

生物活性炭老化对滤池过滤阻力和处理效果的影响

刘璟言^{1,2}, 卢小燕², 尤作亮², 张金松², 郭建宁^{2*} (1.湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2.深圳市水务(集团)有限公司, 广东 深圳 518033)

摘要: 利用饮用水厂运行 10 年的生物活性炭(BAC)装填滤柱,研究活性炭老化对滤柱过滤阻力和处理效果的影响.结果表明,活性炭老化会产生大量小粒径颗粒炭,沉积于活性炭池表层的小粒径颗粒炭产生的过滤阻力是滤柱总阻力的主要来源,其比阻约为底层炭的 22 倍.强化反冲洗仅可降低初始过滤阻力,移除表层细炭是降低活性炭滤池阻力的有效方法.强化反冲洗对滤柱过滤性能无显著影响.移除表层细炭后,老化活性炭滤柱对总有机碳的去除率由 24.71%下降至 7.04%,而后恢复至移除前的水平.移除表层炭后老化活性炭对 UV₂₅₄ 和大于 2 μ m 颗粒数的去除率与对照组活性炭相似.降低活性炭滤池的反冲强度、延长过滤周期是延长老化活性炭寿命的有效方法.

关键词: 生物活性炭; 粒径; 过滤阻力; 饮用水

中图分类号: X703,TU991.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2016)06-1752-05

Effect of aged biological activated carbon on the filtration resistance and performance of biological activated carbon filter. LIU Jing-yan^{1,2}, LU Xiao-yan², YOU Zuo-liang², ZHANG Jin-song², GUO Jian-ning^{2*} (1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2.Shenzhen Water (Group) co., Ltd, Shenzhen 518033, China). *China Environmental Science*, 2016,36(6):

Abstract: Biological activated carbon (BAC) used for about 10years was collected from drinking water treatment plant. The filtration resistance and performance of the aged BAC filter were investigated. The ageing of BAC produced a lot of small BAC particles. The small particles deposited on the surface of the BAC column after backwash and formed a dense filtration layer. The specific resistance of the dense filtration layer was 22 times higher than that of the deep layer of the aged BAC column. Enhanced backwash only decreased the initial filtration resistance and the removal of the dense filtration layer was the most effective method to reduce the filtration resistance. Enhanced backwash had no significant effect on the performance of the aged BAC column. The removal efficiency of the total organic carbon decreased from 24.71% to 7.04% after the removal of the dense filtration layer. However, the removal efficiencies of UV₂₅₄ and particle count larger than 2 μ m did not change greatly and the values were nearly the same as those of the control group. There are several methods to increase the life cycle of the aged BAC, including decreasing the backwashing strength and prolonging the filtration cycle.

Key words: biological active carbon; particle size; filtration resistance; drinking water

生物活性炭(BAC)是目前应用较多的饮用水深度处理工艺中之一.BAC可有效去除水中的有机物、氨氮、颗粒物、个人护理品与药品和消毒副产物前体物等污染物^[1-10].通过BAC中微生物的作用,可维持活性炭对氨氮等污染物的去除效果,延长活性炭使用寿命.工程经验表明,某些水厂的活性炭使用 10 年后仍可维持一定的处理效果.然而,活性炭滤池需定期进行气水反冲洗.随着运行时间延长,活性炭逐渐老化、破碎,粒径变小.滤料粒径变化可能引起滤池过滤性能的改

变^[11-12].田家宇等^[13]发现,粒径为 0.8~1.2mm 的活性炭对污染物的去除效果好于 1.0~2.0mm 的颗粒炭,且水头损失无明显差别.王群等^[14]发现,虽然过滤时大粒径和小粒径组合滤料的水头损失增长速率相近,但小粒径滤料的初始水头损失较大.同时,小粒径的无烟煤和砂粒组合滤料对浊度

