

# 低密度沸石复合填料的制备及其性能研究

束松林, 陈天虎, 谢晶晶, 周跃飞, 庆承松

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**以天然沸石为主要原料,水泥为粘结剂,发泡聚苯乙烯球形颗粒为内核,经复合、成球、筛分、养护,制备出粒径4~8 mm的免烧球形低密度沸石复合填料。对制备的材料进行了空隙率、表观密度、强度等性能测试。研究结果表明,制备低密度沸石复合填料的最优工艺组合条件为质量百分比沸石:水泥=75%:25%,自然条件下养护7~10 d,此时制备的成品填料空隙率为47.4%,表观密度为1.23 g/cm<sup>3</sup>,强度为61.5 N,堆积密度为0.647 g/cm<sup>3</sup>。扫描电镜图像表明,挂膜前填料表面粗糙,内部存在大量孔隙,挂膜后表面和内部均有大量的微生物附着,与粉煤灰制备的陶粒相比,该填料挂膜微生物量提高了一倍。本研究制备的低密度沸石复合填料,用于在环境温度低于15℃下曝气生物滤池的挂膜启动运行,对氨氮的去除率达到96%,具有较好的氨氮去除效果,表明该复合填料在废水脱氮深度处理方面具有良好的应用前景。

**关键词:**沸石;复合填料;制备;性能;曝气生物滤池

中图分类号:P579;P578.974

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2011)06-0987-07

## The preparation and characterization of low-density zeolite composite paddings

SHU Song-lin, CHEN Tian-hu, XIE Jing-jing, ZHOU Yue-fei and QING Cheng-song

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The unburned spherical low-density zeolite composite paddings 4~8 mm in particle size with natural zeolite as the main raw material, cement as the binder, spherical particles of polystyrene as the core were prepared through the procedure of compounding, sphere making, screening, and maintenance. Based on testing the void fraction, apparent density, compression strength and other characteristics of materials in the preparation, the authors have concluded the optimal conditions of process combination in the preparation of low density composite paddings as follows. Weight proportion of zeolite:cement is 75%:25% and maintenance is 7~10 d under normal conditions. Under such conditions, the void fraction is 47.4%, apparent density is 1.23 g/cm<sup>3</sup>, compression strength is 61.5 N, and piled density is 0.647 g/cm<sup>3</sup>. Scanning electron microscopy clearly shows that before the biofilm formation the surface is rough, and the interior has numerous pores, whereas after the biofilm formation, a large number of microbes exist on the surface and in the internal. The number of microbes is twice that of the fly ash biological filter. When the method is applied at the ambient temperature below 15℃ under BAF biofilm, the ammonia and nitrogen removal rate of the unburned spherical low-density zeolite composite paddings even reaches 96%. The high ammonia and nitrogen removal efficiency shows a good prospect of the composite paddings in advanced treatment of wastewater denitrification.

**Key words:** zeolite; composite paddings; preparation; characterization; BAF

收稿日期:2011-09-06;修订日期:2011-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41102023 41072036)

作者简介:束松林(1986-),男,汉族,硕士研究生,环境工程专业,E-mail:shusonglin@163.com;通讯作者:陈天虎,博导,教授,E-mail:chentianhu168@vip.sina.com.

曝气生物滤池 BAF (Biological Aerated Filter) 是 20 世纪 80 年代欧美开发的一种新型污水处理技术, 其基本原理在于以颗粒填料为介质, 通过附着在填料上生物膜及胞外聚合物 (Li *et al.*, 2002) 的吸附截留作用、微生物氧化分解作用及沿水流方向形成的食物分级捕食作用, 实现去除水中污染物的目的, 同时利用反应器内好氧、缺氧区域的存在, 实现脱氮除磷的功能 (邓征宇等, 2010)。它借鉴了污水处理接触氧化法和给水快滤池的设计思路, 集曝气、高流速、截留悬浮物及定期反冲洗等特点于一体, 具有负荷高、占地少、能耗低、出水好及工艺简单灵活等优点, 于 90 年代后期被广泛应用于污水处理 (张杰等, 2002; 冯军等, 2002)。实践证明, 该工艺对城市生活污水、印染废水、焦化废水、啤酒废水等处理效果良好 (李汝琪等, 1999a, 1999b; 顾晓杨等, 2006; 蔡军等, 2006)。

