

· 环境矿物学 ·

钾、钠离子对垃圾渗滤液 RO 浓缩液中鸟粪石结晶的影响

陶 琼¹, 陈天虎¹, 刘海波¹, 朱守成²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 纳米矿物与环境材料实验室, 安徽 合肥 230009; 2. 污水净化与生态修复材料
安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 垃圾渗滤液 RO 浓缩液等高氨氮废水中钾钠离子浓度较高, 而钾钠离子对鸟粪石结晶法回收氨的影响规律尚未了解。本文通过向人工配制不同钾钠浓度的模拟和实际 RO 浓缩液中投加镁盐、磷酸盐促使鸟粪石结晶, 测定结晶前后溶液中氨氮、磷酸盐、钾钠离子浓度, 并利用 XRD、SEM 分析结晶产物的结构和形貌, 探讨钾钠离子对鸟粪石结晶及氨回收率的影响。结果表明, 随着 K^+ 浓度增加, 氨氮回收率由 96.5% 降至 83.0%, 结晶产物中 K^+ 质量分数由 2.4% 升至 6.4%; 鸟粪石特征衍射峰向高角度偏移, 说明 K^+ 进入鸟粪石晶格位置形成含钾鸟粪石; 由于 K^+ 与 NH_4^+ 存在竞争, 在相同镁、氨氮、磷配比条件下会降低氨的回收率, 但 K^+ 对鸟粪石粒径和形貌基本无影响。 Na^+ 对氨氮回收率影响不显著, 但会影响鸟粪石晶体形貌。用实际垃圾渗滤液 RO 浓缩液实验表明, 在鸟粪石结晶回收氨氮的水处理中考虑到 K^+ 的竞争, 提高镁盐、氨氮与磷酸盐的投加比例为 1.8:1:1.5 即可保证氨氮的回收率, 同时还可部分回收其中的 K^+ 成为缓释肥营养组分。

关键词: 垃圾渗滤液; RO 浓缩液; 钾钠离子; 氨氮; 鸟粪石

中图分类号: X703.1; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)03-0417-07

The effect of potassium and sodium ions on the crystallization of struvite in RO concentrate of landfill leachate

TAO Qiong¹, CHEN Tian-hu¹, LIU Hai-bo¹ and ZHU Shou-cheng²

(1. Laboratory of Nanominerals and Environmental Materials, School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Wastewater Purification and Ecological Restoration Materials in Anhui Province, Hefei 230009, China)

Abstract: The high ammonia nitrogen wastewater in the landfill leachate RO concentrate contains high potassium and sodium ions, but the effect of potassium and sodium ions on the crystallization of struvite remains unknown. In this paper, the addition of magnesium salts and phosphates to the simulation of different potassium and sodium concentrations and the actual RO concentrate promotes the crystallization of struvite. The concentrations of ammonia nitrogen, phosphate, potassium and sodium ions in the solution before and after crystallization were determined. The structure and morphology of the crystallized products were analyzed by XRD and SEM. The effects of potassium and sodium ions on the crystallization and ammonia recovery of struvite were discussed. The results showed that, with the increase of potassium ion concentration, the ammonia nitrogen removal rate decreased from 96.5% to 83.0%, and the mass percentage of potassium ions in the precipitated product gradually increased from 2.4% to 6.4%.

收稿日期: 2018-11-01; 接受日期: 2019-03-13; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772035)

作者简介: 陶 琼(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与资源化利用, E-mail: 405082997@qq.com; 通讯作者: 陈天虎, E-mail: chentianhu@hfut.edu.cn。

The characteristic peak of struvite is shifted to a high angle, indicating that potassium ions enter the lattice position of struvite and form a K-struvite; due to the competition between potassium ions and ammonium ions, the removal rate of ammonia nitrogen is reduced under the same magnesium, ammonia nitrogen and phosphorus ratio conditions. However, potassium ions have little effect on the crystal size and morphology of struvite. Sodium ion has no significant effect on ammonia nitrogen recovery, but it will affect the crystal morphology of struvite. Experiments with the actual landfill leachate RO concentrate show that the competition of potassium ions is considered in the water treatment of the recovery of ammonia nitrogen from struvite crystals, and the ratio of magnesium salt, ammonia nitrogen and phosphate is increased by 1.8:1:1.5. The recovery rate of ammonia nitrogen is ensured and, at the same time, the potassium ion is partially recovered as a nutrient component of the slow-release fertilizer.