收稿日期: 2015-12-07

基金项目: 国家水专项深圳市配套(2009ZX07423-003);中国博士后科学基金资助项目

* 责任作者, 高级工程师, guojn08@163.com

的去除效果好于大粒径滤料,单独砂滤池过滤时也出现类似结果^[15]。值得注意的是,活性炭在使用过程中不仅整体粒径变小,而且部分滤池的小粒径颗粒炭无法排出,反冲后沉积至炭层表面。此部分活性炭粒径远小于当前研究中所采用的滤料,现有研究成果无法指导老化活性炭滤池的运行,其对活性炭滤池过滤性能的影响尚无报道。

本研究利用运行 10 年的活性炭和有机物吸附饱和状态的新炭,研究活性炭老化对滤池过滤阻力的影响及机理。通过强化反冲、人工移除表层细炭,考察了老化活性炭过滤阻力的控制及表层细炭的移除对有机物和颗粒物去除的影响,旨在为老化活性炭滤池的维护和正常运行提供参考。

1 材料与方法

1.1 滤柱装填

图 1 为 BAC 过滤装置示意。炭柱内径 15cm,柱高 2.6m,活性炭装填高度 1.4m。活性炭为煤质破碎炭(山西新华),采样时将运行 10 年的老化活性炭按 0~0.5m、0.5~1m、1~1.5m 的深度分层取样,每层样品混匀后按照相应高度装入炭柱。根据实验需要,移除部分表层炭后用 1~1.5m 深度的活性炭补充。滤柱承托层上部为 20cm 石英砂,下部为 10cm 鹅卵石。同时采用运行 1 年的同规格活性炭滤柱作为对照组。

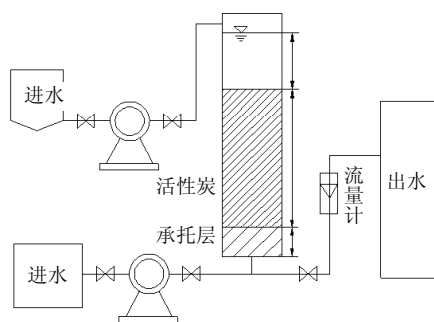


图 1 生物活性炭滤柱实验装置示意

Fig.1 Schematic of the biological activated carbon column

1.2 实验方法

采用砂滤池出水作为 BAC 进水,恒水位过滤,炭层上方水深 0.65m。滤柱运行参数为:平均滤速

8.4m/h、平均空床接触时间 10min、反冲洗周期 6d、气冲强度 15L/(m²·s)、气冲时间 2min、水冲强度 4L/(m²·s)、水冲时间 15min、反冲膨胀率 20%~40%。承托层水头损失可忽略。滤柱反冲后开始运行,每日记录水头损失,每个周期内采样测定水质指标。

利用内径 2.6cm 的层析柱,分别装填 20cm 冲洗后的表层和底层老化活性炭,水平放置后采用纯水恒滤速过滤。记录过滤时装置的空白压强和过滤压强,对不同粒径的清洁活性炭进行过滤阻力对比。图 2 为活性炭过滤阻力实验装置示意。

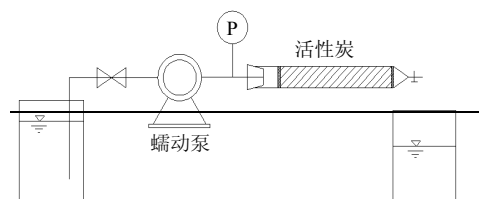


图 2 活性炭过滤阻力实验装置示意

Fig.2 Schematic of the resistance test system

1.3 检测方法

水质指标:总有机碳(TOC),GE Sievers 5310C 分析;UV₂₅₄,紫外吸收分光光度法(Gray 50Conc UV-Visible);颗粒数,激光照射/光吸收法(GR-1000A 激光颗粒物分析仪);浊度,光散射法(哈希 2100N)。

活性炭指标:活性炭的碘值、亚甲蓝值、强度和粒径按照国标 GB/T 7701-2008 系列标准^[16]测定;堆积空隙率采用排水称重法进行估算;总 DNA,取 10g 湿炭,将微生物分离后,采用 Omega Bio-Tek Water DNA Isolation Kit 试剂盒(Omega, 美国)进行提取,具体操作步骤参考文献[17]。提取后的样品 -20℃ 保存,利用 Qubit Fluorometer (Thermo Fisher, 美国) 进行定量分析。

