

曝气生物滤池反冲洗的特性

张杰, 陈秀荣(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 试验根据曝气生物滤池区别于普通给水滤池的特点, 从反冲洗方式、反冲滤床形状等方面进行深入地对照研究. 结果发现在相同的反冲条件下, 在反冲方式的对照中, 脉冲反冲洗具有远大于气水连续反冲洗的效能; 在滤池池型的选择中, 扩展流池型曝气生物滤池较均匀流池型曝气生物滤池易于洗净和生物滤层的恢复. 最后优化组合了反冲方式和滤池池型, 即脉冲反冲方式与扩展流曝气生物滤池组合后, 对应既定的运行工况, 确定了最佳的反冲运行参数为: 气冲强度 $8 \sim 10 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 、水冲强度 $2 \sim 4 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 、反冲时间 5 min.

关键词: 扩展流曝气生物滤池; 均匀流曝气生物滤池; 脉冲反冲洗; 气水连续反冲洗

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)05-05-0086

Characteristics of Aerobic Biofilter Backwash

Zhang Jie, Chen Xiurong (School of Municipal and Environment Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Periodic backwash is the vital stage to keep up the aerobic biofilter's performance. Under the same backwash conditions, a thorough study was done to review the influences on the performances of backwash in such aspects as backwash regimes, biofilter shapes. The experimental results show that the impulse backwash regime was superior to continuous backwash in the backwash performance and that the expansive flow aerobic biofilter was superior to the uniform flow aerobic biofilter in the performances of both backwash process and filter bed recovery. Then the optimal combination of the two factors i.e. the combination of impulse backwash mode and expansive flow filter was determined. Under the fixed filtration conditions, the appropriate impulse backwash parameters of expansive aerobic biofilter were determined as follows: the backwash air-flow intensity was $8 \sim 10 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, the backwash water-flow intensity was $2 \sim 4 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$, and the backwash duration was 5 min.

Keywords: expansive flow aerobic biofilter; uniform flow aerobic biofilter; impulse backwash; continuous backwash; filter bed recovery

曝气生物滤池集生物膜的强氧化降解能力和滤层截留效能于一体, 是一种适合大规模回用、高效、低耗的污水再生工艺. 而运行一定时间后, 滤层需要通过反冲洗进行再生. 反冲过程要求达到释放截留的悬浮物, 不损害并更新生物膜的多重目的. 因此, 反冲洗是保证曝气生物滤池运行效能的关键步骤. 本研究就反冲方式、池型对照和确定反冲参数 3 方面分别探讨曝气生物滤池反冲洗的相关问题.

1 曝气生物滤池反冲洗方式

1.1 气水连续反冲洗与脉冲反冲洗的机理

气水反冲洗过程中综合了空气剪切、摩擦和水流剪切、摩擦以及滤料颗粒间碰撞摩擦的多重作用^[1]. 反冲水使滤料略有流化以减小滤料间的摩擦阻力, 使滤层底部进入的小气泡合

成不易分散的大气泡穿越滤层. 由于气泡较大, 对滤层扰动范围也较大, 增强了滤料间的碰撞摩擦. 同时气流还强化了水流的剪切和碰撞作用^[2]. 总之, 气泡高速浮升产生的泡振作用和气泡尾迹的混掺作用以及气泡在浮升过程中出现的尾迹效应是气水反冲效果较佳的主要原因^[3].

反冲滤层的运动状态可分解为 3 个阶段: 反冲开始的滤层变速膨胀阶段、滤层悬浮平衡阶段和后期的悬浮滤层沉降阶段. 由于第一阶段的特征是滤层变速膨胀, 颗粒拥挤上升, 碰撞摩擦剧烈, 再加上反冲气/水的剪切、摩擦作用

基金项目: 黑龙江省科技攻关项目 GOOC1808201

作者简介: 张杰(1938~), 男, 中国工程院院士, 哈尔滨工业大学教授、博士生导师.

收稿日期: 2002-08-21; 修订日期: 2002-10-19

使滤料净化效率最高;而第 2 和第 3 阶段颗粒碰撞摩擦的机会极少使碰撞摩擦作用减弱,而且反冲气/水对滤料的剪切和摩擦强度也会由于滤层处于平衡状态而有所降低,因此冲洗效果主要取决于第 1 阶段.

