

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.11.012

低成本铁系铝灰催化剂制备及催化臭氧性能

王冠平¹, 孙琦², 石伟¹, 牛涛¹, 刘晓静², 李浙英²

(1. 光大水务<深圳>有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 光大水务科技发展<南京>有限公司, 江苏 南京 211800)

摘要: 以工业废物铝灰、活性氧化铝和煤粉作为复合载体,预处理后采用浸渍法负载氧化铁作为活性组分,制备了低成本铁系铝灰高效催化剂。采用颗粒强度测试仪、扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射仪(XRD)和比表面积测试仪(BET)等对催化剂进行了表征,并针对苯胺和苯酚配水研究臭氧催化氧化去除COD的效果。结果显示,该催化剂载体原料铝灰:活性氧化铝:煤粉的质量比最优为48.5:48.5:3,氧化铁的含量为6%,其强度可达115 N,比表面积和孔容分别为172.5 m²/g和0.34 cm³/g;在初始pH为8、臭氧气体流量为0.4 L/min、臭氧投加量为40 mg/L、苯胺或苯酚配水量为5 L、催化剂填充率为30%的条件下,苯胺和苯酚配水的COD去除率最高可分别达到81.3%和71.9%。该催化剂的制备成本较低,催化性能稳定,可达到利用废弃物资源实现以废治废的目的,具有较好的应用价值。

关键词: 铝灰; 煤粉; 铁系催化剂; 浸渍法; 臭氧催化氧化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)11-0081-08

Preparation of a Cost-effective Ferric-based Aluminum Ash Catalyst and Its Catalytic Ozonation Performance

WANG Guan-ping¹, SUN Qi², SHI Wei¹, NIU Tao¹, LIU Xiao-jing², LI Zhe-ying²

(1. Everbright Water <Shenzhen> Co. Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. Everbright Water Technology Development <Nanjing> Co. Ltd., Nanjing 211800, China)

Abstract: Using aluminum ash, activated alumina, and coal power as composite carriers, a low-cost ferric-based aluminum ash catalyst was prepared after these industrial wastes were pretreated and loaded with iron oxide (active component) using the impregnation method. The catalyst was characterized using particle strength tester, scanning electron microscope (SEM), X-ray diffractometer (XRD), and brunauer-emmett-teller (BET), and the catalytic ozonation performance for removing COD from aniline and phenol wastewater was investigated. The optimal mass ratio of aluminum ash to activated alumina to coal powder was 48.5:48.5:3, with an iron oxide content of 6%. The resulting strength of the catalyst reached 115 N, while the specific surface area and pore capacity were 172.5 m²/g and 0.34 cm³/g, respectively. Under the initial conditions of pH 8, ozone gas flow of 0.4 L/min, ozone dosage of 40 mg/L, volume of aniline or phenol wastewater of 5 L, and catalyst filling rate of 30%, the maximum COD removal rates for aniline wastewater and phenol wastewater reached 81.3% and 71.9%, respectively. The catalyst had low preparation costs, stable catalytic performance, and effectively utilized waste resources for waste treatment, demonstrating significant application value.

Key words: aluminum ash; coal power; ferric catalyst; impregnation method; catalytic

ozonation

在制药、印染和石油等化工生产过程中会产生大量的苯胺类废水,其具有高毒性、难降解、易致癌等特点,需经过有效处理达标后才能排放^[1]。苯酚类废水主要来源于炼油、煤转化和农药生产等过程,具有毒性强、致畸性和难降解等特性,使得含酚废水成为较难处理的工业废水之一^[2]。苯胺和苯酚均为工业废水中的可溶性难降解有机物组分,其生物可降解性差,传统的生物法和物理法的去除效果有限,因此需要探索更为有效的高级催化氧化深度处理技术^[3-4]。

臭氧催化氧化技术是利用催化剂促进臭氧释放更多羟基自由基($\cdot\text{OH}$)去除水中可溶性有机物的高级氧化技术,近年来成为污水深度处理领域的研究热点^[5-6]。目前,可作为非均相臭氧催化剂的活性组分包含Fe、Mn、Ti、Zn、Ce等金属及其氧化物,其负载于活性炭、氧化铝等具有较大比表面积的载体上,能够充分发挥催化剂的催化活性,提高难降解有机物的去除率^[7-10]。徐雪璐等^[11]采用浸渍-烧结法制备了Mn-Ce-O_x/γ-Al₂O₃臭氧催化剂,并用于模拟苯胺废水的臭氧催化氧化实验,对苯胺的去除率高达93.6%。但市场上的臭氧催化剂成本过高,如何降低催化剂成本并保证催化效果成为该技术推广使用的关键。

