·环境工程·

# 硅藻土处理城市污水技术

蒋小红[1], 曹达文[2], 周恭明[1], 高廷耀[1]
(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 城市污染控制国家工程中心, 上海 200092)

**摘　要**: 本文分析了目前城市污水的水质、水量等特点, 并以此提出适合中国国情的污水处理技术。硅藻土处理城市污水技术是一项物化法污水处理技术, 高效的改性硅藻土污水处理剂是该技术的关键, 在此基础上配合合理的工艺流程和工艺设施, 该技术可实现高效、稳定而又廉价地处理城市污水的目的。但由于这是一项新技术, 在理论和实际工程应用上都还存在一些问题有待解决。

**关键词**: 城市污水的特征; 城市污水处理技术; 硅藻土污水处理剂; 硅藻土性质
**中图分类号**: X703　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1001-2141(2003)11-0073-04

利用硅藻土处理工业废水或生产饮用水的技术已有将近 20 年的研究历史[1], 但将硅藻土用于处理城市污水是近几年才发展起来的。特别是对一些含有较高比例工业废水的城市综合废水的处理, 硅藻土处理技术以其独特的特征而受到业内人士的重视。

## 1　目前城市污水的特征及其处理现状

城市的性质、现有的排水系统、气温、水资源及其经济发展水平等多方面因素都会影响城市污水的特征。目前我国城市污水的主要特点为:

### 1.1　废水的有机质浓度低

其成因是多方面的, 主要有: 我国多数城市的排水系统不完善, 导致雨水、地下水、河塘水和湖泊水等混入排水管网内, 污水浓度被稀释, 随着环保产业和体制的发展, 目前在多数城市, 要求工业废水经过适当的预处理达到有关的工业废水排放标准后, 再排入城市排水管网中, 与缄市生活污水混合进入城市污水处理厂作进一步的处理, 而这些经过预处理的工业废水的有机质浓度已较低, 一般 COD 值在 200mg/L 以下, 进入市政管网后会对城市生活污水产生稀释作用, 特别是当工业废水含量高的时候, 城市废水中总的有机质浓度将会较低。低有机物浓度的城市污水给生物处理造成困难[2-4]。

### 1.2　废水的可生化性差

工业废水的初步处理也往往是采用生化的方法, 所以经过处理后, 留在废水中进入市政管网的有机质往往是难以生物降解的, 废水的 B/C 值较低。因此含有大量工业废水的城市污水的可生化性变差, 不利于生化处理。

### 1.3　废水的成分复杂

虽对排入城市下水道的工业废水有严格的控制, 要求抑制生物处理的有害物质不得超过排水设计规范规定, 但由于各工矿企业废水成分的复杂性和经济技术可能性, 控制的项目不可能是全面的。所以废水中可能会引入一些不利于微生物生长的有害物质或引起活性污泥膨胀的物质, 从而给污水厂的运行和管理带来不便。

### 1.4　废水的水质、水量波动大

对于排水系统不完善的城市, 雨天和旱天的污水量和水质都会有很大的变化[2]。另一方面, 排入市政管网的工业废水的水质、水量会受到各工矿企业的运行状况及排水周期等因素的影响, 从而导致总的城市混合废水的水质、水量的变化。城市污水水质、水量的波动, 给污水厂的处理带来一定的冲击负荷。

一般生化法要求废水的可生化性好, 各营养物比例协调、浓度适宜, 且其中抑制生物增长物质的浓度不高于微生物所能承受的范围, 所以对于目前一些城市的废水, 可能由于废水中含有大量的生物抑制剂或水质水量的波动过大等方面的原因, 其生物处理系统的运行有时会不大正常。而且, 生化法对温度的要求较高, 在低温时, 微生物的活性会变低, 有的甚至可能完全丧失活性, 从而导致某些生化处理单元不能正常运行。所以在冬季, 特别是在一些北方城市, 运用生化处理方法的城市污水处理厂在其运行和管理上会存在很多不便。

另一方面, 生化法处理城市污水的运行费用和投资费用都较高, 一些城市, 特别是很多中小城市, 根本建不起也运行不起。所以这些城市的污水处理, 首先要求进行以较小的投资获得较大的环境效益的一级物化处理, 当条件具备时再实施二级生物处理[5-6]。

