

# 再生水曝气生物滤池填料优选研究

张亚维<sup>1,2</sup> 白宇<sup>2</sup> 甘一萍<sup>2</sup> 胡俊<sup>2</sup> 张文超<sup>2</sup>

(1 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100124)

**摘要** 分别对不同填料物理化学性能及其对再生水的处理效果进行研究。结果表明:填料的物理化学性能直接影响微生物的附着、生长和生物膜的形成,进而影响其对再生水的处理效果;填料的粒径小,比表面积大,单位体积的生物量多,对污染物的去除效果好,出水水质稳定;填料的破损率和磨损率相对较小,有助于减少实际工程中填料的耗损,降低运行成本,并可以保障微生物的生长空间。在实际水处理过程中,可根据不同填料去除污染物的特性进行填料的优选与应用。

**关键词** 曝气生物滤池 填料 物理化学性能 去除效果

## 0 前言

曝气生物滤池(BAF)工艺研究始于20世纪80年代末90年代初,是在普通生物滤池的基础上,借鉴快滤池的工艺原理而开发的新型水处理工艺<sup>[1]</sup>。它具有生物量大、挂膜启动快、处理效率高、出水水质好、抗冲击负荷能力强、占地面积小、基建投资省和运行费用低等特点。因其具备这些特点,近年来被广泛应用于污水处理厂升级改造及新建水厂的再生水生产中。目前北京市为了恢复地表水体功能,正在积极进行污水处理厂的升级改造及再生水厂的新建工作,要求出水大部分指标达到地表Ⅳ类要求,该要求严于现行的再生水系列标准。根据北京市相关规划,总处理量为28万m<sup>3</sup>/d的3座新建再生水厂将采用曝气生物滤池工艺进行再生水生产。曝气生物滤池主要是利用填料的物理拦截和填料上生物膜的生物降解双重作用来将污染物加以去除<sup>[2]</sup>。填料作为曝气生物滤池的核心部分,其物理化学性能决定了反应器内附着生长的生物量,也影响了内部传质效果。因此,填料的选择是曝气生物滤池的关键,直接影响着该工艺处理效能的优劣、基建运行成本的高低及能否在水处理中得到更广泛的推广与应用<sup>[3~5]</sup>。

本文重点进行曝气生物滤池填料优选研究,通过对不同填料物理化学性能分析及运行效果对比,实现填料的优选,从而为曝气生物滤池的设计运行提供技术指导。

## 1 试验装置及流程

### 1.1 试验材料

试验采用6根直径0.3m的生物滤柱进行平行试验,装置编号分别为1#~6#。反应器总高为3m,填料层高2m,承托层高0.2m,承托层下部缓冲配水区高0.3m,考虑到反冲洗时填料的膨胀,清水区高0.4m,超高0.1m。本试验采用上向流运行方式,气、水均由底部进入滤池,流程见图1。

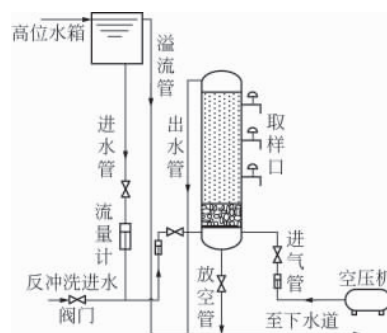


图1 试验装置工艺流程

### 1.2 水质情况

试验进水采用高碑店污水处理厂二级出水,根据需要投加氯化铵调节进水氨氮负荷。表1为进水水质情况。

表1 试验进水水质

| 项目 | 温度/℃  | TOC<br>/mg/L   | COD <sub>Mn</sub><br>/mg/L | NH <sub>3</sub> -N<br>/mg/L | 浊度<br>/NTU     |
|----|-------|----------------|----------------------------|-----------------------------|----------------|
| 数值 | 23~29 | 5.35~<br>12.12 | 6.04~<br>11.6              | 3.07~<br>6.31               | 0.856~<br>1.54 |

### 1.3 分析方法

填料的物理化学性能均采用《水处理用滤料》

(CJ/T 43—2005)标准方法进行测定,COD采用高锰酸钾法测定,TOC采用 MultiN/C2100TOC 仪测定, $\text{NH}_3\text{—N}$ 采用纳氏试剂分光光度法,浊度采用 HACH2100N 浊度仪测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同填料物理化学性能分析

