



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101759324 B

(45) 授权公告日 2012.01.18

(21) 申请号 200910259513.3

(22) 申请日 2009.12.17

(73) 专利权人 北京市水利科学研究所

地址 100048 北京市海淀区车公庄西路 21  
号(72) 发明人 申颖洁 廖日红 刘操 孟庆义  
战楠 高振宇(74) 专利代理机构 北京北新智诚知识产权代理  
有限公司 11100

代理人 郭佩兰

(51) Int. Cl.

C02F 9/14(2006.01)

C02F 3/28(2006.01)

C02F 3/10(2006.01)

C02F 1/44(2006.01)

C02F 3/30(2006.01)

(56) 对比文件

CN 101224357 A, 2008.07.23, 说明书第 2 页  
第 4 行 - 第 3 页第 4 行 .JP 特开平 9-66292 A, 1997.03.11, 说明书  
第 13 段 - 第 36 段 .CN 1478737 A, 2004.03.03, 说明书第 1 页最  
后一行 - 第 3 页第 18 行 .CN 201598221 U, 2010.10.06, 权利要求  
1-5.马春燕等. 针织印染废水处理回用的中  
试.《水处理技术》.2008, 第 34 卷 (第 5 期), 第  
74 页第 2 节 - 第 75 页 .

审查员 刘悦

权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 1 页

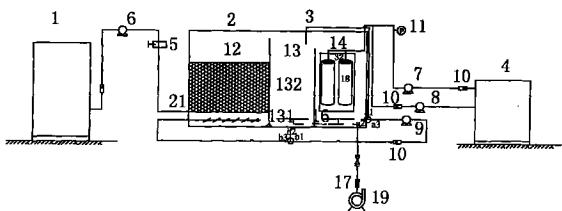
(54) 发明名称

生物滤池 - 陶瓷膜生物反应器装置及应用其  
净化水质方法

(57) 摘要

本发明涉及一种生物滤池 - 陶瓷膜生物反应器装置，其包括进水泵、厌氧生物滤池反应器和陶瓷膜好氧膜生物反应器，该进水泵通过管道与厌氧生物滤池反应器的入水口连接，该厌氧生物滤池反应器的出水口与陶瓷膜好氧膜生物反应器的入水口连接；以及应用该装置净化水质的方法：受污染地表水进入到厌氧滤池反应器内，进行厌氧条件下的生化反应；随后厌氧生物滤池中处理液自流进入陶瓷膜好氧膜生物反应器的生物单元内发生好氧生化反应；之后，溢流进入陶瓷膜好氧膜生物反应器的膜单元内，在真空抽吸泵的作用下，水流通过陶瓷膜组件的膜分离作用后进入清水池；部分处理液由陶瓷膜生物反应器回流进入厌氧生物滤池反应器，进行反硝化反应，回流比为 0.5 ~ 2 : 1。

CN 101759324 B



1. 一种生物滤池 - 陶瓷膜生物反应器装置, 其特征在于, 其包括进水泵 (6)、厌氧生物滤池反应器 (2) 和陶瓷膜好氧膜生物反应器 (3) ;

该进水泵 (6) 通过管道与厌氧生物滤池反应器 (2) 的入水口连接, 该厌氧生物滤池反应器 (2) 的出水口与陶瓷膜好氧膜生物反应器 (3) 的入水口连接;

该厌氧生物滤池反应器 (2) 底部具有入水口 (21), 其内部填充亲水性多孔悬浮型介质 (12) ;

该陶瓷膜好氧膜生物反应器 (3) 包括生物单元 (13) 和膜单元 (14), 其中

生物单元 (13) 的入水口连接厌氧生物滤池反应器 (2) 出水口, 生物单元 (13) 出水口与膜单元 (14) 的入水口连接; 该生物单元 (13) 底部具有曝气装置 (131); 生物单元 (13) 内部填充活性污泥 (132) ;