铝灰是电解铝或铸造铝生产工艺中产生的铝渣经冷却加工后的产物,其主要成分为金属铝、三氧化二铝和氮化铝等,还含有少量的砷、钡、镉、铅等重金属元素^[12]。将工业铝灰经预处理后作为臭氧催化剂的载体原料,利用其中大量的铝及铝氧化物,变废为宝,以废治废,有利于显著降低臭氧催化剂的制备成本。基于此,笔者以预处理后的铝灰、活性氧化铝和煤粉作为复合载体,采用等体积浸渍法负载氧化铁为活性组分,制备了铁系铝灰催化剂,并系统考察了催化臭氧氧化苯胺和苯酚废水的效果。

1 实验材料与方法

1.1 催化剂的制备

将铝灰和活性氧化铝按一定比例混合、球磨,加入到过量去离子水中,充分搅拌。滤去上清液,粉块烘干后破碎至300目,并加入适量煤粉混匀。

将载体混合粉料加入到球形颗粒成型机中,缓慢加入3%的硅溶胶溶液进行造粒,得到粒径为3~5 mm的载体胚体颗粒。在60℃下烘干,并在550℃下煅烧3 h获得铝灰活性氧化铝复合载体颗粒。采用等体积浸渍法,逐步加入一定体积的硝酸铁溶液,待达到吸附平衡后在60℃下干燥,并在450℃下煅烧2 h,采用超声波进行洗净并干燥后,得到铁系铝灰催化剂。

1.2 催化剂的特性表征

采用颗粒强度测试仪测定催化剂的颗粒强度。采用X射线衍射仪(XRD)进行样品的晶型分析。利用扫描电子显微镜(SEM)观察催化剂的微观形态和结构。采用氮吸附法测定催化剂的比表面积和孔容,比表面积根据吸附曲线采用多点BET法计算,孔容根据T-Plot法计算。

1.3 臭氧催化氧化实验装置及方法

取适量催化剂颗粒置于臭氧反应柱内,加入一定量待处理废水(采用移液枪量取分析纯苯胺或苯酚试剂溶于定量的清水中,充分搅拌形成均一的苯胺或苯酚配水水样);开启臭氧发生器和臭氧浓度仪,打开氧气钢瓶,待机5 min后开启以制备臭氧,臭氧经底部微孔曝气器进入反应柱内与催化剂接触反应,剩余尾气经小型抽吸风机至尾气破坏器处理后排空,实验流程如图1所示。

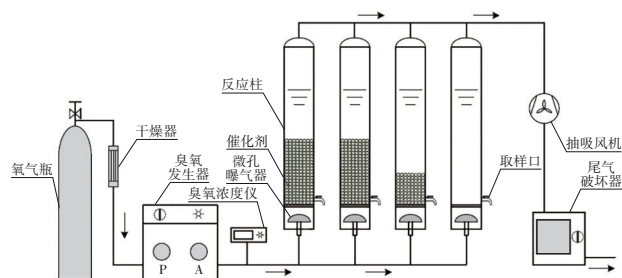


图1 臭氧催化氧化流程示意

Fig.1 Schematic diagram of catalytic ozonation process

本研究考察不同载体配比制备的催化剂的物化性能,分析臭氧投加量、催化剂填充率、初始pH、水中氯离子的浓度等对臭氧催化氧化苯酚和苯胺的影响,并对催化剂的稳定性进行测试。催化剂的连续反应采用批次实验法,即将催化剂填入反应柱内,加入待处理废水进行臭氧催化氧化反应,既定

反应时间结束为一次反应。取出催化剂后采用清水进行冲洗,直至冲洗液未检出 COD,烘干后进行第二次上述反应过程,如此反复。采用重铬酸钾法(HJ 828—2017)测定水样的 COD 浓度。

2 结果与讨论

2.1 催化剂的物性表征及性能分析

不同载体原料配比制备的催化剂的颗粒强度、比表面积和孔容结果见表 1。可知,相比 1#催化剂,2#催化剂的颗粒强度增至 123 N,比表面积和孔容降至 155.83 m²/g 和 0.28 cm³/g,说明随着载体中铝灰投加量的增加,催化剂的颗粒强度显著提高,而比表面积和孔容有所下降。这是因为铝灰相比活性氧化铝,其自身比表面积较小,但铝灰中含有的氧化铝等成分硬度较高,分散于活性氧化铝的多孔骨架中起到了支撑强化作用。另外,相比于未加入煤粉的 2#催化剂,加入 3% 煤粉制备的 3#催化剂的比表面积和孔容提高至 172.50 m²/g 和 0.34 cm³/g,强度由 123 N 略微降至 115 N;相比 3#催化剂,加入 6% 煤粉制备的 4#催化剂的比表面积和孔容进一步增大,但颗粒强度显著下降。可见通过添加煤粉作为造孔剂,经高温煅烧后,煤粉的分解挥发能够释放催化剂内外部更多的孔道,从而有效地提高催化剂的比表面积和孔容,这有利于促进催化剂的催化活性,但同时颗粒强度会受到不利影响,因此选择合适的造孔剂添加比例尤为关键。

