

合成氨废水资源化处理技术研究进展

曾庆玲, 李咏梅*, 顾国维, 董秉直

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 100092)

摘要: 合成氨废水具有高氨氮的特点, 高氨氮污水的治理是大家关注的焦点。文章介绍处理高氨氮废水的三种资源化回收技术, (1)以氨水形式回收氨氮的废水处理技术, (2)将氨氮制成硫酸铵回收利用的废水治理技术, (3)既能高效脱氮又能充分回收氨氮的磷酸铵镁(俗称鸟粪石)结晶沉淀法, 其中重点介绍鸟粪石结晶沉淀法回收氨氮技术。这些废水处理技术有效地治理了高氨氮废水, 具有节能减耗、无二次污染和污染物可得到充分回收利用等特点, 是处理高浓度氨氮废水的可持续发展方向。

关键词: 氨氮; 氨水; 硫酸铵; 磷酸铵镁

中图分类号: X703 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2010.02.023 文章编号: 1003-6504(2010)02-0095-04

Resources Reuse Approaches to Synthetic Ammonia Wastewater Treatment

ZHENG Qing-ling, LI Yong-mei*, GU Guo-wei, DONG Bing-zhi

(State Key Lab of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 100092, China)

Abstract: Current development of technologies for treating synthetic ammonia wastewater is reviewed with particular concerns in resource reuse from the wastewater. Three approaches are described, including ammonia-nitrogen recovered as aqueous ammonia from the wastewater, ammonia-nitrogen converted into $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and high efficiency both in de-nitrification and ammonia-nitrogen recovery through struvite precipitation. Method of struvite precipitation is intensively recounted regarding precipitant selection, dosing and the chemical reaction that leads to the precipitation which could be used in many fields.

Key words: ammonia-nitrogen; aqueous ammonia; ammonium sulfate; magnesium ammonia phosphate (MAP); struvite

以生产合成氨、尿素、纯碱复合肥等产品为主的企业所排放的废水往往具有低碳高氨氮的特点, 其氨氮浓度往往上千, 处理一直是个难题, 如果直接排入混合污水处理厂, 则会引起较大的氨氮冲击负荷, 因此需预先在厂内进行处理。

目前, 含氨氮废水的处理技术, 有空气蒸汽气提法、吹脱法、离子交换法、生物合成硝化法、化学沉淀法等, 但均有不足之处, 如气提法能耗高、容易结垢, 并且必须进行后处理, 否则会产生二次污染。用吹脱法处理高氨氮废水, 其能量消耗高, 产生大气污染; 吹脱法需要在 pH 高于的条件下才能实现, 用石灰调整 pH 值会使吹脱塔结垢, 因此吹脱法的应用受到限制; 吹脱效果还受到水温的影响; 另外, 由于吹脱塔的投资很高, 维护不方便, 国外一些吹脱塔基本上都

已停运行。吸附法受平衡过程控制, 不可能除去废水中少量的氨氮, 离子交换法树脂用量较大, 再生频繁, 废水需预处理除去悬浮物。生物硝化反硝化法是现阶段较为经济有效的方法, 工艺较为成熟, 并已进入工业应用领域, 但该法的缺点是温度及废水中的某些组分较易干扰进程, 且占地面积大、反应速度慢、污泥驯化时间长, 对高浓度氨氮废水的处理效果不够理想; 常规的化学沉淀法采用铁盐、铝盐、石灰法, 将产生大量的污泥, 这些污泥的浓缩脱水性能较差, 给整个工艺增加困难。上述方法的共同不足之处是处理后的氨氮无法回收利用。

基于可持续发展观念, 在高浓度氨氮废水处理方面, 不仅要追求高效脱氮的环境治理目标, 还要追求节能减耗、避免二次污染、充分回收有价值的氨资

收稿日期: 2008-11-01; 修回: 2008-12-27

基金项目: 国家“十一五”水专项(2008ZX07316-003); 中国博士后科学基金资助(20080440653)

作者简介: 曾庆玲(1975-), 女, 博士后, 研究方向为污水处理与资源化, (电话)021-65982693 (电子信箱)zerozql@163.com; * 通讯作者, (电话)021-65982693 (电子信箱)liyongmei@tongji.edu.cn。

