

张欢, 刘霄鹏, 王栋, 等. 煤砂双层滤料滤池气水反冲洗参数探究及应用[J]. 净水技术, 2024, 43(3):68-75,116.

ZHANG H, LIU X P, WANG D, et al. Exploration and application of gas-water backwashing parameters in anthracite-sand double-layer filter[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(3):68-75,116.

煤砂双层滤料滤池气水反冲洗参数探究及应用

张欢^{1,*}, 刘霄鹏², 王栋³, 谷雷严¹, 杨建华⁴, 冯文²

(1. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120; 2. 潍坊市自来水有限公司, 山东潍坊 261000; 3. 济阳水务发展有限公司, 山东济南 251400; 4. 聊城水务集团有限公司, 山东聊城 252000)

摘要 为解决济阳某 10 万 m^3/d 水厂煤砂双层滤料滤池反冲洗不彻底、滤料流失、混层等问题, 对滤池进行了水反冲流体力学(CFD)模拟, 指导水冲阶段反冲洗强度的选取, 并在现场进行了中试试验。试验结果表明: 采用气水反冲洗模式, 当气冲阶段 $q_s = 17.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $t = 3 \text{ min}$ 时; 水冲阶段, 梯度提升水冲强度, 在 $q_{w1} = 4.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $t_1 = 2 \text{ min}$ 、 $q_{w2} = 7.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $t_2 = 3 \text{ min}$ 、 $q_{w3} = 17.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $t_3 = 3 \text{ min}$ 时, 反冲洗后滤料含泥量可控制在 0.1% 以下, 并可恢复滤料混层。将最优参数在工程现场应用后, 有效解决水厂反冲洗问题, 延长过滤周期, 滤池反冲洗年耗水量减少 192 720 m^3 。

关键词 煤砂双层滤料滤池 CFD 模拟 气水反冲洗 含泥量 混层

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)03-0068-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.03.008

Exploration and Application of Gas-Water Backwashing Parameters in Anthracite-Sand Double-Layer Filter

ZHANG Huan^{1,*}, LIU Xiaopeng², WANG Dong³, GU Leiyan¹, YANG Jianhuan⁴, FENG Wen²

(1. China Urban Construction Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China;

2. Weifang Water Supply Co., Ltd., Weifang 261000, China;

3. Jiyang Water Development Co., Ltd., Jinan 251400, China;

4. Liaocheng Water Group Co., Ltd., Liaocheng 252000, China)

Abstract In order to solve the problems of incomplete backwashing, loss of filter material and mixed layer in a 100 000 m^3/d water treatment plant(WTP) in Jiyang City, the water backwash fluid dynamics (CFD) simulation of the filter was carried out to guide the selection of backwash strength in the water flushing stage, and pilot tests were carried out in the field. The test results showed that the gas-water combined recoil mode was adopted, with an air flushing phase of $q_s = 17.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and $t = 3 \text{ min}$, and during the water flushing phase, gradually increasing water flushing intensity with $q_{w1} = 4.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and $t_1 = 2 \text{ min}$, $q_{w2} = 7.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and $t_2 = 3 \text{ min}$, and $q_{w3} = 17.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and $t_3 = 3 \text{ min}$, the mud content of the filter material could be controlled below 0.1% and the mixed layer of the filter material could be restored. After the application of the optimal parameters in the project site, the backwashing problem of the WTP could be effectively solved. The filtration period could be extended, and the water consumption of the filter tank could be reduced by 192 720 m^3 .

Keywords anthracite-sand double-layer filter CFD simulation gas-water backwashing mud content mixed-layer

滤池是净水处理工艺的重要组成部分之一,为

了解决传统砂滤池存在的不足,在此基础上,发展了双层滤料滤池^[1-2]。煤砂双层滤料滤池是以无烟煤替代上层石英砂,形成的上层为无烟煤、下层为石英砂的双层滤料过滤体系。在过滤过程中,大颗粒悬浮物先经上层大孔隙无烟煤滤料截留,残存于水体中的小粒径颗粒物再经过孔隙率较小的下层石英砂

[收稿日期] 2023-08-22

[基金项目] 中国建设科技集团科技创新基金青年科技基金项目(Z2022Q14)

