

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.01.04

化学絮凝法处理海产品加工中高浓度含磷废水

于洪淼, 王超, 凌威, 徐晓晨, 杨凤林, 张树深
(大连理工大学 环境学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对海产品加工中高浓度含磷废水(1 000 mg/L)会恶化生物除磷的问题,通过化学絮凝法对高磷废水进行处理,分析了几种单一与混合絮凝剂的除磷效果。结果表明:聚合氯化铝与海泡石以质量比 $m_{\text{聚合氯化铝}}:m_{\text{海泡石}} = 10:3$ 制作的混合絮凝剂,在投加量为 26 g/L,快速搅拌(160 r/min)60 min,慢速搅拌(80 r/min)30 min后,磷去除率最高,达到 99.68%。混合絮凝剂絮凝沉淀物的 XRD 分析表明,沉淀的主要成分为 $\text{CaAl}_3(\text{PO}_3\text{OH})\text{SiO}_3$,说明海泡石中含有的 CaO 和 SiO_2 成分对磷的去除有促进作用。

关键词: 废水处理;高浓度含磷废水;化学絮凝剂;絮凝参数;海产品加工

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2019)01-0021-06

Treatment of high concentration phosphorus wastewater in seafood processing using chemical flocculation

YU Hongmiao, WANG Chao, LING Wei, XU Xiaochen, YANG Fenglin, ZHANG Shushen
(School of Environmental, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To solve the problem that the biological phosphorus removal be aggravated by the high - concentration phosphorus - containing wastewater (1000 mg/L) in seafood processing, the high - concentration phosphorus - containing wastewater was treated by chemical flocculation method, and the phosphorus removal efficiency of several single and mixed flocculants were analyzed. The results showed that the mixed flocculant, which prepared by polyaluminium chloride and sepiolite with mass ratio $m_{\text{polyaluminium chloride}}:m_{\text{sepiolite}} = 10:3$, had the highest phosphorus removal rate of 99.68% at a dose of 26 g/L, rapid agitation (160 r/min) for 60 min, and slow agitation (80 r/min) for 30 min. The XRD analysis of the precipitated flocculation agent after flocculation showed that the main component of the precipitate was $\text{CaAl}_3(\text{PO}_3\text{OH})\text{SiO}_3$, indicating that the CaO and SiO_2 components contained in the sepiolite have positive effects on the removal of phosphorus.

Key words: wastewater treatment; high concentration of phosphorus wastewater; chemical flocculant; flocculation parameter; seafood processing

1 研究背景

近年来,随着我国经济的快速发展,生态保护问题愈来愈严峻。为了缓解中国严峻的水体富营养化形势,含磷废水的排放标准变得更加严格。随着我国沿海城市中海产品加工厂数量的与日俱增,大量的海产品加工废水亦随之而来。海产品加工废水,主要是指鱼、虾等剖杀清洗废水、蒸煮废水、泡药废水以及工作台面和地面的清洗废水等^[1]。废水中

以有机物和蛋白质为主要污染物^[2-3]。而海产品加工过程中,往往添加部分保水剂以保证食品的口感鲜美。

保水剂的添加虽提升了食物口感,但也造成了海产品加工废水中含有高浓度的磷^[4],总磷浓度可达到 1 000 mg/L。如不对其中的磷进行处理,会对后续废水的生化处理过程以及设施造成严重不良影响。常用保水剂的主要成分为聚合磷酸盐,海产品加工废水中的聚合磷酸盐可以通过厌氧处理转变为

收稿日期:2018-07-16; 修回日期:2018-09-22

基金项目:国家自然科学基金项目(21777018)

