

# V 型滤池中气水反冲洗条件下滤层配置特征的变化

张建锋<sup>1</sup>, 赵 晨<sup>1</sup>, 张栋喆<sup>2</sup>, 周 超<sup>3</sup>

(1.西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2.西安建筑科技大学建筑设计研究院, 陕西 西安, 710055;

3.上海宏波工程咨询有限公司, 上海 200232)

**摘要:** 均质滤料和气水反冲洗技术的应用是 V 型滤池高效运行的核心, 监测表明不同使用龄期的滤层内有效粒径  $d_{10}$  和不均匀系数  $K_{80}$  基本稳定, 但滤池中滤料配置特征, 包括等体积直径  $d_v$  和球形度系数  $\psi$ , 随滤层深度呈现出特定的分布特征. 采用滤层截污量分布、反冲洗后滤料表面残余含泥量分布以及截留污泥剥离性能测定, 对滤层配置特征的变化进行了对比分析. 结果显示, 生产滤池中反冲洗效果最差的部位位于滤层内部, 滤料比表面积分布对截污量分布的影响不大, 但与反冲洗完毕滤料表面残留污泥的分布规律一致. 论文结论有助于气水反冲洗技术的理论发展, 并为生产滤池提高反冲洗运行效率提供依据.

**关键词:** 均质滤料; 气水反冲洗; 滤层配置

中图分类号: TU991.24

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)02-0270-04

## Revolution of filter media configurations with water and air scour backwashing in V-Filter

ZHANG Jianfeng<sup>1</sup>, ZHAO Chen<sup>1</sup>, ZHANG Dongzhe<sup>2</sup>, ZHOU Chao<sup>3</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech. Xi'an 710055, China;

2. Institute of Architecture design and research of Xi'an, Xi'an Univ. of Arch. & Tech. Xi'an 710055, China;

3. Shanghai Hongbo project Management Co., LTD. Shanghai 200232, China)

**Abstract:** The application of uniform media configuration and air scour assisted backwash system are essential to long term successful service in V-Filter. The survey results in several plants revealed that the effective size (ES)  $d_{10}$  and uniformity coefficient (UC)  $K_{80}$  can keep stable with deferent aged period. However, the configuration characteristics, such as grain diameter of sphere of equal volume ( $d_v$ ) and sphericity( $\psi$ ), will shift from uniform with depth in filter. This revolution was explained and analyzed with the distribution of deposit, survival deposit after backwash and the detachment performance of deposit in situ filter. The analysis revealed that the worst backwash efficiency was located 20~30 cm below the surface of media in filter, and the distribution with depth of the specific surface of grains resemble the survival deposit after backwash and no relation with deposit in media porous. The conclusions drawn here will benefit the mechanism research on air scour and water backwash, and promote the innovation of filter backwash techniques.

**Key words:** uniform filter media; air scour and water backwash; filter media configuration

过滤是保证饮用水卫生安全性的重要屏障, 随着过滤理论研究的不断深入和滤池自动化控制技术的进步, 在普快滤池基础上发展起来了以 V 型滤池、翻板滤池为代表的一些新池型, 其中 V 型滤池以其过滤效率高、反冲洗耗水少等优势, 逐渐成为近年来新建、改扩建水厂的主流池型, 应用十分广泛. 与常规的普快滤池相比, 采用气水反冲洗技术和均质滤料的滤层配置是 V 型滤池两个突出特征, 大量的生产实践表明采用均质滤料的滤层配置可以有效增加滤层纳污截留能力、减缓过滤阻力增长, 而气水反冲洗技术则是保证均质滤料滤层稳定和高效反冲洗的前提<sup>[1-3]</sup>.

气水反冲洗技术应用于均质滤料滤层的生产实践尽管已有约 30 年<sup>[4]</sup>, 但目前关于实际生产条件下

V 型滤池内滤料粒径及形状系数分布等配置特征的变化规律、滤料表面残余含泥量分布等内容, 在理论研究和实际检测两方面均属空白, 因此也就无法对气水反冲洗技术应用的长期效果进行评价比较. 本文对生产滤池中不同深度滤料粒径和形状系数进行检测分析, 并从滤料截污量、浊质剥离难易及颗粒表面残余含泥量等几个方面对滤层配置特征变化进行分析比较, 以期高效的滤池反冲洗技术研发提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 水样、砂样采集及水质

确定济南地表水厂甲(二期)(文中标示为 F-1)、济南地表水厂乙(一期、二期)(F-2、F-3)、嘉兴第三水厂(F-4)和西安地表水厂(F-5)等四座水厂的 5

组 V 型滤池进行研究. 在选定滤池的滤层四角及中央设 5 个取样点, 各深度样品混匀后分析.

