

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.03.016

# 磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂处理垃圾渗滤液试验研究

蒋宝军, 孙一文, 王新培, 张小雨

(吉林建筑大学 松辽流域水环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130118)

**摘要:** 制备了二氧化钛/氧化石墨烯(TiO<sub>2</sub>/GO)和磁性二氧化钛/氧化石墨烯(磁性TiO<sub>2</sub>/GO)两种复合催化剂,并用其处理垃圾渗滤液。考察了复合催化剂中TiO<sub>2</sub>与GO的质量比、催化剂投加量、反应时间对COD去除率的影响,并采用SEM、XRD、VSM、FTIR等手段对复合催化剂进行表征。结果表明,磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂表面粗糙、纯度高、磁回收性能良好。当TiO<sub>2</sub>与GO的质量比为5:1、催化剂投加质量与垃圾渗滤液COD的质量比为0.8、反应时间为3 h时,对COD的去除率最高,可达65.35%,此时垃圾渗滤液出水COD为1 774 mg/L,可生化性(BOD<sub>5</sub>/COD)由0.20提高至0.45。

**关键词:** 磁性; 二氧化钛; 氧化石墨烯; 垃圾渗滤液; 催化氧化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)03-0099-06

## Magnetic Titanium Dioxide/Graphene Oxide Composite Catalyst for Landfill Leachate Treatment

JIANG Bao-jun, SUN Yi-wen, WANG Xin-pei, ZHANG Xiao-yu

(Key Laboratory of Songliao River Water Environment <Ministry of Education>, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** Titanium dioxide/graphene oxide (TiO<sub>2</sub>/GO) and magnetic titanium dioxide/graphene oxide (magnetic TiO<sub>2</sub>/GO) composite catalysts were prepared and applied to treat landfill leachate. The effects of mass ratio of TiO<sub>2</sub> to GO, catalyst dosage and reaction time on COD removal efficiency of the composite catalyst were investigated, and the composite catalyst was characterized by SEM, XRD, VSM and FTIR. The magnetic TiO<sub>2</sub>/GO composite catalyst had a rough surface, high purity and good magnetic recovery performance. The removal efficiency of COD reached the maximum of 65.35% under the following conditions: the mass ratio of TiO<sub>2</sub> to GO was 5:1, the mass ratio of catalyst dosage to COD in landfill leachate was 0.8 and the reaction time was 3 h. At this time, COD in the effluent was 1 774 mg/L, and the biodegradability (BOD<sub>5</sub>/COD) was increased from 0.20 to 0.45.

**Key words:** magnetism; titanium dioxide; graphene oxide; landfill leachate; catalytic oxidation

垃圾渗滤液是在垃圾填埋过程中产生的一种高浓度有机废水,具有水质水量变化大、污染物成分复杂、可生化性差等特点<sup>[1]</sup>,单一的处理方法难以将其处理达标<sup>[2]</sup>。某些城市采用的深度膜处理工艺虽然

能够有效降解部分有机物,但其产生的滤液需要进一步处理,存在处理费用高、二次污染严重等问题。

近年来,利用光催化氧化技术降解污水中的有机物受到科研人员的关注,该方法成本低廉、反应无

需在高温高压条件下进行、反应条件温和且不会产生二次污染。其中二氧化钛( $\text{TiO}_2$ )作为光催化反应的催化剂具有稳定性好、催化效率高、无毒、价格低廉等特点,但其对太阳光的利用率不高,回收困难。氧化石墨烯(GO)材料因其具有优异的电学和力学性能,在光催化、储能等领域被广泛应用<sup>[3]</sup>。有研究表明,将 $\text{TiO}_2$ 与GO复合制成 $\text{TiO}_2/\text{GO}$ 复合材料,一方面可增加对光的利用率,另一方面能够增大材料的比表面积,吸附废水中的污染物质,从而提高光催化效率<sup>[4]</sup>。因此笔者结合前人的经验<sup>[5-6]</sup>,制备了 $\text{TiO}_2/\text{GO}$ 和磁性 $\text{TiO}_2/\text{GO}$ 两种复合催化剂,并对其性能进行表征。同时以垃圾渗滤液为处理对象,探究复合催化剂对COD的去除效果与 $\text{TiO}_2$ 和GO的质量比、催化剂投加量、反应时间的关系,并对试验条件进行优化。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验试剂:石墨粉、高锰酸钾、无水乙醇、硫酸、30%过氧化氢、氢氧化钠、重铬酸钾、硫酸亚铁铵、硫酸银、六水合氯化铁、乙二醇、尿素、聚乙二醇2000、 $\text{TiO}_2$ 等。