表 1 铁系铝灰催化剂的强度、比表面积和孔容

Tab.1 Strength, specific surface area and pore volume of ferric-based aluminum ash catalysts

编号	铝灰:活性氧化铝:煤粉(质量比)	氧化铁含量/%	颗粒强度/N	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	孔容/(cm ³ ·g ⁻¹)
1#	30:70:0	6	92	160.72	0.31
2#	50:50:0	6	123	155.83	0.28
3#	48.5:48.5:3	6	115	172.50	0.34
4#	47:47:6	6	97	181.91	0.38

苯胺配水的初始 COD 浓度为 135 mg/L,苯酚配水的初始 COD 浓度为 110 mg/L,在臭氧气体流量为 0.4 L/min、配水水量均为 5 L、催化剂填充率为 30%、反应时间为 60 min、臭氧投加量为 40 mg/L、pH 为 7 的条件下,不同载体配比制备的铁系铝灰催化剂催化臭氧氧化苯胺和苯酚配水的效果如图 2 所示。可知,1#~4#催化剂实验组中,苯胺和苯酚配水

的 COD 去除率均随着时间的增加而逐渐升高。其中,1#催化剂在 60 min 时对苯胺配水的 COD 去除率为 77.6%,高于臭氧单独氧化的 52.7%;对苯酚配水的 COD 去除率为 69.6%,高于臭氧单独氧化的 44.8%,说明有催化剂参与臭氧反应的 COD 去除效果明显优于臭氧单独氧化。

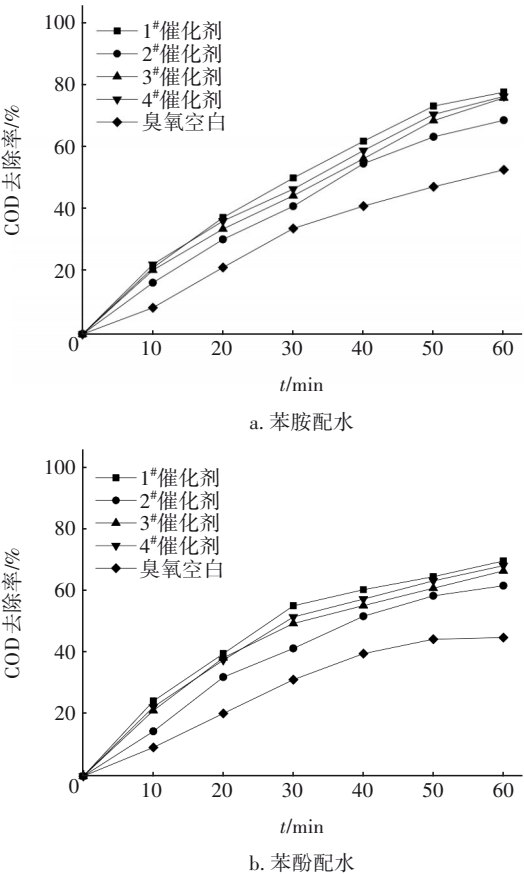


图 2 不同载体配比制备的催化剂催化氧化苯胺和苯酚配水的效果

Fig.2 Effect of catalytic oxidation of aniline and phenol wastewater by catalysts prepared with different carrier ratios

当铝灰的投加量由 30% 提高至 50% 时,相比于 1#催化剂,2#催化剂对苯胺和苯酚配水中 COD 的去除率分别下降至 68.6% 和 61.6%,说明铝灰的载体活性要低于活性氧化铝。同时,相比于 1#催化剂,多投加 20% 铝灰的 2#催化剂,其比表面积和孔容仅小幅降低,而颗粒强度却明显提高,这是因为铝灰中现有的氧化铝主要为 α 晶型,其硬度远高于活性氧化铝;铝灰中大量存在的铝单质和氮化铝成分在水中可发生水解反应,生成氢氧化铝,当载体成球且经煅烧后,氢氧化铝分解为氧化铝并脱水,水气释

放了催化剂颗粒内外部孔道,这在一定程度上增大了比表面积和孔容。当向载体中进一步混入煤粉时,催化剂的比表面积和孔容均大幅度增大,如3[#]和4[#]催化剂的数据表明,相比于未添加煤粉的2[#]催化剂,其催化活性在60 min时对苯胺和苯酚配水中COD的去除率更高,且更接近于1[#]催化剂的效果。但相比于3%煤粉投加量的3[#]催化剂,6%煤粉投加量的4[#]催化剂颗粒强度明显下降,催化剂强度过低不利于实际工程应用,在运输和装填过程中易损碎。