Key words: landfill leachate; RO concentrate; potassium and sodium ions; ammonia nitrogen; struvite

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41772035)

城市生活垃圾填埋过程中会产生成分十分复杂的垃圾渗滤液,其中含有高浓度的有毒有害有机物、氨氮以及溶解盐(张伟光等, 2017)。垃圾渗滤液通常使用物化-生物组合工艺来处理(庆承松等, 2014; Dolar *et al.*, 2016),反渗透膜(RO)处理常作为垃圾渗滤液深度处理的最后一环以保证出水水质,但随之排出的 RO 浓缩液含有较高的氨氮、钾钠盐(许玉东等, 2014; 邓阳等, 2018)。由于高盐度会抑制氨氮的生物硝化,利用鸟粪石结晶法回收和处理垃圾渗滤液 RO 浓缩液中的氨氮是可供选择的技术途径。

鸟粪石($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$),英文名称 struvite (magnesium ammonium phosphate, 简称 MAP),是一种白色粉末晶体矿物,正菱形晶体结构。常温下,在水中的溶度积为 2.5×10^{-13} 。当溶液中含有 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 以及 PO_4^{3-} ,且离子浓度积大于溶度积常数(即溶液处于过饱和状态)时,会自发结晶生成鸟粪石,反应式为: $\text{Mg}^{2+} + \text{NH}_4^+ + \text{PO}_4^{3-} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \downarrow$ 。早期的研究旨在消除和控制鸟粪石沉积物对环境的不良影响(Rawn *et al.*, 1939)。20 世纪以来随着环境问题的加剧,各种污染物排放量逐年上升,过量的氮、磷排放到环境中导致水体富营养化,一些学者开始研究鸟粪石结晶法回收废水中的氨氮或磷酸盐。鸟粪石结晶法回收氨是向含有 NH_4^+ 的废水中投加等摩尔的 Mg^{2+} 和 PO_4^{3-} ,使之生成难溶的复盐 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (MAP),然后通过重力沉淀将 MAP 从废水中分离(蒋京东等, 2008)。鸟粪石结晶法回收氮效率高、反应迅速、操作简单,产物是性能优良的缓释肥,具有环境可持续性,逐渐成为研究热点(Liu *et al.*, 2011; Chung *et al.*, 2013; Britton *et al.*, 2015; 郭五珍等, 2016; 陶智伟等,

2016; Kataki *et al.*, 2016)。

鸟粪石结晶过程受多种因素影响,如体系中 $\text{NH}_4^+:\text{Mg}^{2+}:\text{PO}_4^{3-}$ 比值、溶液 pH 值、过饱和度、有机物、温度和共存离子等,这些因素会影响鸟粪石的成核、结晶速率、晶体大小、晶体形貌特征(万梦娇等, 2015; 韦林等, 2017; Liu and Qu, 2017),也影响最终出水中残留的氨氮、磷酸盐浓度。鸟粪石结晶法回收 RO 浓缩液中的氨氮已有文献报道,但是氨氮回收率只有 85%,氨氮残留浓度偏高(Tao *et al.*, 2009),制约 RO 浓缩液中氨氮回收的本质原因尚不清楚,对高盐度废水中钾钠离子如何影响鸟粪石结晶、氨氮回收率以及钾钠离子在固液中的分配也缺少研究和认识。本文分别用垃圾渗滤液处理厂排出的 RO 浓缩液和人工配制不同钾钠浓度的模拟 RO 浓缩液进行实验研究,探讨钾钠离子对鸟粪石结晶及氨回收率的影响,并研究如何调整 Mg^{2+} 、 PO_4^{3-} 投加量来提高 RO 浓缩液中氨氮和钾的回收率,为 RO 浓缩液的处理提供理论依据。

1 材料与方法

实际废水取自合肥市某垃圾填埋场的 RO 浓缩液, COD、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 浓度分别为 2 262、966、1 718、2 225 mg/L。结合实际氨氮浓度,模拟 RO 废水氨氮浓度固定为 1 000 mg/L。用去离子水溶解 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 配制成氨氮浓度为 2 000 mg/L 的模拟废水并取 100 mL 置于锥形瓶中。将 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 KCl 溶解于 100 mL 去离子水中,使得 $\text{Mg}^{2+}:\text{NH}_4^+:\text{PO}_4^{3-}$ 的摩尔比为 1:1:1, $\text{K}^+:\text{Mg}^{2+}$ 的摩尔比分别为 1:2、1:1、2:1、3:1 和 5:1,通过蠕动泵将该溶液缓慢滴加到模拟废水中,混合废水的氨氮浓度为 1 000

mg/L。磁力搅拌的同时用 1M NaOH 调节反应过程使其 pH 值稳定在 9 ± 0.2 , 搅拌 30 min, 静置 30 min, 取上清液过 $0.45 \mu\text{m}$ 薄膜进行组分分析。固体用超纯水清洗 3 次后放入烘箱内 45°C 干燥 48 h, 取 0.5 g 干燥样品溶解于 9% 盐酸中测定 K^+ 浓度, 计算其所占质量分数及分配系数。Na⁺ 对鸟粪石结晶影响的探究实验步骤同上, 每组实验重复 3 次。取实际垃圾渗滤液 RO 浓缩液 250 mL 于锥形瓶中, 按不同摩尔比 $\text{NH}_4^+ : \text{PO}_4^{3-} = 1:1, 1:1.2, 1:1.5$, $\text{Mg}^{2+} : \text{PO}_4^{3-} = 1.2:1$ 投加 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 编号为 1、2、3, 其他操作步骤同上。COD、氨氮、磷酸盐、pH 值等各项指标均采用标准方法(国家环保局, 1997), K^+ 、 Na^+ 采用皖仪原子吸收分光光度计法。使用日本电子 JSM-2100 型场发射扫描电镜(FE-SEM)、丹东浩圆 2700 型 X 射线衍射仪完成固体分析。