试验仪器:电子天平、数显恒温加热磁力搅拌器、电动搅拌器、超声波清洗仪、恒温水浴锅、干燥箱、COD自动回流消解仪、生化培养箱、内衬聚四氟乙烯的小型高压反应釜、紫外灯等。

进水水质:试验所用垃圾渗滤液为吉林省长春市蘑菇沟垃圾卫生填埋场经厌氧、曝气处理后的渗滤液。其COD平均浓度为5 120 mg/L,  $\text{BOD}_5$ 平均浓度为1 020 mg/L,渗滤液呈棕黄色,色度为150倍。

### 1.2 催化剂的制备

GO的制备:称取3 g石墨粉,将其倒入装有120 mL低温(0~4℃)浓硫酸的烧杯中。再称取15 g高锰酸钾,缓慢加入其中,控制反应温度不超过20℃,搅拌2 h,溶液由黑色变为墨绿色。然后转移到恒温水浴锅中,35℃水浴反应1 h。反应结束后升温至60℃,继续反应15 min,向烧杯中缓慢加入250 mL去离子水,看到有紫色烟雾生成,25 min以后再继续加入500 mL去离子水和30 mL双氧水(浓度为30%)搅拌,此时溶液呈金黄色。取出烧杯静置,并用稀盐酸和去离子水交替洗涤沉淀物3~5次。将产物放在烘箱内,温度为60℃,烘干12 h后研磨,得到

较为纯净的褐色GO粉末。

$\text{TiO}_2/\text{GO}$ 复合催化剂的制备:称取一定量的 $\text{TiO}_2$ 和GO,使 $\text{TiO}_2$ 和GO的质量比分别为1:0、1:1、2:1、5:1、10:1。将其分别加入装有60 mL蒸馏水的烧杯中,超声30 min后磁力搅拌4 h。将溶解后的溶液放入内衬聚四氟乙烯的高压反应釜中,在140℃下反应12 h。取出反应釜冷却至室温,抽滤沉淀。将产物置于蒸发皿中,放入烘干箱烘干(80℃),研磨后得到 $\text{TiO}_2/\text{GO}$ 复合催化剂。

磁性 $\text{TiO}_2/\text{GO}$ 复合催化剂的制备:量取60 mL乙二醇倒入烧杯中,称取1.65 g六水氯化铁,磁力搅拌至完全溶解,溶液呈橘黄色。再称取1 g制备的 $\text{TiO}_2/\text{GO}$ 粉末、2 g尿素、2 g聚乙二醇2000加入上述溶液中,用超声清洗机超声30 min后,再磁力搅拌1 h,使混合物充分溶解,形成均匀混合液。将混合液放入内衬聚四氟乙烯的高压反应釜中,在180℃下反应20 h。取出反应釜冷却至室温,将反应釜中产物移至洁净的烧杯中,用去离子水和乙醇反复清洗5~8次。将洗净后的产物放入蒸发皿中,置于60℃烘箱中干燥10 h,得到磁性 $\text{TiO}_2/\text{GO}$ 复合催化剂。

### 1.3 试验方法

取若干份150 mL垃圾渗滤液分别置于250 mL烧杯中,向其中投加不同质量比( $\text{TiO}_2$ 与GO的质量比)的催化剂。在紫外光照条件下,通过搅拌器搅拌均匀,反应完成后静置或外加磁场将催化剂与渗滤液分离,检测出水COD、 $\text{BOD}_5$ 、色度等水质指标。COD采用重铬酸钾滴定法测定, $\text{BOD}_5$ 采用稀释与接种法测定,色度采用稀释倍数法测定。

采用X-射线衍射仪(XRD)、电子扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)、傅里叶红外光谱仪(FTIR)、振动样品强磁计(VSM)表征复合催化剂的性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 垃圾渗滤液催化氧化试验

