

# BAF 反冲洗过程的优化控制分析

闫立龙<sup>1</sup>, 王兴戩<sup>2</sup>, 李伟光<sup>3</sup>, 任源<sup>3</sup>, 张颖<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 中国市政工程华北设计研究总院, 天津 300074; 3. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 为优化曝气生物滤池(BAF)的反冲洗参数,从降低能耗的角度出发,通过模型分析和数学推导,建立了BAF最佳反冲洗周期公式,确定了最佳反冲洗参数,同时考察了反冲洗参数对BAF内微生物作用的影响。结果表明,瞬时产水率和周期平均产水率相等时所对应的滤池运行时间是滤池的最佳反冲洗周期,此时BAF的产水率达到最大;试验条件下的最佳反冲洗参数:先气冲洗3 min,再气水联合反冲洗5 min,最后水漂洗10 min,其中水冲洗和气冲洗强度分别为9和18 L/(m<sup>2</sup>·s);反冲洗参数对微生物作用的影响较大,反冲洗后BAF进水端处的生物量损失率最大。最佳反冲洗周期公式的建立不仅可提高滤池效率、节省能耗,更重要的是可为实现反冲洗过程的自动控制奠定基础,具有一定的现实意义。

**关键词:** 曝气生物滤池(BAF); 反冲洗; 优化

中图分类号: X703 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2011)11-0080-04

## Analysis on Optimization Control of BAF Backwash

YAN Li-long<sup>1</sup>, WANG Xing-jian<sup>2</sup>, LI Wei-guang<sup>3</sup>, REN Yuan<sup>3</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>

(1. School of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. North China Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300074, China; 3. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** In order to optimize the backwash parameters of biological aerated filter (BAF), from the point of decreasing energy consumption, and using model analysis and mathematic derivation, an optimal period formula of BAF backwash was built, and the optimal backwash parameters were determined. The effect of backwash parameters on microorganisms was investigated. The results show that the optimal backwash period is the corresponding operation time of filter when instantaneous water producing rate equals to periodic average water producing rate, and the water producing rate is maximum at this time. The optimal parameters are calculated by the formula as follows: air wash for 3 min, air-water wash for 5 min and water wash for 10 min with water intensity of 9 L/(m<sup>2</sup>·s) and air intensity of 18 L/(m<sup>2</sup>·s). The backwash parameters influence microorganisms greatly, and the loss rate of biomass is maximum at the inlet of BAF. The optimal backwash periodic formula can not only improve efficiency of filter and save energy consumption, but also be used to help achieve automatic control of backwash.

基金项目: 东北农业大学博士启动基金资助项目(08-10); 苏州科技学院《环境科学与工程》省重点实验室开放基金资助项目(Zd091204); 黑龙江省科技攻关重点项目(GB08C203)

**Key words:** biological aerated filter (BAF); backwash; optimization

曝气生物滤池(BAF)对污染物的去除是生物吸附、生物氧化、物理截留等综合作用的结果,其效能充分发挥的前提是在载体表面生长有大量的生物膜,且截留的污染物不能太多,因此BAF在运行过程中需要进行周期性的反冲洗,用以去除老化的生物膜和释放截留的悬浮物。反冲洗是保证BAF运行效能的前提,长期以来人们一直致力于BAF的反冲洗方式及参数确定方面的研究<sup>[1~4]</sup>,但关于反冲洗周期的确定、反冲洗的理论模型、反冲洗机理等方面的研究很少。笔者从降低BAF能耗的角度出发,通过模型分析和数学推导,建立了BAF最佳反冲洗周期公式,同时考察了反冲洗参数对BAF内微生物作用的影响。

## 1 试验部分

### 1.1 试验装置

试验装置如图1所示。BAF的内径为150 mm、高为3 700 mm,滤柱内装有2 250 mm高的颗粒活性炭;沿滤柱壁每250 mm设一个取样口,柱内采用穿孔管曝气。BAF采用上向流运行方式,底部进水、顶部出水;采用气水联合反冲洗方式;水和气的流量由转子流量计控制。试验处理水量为50 L/h,气水比为3:1。

