

天青石精矿制备碳酸锶工艺及其溶液化学机理

李光辉, 刘牡丹, 黄武华, 姜 涛, 范晓慧

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 研究了天青石精矿复分解法制备碳酸锶的工艺及溶液化学作用机理。当以 Na_2CO_3 为转化剂, SrSO_4 转化率最高可达 97.77%; 而用 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 作转化剂时, SrSO_4 转化率最大仅为 78.66%。溶液化学研究结果表明: 在复分解反应体系内, 反应的实际转化剂为 CO_3^{2-} 离子; 当溶液 pH 值大于 10.3 时, 溶液中 CO_3^{2-} 离子占主要部分, 有利于 SrSO_4 的转化; 当溶液 pH 值低于 8.5 时, 溶液中 CO_3^{2-} 的摩尔分数接近于零, SrSO_4 的转化反应趋于停止。pH 值测定结果表明: 当温度低于 25 °C 时, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 溶液的 pH 值在 8.63~8.79 之间, 而 Na_2CO_3 溶液的 pH 值保持在 11.0 以上。反应体系内 pH 值的差异是导致以 Na_2CO_3 作转化剂时 SrSO_4 转化率显著高于以 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 作转化剂的根本原因。

关键词: 天青石; 碳酸锶; 复分解; 溶液化学

中图分类号: TB 321; TQ 132.3

文献标识码: A

Preparation of strontium carbonate from celestite concentrate and its solution chemistry mechanism

LI Guang-hui, LIU Mu-dan, HUANG Wu-hua, JIANG Tao, FAN Xiao-hui

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The technology and mechanism of solution chemistry of preparation of strontium carbonate by double decomposition from celestite concentrate were investigated. The results indicate that the maximal SrSO_4 conversion reaches 97.77% when Na_2CO_3 is used as the reagent, but the maximal conversion of SrSO_4 is only 78.66% when $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ is used. The investigation results of solution chemistry principles show that CO_3^{2-} ion is the actual conversion agent in this reaction system. CO_3^{2-} ions take up the dominate position when the pH value is greater than 10.3, which benefits to the conversion. However, when the pH value is lowered to 8.5, the CO_3^{2-} molar fraction in liquor almost decreases to zero and SrSO_4 conversion reaction therefore nearly ceases. The detected results show that the pH values of $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ solution in this research are between 8.63~8.79 at 25°C, while the pH value of Na_2CO_3 solution is greater than 11.0, therefore, the difference of pH values within the reaction systems is the basic reason why the conversion and reaction rate of SrSO_4 by Na_2CO_3 is much higher than that by $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Key words: celestite; strontium carbonate; double decomposition; solution chemistry

碳酸锶为白色粉末或颗粒, 广泛用于电子、军工、冶金、轻工、医药和光学等领域, 是当今世界发展较快的无机化工材料^[1]。

目前, 利用天青石制备碳酸锶的方法主要有碳还

原法和复分解法^[2]。碳还原法工艺简单、成本低, 但环境污染较严重。复分解法可利用中低品位天青石矿石, SrSO_4 转化率较高、质量稳定及污染小, 缺点是流程长、成本高及产品杂质含量较高。由于复分解工

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-04-0748)

收稿日期: 2006-07-06; **修订日期:** 2006-09-15

通讯作者: 刘牡丹, 博士研究生; 电话: 0731-8830542; E-mail: mudanhanyi@126.com

艺具有环境污染小等显著特点,国内外开展这方面研究较多。国内,许多学者对以天青石原矿为原料, NH_4HCO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 和 Na_2CO_3 为转化剂制备碳酸锶的工艺进行了广泛的研究^[3-6],在国外也有许多类似的工作^[7-9]。

我国天青石资源丰富,但大多数矿石品位较低、杂质含量较高,需经选矿除杂等过程后才能作为生产碳酸锶的原料^[10]。已有的研究表明,采用浮选方法可有效提高低品位矿石中天青石的含量^[11-12]。因此,研究开发天青石精矿制备碳酸锶的新工艺是我国碳酸锶工业未来的主要发展方向之一^[13]。