2 结果与讨论

2.1 钾钠浓度对氨氮回收率的影响

钾钠离子对鸟粪石结晶氨氮回收率的影响如图 1 所示。由图 1 可知, 随着溶液中 K^+ 浓度增加, 氨氮的回收率由 96.5% 降至 83.0%, 表明 K^+ 的存在会降低氨氮回收率。 Na^+ 浓度增加氨氮回收率变化不明显, 保持在 91% 左右, 图 2 中钾钠含量增加对磷酸盐回收率无明显影响, 均在 98% 左右。

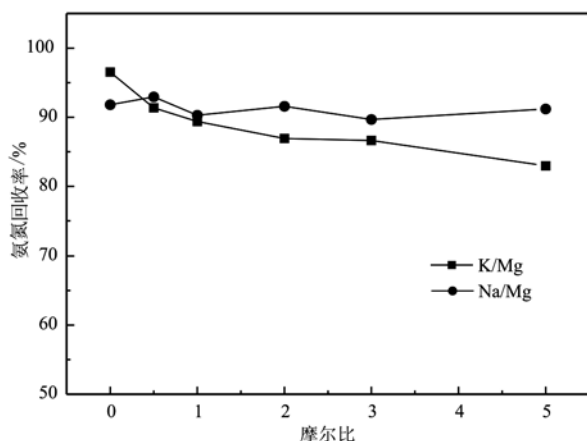


图 1 不同钾钠含量对氨氮回收率的影响

Fig. 1 Effect of different potassium and sodium values on ammonia nitrogen removal rate

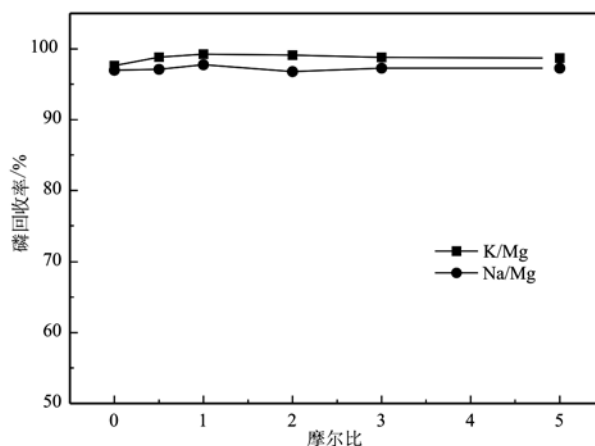


图 2 不同钾钠含量对磷酸盐回收率的影响

Fig. 2 Effect of different potassium and sodium values on phosphate removal rate

2.2 结晶沉淀产物 XRD 分析

图 3、图 4 为不同钾钠浓度下结晶沉淀产物的 XRD 谱图, 各个样品图谱的特征峰与鸟粪石的特征峰完全吻合, 没有出现鸟粪石之外的显著衍射峰, 表明结晶沉淀固体中基本不存在其它结晶物相。由图 3 可知, 随着 K^+ 浓度增加鸟粪石特征衍射峰强度变化不明显, 但是将 (020) 晶面特征衍射峰放大发现其明显向高角度偏移, 表明其中存在显著的 K^+ 类质同像替代。图 4 中显示, 随着 Na^+ 浓度增加鸟粪石特征峰位置没有显著变化, 特征衍射峰强逐渐变弱, 表明没有显著的 Na^+ 类质同像替代, 但是结晶度显著降低。

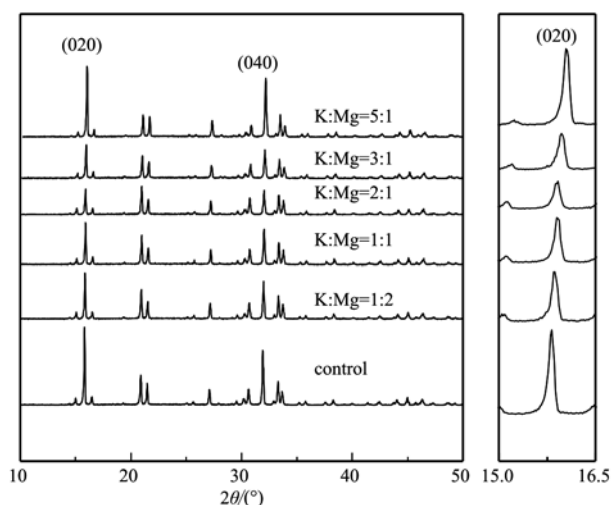


图 3 不同钾镁摩尔比下沉淀产物的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of precipitated products at different K: Mg molar ratios