作者简介:于洪淼(1994-),女,黑龙江绥化人,硕士,研究方向为水污染控制与防治。

通讯作者:杨凤林(1944-),男,辽宁大连人,硕士,教授,博士生导师,研究方向为水污染控制与防治。

正磷酸盐^[5]。

目前处理含正磷酸盐废水的主要方法有生物法、物理法和化学絮凝法^[6]。物理法通过离子交换、吸附等对废水的初级处理可行,但单独使用会存在离子交换容量低、吸附剂再生产生的废水无法直接排放等问题^[7]。生物法虽然在除磷的同时可去除有机物,有较低的运行成本,但工艺过程运行稳定性差,除磷效果的好坏与水质、季节因素直接相关,且不能回收磷^[8]。对比以上两种方法,化学絮凝法具有磷去除率高、不受季节约束、不易受水质变化影响等优点。

常见的化学絮凝除磷药剂有:(1)钙盐类絮凝剂,如 CaCl_2 、 CaSO_4 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaO 等;(2)铝类絮凝剂,如 Al_2SO_4 、聚合氯化铝等;(3)铁类絮凝剂,如 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 等^[9];(4)有机高分子絮凝剂,如淀粉、甲壳素、壳聚糖等^[10-11],通过絮凝沉淀的方式去除水中污染物^[12]。除此之外,综合国内外研究,纯天然含水的富镁硅酸盐黏土矿物海泡石也可作为除磷药剂。海泡石具有超大比表面积和孔隙结构,特殊的晶体结构导致其具有较强吸附性^[13]。常规的絮凝药剂处理一般浓度(100 mg/L 以下)的含磷废水去除率可达90%以上^[14],但针对海产品加工过程中产生的高浓度含磷废水,常规的药剂剂量对磷的去除效果远远达不到处理要求。目前,关于处理海产品加工车间高浓度含磷废水的还鲜有报道。因此,本研究欲采用几种单一絮凝剂与混合絮凝剂,分别对海产品加工车间厌氧处理后含磷废水进行絮凝除磷,以寻找最佳药剂和最佳的絮凝参数,从而有效地提高磷的去除率。

2 材料和方法

2.1 实验药品

常规的絮凝试剂均属于无机试剂,考虑到实验的严谨性,拟添加1组有机试剂进行对照实验。考虑到壳聚糖在处理食品加工废水、景观水中应用效果显著^[15-16],因此选定壳聚糖作为絮凝剂之一。实验中需使用的药品与纯度如表1所示。

2.2 实验用水

本实验废水取自辽宁省大连市庄河地区某鲑鱼加工厂的加工车间。该加工车间为了保证鱼肉制品口感鲜美而人为添加了部分保水剂。保水剂的存在导致了废水中含有高浓度的磷,总磷浓度可达1 000 mg/L。保水剂主要成分为三聚磷酸盐,经过厌氧微

生物处理,聚合形式的磷酸盐可转化为正磷酸盐。本实验用水为经过厌氧处理后的废水,厌氧过程中水力停留时间为24 h,厌氧处理后原废水中大量的聚合形式磷酸盐已转化为正磷酸盐。厌氧处理后废水的各项指标表2所示。

表1 实验中所需要的主要药品

药品名称	制造厂商	化学试剂级别
聚合氯化铝(28%)	河南省郑州市巩义宝来水处理材料厂	AR
硫酸铝	天津博迪化工股份有限公司	AR
氧化镁	天津市大茂化学试剂厂	AR
氧化钙	天津市大茂化学试剂厂	AR
无水氯化镁	天津市光复精细化工研究所	AR
海泡石	河北石家庄雨馨建筑材料有限公司	AR
壳聚糖	天津博迪化工股份有限公司	AR
聚丙烯酰胺(PAM)	河南省郑州市巩义宝来水处理材料厂	AR

