质; 微观机制; 结晶习性

中图分类号: O 645 文献标识码: A

Effect of silicon-containing impurity on precipitation of sodium aluminate solution and interaction mechanism

WU Zheng-ping, YIN Zhou-lan, CHEN Qi-yuan, LIANG Cheng

(Postdoctoral Exchange Station of Chemical Engineering and Technologe, School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: By analyzing the changes of precipitation ratio, particle size and morphology, the effect of the impurity ingredient contained silicon on the process of precipitation of sodium aluminate was studied. According to these experimental results, the total energy and electronic structure of SiO_3^{2-} located on gibbsite (001) and (100) face with some different modes were calculated by using Dmol3 program based on DFT, and the equilibrium and growth morphology of systems were analyzed by using crystal growth habit program morphology. The experimental results show that the silicon dioxide influences the precipitation rate and morphology of gibbsite, and the (100) face of gibbsite is easier to unfold. The theoretic calculation results indicate that the electronic structures of (001) and (100) surface change obviously when SiO_3^{2-} is located on the surface, and the stability of the system with more oxygen atom is lower. The calculation results of equilibrium morphology and growth habit show that the volume of growth crystal is smaller when SiO_3^{2-} is located on gibbsite (001) surface, while the volume is larger when SiO_3^{2-} is located on gibbsite (100) surface, compared with the systems without SiO_3^{2-} .

Key words: sodium aluminate; silicon-containing impurity; microcosmic mechanism; crystal habit

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB623702); 中南大学博士后基金

收稿日期: 2008-03-18; 修订日期: 2008-09-10

通讯作者: 吴争平, 副教授, 博士; 电话: 0731-8877364-315; E-mail: wzp@mail.csu.edu.cn

铝酸钠溶液的分解本质是从铝酸钠溶液中析出氢氧化铝固体的过程,其中包含氢氧化铝晶体的长大、氢氧化铝粒子的附聚、次生晶核的形成。很多学者研究了影响铝酸钠溶液结晶的因素^[1-4]及其结晶机理^[5-7]。

杂质是影响铝酸钠溶液结晶的一个重要因素。铝酸钠溶液中的有些杂质能促进分解^[8],有些杂质能抑制晶体生长,甚至改变晶体形貌^[9-10]。二氧化硅以高岭土和石英的形式广泛存在于铝土矿中,是铝土矿溶出过程中不可避免的杂质。经过脱硅处理大部分二氧化硅以硅铝酸钠析出,但还有部分二氧化硅残留在铝酸钠溶液中,随着含铝组元的快速析出,二氧化硅的过饱和度迅速增大从而影响种分过程。

研究二氧化硅在铝酸钠溶液快速分解过程中的行为有重要意义,可为抑制二氧化硅在铝酸钠溶液中的析出提供理论基础。目前国内外学者^[11-19]主要研究了二氧化硅对铝酸钠溶液物理性质的影响,以及二氧化硅在拜耳法过程中浓度的变化,而较少研究二氧化硅对铝酸钠溶液分解速率及氢氧化铝粒度分布的影响,更未见有报道用理论计算分析其微观作用机制的。

本文作者以低苛性比下二氧化硅在铝酸钠溶液分解过程中行为的实验研究为基础,用理论计算方法,研究 SiO_3^{2-} 以各种不同方式位于氢氧化铝的(001)和(100)面时的总能量和电子结构等,用晶体生长习性计算程序 Morphology 分析各体系的平衡形态及生长习性,从微观层次揭示 SiO_3^{2-} 与铝酸钠溶液分解产物及表面相互作用及对氢氧化铝结晶行为的影响规律,为氧化铝生产工艺抑制二氧化硅进入产品提供实验及理论基础。

1 实验结果

1.1 铝酸钠溶液分解过程中二氧化硅浓度的变化

研究了 60 °C 下,铝酸钠溶液分解过程中二氧化硅浓度随时间的变化规律。首先制备铝酸钠溶液,然后将配制好的饱和硅酸钠溶液缓慢滴加入铝酸钠溶液,得到含硅杂质的铝酸钠溶液。用 722 分光光度计用硅钼蓝比色法测得溶液中二氧化硅的质量浓度。铝酸钠溶液种分分解的实验条件控制为: Na_2O 质量浓度为 123.17 g/L, α_k 为 1.27, Al_2O_3 浓度为 159.55 g/L,晶种量为 200 g/L,搅拌速率为 150 r/min。

图 1 所示为 60 °C 下铝酸钠溶液分解过程中二氧化硅质量浓度变化随时间的关系图。由图 1 可见,当二氧化硅初始质量浓度为 0.90 g/L 时,在种分过程中二氧化硅的质量浓度变化经历如下 3 个阶段: 1) 二氧化硅质量浓度迅速减少; 2) 持续不变; 3) 缓慢减少。