鉴于上述等方面的原因, 物化法污水处理技术因其运行稳定可靠、去除重金属、SS、胶体和色度的效果好、投资和运行费用小等优势而受到重视。而天然的矿产资源, 如硅藻土、沸石、膨润土、海边石、凹凸棒石等, 因其具有的独特的理化性能和环境效应而越来越受到人们的关注[7]。

## 2　硅藻土的特性及其污水处理的原理

### 2.1　硅藻土的特性及其改性

硅藻土是古代单细胞低等植物硅藻的遗体堆积后, 经过初步成岩作用而形成的具有多孔性的生物硅质岩。它的主要化学成分是无定性的 $SiO_2$, 并含有少量的 $Al_2O_3$、$Fe_2O_3$、CaO 和有机质等。由于其具有空隙率高、比表面大、比重小、吸附性强、耐

收稿日期: 2003-02-08
作者简介: 蒋小红(1979- ), 女, 浙江温岭人, 同济大学环境科学与工程学院在读研究生, 研究方向: 水污染控制。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

磨、耐酸、热导性低、隔热阻燃、保温隔音等优良特性，被广泛地应用于饮食、建材、化工、橡胶、石化、医药、冶金、涂料、机械、能源、油漆、水处理等行业中[8-10]。而对于污水处理领域，我们关心的主要是硅藻土的表面性质、精度及孔系结构等。

形成硅藻土的硅藻的壳体具有大量的、有序排列的微孔，从而使硅藻土具有很大的比表面积(3.1～60m$^2$/g)[11]。而且硅藻土的表面及孔内表面分布有大量的硅羟基；这些硅羟基在水溶液中离解出 $H^+$，从而使硅藻土颗粒表现出一定的表面负电性[12-13]。

从硅藻土的精度方面考虑，虽然我国硅藻土总的含量位居世界第二，但是其品味普遍较低，大多数产品的 $SiO_2$ 的含量在 50% 左右，利用时应先将硅藻原土进行提纯处理，使其 $SiO_2$ 含量大于 90%。提纯后的硅藻土具有整体一致均匀的微粒和比较干净的表面，从而使得其比表面充分展露出来。所谓一致均匀是指具有一致均匀的大小、外形尺度、表面理化性能等，这是目前人造微粒难以实现的。常用的提纯方法有酸浸法、擦洗法、焙烧法、离旋—选择性絮凝法、干法重力层析分离法、热浮选矿法和综合提纯法等[14]。

不同产地硅藻土的往往具有不同的形状结构和孔系分布[11]，在生产和应用过程中，应予以注意。

为了改善硅藻土污水处理的效果和范围，需对硅藻原土进行提纯、活化、扩容和改性等处理。对硅藻土进行一定的酸、热等活化、扩容处理，可改善硅藻土的一些表面性质，从而提高污水处理的效果。彭书传通过利用等量的酸活化、热活化及未经活化的硅藻土制成的复合净水剂处理印染废水的对比实验表明，酸活化和热活化均可提高硅藻土的处理能力[15]。向硅藻精土中加入一定比例的其他物质，可制成适合不同性质和种类污水的改性硅藻土，既提高了硅藻土的污水处理效果，又扩大了其应用范围。云南王庆中先利用纯物理湿法选矿工艺将低品味的硅藻原土提纯得到硅藻含量为 90%～98% 的硅藻精土，再根据不同的污水类型和水质特征，向此精土中加入不同数量的絮凝剂(硫酸铝、氯化铝、聚丙烯酰胺或三氯化铁等常见的无机或有机絮凝剂)，得到具有很好吸附、混凝作用的改性硅藻土污水处理剂[16-18]。

### 2.2 硅藻土污水处理的原理

硅藻土表面带有负电性，所以对于带正电荷的胶体态污染物来说，它可实现电中和而使胶体脱稳。但城市生活污水或综合废水中的胶体颗粒大多是带负电的，所以如用普通的硅藻土作为污水处理剂，只能起到压缩双电层的作用，而无法使胶体颗粒脱稳，处理效果不佳。所以对硅藻土进行各种方式的改性，使其对带负电的胶体颗粒也能脱稳。如采用铝、铁等带正电荷的离子对其进行表面改性，或加入其他的絮凝剂复合制成改性硅藻土污水处理剂。对于复合其他絮凝剂制成的改性硅藻土处理剂而言，硅藻土一方面可作为形成絮体的骨架，改善矾花的结构，即有助凝的作用，使形成的絮体密实而有较好的沉降性，从而改善了一般的化学絮凝剂产生的矾花松散、不易下沉的状况；另一方面，由于其巨大的比表面积和表面吸附性等，脱稳胶体极易被吸附到硅藻土上，且附着了污染物质的硅藻土颗粒间的相互吸附的能力也大，所以改性硅藻土用于污水处理时，能快速形成粒度和密度较大的絮体，且絮体的稳定性好，甚至当絮体被打碎后，还可发生再絮凝，—这是其他铝盐、铁盐等常用污水絮凝剂所无法比拟的。