该膜单元 (14) 内部具有陶瓷膜组件 (18), 该陶瓷膜组件的结构为管式单通道、管式多通道、平板式或中空纤维式, 膜组件出水口 (32) 与外部真空抽吸泵 (7) 连接, 在真空抽吸泵负压作用下, 进入膜单元 (14) 内的污水通过陶瓷膜组件的膜分离作用, 由出口排出; 真空抽吸泵 (7) 的出水口与清水池 (4) 连接。

2. 根据权利要求 1 所述的装置, 其特征在于,

三通阀门 a 分别连接所述生物单元 (13)、膜单元 (14) 和回流泵 (9) 入水口; 回流泵 (9) 出水口通过管道与厌氧生物滤池反应器 (2) 入水口连接;

三通阀门 b 分别连接所述回流泵 (9) 的出水口、厌氧生物滤池反应器 (2) 入水口和生物单元 (13) ;

清水池 (4) 的一个出水口通过管道依次连接反洗泵 (8) 和膜组件出水口 (32) 。

3. 根据权利要求 2 所述的装置, 其特征在于, 所述亲水性多孔悬浮型介质为聚丙烯或聚氨酯。

4. 根据权利要求 3 所述的装置, 其特征在于, 所述膜单元 (14) 的底部还具有曝气装置 (16) 。

5. 应用权利要求 1-4 中任一项所述装置净化水质的方法, 其特征在于, 包括如下步骤:

a. 用进水泵将受污染地表水打入到厌氧滤池反应器内, 污水通过亲水性多孔悬浮型填料, 进行厌氧条件下的生化反应, 控制反应器内污水 pH 值为 6 ~ 8、温度为 5 ~ 35℃、水力停留时间为 0.5 ~ 3.5h、溶解氧浓度为 0.5 ~ 2mg/L;

b. 经过厌氧滤池反应器处理的污水进入陶瓷膜好氧膜生物反应器的生物单元内, 控制反应器内污水的 pH 值为 6 ~ 8、温度为 5 ~ 35℃、溶解氧浓度为 3 ~ 5mg/L、水力停留时间为 1 ~ 5h、污水中污泥浓度为 0.5 ~ 13g/L、污泥停留时间为 30 ~ 60 天、曝气量与进水量之比为 15 ~ 25 : 1;

c. 生物单元内的水进入膜单元, 在真空抽吸泵的作用下, 水流通过陶瓷膜组件的膜分离作用, 由出水口进入清水池。

6. 根据权利要求 5 所述的方法, 其特征在于, 在所述步骤 c 操作的同时通过膜单元底部的曝气装置进行曝气, 曝气量与进水量之比为 35 : 1 ~ 60 : 1。

7. 根据权利要求 5 所述的方法, 其特征在于, 该方法还包括:

d. 生物单元内上清液回流进入厌氧滤池反应器, 回流比为 0.5 ~ 2 : 1;

e. 清水池中的水定期分别回流至厌氧生物滤池反应器和陶瓷膜好氧膜生物反应器进

行反冲洗。

## 生物滤池 - 陶瓷膜生物反应器装置及应用其净化水质方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种水体深度净化及中水回用技术,特别是涉及采用厌氧生物滤池 - 陶瓷膜生物反应器组合工艺技术,属于环境工程技术领域。

### 背景技术

[0002] 随着社会经济的飞速发展,尤其是全球性的需水量增大导致世界水资源短缺和水污染不断加剧,人类对再生水资源化利用和城市水环境整治需求已显得日益紧迫,急需受污染地表水净化技术的研发用以恢复河湖水体功能要求,提高流域水资源利用率和构建良好的生态系统。其中,厌氧生物滤池工艺作为一种淹没式的固定填料生物膜法,因具有对水中有机物及总氮处理效率高,抗冲击负荷能力强,运行稳定,几乎无剩余污泥排放等优点而被广泛应用于污水处理的脱氮工艺中;膜生物反应器 (Membrane Bioreactor, MBR) 水处理技术是将传统的活性污泥法与膜分离技术相结合的一种高效污水处理技术,由于膜的过滤作用,微生物被截留在生物反应器中,实现了水力停留时间和污泥龄的彻底分离,使膜生物反应器内保持较高的生物活性,对化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD) 及氨氮污染物的去除率高。