本文所讨论的脉冲反冲是脉冲气冲和连续水冲的组合.一定强度的反冲气流瞬间进入滤层,与连续水流共同使滤层处于变速膨胀状态,生物膜及杂质在强烈的剪切、碰撞作用下快速脱落.瞬间气流脉冲过后,当膨胀滤层逐渐稳定并沉降,尚未达密实状态时再次开气,于是滤层又开始另一周期剧烈的状态变化,其中水流始终起到均匀反冲并漂洗滤层的作用.频繁操作的结果是使滤层始终处于气水反冲过程的第一阶段,强化了反冲过程,从而在耗水、耗气量小的情况下,保证了较高的反冲效率^[4].

1.2 不同池型曝气生物滤池中 2 种反冲方式对照试验

选取 2 种池型即扩展流与均匀流曝气生物滤池进行气水连续反冲与脉冲反冲的对照试验.其中扩展流好气滤床为进水端 $\phi 150\text{ mm}$,出水端 $\phi 400\text{ mm}$,高度 1700 mm 的倒置圆台体,均匀流滤床为 $\phi 200\text{ mm}$,高度 1700 mm 的圆柱体.2 柱均采用升流式过滤方式,均充填多孔陶粒滤料,陶粒平均粒径 4.71 mm ,形状系数 0.63 ,真实密度 1.51 g/cm^3 ,堆积密度 0.86 g/cm^3 .

2 种反冲方式都采用连续进水,区别仅在于脉冲反冲为瞬时、间歇进气,连续反冲为连续进气.采用相同的反冲气、水强度分别为 $10\text{ L/(s}\cdot\text{m}^2)$ 和 $2.21\text{ L/(s}\cdot\text{m}^2)$.以反冲液总固体含量逐时变化指示膜脱落情况.

图 1、2 为 2 滤柱在不同反冲过程中反冲液固体含量的逐时变化曲线,其趋势基本一致,即开始 3 min 内 2 种方式差异较小,以后反冲液浓度逐渐拉大.因为最先脱离滤床的是松散地弥合于滤料缝隙间、老化且已脱落的生物膜和携带杂质,由于 2 种方式皆可迅速冲脱这部分物质,因而差距较小;随后在曲线峰值前的过渡段显示了滤料表面生物膜的剥落过程,2 种反冲方式对膜剥落机制和效率的不同,关系到脱落

生物膜量的变化和剥离膜脱离滤层的速度,两者共同作用的结果就反映为各曲线的过渡段长度不同,峰值大小和位置的不同.此过程反映为图中气水连续反冲曲线的过渡段较脉冲方式历时长,曲线峰值不突出并相对滞后,说明相同时段内杂质及膜脱落量低,即反冲时间长、反冲效果差.从观察试验对比,气水连续反冲只能使滤层下段 $700\sim 800\text{ mm}$ 滤层剧烈窜动,间断出现缝隙并跌落,上部滤层几乎不动;脉冲反冲使整体滤层似蛇形窜动并频繁地脉动,滤层翻卷剧烈,此差异在扩展流滤层尤为明显.

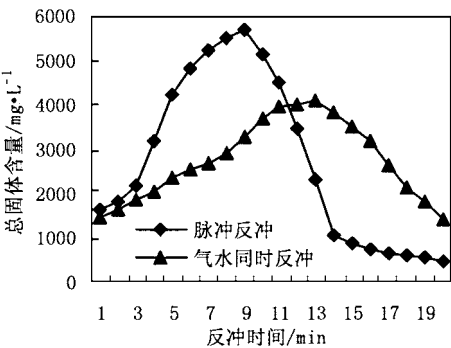


图 1 扩展流滤柱 2 种方式反冲液总固体含量逐时变化曲线

Fig.1 Relation between total solids of backwash liquor and backwash duration for two backwash regimes in emanative flow aerobic biofilter

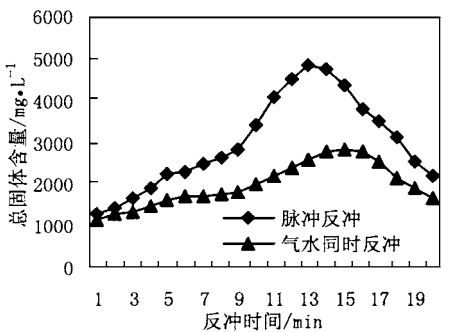


图 2 均匀流滤柱 2 种方式反冲液总固体含量逐时变化曲线

Fig.2 Relation between total solids of backwash liquor and backwash duration for two backwash regimes in uniform flow aerobic biofilter