表2 厌氧处理后实验用废水的各项指标 mg/L

项目	浓度范围
TP	1000 ~ 1500
COD	430 ~ 700
总氮	800 ~ 1300
pH	7.2 ~ 7.4

2.3 实验分析方法

为了分别探索表1中每种药剂的最佳用量,共设置7组实验。每组实验分别取3个1 000 mL烧杯并加入500 mL废水,向其中投加5、15、25 g药剂,即设置3个浓度梯度,分别为10、30、50 g/L,快速搅拌(180 r/min)24 h后加入1 mL 1000 ppm的PAM助凝剂,慢速搅拌(80 r/min)30 min后静置,一段时间后测定废水的各项指标。本文实验中,使用六连电动搅拌机进行快速与慢速搅拌,对实验水质的检测项目与分析方法如表3所示。

表3 实验检测指标与分析方法

检测项目	分析方法
总磷(TP)	钼酸铵分光光度法(消解装置、T6可见分光光度计)
COD	重铬酸钾法(COD微波消解仪、酸式滴定管)
总氮	过硫酸钾氧化紫外分光光度法

2.4 XRD 表征

XRD(X-ray diffraction)即X射线衍射,通过对材料进行X射线衍射、分析其衍射图谱,可获得

材料的成分、材料内部原子或分子的结构或形态等^[17]。X 射线衍射线的出峰位置取决于所分析物质的内部结构,而对于不同的晶胞内原子的种类、数目及排列方式不同时,所衍射出来的强度也随之不同^[18]。根据衍射线的出峰位置及强弱,可对照标准图谱进行分析。本文利用 XRD 来分析絮凝后沉淀的主要成分,以进一步确认单一与混合絮凝药剂的絮凝除磷效果。

3 结果与讨论

3.1 单一絮凝剂对高浓度含磷废水中磷的去除效果

为寻找最佳的絮凝剂种类与投药剂量,实验过程中,7 种絮凝剂分别以 5、15、25 g 的药剂剂量加入到 500 mL 废水中,即浓度为 10、30、50 g/L。原废水中磷浓度为 1 000 mg/L 左右。絮凝后各药剂对废水中磷的去除率如图 1 所示。絮凝沉淀后,几种药剂均对废水中的磷有了不同程度的去除。从图 1 中可以看出,絮凝剂的投加量并不与磷的去除率呈正相关关系,过量的絮凝剂会影响絮体沉淀的形成,导致磷的去除率降低。硫酸铝、有机絮凝药剂壳聚糖以及具有强吸附性的海泡石对高浓度磷的去除并没有明显效果;氧化镁与氯化镁在调节不同 pH 的情况下并不能与废水中含有的较高浓度的 NH_4^+-N 、磷结晶成鸟粪石。经上述几种絮凝剂处理后,废水中磷的浓度依旧有 300 ~ 500 mg/L,远远没有达到污水的处理要求(排入后续生化处理设施,要求磷的浓度在 3 ~ 5 mg/L)。然而,氧化钙和聚合氯化铝对磷具有明显的去除效果。两种药剂添加到 30 g/L 的剂量时去除率已达到 98% 以上,过量添加絮凝剂对磷的去除并没有积极作用,反而造成沉淀效果下降、絮凝时间增长、絮凝后的上清液悬浮物增多。因此,针对药剂量的选择,30 g/L 的絮凝剂对于 1 000 mg/L 的磷已具有足够高的去除效果。

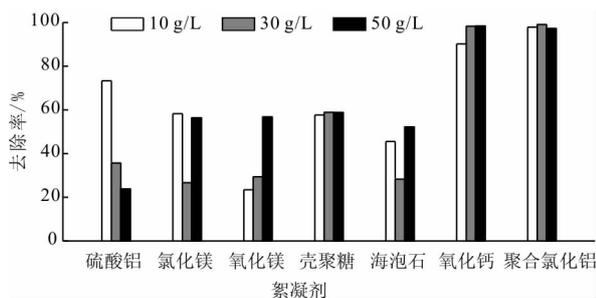


图 1 单一絮凝剂对废水中磷的去除率

经过筛选,30 g/L 的氧化钙和聚合氯化铝对 500 mL 废水中磷的去除效果明显。对比两种药剂

絮凝后的水质,加入氧化钙后絮凝上清液中悬浮物较多,水质较差;而聚合氯化铝处理后的水质几乎看不到悬浮物,水质非常澄清。因此,综合磷的去除率、去磷后的水质以及经济成本等因素,本实验认为聚合氯化铝作为单一絮凝剂是适合处理高浓度含磷废水的最佳药剂。