源等更高层次的环境经济效益目标,才是治理高浓度氨氮废水的比较理想的技术发展方向^[1]。本文介绍三种高氨氮废水的资源化处理技术。

1 以氨水形式回收氨氮的废水处理技术

去除氨氮的同时可获得浓氨水的氨氮回收技术,不仅可经济有效地分离与回收氨氮,而且能使处理后废水达标排放。杨晓奕等^[2]通过电渗析法处理高浓度氨氮废水,氨氮浓度 2000~3000mg/L,氨氮去除率可达 87.5%,同时可获得 89% 的浓氨水;电渗析法处理氨氮废水的原理是,电渗析器由极板、离子交换膜和隔板组成。当含氨氮废水通入时,在直流电场作用下,产生 NH_4^+ 和 OH^- 的定位迁移。离子迁移结果使废水得到净化,氨水得到浓缩。此法工艺流程简单、处理废水不受 pH 与温度的限制、操作简便、投资省、回收率高、不消耗药剂、运行过程中消耗的电量与废水中氨氮浓度成正比。以氨水形式回收氨氮的污水处理技术,可使氨氮得到充分的回收利用,发挥良好的经济效益。

采用离子膜电解法对高浓度氨氮废水进行脱氮预处理是可行的,其处理原理是:离子膜电解技术在直流电场作用下,以电位差为推动力,利用离子交换膜的选择透过性,有选择地使部分离子通过离子交换膜,进而与原溶液分离。张梅玲等^[3]将一定量氨氮废水过滤澄清作为阳极区电解液,NaOH 溶液作为阴极区支持电解质,在直流电场作用下, NH_4^+ 、 H^+ 等能通过阳离子交换膜,由阳室向阴室迁移,与阴室的 OH^- 结合,分别生成 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和水;同时,在两个电极上发生电化学反应,阳极生成 H^+ 以补充阳室迁移出去的阳离子,阴极生成 OH^- 以补充阴室由于与阳室迁移来的 NH_4^+ 等结合所消耗的 OH^- 。对于氨氮浓度高达 7500mg/L 的废水,在 4V、11L/h、60℃ 的操作条件下,电解 1.5h 平均去除率可稳定在 58.1% 左右,3h 去除率接近 63.8%,脱除的氨氮可以以浓氨水形式回收,降低处理成本,实现了废物资源化利用。

2 将氨氮制成硫酸铵回收利用的废水治理技术

将氨氮制成硫酸铵回收利用的废水治理技术,是向富含氨氮的废水中加入碱液,使废水中的氨以游离态的氨存在,然后采用硫酸吸收氨,以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的形式回收氨氮。

采用空气吹脱加硫酸吸收的闭气氨氮汽提系统是将废水中的氨氮去除,并将氨氮制成硫酸铵回收利用的废水治理技术^[4]。此法不但有效地治理了高氨氮废水,还将氨氮回收利用。硫酸吸收系统主要由汽提

塔、洗涤塔、风机及相关附属设备组成。其工作原理是:向富含氨氮的废水中加入碱液将废水 pH 值调为 12,加热到一定的温度后, NH_4^+ 由废水中释放出来,与废水一起由汽提塔顶进入塔内,可循环使用的净化空气由风机推动从汽提塔下部进入塔内,在汽提塔内形成逆向对流,气、液相在塔内填料层发生传质,废水中的氨氮被从塔底进入的净化空气所吹脱,并随空气携带着从汽提塔顶排出,进入洗涤塔,使到达汽提塔塔底的废水中氨氮含量大为减少,达到污水排放条件。废水中氨氮浓度为 5000~8500mg/L,用闭式硫酸吸收法处理后,废水中氨氮脱出率约为 99%,排入水沟与不含氨氮的污水混合,进一步降低污水中的氨氮含量,送往污水处理厂进一步处理,有效地解决了原污水排放不合格的问题,极大地缓解了污水处理场的压力。闭式硫酸吸收法处理技术的使用,也减少了氨气的外泄,改善了现场环境,同时得到硫酸铵溶液可回用利用。

聚丙烯(PP)中空纤维膜法处理高浓度氨氮废水,也可将氨氮制成硫酸铵回收利用^[5]。疏水微孔膜把含氨氮废水和 H_2SO_4 吸收液分隔于膜两侧,通过调节 pH 值,使废水中离子态的 NH_4^+ 转变为分子态的挥发性 NH_3 。聚丙烯塑料在拉丝过程中,将抽出的中空纤维膜拉出许多小孔,气体可以从孔中溢出,而水不能通过。当废水从中空膜内侧通过时,氨分子从膜壁中透出,被壁外的稀 H_2SO_4 吸收,而废水中的氨氮得以去除,同时氨以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的形式回收。聚丙烯中空纤维膜法脱氮技术先进,二级脱除率 $\geq 99.4\%$,适用于处理高浓度氨氮废水,处理后废水能够达标排放。采用酸吸收的方法,可以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的形式回收氨氮,且不产生二次污染。膜法脱氮工艺设备简单,能耗低,占地面积小,操作方便。