作为 BAF 的核心组成部分, 填料的特性决定了 BAF 的运行效率及水处理效果, 通常认为, 品质优良的填料需具备下述特点中的一种或几种: 比表面积大、易附着生物膜、密度适中、形状规则、尺寸统一、化学和生物稳定性好、表面荷正电且亲水、水力流态好、强度大, 此外, 还需考虑材料的价格和易获取性, 以降低水处理的成本。目前已开发了许多具有不同特性的有/无机填料, 其中无机类填料主要有火山岩、陶粒、沸石、焦炭、石英砂、活性炭和膨胀硅铝酸盐等, 有机填料主要有玻璃钢、聚氯乙烯、聚苯乙烯小球、聚丙烯、聚合纤维和波纹板等 (邓征宇等, 2010)。

沸石是一种架状结构的含水铝硅酸盐矿物, 笼状微孔结构, 对氨氮离子具有高效的选择性交换特性。因此, 有很多文献报道把沸石矿石破碎成需要大小的颗粒作为 BAF 填料 (Booker *et al.*, 1996; Singh and Prasad, 1997; 麦穗海等, 2002; 浦哲, 2005)。但同时天然沸石孔穴易被其他杂质堵塞, 相互连通程度较差, 造成其吸附能力较差 (余振宝等, 2005), 在用于 BAF 填料生物挂膜过程中, 微生物仅附着在填料表面, 不能够深入到填料内部, 填料的生物负载量低。

针对上述问题, 本研究采用天然沸石为主要原料, 水泥为粘结剂, 发泡聚苯乙烯球形颗粒为内核制备 BAF 填料, 该填料具有密度低、形状规则、抗压强度高、表面粗糙孔隙多、材料表面无毒等特性, 适合微生物的生长, 克服了一般陶粒填料表面结垢、开放

孔隙率低的缺点; 同时填料较大的孔隙率和孔穴之间的相互连通性容易使生物进入到填料内部, 增大了填料的生物负载量, 因而提高了系统对氨氮的去除效果; 而且低密度沸石复合填料在常温下洒水养护即可, 无需煅烧, 可节约能源, 降低曝气生物滤池填料生产成本。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 材料

**沸石粉** 实验用沸石样品取自安徽宣城水东镇沸石矿, 外观颜色为灰色。将沸石矿石经颚式破碎机、对辊机破碎后过 0.2 mm 筛, 得到沸石粉。X 射线荧光光谱法 (XRF) 测得沸石粉化学组成为 (质量分数):  $\text{SiO}_2$  76.02%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  11.27%、 $\text{CaO}$  2.54%、 $\text{K}_2\text{O}$  2.50%、 $\text{Na}_2\text{O}$  0.35%、 $\text{MgO}$  0.98%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  1.05% 其中  $\text{Si}/\text{Al} = 5.7$  ( $\text{Na} + \text{K})/\text{Ca} = 0.71$ 。利用 X 射线衍射 (XRD) 分析了沸石粉的矿物组成, 结果如图 1 所示, 主要矿物为斜发沸石, 含一定量无定形  $\text{SiO}_2$  ( $20^\circ \sim 30^\circ$  之间出现馒头状峰), 少量石英和蒙脱石。

