

文章编号:1674-9669(2020)03-0099-06 DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2020.03.013

引文格式:雷晋洪,沈强华,蔡晨龙,等.工业氨氮废水的处理方法探讨[J].有色金属科学与工程,2020,11(3):99-104.

工业氨氮废水的处理方法探讨

雷晋洪, 沈强华, 蔡晨龙, 彭忠平, 张周

(昆明理工大学冶金与能源学院, 昆明 650093)

摘要:工业氨氮废水的大量排放,对自然环境和人体健康造成了严重的危害。因此,如何经济高效地处理工业氨氮废水以达到排放标准成为人们必须面对的重要问题。文章对工业氨氮废水的处理技术从典型和新型技术两个方面进行了总结和对比,为实际应用提供参考。其中,处理低浓度氨氮废水的方法有:吸附法、氯化法、生物法、膜分离、土地处理等;处理高浓度氨氮废水的方法有:吹脱法、化学沉淀法等;新型技术包括:微波法、超声波法、光催化技术、生物膜电极法等。

关键词:氨氮;废水处理;脱氮

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A

Analysis of the treatment of industrial ammonia nitrogen wastewater

LEI Jinqi, SHEN Qianghua, CAI Chenlong, PENG Zhongping, ZHANG Zhou

(College of Metallurgy and Energy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The massive discharge of industrial ammonia nitrogen wastewater has caused serious harm to the natural environment and human health. Therefore, how to treat industrial ammonia nitrogen wastewater economically and efficiently to meet the discharge standards has become an urgent issue that people must meet head-on. Typical technology and new technology for treating industrial ammonia nitrogen wastewater have been summarized and compared in this paper to provide a reference for its practical application. Among them, the methods for treating low-concentration ammonia nitrogen wastewater include: the adsorption method, chlorination method, biological method, membrane separation, land treatment, etc; the methods for treating high-concentration ammonia nitrogen wastewater include: the blowing off method, chemical precipitation method, etc; new technologies include: microwave method, ultrasonic method, photocatalysis technology, biofilm electrode method, etc.

Keywords: ammonia nitrogen; wastewater treatment; denitrification

改革开放发展至今,我国的工业水平得到了极大的提升,逐渐形成了完备的工业体系,带动了冶金、石油、制药、化学、食品等领域规模的不断扩大,然而工业废水排放量与日俱增,带来的氨氮污染愈发严重,

总体上呈现污染源广泛化、氨氮浓度急剧上升的趋势,由于各个工业部门排放的氨氮废水浓度不一,大部分有机物含量低,废水性质日趋复杂,难以处理,已经引起了国内外的高度重视,对氨氮废水的控制也日

益严格。另外,过高浓度的氨氮废水排放到江河湖等水体中,使得水体富营养化,造成溶解氧浓度降低、透明度降低、水质恶化,原有的生态系统和功能被破坏,氨氮还会影响到农业、渔业等行业,进而对人体健康构成危害。随着我国将新发展理念、生态文明和建设美丽中国的要求写入宪法^[1],相应的对氨氮废水处理技术的要求也越来越高。

工业氨氮废水具有来源广、水质多变等特点^[2],典型的有化肥废水、味精废水、焦化废水、垃圾渗滤液、煤气废水、养殖废水等,水质特征总结如表 1 所列。

表 1 典型工业氨氮废水水质特征
Table 1 Water quality characteristics of typical industrial ammonia nitrogen wastewater

废水	氨氮/(mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)
化肥废水	400~700	400~600
味精废水	5 000~6 000	20 000~30 000
焦化废水	200~700	—
垃圾渗滤液	2 000	—
煤气废水	200~250	1 200~1 400
养殖废水	800~2 200	3 000~12 000