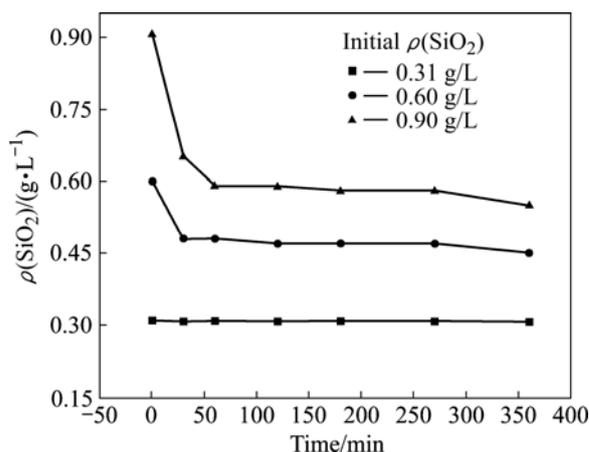


图 1 二氧化硅质量浓度变化与时间的关系

Fig.1 Relationship between of mass concentration of SiO_2 and time

当二氧化硅初始质量浓度为 0.60 g/L 时,只经历第 1、2 个阶段,第 3 个阶段不明显。实验结果说明不同二氧化硅初始质量浓度下形成钠硅渣的反应过程不同。

1.2 二氧化硅质量浓度对铝酸钠溶液分解率的影响

研究了二氧化硅质量浓度对铝酸钠溶液分解率的影响规律。图 2 所示为二氧化硅质量浓度对分解率的影响,种分分解条件同 1.1 节。

由图 2 可见,在相同分解时间,铝酸钠溶液分解率随二氧化硅质量浓度的升高而变小;随着分解过程的进行,铝酸钠溶液分解率随二氧化硅质量浓度的升高而变小的程度有所减小。实验结果表明,在一定的分解时间范围内,铝酸钠溶液分解率随二氧化硅质量浓度的升高而变小,可见二氧化硅的存在不利于铝酸钠溶液种分分解速率的提高,即在一定的分解时间范围内,二氧化硅能抑制铝酸钠溶液种分分解。

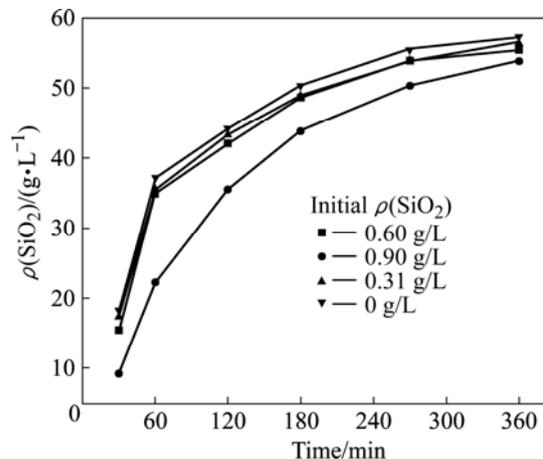


图 2 二氧化硅质量浓度对分解率的影响

Fig.2 Effect of mass concentration of SiO_2 on precipitation ratio of sodium aluminate solution

1.3 二氧化硅对附聚长大过程的影响

在铝酸钠溶液中加入不同质量浓度的二氧化硅, 分别进行铝酸钠溶液种分分解。实验条件均控制为: 温度为 60 °C, 铝酸钠溶液中 Na₂O 质量浓度为 123.17 g/L, α_k 为 1.27, Al₂O₃ 为 159.55 g/L, 晶种量为 200 g/L, 搅拌速率为 150 r/min。对分解时间为 6 h 的产物氢氧化铝进行了激光粒度分析, 图 3 所示为铝酸钠溶液在 60 °C 下分解 6 h 时的产物粒度分布。

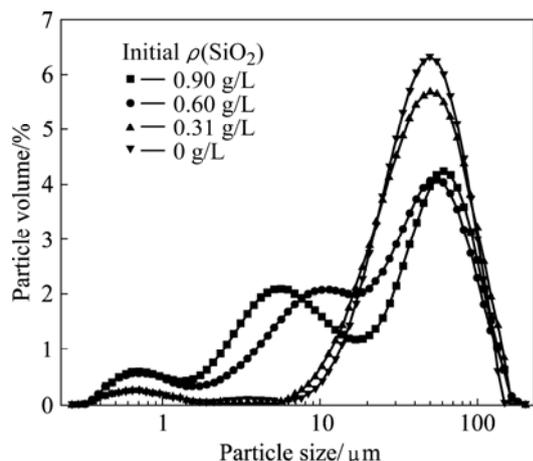


图 3 二氧化硅质量浓度对产品粒度分布的影响

Fig.3 Effect of mass concentration of SiO₂ on particle size of gibbsite production

由图 3 可见, 二氧化硅对铝酸钠溶液的附聚长大过程有一定的影响, 随二氧化硅质量浓度的增加, 对附聚长大过程的影响越显著。实验结果表明, 在低苛性比且温度为 60 °C 时, 氢氧化铝析出以成核和附聚为主, 二氧化硅的存在抑制了附聚过程。

1.4 二氧化硅在分解产物表面的存在状态及对氢氧化铝结晶形貌的影响

为了明确二氧化硅对氢氧化铝表面形貌及氢氧化铝结晶形貌的影响, 对含硅铝酸钠溶液自发成核过程氢氧化铝的 SEM 形貌进行了研究。铝酸钠溶液分解的实验条件控制为: 温度 60 °C, 铝酸钠溶液中 Na₂O 质量浓度 140.35 g/L, α_k 1.22, Al₂O₃ 质量浓度 189.26 g/L, 搅拌速率 160 r/min。实验后取样、过滤、热水洗涤 3 次, 70 °C 下干燥 24 h, 种分产物氢氧化铝用扫描电镜进行检测, 所得 SEM 形貌如图 4 所示, 其中图 4(a)所示为 60 °C 下纯铝酸钠溶液自发分解产品的形貌, 图 4(b)所示为含硅铝酸钠溶液自发分解产品的形貌。

由图 4 可见, 氢氧化铝晶体(001)面为显露较少, (100)面显露较多。纯铝酸钠溶液自发分解产品表面光

滑, 含硅铝酸钠溶液自发分解产品经过 26 h 后表面仍有非常小的小颗粒, 更为明显的是某些晶面上有胶状无定型体, 且(100)面的显露略有增加。同时, 表面元素分析表明, 在这些有无定型体的位置才能测出 Si、O、Al 和 Na 4 种元素, 而在其它光滑的地方与纯铝酸钠溶液自发分解产品一样只能测出 Al 和 O 两种元素。