**水泥** 采用安徽巢湖屹东水泥制造公司的 325 号矿渣硅酸盐水泥作为粘结剂。利用 XRD 分析了水泥的矿物组成, 结果如图 1 所示, 其主要成分是硅酸钙矿物, 还含有少量石英和方解石。水泥的性能参数表如表 1。

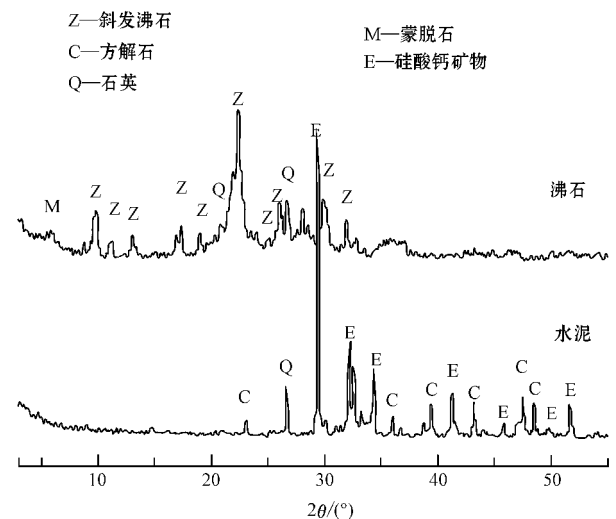


图 1 沸石和水泥的 XRD 分析图

Fig. 1 XRD analytic diagram of zeolites and cement

表1 水泥的性能

Table 1 Performance of cement

抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	凝结时/h
3 d→7 d→28 d	3 d→7 d→28 d	初凝→终凝
≥10.0→≥15.0→≥32.5	≥2.5→≥3.0→≥5.5	≥0.75→≤10

发泡聚苯乙烯塑料颗粒:采用巩义市华龙滤料厂生产的该产品作为材料成型内核,塑料颗粒粒径为2~3 mm,吸水率为0.05%,堆积密度为20~30

kg/m<sup>3</sup>。

上述3种材料性能比较见表2,从表中可知3种材料单独作为BAF填料存在天然沸石密度过大不易反冲洗,水泥在水中会水化变硬,发泡聚苯乙烯塑料颗粒密度太低,均不适宜作为BAF填料等问题。综上所述,将3种材料结合为一起,以天然沸石为主要原料,水泥为粘结剂,发泡聚苯乙烯塑料颗粒为内核,制备出一种低密度、高强度、对氨氮有高效选择交换性能的BAF复合填料,具有很高的应用价值。

表2 三种材料性能比较

Table 2 Comparison of three kinds of materials

名称	形状粒径/mm	密度/g·cm <sup>-3</sup>	主要成分	特性
天然沸石粉	0.2~0.4	2.26	斜发沸石	对氨氮离子有高效的选择交换性能,常作为BAF填料;密度大,不易反冲洗,同时天然沸石空穴连通程度较差。
水泥	<0.08	2.8~3.10	硅酸钙矿物	主要作为粘结剂使用,水化后有很高的强度。
发泡聚苯乙烯塑料颗粒	2~3	0.5~0.8	聚苯乙烯	密度太低,不宜作为BAF填料。

## 1.2 填料制备方法

采用图2所示的工艺流程制备低密度沸石复合填料。在包衣机中撒入发泡聚苯乙烯塑料球形颗粒50 g,均匀喷水,使其表面润湿;再撒入按照一定比例混合均匀的水泥和天然沸石粉配料200 g,调节滚筒倾斜角为15°和转速50 r/min,启动包衣机,在机器旋转的同时边喷水边撒配料,其中喷水要均匀适量,物料在包衣机中包覆在聚苯乙烯塑料颗粒上,团聚成为潮湿的球状颗粒。筛分出粒径在4~8 mm的填料,开始养护,养护室温度为15~25℃,相对湿度为40%~60%,将制备好的成品球放在自然养护室养护7~10 d出料,制备成低密度沸石复合填料。

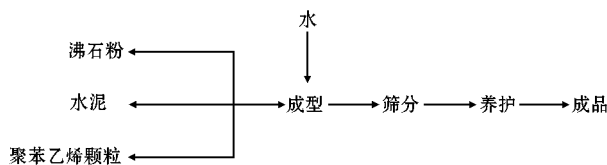


图2 低密度沸石复合填料制备工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of the preparation of low-density zeolite composite filler

对所制备填料的主要性能指标进行测定,低密度沸石复合填料样品的密度、空隙率、堆积密度、表观密度、颗粒抗压强度等特性测定依照中华人民共和国城镇建设行业标准(CJ/T 299-2008)《水处理用人工陶粒滤料》进行评价。低密度沸石复合填料的物相组成采用日本理学D/max-rB型X射线衍射

(X-ray Diffraction, XRD)仪分析,铜靶,电压为40 kV,电流为100 mA,扫描速率为4℃/min。用日本JSM-6490LV型场发射扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察填料的微结构。

