

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.11.001

酵母菌强化磷酸铵镁结晶体系处理富磷污泥上清液

刘玉森^{1,2}, 高明昌³, 孙绍芳^{1,2}, 邱琪³, 邱立平^{1,2}

(1. 济南大学 土木建筑学院, 山东 济南 250022; 2. 山东省功能材料水质净化工程技术研究中心, 山东 济南 250022; 3. 济南大学 水利与环境学院, 山东 济南 250022)

摘要: 利用一株除磷酵母菌在除磷过程中表面形成局部富磷区域的现象,将其引入到结晶除磷中,开发了酵母菌诱导强化磷酸铵镁(MAP)结晶协同除磷新体系。以A²/O污泥浓缩池富磷上清液为处理对象,探究了pH、Mg/P、N/P、反应时间和搅拌强度对该体系除磷效能的影响,采用扫描电子显微镜能谱仪(SEM-EDS)、X射线衍射仪(XRD)分析结晶产物的形貌及晶型。结果表明,酵母菌诱导强化MAP结晶体系处理A²/O污泥浓缩池富磷上清液的最优参数如下:pH=10.0、Mg/P=2.0、N/P=2.0、反应时间=30 min、搅拌强度=300 r/min,出水磷浓度可低至1.71 mg/L,除磷率为97.14%。结晶产物分析结果表明,酵母菌分泌的大量胞外聚合物(EPS)可以吸附废水中的PO₄³⁻-P和Mg²⁺,在菌体周围形成富磷区域,进而以酵母菌为晶核形成MAP结晶产物,实现磷的去除与回收。

关键词: 酵母菌; 磷酸铵镁(MAP); 富磷上清液; 结晶产物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)11-0001-06

Yeast Induced Magnesium Ammonium Phosphorus Crystallization for Treatment of Phosphorus-rich Sludge Supernatant

LIU Yu-sen^{1,2}, GAO Ming-chang³, SUN Shao-fang^{1,2}, QIU Qi³, QIU Li-ping^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China;
2. Shandong Province Functional Material Water Quality Purification Engineering Technology Research Center, Jinan 250022, China; 3. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: A high-efficient phosphorus removal yeast strain, which can form local phosphorus rich areas during phosphorus removal, was introduced into magnesium ammonium phosphate (MAP) crystallization process to carry out a new technology for phosphorus removal and recovery. The effects of pH, Mg/P, N/P, reaction time and stirring intensity on the treatment efficiency of the phosphorus-rich supernatant from A²/O sludge thickener were investigated, and the crystalline products were characterized through scanning electron microscope coupled with energy dispersive spectrometer (SEM-EDS) and X-ray diffraction (XRD). The results showed that the optimal parameters were as follows: pH of 10.0, Mg/P of 2.0, N/P of 2.0, reaction time of 30 min, stirring intensity of 300 r/min. The effluent phosphorus concentration was 1.71 mg/L, and the phosphorus removal rate was 97.14% under optimal conditions. The

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678276); 济南市“高校20条”科研带头人工作室资助项目(2018GXRC020)

通信作者: 邱立平 E-mail: lipingqiu@163.com

analysis of crystallized product suggested that yeast could secrete lots of extracellular polymeric substances absorbing phosphorus and magnesium ion to form phosphorus-rich areas around yeast. MAP crystallization products formed outside the yeast cell to realize phosphorus removal and recovery.

Key words: yeast; magnesium ammonium phosphate (MAP); phosphorus-rich supernatant; crystalline products

水环境中磷浓度超标会导致水体富营养化,严重威胁水环境生态安全^[1-2]。同时,磷作为一种不可再生资源,全球储备量日益减少。因此,去除废水中的磷并进行磷资源回收成为解决水体富营养化和缓解磷资源紧张的有效途径^[3]。