#### 2.1.1 原料对比对COD去除率的影响

在催化剂投加比(催化剂投加质量与渗滤液COD的质量比<sup>[7]</sup>)为0.8的条件下,考察 $\text{TiO}_2$ 与GO的质量比对垃圾渗滤液中COD去除率的影响,结果如图1所示。可知,当 $\text{TiO}_2$ 与GO的质量比为5:1时,复合催化剂对COD的去除效果最好,反应2 h后对COD的去除率可达60.94%。相同条件下,单独使用 $\text{TiO}_2$ 粒子作为催化剂时,COD去除率最低,仅

为41.02%。说明氧化石墨烯的添加可以有效提高催化剂对COD的去除率,这可能是因为当TiO<sub>2</sub>含量过高时,激活产生的光生电子和空穴会发生复合现象,从而导致量子效率降低,光催化活性比较低<sup>[8]</sup>。而当TiO<sub>2</sub>与GO进行复合后,由于GO具有较大的比表面积,且其独特的电子传输性能可降低光生电子与空穴的复合,提高复合材料对光的利用率。但GO过量时,渗滤液中较多的大分子有机物被吸附在复合催化剂表面,对光线起到了遮掩作用,导致COD去除率降低,复合催化剂的光催化活性也随之降低。因此为了达到更好的处理效果,应将TiO<sub>2</sub>与GO的质量比控制为5:1。

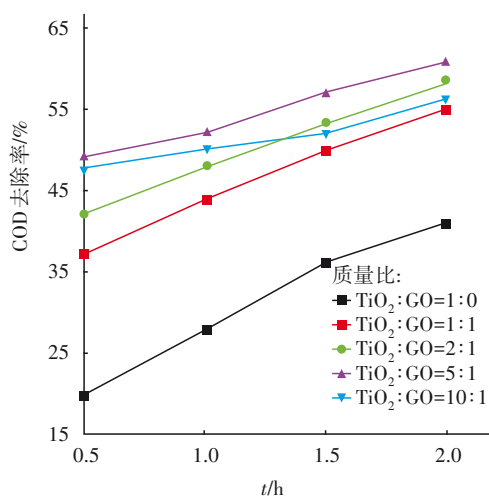


图1 TiO<sub>2</sub>和GO的质量比对COD去除率的影响

Fig.1 Effect of mass ratio of TiO<sub>2</sub> to GO on COD removal rate

### 2.1.2 催化剂投加量对COD去除率的影响

考察催化剂投加量对垃圾渗滤液COD去除率的影响(反应时间为2 h),结果如图2所示。可知,复合催化剂对COD的去除率明显高于单独TiO<sub>2</sub>。当使用TiO<sub>2</sub>作为催化剂时,在催化剂投加比为0.9的条件下,对COD的去除率最高,为43.36%。采用TiO<sub>2</sub>/GO和磁性TiO<sub>2</sub>/GO两种复合催化剂时,对COD的去除率均在投加比为0.8时最高,分别为60.94%和62.87%。并且投加比小于0.8时,COD去除率随投加比的增加而升高;大于0.8时,COD去除率随投加比的增大而降低。这可能是因为过量的催化剂影响了其对紫外光的吸收,投加量越多对紫外光产生的屏蔽和散射作用就越大。由此可见,过量的催化剂不仅会增加成本,还会降低对COD的去除效果,因此在实际应用中应严格控制催化剂的投加

量。另外,在最佳投加比条件下,磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂对COD的去除率高于TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂。由此可见,掺杂少量的Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>可以提高复合催化剂的催化效果,并使复合材料具有磁性,改善了TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂难以回收利用的缺点,使经济效益最大化。