3 鸟粪石结晶沉淀法回收氨氮技术

磷酸铵镁($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)俗称鸟粪石,英文名称 struvite (magnesium ammonium phosphate),简称 MAP,白色粉末无机晶体矿物,相对密度 1.71。MAP 是一种高效的缓释肥料,在沉淀过程中不吸收重金属和有机物。此外,它可用作饲料添加剂、化学试剂、结构制品阻燃剂等。

磷酸铵镁沉淀法,又称化学沉淀法、MAP 法,国外于 20 世纪 60 年代开始研究,至 20 世纪 90 年代便作为一种新的废水脱氮工艺而迅速兴起,进入了一个崭新的应用阶段^[1]。MAP 法脱除废水中氨氮的基本原理就是通过向废水中投加镁盐和磷酸盐,使 Mg^{2+} 、 PO_4^{3-} (或 HPO_4^{2-})与废水中的 NH_4^+ 发生化学反应,生成

复盐($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)沉淀,从而将 NH_4^+ 脱除。该方法的特点是可以处理各种浓度的氨氮废水,在高效脱氮的同时能充分回收氨,所得到的沉淀物 MgNH_4PO_4 可作为复合肥料,因此该法具有较高的经济价值。

关于鸟粪石结晶沉淀法处理氨氮废水的应用研究,很多研究者研究了影响鸟粪石形成的因素,主要有反应时间、pH值、沉淀剂投加摩尔配比、不同沉淀剂的选择等影响因素^[6-8]。

3.1 反应时间

研究表明^[9],鸟粪石结晶法反应时间对氨氮的去除率影响很小,因此鸟粪石结晶沉淀法的反应时间主要取决于鸟粪石晶体的成核速率和成长速率。应用MAP法处理氨氮废水时,使用适宜的搅拌速度和控制适当的反应时间,能使药剂充分作用,使MAP反应充分进行,有利于MAP的结晶作用和晶体的发育与沉淀析出。但反应时间不宜过长,否则会破坏鸟粪石的结晶沉淀体系,降低结晶沉淀性能。另外,反应时间越长,所需的动力消耗越多,处理费用越高,会影响MAP法的经济效益,搅拌速度过大,形成的絮凝体会再次被打散,反而影响了混凝沉淀的效果。显然,MAP法的反应时间需要结合被处理氨氮废水的水质特征,所用药剂种类、处理工艺等具体确定,一般都在1h以内。

实际应用中,由于废水含有各种颗粒物,成核过程所需的过饱和度较均相低,成核晶核数难以准确控制,形成大量细小的鸟粪石颗粒,难以回收,故结晶沉淀应在生长阶段加强控制,可在不饱和阶段添加适宜的晶种,从而培养出粒径分布均匀、品质较好的鸟粪石结晶体。

3.2 pH值

氨氮废水的pH值对MAP法去除氨氮的效果影响很大^[10]。pH条件,决定了组成鸟粪石的各种离子在水中达到平衡时的存在形态和活度。而只有当鸟粪石沉淀所需的各种离子的活度积超过相应的溶度积,沉淀才能发生。

在一定范围内,鸟粪石在水中的溶解度随着pH的升高而降低;但当pH升高到一定值时,鸟粪石的溶解度会随pH的升高而增大。当 $\text{pH} < 7$ 时,溶液中 PO_4^{3-} 离子浓度低,不利于生成鸟粪石沉淀反应的进行;当pH值8.0~9.5时,沉淀为鸟粪石;当pH值9.5~11时,氨氮会有一部分转化成气态氨挥发,此时沉淀为鸟粪石和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$;当pH值 > 11 时,沉淀为鸟粪石和 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$;当pH值为12时,沉淀为 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 。综合文献得知,鸟粪石沉淀法回收氨氮的最优pH范围为8~10之间,不同的研究得出的结论有所差别^[11]。