上述现象可从反冲机理得到解释,反冲洗

过程可概括为在限定条件下最大程度地破坏反冲气、水和滤层组成的三相流体相对平衡状态的过程,只有打破平衡造成相间最大程度的紊乱,才能最大效能地发挥摩擦碰撞和循环混合作用,使滤料颗粒净化.而脉冲反冲正是通过造成滤床频繁地变速膨胀-跌落,加剧了颗粒间的碰撞摩擦,并且强化了水流的剪切和碰撞作用使生物膜快速脱落,同时脉冲气流促使滤床急剧膨胀.流化的过程也加强了对脱落生物膜及杂质的携带作用.2种作用联合使脉冲反冲效率得到了提高.

2 不同型式曝气生物滤池脉冲反冲效果及滤层对 COD_{Cr} 去除效率的恢复

如前所述,曝气生物滤池通过反冲洗不仅要求释放截留的悬浮物还要求对生物膜进行更新和恢复,因此衡量池型对反冲的影响应采用反冲效率和滤层恢复速度的双重尺度.对照试验以相同的反冲气水强度[气冲强度 $10 L/(s \cdot m^2)$,水冲强度 $2.21 L/(s \cdot m^2)$]为基准,以相同工况的扩展流和均匀流曝气生物滤池为考察对象.由于两滤床均采用升流式过滤,致使运行周期末生物膜量的空间分布为:下段由于底物负荷高而生物膜量多,菌群含量丰富且活性较高,而上段由于底物负荷降低,营养贫瘠,造成生物膜量少,菌群含量少且活性较差.因此在反冲过程中,当下段脱落膜大量排入反冲液时,就会达到反冲液总固体含量的峰值.

由图 3、4 可见,扩展流滤柱的反冲时间较均匀流大大缩短,反冲后扩展流比均匀流恢复速度快且稳定后滤层除污效率高.此结果可解释为:扩展流滤床反冲时流速分布在滤床上下不同截面和同一截面内是变化的.在不同截面内,上部流速小,下部流速大;在同一截面内,中间流速大,周边流速小.流速分布不同使滤层形成了从中间向边壁的整体循环置位运动^[5].整体滤层的循环置位不仅促进反冲滤床的流化-脉动,加剧滤料颗粒的碰撞摩擦,达到最佳的反冲状态^[6],而且气/水扫洗和滤料运动携带作用联合可使脱落生物膜加速脱离滤床,改善反冲效果.适当强度下,滤层的循环运动还使下段附

着丰富、活性菌群的滤料与上段菌群含量少且活性差的滤料发生置换,使剧烈冲脱的活性生物膜在上段适当蓄积,从而反冲后只需短暂的稳定,上段滤床的去除能力便立即发挥出来,维持着下段生物膜未成熟前滤床效率的稳定,体现为恢复较快.

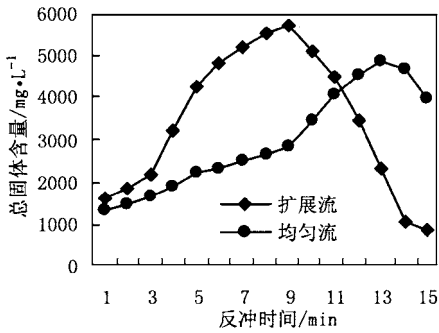


图 3 反冲液总固体含量逐时变化
Fig. 3 Relation between total solids of backwash liquor and backwash duration

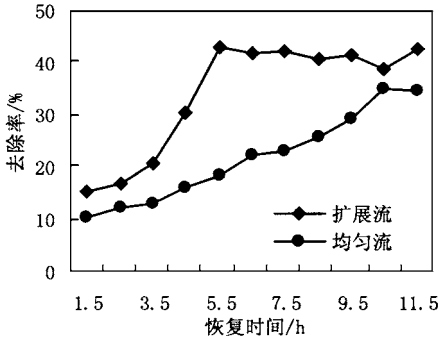


图 4 COD_{Cr} 去除率逐时恢复曲线
Fig. 4 Relation between COD_{Cr} removal and filter bed recovery time