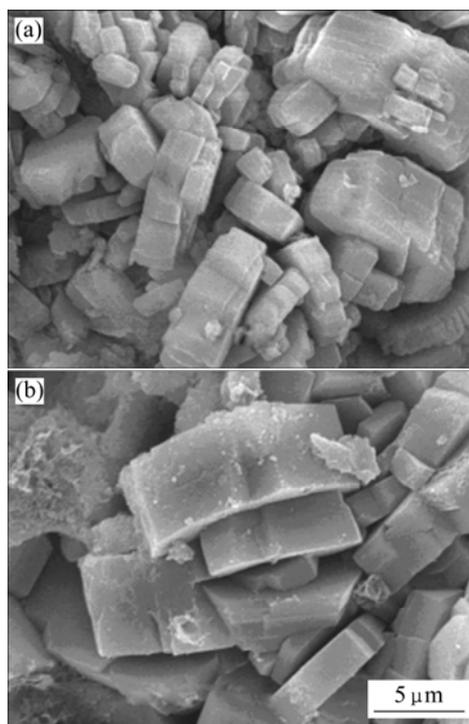


图 4 氢氧化铝的 SEM 形貌

Fig.4 SEM morphologies of gibbsite: (a) 60 °C, pure solution; (b) 60 °C, solution containing SiO₂

2 理论计算与讨论

根据二氧化硅对铝酸钠溶液种分分解率、附聚过程及产品氢氧化铝形貌的影响的实验结果, 为了探究其微观机理, 构建了二氧化硅在氢氧化铝(gibbsite)表面的相互作用模型, 以二氧化硅以各种不同方式位于氢氧化铝的(001)和(100)面的模型为对象, 应用理论计算方法进行研究, 用 C2 工作站的 Dmol3 程序计算各研究体系的总能量和电子结构等, 用 Morphology 程序分析各体系的平衡形态及生长习性, 从而进一步探究二氧化硅对铝酸钠溶液分解过程的影响及在产物表面的相互作用行为机制。

用 Dmol3 程序计算总能量和电子结构时, 采用了局域密度方法, 在 LDA-PWC-DND 基组水平, 对各研究体系模型进行能量计算, 真空 slab 的真空层厚度

均设为 15 Å, 设定 SCF 密度收敛能量参数为 1.0×10^{-4} eV。用 Morphology 程序计算生长习性, 采用平衡形态法, 能量参数用晶体图法, 设定基底厚度为 7 Å, 最大 h 、 k 、 l 均为 3。

2.1 SiO_3^{2-} 与氢氧化铝(001)面的作用

图 5 所示为 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)表面上以不同方式作用的 3 种计算模型, 其中 gibbsite(001)- SiO_3^{2-} -1

中 SiO_3^{2-} 呈“卧”式, gibbsite(001)- SiO_3^{2-} -2 和 gibbsite(001)- SiO_3^{2-} -3 中, SiO_3^{2-} 呈“立”式, 其中(001)-2 中靠近氢氧化铝(001)表面的有 1 个 O 原子, (001)-3 中靠近氢氧化铝(001)表面的有 2 个 O 原子。

表 1 所列为各体系总能量和结合能的计算结果, 图 6 所示为各体系的态密度图。结合能的计算方法为:

$$E = E_{(\text{gibbsite}(001)\text{slab} + \text{SiO}_3^{2-})} - E_{(\text{gibbsite}(001)\text{slab})} - E_{(\text{SiO}_3^{2-})}$$