经选矿获得的天青石精矿粒度细,有利于复分解反应的进行。但由于浮选精矿具有表面残存浮选剂等与天青石原矿性质相异的显著特点,加之现有相关研究基本以原矿为原料,因此,天青石浮选精矿能否用于复分解制备碳酸锶尚未可知。此外,对于复分解法制备碳酸锶机理的相关研究报道极少,尚不太明确。为此,本文作者以天青石浮选精矿为原料,碳酸钠和碳酸铵作转化剂,系统研究了复分解反应中影响 SrSO_4 转化率的各种因素,深入分析了 Na_2CO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 与 SrSO_4 反应的溶液化学机理,揭示碳酸钠和碳酸铵分别作转化剂时 SrSO_4 转化率差异的根本原因。

1 实验

1.1 原料性质

1.1.1 化学成分

采用荧光分析法测定了天青石精矿的主要化学成分,结果如表 1 所列。由表 1 可看出,选矿后精矿中天青石含量明显提高, SrO 含量达到了 42.79%, BaO 含量比较低,仅 1.11%,但其它杂质成分中 CaO 的含量比较高,达到了 11.90%。因此,以这种浮选精矿为原料生产碳酸锶时,必须强化除钙过程。

表 1 天青石精矿主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of celestite concentrate (mass fraction, %)

SrO	BaO	CaO	MgO
42.79	1.11	11.90	3.79
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
3.25	1.01	0.29	0.28

1.1.2 物相组成

采用化学物相法研究了天青石精矿中的主要物相组成,结果如表 2 所列。由表 2 可看出,精矿中 SrSO_4 品位获得了显著提高,由原矿的 30%左右提高到 75.28%,但与此同时,杂质 CaCO_3 含量较之原矿也有所提高,达到 14.69%。

表 2 天青石精矿主要物相组成

Table 2 Mineralogical composition in celestite concentrate (mass fraction, %)

SrSO ₄	SrCO ₃	BaCO ₃	BaSO ₄
75.28	0.45	0.029	1.58
CaCO ₃	MgO	Ig ¹⁾	
14.69	3.79	9.04	

1) Ig: Ignition

1.2 实验方法

实验原料主要有天青石、碳酸钠及碳酸铵。其中天青石由 SrSO_4 品位为 30%的低品位天青石矿经浮选获得的精矿,碳酸钠和碳酸铵均为分析纯试剂。

将碳酸钠和碳酸铵配成一定浓度的溶液,按一定的液固比将溶液与天青石精矿混合,置于带搅拌装置的容器中于一定温度下反应,固液分离所得滤渣即为粗碳酸锶产品。滤渣经烘干、混匀、取样,采用飞利浦 PW2424 荧光仪测定 SrCO_3 的含量。具体方法为:称取一定量样品,加入内标元素,再称取 5 g $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$,放入瓷坩锅内于 700~800 °C 下完全熔融,冷却后磨碎、压片、分析、计算碳酸锶含量。实验中采用 SrSO_4 转化为 SrCO_3 的转化率(η)作为主要评价指标,具体计算方法为:

$$\eta = \frac{w(\text{Sr})_1 \times m_2}{w(\text{Sr})_2 \times m_1} \times 100\%$$

式中 $w(\text{Sr})_1$ 为粗碳酸锶产品中锶含量,%; $w(\text{Sr})_2$ 为天青石精矿中锶含量,%; m_1 为反应前天青石精矿质量, g; m_2 为反应后粗碳酸锶产品质量, g。

2 天青石精矿复分解制备碳酸锶工艺

分别以 Na_2CO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 为转化剂,考查了反应温度、时间、搅拌速度及转化剂浓度对天青石精矿中 SrSO_4 转化率的影响。