而均匀流滤床反冲时整个滤层上下和每个横截面上流速分布大致均匀,反冲时滤床随气、水压力急剧升高整体瞬间膨胀,并随压力渐趋均衡出现局部滤层跌落,在膨胀、跌落过程中相邻滤层间摩擦碰撞,虽然也有脉冲气流的尾迹效应导致周边滤料的循环混合,但相应的滤料颗粒摩擦碰撞的范围和强度远小于扩展流滤层整体的循环运动,因而膜脱落较慢且不均匀,而且脱落的生物膜及杂质仅由气/水扫洗、卷带出

滤床,由于没有滤料大范围循环运动的携带作用,使其脱离滤床的速度较慢,反映为图 3 中均匀流曲线变化平缓.由于反冲时滤床各点受力相同,使各点膜脱落情况一致,则反冲后滤床的恢复仅靠生物膜的重新附着、生长,所以恢复较慢.

3 扩展流曝气生物滤池脉冲反冲强度和反冲时间的确定

反冲强度和反冲时间是衡量曝气生物滤池反冲效果的重要参数.试验针对运行周期为 10d 的扩展流曝气生物滤池,进行了强度和历时的研究.

3.1 反冲气、水强度的确定

试验首先固定水冲强度 $2.21\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,对比 $6\sim 8$ 、 $8\sim 10$ 和 $10\sim 12\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 3 个强度的气冲效率;再固定气冲强度为 $10\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,对比 $1\sim 2$ 、 $2\sim 4$ 和 $4\sim 6\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 3 个强度的水冲效率,由对比分别选择控制范围.

由图 5、6 可见,气冲强度变化对反冲效率的影响明显大于水冲强度变化的影响.这是因为反冲气流可使滤层产生远大于水流的速度梯度^[7],脉冲气流-连续水流的反冲方式使气流的这一特性得到强化,所以反冲气流是决定性因素,其中反冲水流只能起到减小滤料间摩擦阻力和对滤层漂洗的辅助作用.

当气冲强度 $6\sim 8\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 时,反冲气流在滤层底部分散的小气泡不能合成大气泡而是沿滤料空隙迅速上升,此时滤床无搅动、膨胀现象,只是滤层中下段发生蠕动.生物膜及杂质的剥落仅通过低强度水流的剪力和分散气泡引起的小范围滤料的碰撞摩擦作用,并仅由水流的漂洗脱离滤床,因而反冲液中总固体含量较低且逐时变化不明显;当气冲强度增加到 $8\sim 10\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 时,在滤层底部即可形成大气泡,并以不连续的方式跳跃上升,引起整个滤层剧烈的碰撞摩擦,同时滤层具有流化-脉动和循环置位现象,提高了反冲效率;当气冲强度增大到 $10\sim 12\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 时,伴随着反冲滤层更加剧烈的流化-脉动,滤床轴心区由于气流速度较高易发生“短流”现象,即滤料在气流急速的携带下

未经与周边滤层的循环混合而直接进入反冲液,造成滤料大量流失.经对比选择气冲强度控制范围为 $8\sim 10\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$.

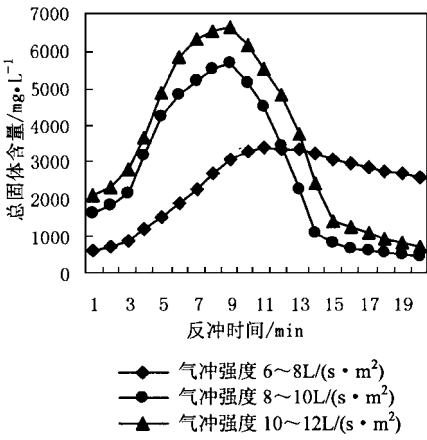


图 5 不同气冲强度下反冲液总固体逐时变化

Fig. 5 Relation between total solids and backwash liquor and time for different backwash air-flow

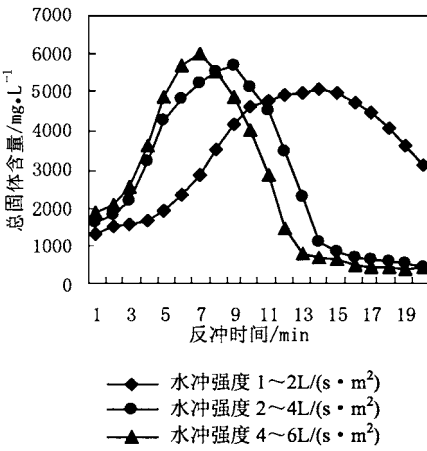


图 6 不同水冲强度下反冲液总固体逐时变化

Fig. 6 Relation between total solids of backwash liquor and time for different backwash water-flow