3.3 沉淀剂投加的摩尔配比

鸟粪石结晶沉淀法去除氨氮,对于沉淀剂投加的摩尔配比,研究者主要研究了氮、镁和磷的不同摩尔比对氨氮去除的影响以及鸟粪石的生成情况。要生成磷酸铵镁($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)沉淀,沉淀剂投加的摩尔配比 $n(\text{Mg}^{2+}) : n(\text{NH}_4^+) : n(\text{PO}_4^{3-})$ 理论比应为1:1:1。根据同离子效应,增大 Mg^{2+} 、 PO_4^{3-} 的配比,可促进反应的进行,从而提高氨氮的去除率与去除速率。虽然投加过量的镁盐和磷酸盐可提高氨氮的去除率,但过量到一定程度后,处理成本不经济,而且增加了水中磷的含量,由于磷本身也是污水处理的控制指标,添加过量会造成二次污染。通常在降低磷酸盐投加比例的同时,适当增加镁盐的投加量,可提高氨氮去除率^[9]。穆大刚等^[12]以 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 为化学沉淀剂处理高浓度氨氮废水(9500mg/L),确定的最佳工艺条件为 $n(\text{Mg}^{2+}) : n(\text{NH}_4^+) : n(\text{PO}_4^{3-}) = 1.25 : 1 : 1$,氨氮去除率 $> 95\%$ 。总的来说,适当增大 Mg^{2+} 、 PO_4^{3-} 的配比,可提高氨氮的去除率,但药剂最佳投配比受多方面因素的影响,应综合考虑各因素确定沉淀比的最佳配比。

3.4 沉淀剂的选择

MAP法可选用多种含 Mg^{2+} 的镁盐和含 PO_4^{3-} 的磷酸盐作为化学沉淀药剂^[11]。例如,可作为镁盐药剂的有 MgO 、 MgCl_2 、 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 MgSO_4 、 MgCO_3 等,也可用卤水代替镁盐;作为磷酸盐药剂的有 H_3PO_4 、 Na_2HPO_4 、 NaH_2PO_4 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 等。但是,不同药剂对氨氮废水的处理效果与处理成本有明显的差异,氨氮去除率可在54.4%~98.2%之间波动,普遍认为以磷酸氢二钠和氯化镁为沉淀剂对高氨氮废水处理效果较好,氨氮的去除率 $> 90\%$ ^[13],镁盐的成本是处理的主要成本之一,使用不同的镁盐其成本占总处理成本的4.4%~40.2%之间,使用 MgCO_3 比使用 MgCl_2 成本低18.3%^[14],磷酸盐较贵,寻找更为廉价高效的磷酸盐可大幅度降低废水处理成本。

赵婷等^[15]在对MAP的特性进行分析的基础上,提出了用 MgHPO_4 (MHP)吸收氨氮,将吸收氨氮后的产物MAP进行热分解使 MgHPO_4 再生的氨氮废水处理新方法。研究以 NH_4Cl 溶液为模拟氨氮废水,主要探索pH、吸附剂用量及反应温度等各种条件对MHP的氨氮吸附性能的影响。研究结果表明,MHP吸附氨氮后处理了氨氮废水,吸附氨氮后生成的MAP经热分解,放出氨与水的混合蒸汽,可以回收高浓度的氨水,此法还可以使MAP转化为MHP循环利用,不需要投加大量的镁盐和磷盐,该方法与生化法等方法相比,具有能把废水中的氨氮以高浓度的氨

水回收,实现了资源的有效利用的特点;吸附剂 MgHPO_4 再生容易,无再生液处理问题的特点;且处理工艺简单,处理速度快。因此,该工艺是一种经济有效的氨氮废水处理方法。

鸟粪石沉淀法脱氮技术,在国内外已应用于多种高浓度氨氮废水的研究,并取得了良好的脱氮效果,可以实现氨氮的再利用^[16],解决了氮的回收和氮的二次污染问题,为后续的生化处理创造了条件。但鸟粪石工艺产业化的主要问题是运行成本高、回收鸟粪石纯度低、对鸟粪石在农业上实用的研究少。在今后的实际应用中,该方法主要有以下趋势:(1)由于该方法生成的磷酸铵镁颗粒细小或是絮状体,固液分离有一定的困难,因此在一定程度上限制了该方法的应用。今后的研究趋势在于鸟粪石结晶反应的动力学、结晶粒度分析、结晶体质量改善等方面的研究。(2)寻找最佳反应条件,确定废水中 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 离子的最佳比例,以实现最大氨氮去除率。(3)找寻价廉高效的沉淀药剂,提高鸟粪石回收氨氮的效率,降低处理成本,是研究的热点之一。鸟粪石工艺运行成本高的一个原因在于需要投加镁源,若能在我国污水厂实际运行中将海水、盐卤水或镁矿工业副产品作为镁源,必将大大降低运行成本。(4)有机物及其他杂质对鸟粪石脱氮过程的影响机理研究。(5)化学法和其他废水处理方法,如吹脱法、生物法联合使用机理研究,以实现处理成本的降低。(6)鸟粪石结晶装置的研究。(7)鸟粪石去除氨氮的经济效益产出途径;广泛开拓 MAP 的用途,使回收的 MAP 不仅能补偿药剂费用还能产生一定的经济效益,则 MAP 法的技术优势将更加完美。如果在以上方面取得突破,鸟粪石沉淀法脱氮除磷技术将得到大规模的推广使用,可能是未来高浓度氨氮废水处理的发展方向 and 优先选择。