[0003] 目前,国内外已开发出多种膜生物反应器,主要可分为一体式膜生物反应器和分置式膜生物反应器两大类。由于分置式 MBR 一般均采用高错流速度的运行方式,相对于一体式 MBR 存在着运行能耗略高,占地面积较大等问题,因此一体式膜生物反应器被市场更为广泛的接受和推广。在膜应用过程中,陶瓷膜相比有机膜因具有化学稳定性好、机械强度高、通量大、寿命长、抗污染等优点,现已广泛应用于生物化工、食品工业、环境保护等领域。近年来,很多研究表明,一体式陶瓷膜生物反应器不仅充分体现了陶瓷膜自身的优点,而且具有高效 COD 去除率和减缓膜污染等独特的优点。

[0004] 当前,MBR 被广泛应用于城市污水和工业污水领域。但 MBR 系统在河流污水资源化中的研究仍鲜有报道。由于河湖等地表水的污染程度大大低于城市污水和工业污水,其污染物和有机物的浓度较低,现有的处理城市污水和工业污水的净化装置不适用于地表水的深度净化。因此亟需研发针对地表水的水质特点的净化装置及工艺。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于克服现有低浓度污水深度处理与水体净化技术中 COD 和氨氮去除率较低和现有机高分子分离膜为膜元件的一体化 MBR 系统膜污染严重的不足,提供一种污染地表水深度净化装置及应用该装置净化水质的方法。

[0006] 为此,一方面,本发明提供一种生物滤池 - 陶瓷膜生物反应器装置,其包括进水泵 6、厌氧生物滤池反应器 2 和陶瓷膜好氧膜生物反应器 3;

[0007] 该进水泵 6 通过管道与厌氧生物滤池反应器 2 的入水口连接,该厌氧生物滤池反应器 2 的出水口与陶瓷膜好氧膜生物反应器 3 的入水口连接;

[0008] 该厌氧生物滤池反应器 2 底部具有入水口 21,其内部填充亲水性多孔悬浮型介质

12；

[0009] 该陶瓷膜好氧膜生物反应器 3 包括生物单元 13 和膜单元 14，其中

[0010] 生物单元 13 的入水口连接厌氧生物滤池反应器 2 出水口，生物单元 13 出水口与膜单元 14 的入水口连接；该生物单元 13 底部具有曝气装置 131；生物单元 13 内部填充活性污泥 132；

[0011] 该膜单元 14 内部具有陶瓷膜组件 18，陶瓷膜组件的结构为管式单通道、管式多通道、平板式或中空纤维式，有出口 32 与外部真空抽吸泵 7 连接，在真空抽吸泵负压作用下，进入膜单元 14 内的污水通过陶瓷膜组件的膜分离作用，经出口排出；真空抽吸泵 7 的出水口与清水池 4 连接。

[0012] 如上所述的装置，还可包括

[0013] 三通阀门 a 分别连接所述生物单元 13、膜单元 14 和回流泵 9 入水口；回流泵 9 出水口通过管道与厌氧生物滤池反应器 2 入水口连接；

[0014] 三通阀门 b 分别连接所述回流泵 9 的出水口、厌氧生物滤池反应器 2 入水口和生物单元 13；

[0015] 清水池 4 的一个出水口通过管道依次连接反洗泵 8 和陶瓷膜组件出口 32。

[0016] 如上所述的装置，其中，该亲水性多孔悬浮型介质优选为聚丙烯或聚氨酯。介质湿密度优选为  $0.6 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$ ，持水量优选为 2000-2600%，比表面优选为  $80-120 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