固定气冲强度为 $10\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$,当水冲强度低至 $1\sim 2\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 时,不仅削弱了水流的剪力降低反冲效率,而且反冲水输泥能力低,不能及时漂洗滤层,更不能快速排放滤层循环携带至反冲液中的膜及杂质,致使反冲液总固体浓度峰值迟到并且平缓,影响反冲效果;当水冲强度调至 $2\sim 4\text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 时,不仅增强了反冲水的输

泥能力而且降低了滤料的摩擦阻力使气冲效能得到加强,明显提高反冲效率;水冲强度继续增大至 $4 \sim 6 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时,高速的冲洗水不仅会携带滤料至反冲液中而且易使床层发生明显膨胀,而气水冲洗滤床最佳的运动状态应是产生搅动但又无较大膨胀^[8],因此水冲强度不宜过高.经分析选择水冲强度控制范围为 $2 \sim 4 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$.

3.2 反冲时间的确定

生物膜的形成首先是单体或聚集的细胞在滤料表面附着,形成薄层的活性生物膜,在对底物的代谢过程中,膜内菌群增生并生成大量的胞外聚合物,使膜厚增加;厚生物膜多孔的缠结结构^[9]使其具有很强的吸附能力^[10],因此膜外层多聚物的孔隙内常吸附大量的无机杂质.此时生物膜量的继续增长主要为非活性物质的积累,形成活性降低的生物膜层;当生物膜厚度增到使底物和 DO 的传输不能到达底层时,生物膜深处会形成厌氧区,此时生物膜容易脱落^[9].根据生物膜增长阶段不同可分为 2 种膜结构:一种为新生结构,包括基层活性膜层和外层非活性膜层(多由胞外多聚物及吸附于内的无机物构成);另一种为老化结构,分为底层厌氧区和外层好氧区.在运行周期末,老化生物膜常自行脱落并夹杂于滤料缝隙.由于不同的膜层内有机与无机物质相对含量不同,因此以反冲液中有有机与无机固体的相对含量表示生物膜的剥落程度.

图 7 中反冲液有机固体与无机固体含量比值的变化曲线以 5 min 处为谷值,经过平稳下降段、急速下降段,并由渐缓下降段过渡到谷值后的渐进升高段.此间相应的反洗液中固体含量变化为:最初 3 min 内为有机、无机和总固体含量的平行稳定上升;然后在有机/无机含量的谷值之前发生有机与无机含量的加速上升,而以无机含量的上升更快,此时两者叠加的总固体含量也为急速上升;在有机/无机含量的谷值之后,有机含量仍以恒定速度快速上升,而无机含量则保持低速上升,两者叠加的总固体含量上升趋势渐缓.

此现象可解释为:反冲初期最快脱离滤床的是滤料空隙弥合的、比较轻的、老化生物膜体.相对于滤料上牢固附着的生物膜量,其含量较少,但总的有机体含量远远大于吸附截留的无机杂质,且两者相对含量较为恒定,反映为有

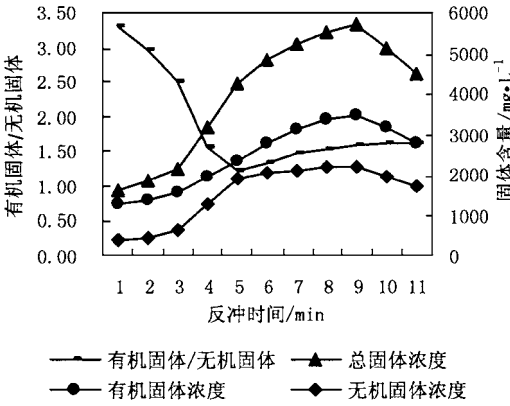


图 7 反冲液分析指标逐时变化

Fig. 7 Relation between the backwash time and the properties of backwash liquor

机与无机含量比值较高且图中各曲线变化平稳;随着滤层内易脱落的老化膜量减少,滤料上牢固附着的生物膜在剧烈的剪切和碰撞摩擦作用下大量进入反冲液,首先剥落的为外部膜层,主要为大量的胞外多聚物及长期吸附于内的无机杂质.脱落生物量的急剧增加使各曲线上升幅度较大.由于外层多聚物的多孔性使截留并镶嵌于内的无机成分含量在所有生物膜层为最高,此时无机含量上升幅度最大,显示为有机与无机含量比值下降速度逐时加快;当内层生物膜进一步脱落时,由于内层生物膜致密且空隙率大大降低^[11],加上无机颗粒的渗透力减弱使内层无机成分减少,由于有机成分在各层的含量较为恒定^[12],使有机含量继续均匀上升并具有绝对优势,此时有机与无机含量的比值出现逐渐升高的趋势.由上述分析知,反冲 5 min 为内层有机膜层脱落的起点.