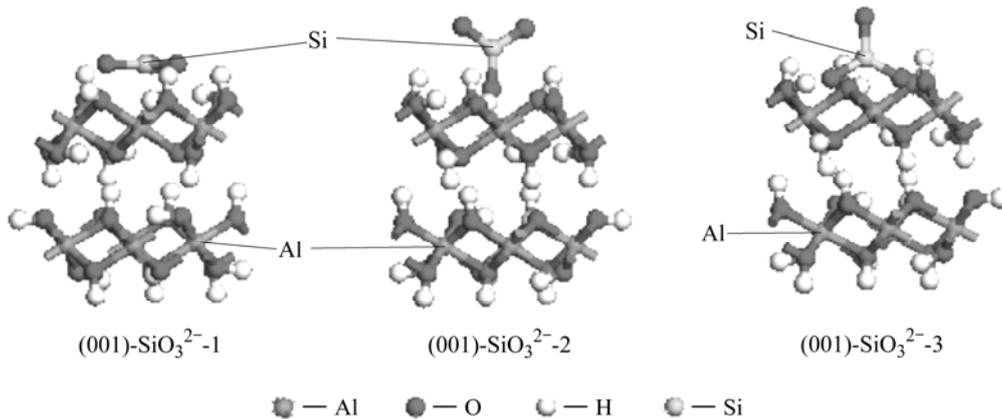


图 5 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)表面上的计算模型

Fig.5 Calculation models of (001) surface of super-cell gibbsite with SiO_3^{2-}

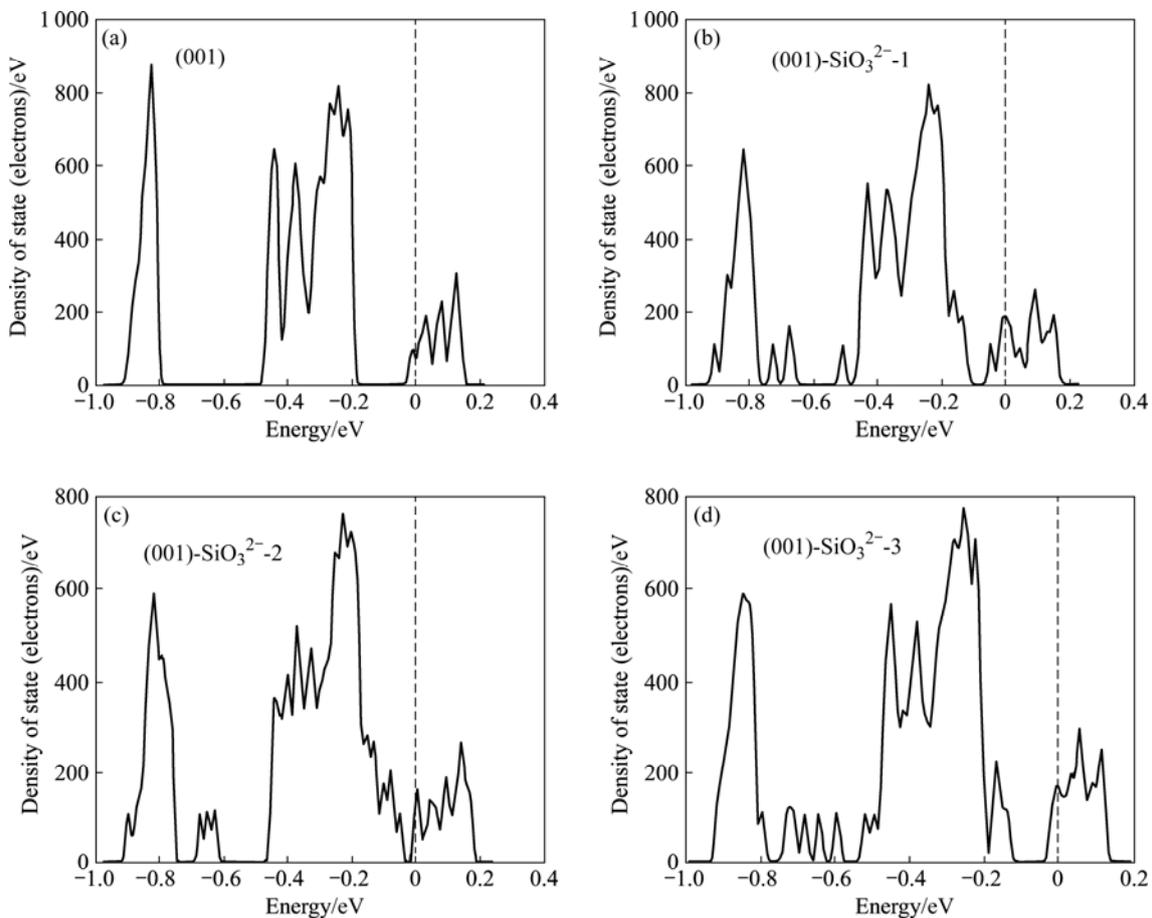


图 6 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)表面计算模型的态密度图

Fig.6 DOS of (001) surface of super-cell gibbsite with SiO_3^{2-} : (a) (001); (b) (001)- SiO_3^{2-} -1; (c) (001)- SiO_3^{2-} -2; (d) (001)- SiO_3^{2-} -3

表 1 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)表面的计算模型的总能量和结合能

Table 1 Total energy and bonding energy of (001) surface of super-cell gibbsite with SiO_3^{2-}

Model	Total energy/a.u.	Binding energy/a.u.
(001)-1	-4 253.319 368 6	-10.957 995 1
(001)-2	-4 253.752 515 9	-11.391 142 3
(001)-3	-4 252.863 438 8	-10.502 065 3

由表 1 可见, (001)-2 的总能量最低, 能量上最稳定, 且结合能也最大, 说明 SiO_3^{2-} 中 O 原子的位置对体系的稳定性有影响, 整体上, 靠近(001)面的 O 原子越多, 体系的稳定性会稍有降低, 相应的表面能会有所升高。由图 6 可见, SiO_3^{2-} 的存在明显改变的氢氧化铝(001)表面的电子结构。

表面性质的计算结果说明, SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)表面上时, 靠近(001)面的 O 原子多的体系稳定性低。

图 7 所示为平衡形态的计算结果, 图中给出的主

要晶面的总表面能和晶面面积比。表 2 所列为生长习性的部分计算结果, 表中列出了比表面积、面积、体积和特征晶面数。由图 7 可知, 体系中存在的 SiO_3^{2-} , 会对氢氧化铝(001)的平衡形态有所影响, SiO_3^{2-} 位置的不同造成的平衡形态的差异并不明显; 各研究体系的(001)和(00 $\bar{1}$)面的表面能最小, 且均未生长为稳定晶面。由表 2 可知, 体系中存在 SiO_3^{2-} 时, 各体系长大晶粒的体积均小于无 SiO_3^{2-} 体系中氢氧化铝(001)的晶粒体积。

表 2 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)表面计算模型生长习性的计算结果

Table 2 Calculation results of growth habit of (001) surface of super-cell gibbsite with SiO_3^{2-}

Model	Relative surface /volume ratio	Volume/ \AA^3	Unique number of facets
Gibbsite(001)	1.182	$1.482\ 442 \times 10^4$	18
(001)- SiO_3^{2-} -1	1.294	$6.938\ 879 \times 10^3$	22
(001)- SiO_3^{2-} -2	1.299	$7.755\ 121 \times 10^3$	26
(001)- SiO_3^{2-} -3	1.299	$7.686\ 163 \times 10^3$	26