2.1 温度对转化率的影响

温度变化对 SrSO_4 转化率的影响如图 1 所示。其

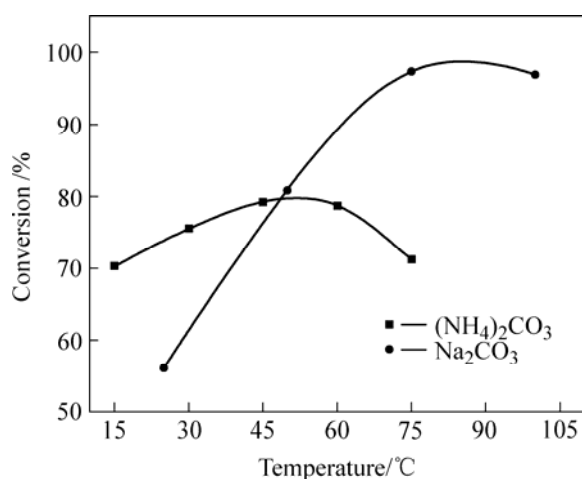


图 1 反应温度对 SrSO₄ 转化率的影响

Fig.1 Effect of temperature on conversion of SrSO₄ (Ratio of liquid to solid is 5/1, stirring rate is 300 r/min, molar ratio is 1.2)

中碳酸钠与天青石反应时间为 45 min, 碳酸铵与天青石反应时间为 150 min。

由图 1 可以看出, 当碳酸钠浓度为 1.1 mol/L, 反应温度由 25 °C 提高到 75 °C 时, SrSO₄ 的转化率相应由 56.16% 增加到 97.35%, 并在 75 °C 左右时达到最大值, 继续提高反应温度, 转化率相反开始下降。这是由于温度升高, 反应速率加快, 生成的不溶物 SrCO₃ 覆盖在反应物表面反而减慢了其反应速率。当采用 (NH₄)₂CO₃ 作转化剂, 其浓度为 1.7 mol/L、 $n[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]/n(\text{SrSO}_4)=1.2$ 时, SrSO₄ 的转化率随着反应温度升高首先增大, 当温度为 45 °C 左右时达到最大值, 此后继续提高反应温度会导致转化率大幅度降低。

天青石复分解反应是一个 SrSO₄ 的溶解反应与 SrCO₃ 的沉淀反应相伴而生的化学反应过程, 适当提高温度可加快反应速率, 有利于 SrSO₄ 的转化。但由于碳酸铵开始分解的温度在 50 °C 左右^[14], 温度过高, 会导致碳酸铵大量分解放出 CO₂, 使溶液中 CO₃²⁻ 浓度降低, 转化率和转化速率相应减小。

因此, Na₂CO₃ 和 (NH₄)₂CO₃ 的适宜反应温度分别为 75~90 °C 和 45~60 °C。

2.2 反应时间对转化率的影响

反应时间对 SrSO₄ 转化率的影响如图 2 所示, 其中碳酸钠与天青石反应温度为 75 °C, $c(\text{Na}_2\text{CO}_3)=1.1$ mol/L; 碳酸铵与天青石反应温度 60 °C, $c[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]=1.7$ mol/L。

由图 2 可知, 天青石与碳酸钠反应时间在 45~75 min 范围内变化时, SrSO₄ 转化率增大, 但幅度较小。

当反应时间为 75 min 时, 转化率达到最大值 97.77%, 继续延长反应时间, 转化率相反有所下降; 碳酸铵与天青石反应, 在 90~150 min 范围内, SrSO₄ 转化率随着时间增加而增大; 在 150 min 时, SrSO₄ 转化率达到最大 78.66%, 继续延长反应时间, 转化率同样开始有所降低。因此, Na₂CO₃ 和 (NH₄)₂CO₃ 适宜的反应时间分别为 75 和 150 min 左右。

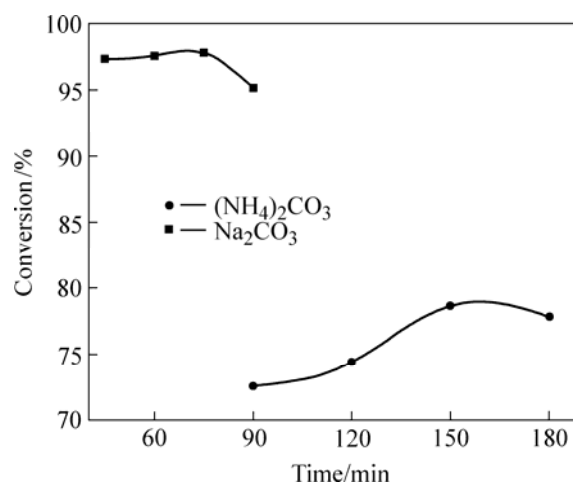


图 2 反应时间对 SrSO₄ 转化率的影响

Fig.2 Effect of time on conversion of SrSO₄ (Ratio of liquid to solid is 5/1, stirring rate is 300 r/min, molar ratio is 1.2)