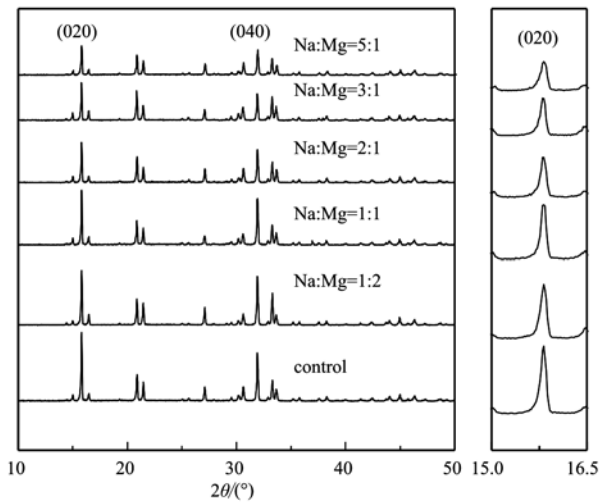


图4 不同钠镁摩尔比下沉淀产物的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of precipitated products at different Na: Mg molar ratios

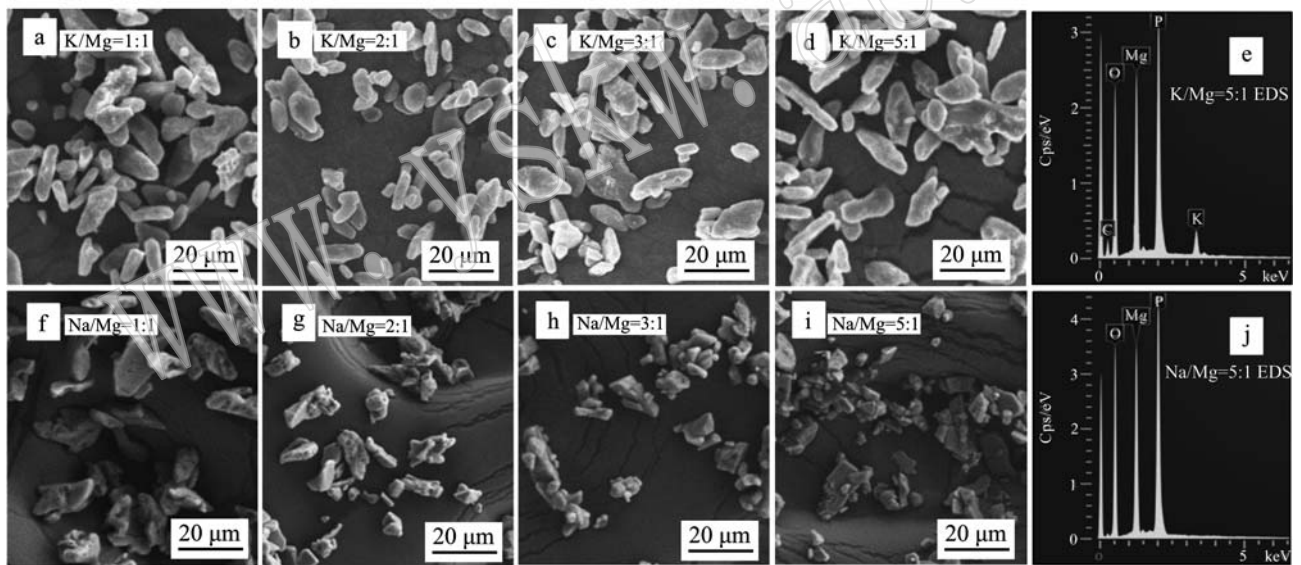


图5 不同摩尔比的SEM图

Fig. 5 SEM image of different molar ratios

过程中 Na^+ 没有进入鸟粪石晶格。 K^+ 测试结果显示,随着溶液中 K^+ 浓度增加结晶沉淀固体中 K^+ 质量百分比逐步上升,其值分别为 2.4%、3.1%、4.6%、5.3%、6.4%。结晶固体中钾含量与溶液中残余 K^+ 浓度含量相关关系如图 6 所示,拟合线性可用 $y = 1.62x + 289.72$ 表示,相关系数 $R^2 = 0.96$ 。斜率为分配系数, $k_d = 1.62 \text{ L/kg}$ 。 K^+ 固液分配系数较小,说明 K^+ 进入鸟粪石沉淀中含量少。