污泥浓缩池是A²/O工艺中的重要处理单元,其产生的富磷上清液回流至系统进水井是造成工艺进水磷负荷过高、除磷效能下降的主要原因之一。因此,降低富磷上清液中的磷浓度并有效回收磷资源具有重要意义^[4]。目前,生物法和结晶法是回收除磷的常用方法。生物法运行管理方便,成本相对较低,但剩余污泥磷含量不高,无法有效回收磷资源^[5-6]。结晶法是目前磷回收的研究热点,其中磷酸铵镁(MAP)结晶法因具有除磷效率高、结晶速度快、晶体沉淀性好等优势而备受关注^[7-8]。但化学结晶对初始磷浓度要求较高,需要投加大量化学药剂,设备复杂,且运行成本较高,在实际应用中存在诸多限制^[9]。近年来,部分学者将生物法与化学结晶法相结合,形成生物-结晶耦合除磷工艺,可有效解决生物法除磷效率较低及结晶法化学药剂投加量高等问题,同时可以突破化学结晶需要高磷浓度的限制^[3,10]。课题组前期研究表明,部分酵母菌表现出良好的除磷效果与明显的磷结晶诱导效应^[11-12]。为此,以A²/O污泥浓缩池富磷上清液为处理对象,利用酵母菌的富磷特性,将酵母菌与MAP结晶相结合,构建酵母菌-MAP结晶除磷新体系,探究pH、氮磷比(N/P)、镁磷比(Mg/P)、反应时间和搅拌强度等参数的影响,分析结晶产物的形貌及晶型,揭示结晶产物回收价值,以期为进一步推动生物-结晶耦合除磷技术的应用提供参考。

1 试验材料和方法

1.1 试验菌株及模拟废水水质

试验所用酵母菌为前期课题组在交替厌氧-好氧生物滤池系统中分离纯化的*Trichosporon* sp. BZ菌株^[13],细胞呈短棒状,产分生孢子,菌落呈半透

明、白色椭圆形、干燥黏稠。

模拟废水按照A²/O工艺污泥浓缩池富磷上清液配制,其COD为450 mg/L、PO₄³⁻-P为60 mg/L。

1.2 试验方法

试验均在无菌条件下1 000 mL锥形瓶中进行。将酵母菌以体积分数为5%接种至模拟废水中,在28℃恒温箱中振荡培养8 h,控制菌液浓度为1.03×10¹⁰ CFU/mL,然后在搅拌强度为200 r/min下,调整pH到设定值后加入一定量Mg²⁺,开始计时,分别在0、2、4、6、8、10、15、30、60 min时取样,部分水样直接测定浊度,部分水样经过0.45 μm水系滤膜过滤后测定NH₄⁺-N和PO₄³⁻-P浓度。

采用单因素试验探究了pH、Mg/P、N/P、反应时间、搅拌强度对酵母菌-MAP结晶体系处理富磷上清液效能的影响。试验过程中使用1 mol/L的HCl或NaOH溶液将pH调节至9.0~11.0,保持废水中磷浓度为60 mg/L,调节MgCl₂和NH₄Cl投量控制Mg/P和N/P为1.0~3.0,控制反应时间为0~60 min,使用搅拌机控制搅拌强度为100~500 r/min,以此确定酵母菌-MAP结晶体系的最优操作参数。

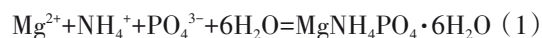
1.3 分析项目及方法

pH:pH计;浊度:哈希2100 AN浊度仪;PO₄³⁻-P浓度:钼锑抗分光光度法;NH₄⁺-N浓度:纳氏试剂光度法^[14];结晶产物形貌及晶型:扫描电子显微镜能谱仪(SEM-EDS)和X射线衍射仪(XRD)。

2 结果与讨论

2.1 水质条件对除磷效能的影响

MAP结晶反应化学方程式如下^[15]:



其中,NH₄⁺、Mg²⁺、PO₄³⁻含量直接影响MAP结晶过程,不同工艺的最优n(Mg):n(N):n(P)值也不同,因此不能以n(Mg):n(N):n(P)=1:1:1作为结晶工艺有效比例,且pH决定NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P在溶液中的存在形式,影响反应的化学平衡。由此可见,探究pH、Mg/P及N/P对酵母菌-MAP结晶体系去除