注:“—”表示未检测到。

通过比较发现,不同企业产生的废水中氨氮的含量差别很大,总体呈现出高氨氮高 COD、低氨氮低 COD、低氨氮高 COD 3 个特点。因此,虽然目前可用于氨氮废水脱氮处理的方法有很多,但受不同水质控制指标及需要达到的处理效果的要求,工业上处理不同类别废水过程中所采用的氨氮处理技术相差甚远。为了更好地降低水体中氨氮的影响,国内外科研工作者探索出了一些更为新型的技术,旨在找到一条更加经济可行的处理废水的方法。

1 低浓度工业氨氮废水的典型处理技术

长期以来,诸多企业在处理这类废水时多集中于降低 COD,往往未能加深对其氨氮的有效处理^[3],导致低浓度的氨氮被随意排放到自然环境中。对这类废水的处理,要综合考虑效率和成本,目前工业上常用的技术主要有吸附法、氯化法、生物法、膜分离、土地处理等。

1.1 吸附法

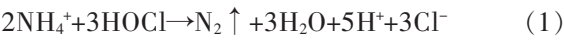
吸附法利用的是一些多孔性固体(沸石、活性炭、煤炭、离子交换树脂等)表面具有色散力,加之内部较大的静电力,可将废水中的氨氮牢牢地吸附在吸附剂的表面和空穴中,然后通过吸附剂的脱附及再生,将水中的含氮污染物去除或回收利用,从而使废水得到净化。在吸附过程中,吸附动力来自离子间的浓度差和吸附剂对离子的亲和力。

张敏等^[4]研究了沸石吸附微污染源中浓度为 1.5~6.5 mg/L 的 NH₃-N,去除率达 50 %以上。然而一般的吸附法 NH₃-N 去除率普遍偏低,近年来,有人通过对吸附剂进行改性,改善其表面结构,显著提高了吸附量,脱氮效果比一般吸附更好。吕亲尔^[5]使用经氯化钠溶液改性过的沸石对浓度为 30~60 mg/L 的低浓度氨氮废水进行吸附,NH₃-N 去除率达到了 95.9 %。

该法工艺简单、操作方便、反应快、节能高效,氨的回收利用率高,但由于吸附剂交换容量有限,解吸频繁,一般常与其他方法联合起来使用,或是作为深度处理技术的一部分。

1.2 氯化法

氯化法多应用于低浓度氨氮废水,比如自来水厂常用此法处理水体中的氨氮,还可起到消毒漂白的作用。原理是将氯气或次氯酸钠不断加入到氨氮废水中至饱和,氯气或次氯酸钠与水反应生成具有强氧化性的 HOCl,HOCl 会氧化氨使其转化为氮气进而挥发出来,反应过程可表示为^[6]:



黄海明等^[7]对有机物含量少、盐度高的稀土冶炼废水进行氯化处理,设置 pH =7, M[Cl]/M[NH₄⁺]=7:1,反应时间 15 min 的运行参数,分别对 30、50、100、150、200 mg/L 不同浓度的氨氮废水进行试验,经处理后出水残余 NH₃-N 浓度均低于 2 mg/L。马金保等^[8]采用该法处理四氧化三锰工业污水,正交试验表明,设置 pH=7、反应时间 10 min、次氯酸钠加入量为 1:800(体积比)的参数,分别对 NH₃-N 浓度为 38.6、35.7、37.2 mg/L 进行试验,去除率最高可达 98 %以上。

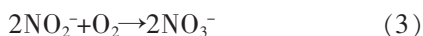
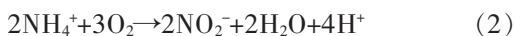
该法优点是脱氮效果稳定,有机物含量越少氨氮处理效率越高,同时不受水的温度和盐度干扰,但是氯化反应过程会产生氯胺等有害副产物,需要进一步的深度处理。

1.3 生物法

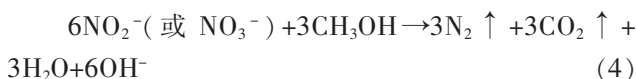
生物法对于处理可生化性高的废水(BOD/COD>0.3)效果较为理想,具有操作简单、效果稳定的特点。原理是在各种微生物自身的新陈代谢作用下,将废水