硅藻土的巨大比表面、强大吸附性以及表面电性，使得其在污水处理过程中，不但能去除颗粒态和胶体态的污染物质，还能有效地去除色度和以溶解态存在的磷(导致富营养化的主要污染物之一)和金属离子等[19-26]。特别是对于含有较高工业废水比例的城市污水，其可能有较大的色度和较高浓度的金属离子，但对于改性硅藻土处理系统来说，由于其表面带负电，能有效地吸附去除一部分带正电荷的金属离子。

硅藻土用于污水处理时的工艺设备对其处理效果也有很大的影响。通常水力澄清池只用于给水处理领域，而对于一般城市污水的处理，由于污水中含有大量的有机物和微生物，会在形成的污泥悬浮层发生厌氧反应而产生气体，从而会破坏悬浮层的稳定性。但最近的研究发现，在澄清池中增设必要的设施或方法，使悬浮污泥层保持缺氧状态，可有效抑制气体的产生，保证池内形成一个稳定的悬浮污泥层。此工艺相对于竖流式、平流式或辐流式沉淀池而言，可大大减少用药量和提高系统缓冲力。主要是因为污泥悬浮层有筛虑作用，可截留絮体颗粒；悬浮层中没达到其饱和状态的硅藻土，还可进一步吸附絮凝未絮凝的胶体和水中的溶解态污染物，使药剂的潜能大到最大限度的发挥，从而节省药剂的用量。当投药量不足或进水水质、水量有冲击时，反应器内的悬浮层可以帮助吸附、截留水中的污染物，起到一定的缓冲作用，从而提高系统的稳定性。

## 3 硅藻土污水处理技术的典型工艺及其特点

改性硅藻土处理城市污水可采用以下工艺流程：

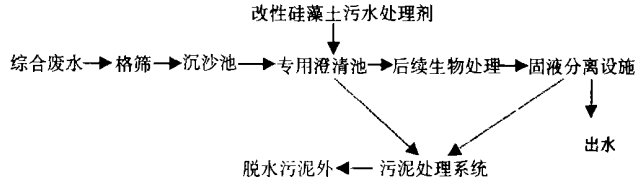



图 1 硅藻土污水处理技术工艺

硅藻土处理单元对污水中 SS、COD、BOD、TP 和重金属离子等有很好的去除效果。根据该工艺，我们在上海市曲阳污水厂进行了中试，系统的进水水质为：$COD_{Cr}$ 为 200～450mg/L，$BOD_5$ 为 130～250mg/L，氨氮为 25～40mg/L，SS 为 150～300mg/L；采用的停留时间为：硅藻土处理单元为 1.5h，后续生物处理单元为 2h；采用的污水处理剂为大理庆中环境工程有限公司生产提供的改性硅藻土。运行结果表明：硅藻土处理单元对于污水中 COD 的去除率在 70% 左右，对 BOD 的去除率在 70% 左右，对 SS 的去除率> 90%，对总磷的去除率> 92%，氨氮的去除率为 30% 左右。而经过后续的生物处理后出水的 $COD_{Cr}$ 则都在 45mg/L 以下，氨氮的硝化率也达到 60% 左右。

硅藻土处理单元的出水中各项污染物的浓度已较低，达到了国家二级排放标准，所以对于出水要求不高的地区和采用深海排放系统的沿海城市，该出水可直接排放。对于出水要求较

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

高的地区, 增加一个二级的生物处理装置即可, 考虑到一级出水中有机质浓度已较低, 二级生物处理系统可采用生物膜法或氧化塘法等, 以进一步降低水中的有机质浓度和去除氨氮。

将改性硅藻土用于城市污水的处理是一项新技术, 其主要的特点是:

(1) 硅藻土处理单元的耐冲击负荷能力强, 处理效果十分稳定, 不易受到温度、水质、水量变化等的影响, 适宜含有较多有毒物质或冲击负荷较大的城市污水的处理。

(2) 该工艺技术先进, 所需设备少, 占地面积小, 工艺流程简单, 操作管理方便, 可实现自动化操作, 而且该工艺的建设工期短。

(3) 硅藻土药剂的用量少, 投加量为 50ppm 左右时即可达到 70% 左右的 COD 去除率, 每 t 污水药剂的费用不超过 0. 10 元, 每 t 污水的运行费在 0. 30 元/$m^3$ 左右。

(4) 硅藻土的脱水性能比一般的生物污泥和其它的化学污泥的要好, 可用离心法或板框压虑机将其脱水至含水率为 58% ～ 60% 左右的泥饼[16]。

(5) 硅藻土污泥的回收利用空间大, 因其是一种天然矿物, 且稳定性好, 经适当的处理, 可回用到农业、污水处理或建材等领域, 所以是一项无二次污染的技术。

## 4　硅藻土污水处理技术有待解决的问题

硅藻土用于城市污水的处理还处于其初期阶段, 在工程实践上可以借鉴的工程实例还较少, 所积累的经验也不多, 从而使其在推广应用上受到一定的限制。在理论上, 硅藻土污水处理的完整的机理还不清楚, 目前的研究主要还是处于黑箱模式阶段, 从而影响了其处理效果和操作运行条件的进一步提高和改善。特别是在硅藻精土的改性上, 其研究的成果还远不能满足根据不同的污水水质特征采用不同的改性硅藻精土的要求[23]。

就目前国际污水处理的形式来看, 污水处理除了去除有机物外, 还要求除磷脱氮。而就上述提出的工艺来说, 虽然能达到较好的除磷效果, 但脱氮的效果不佳。所以, 应开发出更好的组合工艺, 使系统兼具脱氮的功能。

硅藻土是一种利用价值较高的矿物质, 其回收利用的可能性较大, 而目前在实际工程中, 往往都将脱水污泥填埋。考虑到硅藻土的各项理化性质, 及其在其它领域里的应用, 应对其回收利用的途径作进一步的研究, 从而实现污水治理的可持续发展。

## 5　小　结

(1) 物化法处理城市污水是一项适合中国国情的技术, 也是一项适合我国城市污水特征的技术。硅藻土污水处理技术是一项物化的污水处理方法, 其技术的关键是高效硅藻土污水处理剂的生产。采用专用澄清池, 可使该技术达到更好的污水处理效果。

(2) 硅藻土具有比表面积大、表面电性、化学稳定性好等各项优异的理化性质, 是一种优良的污水处理剂。污水处理时, 需将其进行适当的改性处理, 才能有良好的处理效果。

(3) 当出水要求不高时, 改性硅藻土处理污水可以单独作为一个工艺; 否则, 可在其后接生物膜或氧化塘等的后续生物处理装置, 以进一步提高出水的水质。

(4) 硅藻土污水处理技术的稳定性好、操作简单, 特别适合于水质水量波动较大的含工业废水比例较大的城市污水, 且其污水处理的成本低。

(5) 硅藻土污水处理技术还是一项较新的技术, 各方面还不完善, 还需加强理论上和实际工程应用上的进一步研究和探索。

## 6　参考文献


1　于[illegible], 包亚芳. 硅藻土在污水处理中的应用. 中国矿业, 2002, 11(2): 33～36.

2　邵林广. 南方城市污水处理厂实际运行水质远小于设计值的原因及其对策. 给水排水, 1999, 25(2): 11～13.

3　羊寿生, 张辰. 城市污水处理厂设计中热点问题剖析. 给水排水, 1999, 25(9): 1～3.

4　王杉. 对小城市污水处理工程设计的思考. 给水排水, 2001, 27(9): 12～14.

5　杜鹏飞, 杜文涛, 钱易. 一级与二级城市污水处理费用比较. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(4): 73～76.

6　沈耀良, 王宝贞. 论我国城市污水厂建设和处理技术的发展方向. 污染防治技术, 1996, 9(3): 129～133.

7　邓玉珍. 天然矿物在水处理过程中的利用. 国外选矿快报, 1996, (9): 16～20.

8　penn Croosley. Industrial Minerals. 2000(390): 3, 119.