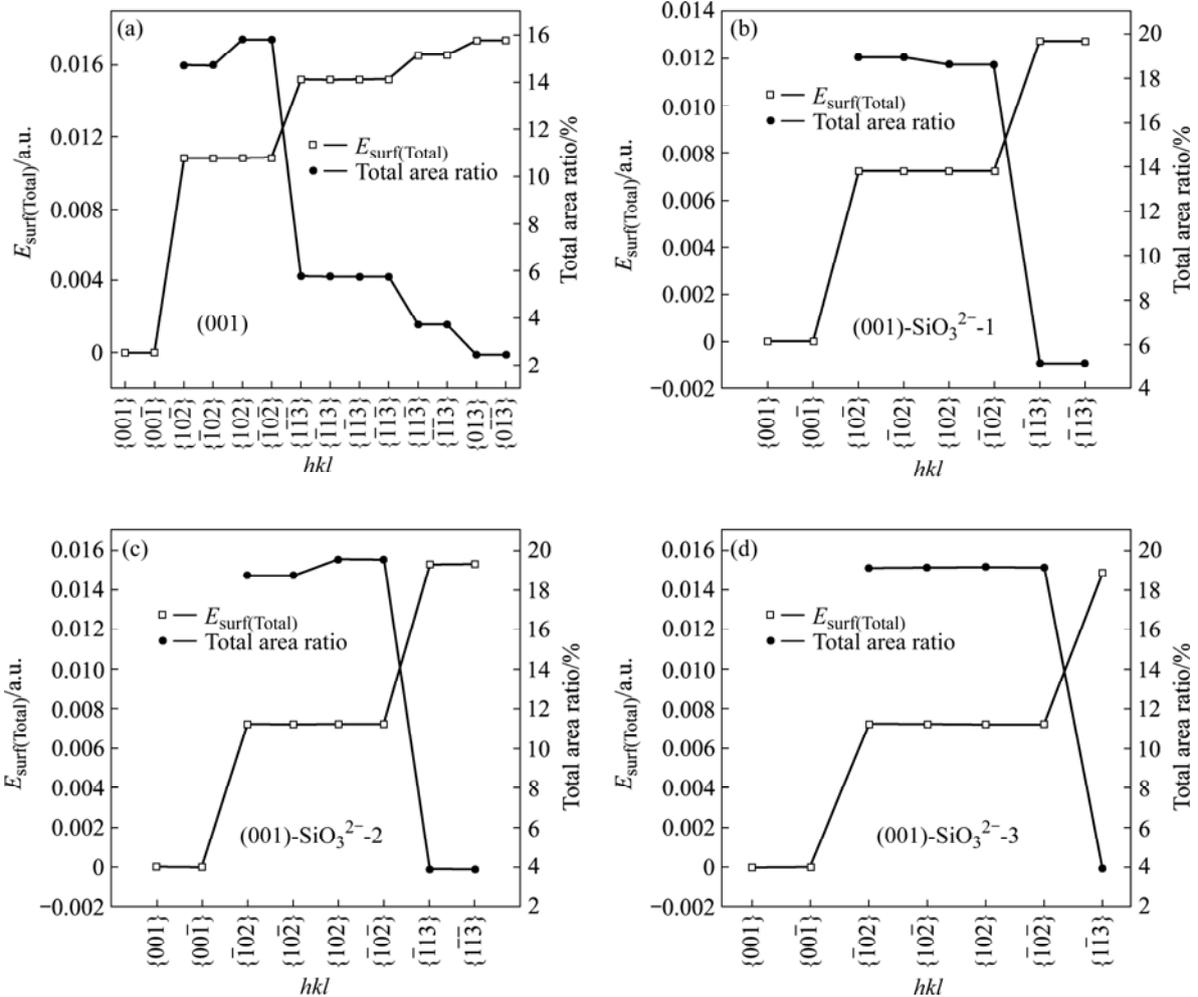


图 7 平衡形态计算的主要晶面的总表面能和晶面面积比

Fig.7 Total surface energy and area ratio of main crystal face calculated by equilibrium morphology method: (a) (001); (b) (001)- SiO_3^{2-} -1; (c) (001)- SiO_3^{2-} -2; (d) (001)- SiO_3^{2-} -3

上述平衡形态及生长习性计算结果说明, SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)表面上时, 各体系长大晶粒的体积均小于无 SiO_3^{2-} 体系中氢氧化铝(001)的晶粒体积。

2.2 SiO_3^{2-} 与氢氧化铝(100)面的作用

图8所示为 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(100)表面上以不同方式作用的3种计算模型, 其中 gibbsite(001)- SiO_3^{2-} -1

中 SiO_3^{2-} 呈“卧”式, gibbsite(001)- SiO_3^{2-} -2 和 gibbsite(001)- SiO_3^{2-} -3 中, SiO_3^{2-} 呈“立”式, 其中(001)-2 中靠近(001)表面的有1个O原子, (001)-3 中靠近氢氧化铝(001)表面的有2个O原子。