[0017] 如上所述的装置，其中，该陶瓷膜组件的结构优选为管式单通道、管式多通道、平板式或中空纤维式。

[0018] 如上所述的装置，其中，该膜单元 14 的底部还可具有曝气装置 16。

[0019] 另一方面，本发明提供利用上述装置净化水质的方法，其包括如下步骤：

[0020] a. 用进水泵将受污染地表水打入到厌氧滤池反应器内，污水通过亲水性多孔悬浮型填料，进行厌氧条件下的生化反应，控制反应器内污水 pH 值为  $6 \sim 8$ 、温度为  $5 \sim 35^\circ\text{C}$ 、水力停留时间为  $0.5 \sim 3.5 \text{ h}$ 、溶解氧浓度为  $0.5 \sim 2 \text{ mg/L}$ ；

[0021] b. 经过厌氧滤池反应器处理的污水进入陶瓷膜好氧膜生物反应器的生物单元内，控制反应器内污水的 pH 值为  $6 \sim 8$ 、温度为  $5 \sim 35^\circ\text{C}$ 、溶解氧浓度为  $3 \sim 5 \text{ mg/L}$ 、水力停留时间为  $1 \sim 5 \text{ h}$ 、污水中污泥浓度为  $0.5 \sim 13 \text{ g/L}$ 、污泥停留时间为  $30 \sim 60 \text{ 天}$ 、曝气量与进水量之比为  $15 \sim 25 : 1$ ；

[0022] c. 生物单元内的水进入膜单元，在真空抽吸泵的作用下，水流通过陶瓷膜组件的膜分离作用，由出水口进入清水池。

[0023] 如上所述的方法，在所述步骤 c 操作的同时可通过膜单元底部的曝气装置进行曝气，曝气量与进水量之比为  $35 : 1 \sim 60 : 1$ 。

[0024] 如上所述的方法，该方法还可包括：

[0025] d. 生物单元内上清液回流进入厌氧滤池反应器，回流比为  $0.5 \sim 2 : 1$ ；

[0026] e. 清水池中的水定期分别回流至厌氧生物滤池反应器和陶瓷膜好氧膜生物反应器进行反冲洗。

[0027] 由于河流污水与工业废水、生活污水相比污染物成分不同且浓度较低，因而应用现有生物法处理效果不理想。采用本发明的厌氧生物滤池-陶瓷膜生物反应器进行污水深度处理，与同类生物法相比可维持较高好氧微生物浓度的同时，保证高效的 COD 和氨氮去

除率。其中，采用厌氧生物滤池功能单元进行反硝化脱氮反应，采用陶瓷膜生物反应器功能单元进行好氧活性污泥与膜分离过程中，能同时去除水中 COD，并且减缓膜污染，提高出水稳定性。两个功能单元的组合工艺，既可灵活控制运行条件，又能因地制宜的适应目标河流水质特点，是发挥厌氧生物滤池 - 好氧膜生物反应器最佳效能和达到最佳处理效果的有效途径。

[0028] 使用本发明提出的受污染地表水深度净化方法，其水力负荷适用范围为  $10 \sim 40 \text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ，对水体中各污染物的去除效果为 COD 去除率超过 67%， $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  的去除率超过 90%，TN 的去除率均超过 52%。

[0029] 本发明提出的厌氧生物滤池 - 陶瓷膜好氧膜生物反应器组合工艺的深度净化法，具有生物降解、生物吸附、机械过滤、膜分离作用以及化学转化等多种功能，不仅通过机械过滤和膜分离作用完成对悬浮固体的去除，而且通过生物吸附、生物降解、机械过滤与膜分离等作用实现对水中有机物和氨氮的高效去除。此外，由于采用陶瓷膜作为膜组件的核心单元，使膜生物反应器出水水质稳定，膜污染现象得到根本减缓。

[0030] 本发明的主要优点是：(1) 实现反硝化脱氮与好氧去除有机污染物的高效功能性组合；(2) 组合工艺出水水质稳定，膜污染现象得到减缓；(3) 对于微污染水体的处理针对性强、效果好；(4) 自动化程度高、操作管理方便、系统适应性与实用性强。