2.5 实际垃圾渗滤液 RO 浓缩液中氮回收

鸟粪石结晶法回收氨氮中 $\text{NH}_4^+ : \text{Mg}^{2+} : \text{PO}_4^{3-}$ 摩

2.3 钾钠离子对结晶沉淀物形态的影响

由图 5 可以看出($\text{K} : \text{Mg} = 1:2$ 、 $\text{Na} : \text{Mg} = 1:2$ 与 $1:1$ 的 SEM 图相似未列出),高浓度 K^+ 对鸟粪石晶体的形貌粒度无影响,晶型规则,且大多呈柱状,其形状和表面特性与文献(Wang *et al.*, 2010; Hanhoun *et al.*, 2013)报道的鸟粪石晶体相似,但结晶产物的 EDS 光谱中出现钾的特征峰,表明 K^+ 进入鸟粪石中。然而在高浓度 Na^+ 存在的体系中,鸟粪石颗粒形貌不规则,且随着 Na^+ 浓度增加,鸟粪石晶体颗粒变小。但图 5j 中没有出现钠的特征峰在沉淀物的 EDS 光谱中,表明 Na^+ 未进入沉淀中。

2.4 结晶沉淀产物钾钠组分分析

不同钾钠浓度下结晶沉淀产物用 9% 盐酸溶解后原子吸收测定钾钠离子浓度,计算固体中钾钠含量。结果显示所有的固体样品中均未检测到 Na^+ ,这与扫描电镜能谱分析结果一致,表明在结晶沉淀

尔比的理论值为 $1:1:1$ (苑宏英等, 2011; 曾庆玲等, 2012)。但考虑到 RO 浓缩液中存在的高浓度 K^+ 与 NH_4^+ 之间的竞争作用,为保证溶液中氨氮的回收率,就需要加大镁盐、磷酸盐的投加量。曾俊钦等(2015)也强调,废水中氨氮和磷酸盐的回收通常受镁的添加量影响,提高镁浓度有利于回收磷酸盐。

因此,在实际垃圾渗滤液 RO 浓缩液鸟粪石回收氨氮的处理中,保持恒定的 $\text{Mg}^{2+} : \text{PO}_4^{3-} = 1.2:1$ 以保证磷的回收率,改变 PO_4^{3-} 的投加剂量,从而改变 NH_4^+ 与 Mg^{2+} 、 PO_4^{3-} 的比例。实验结果如图 7 所示,

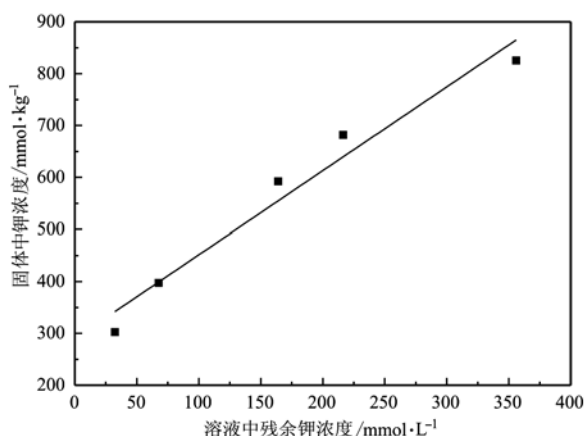
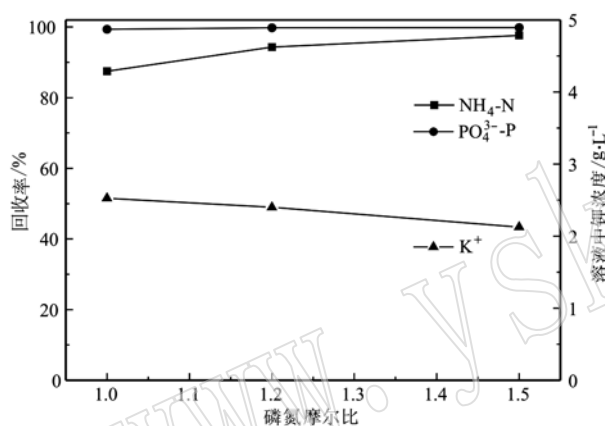
图6 K^+ 固液分配Fig. 6 K^+ value of potassium ion图7 氨氮、磷酸盐回收率及 K^+ 浓度变化

Fig. 7 Ammonia nitrogen, phosphate recovery, potassium ion concentration change

随着 $NH_4^+ : PO_4^{3-}$ 摩尔比由 1:1 到 1:1.5, 氨氮回收率由 87.5% 增至 97.6%, 磷酸盐回收率保持在 99%, 出水氨氮、磷酸盐浓度分别为 23.2 mg/L、1.7 mg/L, 均可达标排放。不同 $NH_4^+ : PO_4^{3-}$ 摩尔比结晶鸟粪石的 XRD 分析结果(图 8)表明, 随着投加磷酸盐比例的增加, 鸟粪石特征衍射峰向高角度偏移, 表明进入鸟粪石晶格中的 K^+ 量也越多, 形成含钾鸟粪石。对鸟粪石中 K^+ 含量进行测定, K^+ 含量随着磷酸盐投加比例增加其值分别为 1.6%、4.5%、5.3%, 鸟粪石中未检测到 Na^+ 。钾是一种稀缺且昂贵的农业资源(Li *et al.*, 2015), 从废水(如浓缩液)中回收钾是重要且环保的选择, 提高 Mg^{2+} 、 PO_4^{3-} 的投加比例在保证氨回收的同时可促进溶液中钾的回收, 实际应用中可将 $Mg^{2+} : NH_4^+ : PO_4^{3-}$ 摩尔比提高至 1.8 : 1:1.5。