3.2 聚合氯化铝的最佳用量筛选

上述试验表明,相同剂量的几种实验絮凝剂中,以 30 g/L 的聚合氯化铝的絮凝除磷效果最好,去除率可达到 99.13%。然而,通过对絮凝剂的研究,过少或过多的絮凝剂对絮凝效果均有不良影响^[19-20]。30 g/L 的聚合氯化铝尽管絮凝效果已经很高,但 30 g/L 未必是最佳用量。因此,为寻找聚合氯化铝作为单一絮凝剂处理废水的最佳用量与最佳实验条件,实验中将 5、8、10、12、15 g 共 5 个梯度的聚合氯化铝分别加入到 500 mL 的高磷废水中,即浓度梯度为:10、16、20、24、30 g/L。在絮凝条件完全相同的情况下,依次测定 5 份废水絮凝后的磷含量,以探究聚合氯化铝的最佳用量。

图 2 为加入不同质量的聚合氯化铝絮凝后废水中磷浓度的变化与去除率。由图 2 可知,絮凝后 5 份废水中磷的浓度均有很大程度的降低。投加量为 10 g/L 时,磷的去除率为 97.87%,随着聚合氯化铝投加量的增加,去除率也在不断增加,在投加量为 20 g/L 时,去除率达到最大,为 99.27%。继续增加投加量,去除率不再增大甚至开始降低。因此,认为 20 g/L 的聚合氯化铝对于 1 000 mg/L 的高浓度含磷废水除磷效果最好,絮凝后废水中含磷量仅有 7.29 mg/L,过度添加药剂会造成絮凝效果变差、经济成本增高。

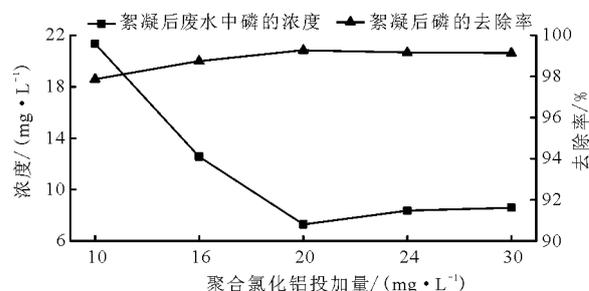


图 2 加入不同质量的聚合氯化铝絮凝后废水中磷浓度的变化与去除率

3.3 混合絮凝剂对高浓度含磷废水中磷的去除效果

在单独的海泡石处理含有 1000 mg/L 的高浓度含磷废水时,即使投加量达到 50 g/L,去除率也仅有 50%,完全达不到处理要求。在以往的研究中,已发

现海泡石的特殊晶体结构,可以搭载一些特殊材料对硝基酚、废水中的金属离子等具有较强的吸收作用^[21-22]。因此,考虑到海泡石超高的吸附能力,实验中设想海泡石可以作为一种助凝剂,与聚合氯化铝以一定的比例混合,可增强聚合氯化铝的絮凝效果。为探究海泡石对絮凝效果的影响以及聚合氯化铝与海泡石的最佳比例,在 500 mL 废水中,以聚合氯化铝的最佳投加量 10 g 为基础,设置聚合氯化铝与海泡石的质量比依次为 10:0、10:1、10:3、10:5、10:7、10:10 共 6 组实验,即在投加 20 g/L 的聚合氯化铝基础上继续加入海泡石,海泡石投加量依次为:0、2、6、10、14、20 g/L。在相同的絮凝条件下,依次测定絮凝后 500 mL 废水中磷的含量,同时测定絮凝后废水中 COD 与总氮的浓度,以确定絮凝剂是否会对 COD 和总氮的浓度造成影响。