## 1.3 填料特性分析方法

将本研究所制备的填料和粉煤灰生物滤料在相同条件下分别用于BAF挂膜,挂膜成型后分别取一定质量的填料,经去离子水冲洗3次后置于105℃恒温干燥箱中至质量恒定,测定其质量 $m_1$ ;将干燥后的填料置于马弗炉中于550℃温度下灼烧90 min,冷却后测定其质量 $m_2$ ,以 $m_1$ 与 $m_2$ 的差值来反映填料上面的挂膜生物量(Yu *et al.*, 2008)。

同时为了考察低密度沸石复合填料用于BAF的处理氨氮的效果,将低密度沸石复合填料用于BAF考察其在启动阶段的氨氮去除特性。实验用BAF反应器直径为15 cm,柱高200 cm,填料高度为140 cm,进水方式为上流式进水。运行期间环境温度为2~15℃,进水氨氮平均浓度为10 mg/L,气水比3:1,水力负荷0.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·h。测试方法采用国家标准方法(国家环保局,1998),仪器为722E分光光度计。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原料配比的确定

作为BAF的载体,应具备较好机械强度,较低

的密度,这些因素又与载体的制备条件密切相关。本研究主要以天然沸石为原料,水泥为粘结剂,发泡聚苯乙烯球形颗粒为内核,水泥的添加量决定了所制备填料的抗压强度,但是沸石的添加量则决定了制备填料的处理氨氮的效果。为确定低密度沸石复合填料的最佳组成,设计 6 组不同的天然沸石和水泥配比,天然沸石和水泥的配比分别为:90%:10%、85%:15%、80%:20%、75%:25%、70%:30%、65%:35%,制备出上述 6 组不同配比的填料,对其分别进行颗粒强度测试和氨氮处理效果的性能实验,以颗粒强度和氨氮处理效率为考察指标,筛选配备。

**颗粒的强度测试方法:**分别取不同配比制备的填料各 5 颗,使用强度仪测其每颗的强度,取平均值。

**氨氮的处理效果实验方法:**分别取经蒸馏水清洗、自然晾干的不同配比填料 20 g,放入 250 mL 锥形瓶中,加入 10 mg/L 的  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液 200 mL,密封后在振荡器上震荡 2 h,静止 0.5 h,取出上清液,测定水中的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度,计算填料对氨氮的去除率。

测得的颗粒强度和氨氮处理效果如图 3 所示,从图 3 可以看出 4 号配比的颗粒强度高于 60 N,而且对氨氮的处理效果优于配比 5 号和 6 号,由此最后确定实验配方质量百分比为沸石:水泥 = 75%:25%。经最佳原料配比制备出低密度沸石复合填料如图 4 所示,填料养护前后尺寸和表面形状没有发生变化,养护前后填料颜色由深灰色变为浅灰色,颗粒的直径在 4~8 mm。