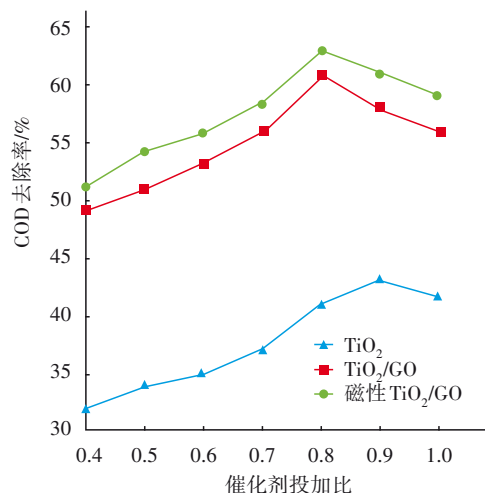


图2 催化剂投加量对COD去除率的影响

Fig.2 Effect of catalyst dosage on COD removal rate

### 2.1.3 反应时间对COD去除率的影响

在催化剂投加比为0.8的条件下,考察反应时间对垃圾渗滤液中COD去除率的影响,结果如图3所示。可知,当反应时间由0.5 h增加至2 h时,复合催化剂对COD的去除率增长较快,TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂对COD的去除率由49.22%升至60.94%,磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂对COD的去除率由51.85%升高至62.87%;继续延长反应时间,去除率增长速度变慢,当反应时间达到3 h时,COD去除率最高,分别为63.14%和65.35%,3 h以后COD去除率几乎不再增加。单独使用TiO<sub>2</sub>时,当反应时间由0.5 h增加至1.5 h时,COD去除率增长较快,由20.12%增加至36.13%;继续延长反应时间,COD去除率增长速度变慢,反应3 h时COD去除率最高达到44.25%,之后几乎不再增加。另外,相同反应时间下,复合催化剂对COD的去除率明显高于TiO<sub>2</sub>。在本试验中,三种催化剂在达到最佳反应时间之前,对COD的去除率都随反应时间的增加而增大,达到最佳反应时间3 h后,继续延长反应时间对COD的去除率影响不大。这是由于复合材料在紫外光的照射下产生电子-空穴对,电子-空穴对与溶液中的H<sub>2</sub>O反应产生具有强氧化性的羟基自由基,以此去



除渗滤液中的有机污染物。但随着反应时间的增加,会消耗大量的电子-空穴对,导致对COD的去除率逐渐下降<sup>[9]</sup>。

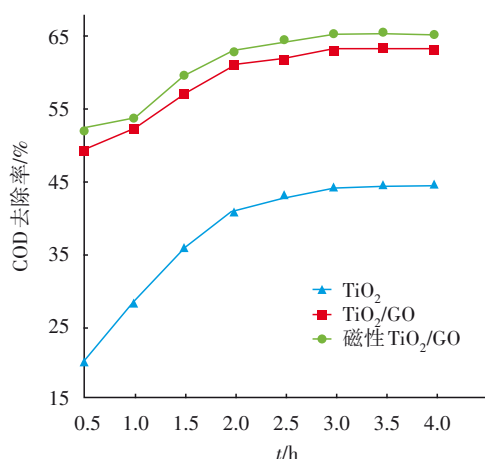


图3 反应时间对COD去除率的影响

Fig.3 Effect of reaction time on COD removal rate

#### 2.1.4 反应前后垃圾渗滤液水质的变化

在复合催化剂TiO<sub>2</sub>和GO的质量比为5:1、催化剂投加比为0.8、反应时间为3 h条件下,投加TiO<sub>2</sub>/GO和磁性TiO<sub>2</sub>/GO两种复合催化剂后,垃圾渗滤液出水COD分别为1 887、1 774 mg/L,出水BOD<sub>5</sub>分别为850、800 mg/L,可生化性(BOD<sub>5</sub>/COD)均为0.45,色度均为50倍。可见,投加磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂后出水COD更低,两种复合催化剂均可提高渗滤液的可生化性、降低色度,因此通过复合催化剂处理垃圾渗滤液后,可采用生物工艺进行后续处理,在降低处理成本的同时,可以达到提高处理效果的目的。

#### 2.1.5 磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂重复使用性能

在磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂投加比为0.8、反应时间为2 h的条件下,考察COD去除率的变化,通过外加磁场分离出复合催化剂,80℃烘干后补加150 mL垃圾渗滤液,重复上述步骤,回收5次后COD去除率分别为62.87%、62.31%、61.52%、60.55%、59.37%。可以看出,重复使用5次磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂后,对COD的去除率并没有明显下降,表明该复合催化剂具有良好的回收性能和重复使用性能。