表3所列各体系总能量和结合能的计算结果, 图9所示为各体系的态密度图。由表3可见, 比较而言, (100)-2的总能量最低, 能量上最稳定, 且结合能

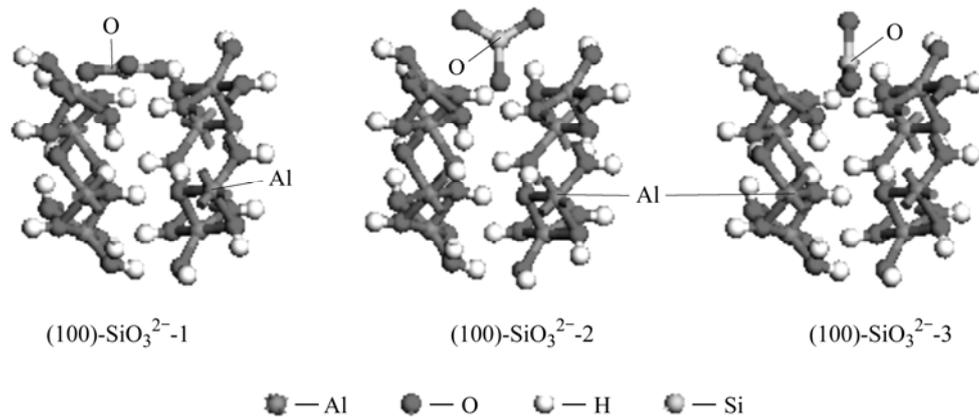


图8 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(100)表面上的计算模型

Fig.8 Calculation models of (100) surface of super-cell gibbsite with SiO_3^{2-}

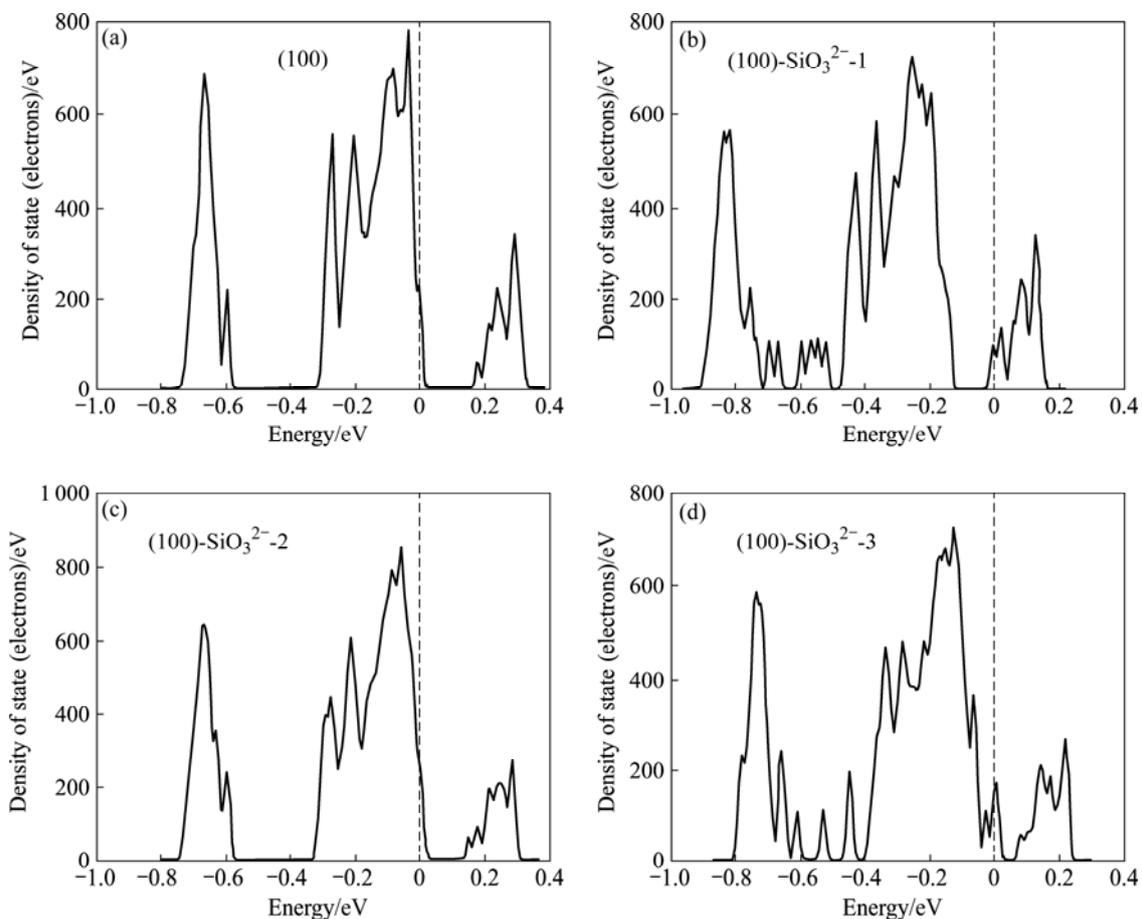


图9 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(100)表面计算模型的态密度图

Fig.9 DOS of (100) surface of super-cell gibbsite with SiO_3^{2-} : (a) (100); (b) (100)- SiO_3^{2-} -1; (c) (100)- SiO_3^{2-} -2; (d) (100)- SiO_3^{2-} -3

表 3 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(100)表面的计算模型的总能量和结合能

Table 3 Total energy and bonding energy of (100) surface of super-cell gibbsite with SiO_3^{2-}

Model	Total energy/a.u.	Binding energy/a.u.
(100)- SiO_3^{2-} -1	-4 252.549 943 9	-10.188 570 4
(100)- SiO_3^{2-} -2	-4 253.649 463 1	-11.288 089 6
(100)- SiO_3^{2-} -3	-4 253.223 403 6	-10.862 030 1

也最大, 与 SiO_3^{2-} 对氢氧化铝(001)面的影响特点一样, 靠近(100)面的 O 原子越多, 体系的稳定性会稍有降低, 相应的表面能会有所升高。由图 7 可见, SiO_3^{2-} 的存在明显改变的氢氧化铝(100)表面的电子结构。

表面性质的计算结果说明, SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(100)表面上时, 比较而言, 靠近(100)面的 O 原子多的体系稳定性低。

图 10 所示为平衡形态的计算结果, 图中给出的主要晶面的总表面能和晶面面积比。表 4 所列为生长习性的部分计算结果, 表中列出了比表面积、体积和特征晶面数。由图 10 可知, 体系中存在的 SiO_3^{2-} 会对氢氧化铝(100)的平衡形态有所影响, SiO_3^{2-} 位置的不

表 4 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(100)表面计算模型生长习性的计算结果

Table 4 Calculation results of growth habit of (100) surface of gibbsite with SiO_3^{2-}

Model	Relative surface /volume ratio	Volume/ \AA^3	Unique number of facets
Gibbsite(100)	1.233	$1.436\ 780 \times 10^4$	32
(100)- SiO_3^{1-} -1	1.178	$2.531\ 424 \times 10^4$	30
(100)- SiO_3^{2-} -2	1.200	$1.678\ 446 \times 10^4$	36
(100)- SiO_3^{3-} -3	1.186	$2.221\ 179 \times 10^4$	28