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的影响具有重要意义。此外,反应溶液浊度变化也可间接反映结晶效果的好坏^[16]。因此,同时测定了浊度的变化情况。

2.1.1 pH的影响

不同pH下酵母菌强化MAP结晶体系处理富磷上清液的效果见图1。随着pH的增大, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率呈先上升后下降的趋势。当pH由9.0增大到9.5时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率分别从43.01%、88.73%升高到48.20%、93.53%;pH继续增大至10.0时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别降低至42.43、2.33 mg/L,去除率分别为47.73%和96.11%;继续提高溶液pH, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率略有下降,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率显著降低。这是由于随着pH增大, H^+ 浓度降低,平衡右移,结晶速率加快,促进了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度降低,去除率升高;但当废水pH>10.0时 OH^- 增多,会产生 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉淀,致使 Mg^{2+} 浓度下降,同时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 也会转换为 NH_3 ,进而导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效果变差。刘晨等^[17]在研究不同晶种对MAP除磷效能的影响时发现,以活化石英砂为晶种的除磷率最高,达到80.97%。而本研究中,最优 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率能够达到96.11%。这可能是由于酵母菌表面对磷元素的富集更有利于晶体形成,且菌体表面的静电作用更容易吸附溶液中的离子^[18],进而提高系统除磷效能。由图1还可知,体系的浊度随pH的增加,呈先上升后逐渐下降的变化趋势,说明溶液中颗粒沉淀逐渐减少,结晶效果较好。因此,综合考虑 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果以及浊度变化,确定反应最佳pH为10.0。

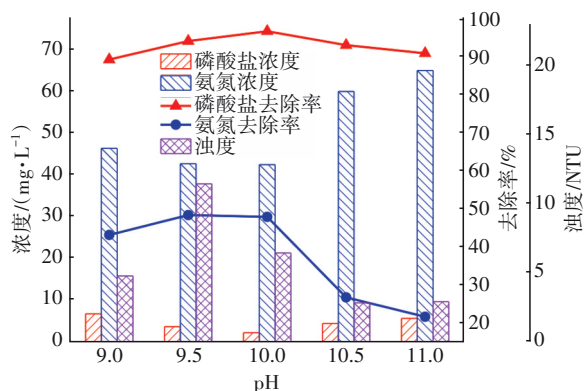


图1 pH对酵母菌强化MAP结晶体系处理富磷上清液的影响

Fig.1 Effect of pH on the treatment of phosphorus-rich supernatant by yeast-MAP

2.1.2 Mg/P的影响

Mg/P对酵母菌强化MAP结晶体系处理富磷上清液的影响如图2所示。随着Mg/P的提高, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率先上升后保持平稳。当Mg/P从1.0增至1.5时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率分别从49.50%和85.34%增加到51.52%和96.39%;当Mg/P为2.0时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率分别为52.15%和97.45%,溶液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别为28.71、1.86 mg/L;随着Mg/P的继续增大, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率基本保持不变。由图2还可知,反应体系的浊度随Mg/P的增加,呈现持续降低的趋势。当Mg/P增大至2.0后,浊度基本稳定在2.00 NTU。Mg/P是影响MAP结晶反应平衡的关键因子,Mg/P提高即 Mg^{2+} 浓度增加有利于 Mg^{2+} 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 接触碰撞,促进MAP结晶的生成,从而提高对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效能。但是Mg/P过高可能导致 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 等沉淀生成,不利于MAP结晶的进行。综上,确定最优Mg/P为2.0。