## 附图说明

[0031] 图 1 为本发明的生物滤池 - 陶瓷膜生物反应器装置结构示意图。

[0032] 图 2 为本发明的厌氧生物滤池结构示意图。

[0033] 图 3 为本发明的陶瓷膜好氧膜生物反应器结构示意图。

## 具体实施方式

[0034] 以下结合附图和具体实施例对本发明进行进一步详细说明。

[0035] 本发明所提出的装置及污染地表水深度净化方法，是针对河流污水净化的生化处理技术。图 1 所示为本发明所提出的生物滤池 - 陶瓷膜生物反应器装置一种优选实施方式的结构示意图，该装置主要包括原水池 1、进水泵 6、毛发收集器 5、厌氧生物滤池反应器 2、陶瓷膜好氧膜生物反应器 3、陶瓷膜组件 18、清水池 4、鼓风机 19、进水泵 6、真空抽吸泵 7、回流泵 9、反洗泵 8、液体流量计 10、三通活塞 a、b、填料和管道等组成。进水泵 6 通过管道依次连接毛发收集器 5 和厌氧生物滤池反应器 2 的入水口，厌氧生物滤池反应器 2 的出水口与陶瓷膜好氧膜生物反应器 3 的生物单元 13 连接，生物单元 13 的出水口连接膜单元 14。如图 2 所示，该厌氧生物滤池反应器 2 底部具有入水口 21，其内部填充亲水性多孔悬浮型介质聚丙烯或聚氨酯 12。如图 1 和 3 所示，生物单元 13 底部具有曝气装置 131，曝气装置连接鼓风机 17；生物单元 13 内部填充活性污泥 132；膜单元 14 内部具有陶瓷膜组件 18，该陶瓷膜组件为中空的密闭结构，膜组件出水口 32 与外部真空抽吸泵 7 连接，在真空抽吸泵负压作用下，进入膜单元 14 内的污水通过陶瓷膜组件的膜分离作用，经出口 32 排出，该陶瓷膜组件可以是管式陶瓷膜组件、板式陶瓷膜组件或中空纤维陶瓷膜组件；真空抽吸泵 7 的出水口与清水池 4 连接；膜单元 14 的底部设置有曝气装置 16，曝气装置 16 连接鼓风机 17。三通阀门 a 分别连接生物单元 13、膜单元 14 和回流泵 9 入水口；回流泵 9 出水口通过管道

与厌氧生物滤池反应器 2 入水口连接。三通阀门 b 分别连接回流泵 9 的出水口、厌氧生物滤池反应器 2 入水口和生物单元 13。清水池 4 的出水口通过管道依次连接反洗泵 8 和陶瓷膜组件出口 32。进水泵 6、真空抽吸泵 7、回流泵 9 及反洗泵 8 的流量分别加设液体流量计 10 进行控制。

[0036] 本发明所提出的污染地表水深度净化工艺的一种优选操作步骤如下：

[0037] (1) 污水首先从原水池 1 下端经进水泵 6 和毛发收集器 5 进入厌氧生物滤池 2，通过填料 12 及所挂生物膜去除部分 SS 及  $BOD_5$ ，停留时间为 0.5 ~ 3.5h；

[0038] (2) 之后污水从厌氧生物滤池 2 的上端自流进入相邻的生物单元 13，生物单元池底设置穿孔管曝气装置 131，通过鼓风机 19 进行供气，气量由气体流量计 17 进行控制；池内污水通过活性污泥好氧微生物生化作用去除  $BOD_5$  及  $NH_4^+-N$ ，水力停留时间为 1 ~ 5 小时；

[0039] (3) 其后，污水溢流进入相邻的膜单元 14，通过真空抽吸泵 7 将水经管式陶瓷膜组件 18 进行过滤后进入清水池 4，负压由真空压力表 11 进行读取；池底设置穿孔管曝气装置 16，通过鼓风机 19 进行供气，气量由气体流量计 17 进行控制；池内污水通过膜的截留和生物膜的生化作用去除 SS 和部分  $BOD_5$  及  $NH_4^+-N$  的同时，微生物也被截留在池内。

[0040] (4) 打开三通阀门，使 a1 和 a3、b1 和 b3 分别连接，使生物单元 13 中一部分污水通过回流泵 9 回流至厌氧生物滤池 2，进行反硝化反应，去除 TN 及部分  $BOD_5$  及  $NH_4^+-N$ ；回流比为 0.5 ~ 2 : 1。