在实际应用中应同时考虑臭氧催化剂的生产成本和催化活性,催化剂中铝灰含量越高,其成本越低,同时颗粒强度越高,水流冲刷造成的磨损率越低,理论使用寿命也越长;适量投加煤粉作为造孔剂能够有效弥补投加铝灰造成的比表面积下降问题,保证催化活性。综合考虑臭氧催化剂的物性参数和催化效率,铁系铝灰催化剂的最佳制备工艺如下:载体原料中铝灰、活性氧化铝、煤粉的质量比为48.5:48.5:3(3[#]催化剂),载体煅烧温度为550℃、时间为3 h,活性组分氧化铁含量为6%,催化剂煅烧温度为450℃、时间为2 h。后续研究均以此最优参数制备催化剂。

2.2 铁系铝灰催化剂的结构表征

3[#]铁系铝灰催化剂的SEM照片如图3所示。可以看出,催化剂的表面粗糙度不一,粒子之间结合牢固,其间分布着较多的孔道。这样的表面结构有利于水体中污染物附着在催化剂表面,并进入催化剂内部孔道中快速发生反应。

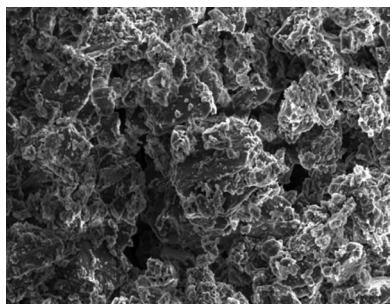


图3 铁系铝灰催化剂的SEM照片

Fig.3 SEM image of ferric-based aluminum ash catalyst

3[#]铁系铝灰催化剂的XRD图谱如图4所示。可知,由于铝灰成分较为复杂,出现的衍射峰较多,其中明显可见催化剂主要含有氧化铝、氧化铁和氧化硅等成分,且氧化铁的特征衍射峰强度明显,说明

氧化铁成分负载率高,分散性较好。

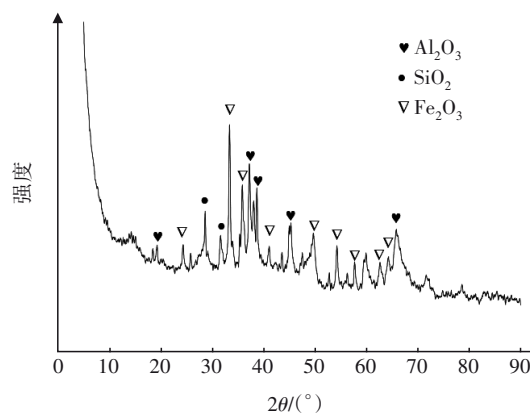


图4 铁系铝灰催化剂的XRD图谱

Fig.4 XRD pattern of ferric-based aluminum ash catalyst

2.3 臭氧催化氧化影响因素分析

2.3.1 臭氧投加量的影响

在臭氧气体流量为0.4 L/min、苯胺和苯酚配水量均为5 L、催化剂填充率为30%、pH为7、反应时间为60 min条件下,臭氧投加量对苯胺和苯酚配水中COD去除率的影响如图5所示。由图5(a)可知,随着臭氧投加量的增加,苯胺配水的COD去除率不断升高,当臭氧投加量为20、30、40和50 mg/L时,反应60 min后对COD的去除率分别为50.6%、63.4%、75.8%和78.3%。当臭氧投加量低于40 mg/L时,COD去除率明显提高;当臭氧投加量高于40 mg/L时,尽管COD去除率会进一步增加,但增幅较小,可见合适的臭氧投加量为40 mg/L。该现象亦可见于图5(b)中,当臭氧投加量为20 mg/L时,反应60 min后苯酚配水中COD去除率为52.3%;当臭氧投加量增至30 mg/L时,COD去除率提高至63.3%;当臭氧投加量进一步提高至40和50 mg/L时,COD去除率小幅提高至66.4%和69.9%,因此对于苯酚配水较合理的臭氧投加量为30 mg/L。这是因为增加臭氧投加量后,溶于水中的臭氧量增加,与污染物接触反应更充分。根据反应机理不同,臭氧在水体中呈现两种反应形式:一种是溶于水的臭氧迅速与催化剂表面的含氧基团以氢键、静电作用力结合并分解释放·OH与催化剂表面的污染物反应;另一种是臭氧分子在水中直接与污染物反应。·OH与有机物的反应速率高、氧化性强,几乎可以氧化所有有机物;而臭氧分子与有机物的反应具有选择性,无法降解小分子有机酸、醛等。当催化剂填充

率一定时,催化剂与水中溶解的臭氧接触几率一定,若臭氧投加过量,则多余的臭氧溶于水后无法有效获得与催化剂接触的机会,过量臭氧以接触氧化的形式消耗,对苯胺和苯酚去除率的提升不再显著,存在多余臭氧的浪费现象,因此综合考虑后确定臭氧投加量为30~40 mg/L较适宜。为便于在相同操作条件下考察,将臭氧投加量定为40 mg/L。