中的含氮化合物通过一系列生化反应转化为硝酸盐或亚硝酸盐,最后再还原为氮气。一般生物脱氮可分为硝化和反硝化 2 种。

生物硝化是菌类如硝酸盐菌在氧气量充足、pH 和水温适宜的环境中,吸入氨氮将之转化为硝酸盐氮或亚硝酸盐氮,涉及的主要反应有^[9]:



生物反硝化是指在缺氧条件下,反硝化菌通过消耗水中的有机物将硝酸盐氮和亚硝酸盐氮还原成氮气,主要反应有^[9]:



同样地,反硝化菌需要适宜的水温和 pH。可以看到,上述两种传统生物脱氮工艺的微生物和外界条件都有所不同,所以硝化与反硝化作用一般交替进行,不能同时发生。

张鹏娟^[9]以 A/O 生物脱氮工艺对总氮浓度为 93.73~117.6 mg/L 的废水进行处理,结果表明,相较于传统 A/O 工艺,在 A/O 系统中投加悬浮填料,并且完成挂膜后,NH₃-N 浓度降为 1.96 mg/L,NH₃-N 去除率提高到了 95%。Ruiz 等^[11]研究了合成废水的改性,提高了微生物还原亚硝酸盐的能力。

由于高浓度的氨氮对生物硝化过程有抑制作用,所以该法用于处理低浓度工业氨氮废水效果较好。总的来说,此法脱氮率一般可达 95%,还可以降低其他杂物含量,二次污染小,然而,采用该法运行成本很高,如占地面积大、合理控制温度,需要有较好的运行与管理条件。

1.4 膜分离法

利用选择透过性膜(天然膜或人工合成膜),依靠一定的外界条件提供动力进行氨氮脱除的方法称为膜分离,常用的做法有加压渗透和电渗析。杨晓奕等^[12]采用聚丙烯中空纤维膜分离法以及电渗析法处理 NH₃-N 含量为 7 011.5~7 106.3 mg/L 高浓度废水,出水 NH₃-N 浓度仅为 32.5~38.2 mg/L,去除率超过了 99.4%。曾次元等^[13]通过外加电场对城市污水进行渗析,NH₃-N 从 26.8 mg/L 下降到 6.1 mg/L,二沉池出水处理后 NH₃-N 浓度从 19.9 mg/L 降为 0.1 mg/L,出水质量达到了地表水环境质量标准。

膜分离技术稳定、耗能少、操作简单、处理效率高、无二次污染等优势,虽然此法可用来处理高、低浓度氨氮废水,但从成本角度考虑,此法用于低浓度氨氮废水较为经济合理。

1.5 土地处理

依靠土壤-微生物-植物构成的生态系统,土地

处理利用农作物吸收吸附和微生物脱氮、挥发作用实现对污水综合净化处理。罗鑫勋^[14]对 NH₃-N 浓度在 (40.18±10.04) mg/L 的废水进行了模块化填料的实验,出水浓度为 (17.05±1.90) mg/L,可以满足一级标准,而且去除效果保持稳定。

此法是近年来环境领域兴起的研究热点之一,具有低投资、低能耗、效果好等优点,但是污水土地处理系统占地面积大、易受温度季节变化影响,还需适当的设计和管理运行条件。

2 高浓度工业氨氮废水的典型处理技术

随着工业的快速发展,高浓度氨氮废水呈现污染源多且排放量大的特点^[15],处理起来十分困难,如何行之有效且经济地处理高浓度氨氮废水已成为环保工作者面临的难点。目前针对高浓度氨氮废水的处理,使用频次较多的方法主要有吹脱法、化学沉淀法等。

2.1 吹脱法

在强碱性条件下,废水中的氨氮将主要以游离氨的形式存在,若向废水持续曝气,使废水与空气充分接触,氨的气液平衡关系发生变化,具有挥发性的 NH₃ 会由液相向气相传质转移。吹脱法即是利用这一原理将氨氮从废水中去除。