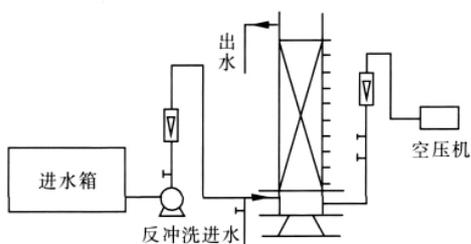


图1 试验装置

Fig.1 Schematic diagram of experiment setup

### 1.2 试验用水

试验装置设在某石化厂冷凝液泵房中,试验用水取自该厂的冷凝液出水,其COD为7.97~45.3 mg/L、氨氮为0~1.53 mg/L、尿素含量为94~800 mg/L、pH值为7.20~8.52、温度为23~27℃。

### 1.3 分析项目与方法

COD: 重铬酸钾法;氨氮: 纳氏试剂分光光度法;尿素: 二乙酰一肟法; pH值: pH S-3C精密pH计;生物膜的形态和结构特征: 目测法和显微镜观察法

相结合,并通过扫描电镜照片记录特征形态;生物量: 干重法;生物活性: 参见文献[5]。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模型分析

在滤池运行过程中,人们希望在保证出水水质的前提下使产水率达到最大。笔者在前期研究中<sup>[6]</sup>,从理论角度分析表明存在一个数值,它能保证周期的平均产水率达到最大,并将对应的滤池运行时间定义为最佳反冲洗周期。然而这个最佳值是否存在,仅限于理论分析,笔者从数学角度出发,并结合滤池实际运行过程,证明了该值的存在,其推导过程如下。

周期的平均产水率数学表达式为:

$$Q(t) = \frac{\int_0^t q(t) dt - \int_0^{t'} q_1(t) dt - \int_0^{t_b} q_2(t) dt - \int_0^{t''} q(t) dt}{t + t_b + t'} \quad (1)$$

其中 $Q(t)$ 为周期的平均产水率(L/h), $t$ 为滤池运行时间(h), $q(t)$ 为滤池的瞬时产水率(L/h), $q_1(t)$ 为气水联合反冲洗时的瞬时耗水率(L/h), $t'$ 为气水联合反冲洗的时间(h), $q_2(t)$ 为反冲洗漂洗耗水率(L/h), $t_b$ 为漂洗时间(h), $t''$ 为反冲洗恢复时间(h)。

在恒压运行条件下 $q(t)$ 是时间函数,随着时间的延长而逐渐减小,在反冲洗方式、强度一定的情况下 $q_1(t)$ 应该是一个定值, $q_2(t) \times t_b$ 、 $t''$ 也应该是一个定值,此时只有 $q(t)$ 和 $t$ 两个变量。若想 $Q(t)$ 有最大值,需要对函数进行求导,使一阶导数为零,即:

$$q(t)(t + t_b + t' + t'') - [\int_0^t q(t) dt - \int_0^{t'} q_1(t) dt - \int_0^{t_b} q_2(t) dt - \int_0^{t''} q(t) dt] = 0 \quad (2)$$

移项并整理可得:

$$q(t) = \frac{\int_0^t q(t) dt - \int_0^{t'} q_1(t) dt - \int_0^{t_b} q_2(t) dt - \int_0^{t''} q(t) dt}{t + t_b + t'} \quad (3)$$

为了下一步求导方便,令 $\int_0^{t'} q_1(t) dt + \int_0^{t_b} q_2(t) dt + \int_0^{t''} q(t) dt = c_1$ 、 $t_b + t' = c_2$ ,则有:

$$Q'(t) = \frac{q(t)(t + c_2) - [\int_0^t q(t) dt - c_1]}{(t + c_2)^2} \quad (4)$$

对 $Q(t)$ 求二阶导数,移项并整理,可得:

$$Q''(t) = \frac{q'(t)(t+c_2)^2 - 2q(t)(t+c_2) - 2[\int_0^t q(t) dt - c_1]}{(t+c_2)^3} \quad (5)$$