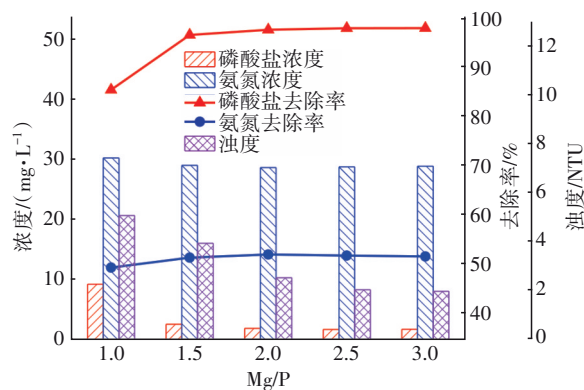


图2 Mg/P对酵母菌强化MAP结晶体系处理富磷上清液的影响

Fig.2 Effect of Mg/P on the treatment of phosphorus-rich supernatant by yeast-MAP

2.1.3 N/P的影响

N/P对酵母菌强化MAP结晶体系处理富磷上清液的影响如图3所示。由图3可见, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率随N/P的增加呈逐步上升的趋势。N/P由1.0增加到2.0时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率从85.70%升高至97.14%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度降低至1.71 mg/L;随N/P继续增加至3.0时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率增长缓慢,增幅仅为1.03%。反应溶液中的浊度随N/P的增加呈逐渐降低的趋势。当N/P=2.0时浊度降至1.95 NTU,继续提高N/P,则浊度基本趋于稳定。这是因为当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

浓度较低时,无法满足 MAP 结晶反应的需要,随着 N/P 的提升, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度增加,促进了 MAP 结晶反应向右进行,但由于其他影响因子的限制,当 N/P > 2.0 时, MAP 结晶除磷效能增幅并不明显,由此确定酵母菌-MAP 结晶除磷的最佳 N/P 为 2.0。

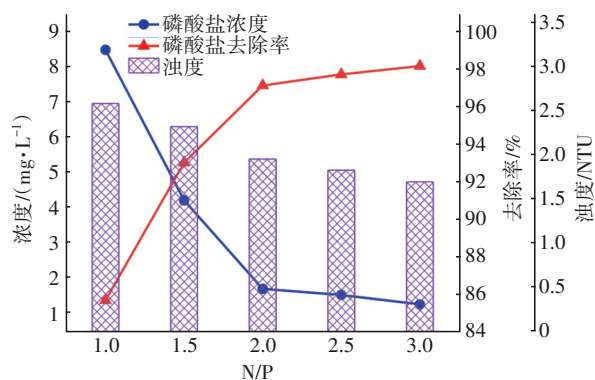


图3 N/P对酵母菌强化MAP结晶体系处理富磷上清液的影响

Fig.3 Effect of N/P on the treatment of phosphorus-rich supernatant by yeast-MAP

2.2 反应条件对除磷效能的影响

2.2.1 反应时间的影响

研究表明,反应时间与晶体的形成和增长有关,适当的反应时间会影响晶体结构^[19],但反应时间过长会导致成本过高。因此,考察了反应时间对 MAP 结晶除磷效能的影响,结果如图4所示。

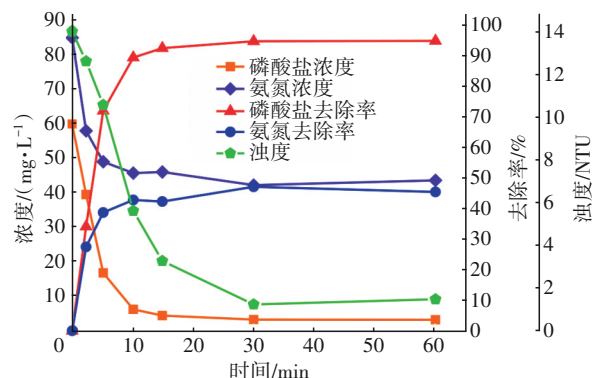


图4 反应时间对酵母菌强化MAP结晶体系处理富磷上清液的影响

Fig.4 Effect of reaction time on the treatment of phosphorus-rich supernatant by yeast-MAP