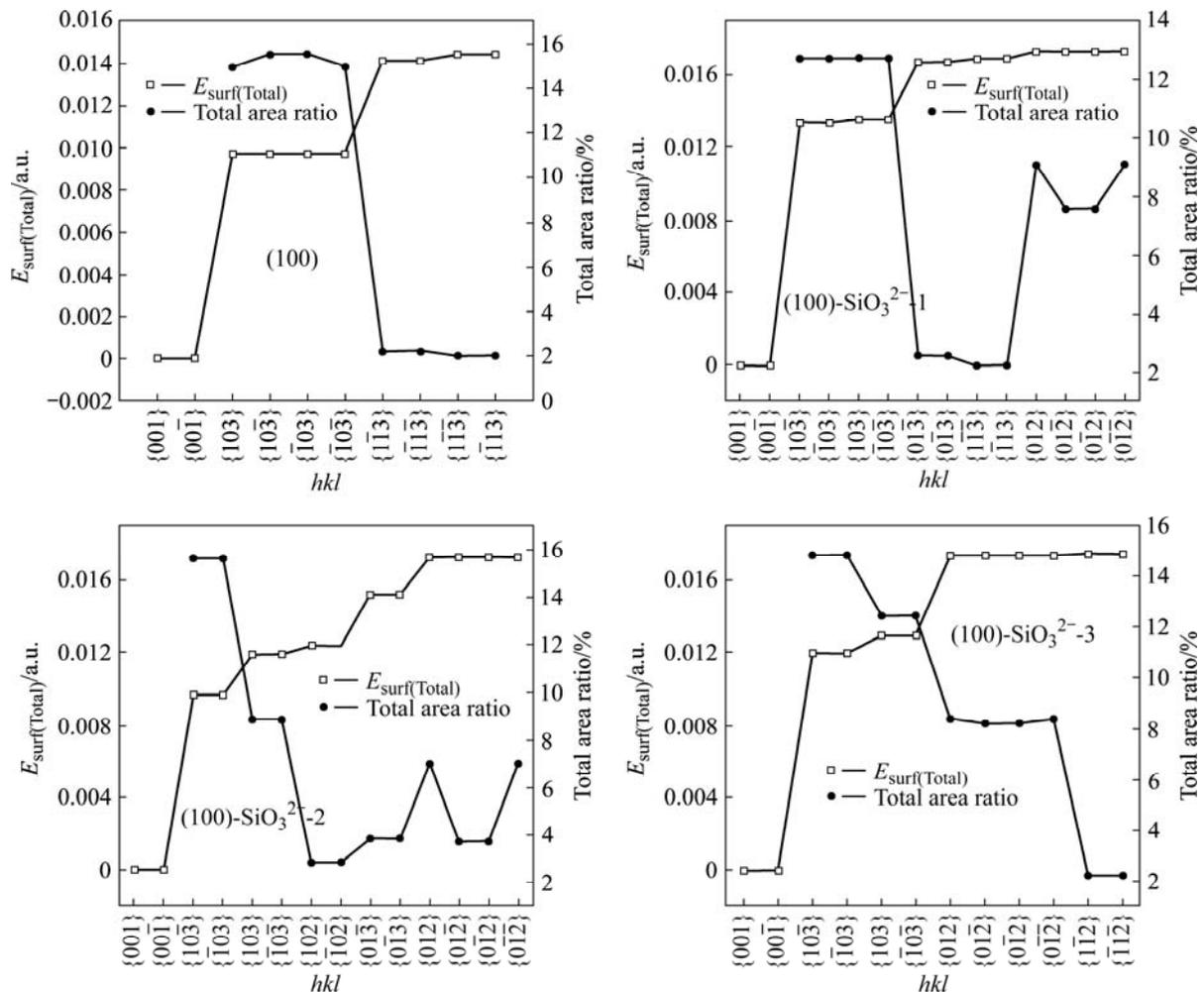


图 10 平衡形态计算的主要晶面的总表面能和晶面面积百分比

Fig.10 Total surface energy and area ratio of main crystal face calculated by equilibrium morphology method: (a) (100); (b) (100)- SiO_3^{2-} -1; (c) (100)- SiO_3^{2-} -2; (d) (100)- SiO_3^{2-} -3

同时,平衡形态存在差异;各研究体系的(001)和(00 $\bar{1}$)面的表面能最小,均未生长为稳定晶面。由表4可知,体系中存在 SiO_3^{2-} 时,各体系长大晶粒的体积比无 SiO_3^{2-} 体系中氢氧化铝(100)的晶粒体积稍大,体积值比较接近。

上述平衡形态及生长习性计算结果说明, SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(100)表面上时,各体系长大晶粒的体积均大于无 SiO_3^{2-} 体系中氢氧化铝(100)的晶粒体积。

3 结论

1) 在一定的分解时间范围内,硅能抑制铝酸钠溶液种分分解,硅的存在不利于铝酸钠溶液种分分解速率的提高;在低苛性比且温度为60℃时,氢氧化铝析出以成核和附聚为主,二氧化硅的存在抑制了附聚过程;含硅铝酸钠溶液自发分解产品的某些晶面上有胶状无定型体,且(100)面的显露略有增加。

2) 理论计算结果表明: SiO_3^{2-} 的存在明显改变的氢氧化铝(001)和(100)表面的电子结构, SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)和(100)表面上时,靠近(001)面的O原子多的体系稳定性低。