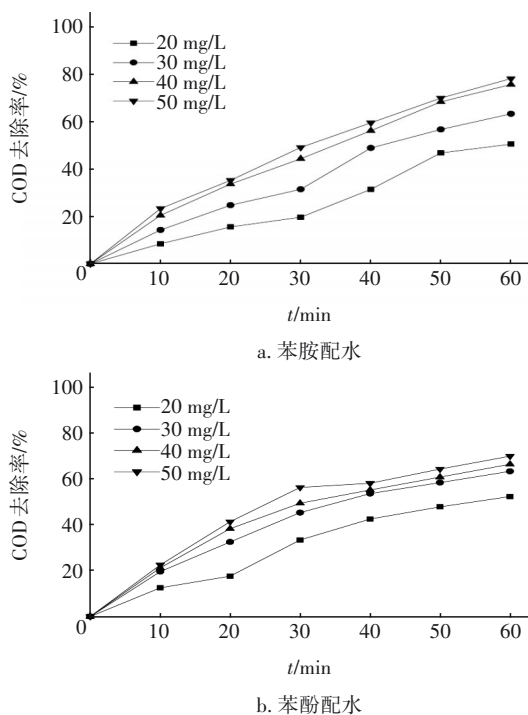


图5 臭氧投加量对苯胺和苯酚配水中COD去除率的影响

Fig.5 Effect of ozone dosage on COD removal rate of aniline and phenol wastewater

2.3.2 催化剂填充率的影响

在臭氧气体流量为0.4 L/min、臭氧投加量为40 mg/L、苯胺和苯酚配水水量为5 L、pH为7、反应时间为60 min的条件下,催化剂填充率对苯胺和苯酚配水中COD去除率的影响如图6所示。由图6(a)可知,对于苯胺配水,当催化剂填充率为10%、20%、30%和40%时,反应60 min后,对COD的去除率分别为56.7%、64.9%、75.8%和80.7%。随着催化剂填充率的增加,COD去除率逐渐升高,但增幅变小。这可能是因为,当臭氧投加量一定时,催化剂量填充率增大后,活性位点增多,水中的臭氧、有机物与催化剂接触几率增加,反应更充分;当填充率进一步增大后,水中的溶解臭氧无法充分占据更多的催化剂表面活性位点,造成催化剂的浪费^[13]。

同样的现象可见于图6(b)中,当催化剂填充率为10%、20%、30%和40%时,反应60 min后,苯酚配水中的COD去除率分别为44.1%、51.3%、66.4%和71.4%。当催化剂填充率由10%增加至30%时,COD去除率大幅提高;当填充率进一步增加至40%时,COD去除率提升幅度较小。这种现象与阚小康等人^[14]的研究结果一致,可见催化剂填充率会显著影响臭氧催化氧化的效果,但同时也应充分考虑合适的用量以控制工程应用成本。

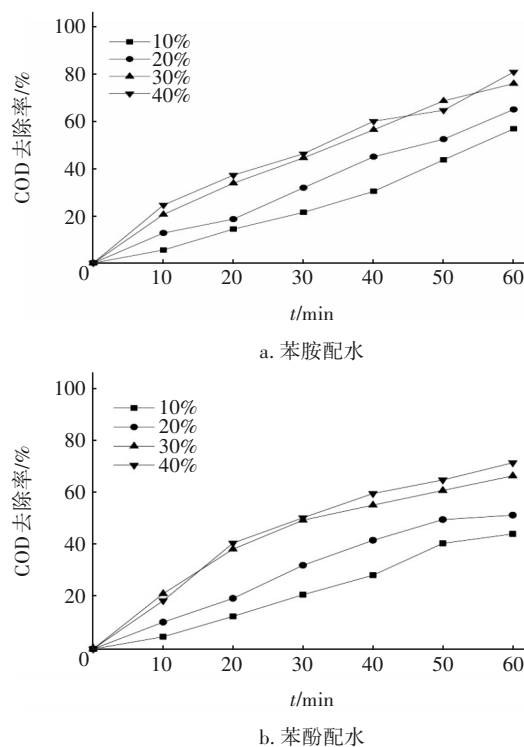


图6 催化剂填充率对苯胺和苯酚配水中COD去除率的影响

Fig.6 Effect of catalyst filling rate on COD removal rate of aniline and phenol wastewater

2.3.3 初始pH的影响

在臭氧气体流量为0.4 L/min、臭氧投加量为40 mg/L、苯胺和苯酚配水水量均为5 L、催化剂填充率为30%、反应时间为60 min的条件下,初始pH对苯胺和苯酚配水中COD去除率的影响如图7所示。在酸性条件下,水中的 H^+ 会抑制 $\cdot OH$ 的产生,臭氧氧化的主要反应方式为直接反应,即臭氧分子直接氧化有机物,但氧化效率低;在碱性条件下,氢氧根离子协同催化剂活化臭氧,产生 $\cdot OH$,反应效率明显提高,因此控制水体在中性或碱性较为适宜^[15]。从图7可知,当苯胺和苯酚配水的初始pH由7升高至