试验中考察了 6 种填料(1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>)的粒径范围、颗粒强度、堆积密度、真实密度、比表面积、比孔隙体积、灼烧减率、盐酸溶解率、不均匀系数、磨损率和破损率之和。1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>为不同厂家生产的陶粒,5<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>为不同厂家生产的火山岩,试验结果见表 2。

表 2 填料物理化学性能参数

| 测试项目                            | 1 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> | 4 <sup>#</sup> | 5 <sup>#</sup> | 6 <sup>#</sup> |
|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 粒径范围/mm                         | 2~4            | 2~4            | 2~4            | 2~4            | 3~5            | 2~4            |
| 颗粒强度/N                          | 209.88         | 141.65         | 61.2           | 165.78         | 137.48         | 66.18          |
| 堆积密度/g/cm <sup>3</sup>          | 0.734          | 0.817          | 0.912          | 0.998          | 0.925          | 0.946          |
| 真实密度/g/cm <sup>3</sup>          | 1.55           | 1.743          | 2.06           | 2.116          | 1.62           | 2.14           |
| 比表面积/m <sup>2</sup> /g          | 3.285          | 1.53           | 3.055          | 0.574          | 0.996          |                |
| 比孔隙体积/<br>10 <sup>-4</sup> mL/g | 15.44          | 9.644          | 17.90          | 3.767          | 6.651          |                |
| 灼烧减率/%                          | 0.86           | 0.54           | 0.78           | 0.02           | 0.48           | 0.94           |
| 盐酸溶解率/%                         | -0.2           | 0.221          | 1.07           | 1.2            | 1.6            | 4.53           |
| 不均匀系数                           | 1.56           | 1.66           | 1.38           | 1.74           | 1.33           | 1.70           |
| 磨损率和破损<br>率之和/%                 | 4.21           | 5.38           | 2.38           | 7.20           | 5.34           | 3.76           |

填料粒径是影响 BAF 处理效能的重要参数。一般来说,填料粒径越小,越有利于微生物的附着生长。但填料粒径越小,滤池越容易堵塞,运行周期越短,需频繁反冲洗,且不易发挥深层填料的作用。因此,填料粒径选择时,需同时考虑滤池处理效能及运行周期,根据滤池进水水质和处理要求进行优化选择。由于再生水 BAF 工艺中进水有机物及悬浮物浓度较低,粒径宜选择 2~4 mm 的填料。

在 BAF 运行过程中,填料之间存在着不同强度的水力剪切及相互摩擦挤压作用,所以填料必须满足一定的强度要求<sup>[6]</sup>。从表 2 可以看出,不同填料的颗粒强度差别较大,1<sup>#</sup>强度最大,达到 209.88 N,2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>居中,3<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>强度仅为 61.2 N 和 66.18 N。填料只有具备足够的强度,才能承受一定的摩擦挤压和水力剪切,使布水布气均匀,流态稳定。

填料密度直接关系到 BAF 的反冲洗强度。填

料密度越大,反冲洗强度越大,需要的能耗越大,对其冲刷磨损越大;而密度越小,所需的能耗随之减小,但密度过小,填料容易上浮,易出现跑料现象。因此在填料优选时,需测定其密度。堆积密度是指一定填料的质量与其堆积体积之比,而真实密度是指在密实状态下单位体积内固体物质的质量,等于一定填料的质量与刨除内部孔隙体积的单个填料的体积总和之比。通常真实密度大于堆积密度。从表 2 可以看出,6 种填料的堆积密度均小于 1 g/cm<sup>3</sup>,真实密度均大于 1.5 g/cm<sup>3</sup>。BAF 最佳填料密度应该是在保证填料挂膜后与微生物形成新的整体后所具有的密度,既不上浮又能最大程度降低反冲洗能耗。

比表面积和比孔隙体积反映了填料的孔隙率和孔径的综合特征,二者之间具有一定的正相关性。比表面积和比孔隙体积越大,越有利于微生物附着、生长和生物膜形成,并有利于促进主体相和生物膜内部溶解氧、底物及代谢产物的传质过程。从表 2 可以看出,不同填料比表面积差别较大,1<sup>#</sup>比表面积最大为 3.285 m<sup>2</sup>/g,而 4<sup>#</sup>比表面积最小仅为 0.574 m<sup>2</sup>/g;比孔隙体积差别也较大,3<sup>#</sup>比孔隙体积最大为 17.9×10<sup>-4</sup> mL/g,而 4<sup>#</sup>比孔隙体积最小仅为 3.767×10<sup>-4</sup> mL/g。