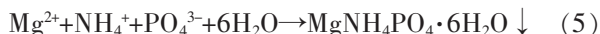
谢凤岩^[16]对 8 000~10 000 mg/L 的高浓度氨氮废水进行了大量的静态吹脱试验,吹脱率高达 99%。文艳^[17]用 Na₂CO₃ 作为助脱剂吹脱焦化废水,NH₃-N 去除率超过了 90%。崔鹏等^[18]对某煤化工企业高氨氮煤气废水的指标及处理工艺流程做了详细研究,并对处理后的出水水质进行分析后发现,300~500 mg/L 的氨氮废水经蒸汽吹脱处理后,废水中的 NH₃-N 含量降低到 100 mg/L 以下。

虽然空气吹脱技术简单、设备运行成本低,但易受外界影响,气温低时吹脱效率降低,需要多级串联操作,故而引入蒸汽进行吹脱,较之空气吹脱效率有所提高。另外,pH、水力负荷也会对去除率产生影响,填料结垢会干扰运行,且吹脱出的氨需进行回收处理,否则会对环境造成二次污染。

2.2 化学沉淀法

化学沉淀法常称为磷酸铵镁(MAP)沉淀法,在实际生产应用中,磷酸铵镁沉淀法广泛应用于处理高浓度氨氮含量的工业废水上。即向氨氮废水中投入一定量的镁试剂和磷酸试剂与之反应,会生成难溶于水的磷酸铵镁白色沉淀,经固液分离后可达到除去氨氮的

目的,反应如下^[19]:



梁建华等^[20]讨论了药剂配比、pH 值等因素对高浓度氨氮去除率的影响,确定了较优反应条件, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率高达 98%。林明^[21]采用了 MAP 沉淀法,通过不同镁磷摩尔比对高浓度氨氮废水中进行了大量试验,都取得了很好的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果。

化学沉淀法不受温度和其他毒素影响,具有处理效果好、装置简易等优点,不但显著降低氨氮浓度,相比其他方法,又可回收利用废水中的磷元素,产生的沉淀产物还可作为缓释肥^[22-23],因而具有很好环保意义和经济价值,缺点是沉淀剂的投加量较大,成本高,还需对废水的 pH 进行调整。

3 新型氨氮处理技术

3.1 微波法

微波处理氨氮废水利用的是微波的“内加热”以及“选择性”加热的特性,先将废水中的污染物吸附到具有吸附能力的吸波材料上,再将吸波材料置于微波辐射场中,吸附材料上的污染物进而脱除降解氨氮。

Chen 等^[24]进行了微波辅助活性炭脱除氨氮的试验研究,结果表明,微波辅助活性炭能有效地去除废水中的氨氮。訾培建^[25]的微波活性炭联合处理 100 mg/L 的氨氮废水的研究结果表明,单一微波情况下, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率为 82.7%,而微波活性炭联合法对氨氮废水的处理效果比单独微波法提高了约 10%。由于微波的内加热模式,大大加快了去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的速率,但是使用该法需要有专门的微波设备,处理量较小,适用于处理低浓度氨氮废水。

3.2 超声波法

超声波处理氨氮废水主要利用超声波的空化作用^[26],超声波能够在水体瞬间发出大量气泡,使污染物进入气泡内,在高温高压的作用下直接热解降解,加之超声波的机械效应能使吸附剂表面进行改性,也能提高其对氨氮的去除效果^[27]。

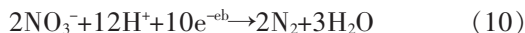
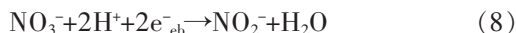
缪应菊等^[28]用超声波改性粉煤灰,然后用于去除 100 mg/L 的氨氮废水, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率达 81.9%,比改性前提高了约 34%。Li 等^[29]采用超声波来降解偶氮二甲酰胺废水中的有机物和氨氮,发现在超声波模式为 1:1 的条件下, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除的效果较好。曲珍杰^[30]用改性沸石处理 1 000 mg/L 的氨氮废水,对比了吸附过程是否加超声,发现在各种因素影响下,改性沸