2.3 搅拌速度对转化率的影响

搅拌速度对 SrSO₄ 转化率的影响如图 3 所示, 其中碳酸钠与天青石反应温度为 75 °C, 反应时间为 75 min, $c(\text{Na}_2\text{CO}_3)=1.1$ mol/L; 碳酸铵与天青石反应温度 60 °C, 反应时间 150 min, $c[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]=1.7$ mol/L。

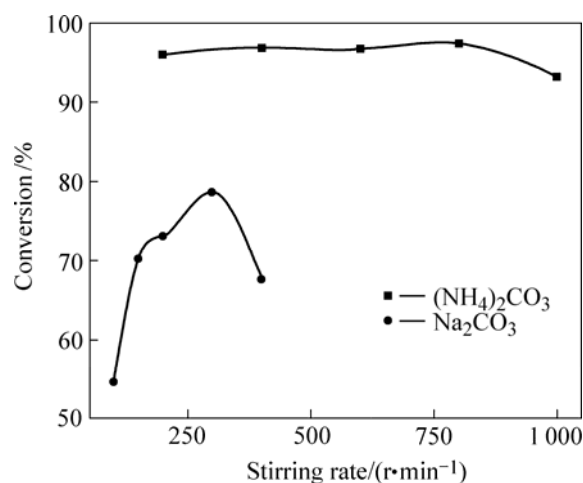


图 3 搅拌速度对 SrSO₄ 转化率的影响

Fig.3 Effect of stirring rate on conversion of SrSO₄ (Ratio of liquid to solid is 5/1, molar ratio is 1.2)

由图 3 可以看出, 碳酸钠与天青石反应, 搅拌速度对 SrSO_4 转化率影响并不显著, 曲线基本呈水平; 碳酸铵与天青石反应则随着搅拌速度的增加 SrSO_4 转化率增大, 在 300 r/min 时达到最大值 78.66%, 搅拌速度继续增加时, 转化率开始下降。

研究表明, SrSO_4 的转化过程中天青石颗粒表面逐渐形成一层生成物, 反应遵守收缩未反应核控制模型^[9]。由此可知, 随着反应的进行, 反应物天青石周围的产物层不断加厚, 阻碍了 Sr^{2+} 与 CO_3^{2-} 离子的扩散, 从而降低了反应速率。搅拌既可促进固-液反应传质过程, 又可减少固体生成物在固体反应物表面的附着机会, 通过搅拌可加快 SrSO_4 与碳酸钠和碳酸铵间的扩散速度, 促进转化反应的进行, 但过高搅拌强度将加快碳酸铵的分解, 降低 SrSO_4 转化速率和转化率。因此, 对碳酸钠和碳酸铵而言, 适宜的搅拌速度为 300 r/min。

2.4 转化剂浓度对转化率的影响

不同碳酸钠和碳酸铵溶液浓度对 SrSO_4 转化率的影响如图 4 所示。其中, 碳酸钠与天青石反应时间为 45 min, 反应温度为 75 °C; 碳酸铵与天青石反应温度为 60 °C, 反应时间为 150 min, $c[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]=1.7 \text{ mol/L}$ 。从图 3 可以看出, 在实验浓度范围内, 当碳酸钠浓度在 1.1 mol/L 左右时, SrSO_4 的转化率最大, 达到 97.77%, 浓度过高或过低均对天青石中 SrSO_4 的转化不利。采用碳酸铵时适宜的浓度为 1.7 mol/L 时, 此时天青石中 SrSO_4 的转化率可达到 78.66%。