2 结果与讨论

2.1 活性炭老化对过滤阻力的影响

由图 3 可见,老化活性炭的初始过滤阻力约为对照组活性炭的 3 倍。移除占炭柱高度 7.1%(10cm)和 28.6%(40cm)的表层活性炭后,初

始过滤水头损失分别降低 35.4%和 69.2%.说明表层炭是滤柱初始过滤阻力的主要来源,且越接近表层,其对过滤阻力的贡献越大,此结果与其他研究结论一致^[12].

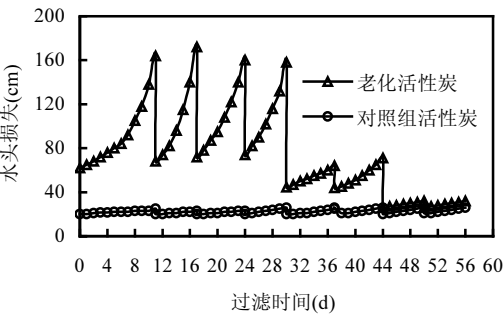


图3 表层炭对滤柱过滤阻力的影响
Fig.3 Effect of activated carbon of the surface layer on the resistance of the filter column

表 1 老化活性炭粒径变化(%)
Table 1 Variation of particle size of the aged activated carbon (%)

粒径(mm)	取样深度(m)		
	0.5~1	1~1.5	>1.5
1.4~2.4	0.00	0.01	0.01
1.00~1.40	3.76	3.53	4.94
0.83~1.00	19.14	18.18	22.99
0.55~0.83	23.01	22.73	27.38
0.38~0.55	14.01	13.27	13.50
<0.38	40.08	42.28	31.18

注:0~0.5m活性耐炭中粒径小于0.15mm活性炭的质量分数为23.3%.

清洁滤料的初始阻力与滤料粒径和级配有关,粒径较小的滤料过滤阻力较大^[11,14].由表 1 可见,老化活性炭中,表层炭的粒径最细,当深度大于 0.5m 后,老化炭的粒径随着深度增加变化不显著,趋于稳定.因此,移除表层炭即可达到显著降低滤柱初始过滤阻力的目的.表2中,新炭(对照组)中粒径大于 0.83mm 的活性炭比例为 93.17%,而运行 10 年(实验组)后此部分活性炭比例仅为 28.17%.活性炭使用过程中,臭氧氧化、微生物分解和自然老化等均有可能降低活性炭的强度,反冲洗时炭粒间的相互摩擦、碰撞等产生了大量小粒径炭粒.如反冲过程无法排出炭池部分小粒径活性炭则

积累于炭层表面,形成相对密实的过滤层,可导致初始过滤阻力升高.

强化反冲排炭后,过滤时滤柱水头损失平均增长率为 15cm/d,移除表层 40cm 炭后水头损失平均增长率为 1.0cm/d,与对照组相同.这是因为移除表层细炭形成的致密滤层后,颗粒物可进入到滤柱较深处,增强了滤柱的纳污能力,表现为水头损失增长率的降低.

表 2 混合活性炭参数变化

Table 2 Variation of typical characteristics of the mixed activated carbon

参数	使用时间(a)				
	0	5	8	10	
碘吸附值(mg/g)	978	211	175	103	
亚甲基蓝吸附值(mg/g)	210	<75	<75	<75	
强度(%)	98.8	94.3	88.0	88.7	
不同粒径炭所占比例 (%)	>2.4mm	0.73	0.03	0	0
	1.4~2.4mm	37.32	4.27	0.03	0.01
	1.00~1.40mm	46.23	21.52	6.62	5.61
	0.83~1.00mm	8.89	32.45	18.09	22.55
	0.55~0.83mm	5.02	28.19	23.30	23.56
	0.38~0.55mm	1.25	9.25	21.15	13.00
	<0.38mm	0.56	4.29	30.81	35.27

2.2 老化活性炭过滤阻力机理分析

利用图 2 所示装置,以 10m/h 滤速测定老化活性炭的过滤阻力.结果表明,表层和底层炭的比过滤阻力分别为 10.65,0.50kPa/m.