石的变化趋势基本保持不变,但超声作用后,吸附效果更加显著。

此法能够极大地缩短反应时间,效果好,但与微波法一样具有局限性,作用范围小。

3.3 光催化技术

自 1972 年 Fujishima 等^[31]在《自然》杂志上发表了关于通过 TiO_2 光催化可以将 H_2O 分解为 H_2 和 O_2 的报道以来,人们不断加深对光催化技术的探究,如今该技术广泛应用于净化空气以及水处理。光催化是特定催化剂在光的作用下而激发的氧化还原反应。有学者指出, TiO_2 光催化降解过程中形成的自由基($\cdot\text{OH}$)和超氧离子($\cdot\text{O}_2^-$)具有很高的光催化能力,在处理氨氮废水的过程中可氧化 NH_4^+ 和还原 NO_3^- ,最终得到无害产物氮气和水^[32],但整个过程的具体反应机理还未彻底弄清,需要进一步研究。



张杨^[33]制备了 Ce^{3+} 和 Ag^+ 共掺杂的 TiO_2 粉末催化剂,考察并探讨了共掺杂各金属离子的浓度、反应液比例、制孔剂的种类及加入量、不同光源等不同因素对光催化效率的影响,结果表明,(0.1% Ce^{3+} +0.1% Ag^+)/ TiO_2 此型催化剂在光照 2 h 后,对 50 mg/L 的氨氮废水取得了去除 69.9%氨氮、去除 59.9%亚硝酸氮、总氮去除率达 64.9%的较优效果。曾鹏等^[34]在光催化处理技术小型试验取得了预期的工艺技术指标的基础上,联合云南大学工业废水光催化处理工程技术研究中心及浙江南化环保工程有限公司开发了错流式光催化处理有色金属氨氮废水装置,可将氨氮含量 400~800 mg/L 的废水处理成 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量 ≤ 20 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 脱除率高达 90%~99%,并且证明了该技术具有治污不产污的特点,还能改善一般低浓度氨氮废水脱除工艺能耗大、成本高的状况。

3.4 生物膜电极法

生物膜电极法是近年来发展起来的一项新型废水处理技术,在处理低浓度硝酸盐氮污染的地下水和饮用水等方面具有良好的效果。此法通过将一定微生物固定在电极表面形成一层生物膜,再在电极间通以一定强度的电流(在微生物耐受范围内),在微生物的新陈代谢和电场氧化的双重作用下,污染物得以处理。赵银平^[35]于 1988 年结合生物处理方法与电化学氧化法,成功地将 NH_4^+ 转化为 N_2 ,这为生物膜电极法开辟了道路。

杨晓婷等^[36]发现,随着电流强度的增大,三维生物膜电极反应器对 30 mg/L 的废水的 NH₃-N 去除率呈现先上升后下降的趋势,当电流强度为 40 mA 时取得 NH₃-N 去除率为 79.24%的较优效果。黄勇^[37]采用生物膜电极法,将微电解技术应用于生物滤床上,通过电流调节控制供氧量、供氢量,选择适当水力停留时间和改变 C/N 等值来实现对生物硝化、反

硝化的控制,最终实验得出的 NH₃-N 氧化率平均值高达 95%,显著降低了饮用水源水中的氨氮和有机物含量。

4 技术对比

不同工业氨氮废水的处理技术对比见表 2。

表 2 氨氮废水处理技术对比
Table 2 Comparison of ammonia nitrogen wastewater treatment technology