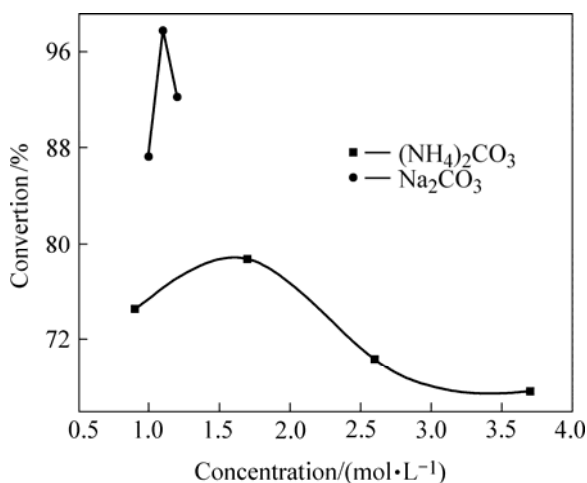


图 4 转化剂浓度对 SrSO_4 转化率的影响

Fig.4 Effect of conversion reagent concentration on conversion of SrSO_4 (Ratio of liquid to solid is 5/1, stirring rate is 300 r/min, molar ratio is 1.2)

3 天青石复分解反应的溶液化学作用机理

天青石复分解制备碳酸锶作用机理方面, 相关的研究报道不多, 最具代表性的为 Castillejos 等^[7]的研究成果, 揭示了 SrSO_4 转化过程中, 天青石颗粒表面逐渐被产物层包裹, CO_3^{2-} 离子在产物层孔隙中的扩散速度是 SrSO_4 转化反应的控制环节的基本规律, 指出反应遵循收缩未反应核控制模型。但根据这些研究成果不能很好地解释转化剂 Na_2CO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 对 SrSO_4 转化率影响差异的原因。

天青石复分解制备碳酸锶工艺中, Na_2CO_3 或 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 与 SrSO_4 作用生成 SrCO_3 遵循以下主要反应^[15]:



由于 SrSO_4 的溶度积^[14]为 3.2×10^{-7} , SrCO_3 的溶度积为 1.1×10^{-10} , 溶液中少量 Sr^{2+} 是由 SrSO_4 水解而成, 可与 CO_3^{2-} 反应形成较 SrSO_4 更稳定的 SrCO_3 , 促使式(1)向生成 SrCO_3 的方向顺利进行。显然, 式(1)中, 转化反应的实际浸出剂为 CO_3^{2-} , CO_3^{2-} 离子浓度的高低是 SrSO_4 转化为 SrCO_3 反应的主要推动力。

按化学反应计量数来说, 当 Na_2CO_3 或 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 与 SrSO_4 的摩尔比等于 1 时, 硫酸锶能完全转变为碳酸锶。但由于 Na_2CO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 为多元酸 H_2CO_3 的盐类, 水溶液中 CO_3^{2-} 将水解生成 HCO_3^- 和 $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$, 即溶液中同时存在 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 及 $\text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ 3 种组分。因此, 复分解反应中转化剂 Na_2CO_3 或 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 与矿石中 SrSO_4 的摩尔比应大于 1。

根据溶液化学的基本原理^[14-15], 在一定温度下, 多元弱酸盐类溶液中各离子组分的摩尔分数主要取决于溶液的 pH 值。图 5 和 6 所示为通过理论计算得到的 25 °C 时不同 pH 值下 Na_2CO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 溶液的有关离子组分的摩尔分数。

由图 5 和 6 可看出, 当 pH 值大于 10.3 时, 转化反应的实际浸出剂 CO_3^{2-} 占溶液的主体部分。 CO_3^{2-} 浓度越大, SrSO_4 转变为 SrCO_3 的驱动力也越大, 天青石中 SrSO_4 转变为 SrCO_3 的速率也越快, 转化率相应越高。随着 pH 值的降低, 溶液中 HCO_3^- 或 H_2CO_3 组分的摩尔分数逐渐增大, CO_3^{2-} 的摩尔分数相应减小。当 pH 值小于 8.5 时, CO_3^{2-} 的摩尔分数接近于零, 此时, SrSO_4 转化反应也趋于停止。