清洁滤料的过滤阻力可通过 Kozony-Carman 模型计算,式 1 为其表达式

$$h=k\frac{\mu}{\rho g}\cdot\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}(S_v)^2LV \tag{1}$$

式中:k 为 Kozony 常数,一般取 5; μ 为水的粘度系数, $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ 为水的密度, g/mL ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ε 为固定床孔隙率,%; S_v 为单位体积颗粒比表面积, m^2/m^3 ,不规则颗粒 $S_v=6/\psi d$; ψ 为滤料球度系数; d 为滤料颗粒等体积球体直径, m ; V 为滤速, m/s ; L 为滤层厚度, m .

2 种滤料的水头损失比值可以简化为式(2):

$$\frac{h_1}{h_2}=\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)^3\cdot\left(\frac{1-\varepsilon_1}{1-\varepsilon_2}\right)^2\left(\frac{\psi_2d_2}{\psi_1d_1}\right)^2 \tag{2}$$

由于滤料中存在多种粒径的颗粒,如采用 d_{50} 对应的粒径值可较好的模拟整个滤层的过滤阻力^[18].表层炭和底层炭的 d_{50} 分别为 0.33,0.58mm,孔隙率分别为 62%和 75%.计算结果显示:

$$\frac{h_{\text{表层炭}}}{h_{\text{底层炭}}} = 33.73 \left(\frac{\psi_{\text{底层炭}}}{\psi_{\text{表层炭}}} \right)^2 \quad (3)$$

由式(2)及模拟结果可知,影响清洁滤层过滤阻力的主要因素为粒径、孔隙率和颗粒球度.在假设 2 种炭球度系数相等的情况下,表层炭过滤阻力是底层炭的 33.7 倍,大于实测值的 21.3 倍.模拟值与实测值之间的差别可能来源于球度系数.据此推测表层小粒径炭的球度系数应高于底层炭,其均值约为底层炭的 1.26 倍.因此,老化活性炭过滤阻力增加的主要原因为粒径变小,炭粒径的监测对活性炭滤池的运行具有指导作用.

2.3 强化反冲洗和移除表层炭对有机物去除的影响

由图 4 可见,强化反冲洗阶段,老化活性炭滤柱对 TOC 和 UV_{254} 的平均去除率分别分别为 24.71% 和 24.13%,相应的对照组滤柱值为 16.65% 和 16.18%.移除表层炭后,老化活性炭对 TOC 的平均去除率降为 7.04%,但 UV_{254} 的平均去除率仍为 23.42%.强化反冲洗阶段,老化活性炭对有机物去除率高于对照组.移除表层炭后,老化活性炭对 TOC 的去除效果大幅降低.一方面,由表 2 可知,活性炭使用 5 年后,其碘值和亚甲蓝值显著降低,随着使用年限的增加,变化幅度逐渐降低.说明老化活性炭的孔隙已经堵塞,吸附位已趋于饱和.此时微生物降解是老化活性炭去除 TOC 的主要途径.而且,研究表明,较小粒径的颗粒炭能为微生物的生长提供更大的表面积,增大微生物量^[13,19].同时,表层活性炭中的微生物量最高^[19],随着活性炭深度增加,微生物量呈线性下降的趋势^[20].研究中所用的表层老化活性炭呈粉末状,粒径小于 0.15mm(100 目筛)的活性炭比例为 23.3%.细颗粒活性炭为微生物的栖息提供了良好的载体.总 DNA 提取结果显示,表层老化活性炭和对照组活性炭的总 DNA 分别为 0.92, 0.45 $\mu\text{g/g}$ 湿炭,说明表层老化活性炭中具有更多的微生物.另一方面,老化活性炭滤柱

表层的细颗粒炭层有较好的截留效果.因此,老化活性炭对 TOC 的去除效果好于对照组,移除表层 40cm 炭的同时也移除了大部分微生物,导致 TOC 的去除效果下降.