[0041] (5) 通过泵 8 将清水池 4 中的水反压进入管式陶瓷膜组件 18 进行反洗，反洗周期为 20 ~ 40min；

[0042] (6) 打开三通阀门，使得 a2 与 a3、b1 与 b2 分别连通，将膜单元 14 的富集污泥回流部分至生物单元 13，回流周期为 30 ~ 60d。

[0043] 实施例 1：

[0044] 原水为北京地区某实验河段的污染河水，应用上述装置处理，水力负荷为  $40m^3/m^2 \cdot d$ 。原水自池体下端进入厌氧生物滤池单元，通过聚氨酯填料，漫流至池体上端，进行厌氧条件下的生化反应，溶解氧浓度控制在 0.5 ~ 2mg/L，水力停留时间为 3h，以缓冲试剂控制 pH 值为 6 ~ 8、温度为 24 ~ 28°C，填料湿密度为  $0.8g/cm^3$ ，持水量为 2400%，比表面为  $100m^2/g$ ；厌氧生物滤池出水从好氧膜生物反应器生物单元上端自流进入，进行好氧微生物的生化反应，通过穿孔管曝气，曝气量与进水量之比为 20 : 1，溶解氧浓度控制在 3 ~ 4mg/L，水力停留时间为 3h，pH 值为 7 ~ 8、温度为 24 ~ 25°C，污水中污泥浓度为 1 ~ 2g/L，污泥停留时间为 50 天；混合液通过溢流口进入其内设置有管式陶瓷膜组件（广东佛陶集团金刚新材料有限公司制造）的膜单元内，在真空抽吸泵的作用下，使其通过膜表面进行过滤后进入清水池，膜单元内曝气量与进水量之比为 40 : 1，溶解氧浓度控制在 5mg/L，pH 值为 7 ~ 8、温度为 24 ~ 25°C，污水中污泥浓度为 2 ~ 3g/L；一部分混合液由生物单元回流至厌氧生物滤池底端，回流比控制在 1.5 : 1；清水池清水每隔 30min 泵入膜组件进行负压清洗；每隔 45 天将陶瓷膜生物反应器膜单元的富集污泥回流部分至生物单元。

[0045] 经检测：进水 CODcr、 $BOD_5$ 、 $NH_4^+-N$  及 TN 分别在 60 ~ 150mg/L、10 ~ 50mg/L、13 ~ 20mg/L、18 ~ 25mg/L 时，出水 CODcr、 $BOD_5$ 、 $NH_4^+-N$  及 TN 维持在 20 ~ 30mg/L、3 ~ 8mg/L、1 ~ 2mg/L、8 ~ 12mg/L 之间，各项污染物平均去除率分别达到 67%、70%、90% 和 52% 以上。

[0046] 实施例 2：

[0047] 原水为北京地区某实验河段的重污染河水，应用上述装置处理，水力负荷  $25\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 。原水自池体下端进入厌氧生物滤池单元，通过聚氨酯填料，漫流至池体上端，进行厌氧条件下的生化反应，溶解氧浓度控制在  $0.5 \sim 2\text{mg/L}$ ，水力停留时间为 3h，以缓冲试剂控制 pH 值为 6 ~ 8、温度为  $20 \sim 28^\circ\text{C}$ ，填料湿密度为  $0.8\text{g/cm}^3$ ，持水量为 2400%，比表面为  $100\text{m}^2/\text{g}$ ；厌氧生物滤池出水从好氧膜生物反应器的生物单元上端自流进入，进行好氧微生物的生化反应，通过穿孔管曝气，曝气量与进水量之比为 25 : 1，溶解氧浓度控制在  $3 \sim 5\text{mg/L}$ ，水力停留时间为 3h，pH 值为 7 ~ 8、温度为  $24 \sim 28^\circ\text{C}$ ，污水中污泥浓度为  $3 \sim 5\text{g/L}$ ，污泥停留时间为 60 天；混合液通过溢流口进入其内设置有板式陶瓷膜组件（南京九思高科技有限公司制造）的膜单元内，在真空抽吸泵的作用下，使其通过膜表面进行过滤后进入清水池，膜单元内曝气量与进水量之比为 50 : 1、pH 值为 7 ~ 8、温度为  $24 \sim 25^\circ\text{C}$ ，污水中污泥浓度为  $4 \sim 6\text{g/L}$ ，溶解氧浓度控制在  $5 \sim 6\text{mg/L}$ ；一部分混合液回流至厌氧生物滤池底端，回流比控制在 1.5 : 1；清水池清水每隔 30min 泵入膜组件进行负压清洗；每隔 45 天将陶瓷膜生物反应器膜单元的富集污泥回流部分至生物单元。