4 结语

合成氨工业经过几十年来的不断技术革新改造,污水治理工作取得了一定的成果,但是由于各企业产品结构、工艺路线与管理水平不尽相同,部分企业外排水中 COD、氨氮、硫化物等污染物质仍存在超标现象,水污染问题一直未得到有效的控制。经济有效的氨氮废水资源化处理技术还需要更深入的研究,使废水中氮、磷等营养物质的回收与再生成为可能。资源化技术的开发研究将使新技术在社会效益、经济效益和生态效益之间找到平衡点,实现可持续发展。

【参考文献】

[1] 钟金松, 闵育顺, 肖贤明. 浅谈高浓度氨氮废水处理的可

持续发展方向[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 92-94, 147.

Zhong Jin-song, Min Yu-shun, Xiao Xian-ming. An overview on treatment of wastewater with high concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$ [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 92-94, 147. (in Chinese)

[2] 杨晓奕, 蒋展鹏, 潘咸峰. 膜法处理高浓度氨氮废水的研究[J]. 水处理技术, 2003, 29(2): 85-88.

Yang Xiao-yi, Jiang Zhan-peng, Pan Xian-feng. Separation of ammonia and water by membranes[J]. Technology of Water Treatment, 2003, 29(2): 85-88. (in Chinese)

[3] 张梅玲, 蔚东升, 顾国锋, 等. 离子膜电解除味精废水中氨氮的研究[J]. 膜科学与技术, 2007, 27(2): 61-65.

Zhang Mei-ling, Yu Dong-sheng, Gu Guo-feng, et al. Research on the removal of the ammonium-nitrogen from monosodium L-glutamate wastewater by ion exchange membrane electrolysis[J]. Membrane Science and Technology, 2007, 27(2): 61-65. (in Chinese)

[4] 郝大明, 谢进宁. 高氨氮污水处理技术的应用[J]. 石油化工安全环保技术, 2008, 24(3): 39-42.

Hao Da-ming, Xie Jin-ning. Application of high ammonia-nitrogen wastewater treatment technology[J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 2008, 24(3): 39-42. (in Chinese)

[5] 郝卓莉, 王爱军, 朱振中, 等. 膜吸收法处理焦化厂剩余氨水中氨氮及苯酚[J]. 水处理技术, 2006, 32(6): 16-20.

Hao Zuo-li, Wang Ai-jun, Zhu Zhen-zhong, et al. Treatment of ammonia and phenol in residual-ammonia wastewater from coking mill by membrane absorption process[J]. Technology of Water Treatment, 2006, 32(6): 16-20. (in Chinese)

[6] 汤琪, 罗固源, 季铁军, 等. 磷酸铵镁同时脱氮除磷技术研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 1-5.

Tang Qi, Luo Gu-yuan, Ji Tie-jun, et al. Simultaneous removal of nitrogen and phosphorus by magnesium ammonium phosphate process[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 1-5. (in Chinese)

[7] Ryu Hong-Duck, Kim Daekeun, Lee Sang-Il. Application of struvite precipitation in treating ammonium nitrogen from semiconductor wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 156(1-3): 163-169.

[8] Karthikeyan Obuli P, Joseph Kurian. Chemical precipitation of ammonia-N as struvite from landfill leachate effect of molar ratio upon recovery[J]. Journal of Solid Waste Technology and Management, 2008, 34(1): 20-26.

[9] 徐远, 蒋京东, 马三剑, 等. 鸟粪石结晶沉淀法处理氨氮废水的应用研究[J]. 污染防治技术, 2006, 19(6): 26-30, 57.