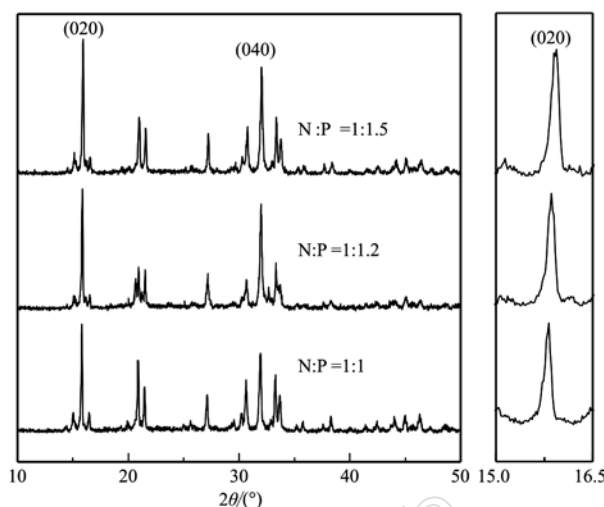


图8 不同氮磷摩尔比下 XRD 图谱

Fig. 8 XRD patterns at different N/P molar ratios

2.6 结果讨论

XRD、SEM 能谱分析及固体成分化学分析结果都显示, 在用鸟粪石法回收水中氨氮的过程中, K^+ 可以替代鸟粪石中 NH_4^+ 的晶格位置, 而 Na^+ 难以进入该晶格位置。这可以归结于 K^+ 、 Na^+ 与 NH_4^+ 半径的差异。 K^+ 半径(0.138 nm)与 NH_4^+ 半径(0.146 nm)比较接近, 相差只有 5.5%, 所以 K^+ 可替代 NH_4^+ 进入鸟粪石晶格。由于 K^+ 半径略小于 NH_4^+ 半径, 所以导致 K^+ 替代鸟粪石中 NH_4^+ 后其面网间距变小, 衍射峰显著向高角度偏移, 替代 K^+ 量越大衍射峰的偏移越大。 Na^+ 半径为 0.102 nm 与 NH_4^+ 半径相差 30%, 所以 Na^+ 很难进入鸟粪石晶格。

Na^+ 对鸟粪石结晶度的影响可以用离子的水化能来解释。离子的水化能与离子半径有关, 离子半径越小水化能越大, 离子水化作用和效应越强。 Na^+ 的半径小, 具有很强的水化作用和效应, 在高浓度的盐溶液中由于 Na^+ 的水化能对生长中鸟粪石晶体表面的作用, 阻止 NH_4^+ 在生长晶面的堆积, 就会降低鸟粪石的晶体粒径, 影响产物的结晶度, Na^+ 浓度越高影响就会越大。也有文献指出溶液中存在的 Na^+ 可通过与 Mg^{2+} 、 PO_4^{3-} 和 NH_4^+ 之间的静电相互作用, 降低它们的活性。带正电荷的 Na^+ 在负电荷的鸟粪石分子群周围积累, 会吸附到鸟粪石表面影响鸟粪石晶体的进一步生长(Warmadewanthi and Liu, 2009; Di *et al.*, 2010; Ronteltap *et al.*, 2010; Rahman *et al.*, 2014)。

在鸟粪石结晶过程中, 溶液中高浓度的 K^+ 与

NH_4^+ 存在竞争关系,在镁、铵、磷比例不变的情况下必然导致氨氮回收率下降,而 Na^+ 与 NH_4^+ 不存在竞争关系,所以 Na^+ 存在不会影响氨氮的回收率。

3 结论

垃圾渗滤液 RO 浓缩液中高浓度的 K^+ 、 Na^+ 会影响鸟粪石结晶。 K^+ 半径接近铵根离子,在生成鸟粪石过程中会与其竞争进入晶格位置形成含钾鸟粪石。 K^+ 浓度增加,氨氮回收率由 96.5% 降至 83.0%, K^+ 所占沉淀的质量分数由 2.4% 升至 6.4%,但其对鸟粪石晶体的粒径和形貌无影响。 Na^+ 半径与 NH_4^+ 半径相差 30%,难以进入鸟粪石晶格,其与铵根离子间的竞争不明显,但溶液中高浓度的 Na^+ 会阻碍鸟粪石晶体进一步生长,使晶体粒度变小。在高钾钠离子存在的废水中为保证氨氮的回收率需提高镁盐、磷酸盐的投加比例,实际应用中可将 $\text{Mg}^{2+}:\text{NH}_4^+:\text{PO}_4^{3-}$ 提高至 1.8:1:1.5,以保证氨氮、磷酸盐出水达标,同时可进一步回收溶液中的 K^+ 。