10时,COD去除率均先升高后降低。当初始pH为7、8、9和10时,苯胺配水的COD去除率分别为75.8%、81.3%、83.5%和81.7%,苯酚配水的COD去除率分别为66.4%、71.9%、70.4%和69.1%。可见苯胺配水的COD去除率在pH为9时最高,苯酚配水在pH为8时最高。这是因为当pH升高时,臭氧分子在水体中通过自由基链式反应产生的 $\cdot\text{OH}$ 数量更多,但过多的自由基也会消耗部分 $\cdot\text{OH}$ 以及自由基相互碰撞发生淬灭,反而不利于对污染物的去除。综合考虑对COD的去除效果,苯胺和苯酚配水在pH为8时的COD去除率提高较明显,且NaOH(调节pH)投加量最少,有利于控制成本。

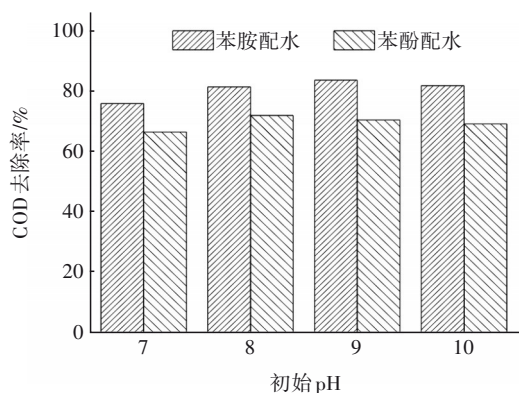


图7 初始pH对苯胺和苯酚配水中COD去除率的影响

Fig.7 Effect of initial pH on COD removal rate of aniline and phenol wastewater

2.3.4 氯离子浓度的影响

在工业生产过程中常常伴随产生大量结构复杂、浓度高、高盐高氯的废水,研究其中无机氯离子浓度对催化臭氧氧化效果的影响尤为重要^[16]。在臭氧气体流量为0.4 L/min、臭氧投加量为40 mg/L、苯胺和苯酚配水水量均为5 L、催化剂填充率为30%、初始pH为8、反应时间为60 min条件下,氯离子浓度对苯胺和苯酚配水中COD去除率的影响见图8。苯胺配水中,当氯离子浓度从0增至3 g/L时,COD去除率从81.3%小幅降低至79.4%;当进一步增加氯离子浓度时,COD去除率降幅明显;当氯离子浓度为10 g/L时,COD去除率仅为31.1%。苯酚配水中,当氯离子浓度从0增至5 g/L时,COD去除率从71.9%小幅降至67.8%;继续增加氯离子浓度后,COD去除率显著下降;当氯离子浓度提高至10 g/L时,COD去除率降至25.3%。分析原因,增加氯离子浓度后,水中臭氧及臭氧在催化剂表面释放

的 $\cdot\text{OH}$ 与氯离子接触的几率增大,从而降低了与有机物反应的几率和效率;同时氯离子本身具有一定的还原性,能够与无选择性的 $\cdot\text{OH}$ 发生反应,生成氯自由基等,从而消耗臭氧。另外,氯离子容易吸附到催化剂表面,减少催化剂的活性中心数量,影响臭氧分子与催化剂接触转化自由基的效率,进而降低对有机物的去除效果。因此,综合考虑氯离子浓度对苯胺和苯酚配水中COD去除率的影响,当水中氯离子浓度达到3 g/L以上时,苯胺和苯酚的降解受到显著抑制,为获得较好的污染物去除率,可增加臭氧投加量以消除氯离子的负面影响。

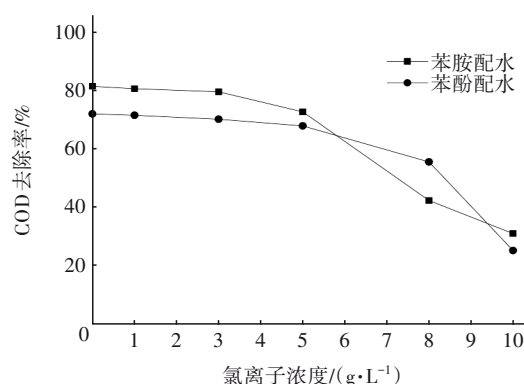


图8 氯离子浓度对苯胺和苯酚配水中COD去除率的影响

Fig.8 Effect of chloride ion concentration on COD removal rate of aniline and phenol wastewater

2.3.5 铁系铝灰催化剂的稳定性

催化剂的稳定性决定了实际工程应用的可行性,是催化剂应用的基础考核指标。在pH为8、臭氧气体流量为0.4 L/min、臭氧投加量为40 mg/L、苯胺和苯酚配水水量为5 L、催化剂填充率为30%的条件下,首先进行10次苯胺配水的连续反应,然后进行清水曝气冲洗,在催化剂冲刷洗净后继续进行10次苯酚配水的连续反应,铁系铝灰催化剂的稳定性如图9所示。