鉴于再生水水源特征,填料应具有一定的抗腐蚀性,同时不参与生物膜的生物化学反应,且本身不可被生物降解。从表 2 可以看出,除 6<sup>#</sup>盐酸溶解率为 4.53%,其他填料的盐酸溶解率均小于 2%,且不同填料灼烧减率均小于 1%,说明 6 种填料的抗腐蚀性和化学稳定性均较好。

填料的不均匀系数越接近于 1,表明填料均匀性越好,布水布气越均匀,对污染物的去除效果越好。从表 2 可以看出,6 种填料的不均匀系数为 1.3~1.8,均大于 1,相比之下,5<sup>#</sup>均匀性最好,4<sup>#</sup>均匀性最差。

填料的磨损率和破损率对曝气生物滤池的处理效果也有很大影响。填料的磨损率和破损率越大,在运行过程中越易破碎,生物膜越易脱落,不但影响出水水质,还会因为需要补加填料造成运行成本的上升。从表 2 以看出,3<sup>#</sup>磨损率和破损率之和最小为 2.38%,4<sup>#</sup>磨损率和破损率之和最大为 7.2%,不能满足《水处理用人工陶粒滤料(CJ/T 229—2008)》中小于 6%的要求,因此将其更换为粒径 3~

5 mm 的陶粒。

## 2.2 不同填料挂膜比较

试验采用原水挂膜,挂膜方式为连续流,流速 1 m/h, HRT 2 h, 气水比 4 : 1。挂膜期间,定时监测 6 个滤柱的进出水  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{NH}_3\text{—N}$  浓度。

曝气生物滤池在进行再生水处理过程中除了进行剩余有机物及悬浮物的进一步去除,还进行  $\text{NH}_3\text{—N}$  的去除。因此,滤池启动成功的标志应由有机物和  $\text{NH}_3\text{—N}$  共同表征。由于硝化细菌是自养菌,其繁殖速度慢于异养菌,而且在再生水处理中,原水中的有机物一般都很低,异养菌生长状况不稳定,对有机物的去除也不稳定。因此再生水曝气生物滤池以  $\text{NH}_3\text{—N}$  具有稳定的去除率作为启动成功的标志,当  $\text{NH}_3\text{—N}$  去除率稳定在 50% 以上,表明挂膜启动成功。

从图 2 和图 3 可以看出,挂膜期间,6 种填料曝气生物滤池对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除效果一般,而对  $\text{NH}_3\text{—N}$  的去除效果非常理想,在运行一周之后  $\text{NH}_3\text{—N}$  去除率在 90% 以上,出水  $\text{NH}_3\text{—N} < 0.5 \text{ mg/L}$ 。说明此时硝化菌已经培养成熟,并表现出稳定的去除效果,标志挂膜启动成功。从图 3 还可以看出,陶粒比火山岩启动要快,4<sup>#</sup> 虽然也是陶粒,但启动明显慢于 3<sup>#</sup>,6<sup>#</sup> 出水  $\text{NH}_3\text{—N}$  浓度较高。分析其原因,是由于不同填料的物理化学性能差异造成的。陶粒比火山岩的比表面积要大,生物膜易附着生长,挂膜速度快,易启动成功。4<sup>#</sup> 粒径比 3<sup>#</sup> 大,生物膜不易附着,容易随水流流出,因此启动比 3<sup>#</sup> 慢。6<sup>#</sup> 不均匀系数大,布水布气不易均匀,影响了微生物的硝化作用,导致  $\text{NH}_3\text{—N}$  去除率较低,出水  $\text{NH}_3\text{—N}$  浓度相对较高。