试验对比了不同反冲时间滤层的恢复速度.图 8 中曲线表明,滤层反冲 5 min 恢复比反冲 10 min 快近 9h.结合上述分析可知,反冲 5 min 时滤料表层的有机活性生物膜层仍有适

当保存,反冲后滤层只需短暂的稳定即可达到较高的 COD_{Cr} 去除效率,而反冲 10 min 则使生物膜几乎全部冲脱,滤层的恢复仅依赖于生物膜的重新形成,因而速度较慢.

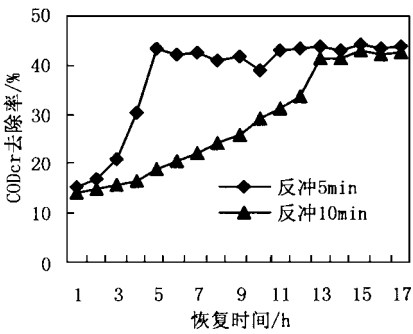


图 8 不同反冲时间滤层去除 COD_{Cr} 的效率恢复曲线

Fig. 8 Relation between COD_{Cr} removal and filter bed recovery time

4 结论

(1) 由于脉冲气冲-连续水冲的反冲方式使反冲过程的第一阶段得到强化,提高了反冲效率,不同池型的试验结果皆证明脉冲反冲好于气水连续反冲.

(2) 扩展流曝气生物滤池的池型优化了反冲过程,使反冲效率和滤层恢复速度都超过均匀流曝气生物滤池.

(3) 反冲方式对反冲效率的影响大于滤池池型的影响.

(4) 试验确定扩展流曝气生物滤池脉冲气流强度为 $8 \sim 10 L/(s \cdot m^2)$,连续水冲强度为 $2 \sim$

$4 L/(s \cdot m^2)$.

(5) 曝气生物滤池反冲后的恢复速度决定于滤料上活性生物膜层的存在与否,因此反冲时间的确定应以避免基层有机生物膜层的脱落为准.试验确定扩展流脉冲反冲时间为 5 min.

参考文献:

- 1 刘荣光,罗辉荣,汪义强等.滤池气水反冲洗机理综述与初探.重庆建筑大学学报,1998,20(6):7~11.
- 2 吴光春,唐传祥.快滤池气水反冲洗技术的研究与设计.化工给排水设计,1995,4:1~6.
- 3 袁志宇,陈晓如,李传志等.悬移式气水连续反冲洗机理探讨.给水排水,1999,25(5):21~24.
- 4 邹伟国,孙群,王国华等.新型 BIOS MEDI 滤池的开发研究.中国给水排水,2001,17(1):1~4.
- 5 王祥权.正向变截面滤床.给水排水,1993,19(1):20~24.
- 6 David Hall, Caroline S, B Fitzpatrick. Research note —— spectral analysis of pressure variations during combined air and water backwash of rapid gravity filters. Wat. Sci. Tech., 1999,33(17):3666~3672.
- 7 张俊贞,邓彩玲,安鼎年.滤池气水反冲洗的数学模型.中国给水排水,1997,13(3):10~13.
- 8 汪义强.快滤池气水反冲洗最佳运行参数研究.净水技术,2001,20(1):9~13.
- 9 刘雨,赵庆良,郑兴灿编著.生物膜法污水处理技术.北京:中国建筑工业出版社,2000.3~4.
- 10 Späth R, H C Flemming, S Wuertz. Sorption Properties of Biofilms. Wat. Sci. Tech., 1998,37(4-5):207~210.
- 11 Zbigxiew Lewandowski. Rapid Communication notes on biofilm porosity. Wat. Res., 2000,34(9):2620~2624.
- 12 Xiaoqi Zhang, Paul L Bishop, Margaret J Kupferle. Measurement of polysaccharides and proteins in biofilm extracellular polymers. Wat. Sci. Tech., 1998,37(4-5):345~348.