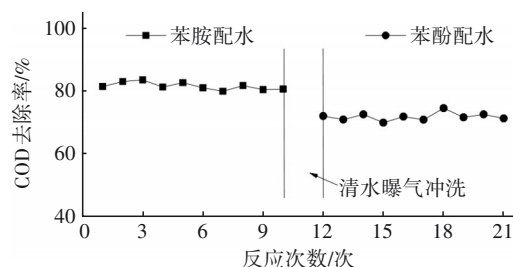


图9 铁系铝灰催化剂的稳定性

Fig.9 Stability of ferric-based aluminum ash catalyst

从图9可以看出,首次苯胺配水的COD去除率为81.3%,第10次的COD去除率为80.5%;首次苯酚配水的COD去除率为71.9%,第10次的COD去除率为71.1%。反应效果持续性良好,说明催化剂稳定。

采用X射线荧光光谱仪(XRF)测试铁系铝灰催化剂在使用前后的组成变化,结果见表2。可知,初始未使用的新催化剂其氧化铁的相对含量为6.02%,使用1次后氧化铁的含量降至5.83%,使用10次后为5.80%,使用20次后为5.78%。可见,催化剂首次使用后氧化铁的含量降幅较大,这可能是由于新制备的催化剂表面和内部孔道附着较多结合力较差的氧化铁微粒,在水中经曝气冲刷后发生脱落;后续使用过程中氧化铁的含量减少幅度较低,说明氧化铁与载体之间结合得较为牢固,不易流失,证明催化剂的稳定性较好。

表2 使用前铁系铝灰催化剂的化学成分组成

Fig.2 Chemical composition of ferric-based aluminum ash catalyst before and after use %

项目	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	MgO	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	其他
初始	6.02	81.45	7.31	1.05	0.63	1.25	0.46	0.38	1.45
1次	5.83	82.21	7.42	1.08	0.47	1.21	0.40	0.32	1.06
10次	5.80	82.33	7.41	1.11	0.42	1.30	0.47	0.40	0.76
20次	5.78	81.96	7.46	1.15	0.37	1.38	0.49	0.41	1.00

3 结论

① 以工业废弃物铝灰和活性氧化铝为复合载体,添加煤粉作为造孔剂,负载活性组分氧化铁制备的铁系铝灰催化剂,在具有较高颗粒强度的同时保证了催化性能。

② 铁系铝灰催化剂的最佳制备工艺如下:载体原料中铝灰、活性氧化铝、煤粉的质量比为48.5:48.5:3,载体煅烧温度为550℃、时间为3h,活性组分氧化铁含量为6%,催化剂煅烧温度为450℃、时间为2h。该催化剂的强度可达115N,比表面积和孔容分别为172.50m²/g和0.34cm³/g。将其用于苯胺和苯酚配水处理,在初始pH为8、臭氧气体流量为0.4L/min、臭氧投加量为40mg/L、苯胺和苯酚配水水量均为5L、催化剂填充率为30%的条件下,对COD的去除率最高分别可达81.3%和71.9%。

③ 铁系铝灰催化剂原料来源广泛,制备成本较低,催化剂性能稳定,可实现废物资源化和以废治废的目的,具有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] 黄卓,冯梦龙,彭敬慧,等. 苯胺类废水处理技术研究进展[J]. 染料与染色, 2018, 55(5): 54-57.
HUANG Zhuo, FENG Menglong, PENG Jinghui, *et al.* The progress of aniline wastewater treatment [J]. Dyestuffs and Coloration, 2018, 55(5): 54-57 (in Chinese).
- [2] 温俊峰,赵何,刘侠,等. 活化沙蒿吸附剂处理苯酚废水[J]. 化学与生物工程, 2019, 36(1): 53-59.
WEN Junfeng, ZHAO He, LIU Xia, *et al.* Removal of phenol from wastewater by activated *Artemisia desertorum* biosorbent [J]. Chemistry & Bioengineering, 2019, 36(1): 53-59(in Chinese).
- [3] 王治业,祝英,季彬,等. 生物强化技术处理苯胺废水难降解有机物的研究[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 16-18.
WANG Zhiye, ZHU Ying, JI Bin, *et al.* A study on treatment of refractory compounds in aniline wastewater by bioaugmentation technology [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(S1): 16-18(in Chinese).
- [4] 荣俊峰,陆雪玉,张帅,等. 填料吸附-等离子体氧化协同处理苯酚废水[J]. 环境工程, 2016, 34(12): 53-57.
RONG Junfeng, LU Xueyu, ZHANG Shuai, *et al.* Phenol wastewater treatment by packing adsorption combined with non-thermal plasma oxidation [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(12): 53-57 (in Chinese).
- [5] LIN F W, WANG Z H, SHAO J M, *et al.* Promotional effect of spherical alumina loading with manganese-based bimetallic oxides on nitric-oxide deep oxidation by ozone[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2017, 38(7): 1270-1280.
- [6] 洪苡辰,刘永泽,张立秋,等. 臭氧催化氧化深度处理焦化废水效能研究[J]. 给水排水, 2017, 43(12): 53-57.
HONG Yichen, LIU Yongze, ZHANG Liqiu, *et al.* Advanced treatment of coking wastewater by catalytic ozonation[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(12): 53-57(in Chinese).
- [7] 武倩,涂勇,徐军,等. 改性活性炭催化臭氧深度处理化工废水的研究[J]. 环境保护科学, 2016, 42(5): 81-85,95.
WU Qian, TU Yong, XU Jun, *et al.* Study of catalytic ozonation of chemical industrial wastewater by modified activated carbon[J]. Environmental Protection Science,