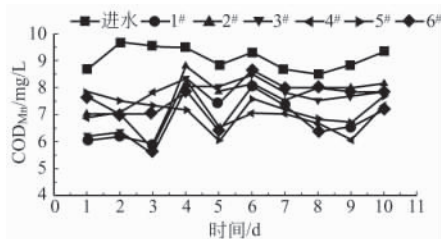


图 2 不同填料曝气生物滤池对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除效果

## 2.3 不同填料去除效果比较

### 2.3.1 对有机物的去除作用

从图 4 可以看出,在进水有机物浓度较低的情

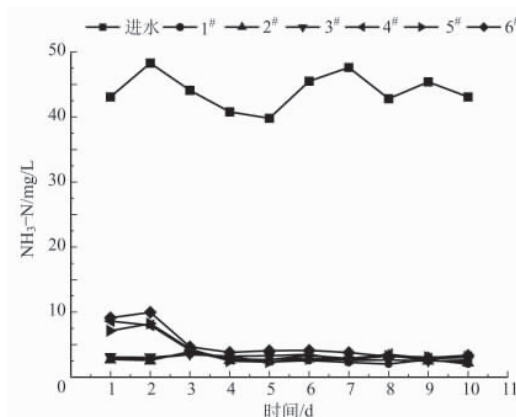


图 3 不同填料曝气生物滤池对  $\text{NH}_3\text{—N}$  的去除效果

况下,1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup> 填料对进一步去除原水中的 TOC 的效果并不明显,对冲击负荷的耐受能力较强,其平均去除率分别为 17.16%、16.94%、20.66%、19.8%、21.03%、20.55%。从上述数据可以看出,5<sup>#</sup> 对 TOC 的平均去除效果最好,这与 5<sup>#</sup> 的不均匀系数有关。5<sup>#</sup> 的不均匀系数最接近于 1,说明其均匀性最好,布水布气最均匀,有利于溶解氧和底物的传输,因此对 TOC 的去除效果最好。1<sup>#</sup> 和 2<sup>#</sup> 的不均匀系数较大,布水布气不易均匀,填料及生物膜容易随水流流出,影响出水水质。

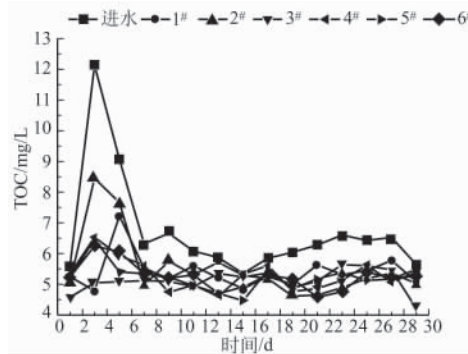


图 4 不同填料曝气生物滤池对 TOC 的去除效果

从图 5 可以看出,曝气生物滤池对低浓度有机物仍具有一定的去除效果。微生物利用水中的基质进行生长繁殖,在填料表面及孔隙内形成微生物聚合体,产生生物膜,对水中有机物进行生物降解。填料上的生物膜对污水中的有机物除了生物降解之外,还有生物膜絮体减少了填料之间的空隙,对污水中的有机物起到一定的吸附和截留作用。在试验过程中,进水有机物浓度波动较大,但不同填料 BAF 的出水比较稳定,说明不同填料

BAF 对有机物具有良好的去除效果,并具有一定的抗冲击负荷能力。1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup> 填料对 COD<sub>Mn</sub> 的平均去除率分别为 22.61%、22.31%、25.11%、22.36%、22.42%、22.92%。3<sup>#</sup> 比表面积较大,破损率和磨损率较小,填料不易破碎,生物膜附着能力强,生物量大,对 COD<sub>Mn</sub> 去除效果好。说明不同填料对 COD<sub>Mn</sub> 的去除除了与填料的比表面积有关,还与填料的破损率和磨损率有关,实际工程中能够验证这一结论。