由不同浓度 Na_2CO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 溶液的 pH 值测

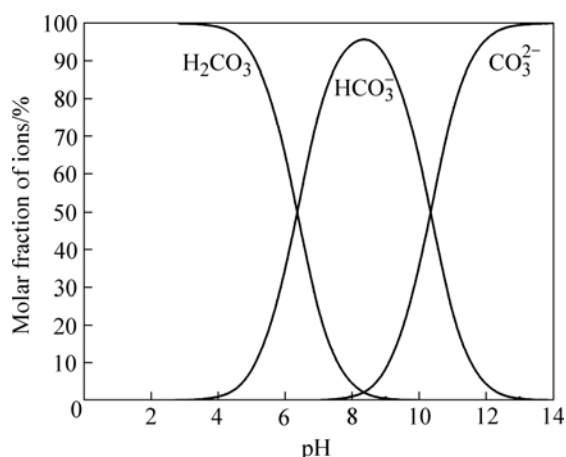


图 5 25 °C 下 Na_2CO_3 溶液中不同 pH 值下各离子组分的摩尔分数

Fig.5 Molar fraction of ions under different pH values in Na_2CO_3 solution at 25 °C

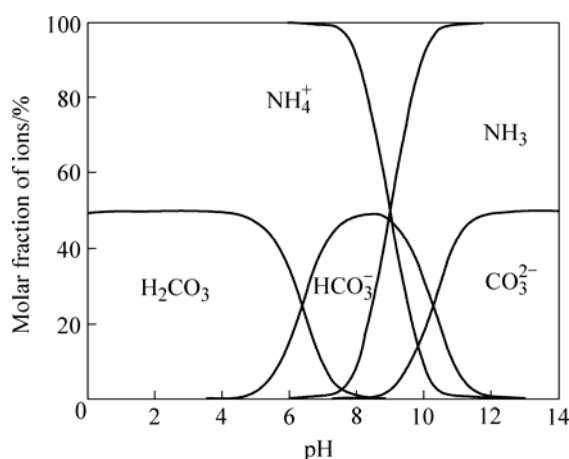


图 6 25 °C 时 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 溶液中不同 pH 值下各离子组分的摩尔分数

Fig.6 Molar fraction of ions under different pH values in $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ solution at 25 °C

定值可发现, 碳酸钠溶液的碱性较强, 而碳酸铵的碱性较弱(见图 7 和 8)。由图 7 可知, 在实验浓度范围内, 碳酸钠溶液 pH 值均大于 11.0, 相应溶液中 CO_3^{2-} 的摩尔分数大于 82.39%, 有利于复分解反应的进行和 SrSO_4 转化率的提高。而 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 是弱酸弱碱盐, $(\text{NH}_4)^+$ 的存在导致溶液 pH 值降低。由图 8 可看出, 溶液的 pH 值维持在 8.63~8.79 之间, 且碳酸铵溶液浓度的变化对溶液 pH 值的影响甚微。由图 6 可知, 在此 pH 值范围内, 溶液中 CO_3^{2-} 离子摩尔分数极小, 仅为 1% 左右, 不利于 SrSO_4 的转化。以上结果揭示了 Na_2CO_3 与天青石反应 SrSO_4 转化率可达 97.77%, 而 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 反应 SrSO_4 转化率最高只有 78.66% 的根本

原因。

由图 8 可知, 在实验浓度范围内, 当溶液浓度为 1.7 mol/L 时, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 溶液 pH 最大值为 8.79, 浓度过高与过低均导致溶液 pH 值降低。此 pH 值的变化规律与图 4 所示的 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 浓度对 SrSO_4 转化率影响规律完全吻合。即从另一方面证实了 CO_3^{2-} 浓度是 SrSO_4 转变为 SrCO_3 的最根本驱动力。同时, 溶液中 CO_3^{2-} 浓度上的差异也是导致 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 适宜反应时间和适宜摩尔浓度明显大于 Na_2CO_3 的最主要原因之一。