$Q(t)$  有极大值的条件是  $Q'(t) = 0$ , 则  $t_0$  满足以下关系式:

$$q(t_0) = \frac{\int_0^{t_0} q(t) dt - c_1}{t_0 + c_2} \quad (6)$$

将  $t_0$  代入式(5), 然后联立式(6), 整理可得:

$$Q''(t_0) = \frac{q'(t_0)}{t_0 + c_2} \quad (7)$$

因在恒压条件下  $q(t)$  是递减函数, 则有  $q'(t) < 0$ , 而  $t_0 + c_2 > 0$ , 则有  $Q''(t_0) < 0$ , 满足  $Q(t)$  取得极大值的充要条件, 进而证明了  $Q(t)$  存在极大值, 此时的最佳时间定义为  $t_f$ , 则有:

$$t_f = \frac{\int_0^{t_b} q(t) dt - \int_0^{t'} q'(t) dt - \int_0^{t_b} q''(t) dt - \int_0^{t'} q(t) dt}{q(t)} - t_b - t' \quad (8)$$

从式(1)和式(3)可以看出:  $Q(t) = q(t)$ , 即瞬时产水率和周期平均产水率相等时所对应的滤池运行时间是滤池的最佳反冲洗周期, 这时能保证 BAF 的产水率达到最大。确定最佳反冲洗周期不仅可以提高滤池的运行效率、节省能耗, 更重要的是可为实现反冲洗过程的自动控制奠定基础, 具有一定的现实意义。

从以上的推导过程可以看出, 在生物滤池运行过程中存在着一个最佳运行时间, 使滤池的平均水力负荷或单位能耗的产水量达到最大, 它的选取直接关系到滤池的利用效率。

## 2.2 反冲洗参数的确定

BAF 的过滤周期一般以滤池水头损失、出水水质作为依据。随着运行时间的延长, 滤池的水头损失也逐渐增加, 试验中以水头损失达到 8 kPa(此值过大则出水 SS 值偏高)作为反冲洗开始的条件。

反冲洗强度的大小不仅决定反冲洗效率, 还将影响整个反应器的运行费用, 因此确定最佳反冲洗强度十分关键。在确定反冲洗方式后, 重点对气冲洗和水冲洗强度进行了研究。试验在水力负荷为  $2.8 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、尿素含量为 350~400 mg/L、COD 为 20~35 mg/L 的条件下, 按照先气冲洗 3 min、再气水联合反冲洗 5 min、最后水漂洗 10 min 的反冲

洗方式, 考察了不同反冲洗条件下 BAF 在 6 h 内对尿素去除能力的恢复情况。

试验确定的反冲洗参数及滤池的运行效果如表 1 所示。

表 1 不同反冲洗条件下 BAF 的运行效果

Tab. 1 Operation results of BAF at different backwash conditions

气冲强度 / /(L·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	水冲强度 / /(L·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	漂洗强度 / /(L·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	尿素去 除率 / %	产水率 / (L·h <sup>-1</sup> )	总运行时间(未达标 时间) /d
12	9	18	99.24	7.036	2(0)
15	9	18	95.43	17.60	4(0)
18	9	18	90.65	23.96	5(0)
21	9	18	44.51	24.17	7(1)
18	7	18	96.54	9.139	2.5(0)
18	9	18	89.65	23.96	5(0)
18	11	18	73.26	15.57	6(1)
18	13	18	58.60	16.62	7(1)

从表 1 可以看出, 反冲洗水强度、气强度均存在一个最佳值。若反冲洗强度过大, 滤池内生物量的损失就大, 过滤周期虽长, 但反冲洗后的恢复期过长, 不仅能耗大, 而且会导致部分出水水质较差; 若反冲洗强度过小, 反冲洗不彻底, 虽然滤池恢复期短, 但过滤周期也短, 导致反冲洗频繁。从表中还可以看出, 不同反冲洗强度下滤池的运行周期不同, 其周期内的平均产水率相差很大, 对于以活性炭为载体的 BAF, 在水洗强度为  $9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、气洗强度为  $21 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的条件下, 滤池的平均产水率达到最大。考虑到反冲洗强度过大会导致活性炭颗粒破碎, 从而降低活性炭的使用寿命, 在周期平均产水率接近的情况下, 选用水冲洗强度为  $9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、气冲洗强度为  $18 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  作为最佳反冲洗强度, 此时最佳运行周期为 5 d。

## 2.3 反冲洗参数对微生物作用的影响

BAF 内高活性微生物菌群的降解作用是去除污染物的关键, 滤池的反冲洗方式、强度和时间等条件会直接影响滤料表面微生物的生长状态, 从而对 BAF 的净水效能产生影响。在水冲洗强度为  $9 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的条件下, 考察了不同气冲洗强度对 BAF 生物量和生物活性的影响。