[通信作者] 张欢(1992—),女,工程师,研究方向为给水处理工艺优化与应用,E-mail:liuncepu@163.com。

滤料时继续被拦截,充分发挥了上下两层滤料的过滤效能,截污容积大幅度增加,使得过滤效率提升,滤池寿命延长^[3-5]。

反冲洗是清除滤料截留污染物,恢复滤池过滤能力的重要工序之一。目前,在实际生产运行中,双层滤料滤池常采用气-水联合反冲洗方式,基于均质滤料滤池反冲洗理念,为防止滤料流失、规避混层风险,《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)^[6]设计反洗时滤料处于松动微膨胀状态,但影响了输泥排放和杂质剥落效果,导致反洗不彻底,滤料截污能力减弱,过滤周期缩短。为防止滤料流失并提高反冲洗彻底性,瑞士苏尔寿(Sulzer)公司开发了气水反冲洗翻板滤池^[7],在后水冲阶段提高水冲强度至 15.0~17.0 L/(m²·s),使滤料膨胀率达到 15%~25%,提高反冲洗效率,但也存在耗水量大的问题。

济阳某水厂处理水量为 10 万 m³/d,采用煤砂双层滤料滤池过滤形式,共设置 8 格,单格滤池尺寸为 L×W×H=9.5 m×7.0 m×5.8 m。在滤料设计上,无烟煤和石英砂层高均为 700 mm,其中石英砂有效粒径 d₁₀=0.8 mm,不均匀系数为 1.5,无烟煤有效粒径 d₁₀=1.5 mm,不均匀系数为 1.4。滤池采用气水反冲洗方式,初始反冲洗设计参数为:气冲阶段,气冲强度为 17.0 L/(m²·s)、气冲时间为 3 min;水冲阶段,水冲强度为 8.0 L/(m²·s)、水冲时间为 10 min。由于水冲阶段反冲洗强度设为定值,造成水冲开始阶段强度偏大,在气流的夹带作用下造成滤料流失,结束阶段强度偏低,滤层混层无法消除。后续厂区运行过程中,为减少滤料流失,将气冲时间提高至 6 min,同时降低水冲强度为 6.0 L/(m²·s),延长水冲时间至 15~20 min,虽然减少了滤料流失,但水冲洗强度不足,导致反冲洗不彻底,反冲洗后滤料含泥量在 0.1%~0.15%,过滤周期为 48 h。

因此,本文结合均质滤池反冲洗以及翻板滤池反冲洗的优点,以济阳某水厂的煤砂双层滤料滤池作为研究对象,通过开展计算流体力学(CFD)模拟,确定适合厂区滤池滤料高效反洗且可利用水力分层的水反冲洗参数,指导气水反冲洗中水冲结束阶段参数选取,并通过试验优化,确定气水反冲洗参数控制方式和参数取值,提高反冲洗效率,减少滤料流失。

1 材料与方法

1.1 反冲洗模拟

1.1.1 动力学理论

本文采用欧拉-欧拉双流体模型对厂区双层滤料反冲洗进行数值模拟,建立适用于双层滤料反冲洗过程的双流体动力学模型,研究滤池内液体和固体颗粒的运动特征,分析不同水反冲洗强度下的滤池膨胀状态以及滤料运动形态。描述流体流动规律的控制方程表达^[8-9]形式如下。

(1) 连续性方程

气相和颗粒相的连续性方程如式(1)~式(3)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = S_{gs} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = S_{gs} \quad (2)$$

$$\alpha_g + \alpha_s = 1 \quad (3)$$

其中: α_g ——气相的体积分数;

ρ_g ——气相的密度,g/cm³;

α_s ——固相的体积分数;

ρ_s ——固相的密度,g/cm³;

\vec{v}_g ——气相的瞬时速度,m/s;

\vec{v}_s ——固相的瞬时速度,m/s;

t ——模拟时间,s;

S_{gs} ——化学反应产生的质量源项。

(2) 动量守恒方程

颗粒相的动量方程如式(4)~式(5)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \vec{v}_g + \beta_{gs}(\vec{v}_s - \vec{v}_g) + S_{gs} \vec{v}_g \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{v}_g + \beta_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) + S_{gs} \vec{v}_s \quad (5)$$

其中: \vec{v} ——速度矢量,m/s;

p ——静压,Pa;

$\bar{\tau}_g$ ——气相黏性应力张量,m²/s;

$\bar{\tau}_s$ ——固相黏性应力张量,m²/s;

β_{gs} ——气固相间曳力系数;

(3) 封闭方程组

液固间相互作用系数模型采用 Syamlal-OBrien 模型,如式(6)~式(8)。曳力函数采用 Dalla 给出

的形式。黏性流体本构方程,根据费祥麟^[10]气相应力 p_{gij} ,具体如式(9)~式(12)。

$$\beta = \frac{C_D Re \alpha_g}{24 v_{r,s}^2} \quad (6)$$

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\frac{Re}{v_{r,s}}}} \right)^2 \quad (7)$$

$$Re = \frac{d_s |v_g - v_s| \rho_g}{\mu_g} \quad (8)$$

$$\alpha_{s,max} = 0.63 p_{gij} = -p_g + \alpha_g \left(\mu'_g - \frac{2}{3} \mu_g \right) \frac{\partial v_{gi}}{\partial x_i} \delta_{ij} + \alpha_g \mu_g \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

$$T_f = \alpha_s \mu_f \frac{\partial v_{si}}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (10)$$