图 3 为不同海泡石投加量的混合絮凝剂处理后废水中磷浓度的变化与去除率。由图 3 可知,添加海泡石后,絮凝效果有了一定程度的升高。单独的 20 g/L 聚合氯化铝絮凝后,废水中磷的含量为 7.29 mg/L。在此基础上依次投加了 2、6、10、14、20 g/L 的海泡石,随着海泡石含量的增加,磷的去除率逐渐增大,添加 6 g/L 海泡石的烧杯中磷的浓度最低为 3.21 mg/L。继续添加海泡石,磷的去除率反而慢慢减小。因此,过量投加海泡石对磷的去除并没有积极作用,并且造成成本增加。最终认为聚合氯化铝与海泡石按质量比 $m_{\text{聚合氯化铝}}:m_{\text{海泡石}}=10:3$ 投加时磷的去除效果最好。

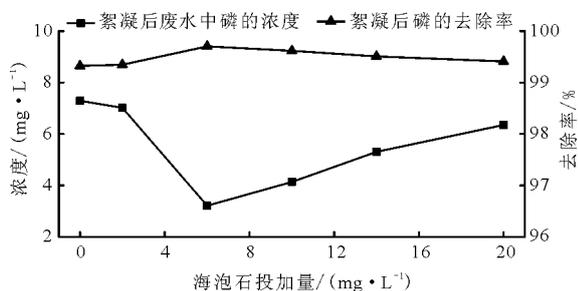


图 3 不同海泡石投加量的混合絮凝剂处理后废水中磷浓度的变化与去除率

图 4 为聚合氯化铝与海泡石不同比例的混合絮凝剂处理后废水中总氮与 COD 浓度的变化。本次实验所用废水(原水)中 COD 浓度为 430~440 mg/L、总氮浓度为 820 mg/L 左右。添加不同比例的混合絮凝剂除磷后,分别测定了几次絮凝后废水中的 COD 与总氮的浓度,并与絮凝前废水中二者的浓度进行对比。结果显示,絮凝后,废水中 COD

与总氮的浓度均没有明显变化。说明添加絮凝剂并没有对废水中的 COD 与总氮浓度产生影响。

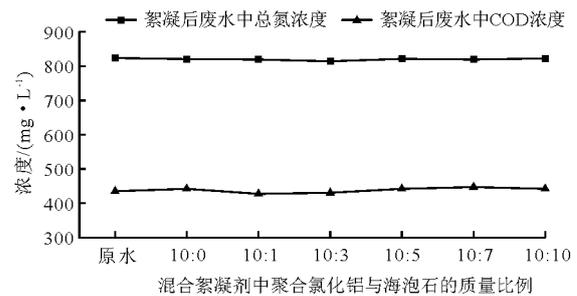


图 4 不同比例的混合絮凝剂处理后废水中总氮与 COD 浓度的变化

为了证明海泡石的存在促进了絮凝沉淀的形成,实验中分别对絮凝前的药剂与絮凝后的沉淀进行了 XRD 分析。图 5 为单一的聚合氯化铝絮凝剂以及混合絮凝剂($m_{\text{聚合氯化铝}}:m_{\text{海泡石}}=10:3$)絮凝前后的 XRD 衍射图,横坐标为 X 射线入射角度 θ 的两倍,纵坐标为衍射后的强度。其中图 5(a) 的衍射峰 I 为絮凝前的聚合氯化铝,图 5(b) 的衍射峰 II 则为聚合氯化铝絮凝后形成的沉淀,与标准谱图进行比对,基本可以得出单独的聚合氯化铝絮凝除磷后出峰物质是 $\text{Al}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$ 。混合絮凝剂絮凝前后的出峰对比如图 5(c) 与图 5(d) 所示,其中 III 为海絮凝前的 XRD 谱图,IV 为絮凝后形成沉淀的衍射峰,与标准谱图对比沉淀后得到的物质为 $\text{CaAl}_3(\text{PO}_3\text{OH})\text{SiO}_3$ 。因此,添加海泡石后的混合絮凝剂,无论是从絮凝后废水中磷浓度的进一步降低,还是从 XRD 分析后出峰物质的测定,均说明了海泡石中含有的 CaO 与 SiO_2 成分在絮凝沉淀时发挥了一定的效果,对聚合氯化铝的絮凝除磷起到了助凝剂的作用。