### 2.2 磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的表征

当复合催化剂中TiO<sub>2</sub>和GO的质量比为5:1时,对垃圾渗滤液COD的去除效果最好,所以对该配比

下的复合催化剂进行表征。

#### 2.2.1 XRD分析

图4为GO、TiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂和磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的XRD图谱。通过与标准卡片(PDF2-2004)进行对比,GO在2 $\theta$ =11.18°处出现了GO特征峰,TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂在2 $\theta$ =25.28°、37.80°、48.05°、53.89°、55.06°、62.68°、68.76°、70.31°、75.03°处出现了衍射峰,分别对应锐钛型TiO<sub>2</sub>的(101)、(004)、(200)、(105)、(211)、(204)、(116)、(220)、(215)晶面的衍射峰,表明TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂中的TiO<sub>2</sub>为锐钛型。对比TiO<sub>2</sub>和TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂可以发现,TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂对应锐钛型TiO<sub>2</sub>的衍射峰显著减弱,表明已经形成TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂,对比TiO<sub>2</sub>/GO和磁性TiO<sub>2</sub>/GO两种复合催化剂可以看出,除锐钛型TiO<sub>2</sub>的特征峰外,磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂在2 $\theta$ =31.25°、36.82°、44.76°、55.62°处出现了Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的特征衍射峰,分别对应立方晶系Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的(220)、(311)、(400)、(422)处的衍射峰,说明复合催化剂中各物质为共存状态。TiO<sub>2</sub>/GO和磁性TiO<sub>2</sub>/GO两种复合催化剂的图谱均没有GO特征峰,这可能是因为超声处理过程中,GO被剥离为单层的石墨烯结构,即GO被还原成石墨烯。

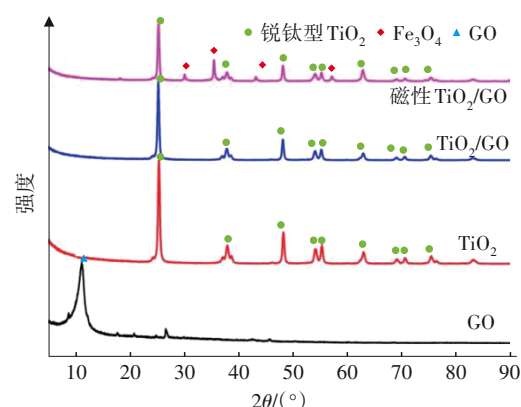


图4 GO、TiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂和磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的XRD图谱

Fig.4 XRD spectra of GO, TiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>/GO and magnetic TiO<sub>2</sub>/GO composite catalysts

#### 2.2.2 SEM分析

图5为磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的SEM照片。可以看出,TiO<sub>2</sub>纳米粒子分散在片层结构的GO上,增大了催化剂的比表面积,同时也增大了污染物与

催化剂的接触面积。从图5(b)和(c)可以看出,该复合催化剂有较大的空隙,能吸附一定量的污染物。从图5(d)可以看出,球形纳米颗粒物Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>附着在TiO<sub>2</sub>表面,使该复合催化剂具有磁性,便于回收。

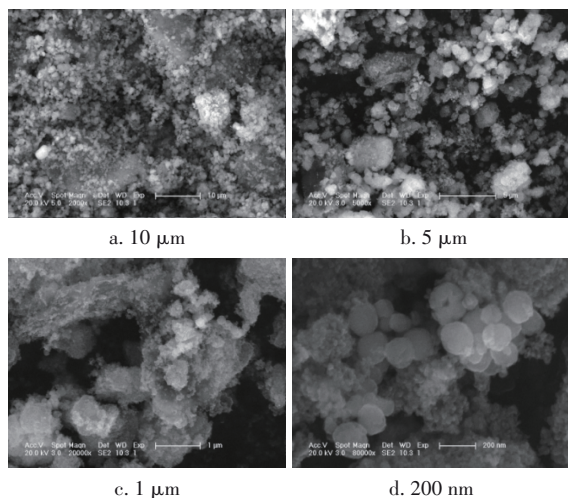


图5 磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的SEM照片

Fig.5 SEM photos of magnetic TiO<sub>2</sub>/GO composite catalyst

### 2.2.3 EDS分层图像分析

磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂EDS分析结果表明,各元素紧密分布在一起,GO被TiO<sub>2</sub>包裹,增大了比表面积,提高了复合催化剂的光催化性能。铁元素的分层图像表明,该复合催化剂具有磁性,可以回收利用。