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s(1+e)\alpha_s^2 g_0 \Theta_s \quad (11)$$

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (12)$$

其中: β ——曳力函数;
 C_D ——曳力系数;
 $v_{r,s}$ ——颗粒末端速度, m/s;
 Re ——雷诺数;
 d_s ——颗粒直径, mm;
 v_g ——气相速度, m/s;
 v_s ——固相速度, m/s;
 $\alpha_{s,max}$ ——固体颗粒在自然堆积状态下体积分数的最大值;
 μ_g ——气体动力黏度, Pa·s;
 v_{gi} ——气相速度分量, m/s;
 x_i ——空间坐标;
 δ_{ij} ——罗内克尔函数;
 v_j ——第 j 相速度, m/s;
 v_i ——第 i 相速度, m/s;
 μ_f ——流体相黏度, Pa·s;
 v_{si} ——固相速度分量, m/s;
 Θ_s ——固相颗粒的颗粒温度, °C;
 μ'_g ——气相体积黏度, Pa·s;
 T_f ——固相摩擦应力, Pa;
 p_s ——固相压力, Pa;
 e ——颗粒碰撞恢复系数, 为 0.9;
 g_0 ——径向分布函数, 采用 Ogawa 等^[11]提出的公式, 通常 $\alpha_{s,max} = 0.63$ 。

1.1.2 网格划分

为准确捕捉反冲洗流场内水流形态,使用 ICEM 软件划分模型网格如图 1 所示。由图 1 可知,最大网格尺度不超过 1 mm,网格总数为 300 万。

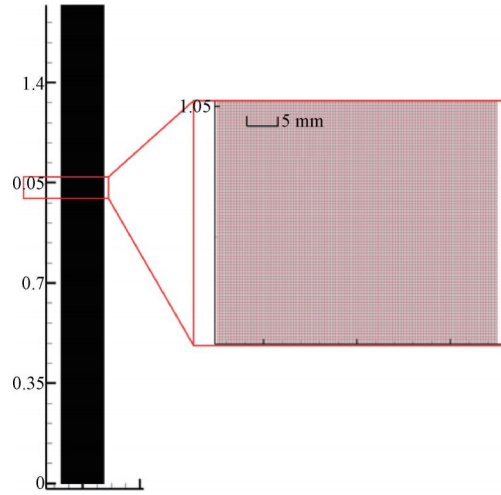


图 1 反冲洗模拟中网格结构

Fig. 1 Grid Structure in Backwash Simulation

1.2 试验装置与方法

煤砂双层滤料滤池过滤及反冲洗中试装置如图 2 所示,滤柱采用有机玻璃管,高为 3 000 mm,内径为 150 mm,安装滤头进行配水、配气。滤料填充与厂区一致,石英砂有效粒径 $d_{10} = 0.8$ mm,不均匀系数为 1.5,填充高度为 0.7 m;无烟煤有效粒径 $d_{10} = 1.5$ mm,不均匀系数为 1.4,填充高度为 0.7 m;承托层采用粗砂,粒径为 4~32 mm,厚度为 0.15 m。

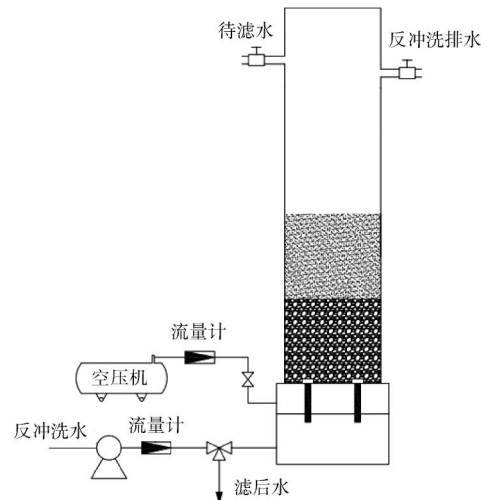


图 2 煤砂双层滤料反冲洗装置

Fig. 2 Backwashing Set-Up of Anthracite Double Layer Filter
试验期间水温为 20~25 °C,待滤水取自水厂沉