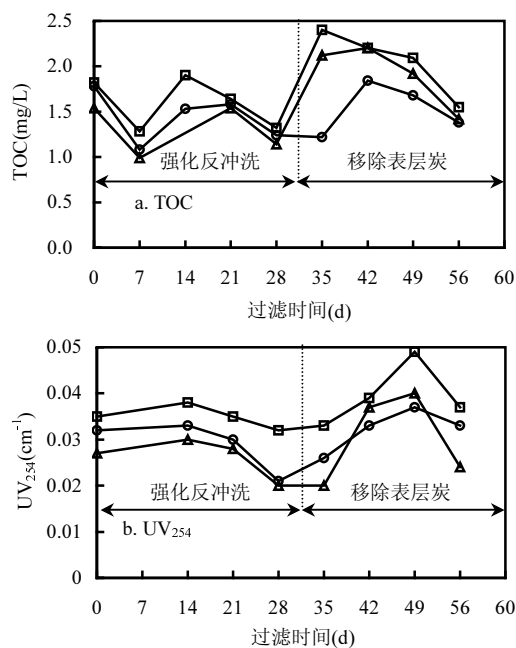


图 4 活性炭滤柱对 TOC 与 UV_{254} 的去除
Fig.4 Removal of TOC and UV_{254} by activated carbon filter

—□— 进水 —○— 对照组出水 —△— 实验组出水

UV_{254} 的去除率并未随着表层炭的移除而显著降低,这是因为微生物并不是 UV 吸收类有机物去除的主要贡献者^[21].同时也说明老化活性炭仍可通过微生物以外的作用,如吸附等去除部分 UV 吸收类有机物.值得注意的是,在移除表层 40cm 活性炭后 10d 左右,活性炭对 TOC 的去除效果接近对照组水平,说明微生物对 TOC 的降解功能已经恢复.

2.4 强化反冲洗和移除表层炭对颗粒物去除的影响

试验期间滤柱进水平均浊度为 0.18NTU,老化活性炭和对照组活性炭活出水的浊度均值分别为 0.19,0.13NTU,强化反冲和移除表层炭对老化活性炭滤柱出水浊度无影响.浊度较低的情况下,采用颗粒数可更好地表征饮用水中的颗粒物

状态.由图 5 可见,强化反冲阶段老化活性炭柱出水的颗粒数均值为 74 个/mL,略低于对照组(91 个/mL).由于老化活性炭滤柱表层的细炭粒形成了较致密的过滤层,对颗粒物具有较好的截留作用.颗粒物被截留于表层后无法进入滤床深处,可导致较高的水头损失增长率(图 3),与 2.1 中的结果相吻合.移除表层活性炭后,出水颗粒数均值为 95 个/mL,与对照组基本相同.说明移除表层炭不会显著影响老化活性炭对颗粒物的截留效果,其对于大于 $2\mu\text{m}$ 颗粒数的去除率可保持在 34.7%左右.

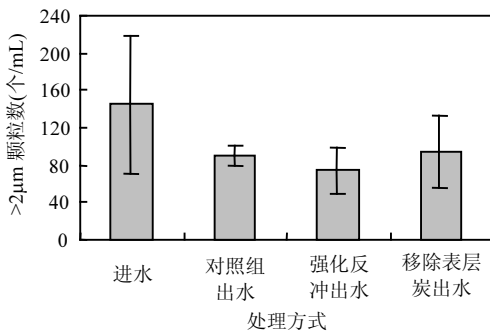


图 5 大于 $2\mu\text{m}$ 颗粒数的变化

Fig.5 Variation of the particle counts larger than $2\mu\text{m}$

3 结论

3.1 活性炭老化后产生的小粒径颗粒炭无法排出是导致滤池阻力升高的主要原因.炭池表层小粒径颗粒炭可形成致密过滤层,其比过滤阻力深层大粒径活性炭的 21.3 倍,是滤池过滤阻力的主要来源.移除表层细炭是降低过滤阻力的有效方法.