### 2.2.4 EDS能谱分析

磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的EDS能谱分析结果表明,该催化剂含有碳、氧、钛、铁元素,符合磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的元素组成,可以确定该催化剂为TiO<sub>2</sub>与GO的复合产物。碳、氧、钛、铁的原子百分比分别为26.03%、58.71%、10.89%、4.37%,氧的原子百分比最高,证明该催化剂具有较强的氧化性。同时,各元素的原子百分比之和为100,说明制得的催化剂纯度较高,不含有其他杂质。

### 2.2.5 FTIR分析

图6为磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的FTIR图谱。可以看出,在3 429和1 570 cm<sup>-1</sup>处出现的吸收峰是羟基的伸缩振动峰;1 630 cm<sup>-1</sup>处的峰是C=C的伸缩振动峰;1 222 cm<sup>-1</sup>处的峰是环氧键(C—O—C)的伸缩振动峰;1 078 cm<sup>-1</sup>处的峰是烷氧基的伸缩振动峰<sup>[10-11]</sup>。可见,石墨粉经过氧化后引入了含氧官能

团,如羟基、碳基等,成功制备出GO。在562 cm<sup>-1</sup>处是Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的Fe—O伸缩振动峰,并且在1 000 cm<sup>-1</sup>以下的吸收峰变宽增强,是因为存在Ti—C—O键<sup>[12]</sup>,说明三者成功复合。

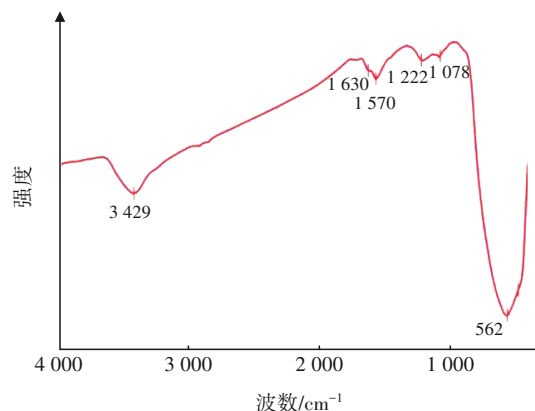


图6 磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的FTIR图谱

Fig.6 FTIR spectrum of magnetic TiO<sub>2</sub>/GO composite catalyst

### 2.2.6 VSM分析

图7为磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的磁化曲线。可以看出,该复合催化剂的磁饱和强度为27.1 A·m<sup>2</sup>/kg,可以顺利通过外加磁场将催化剂从水溶液中提取出来,达到磁分离的目的,从而实现对复合催化剂的回收利用。

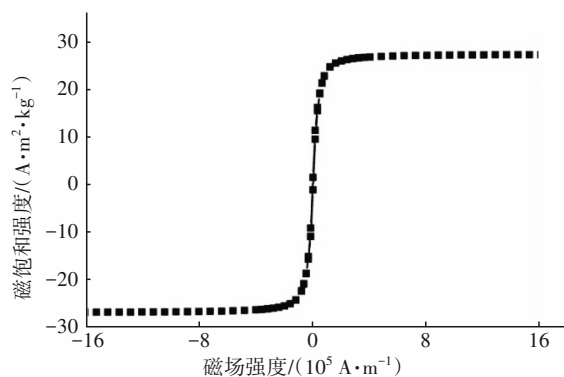


图7 磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂的磁化曲线

Fig.7 Magnetization curve of magnetic TiO<sub>2</sub>/GO composite catalyst

## 3 结论

① 在TiO<sub>2</sub>和GO的质量比为5:1的条件下制得的复合催化剂对垃圾渗滤液的处理效果最好,当催化剂投加比为0.8、反应时间为3 h时,TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂对COD的去除率达到63.14%,渗滤液出水COD浓度为1 887 mg/L;磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂

对COD的去除率达到65.35%,渗滤液出水COD浓度为1 774 mg/L, BOD<sub>5</sub>/COD值提高到了0.45,改善了垃圾渗滤液的可生化性能。

② 通过溶剂热法制备了磁性TiO<sub>2</sub>/GO复合催化剂,该复合催化剂表面粗糙、纯度较高、不含杂质、比表面积较大,并且可以通过外加磁场对其进行回收利用,降低成本的同时减少了催化剂对水体的污染。