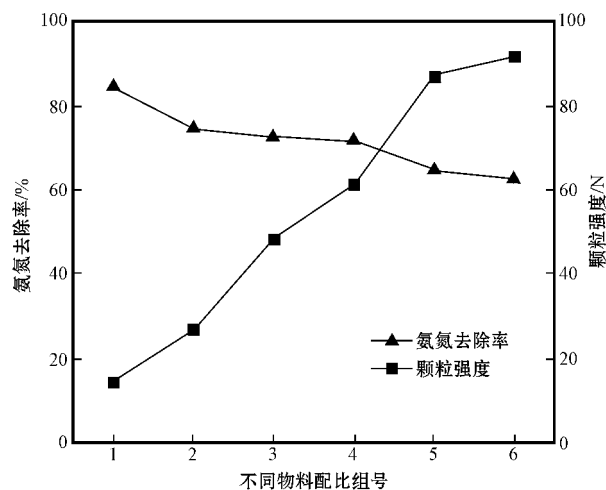


图 3 低密度沸石性能实验

Fig. 3 Performance test of low-density zeolite

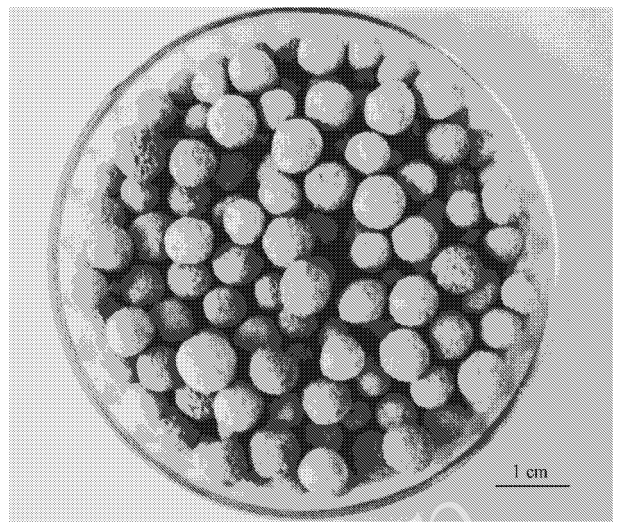


图 4 低密度沸石复合填料实物图

Fig. 4 Material diagram of low-density zeolite composite fillings

## 2.2 填料特性分析结果

经最佳配比制备的样品填料与粉煤灰生物滤料(郑俊等 2005)及国家标准进行主要物理性能对比,见表 3。从表中可看出样品填料的性能指标都优于粉煤灰生物滤料,其密度低,空隙率高,材质轻,满足水处理人工陶粒滤料的应用要求。

表 3 两种填料与国家标准的主要物理性能对比

Table 3 Main physical properties of two kinds of filler in comparison with the national standard

项目	样品填料	国家标准	粉煤灰生物滤料
粒径/mm	3~9	0.5~9.0	4~6
表观密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.23	.....	1.57
堆积密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.647	0.610~0.700	0.85
空隙率/%	47.4	$\geq 40$	45.8
真密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.14	.....	.....
吸水率/%	20.47	.....	.....
强度/N	61.5	.....	.....

图 5 为所制备复合填料的 XRD 图谱,从图中可以得出填料主要矿物为斜发沸石,含有一部分方解石,其主要是由于矿渣硅酸盐水泥经水化后释放出钙离子与空气接触反应后而形成的,还含有一定量无定形  $\text{SiO}_2$  ( $20^\circ\sim 30^\circ$  之间出现馒头状峰)、少量石英和蒙脱石。由于是在自然条件下制备而成,材料的主要性质没有改变。

图 6a 和 6b 分别为填料挂膜前外表面和内表面扫描电镜照片。从图中可以看出新鲜的颗粒外表面粗糙多孔,内部具有相互连通、分布均匀的大孔结

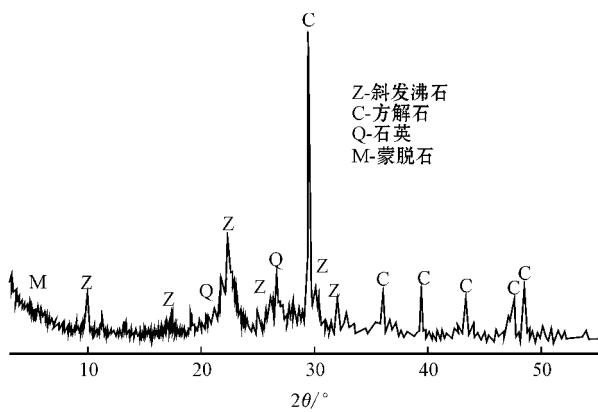


图 5 样品填料的 XRD 分析图

Fig. 5 XRD analytic diagram of sample filler

构 其形状多为圆形,孔径大于  $10\ \mu\text{m}$ ,大多数分布在  $20\sim 100\ \mu\text{m}$  范围内。所制备填料表面粗糙,孔隙大而多,大孔和微孔相结合的多孔结构,易于微生物的附着和生长,对生物负载有着良好的效果。

图 6c 和 6d 分别为填料挂膜后外表面和内表面附着微生物的扫描电镜照片。从图中可知 BAF 挂膜培养运行稳定后,填料的表面被微生物及其分泌物所包裹,部分孔隙结构被覆盖,微生物在填料表面完全铺开,与填料形成紧密联合,其形态多为长扁丝状或杆状,而且微生物还向孔内爬行,并在孔的内壁贴壁生长,可以观察到此时丝状形菌已在填料内表面铺展,呈现均匀状分布,微生物与微生物之