- 2016, 42(5): 81-85, 95(in Chinese).
- [8] 温舒涵, 姚沁坪, 李炜琦, 等. MnO_2 陶粒臭氧氧化催化剂的制备及其性能[J]. 化工环保, 2018, 38(2): 157-163.
- WEN Shuhan, YAO Qinqing, LI Weiqi, *et al.* Preparation of MnO_2 ceramsite and its catalytic activity for ozone oxidation [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2018, 38 (2) : 157-163 (in Chinese).
- [9] 贺晓凌, 孙琪, 李媛媛, 等. 臭氧催化氧化处理废水的催化剂适配[J]. 天津工业大学学报, 2018, 37(1): 32-37, 42.
- HE Xiaoling, SUN Qi, LI Yuanyuan, *et al.* Catalyst adaptation of ozone catalytic oxidation for wastewater treatment[J]. Journal of Tiangong University, 2018, 37 (1): 32-37, 42(in Chinese).
- [10] 刘爱宝, 石伟, 杜庆洋, 等. 活性炭催化剂对臭氧氧化污水深度处理中 nbsCOD 的研究[J]. 广东化工, 2018, 45(7): 113-115.
- LIU Aibao, SHI Wei, DU Qingyang, *et al.* Study on the removal efficiency of ozonation with activated carbon catalysts on nbsCOD in the advanced sewage treatment [J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45 (7) : 113-115(in Chinese).
- [11] 徐雪璐, 蒋云飞, 金琪, 等. Mn-Ce 负载型催化剂催化臭氧氧化苯胺实验研究[J]. 工业水处理, 2019, 39(3): 54-58.
- XU Xuelu, JIANG Yunfei, JIN Qi, *et al.* Experimental research on the Mn-Ce supported catalyst for the catalytic ozonation of aniline [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(3): 54-58(in Chinese).
- [12] 吴龙, 胡天麒, 郝以党. 铝灰综合利用工艺技术进展[J]. 有色金属工程, 2016, 6(6): 45-49.
- WU Long, HU Tianqi, HAO Yidang, *et al.* Progress of utilization technology for aluminum ash [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(6): 45-49(in Chinese).
- [13] 李桂菊, 李弘涛, 夏欣, 等. 臭氧催化氧化技术深度处理印染废水的研究[J]. 天津科技大学学报, 2019, 34(2): 55-59, 80.
- LI Guiju, LI Hongtao, XIA Xin, *et al.* Treating of dyeing wastewater with catalytic ozonation technology [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2019, 34(2): 55-59, 80(in Chinese).
- [14] 阚小康, 颜家保, 刘学东, 等. 臭氧催化氧化处理炼油生化尾水的研究[J]. 应用化工, 2018, 47(4): 750-753.
- KAN Xiaokang, YAN Jiabao, LIU Xuedong, *et al.* Study on biochemical tail water of refinery by ozone catalytic oxidation [J] Applied Chemical Industry, 2018, 47(4): 750-753(in Chinese).
- [15] 缪倩倩, 孟冠华, 刘宝河, 等. 铜氧化物/D851 树脂催化臭氧氧化降解双酚 A[J]. 环境工程学报, 2019, 13(7): 1557-1564.
- MIAO Qianqian, MENG Guanhua, LIU Baohe, *et al.* Degradation of bisphenol A through catalytic ozonation process with copper oxide/D851 resin [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13 (7) : 1557-1564(in Chinese).
- [16] 宋红, 孙宇明, 马文静. 高盐苯胺类生产废水处理工艺研究[J]. 精细与专用化学品, 2016, 24(2): 14-17.
- SONG Hong, SUN Yuming, MA Wenjing, *et al.* Research on treatment process of high salt aniline production wastewater [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2016, 24(2): 14-17(in Chinese).

作者简介:王冠平(1972-),男,湖北荆州人,博士,高级工程师,主要研究方向为水处理技术。

E-mail:wanggp@ebwater.com

收稿日期:2023-12-05

修回日期:2024-02-19

(编辑:任莹莹)