结果表明, 在 BAF 进水端(10 cm 处), 不同的气冲洗强度均对滤池内的生物量造成了一定的损失, 而且随着气冲洗强度的增加, 总生物量损失逐渐增大; 当气冲洗强度为  $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时, 总生物

量损失为 49.07% ,当气冲洗强度增至  $21 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,总生物量损失达到 75.47% (见图 2)。另外,随着气冲洗强度的增大,生物滤池 110 和 210 cm 处的生物量损失也表现出类似的规律,当气冲洗强度分别为 15 和  $21 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,生物滤池 110 cm 处的生物量损失分别为 36.58% 和 73.72% ,210 cm 处的生物量损失分别为 29.92% 和 58.37%。随着气冲洗强度的增加,在滤层内合成大气泡的机会增多,导致气泡上升时对滤料颗粒产生的剪切、摩擦作用,以及因气泡通过滤层某处后的空缺由周围滤料颗粒来填充而引起的滤料颗粒间碰撞和摩擦作用增强,滤料表面的生物膜在上述作用下被剥落下来,因此气冲洗强度越大则引起的生物量损失就越大。

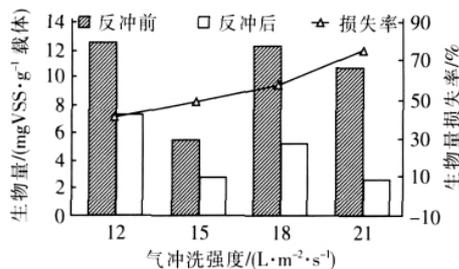


图 2 气冲强度对 BAF 内生物量的影响(10 cm 处)

Fig. 2 Effect of air velocity on biomass during backwashing in BAF (10 cm zone)

从以上结果还可以看出,在相同的反冲洗条件下,滤池进水端的生物量损失相对较大,而出水端的生物量损失相对较小。滤池进水端的底物负荷高,导致生物膜大量生长,生物量较大,载体表面的生物膜较厚;同时,进水中的大部分悬浮物都在该段被截留,悬浮生物量也较大,因此,在同一反冲洗气强度下进水端的生物膜损失相对较大。

另外,在不同反冲洗强度下,总生物活性均有所降低。这是因为此时的生物活性是以单位载体的耗氧速率来表征的,反冲洗后单位载体生物量降低,必然会导致单位载体耗氧速率的下降。

### 3 结论

① 从提高滤池效能的角度出发,验证了最佳反冲洗周期的存在,此时瞬时产水率和周期平均产水率相等,BAF 的产水率达到最大。最佳反冲洗周期的确定不仅可以提高滤池效率、节省能耗,更重要的是可为实现反冲洗过程的自动控制奠定基础,具有一定的现实意义。

② 反冲洗参数对微生物作用影响较大,反冲洗后滤层内的生物量和生物活性均会降低,其中进水端处受到的影响最大,反冲洗后其生物量损失率达到 40% 以上。

③ 在试验条件下,最佳反冲洗参数为:先气冲洗 3 min、再气水联合反冲洗 5 min、最后水漂洗 10 min,其中水冲洗和气冲洗强度分别为 9 和  $18 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

### 参考文献:

- [1] 张杰,陈秀荣.曝气生物滤池反冲洗的特性[J].环境科学,2003,24(5):86-91.
- [2] 孙昕,张金松,葛旭,等.生物活性炭滤池的反冲洗方式研究[J].中国给水排水,2002,18(2):14-17.
- [3] 李思敏,宿程远,张建昆.生物砂滤池气水反冲洗的最佳运行参数确定[J].中国给水排水,2007,23(7):102-105.
- [4] Hall D, Fitzpatrick C S B. Spectral analysis of pressure variations during combined air and water backwash of rapid gravity filters[J]. Water Res, 1999, 33(17): 3666-3672.
- [5] Urfer D, Huck P M. Measurement of biomass activity in drinking water biofilters using a respirometric method[J]. Water Res, 2001, 35(6): 1469-1477.
- [6] 张宝杰,闫立龙,甄捷,等.曝气生物滤池最佳反冲洗周期及反冲洗方式研究[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(7):1045-1046,1050.

E-mail: yanll98@163.com

收稿日期:2010-11-10