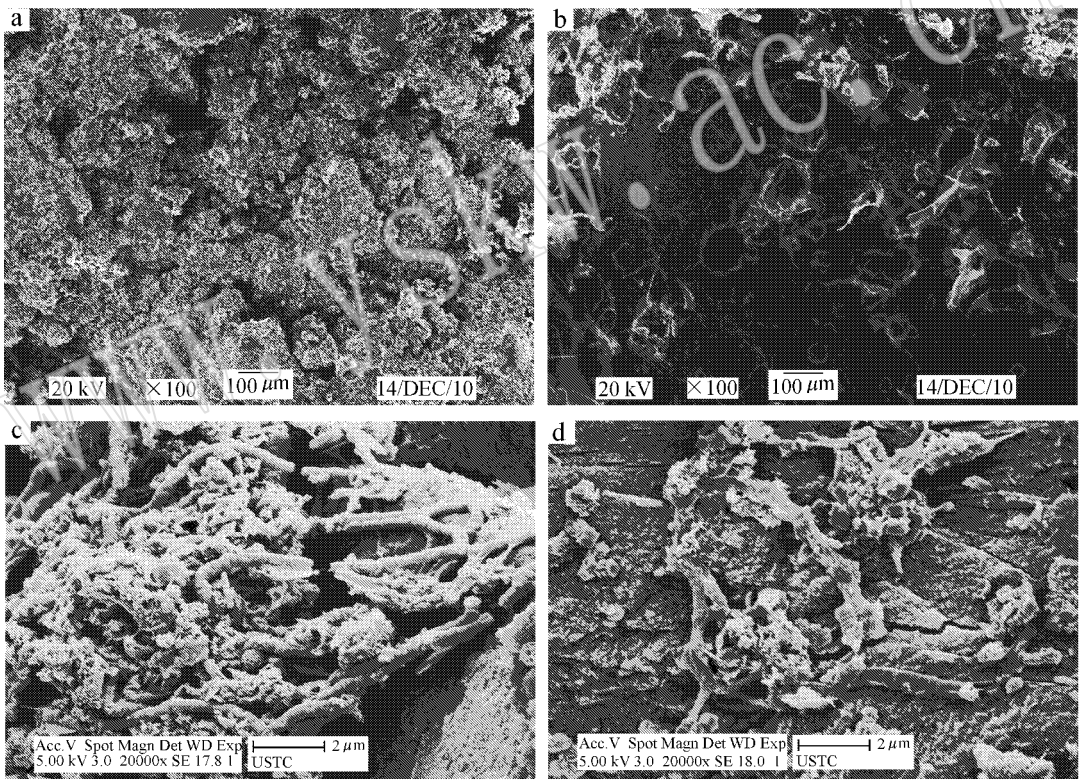


图 6 低密度沸石复合填料挂膜前后扫描电镜图

Fig. 6 SEM images of low-density zeolite composite paddings before and after biofilm

间相互连接,微生物在填料表面的粘附和伸展是生长和繁殖的前提(王兴润等,2007;Mansur and Mansur,2010)。

按照上述方法测得低密度沸石复合填料的挂膜生物量为  $4.8\ \text{mg/g}$ ,而粉煤灰生物滤料的生物量为  $2.23\ \text{mg/g}$ ,与粉煤灰制备的陶粒相比,该填料挂膜

微生物量提高了一倍。

### 2.3 氨氮处理效果

低密度沸石复合填料用于 BAF 的氨氮去除特性如图 7 所示,启动阶段,环境温度为  $2\sim 15^\circ\text{C}$ ,图 7a、7b 分别为挂膜阶段反应装置进出水氨氮浓度和氨氮的去除率,以及环境温度的变化。从图中可知,

挂膜前期低密度沸石复合填料并未形成生物膜,对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除主要是填料中沸石对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  离子交换作用造成的,在启动运行约 20 d 后,曝气生物滤池中的填料挂膜成型,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率开始增高,去除效果明显。由于环境温度对生物的生长、活性有比较大的影响,前期填料的挂膜速度比较缓慢,需

要约 20 d 的时间才能完成挂膜,但是当挂膜成功后,低密度沸石陶粒对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果并没有因为温度的逐渐降低而下降,而是保持在很稳定的去除效果。进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  平均浓度为 10 mg/L,在陶粒挂膜成功后,出水浓度平均为 0.4 mg/L,对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率达到 96%,对氨氮的处理效果好。