[0048] 经检测：进水 CODcr、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及 TN 分别在  $100 \sim 200\text{mg/L}$ 、 $40 \sim 70\text{mg/L}$ 、 $13 \sim 20\text{mg/L}$ 、 $18 \sim 25\text{mg/L}$  时，出水 CODcr、 $\text{BOD}_5$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及 TN 维持在  $20 \sim 40\text{mg/L}$ 、 $3 \sim 8\text{mg/L}$ 、 $1 \sim 2\text{mg/L}$ 、 $8 \sim 12\text{mg/L}$  之间，各项污染物平均去除率分别达到 70%、80%、90% 和 50% 以上。

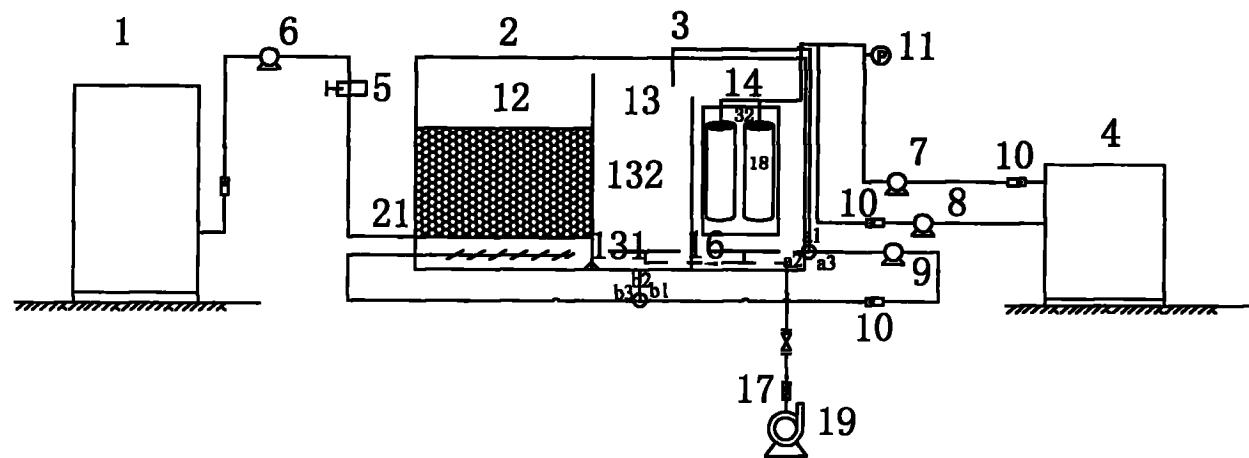


图 1

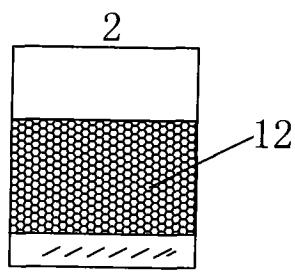


图 2

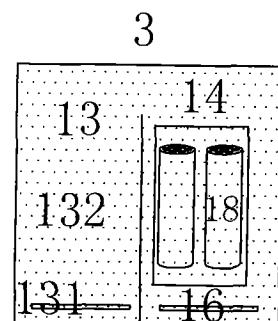


图 3