淀池出水, 浑浊度为 0.7~1.3 NTU, 采用与厂区一致的恒水位过滤方式, 当滤池出水浑浊度到达 0.5 NTU 时, 即为过滤终点, 开始进行反冲洗。反冲洗供水装置采用自吸增压泵, 从水厂清水池获取, 水冲强度由液体转子流量计控制; 反冲洗供气装置采用鼓风机, 气冲强度由 LZB-10F 玻璃转子流量计控制。

在进行过滤反冲洗前探究前, 基于水力模拟, 首先进行气水反冲洗强度和反冲洗程序探究预备试验, 指导参数的选取。

1.3 检测项目与方法

反冲洗水浑浊度是滤池反冲洗效果的表征方法之一。反冲洗时, 从反冲洗排水开始每隔 30 s 取一次水样, 采用 TL 2300 浊度仪对不同条件下的反冲洗出水浑浊度测定。

滤后水浑浊度: 反冲洗结束后, 每隔 1 h 检测一次过滤出水浑浊度, 记录过滤周期。

滤料含泥量测定: 按照滤层表面以下 15 cm 处滤料含泥量 $\leq 0.2\%$ 作为衡量反冲洗效果的标

准^[12]。取滤层各深度处一定量的滤料置于 105 ℃ 的烘箱中烘至恒重, 并称其质量 C_1 ; 将滤料清洗干净, 再次经 105 ℃ 烘干, 称其质量 C_2 , 根据式(13)计算滤料含泥量。

$$n = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \quad (13)$$

其中: n ——滤料含泥量;

C_1 ——水洗前滤料的质量, g;

C_2 ——水洗后滤料的质量, g。

2 结果与讨论

2.1 CFD 模拟

反冲洗过程中, 各滤料层中滤料的运动速度影响滤层的膨胀和运动形态, 采用 CFD 对给定不同反冲洗速度的滤料模拟, 为水反冲洗以及气水联合反冲洗中水冲阶段确定合理的参数取值范围。不同反冲洗速度下无烟煤和石英砂的滤料运动模拟(水温为 20 ℃)如图 3 所示, 图中红色区域代表滤料状态, 纵向高度为反冲洗时滤料层高, 膨胀率与反冲洗强