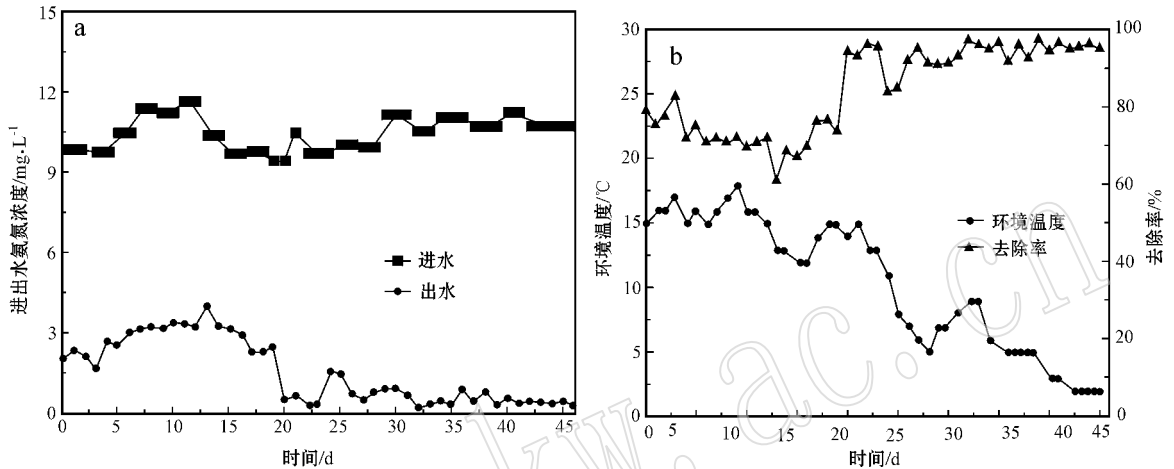


图 7 启动期间  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效果

Fig. 7 Removal effect of ammonia during the startup period

### 3 结论

(1) 以天然沸石为主要原料,水泥为粘结剂,发泡聚苯乙烯球形颗粒为内核制备出免烧球形低密度沸石复合填料。制备填料的最优工艺条件为质量百分比沸石:水泥 = 75%:25%,自然条件下养护 7~10 d 制备的成品填料粒径为 4~8 mm,空隙率为 47.4%,表观密度为 1.23 g/cm<sup>3</sup>,强度为 61.5 N,堆积密度为 0.647 g/cm<sup>3</sup>。

(2) 制备的填料表面粗糙多孔,内部和外部具有相互连通且分布均匀的大孔结构和材料无毒性。其克服了一般陶粒填料表面结垢、开放孔隙率低的缺点,适合微生物的附着和生长,且微生物可以通过相互连通的多孔结构,深入到填料的内部,增加了填料的生物负载量。

(3) 环境温度在 2~15°C 条件下,将填料应用于 BAF 挂膜启动运行,研究表明对氨氮仍具有较好的去除效果,同时低密度沸石复合填料制备无需煅烧,自然养护即可,生产工艺简单,可以节约大量能源,降低 BAF 填料生产成本,在 BAF 填料应用方面具有

很好的前景。

### References

- Booker N A, Cooney E L and Priestley A J. 1996. Ammonia removal from sewage using natural Australian Zeolite[J]. *Water Science and Technology*, 34(9): 17~24.
- Cai Jun, An Lichao, Huang Rongfu, et al. 2006. Research on removal of nitrogen in coke-plant wastewater by using biological aerated filter[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 7(11): 138~141(in Chinese with English abstract).
- Deng Zhengyu, Yang Chunping, Zeng Guangming, et al. 2010. Progress on biological aerated filter technique[J]. *Environmental Science & Technology*, 33(8): 88~91(in Chinese with English abstract).
- Gu Xiaoyang, Wang Xiaojun, Lin Dexian, et al. 2006. Treatment of acidity rose red dyeing wastewater by Fenton reagent-biological aerated filter process[J]. *Industrial Water Treatment*, 26(11): 28~31(in Chinese with English abstract).
- Li Jiuyi, Luan Zhaokun, Zhu Baoxia, et al. 2002. Effects of colloidal organic matter on nitrification and composition of extracellular polymeric substances in biofilms[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77(12): 1333~1339.
- Li Ruqi, Kong Bo and Qian Yi. 1999a. The removal performance of the