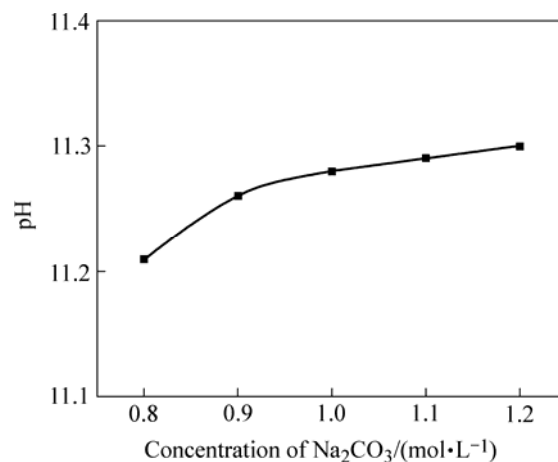


图 7 25 °C 下不同浓度碳酸钠溶液的 pH 值

Fig.7 pH value of different concentrations of Na_2CO_3 solution at 25 °C

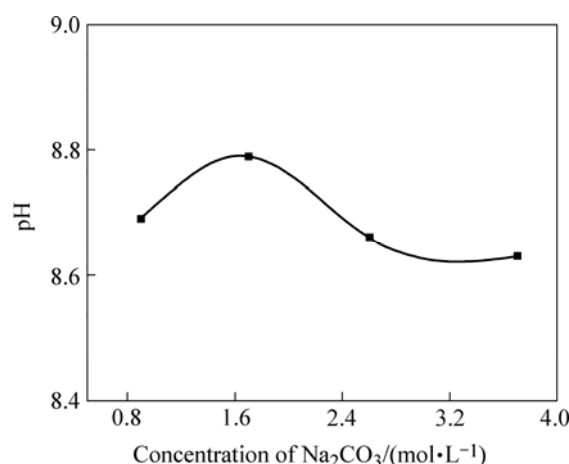


图 8 25 °C 下不同浓度碳酸铵溶液的 pH 值

Fig.8 pH value of different concentrations of $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ solution at 25 °C

4 结论

1) 以 Na_2CO_3 作转化剂时, 适宜的反应温度为

75℃、液固比为5:1、 Na_2CO_3 浓度1.1 mol/L、 $n(\text{Na}_2\text{CO}_3)/n(\text{SrSO}_4)=1.2$ 、时间75 min, SrSO_4 的转化率为97.77%; 而以 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 作转化剂时, 相应为温度60℃、液固比为5:1、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 浓度1.7 mol/L、 $n[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]/n(\text{SrSO}_4)=1.2$ 、时间150 min, SrSO_4 的转化率为78.66%。

2) 溶液化学研究表明, 天青石复分解反应的实质是 CO_3^{2-} 离子与 SrSO_4 反应生成更难溶的 SrCO_3 , 溶液中 CO_3^{2-} 离子浓度是 SrSO_4 转变为 SrCO_3 的主要驱动力。当溶液pH值大于10.3时, 该反应体系中 CO_3^{2-} 含量占绝大部分, 而当pH值小于8.5时, 溶液中 CO_3^{2-} 摩尔分数接近于零, SrSO_4 转化反应趋于停止。

3) pH值测定结果表明, 在一定温度下, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 溶液的pH值在8.63~8.79之间, 相应溶液中 CO_3^{2-} 离子摩尔分数仅为1%左右, 而当 Na_2CO_3 溶液的pH值保持在11.0以上时, 相应溶液中 CO_3^{2-} 的摩尔分数大于82.39%。反应体系内pH值的差异是分别以 Na_2CO_3 和 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 作转化剂时, SrSO_4 转化率差异的根本原因。