9　Industrial Minerals. 1999(368): 11, 23.

10　Richard Marinshaw. Background Information for Proposed AP- 42 Section 11. 22 (Formerly 8. 29). Diatomite Processing Review and Update Remaining Sections of Chapter 8 (Mineral Products Industry) of AP- 42. U. S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park. 1993.

11　杨宇翔等. 国产硅藻土结构的研究. 化学学报, 1996, 54: 57～64.

12　杨宇翔等. 几种硅藻土表面电化学性质的研究. 无机化学学报, 1997, 13(1): 11～15.

13　袁鹏等. 硅藻土表面酸位及其来源探讨. 矿物学报, 2001, 21(3): 431～434.

14　于[illegible]等. 中国非金属矿——硅藻土提纯研究. 中国矿业, 1998, 7(4): 6～9.

15　彭书传. 硅藻土复合净水剂处理印染废水. 环境科学与技术, 1998, 80(1): 24～25.

16　郑水林, 王庆中. 改性硅藻精土在污水处理中的应用. 非金属矿, 2000, 23(4): 36～37

17　王庆中. 超低品位硅藻土纯物理选矿方法及设备. 中国专利: CN 1184718, 1998.

18　王庆中. 用硅藻精土处理剂处理污水的工艺及设备. 中国专利: CN- 1l840821, 1998.

19　孙国忠等. 硅藻土的比表面及其脱色机理. 玻璃与陶瓷, 1999, 27(5): 16～20, 35.

20　杨宇翔等. 硅藻土脱色机理及其在印染废水中应用的研究. 工业水


© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

处理, 1999, 19(1): 15～17.
21 夏士朋等. 改性硅藻土处理废水中重金属离子. 河南化工, 2001, 5: 24～26.
22 艾志敏. 应用硅藻土处理污水的实验, 云南环境科学, 1999, 18(1): 36～36, 41.
23 张望军. 硅藻土处理城市生活污水可行性探讨. 西南给排水, 2002, 24(2): 9～11.
24 杨宇翔等. 硅藻土脱色机理及其在印染废水中应用的研究. 工业水处理. 1999, 19(1): 15～17.
25 杜玉成等. 某低品味硅藻土提纯及作为污水处理剂的改性研究. 非金属矿, 2001, 24(1): 44～45.
26 王泽民等. 利用硅藻土复合净水剂处理造纸废水的研究. 非金属矿, 1997, 117(3): 33～35.

(上接第 57 页)

光催化氧化的反应速率。但实验发现, $O_3$ 浓度过高也会抑制光催化效率, 原因可能是 $O_3$ 过高也会对·OH 起清除作用, 也可能 $O_3$ 会引起 $TiO_2$ 膜"中毒", 因此 $O_3$ 有一个最佳的浓度范围, 在此范围内才能促进光催化反应, 本文用 400W 高压汞灯作光源处理 pH= 3.3 的垃圾渗滤液, 不同反应体系的 $COD_{Cr}$ 去除率(%)见表 3。

**表 3 不同反应体系对光催化氧化处理垃圾渗滤液的影响**

| 反应体系 | 光照时间(min) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| UV/$TiO_2$ | 12.3 | 17.5 | 19.2 | 21.2 | 25.3 |
| UV/$TiO_2$+ $O_2$ | 18.5 | 23.4 | 28.7 | 31.2 | 33.6 |
| UV/$TiO_2$+ $O_3$ | 19.2 | 25.6 | 31.2 | 29.5 | 27.8 |

3.6 光催化氧化与光氧化的比较

以 10W 低压汞灯作光源, 分别对垃圾渗滤液进行光催化氧化和光氧化处理, 结果见表 4。

**表 4 $TiO_2$ 膜光催化氧化与光氧化处理垃圾渗滤液 $COD_{Cr}$ 去除率比较**

| 反应体系 | 光照时间(min) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| **UV** | 4.1 | 7.8 | 8.5 | 9.2 | 10.3 |
| **UV+ $O_2$** | 9.2 | 12.6 | 13.5 | 14.3 | 15.8 |
| **UV+ $O_3$** | 11.2 | 14.3 | 16.7 | 18.2 | 17.8 |
| **UV+ Fenton** | 17.3 | 21.4 | 25.3 | 28.9 | 30.1 |
| **UV/$TiO_2$+ $O_2$** | 18.5 | 23.4 | 28.7 | 31.2 | 33.6 |