- sewage treatment with the biological aerated filter(BAF) [J]. Chinese Journal Of Environmental Science, 20(9): 69~71( in Chinese with English abstract ).
- Li Ruqi, Sun Chonghong and Qian Yi. 1999b. Study on the treatment of brewery wastewater with biological aerated filter [J]. Chinese Journal Of Environmental Science, 20(4): 83~85( in Chinese with English abstract ).
- Ma Jun and Qiu Liping. 2002. Biological aerated filter and its research progress [J]. Environmental Engineering, 20(6): 7~11( in Chinese with English abstract ).
- Mai Suihai, Wu Zhichao and Chen Shaowei. 2002. Study on denitrification enhancement process with zeolite [J]. Shanghai Environmental Science, 21(10): 640~642( in Chinese with English abstract ).
- Mansur A A P and Mansur H.S. 2010. Preparation, characterization and cytocompatibility of bioactive coatings on porous calcium silicate-hydrate scaffold [J]. Materials Science and Engineering C, 30(2): 288~294.
- Pu Zhe. 2005. Research on tertiary treatment for secondary sewage of petrochemical wastewater by using zeolite filter bed [J]. Industrial Safety and Dust Control, 31(9): 29~31( in Chinese with English abstract ).
- She Zhenbao and Song Naizhong. 2005. The Processing and Application of Zeolite [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 32.
- Singh G and Prasad B. 1997. Removal of ammonia from coke-plant wastewater by using synthetic zeolite [J]. Water Environment Research, 6(2): 157~161.
- Wang Xingrun, Jin Yiyang, Du Xin, et al. 2007. Feasibility research on sintering municipal sewage sludge for manufacturing haydite [J]. China Water & Wastewater, 23(7): 11~15( in Chinese with English abstract ).
- Yu Yanzhen, Feng Yan, Qiu Liping, et al. 2008. Effect of grainslag media for the treatment of wastewater in a biological aerated filter [J]. Bioresource Technology, 99(11): 4120~4123.
- Zhang Jie, Cao Xiangsheng and Meng Xuezheng. 2002. Research progress on biological aerated filter [J]. China Water & Wastewater, 18(8): 26~28( in Chinese ).
- Zheng Jun and Wu Haotin. 2005. Biological Aerated Filter Process Theory and Engineering Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 64~70.
- ### 附中文参考文献
- 蔡军, 安立超, 黄荣富, 等. 2006. 曝气生物滤池处理焦化废水脱氮的研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 7(11): 138~141.
- 邓征宇, 杨春平, 曾光明, 等. 2010. 曝气生物滤池技术进展 [J]. 环境科学技术, 33(8): 88~91.
- 顾晓扬, 汪晓军, 林德贤, 等. 2006. Fenton 试剂-曝气生物滤池处理酸性玫瑰红印染废水 [J]. 工业水处理, 26(11): 28~31.
- 国家环保局. 1998. 水和废水监测分析方法 (第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 279~281.
- 李汝琪, 孔波, 钱易. 1999a. 曝气生物滤池处理生活污水试验 [J]. 环境科学, 20(9): 69~71.
- 李汝琪, 孙长虹, 钱易. 1999b. 曝气生物滤池处理啤酒废水的研究 [J]. 环境科学, 20(4): 83~85.
- 马军, 邱立平. 2002. 曝气生物滤池及其研究进展 [J]. 环境工程, 20(6): 7~11.
- 麦穗海, 吴志超, 陈绍伟. 2002. 沸石强化生物脱氮工艺研究 [J]. 上海环境科学, 21(10): 640~642.
- 浦哲. 2005. 沸石滤池深度处理石化废水二级出水研究 [J]. 工业安全与环保, 31(9): 29~31.
- 余振宝, 宋乃忠. 2005. 沸石的加工与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 32.
- 王兴润, 金宜英, 杜欣, 等. 2007. 城市污水厂污泥烧结制陶粒的可行性研究 [J]. 中国给水排水, 23(7): 11~15.
- 张杰, 曹相生, 孟雪征. 2002. 曝气生物滤池的研究进展 [J]. 中国给水排水, 18(8): 26~28.
- 郑俊, 吴浩汀. 2005. 曝气生物滤池工艺的理论及工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 64~70.