1.2 试剂与仪器

浊度测量采用 HACH2100N 台式浊度仪, 采用 FA2004 上海精科天平进行称重, 滤料形状系数测定中使用了奥林巴斯显微系统.

1.3 实验方法

1.3.1 滤料粒径  $d_v$  和球形度系数的测定

在生产滤池中沿深度分层取砂样, 清洗后 103 ℃ 烘干冷却, 取约 100 g 滤料进行筛分, 另取约 0.25 g 砂样 (50 颗左右) 逐颗精确称量换算得到等体积直径  $d_v$ , 同时摄影并分析图像得到投影面积, 换算得到截面直径  $d_p$ , 根据文献[5]方法换算得到颗粒球形度系数  $\psi$ .

1.3.1 滤料截污量 (含泥量) 测定

取一定量的滤料 103 ℃ 烘干冷却, 精确称重后再用清水将滤料浸泡冲洗干净, 再次放入烘箱中烘干至恒重, 称出水洗后滤料的干重, 水洗前后滤料干重的质量差所占滤料重量的百分数即为滤料的含泥量.

反冲洗前后滤料表面的含泥量, 分别对应着滤料的截污量和表面无法被常规反冲洗剥离、持续积累在滤料表面的浊质量.

1.3.2 截污滤料表面浊质剥离性能测定

在生产滤池进入反冲洗之前分层取样, 用 100 mL 量筒量取 50 mL 滤料, 转移至一个 500 mL 广口瓶中, 向广口瓶中加入 100 mL 超纯水, 以 60 rpm 震荡 1 min, 将广口瓶中洗滤料后的浑浊水倒入另一个 500 mL 广口瓶中, 重复以上过程 4 次, 用超纯水定容冲洗水至 500 mL 后搅拌均匀测其浊度, 以此表征截污滤料表面浊质的剥离难易程度.

2 结果与讨论

2.1 滤料层有效粒径  $d_{10}$  的时效变化

检测滤池中滤料规格见表 1. 检测结果表明不同龄期的滤池中, 混合后滤料样品的有效粒径  $d_{10}$  与原设计参数基本一致, 有效粒径  $d_{10}$  增加或减小的范围在大约  $\pm 7\%$ . 鉴于  $d_{10}$  与滤池的过流阻力相关<sup>[1]</sup>, 因此  $d_{10}$  的减小会引起过流阻力的增加, 但在目前 V 型滤池流量控制模式下, 这一阻力的变化值可以通过出流阀开启度予以补偿, 因此在实际生产中滤池的生产能力并不会受到影响<sup>[6]</sup>. 均匀系数  $k_{80}$  数值在保持基本稳定的情况下略有增大, 结合现场调研发现一些滤池表面存在过于细小的滤料颗粒, 推测在这些滤池中存在滤料破碎现象. 在常规 V 型滤池中, 3~13 年

期的滤料有效粒径  $d_{10}$  和均匀系数  $k_{80}$  基本不变化.

表 1 各水厂滤池滤料规格及龄期  
Tab.1 Media properties and aged period in filters

滤池编号	滤层厚度/m	设计滤料规格		实测滤料规格			滤料龄期/a
		$d_{10}/\text{mm}$	$K_{80}$	$d_{10}/\text{mm}$	$K_{80}$	$d_{90}/\text{mm}$	
F-1	1.2m	0.85	1.4	0.79	1.48	1.38	3
F-2	1.3m	1.0	1.35	1.06	1.39	1.27	13
F-3	1.3m	1.0	1.35	1.02	1.34	1.63	13
F-4	1.2m	1.0	1.35	0.97	1.32	1.49	8
F-5	1.2m	0.9	1.40	0.83	1.63	1.49	7

注: 实测滤料系滤池中沿深度方向取样后混合均匀的样品.