References

- Britton A, Koch F A, Mavinic D S, *et al.* 2015. Pilot-scale struvite recovery from anaerobic digester supernatant at an enhanced biological phosphorus removal wastewater treatment plant[J]. *Journal of Environmental Engineering & Science*, 4(4): 265 ~ 277.
- Chung J, Kim J, Kim Y, *et al.* 2013. Assessment and selection of best available technology (BAT) for wastewater facilities in the leather tanning and finishing industry[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 70(3): 32 ~ 37.
- Deng Yang, Feng Chuanping, Hu Weiwu, *et al.* 2018. Morphology and biodegradability of dissolved organic matter in electrochemical oxidation of landfill leachate during biochemical effluent[J]. *Environmental Chemistry*, 37(7): 1 647 ~ 1 659(in Chinese).
- Di I C, Pagano M, Ramadori R, *et al.* 2010. Nitrogen recovery from a stabilized municipal landfill leachate[J]. *Bioresource Technology*, 101(6): 1 732 ~ 1 736.
- Dolar D, Košutic K and Strmecky T. 2016. Hybrid processes for treatment of landfill leachate: Coagulation/UF/NF-RO and adsorption/UF/NF-RO[J]. *Separation & Purification Technology*, 168: 39 ~ 46.
- Guo Wuzhen, Wang Yushan, Ye Tingjin, *et al.* 2016. Experimental study on the recovery of phosphorus from struvite by dynamic medium temperature anaerobic digestion[J]. *Chinese Water and Wastewater*, 32(15): 57 ~ 61(in Chinese).
- Hanhoun M, Montastruc L, Azzaro-Pantel C, *et al.* 2013. Simultaneous determination of nucleation and crystal growth kinetics of struvite using a thermodynamic modeling approach[J]. *Chemical Engineering Journal*, 215(3): 903 ~ 912.
- Jiang Jingdong, Xu Yuan, Ma Sanjian, *et al.* 2008. Treatment of ammonia-nitrogen wastewater by struvite precipitation method[J]. *Water Treatment Technology*, 34(2): 45 ~ 49(in Chinese).
- Kataki S, West H, Clarke M, *et al.* 2016. Phosphorus recovery as struvite from farm, municipal and industrial waste: Feedstock suitability, methods and pre-treatments[J]. *Waste Management*, 49: 437 ~ 454.
- Li X, Zhu W, Wu Y, *et al.* 2015. Recovery of potassium from landfill leachate concentrates using a combination of cation-exchange membrane electrolysis and magnesium potassium phosphate crystallization[J]. *Separation & Purification Technology*, 144: 1 ~ 7.
- Liu Y and Qu H. 2017. Interplay of digester supernatant composition and operating pH on impacting the struvite particulate properties[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(4): 3 949 ~ 3 955.
- Liu Y H, Kumar S, Kwag J H, *et al.* 2011. Recycle of electronically dissolved struvite as an alternative to enhance phosphate and nitrogen recovery from swine wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 195(1): 175 ~ 181.
- National Environmental Protection Agency. 1997. Methods for Monitoring and Analysis of Water and Wastewater[M]. China Environmental Science Press(in Chinese).
- Qing Chengsong, Wei Ling, Chen Tianhu, *et al.* 2014. Preliminary study on the enhanced effect of limonite and dolomite on anaerobic digestion of landfill leachate[J]. *Journal of Rock Mineralogy*, 33(2): 365 ~ 369(in Chinese).
- Rahman M M, Salleh M A M, Rashid U, *et al.* 2014. Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization-A review[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(1): 139 ~ 155.
- Rawns A M, Banta A P and Pomeroy R. 1939. Multiple-stage sewage sludge digestion[J]. *American Society of Civil Engineers*, 105: 93 ~ 132.
- Ronteltap M, Maurer M, Hausherr R, *et al.* 2010. Struvite precipitation from urine - influencing factors on particle size[J]. *Water Research*, 44(6): 2 038 ~ 2 046.
- Tao Z, Ding L and Ren H. 2009. Pretreatment of ammonium removal from landfill leachate by chemical precipitation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2): 911 ~ 915.
- Tao Zhiwei, Feng Liang, Xiao Huiqun, *et al.* 2016. Study on the recovery of phosphorus from struvite by dynamic medium temperature anaerobic digestion[J]. *Chinese Water and Wastewater*, 32(15): 57 ~ 61(in Chinese).