从表 4 可知, $TiO_2$ 膜光催化氧化去除 $COD_{Cr}$ 的效果比一般的光氧化效果都要好, 其效果与 UV + Fenton 反应体系中的光氧化处理效果相当, 因为 Fenton 试剂是亚铁离子和 $H_2O_2$ 的组合, $H_2O_2$ 是强氧化剂, 而 $Fe^{2+}$ 是催化剂, 它能催化分解 $H_2O_2$ 产生的自由基(·OH)等强氧化剂, 因此 UV + Fenton 的光氧化反应也有较好的处理效果。

3.7 玻璃纤维布与其它载体光催化氧化的比较

$TiO_2$ 在不同的载体上, 光降解的速率也会有很大不同。本文中使用不同材料作载体, 在相同条件下, 用高压汞灯作为光源处理垃圾渗滤液, 光照 30min 后取样分析, 结果见表 5。可见玻璃纤维布与玻璃管的效果较好, 而玻璃纤维布易于加工成形, 更便于在实际中推广应用。

**表 5 不同载体对 $TiO_2$ 光催化氧化的影响**

| $TiO_2$ 膜的载体类型 | 不锈钢板 | 不锈钢丝筛网 | 陶瓷 | 玻璃纤维布 | 玻璃 |
|---|---|---|---|---|---|
| $COD_{Cr}$ 去除率(%) | 21.3 | 25.6 | 29.2 | 32.6 | 38.5 |
| $UV_{335}$ 退色率(%) | 41.2 | 48.3 | 49.5 | 53.6 | 57.8 |

## 4 结 语

4.1 玻璃纤维布具有透光性能好、质地柔软、容易进行酸碱处理、适宜浸入 $TiO_2$ 胶体溶液中吸附 $TiO_2$ 凝胶、且能耐高温(450℃左右)、易于制成膜组件并加工成形等特性, 因此, 以溶胶- 凝胶法在玻璃纤维布上制备的 $TiO_2$ 膜, 解决了 $TiO_2$ 的固定化问题。分别以波长为 254nm 低压汞灯和高压汞灯作为光源, 利用 $TiO_2$ 膜光催化氧化处理垃圾渗滤液, 取得了较好的处理效果。

4.2 应用 $TiO_2$ 膜作催化剂的光催化氧化能有效分解垃圾渗滤液中的难降解有机物, 当溶液酸度为 pH1～5 和 pH> 9 时, $TiO_2$ 膜光催化氧化的效果都较好。

4.3 玻璃纤维布上催化剂的负载量存在一个最佳范围, 过高过低均不利于提高光催化氧化反应速率。

4.4 垃圾渗滤液难降解有机物成分较复杂, 经过玻璃纤维布负载 $TiO_2$ 膜的光催化氧化深度处理后, $COD_{Cr}$ 值大约为 200mg/L 左右。

4.5 本文选用的玻璃纤维布的灼烧温度不宜过高, 一般不宜超过 450℃, 超过 450℃玻璃纤维布易产生脆裂, 因而影响其处理效率, 且高于 400℃时, 有一部分 $TiO_2$ 开始转为催化活性较差的金红石型。为了克服这一局限性, 可通过控制马福炉的灼烧温度制备锐钛型的 $TiO_2$ 膜, 选用质量较佳、更耐高温的玻璃纤维布作载体等途径解决。

## 5 参考文献

1 谭小萍, 王国生, 汤克敏. 光催化法深度处理垃圾渗滤液的影响因素. 中国给水排水, 1999, 15(5): 52～54.
2 贺飞, 唐怀军, 赵文宽, 方佑龄. 纳米 $TiO_2$ 光催化剂负载技术研究. 环境污染治理技术与设备, 2001, 2(2): 47～58.
3 魏宏斌, 严煦世. 二氧化钛膜光催化氧化苯酚. 上海环境科学, 1995, 14(10): 31～34.
4 李田, 严煦世, 黄伟星. 固定膜光催化氧化反应器深度净化自来水研究. 中国给水排水, 12(3): 7～10.
5 陈闯, 彭伟棠. 微波密封消解法快速测定 $COD_{Cr}$. 重庆环境科学, 1996, 18(3): 56～58.
6 国家环保总局编. 水和废水监测分析方法. 第 3 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
7 程沧沧, 肖忠海, 张坚亦等. 不锈钢负载 $TiO_2$ 膜光降解印染废水. 环境污染与防治, 2001, 23(5): 241～242.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net