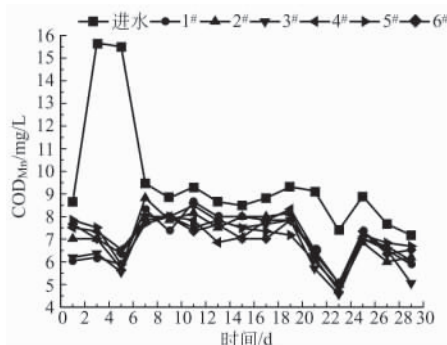


图 5 不同填料曝气生物滤池对 COD<sub>Mn</sub> 的去除效果

### 2.3.2 对氨氮的去除作用

在 BAF 中,一些生长较慢的微生物如硝化菌等可在反应器内不断积累。反应器内具有足够的溶解氧,就能促进生物膜上硝化菌的生长和代谢活动。

从图 6 可以看出,不同填料曝气生物滤池对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果相当,进水 NH<sub>3</sub>-N 浓度在 3~6.5 mg/L 之间,出水 NH<sub>3</sub>-N 浓度基本都稳定在 0.5 mg/L 以下。1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup> 填料 BAF 的平均去除率分别为 93.74%、93.25%、92.93%、91.53%、91.68%、90.33%。从整个试验效果来看,填料的粒径小,比表面积大,单位体积内的生物量大,对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果好。3<sup>#</sup> 比 4<sup>#</sup> 的去除效果好,说明小粒径填料对 NH<sub>3</sub>-N 的去除比大粒径填料要好。填料的粒径大,间接导致填料之间的空隙大,容纳截留的悬浮物多,在一定程度上限制了硝化菌对溶解氧和有机营养物质的利用,致使形成的生物膜相对较少,因此限制了 NH<sub>3</sub>-N 的去除。不同材质的填料在 NH<sub>3</sub>-N 的去除上表现有所差别,陶粒因其比火山岩具有更大的比表面积和比孔隙体积,具备易于生物膜附着的表面和孔隙,更利于硝化菌的生长繁殖,因而对 NH<sub>3</sub>-N 具有更好的去除效果。

### 2.3.3 对浊度的去除作用

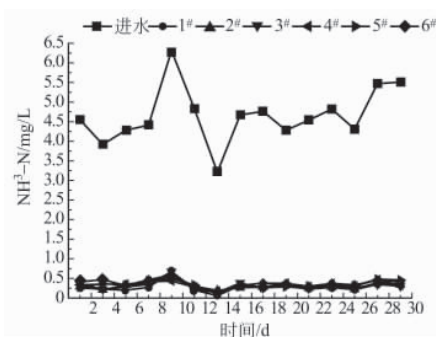


图 6 不同填料曝气生物滤池对 NH<sub>3</sub>-N 的去除效果

从图 7 可以看出,6 种填料对浊度的去除率均到 50%左右,出水浊度在 1 NTU 以下。主要是由于上向流运行方式,曝气会吹脱一部分生物膜,随出水流出,致使浊度去除率不高。相比之下,3<sup>#</sup> 对浊度的去除效果比 4<sup>#</sup> 要好,这与填料的粒径有关。填料的粒径越小,对悬浮物的截留能力越强,对浊度的去除效果越好,但填料粒径较小时,滤池容易堵塞,需频繁反冲洗;而大粒径填料可克服上述问题,但对细小悬浮物的截留能力较差,因此对浊度的去除能力有所下降。

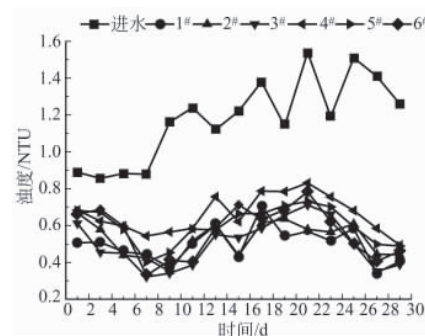


图 7 不同填料曝气生物滤池对浊度的去除效果

### 2.4 不同填料滤池反冲洗恢复情况比较

反冲洗目的主要是为了去除填料表面截留的悬浮物、填料表面老化的生物膜,使生物膜得到更新,恢复填料的去除能力。本试验采用气水联合反冲洗。滤池的反冲洗强度和时间受填料的物理化学性能参数的影响。反冲洗强度过低达不到反冲洗目的,过高会使生物膜严重脱落,影响去除效果,还易造成填料磨损,增加反冲洗能耗,进而增加处理成本。试验通过变化流速、气水比和监测出水浊度来确定反冲洗强度和时间。经试验,本装置确定的反冲洗强度和时间分别为:气洗强度 9~11 L/(s·m<sup>2</sup>),历时 3~4 min;气~水联合反冲洗,气量不变,水洗强度 6~7 L/(s·m<sup>2</sup>),历时 4~5 min;水单独漂洗强度为 6~

7 L/(s·m<sup>2</sup>),历时 6~8 min。反冲洗后一般都会出现出水水质下降的现象,造成填料上生物量的减少和生物膜活性一定程度的提高<sup>[7]</sup>。在试验中,反冲洗周期是通过观察出水水质来进行调整的。根据试验进水浓度及出水水质变化,最终确定反冲洗周期为 72 h。

从图 8 中可以看出,反冲洗后出水 NH<sub>3</sub>-N 瞬间恢复,中间虽有一些小的波动,但仍保持在反冲洗前的较低水平,即出水 NH<sub>3</sub>-N<0.5 mg/L,说明反冲洗对 NH<sub>3</sub>-N 的去除几乎没有影响。这主要是由于进水 NH<sub>3</sub>-N 水平较低,并且滤柱内硝化菌占主导地位的原因。