2.2 沿滤层厚度滤料配置特征的变化

2.2.1 等体积直径  $d_v$  的变化

沿深度方向滤料等体积直径  $d_v$  的变化见图 1. 结果表明, 采用气水反冲洗的实际生产滤池中, 沿着深度方向滤料颗粒的等体积球径呈“侧马鞍形分布”, 相对于滤层表面和内部 (深度 50 cm 位置处), 表层以下  $20\pm 5$  cm 处的滤料  $d_v$  值明显偏小.

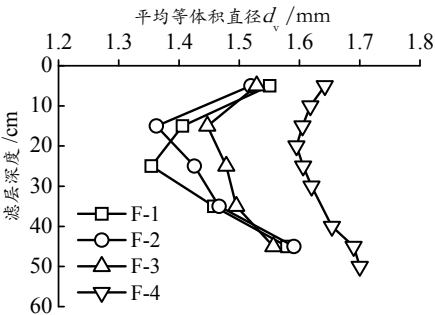


图 1 沿滤层深度滤料等体积直径变化情况  
Fig.1 Grains size  $d_v$  with depth in filter

根据 V 型滤池的技术要求<sup>[7]</sup>, 在气水反冲洗过程中滤料层仅发生微小膨胀甚至不膨胀, 这样可以保持沿深度方向滤料的粒径与级配在反冲洗过程中保持稳定, 这也正是均质滤料滤层构造的核心. 但从实测结果来看, 滤料的等体积直径沿滤层厚度方向发生了改变, 滤层的构造即不同于均质滤层粒径“上下一致”的分布特征, 也不同于单独水冲所形成的“上细下粗”的分级特征<sup>[1]</sup>.

2.2.2 滤料球形度系数的变化

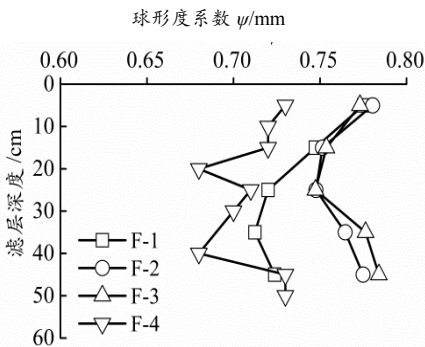


图 2 沿滤层深度滤料球形度系数变化情况  
Fig.2 Grains sphericity with depth in filter

滤料颗粒形状特征对截留效率的影响主要通过粒径  $d_v$  和球形度系数  $\psi$  两个因素体现.球形度系数  $\psi$  表征的是颗粒接近球体积的程度,其值小于等于 1.0,颗粒的形状与球偏离越大,球形度系数就越小.

由图 2 可以发现  $\psi$  在滤层深度方向的变化趋势与  $d_v$  的变化趋势大致相同,滤层表面和深层区域石英砂颗粒的  $\psi$  偏大,而在表层下滤层深度为 15~40cm 的范围内  $\psi$  则相对偏小,显示在该区域滤料颗粒的棱角相对比较发达.

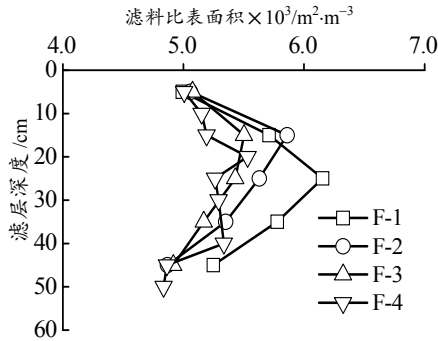


图 3 沿滤层深度滤层的比表面积分布  
Fig.3 Special surface  $S$  with depth in filter

根据深床过滤理论,  $\psi$  和  $d_v$  的变化通过滤料比表面积来影响截留效率,根据式 (1) 计算得到滤层内滤料体积比表面积分布,见图 3.

$$S = 6 / \psi d_v \tag{1}$$

式中:  $S$  为滤料比表面积,  $m^2/m^{-3}$ ;  $d_v$  为滤料的等体积直径,  $m$ ;  $\psi$  为球形度系数.