处理方法	优点	缺点	适用范围	
典型技术	吸附法	工艺简单、效果稳定	吸附剂消耗量大、再生难	低浓度氨氮废水
	氯化法	反应快、效率高	操作要求高、成本高、有二次污染	低浓度氨氮废水
	生物法	技术可靠、处理效果较好	工艺流程长、占地面积大、基建投资高	低浓度氨氮废水
	膜分离法	工艺简单操作方便 投资省	再生难、费用高、有二次污染	低浓度氨氮废水
	土地处理	低投资、低能耗、效果好	占地面积大、易受温度季节变化影响	低浓度氨氮废水
	吹脱法	处理量大、效率高、投资较低	易受环境影响、设备易结垢	高浓度氨氮废水
	MAP 法	效率高、工艺简单	药剂投加量较大、处理成本高	高浓度氨氮废水
新型技术	微波法,超声波法等	效率较高、无二次污染	应用范围有限、技术有待发展	各技术有其对应的适用范围

从表 2 可以看出,每种处理氨氮废水的方法都各有其优缺点和适用范围,到目前为止,还没有一种可以处理所有氨氮废水的通用方法。此外,虽然新型技术对处理这类废水也取得了较为理想的效果,但受制于其技术原理的局限性,未能大规模推广应用。

5 结 论

为了处理工业废水中的氨氮,人们提出了各种工艺技术,无论采用哪一种技术方法,都有其应用的局限性,对氨氮的处理,需要根据不同废水的水质差异,选择合理的技术路线。此外,多种处理工艺的联合使用也可充分发挥出现有方法的优势,对工业氨氮废水可以进行多级处理以达到预期目的,比如在预处理阶段主要依靠物理法或化学法去除悬浮固体污染物,并调整 pH 值,在深处理阶段运用生物法等。随着科学技术的发展,新型氨氮废水处理方法不断涌现,但大

多还仅处于实验室应用阶段,大规模的工业应用亟待加深研究。若是企业在发展过程中更加注重三废的排放管理,治理和预防同时进行,那么今后氨氮废水的处理方法一定会是朝着促进经济、绿色环保、高效便捷的方向发展。

参考文献:

[1] 生态环境部. 中国生态环境状况公报[R]. 北京:生态环境部,2018.
[2] 闫家望. 高氨氮废水处理技术及研究现状[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(3):99-101.
[3] 王金山. 低浓度氨氮废水的脱氮方法研究 [J]. 环境科学与管理, 2019, 44(3):99-103.
[4] 张敏, 叶峰, 张林生. 沸石去除微污染源中氨氮的研究[J]. 污染防治技术, 2002, 15(4):10-12.
[5] 吕亲尔. 改性沸石去除废水中氨氮的实验研究[D]. 太原:太原理工大学, 2010.
[6] 银瑰, 刘维荣, 楚广. 氨氮废水处理技术现状分析及新动向[J]. 中国锰业, 2018, 36(6):13-17.
[7] 黄海明, 肖贤明, 晏波. 折点氯化处理低浓度氨氮废水[J]. 水处理技