3.2 移除表层炭后,老化活性炭对 TOC 的去除效率降低,其去除效果可在较短时间内恢复,对 UV_{254} 的去除则无显著影响.

3.3 移除表层炭对浊度的去除无显著影响,大于 $2\mu\text{m}$ 颗粒数的去除率高于 30%.

3.4 在保证水质的前提下,降低老化活性炭的反冲强度、延长反冲周期是减缓滤池阻力增加的有效方法.

参考文献:

[1] Chu W H, Gao N Y, Yin D Q, et al. Ozone-biological activated carbon integrated treatment for removal of precursors of halogenated nitrogenous disinfection by-products [J].

Chemosphere, 2012,86(11):1087-1091.

- [2] 吴月华,盛德洋,张锡辉,等.饮用水处理中不同滤料除氨氮效果及需氧量研究 [J]. 给水排水, 2011,37(6):22-26.
- [3] 郭建宁,陈磊,张锡辉,等.臭氧/陶瓷膜对生物活性炭工艺性能和微生物群落结构影响 [J]. 中国环境科学, 2014,24(3):697-704.
- [4] Guo J, Hu J, Tao Y, et al. Effect of ozone on the performance of a hybrid ceramic membrane-biological activated carbon process [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014,26(4):783-791.
- [5] Fan X, Tao Y, Wei D, et al. Removal of organic matter and disinfection by-products precursors in a hybrid process combining ozonation with ceramic membrane ultrafiltration [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2015,9(1):112-120.
- [6] Feng S, Zhang X J, Wang Q F, et al. Heterogeneity of ammonia-oxidizing community structures in a pilot-scale drinking water biofilter [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2012,70(5):148-152.
- [7] 喻峥嵘,乔铁军,张锡辉.某市饮用水系统中药品和个人护理用品的调查研究 [J]. 给水排水, 2010,36(9):24-28.
- [8] 乔铁军.活性炭-超滤复合工艺去除水中典型 PPCPs 的效能与机理 [D]. 北京:清华大学, 2011.
- [9] 刘冰,古励,余国忠,等.臭氧/活性炭协同作用去除二级出水中 DON [J]. 中国环境科学, 2014,34(7):1740-1748.
- [10] 丁春生,沈嘉辰,缪佳,等.改性活性炭吸附饮用水中三氯硝基甲烷的研究 [J]. 中国环境科学, 2013,33(5):821-826.
- [11] 汤利华.滤料粒径对过滤的影响 [J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2000,8(3):45-48.
- [12] 阮如新.滤料粒度对过滤的影响 [J]. 给水排水, 1997,23(11):15-17.
- [13] 田家宇,陈伟雄,王威,等.滤料粒径对生物活性滤池除污染效能的影响 [J]. 工业水处理, 2007,27(11):15-18.
- [14] 王群,李涛,叶琳嫣,等.粒径及厚度对双层滤料滤池过滤的影响 [J]. 给水排水, 2012,38(2):27-31.
- [15] 周超,张建锋,何华,等.砂滤池对水中颗粒物截留效果及反冲洗效果的分析 [J]. 给水排水, 2013,39(9):33-38.
- [16] GB/T 7701.2-2008 煤质颗粒活性炭净化水用煤质颗粒活性炭 [S].
- [17] 郭建宁.陶瓷膜及其集成工艺处理微污染饮用水的研究 [D]. 北京:清华大学, 2014.
- [18] Letterman R D. Water quality and treatment: a handbook of community water supplies [M]. McGraw-hill New York, 1999.
- [19] 孙国芬,乔铁军,刘晓飞,等.生物活性炭技术中生物量的变化和影响 [J]. 水处理技术, 2007,33(7):44-47.
- [20] 于鑫,张晓健,王占生.饮用水生物处理中生物量的脂磷法测定 [J]. 给水排水, 2002,28(5):1-5.
- [21] 雷颖,范小江,张锡辉,等.活性无烟煤滤池处理高氨氮原水的中试研究 [J]. 中国给水排水, 2012,28(15):36-40.

作者简介: 刘璟言(1990-),女,山西大同人,硕士研究生,主要从事饮用水的膜工艺处理研究.