(下转第 111 页)

- Sweden: Swedish National Chemicals Inspectorate (KEMI), 1992.
- [37] Voul voulis N, Scrimshaw M D, Lester J N. Occurrence of four biocides utilized in antifouling paints, as alternatives to organotin compounds, in waters and sediments of a commercial estuary in the UK[J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40:938-946.
- [38] Evans D W, Laughlin R B. Accumulation of bis-tributyltin oxide by the mud crab[J]. Chemosphere, 1984, 13:213-219.
- [39] Uhler A D, Coogan T H, Davis K S, et al. Findings of tributyltin, dibutyltin and monobutyltin in bivalves from selected US coastal waters[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1989, 8:971-979.
- [40] Evans D W, Laughlin R B. Accumulation of bis-tributyltin oxide by the mud crab, *Rithropanopeus harrisi*[J]. Chemosphere, 1984; 13:213-219.
- [41] Uhler A D, Coogan T H, Davis K S, et al. Findings of tributyltin, dibutyltin and monobutyltin in bivalves from selected US coastal waters[J]. Environment Toxicology and Chemistry, 1989; 8:971-979.
- [42] Field experimental evaluation of secondary metabolites from marine invertebrates as antifoulants[J]. Brazilian Journal of Biology, 2002, 62(2):311-320.
- [43] Jacobson A H, Willingham G L. Sea-nine antifoulant: an environmentally acceptable alternative to organotin antifoulants[J]. Science of the Total Environment, 2000, 258: 103-110.
- [44] Fernandez-Alba A R, Hemado M D, Piedra L, et al. Toxicity evaluation of single and mixed antifouling biocides measured with acute toxicity bioassays[J]. Analytica Chimica Acta, 2002, 456:303-312.
- [45] KEMI. Antifouling Products: Pleasure Boats, Commercial Vessels, Nets, Fish Cages and Other Underwater Equipment[R]. Solna, Sweden: KEMI Report 2/93.Solna, 1993.
- ~~~~~
- (上接第 98 页)
- Xu Yuan, Jiang Jing-dong, Ma San-jian, et al. Advances in the application of struvite sediment to wastewater treatment [J]. Pollution Control Technology, 2006, 19 (6): 26-30, 57. (in Chinese)
- [10] Pastor L, Mangin D, Barat R, et al. A pilot-scale study of struvite precipitation in a stirred tank reactor: Conditions influencing the process[J]. Bioresource Technology, 2008, 99 (14): 6285-6291.
- [11] 陈启华, 罗冬浦, 梁江浩, 等. 磷酸铵镁法脱除废水中氨氮的技术现状[J]. 工业水处理, 2008, 28 (6): 5-8.
- Chen Qi-hua, Luo Dong-pu, Liang Jiang-hao, et al. Removal of ammonia nitrogen from wastewater by magnesium-ammonium-phosphate method: technique status[J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(6): 5-8. (in Chinese)
- [12] 穆大刚, 孟范平, 赵莹, 等. 化学沉淀法净化高浓度氨氮废水初步研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2004, 19(2): 1-5.
- Mu Da-gang, Meng Fan-ping, Zhao Ying, et al. A primary study on the purification of wastewater with ammonia nitrogen of high concentration by chemical precipitation[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2004, 19(2): 1-5 (in Chinese)
- [13] 崔志广, 孙体昌, 邹安华, 等. 用沉淀气浮法回收化肥厂 tributyltin, dibutyltin and monobutyltin in bivalves from selected US coastal waters[J]. Environment Toxicology and Chemistry, 1989:971-979.
- [14] Gunay Ahmet, Karadag Dogan, Tosun Ismail, et al. Use of magnesit as a magnesium source for ammonium removal from leachate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 156 (1-3): 619-623.
- [15] 赵婷, 周康根, 王昊, 等. 磷酸氢镁吸附法处理氨氮废水的工艺条件[J]. 水处理技术, 2008, 34(4): 69-72.
- Zhao Ting, Zhou Kang-gen, Wang Hao, et al. Study on optimal conditions of absorbing ammonia -nitrogen in wastewater with MHP[J]. Technology of Water Treatment, 2008, 34(4): 69-72. (in Chinese)
- [16] 高健磊, 闫怡新, 吴建平, 等. 化学沉淀法处理高浓度氨氮废水工艺条件研究 [J]. 环境科学与技术, 2008, 31(10): 114-117.
- Gao Jian-lei, Yan Yi-xin, Wu Jian-ping, et al. Technical conditions of chemical precipitation for treatment of high concentrated ammonia nitrogen wastewater[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(10): 114-117. (in Chinese)