经过上述实验,基本可以确定质量比为 $m_{\text{聚合氯化铝}}:m_{\text{海泡石}}=10:3$ 混合絮凝剂,即在 1 000 mg/L 的高磷废水中加入 20 g/L 的聚合氯化铝、6 g/L 的海泡石除磷效果最好。在此药剂量的基础上,根据海泡石的相关研究,絮凝时间设置为 24 h 时效果较好^[23]。然而,在絮凝过程中,过长时间的搅拌会对絮体的产生造成不良影响,也会造成经济成本的浪费。因此,在确定最佳絮凝药剂的种类与投加量后,还需确定最佳的絮凝反应时间。因此,本实验中,针对快速搅拌阶段的搅拌时间,分别设置了 0.5、1、2、4、6、8、10、12 h 共 8 组对照实验,其余的反应条件包括快速搅拌转速、慢速搅拌转速、慢速搅拌时间等均保持不变,实验结束后分别测定几组絮凝后废水中磷的浓度。

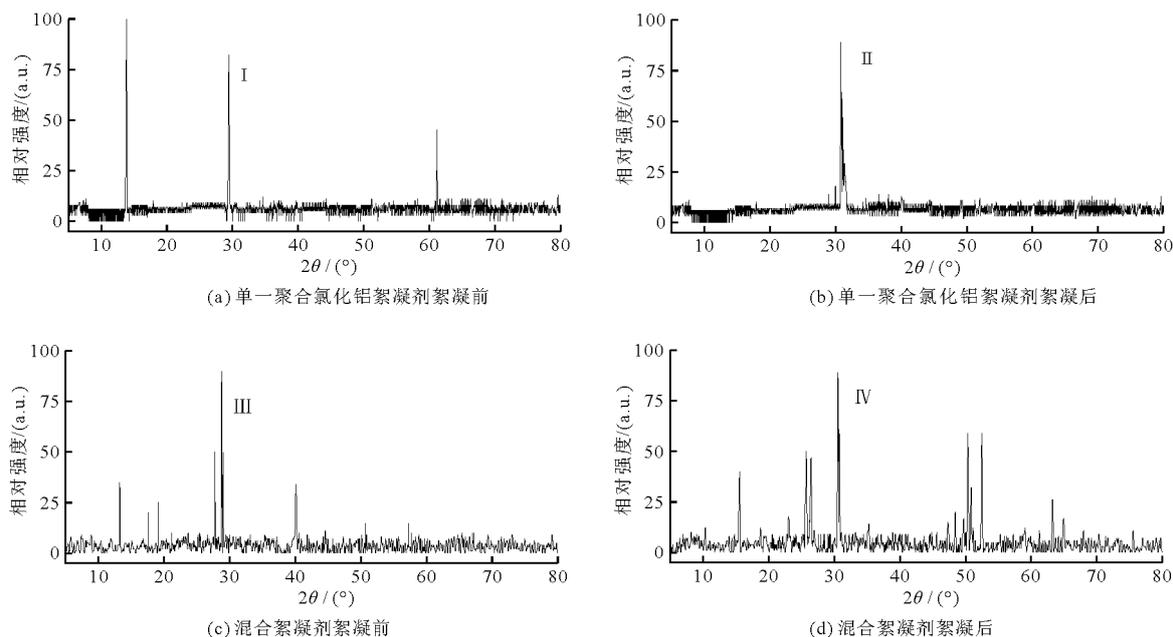


图 5 单一絮凝剂与混合絮凝剂絮凝前后的 XRD 对比

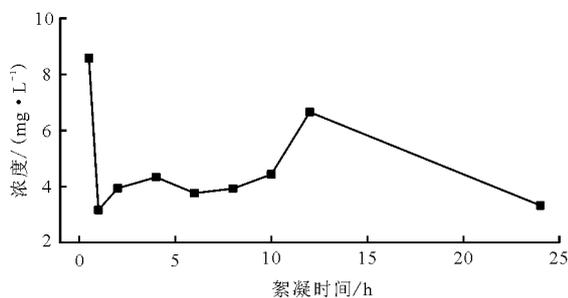


图 6 不同的絮凝时间下废水中磷浓度的变化

如图 6 所示,当絮凝时间仅为 0.5 h 时,废水中的磷的浓度已经大幅度降低,仅剩 8.57 mg/L。说明针对以聚合氯化铝为主要成分的混合絮凝药剂,快速搅拌 0.5 h 即可将磷去除 99.14%。随着絮凝时间的延长,废水中磷的浓度有着不同程度的波动,虽然去除率均在 99% 以上,但搅拌时间在 1 h 时磷的去除效果最好,处理后的废水中磷浓度仅剩 3.16 mg/L。再增加絮凝搅拌时间,反而造成磷的去除率降低、经济成本增加。因此,认为快速搅拌(180 r/min)时间 1 h 为最佳的絮凝时间。

4 结 论