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率呈先上升后稳定的趋势,浊度呈先持续降低后轻微上升的趋势。反应开始 2 min 后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度分别降至 58.01、39.53 mg/L;随着反应的进行, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率持续升高,反应 10 min 时分别达到 42.84% 和 89.48%;当反应时间继续增加到 30 min 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率分别增大到 47.17% 和 94.84%,继续增加反应时间到 60 min,两者的去除率基本保持不变。此外,浊度随反应持续下降,在 30 min 时降到最低,为 1.23 NTU,延长反应时间浊度并未发生明显变化,说明在 30 min 时 MAP 结晶反应基本完成,晶体生长良好,沉淀效果显著,继续增加反应时间对强化结晶除磷效能无明显作用,因此选定 30 min 为最佳反应时间。

2.2.2 搅拌强度的影响

探究了搅拌强度对酵母菌强化 MAP 结晶体系处理富磷上清液的影响,结果见图5。

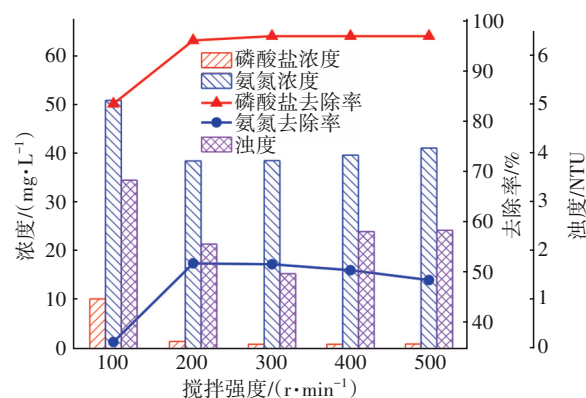


图5 搅拌强度对酵母菌强化MAP结晶体系处理富磷上清液的影响

Fig.5 Effect of stirring intensity on the treatment of phosphorus-rich supernatant by yeast-MAP

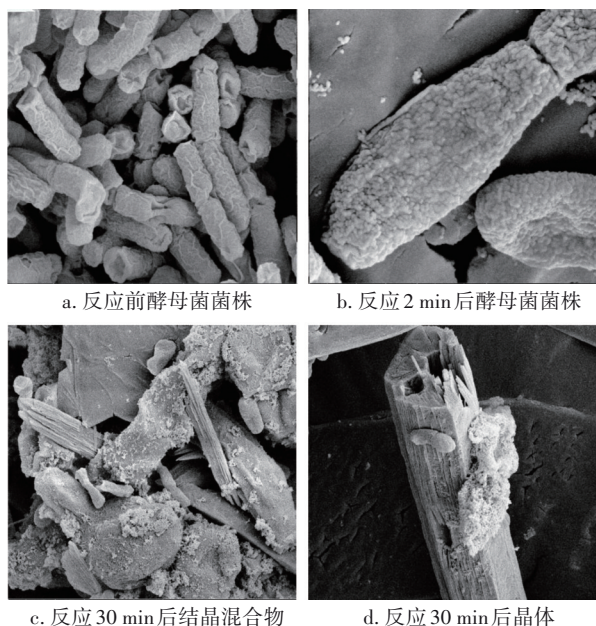
从图5可以看出,随着搅拌强度的增加, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率先升高然后基本保持稳定。当搅拌强度为 100、200、300 r/min 时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率分别为 83.59%、96.17% 和 97.17%,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率较低,分别为 36.34%、51.94%、51.76%。继续增大搅拌强度, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率基本保持不变。由图5还可发现,反应体系的浊度随搅拌强度的增加呈先降低后小幅度上升的趋势,当搅拌强度为 300 r/min 时,达到最低值 1.53 NTU。这是因为 MAP 晶体具有一定韧性,在一定范围内增大搅拌强度,可以使结晶离子得到充分接触而不会导致晶体破碎,从而有利于晶体生成,提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率及晶体沉降性能;继续提高搅拌强度, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效果变化较小,浊度反而增加,说明当搅拌强度过大时,晶体颗粒间碰撞加剧,