滤料比表面积的分布表明,从滤层表面开始,滤料颗粒的体积比表面积逐渐增大,至表层以下 15~30 cm 处达到最大值后开始逐渐减小.根据过滤截留机理,滤层内比表面最大的部位截留效率最高、截污量最大.在 V 型滤池内采用均质滤料滤层配置和汽水反冲洗的初衷,是保证沿深度方向的滤料粒径分布和组成均匀一致,避免出现滤层出现粒径“上细下粗”分级而进入“表层泥饼过滤”模式,确保浊质能进入滤层深部,并减缓表层滤料的水头损失的过度增长.实际监测表明沿深度方向滤料比表面积并不一致,即滤料层间截留能力有差异,这会对滤层的实际截污情况造成影响.

### 2.3 滤层截留浊质分布及汽水反冲洗实际效果

生产滤池在反冲洗之前分层取样,测定不同深度滤料截污量见图 4.与滤层表面相比较,深部滤层的截污量没有显著的减小,这体现了均质滤料进行深床过滤的典型特征<sup>[1]</sup>.

反冲洗前在滤层内分层取样,经过震荡后测定砂水混合物悬混液浊度,比较截污滤料表面浊质剥离情

况见图 5.在滤层上下截污量差异不大的条件下(图 4 所示),表层滤料截留的浊质最容易剥离.根据 Amirtharajah 的理论,在汽水反冲洗过程中,表层滤料颗粒本身承受的有效压应力最小,同时表层气泡受到的孔隙水的压力降低,因此气泡上向冲量增加导致其对滤料的搅动作用增强,表层滤料表面浊质剥离效果最好,这在以往的研究观察中已经得到确认<sup>[7]</sup>.

在图 5 中,值得注意的是从表面往下 10~20 cm 处浊度值有一个“拐点”,对应着浊度较低,与图 4 中截污量分布对比,可以大致判断在这一区域滤料表面的浊质剥离效果最差.

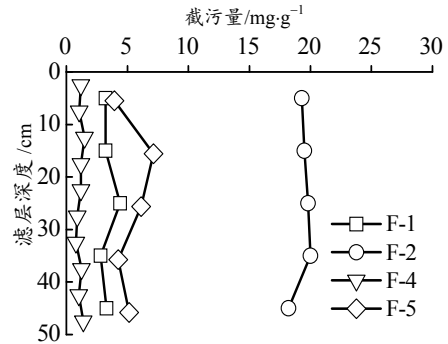


图 4 过滤期终滤层的截污量分布  
Fig.4 Deposit distribution in terminal run with depth

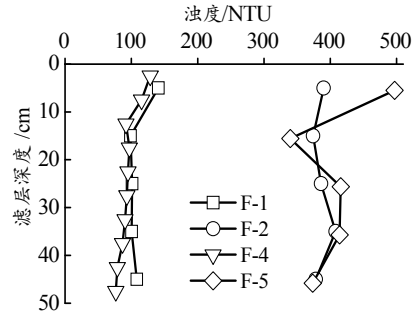


图 5 截污滤层的浊质剥离特征  
Fig.5 Feature of deposit detachment with depth

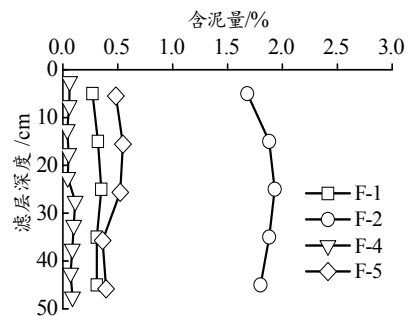


图 6 反冲洗后滤料表面残余含泥量  
Fig.6 Survival deposit on grain surface after backwash with depth in filter

生产滤池反冲洗完成后不同深度滤料表面残余含泥量的分布见图 6.除 F-4 以外其余滤池组反冲后滤料表面残余含泥量不满足“ $\leq 0.2\%$  的优良标”<sup>[4]</sup>,因此这些水厂的反冲洗参数存在进一步优化的必要.

结合前面有关滤料比表面积的分析, 滤层在 20~30 cm 处截留效率最大 (图 3), 但截污量分布的差异性不明显 (图 4), 在滤层内部反冲洗完成后, 滤料表面残余污泥的量在 20~30 cm 处达到峰值 (图 6). 这表明沿深度方向滤料比表面积的对截污量分布的影响不大, 但与反冲洗完毕滤料表面残留污泥的分布规律一致. Ives 关于滤池反冲洗的理论认为滤料表面截留的浊质污泥分为一次污泥和二次污泥, 其中与滤料表面直接接触、粘附强度和密度比较大的为一次污泥, 其余为二次污泥, 一次污泥在常规水力反冲洗条件下不易剥离, 因此是形成反冲洗后滤料表面残余含泥量的主要成分, 一次污泥量与滤料比表面积呈正比例关系<sup>[8]</sup>, 这与上面的监测结果 (图 3 和图 6) 相吻合.