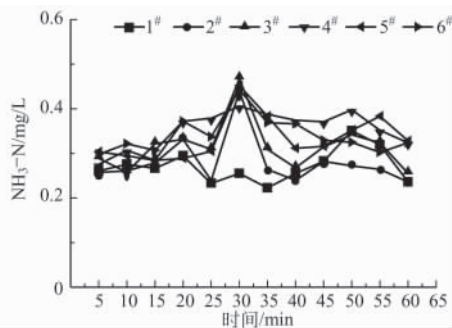


图 8 不同填料曝气生物滤池反冲洗后 NH<sub>3</sub>-N 变化

从图 9 可以看出,反冲洗对浊度的影响较大。反冲洗时,水流以很高的滤速流过滤床,引起原先被压缩的填料向上膨胀,滤层截留的悬浮物和多余的生物膜被带走,导致出水浊度急剧升高。反冲洗过后 4 h 时,出水浊度基本恢复到反冲洗前的水平。在实际工程中,因为清水区高度要高于试验高度,因此浊度的恢复应该更快些。试验中 1<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 浊度恢复梯度较快,这与它们的比表面积较大,生物膜不易冲刷,对悬浮物的截留能力强,对浊度的去除效果较好有关。

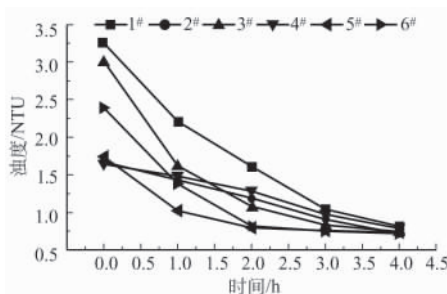


图 9 不同填料曝气生物滤池反冲洗后浊度变化

### 3 结论

在 BAF 处理过程中,填料起着相当重要的作

用。填料的选择决定了 BAF 处理性能的优劣、工程基建投资及运行管理、运行动力消耗等诸多因素。本文通过对 6 种填料物理化学性能和其对再生水的去除效果作了比较。结果表明:

(1) 不同填料之间颗粒强度变化较大,该指标会直接影响再生水的处理成本;相对于堆积密度而言,填料的真实密度及挂膜后的最佳密度会直接影响滤池的运行性能,本试验所选填料的真实密度在 1.55~2.116 g/cm<sup>3</sup>;填料的比表面积和比孔隙体积反映了填料的孔隙率和孔径的综合特征,试验所选填料比表面积在 0.574~3.285 m<sup>2</sup>/g,比孔隙体积在 6.651×10<sup>-4</sup>~17.9×10<sup>-4</sup> mL/g。

(2) 在夏季较高的温度下,BAF 挂膜仅需一周时间就可以完成,NH<sub>3</sub>-N 的去除率稳定在 90%以上,且陶粒填料比火山岩滤柱启动要快,主要是由于陶粒的比表面积大,生物膜易附着,生物量大造成的结果。

(3) 由于进水有机物浓度低,不同填料对 TOC、COD<sub>Mn</sub> 去除效果一般,但对 NH<sub>3</sub>-N 具有很好的去除效果。3<sup>#</sup> 填料滤柱的综合运行效果较好,在实际水处理过程中可以根据需要来选择。

(4) 反冲洗后,不同填料曝气生物滤池 NH<sub>3</sub>-N 恢复都很快,短时间内就能恢复到反冲洗前水平,浊度恢复到反冲洗前水平至少需要 4 h。

### 参考文献

- 1 郑俊,吴浩汀,程寒飞. 曝气生物滤池污水处理工艺及其工程实例. 北京:化学工业出版社,2002
- 2 张林生. 水的深度处理与回用技术. 北京:化学工业出版社,2009
- 3 Pujol R. A keypoint of nitrification in an upflow biofiltration reaction. Wat Sci Tech, 1998, 38(3): 43~49
- 4 Rogalla F. New development in complete nitrogen removal with biological aerated filters. Wat Sci Tech, 1990, 22(2): 273~280
- 5 Séguret F, Racault Y. Hydrodynamic behavior of a full-scale submerged biofilter and its possible influence on performances. wat Sci Tech, 1998, 38(89): 249~256
- 6 张小东,陈季华,奚旦立. 生态填料在微污染水体处理中的应用. 水处理技术, 2008, 34(1): 56~58
- 7 曹相生. 污水深度处理中的生物强化过滤技术研究[学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003. 103~106

✉ 通讯处:100124 北京市朝阳区高碑店村甲 1 号

E-mail: baiyu7522@163.com

收稿日期:2011-05-11