晶体碎裂导致浊度升高,因此确定最佳搅拌强度为300 r/min。

2.3 酵母菌强化MAP结晶产物分析

2.3.1 SEM-EDS分析

利用SEM对酵母菌强化MAP结晶前后的菌株与结晶产物的形貌进行了分析,结果见图6。酵母菌 *Trichosporon* sp. BZ 为短棒状,且表面有褶皱,这可能是酵母菌分泌的胞外聚合物(EPS)脱水后形成的,见图6(a)。图6(b)显示,反应2 min后酵母菌表面存在较多的点状颗粒,可能是酵母菌表面吸附的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 Mg^{2+} 开始形成小的MAP晶体。图6(c)、(d)为反应30 min后,酵母菌与MAP结晶混合物的形貌。从图6(c)可知反应后菌体数量明显减少,且混合物尺寸较大,可达5 μm 以上,这可能是由于酵母菌菌体被结晶产物包裹在内部形成结晶混合物;图6(d)表明,在酵母菌-MAP结晶体系中形成的结晶产物呈长方体状,且形状较为均匀。



a. 反应前酵母菌菌株

b. 反应2 min后酵母菌菌株

c. 反应30 min后结晶混合物

d. 反应30 min后晶体

图6 酵母菌强化MAP结晶反应的SEM照片

Fig.6 Scanning electron microscope of yeast-MAP crystallization reaction

EDS分析显示,结晶前C、N、O、Na、Mg、P、S、K、Fe的原子百分比分别为67.16%、8.73%、22.34%、0.40%、0.80%、0.20%、0.10%、0.26%,结晶后为47.01%、5.76%、40.50%、0.79%、2.40%、3.21%、0.33%、0,即酵母菌表面主要由C、N、O三种元素组成。反应前后体系中P含量变化较大,原子百分

比由结晶前的0.80%升至结晶后的3.21%。而Mg元素的原子百分比在结晶反应完成后也大幅升高。反应结束后Mg/P原子比为0.75,略小于MAP中的Mg/P原子比,这可能是由于部分磷以其他形式存在于酵母菌胞内或EPS中^[11]。

2.3.2 XRD分析

利用XRD对结晶产物进行分析,发现酵母菌强化MAP结晶产物的特征图谱与MAP标准图谱匹配度较好。此外,在图谱中还存在其他较弱衍射峰,与 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 晶体的标准图谱相吻合,说明结晶产物中主要是MAP晶体,还存在少量 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 晶体。

3 结论

① 酵母菌强化MAP结晶除磷体系能够有效处理初始磷浓度为60 mg/L的A²/O污泥浓缩池富磷上清液模拟废水,对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率可以达到97.14%,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度低至1.71 mg/L,能显著降低富磷上清液回流对主流工艺的磷负荷冲击。

② 水质(pH、Mg/P、N/P)以及反应条件(反应时间、搅拌强度)对酵母菌强化MAP结晶除磷体系的效能影响较大,最优参数如下:pH=10.0、N/P=2.0、Mg/P=2.0、反应时间为30 min、搅拌强度为300 r/min。

③ 酵母菌对 PO_4^{3-} 和 Mg^{2+} 的吸附作用,促使菌体周围形成富磷区域,进而以酵母菌为晶核形成MAP结晶产物,实现对磷的同步去除与回收。

参考文献:

- [1] ZHU Y, ZHAI Y B, LI S H, *et al.* Thermal treatment of sewage sludge: a comparative review of the conversion principle, recovery methods and bioavailability-predicting of phosphorus [J]. Chemosphere, 2022, 291: 133053.
- [2] 郝晓地,宋鑫,Mark van Loosdrecht,等. 政策驱动欧洲磷回收与再利用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 35-42.
HAO Xiaodi, SONG Xin, Mark van Loosdrecht, *et al.* Phosphorus recovery and reuse driven by policies in Europe[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 35-42 (in Chinese).
- [3] ZOU H M, WANG Y. Phosphorus removal and recovery from domestic wastewater in a novel process of enhanced biological phosphorus removal coupled with crystallization[J]. Bioresource Technology, 2016, 211:

- 87-92.
- [4] 李吉玉,刘安平,毛先勇,等. 污泥浓缩池中磷的释放及其强化去除措施[J]. 中国给水排水, 2019, 35(13): 1-5.
- LI Jiyu, LIU Anping, MAO Xianyong, *et al.* Release of phosphorus in sludge thickener and its enhanced removal measures [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(13): 1-5 (in Chinese).
- [5] ROY S, QIU G L, ZUNIGA-MONTANEZ R, *et al.* Recent advances in understanding the ecophysiology of enhanced biological phosphorus removal [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2021, 67: 166-174.
- [6] YUAN Z G, PRATT S, BATSTONE D J. Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23(6): 878-883.
- [7] PENG L H, DAI H L, WU Y F, *et al.* A comprehensive review of phosphorus recovery from wastewater by crystallization processes[J]. *Chemosphere*, 2018, 197: 768-781.
- [8] LI B, BOIARKINA I, YU W, *et al.* Phosphorous recovery through struvite crystallization: challenges for future design [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1244-1256.
- [9] GUAN Q, ZENG G S, GONG B C, *et al.* Phosphorus recovery and iron, copper precipitation from swine wastewater via struvite crystallization using various magnesium compounds [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 328: 129588.
- [10] LIN L, ZHANG Y L, BECKMAN M, *et al.* Process optimization of anammox-driven hydroxyapatite crystallization for simultaneous nitrogen removal and phosphorus recovery [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 290: 121779.
- [11] HAN J L, QIU Q, GAO M C, *et al.* Phosphorus removal from municipal wastewater through a novel *Trichosporon asahii* BZ: performance and mechanism [J]. *Chemosphere*, 2022, 298: 134329.
- [12] 高明昌,孙绍芳,邱琪,等. 酵母菌在废水除磷中的机理与应用研究进展[J]. 中国给水排水, 2021, 37(10): 41-48.
- GAO Mingchang, SUN Shaofang, QIU Qi, *et al.* Application and mechanism of yeast in phosphorus removal from wastewater: an overview [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(10): 41-48 (in Chinese).
- [13] 石亮. A/O交替生物膜系统中酵母菌种群及其磷代谢特性研究[D]. 济南: 济南大学, 2018.
- SHI Liang. Population and Phosphorus Metabolism of Yeasts in Anaerobic/Oxic Biofilm System [D]. Jinan: University of Jinan, 2018 (in Chinese).
- [14] 左嘉,戴书浩,魏宝梅,等. 地表水中氨氮的三种测定方法比对试验研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(6): 128-130.
- ZUO Jia, DAI Shuhao, WEI Baomei, *et al.* Comparison experiment on determination of ammonia nitrogen in surface water with three methods [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(6): 128-130 (in Chinese).
- [15] SHIH Y J, ABARCA R R M, DE LUNA M D G, *et al.* Recovery of phosphorus from synthetic wastewaters by struvite crystallization in a fluidized-bed reactor: effects of pH, phosphate concentration and coexisting ions [J]. *Chemosphere*, 2017, 173: 466-473.
- [16] TRIGER A, PIC J S, CABASSUD C. Determination of struvite crystallization mechanisms in urine using turbidity measurement [J]. *Water Research*, 2012, 46(18): 6084-6094.
- [17] 刘晨,聂锦霞,郭琳,等. 晶种对磷酸铵镁法去除水中磷的影响[J]. 应用化工, 2018, 47(7): 1391-1394.
- LIU Chen, NIE Jinxia, GUO Lin, *et al.* Effects of seed crystals on phosphorus removal by magnesium ammonium phosphate crystallization [J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(7): 1391-1394 (in Chinese).
- [18] PATEL J K. Colloidal examination of yeast and wort associated with premature yeast flocculation [J]. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2011, 69(2): 81-90.
- [19] OGATA F, UEMATSU Y, FUKUDA M, *et al.* Changes in the mechanism of the reaction between phosphate and magnesium ions: effect of initial concentration and contact time on removal of phosphate ions from aqueous media [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(5): 104385.

作者简介: 刘玉森(1996-), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理理论与工艺。

E-mail: yusen04@163.com

收稿日期: 2022-04-02

修回日期: 2022-04-10

(编辑: 李德强)