另一方面, 根据 Amirtharajah 关于气水反冲洗的基础理论, 在滤层表面以下的水饱和砂层中, 上升气泡的膨胀、融合、破裂均对沿深度呈线性分布的有效应力产生非线性影响, 例如在某一位置处大气泡破裂为小气泡, 其对周围砂层有效应力的影响瞬时减小, 导致浊质剥离作用减弱<sup>[7]</sup>. 基于这一理论, 最弱反冲洗效果区域可能出现在滤层下部的某一位置, 在滤层浊质截留量差异不大的情况下, 反冲洗后滤料表面残余污泥量的最大值可能会出现在表层以下, 如图 6.

调研的各组滤池反冲洗参数见表 2, 在相同的冲洗流程和基本一致的冲洗强度下, 各组滤池的冲洗历时相差较大, 其中气冲时间 3~5 min, 气水混冲时间 5~15 min, 水冲时间 3~8 min, 但是这些控制条件与 50 cm 厚度滤层的平均残余含泥量之间并没有相关性.

表 2 V 型滤池气水反冲洗控制参数  
Tab.2 Water and air-scour flow rates for V-Filter backwash

滤池组别	混凝剂	冲洗强度 /L·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>		冲洗时间 /min		
		气冲	水冲	气冲	气水混冲	水冲
F-1	PACF	15.3	4.7	5	5	8
F-2	PACF	15.0	4.2	3~4	10~15	3~4
F-3	PAC	15.0	4.2	3~4	10~15	3~4
F-4	PAC+PAM	15.0	4.0	4	7	4
F-5	PAC	15.0	3.5	4.7	5	4.7

3 结论

生产滤池的实际监测和理论分析表明:

(1) 采用气水反冲洗技的均质滤料滤池术, 3~13 年龄期的滤料有效粒径  $d_{10}$  和均匀系数  $k_{80}$  基本不变化, 与原滤池设计参数基本一致, 但沿深度方向滤料等体积粒径  $d_v$  和形状系数发生改变, 与均质滤料的配置特征不符;

(2) 调研的几组滤池中截污量分布表现出深床过滤的特征, 但沿深度方向各层滤料截污量剥离难易程度、反冲洗后滤料表面残余含泥量有显著差异. 检测结果对比分析表明, 滤料比表面积的对截污量分布的影响不大, 但与反冲洗完毕滤料表面残留污泥的分布规律一致. 为提高滤池截留效率, 在实际生产中应该定期监测滤层深部的反冲洗效果.

参考文献 References

[1] 许保玖. 给水处理理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社 2000.  
HSU Paochiu. Water treatment theories and principles [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000.

[2] 杨永志, 张鹏, 张德跃. 翻板滤池在设计和施工中的注意事项[J]. 中国给水排水, 2015, 31(10): 61-63.  
YANG Y Z, ZHANG P, ZHANG D Y. Considerations in Design and Construction of Shutter Filter [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(10):61-63.

[3] SLAVIK I, JEHLICH A, UHL W. Impact of backwashing procedures on deep bed filtration productivity in drinking water treatment [J]. Water Research. 2013(47): 6348-6357.

[4] CLEASBY J L, LOGSDON G S. Granular bed and precoat filtration. In: AWWA. Water quality and treatment—a handbook of community water supplies [M]. 5<sup>th</sup> ed. New York: Mc Graw Hill, 2000.

[5] T. 艾伦. 颗粒大小测定[M]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1984.  
ALLEN T. Particle size measurement [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1984.

[6] HALL D, FITZPATRICK C S B. Spectral analysis of pressure variations during combined air and water backwash of rapid gravity filters [J]. Water Research. 1999(33): 3666-3672.

[7] AMIRTHARAJAH A. Fundamentals and theory of air scour[J]. Jour. Envir. Engr. Div.-ASCE, 1984, 110(3):573.

[8] IVESK J, FITZPATRICK C S B. Detachment of deposit from sand grains[J].Colloid sand surfaces, 1989, 39(1): 239-253

(编辑 沈波)