3) 平衡形态及生长习性计算结果表明, SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(001)表面上时,各体系长大晶粒的体积均小于无 SiO_3^{2-} 体系中氢氧化铝(001)的晶粒体积;而 SiO_3^{2-} 在氢氧化铝(100)表面上时,各体系长大晶粒的体积大于无 SiO_3^{2-} 体系中氢氧化铝(100)的晶粒体积。

REFERENCES

- [1] SEYSSIECQ I, VEESLER S, BOISTELLE R. Agglomeration of Gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$ crystals in Bayer liquors Influence of the process parameters[J]. Chemical Engineer Science, 1998, 53: 2177-2185.
- [2] ILIEVSKI D. Development and application of a constant supersaturation semi-batch crystallizer for investigating gibbsite agglomeration[J]. J Crystal Growth, 2001, 233: 846-862.
- [3] DAMIEN R, HARRIS, ROLAND I K, CLIVE A P. A dynamic light scattering investigation of nucleation and growth in supersaturated alkaline sodium aluminate solutions (synthetic Bayer liquors)[J]. Colloids and Surfaces, 1999, 154: 343-352.
- [4] LI H X, ADDAI-MENSAH J, THOMAS J C. The influence of $\text{Al}(\text{III})$ supersaturation and NaOH concentration on the rate of crystallization of $\text{Al}(\text{OH})_3$ precursor particles from sodium aluminate solutions[J]. J Colloid and Interface Science, 2005, 286: 511-519.
- [5] FREIJ S J, PARKINSON G M. Surface morphology and crystal growth mechanism of gibbsite in industrial Bayer liquors[J]. Hydrometallurgy, 2005, 78: 246-255.
- [6] LI H X, ADDAI-MENSAH J, THOMAS J C, et al. The crystallization mechanism of $\text{Al}(\text{OH})_3$ from sodium aluminate solutions[J]. J Crystal Growth, 2005, 279: 508-520.
- [7] FREIJ S J, PARKINSON G M, REYHANI M M. Atomic force microscopy study of the growth mechanism of gibbsite crystals[J]. Phys Chem Chem Phys, 2004, 6: 1049-1055.
- [8] 陈金清, 刘吉波, 张平民. 铝酸钠(钾)溶液种分过程的分解率和粒度分布[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(3): 515-519.
CHEN Jin-qing, LIU Ji-bo, ZHANG Ping-min. Precipitation rate and particle size distribution of seeded precipitation proceeding in sodium and potassium aluminate solutions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(3): 515-519.
- [9] WATLING H, LOH J, GATTER H. Gibbsite crystallization inhibition. Effects of sodium gluconate on nucleation, agglomeration and growth[J]. Hydrometallurgy, 2000, 55: 275-288.
- [10] SWEEGERS C, VAN ENCKEVORT W J P, MEEKES H. The impact of twinning on the morphology of $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ crystals[J]. J Crystal Growth, 1999, 197: 244-253.
- [11] 王雅静, 翟玉春, 任玉兰. 硅铝酸钠溶液性质的研究[J]. 矿冶工程, 2004, 24(2): 53-55.
WANG Jing-ya, ZHAI Yu-chun, REN Yu-lan. Study on character of sodium aluminosilicate solution[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2004, 24(2): 53-55.
- [12] 王雅静, 翟玉春, 田彦文. 铝酸钠溶液结构改变时的表面张力变化[J]. 过程工程学报, 2003, 3(2): 121-124.
WANG Jing-ya, ZHAI Yu-chun, TIAN Yan-wen. Variation of surface Tension of sodium aluminate solution with electrolytic microstructure[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2003, 3(2): 121-124.
- [13] 李小斌, 刘桂华, 彭志宏. 铝酸钠溶液中二氧化硅的平衡浓度[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(3): 251-254.
LI Xiao-bin, LIU Gui-hua, PENG Zhi-hong. Equilibrium concentration of SiO_2 in aluminate solution[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2002, 23(3): 251-254.
- [14] ZHENG K L, GERSON A R, ADDAI-MENSAH J, SMART R S C. The influence of sodium carbonate in sodium aluminosilicate crystallization and solubility in sodium aluminate solutions[J]. J Crystal Growth, 1997, 171: 197-208.
- [15] 刘桂华, 李小斌, 周秋生. 铝、硅在强碱溶液中的结构[J]. 轻金属, 1998, 6: 13-16.
LIU Gui-hua, LI Xiao-bin, ZHOU Qiu-sheng. The structure of Si,

- Al in alkali lye[J]. *Light Metals*, 1998, 6: 13–16.
- [16] SIZYAKOV V M, VOLOKHOV Y A. Study of structure and properties of alumino-silicate component in aluminate liquors[J]. *Light Metals*, 1983: 223–227.
- [17] 邓红梅, 曾文明, 陈念贻. 氧化铝生产中“硅渣”的组成和结构研究[J]. *金属学报*, 1996, 32(12): 1248–1251.
- DENG Hong-mei, ZENG Wen-ming, CHEN Nian-yi. Composition and crystal structure of Na-Al silicate slime in alumina production[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1996, 32(12): 1248–1251.
- [18] 元炯亮, 张 懿. 高苛性化系数铝酸钠溶液深度脱硅[J]. *过程工程学报*, 1999, 20(4): 342–346.
- YUAN Jiong-liang, ZHANG Rui. Deep desilication of sodium aluminate solution with a high caustic module[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 1999, 20(4): 342–346.
- [19] 王雅静, 翟玉春, 田彦文, 韩跃新, 刘连利, 姬生利. 铝酸钠和含硅铝酸钠溶液的红外光谱和拉曼光谱[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(1): 271–275.
- WANG Jing-ya, ZHAI Yu-chun, TIAN Yan-wen, HAN Yue-xin, LIU Lian-li, JI Sheng-li. Infrared and Raman spectra of aluminate and SiO₂-containing sodium aluminate solutions[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(1): 271–275.

(编辑 何学锋)