REFERENCES

- [1] 田世光. 浅谈我国碳酸锶工业的现状与发展[J]. 化工设计通讯, 2003, 29(3): 56-58.
TIAN Shi-guang. Present situation and development of strontium carbonate industry in China[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2003, 29(3): 56-58.
- [2] 张庆雳, 王爱广, 吴卫东. 中国工业碳酸锶生产现状及发展方向[J]. 无机盐工业, 2005(8): 1-4.
ZHANG Qing-li, WANG Ai-guang, WU Wei-dong. The current status and developing trend of industrial strontium carbonate production in China[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2005(8): 1-4.
- [3] 徐旺生, 何秉忠, 徐莹, 陈中. 由天青石制高纯碳酸锶新工艺研究[J]. 化工矿物与加工, 2002(5): 4-7.
XU Wang-sheng, HE Bing-zhong, XU Ying, CHEN Zhong. Study on new process for production of high purity strontium carbonate from celestite[J]. Industrial Minerals and Processing, 2002(5): 4-7.
- [4] 徐旺生, 徐莹, 李海霞. 天青石绿色化学法制备高纯碳酸锶[J]. 无机盐工业, 2005(5): 25-27.
XU Wang-sheng, XU Ying, LI Hai-xia. The preparation of the high purity strontium carbonate by green chemical method from the celestite[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2005(5): 25-27.
- [5] 谢永福, 高瑞华. 用碳酸铵和天青石复分解制碳酸锶[J]. 江苏化工, 1995, 23(2): 15-17.
XIE Yong-fu, GAO Rui-hua. Preparation of strontium carbonate with celestite and salvolatile by double decomposition[J]. Jiansu Chemical Industry, 1995, 23(2): 15-17.
- [6] 夏士朋, 林万祝. 低品位天青石矿直接制取碳酸锶的新方法[J]. 四川化工与腐蚀控制, 1999, 2(2): 23-25.
XIA Shi-peng, LIN Wan-zhu. New method of direct preparation of strontium carbonate from low-grade celestite[J]. Sichuan Chemical Industry and Corrosion Control, 1999, 2(2): 23-25.
- [7] Castillejos E A H, de la Cruz del B F P, Uribe S A. The direct conversion of celestite to strontium carbonate in sodium carbonate aqueous media[J]. Hydrometallurgy, 1996, 40(1-2): 207-22.
- [8] Carrillo P F R, Uribe S A, Castillejos E A H. A laboratory study of the leaching of celestite in a pachuca tank[J]. Minerals Engineering, 1995, 18(4-5): 495-509.
- [9] Martinez L A, Uribe S A. Interfacial properties of celestite and strontianite in aqueous solutions[J]. Minerals Engineering, 1995, 8(9): 1009-1022.
- [10] Lopez V A, Robledo C A, Uribe S A. Flotation of celestite with the anionic collector sodium dodecyl sulfate effect of carbonate ions[J]. Mineral Processing, 2000, 60(2): 79-90.
- [11] 陈滨. 青海天青石矿的选矿工艺设计[J]. 工程设计与建设, 2003, 35(3): 27-31.
CHEN Bing. Process beneficiation design of Qinghai celestite[J]. Engineering Design and Construction, 2003, 35(3): 27-31.
- [12] 邵广全, 吴沛然, 程波, 张心平, 白秀梅. 某天青石矿浮选工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2005(4): 13-17.
SHAO Guang-quan, WU Pei-ran, CHENG Bo, ZHANG Xin-ping, BAI Xiu-mei. The research on flotation technology of certain celestine ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing), 2005(4): 13-17.
- [13] 刘牡丹, 李光辉, 董海刚, 范晓慧, 黄柱成, 姜涛. 我国碳酸锶工业生产现状与进展[J]. 无机盐工业, 2006(1): 9-12.
LIU Mu-dan, LI Guang-hui, DONG Hai-gang, FAN Xiao-hui, HUANG Zhu-cheng, JIANG Tao. Advance and present state of strontium carbonate industry in China[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2006(1): 9-12.
- [14] 天津化工研究院. 无机盐工业手册(上)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996: 142-144.
Chemical Industry Academe of Tianjin. Manual of Inorganic Chemicals Industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1996: 142-144.
- [15] 王淀佐, 胡岳华. 浮选溶液化学[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988.
WANG Dian-zuo, HU Yue-hua. Solution Chemistry of Flotation[M]. Changsha: Hunan Technology Press, 1988.

(编辑 李艳红)