- 术, 2008, 34(8): 63–65.
- [8] 马金保, 鲁俊, 陈思学. 折点氯化法处理四氧化三锰工业污水[J]. 中国铝业, 2013, 31(2):49–51.
- [9] 钱前, 史玉龙, 杨红军. 废水中氨氮脱除的技术概述[J]. 安徽化工, 2019, 45(6):8–10.
- [10] 张鹏娟. A/O 生物脱氮工艺影响因素及强化运行效果的试验研究[D]. 郑州:郑州大学, 2013.
- [11] RUIZ G, JEISON D, CHAMY R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration[J]. Water Research, 2003, 37(6):1371–1377.
- [12] 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(2):85–88.
- [13] 曾次元, 李亮, 赵心越, 等. 电化学氧化法除氨氮的影响因素[J]. 复旦学报(自然科学版), 2006, 45(3):348–352.
- [14] 罗鑫勋. 模块化填料及人工湿地处理农村生活污水的应用 [J]. 低碳世界, 2020, 10(3):7–8.
- [15] 张文龙, 刘云鹏, 冯江涛, 等. 低浓度氨氮废水深度处理技术[J]. 工业水处理, 2019, 39(4):5–11.
- [16] 谢凤岩. 吹脱法处理高浓度氨氮废水的研究[J]. 环境保护与循环经济, 2011(7):58–61.
- [17] 文艳. 吹脱解吸法去除焦化废水中氨氮的研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2007.
- [18] 崔鹏, 张钦. 蒸汽吹脱法和 AO 法联合处理高氨氮废水的应用[J]. 科技创新与应用, 2013(5):36–37.
- [19] LEI Z, ZHI Y G, XIU Y H, etc. Ammonia nitrogen removal from chlor-alkali chemical industry wastewater by magnesium ammonium phosphate precipitation method[J]. Advanced Materials Research, 2012, 573/574:1096–1100.
- [20] 梁建华, 徐蕾, 袁媛, 等. 化学沉淀法脱除焦化废水中氨氮的研究[J]. 燃料与化工, 2011, 42(3):47–50.
- [21] 林明. 鸟粪石沉淀法去除和回收废水中氨氮和磷的实验研究[D]. 广州:暨南大学, 2012.
- [22] BI W, LI Y, HU Y. Recovery of phosphorus and nitrogen from alkaline hydrolysis supernatant of excess sludge by magnesium ammonium phosphate[J]. Bioresource Technology, 2014, 166:1–8.
- [23] CHEN Y Q, TANG J J, LI W L, et al. Thermal decomposition of magnesium ammonium phosphate and adsorption properties of its pyrolysis products toward ammonia nitrogen[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(2):497–503.
- [24] CHEN P J, CHEN Y Z, CHEN Y X, et al. Study on the removal of ammonia nitrogen from wastewater using microwave coupled with active carbon [J]. Meteorological and Environmental Research, 2012, 3(7):51–54.
- [25] 瞿培建. 微波技术处理氨氮废水的实验研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2012.
- [26] 王光旭, 徐国栋, 刘文婧, 等. 应用电声换能超声波雾化方法提高超细颗粒捕集效率[J]. 环境工程学报, 2013, 7(1):294–300.
- [27] 曾青云, 张勇, 帅庚未. 微波及超声波在钨冶金中的研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(2):15–19.
- [28] 缪应菊, 敖显字, 胡庆林, 等. 超声辅助改性粉煤灰对废水中氨氮去除率的影响[J]. 湿法冶金, 2016, 35(4):349–352.
- [29] WENJUN L, DI W U, SHI X, et al. Removal of organic matter and ammonia nitrogen in azodicarbonamide wastewater by a combination of power ultrasound radiation and hydrogen peroxide [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(4):754–759.
- [30] 曲珍杰. 超声强化人造沸石处理高浓度氨氮废水[D]. 南京:南京工业大学, 2016.
- [31] FUJISHIMA, HONDA K. Electrochemical photolysis of water at semiconductor electrode[J]. Nature, 1972, 238(5358):37–38.
- [32] GANESAN J J, PONNUSAMY S K, FEMINA C C, et al. Insights of CMNPs in water pollution control [J]. IET Nanobiotechnology, 2019, 13(6):553–559.
- [33] 张杨. 金属离子共掺杂 TiO₂ 及其水体光催化脱氮研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- [34] 曾鹏, 王秋银, 张浩杰, 等. 光催化技术在中低浓度氨氮废水处理中的应用[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(4):83–87.
- [35] 赵银平. 生物膜电极法在废水处理中的应用[C]//第十一届沈阳科学学术年会暨中国汽车产业集聚区发展与合作论坛论文集(农业环境与生物医药分册), 2014:24–27.
- [36] 杨晓婷, 赵晓莉, 郭众一, 等. 电流强度对三维生物膜电极反应器处理含氮污水性能研究[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(5):91–95.
- [37] 黄勇. 生物膜电极法处理饮用水源水中氨氮和有机物的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007.