## 参考文献:

- [1] 王力功,王健.垃圾渗滤液处理技术发展现状及应用[J].煤炭科学技术,2017,45(S2):55-58.  
WANG Ligong, WANG Jian. Application and development status of leachate treatment technology [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (S2): 55-58(in Chinese).
- [2] YUAN Y C, LIU J D, GAO B, *et al.* Ozone direct oxidation pretreatment and catalytic oxidation post-treatment coupled with ABMBR for landfill leachate treatment[J]. Science of the Total Environment, 2021, 794:148557.
- [3] 李军直,王磊,樊雨欣,等. TiO<sub>2</sub>/氧化石墨烯复合材料的制备及在焦化废水处理中的应用研究[J]. 山东化工, 2020, 49(7):47-48, 60.  
LI Junzhi, WANG Lei, FAN Yuxin, *et al.* Preparation of TiO<sub>2</sub>/graphene oxide and photocatalytic degradation for coking wastewater[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49 (7): 47-48, 60(in Chinese).
- [4] 夏爱清,邢翠娟,于玲,等. TiO<sub>2</sub>-GO复合材料对苯酚废水的吸附行为[J]. 吉林大学学报(理学版), 2021, 59(3):713-718.  
XIA Aiqing, XING Cuijuan, YU Ling, *et al.* Adsorption behavior of TiO<sub>2</sub>-GO composites on phenol wastewater [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2021, 59 (3): 713-718(in Chinese).
- [5] SINA K, RAMI R, DRISSI L B, *et al.* Fluorite-type phase of TiO<sub>2</sub> (co)-doped with (Co, Nb and Ru): first-principles calculations [J]. Bulletin of Materials Science, 2021. DOI:10.1007/s12034-021-02479-2.
- [6] GAMONCHUANG J, BURAKHAM R. Surfactant-coupled titanium dioxide coated iron-aluminium mixed metal hydroxide for magnetic solid phase extraction of bisphenols in carbonated beverages[J]. Heliyon, 2021, 7(5):e06964.
- [7] 蒋宝军,刘卓驿,郭昊程,等. TiO<sub>2</sub>、Cu<sub>2</sub>O和氧化石墨烯复合氧化垃圾渗滤液效能[J]. 中国给水排水, 2021, 37(5):86-90.  
JIANG Baojun, LIU Zhuoyi, GUO Haocheng, *et al.* Combined oxidation efficiency of landfill leachate by TiO<sub>2</sub>, Cu<sub>2</sub>O and graphene oxide [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (5): 86-90(in Chinese).
- [8] 张一兵,吴文菲. 铁掺杂改性二氧化钛的制备及其光催化处理废水[J]. 水处理技术, 2020, 46(8):60-63.  
ZHANG Yibing, WU Wenfei. Preparation of iron doping modified TiO<sub>2</sub> and its photocatalytic treatment of wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46 (8): 60-63(in Chinese).
- [9] 阳小宇. 纳米二氧化钛光催化降解的影响因素[J]. 化工中间体, 2010, 6(11):33-37.  
YANG Xiaoyu. Factors of the photocatalytic degradation about nano-TiO<sub>2</sub> [J]. Chemical Intermediate, 2010, 6 (11): 33-37(in Chinese).
- [10] 张寒旭. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/GO对制药废水的紫外光催化性能及吸附特性的研究[D]. 郑州:郑州大学, 2020.  
ZHANG Hanxu. Study on Photocatalytic Performance and Adsorption Properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/GO on Pharmaceutical Wastewater [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020(in Chinese).
- [11] 唐振平,谢严兴,毕玉玺,等. 磁性介孔二氧化钛/氧化石墨烯复合材料的制备及其对Cd(II)的吸附[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(35):388-394.  
TANG Zhenping, XIE Yanxing, BI Yuxi, *et al.* Preparation of magnetic mesoporous titanium dioxide/graphene oxide composites and their adsorption of Cd ( II ) [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (35): 388-394(in Chinese).
- [12] 李文强. 改性TiO<sub>2</sub>/石墨烯复合物的制备与光催化性能研究[D]. 无锡:江南大学, 2015.  
LI Wenqiang. Preparation and Photocatalytic Properties of Modified TiO<sub>2</sub>/Graphene Composites [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015(in Chinese).

作者简介:蒋宝军(1979- ),男,吉林双辽人,博士,副教授,研究方向为垃圾渗滤液处理技术。

E-mail:67958971@qq.com

收稿日期:2021-07-18

修回日期:2021-09-09

(编辑:任莹莹)