本研究利用化学絮凝的方法,对磷浓度高达 1 000 mg/L 的海产品加工车间厌氧处理后高浓度含磷废水进行了高效除磷研究。实验中共对比了 7 种不同絮凝药剂的絮凝除磷效果,即:硫酸铝、氯化镁、氧化镁、壳聚糖、氧化钙、聚合氯化铝 6 种常规絮凝药剂以及一种具有特殊晶体结构、具有超强吸附

性的海泡石。实验中对单一絮凝药剂与混合絮凝药剂的除磷效果分别进行了分析。实验结果表明:

(1)单一絮凝药剂的除磷效果:在快速搅拌(180 r/min)24 h 后,加入 1 ml PAM 助凝剂再慢速搅拌(80 r/min)的絮凝条件下,上述 7 种絮凝药剂对于海产品加工车间厌氧处理后废水中的高浓度磷均有不同程度的去除,综合考虑磷的去除率、絮凝后的水质以及经济成本等问题,认为聚合氯化铝是处理高浓度含磷废水的最佳药剂,最佳投药量为 20 g/L,出水中磷的浓度为 7.29 mg/L,磷的去除率为 99.27%。

(2)混合絮凝药剂的除磷效果:拥有特殊晶体结构的海泡石所含有的 SiO_2 成分虽导致了其具有超强的吸附性,但单独的海泡石并不能高效地处理海产品加工车间厌氧处理后高浓度含磷废水,去除率仅有 50%。但海泡石可作为助凝剂进一步提高聚合氯化铝的除磷效率,最佳比例为 $m_{\text{聚合氯化铝}} : m_{\text{海泡石}} = 10 : 3$,出水中磷的浓度为 3.21 mg/L,磷的去除率为 99.68%。

(3)针对本次含磷浓度 1 000 mg/L 的海产品加工车间厌氧处理后废水,混合絮凝药剂的最佳投药量为:聚合氯化铝 20 g/L、海泡石 6 g/L;最佳絮凝条件为:快速搅拌(180 r/min)1 h 后,加入 1 ml PAM 助凝剂再慢速搅拌(80 r/min)30 min。

参考文献:

[1] 张亚军,陈丽丽,楼亚男,等.膜生物反应器在海产品加工废水处理中的应用[J].中国建设信息(水工业市

- 场), 2008(11):15-17.
- [2] 方志民, 杨莲芬, 金大勇. 海产品加工废水蛋白质回收的研究[J]. 浙江工业大学学报, 2008,36(2):133-135.
- [3] 裘巧俊, 尹炜, 吕谋, 等. SBR法处理高盐度海产品加工废水[J]. 环境工程, 2006,24(2):79-81+6.
- [4] 高瑞昌. 鳙鱼中多聚磷酸盐水解机理及无磷保水剂的研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2007.
- [5] 郑敏, 张代均. 废水化学法脱氮和化学法除磷的研究[J]. 科技情报开发与经济, 2006,16(1):154-156.
- [6] 张鹏飞, 岳焯, 侯嫫, 等. 人工湖水体富营养化的活性炭处理技术及生态修复建议[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(2):92-98.
- [7] 孙梦, 张培玉, 张晨. 城市污水的除磷技术分析[J]. 水处理技术, 2010,36(8):16-20.
- [8] 高伟胜. 化学沉淀法处理高浓度含磷废水[J]. 工业用水与废水, 2012,43(4):24-26.
- [9] 周斌, 王桂玉, 占国将. 化学药剂除磷试验初探[J]. 净水技术, 2015,34(1):25-28.
- [10] 苗庆显, 高立芹, 秦梦华. 水处理有机絮凝剂的研究进展[J]. 工业水处理, 2006,26(10):14-17.
- [11] 张永超, 冯喆. 有机絮凝剂的机理及进展[J]. 塑料制造, 2010(9):79-80+85.
- [12] 师雯洁, 程文, 任立志, 等. 地铁施工废弃泥浆处理试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(1):141-145.
- [13] 梁凯. 海泡石的矿物学研究与其在环境治理中的应用[D]. 长沙:中南大学, 2008.
- [14] 游俊仁, 林木兰, 汪惠阳. 高浓度含磷废水处理方法综述[J]. 化学工程与装备, 2010(8):143-146.
- [15] 王明丽. 壳聚糖改性膜制备及其对海产品加工废水处理研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2008.
- [16] 吴春笃, 侯纯莉, 杨峰, 等. 海泡石、膨润土改性壳聚糖对景观水絮凝效果的研究[J]. 生态环境, 2008,17(1):50-54.
- [17] 徐玉林, 徐明波, 杨水金. XRD在无机合成中物相分析的应用[J]. 湖北师范学院学报(自然科学版), 2013,33(4):40-46+62.
- [18] HUANG Xuejiao, FENG Mi, NI Chengsheng, et al. Enhancement of nitrogen and phosphorus removal in landscape water using polymeric ferric sulfate as well as the synergistic effect of four kinds of natural rocks as promoter [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,25(13):12859-12867.
- [19] 章文琴, 李晔, 李柏林, 等. 矿渣制备的无机复合絮凝剂在城市污水深度除磷中的应用[J]. 环境工程学报, 2014,8(9):3567-3571.
- [20] 江晖, 曾庆文, 罗正维, 等. 沼液预处理最优混凝搅拌条件的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014,25(3):147-151.
- [21] VAHEDI A, RAHMANI M, RAHMANI Z, et al. Application of polymer-sepiolite composites for adsorption of Cu(II) and Ni(II) from aqueous solution: equilibrium and kinetic studies[J]. E-POLYMERS, 2018,18(3):217-228.
- [22] SONG W, ZHANG L, XU X, et al. Straw fiber composite adsorbent material for treating heavy metal-contaminated wastewater or dye wastewater, comprises straw, acrylic emulsion, nano calcium carbonate, polyethylene glycol, sepiolite powder, sodium silicate solution [Z]. CN107913681-A, 2018-4-17.
- [23] YIN Hongbin, YUN Ye, ZHANG Yinlong, et al. Phosphate removal from wastewaters by a naturally occurring, calcium-rich sepiolite[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,198:362-369.