- ery of nutrient elements in pig biogas slurry by magnesium ammonium phosphate method[J]. *Water Treatment Technology*, 42(1): 96 ~ 100(in Chinese).
- Wan Mengjiao, Wang Changqiu, Meng Fanlu, *et al.* 2015. Regulation of pH on the growth of hydroxyapatite crystals in simulated body fluids [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(6): 950 ~ 956(in Chinese with English abstract).
- Wang C C, Hao X D, Guo G S, *et al.* 2010. Formation of pure struvite at neutral pH by electrochemical deposition[J]. *Chemical Engineering Journal*, 159(1): 280 ~ 283.
- Warmadewanthi and Liu J C. 2009. Recovery of phosphate and ammonium as struvite from semiconductor wastewater[J]. *Separation & Purification Technology*, 64(3): 368 ~ 373.
- Wei Lin, Hong Tianqiu, Li Ruzhong, *et al.* 2017. Effect of sodium alginate on the crystallization of struvite and its mechanism[J]. *Environmental Science of China*, 37(8): 2 941 ~ 2 946(in Chinese).
- Xu Yudong, Fan Liangxin, Huang Youfu, *et al.* 2014. Treatment of landfill leachate MBR-NF concentrate by Fenton method[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 8(9): 3 711 ~ 3 717(in Chinese).
- Yuan Hongying, Chen Yi, Yuan Jian, *et al.* 2011. Effect of Ca^{2+} and Mg^{2+} dissolution on phosphorus recovery in excess sludge under acidic conditions[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 5(12): 2 743 ~ 2 748 (in Chinese).
- Zeng Junqin, Qiu Chunsheng, Sun Liping, *et al.* 2015. Factors affecting the recovery of phosphorus in urine by magnesium ammonium phosphate precipitation method[J]. *Water Treatment Technology*, 12: 68 ~ 72.
- Zeng Qingling and Shen Chunhua. 2012. Study on factors affecting recovery of ammonia nitrogen from struvite crystallization[J]. *Environmental Science and Technology*, 35(1): 80 ~ 83(in Chinese).
- Zhang Weiguang, Li Jun, Bian Wei, *et al.* 2017. Pretreatment and parameter optimization of late landfill leachate[J]. *Water Treatment Technology*, 43(12): 51 ~ 56(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 邓 阳, 冯传平, 胡伟武, 等. 2018. 电化学氧化垃圾渗滤液生化出水过程中溶解性有机物形态及可生化性[J]. *环境化学*, 37(7): 1 647 ~ 1 659.
- 郭五珍, 王宇珊, 叶挺进, 等. 2016. 动态中温厌氧消化液进行鸟粪石回收磷的试验研究[J]. *中国给水排水*, 32(15): 57 ~ 61.
- 国家环保局. 1997. 水和废水监测分析方法[M]. 中国环境科学出版社.
- 蒋京东, 徐 远, 马三剑, 等. 2008. 鸟粪石结晶沉淀法处理氨氮废水[J]. *水处理技术*, 34(2): 45 ~ 49.
- 庆承松, 韦 玲, 陈天虎, 等. 2014. 褐铁矿和白云石对垃圾渗滤液厌氧消化增强作用的初步研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(2): 365 ~ 369.
- 陶智伟, 冯 亮, 肖惠群, 等. 2016. 磷酸铵镁法回收养猪沼液中营养元素的研究[J]. *水处理技术*, 42(1): 96 ~ 100.
- 万梦娇, 王长秋, 孟繁露, 等. 2015. pH 值对模拟体液中羟磷灰石晶体生长的调控[J]. *岩石矿物学杂志*, 34(6): 950 ~ 956.
- 韦 林, 洪天求, 李如忠, 等. 2017. 海藻酸钠对鸟粪石结晶的影响及机理研究[J]. *中国环境科学*, 7(8): 2 941 ~ 2 946.
- 许玉东, 范良鑫, 黄友福, 等. 2014. Fenton 法处理垃圾渗滤液 MBR-NF 浓缩液[J]. *环境工程学报*, 8(9): 3 711 ~ 3 717.
- 苑宏英, 陈 轶, 员 建, 等. 2011. 酸性条件下剩余污泥中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 溶出对磷回收的影响[J]. *环境工程学报*, 5(12): 2 743 ~ 2 748.
- 曾俊钦, 邱春生, 孙力平, 等. 2015. 磷酸铵镁沉淀法对尿液中磷的回收影响因素研究[J]. *水处理技术*, 12: 68 ~ 72.
- 曾庆玲, 沈春花. 2012. 鸟粪石结晶法回收氨氮影响因素的研究[J]. *环境科学与技术*, 35(1): 80 ~ 83.
- 张伟光, 李 军, 卞 伟, 等. 2017. 晚期垃圾渗滤液的预处理及参数优化[J]. *水处理技术*, 43(12): 51 ~ 56.