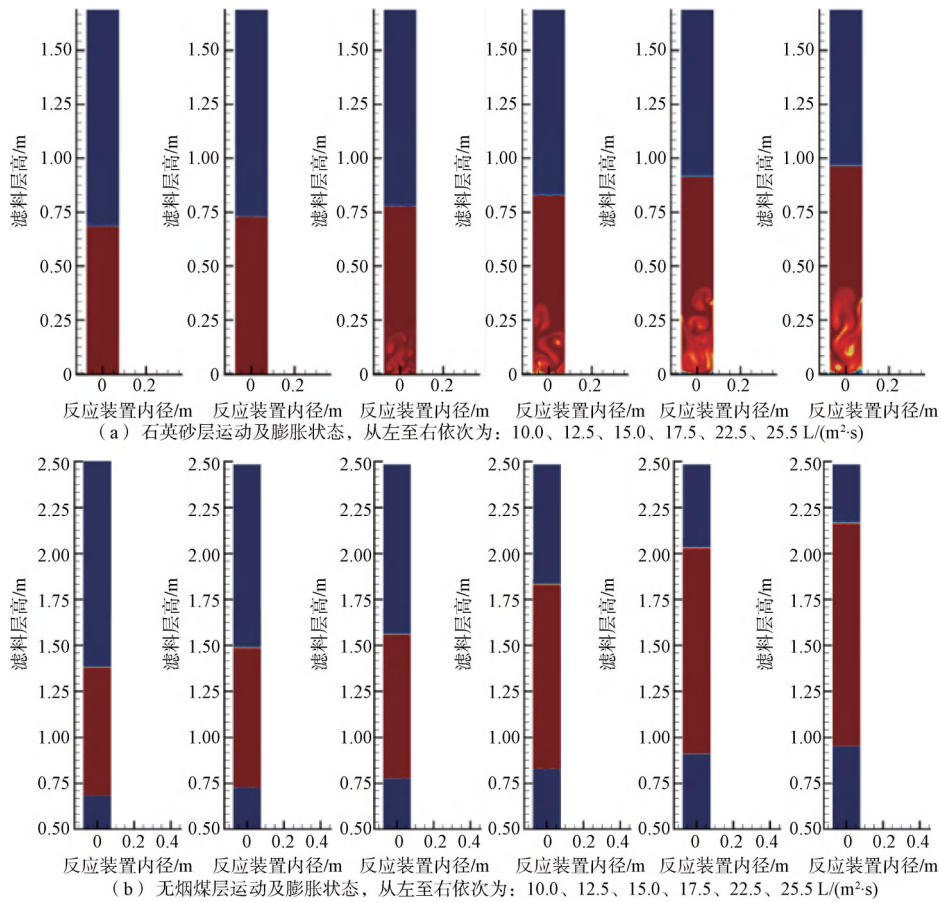


图 3 无烟煤和石英砂运动及膨胀状态模拟

Fig. 3 Simulation of Anthracite and Quartz Sand Expansion State

度的关系如图4所示。

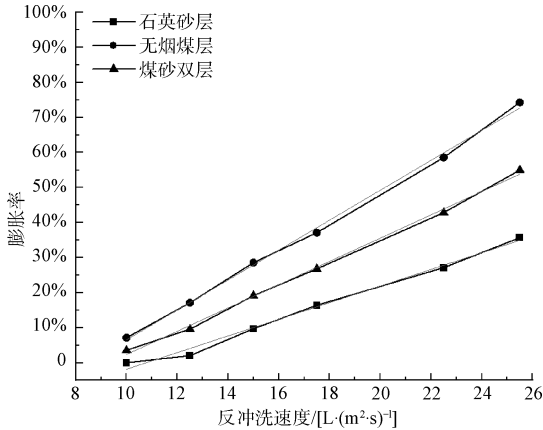


图4 煤砂双层滤池膨胀率与反冲洗强度关系

Fig. 4 Relation between Expansion Rate of Anthracite-Sand Double-Layer Filter and Backwashing Entensity

由图3、图4及模拟效果可知,在反冲洗过程中,无烟煤首先开始膨胀,当反冲洗强度为12.5 L/(m²·s)时,下层石英砂颗粒在水流的作用下开始向上运动,根据经验公式计算^[13],此时水反冲洗强度满足最小流化冲洗强度为12.0 L/(m²·s),滤料层开始发生膨胀;当反冲洗强度为15.0 L/(m²·s)时,滤料层发生反方向运动现象,形成回流,但石英砂层砂粒向下运动的速度较慢;当反冲洗强度为17.5 L/(m²·s),石英砂层开始形成稳定的环流,膨胀率为16.4%;继续增加反冲洗强度,环流作用更加明显。

根据反冲洗过程中,滤层所受的合力计算公式^[14-15]如式(14)。

$$F = \sum_i^n F_i - (m_1 + m_2)g - f \quad (14)$$

- 其中: F ——滤层所受合力,N;
- F_i ——第*i*层滤料所受上升曳力,N;
- m_1 ——石英砂层质量,kg;
- m_2 ——无烟煤层质量,kg;
- g ——重力加速度,N/kg;
- f ——滤料所受阻力,N。

这是由于随着水冲强度增加,滤层中的流速高于空床流速,滤料层受到向上的曳力,同时在重力作用的影响下,滤料颗粒开始减速,出现反方向的回流运动,在一定区域内形成环流。由于无烟煤和石英砂的密度差异,掺混在石英砂中的无烟煤在水流的作用下可继续上升,无烟煤与石英砂

分层。因此,若保证本试验设计下的双层滤池滤料煤粒、砂粒不混层,水反冲洗强度至少应控制在17.5 L/(m²·s)。

基于CFD模拟结论开展中试试验,验证了不同水反冲洗条件下的滤料膨胀率与反冲洗强度的关系,如图5所示。

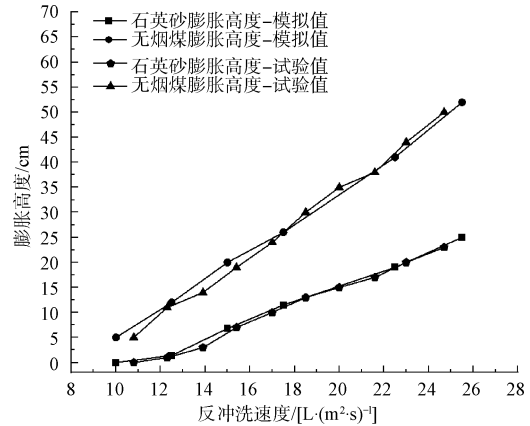


图5 滤层膨胀高度模拟与试验值

Fig. 5 Simulation and Test Values of Filter Expansion Height

由图5可知,通过对比计算,石英砂和无烟煤试验膨胀高度与模拟膨胀高度误差分别在3.4%和8.1%以内,误差最大值在接受范围内,说明模拟结果准确可信,可反映煤砂滤池反冲洗时滤料的运动及水流形态。

2.2 气水反冲洗运行控制

本试验先通过气反冲洗强度下滤料流失、混层程度研究,确定合适的气反冲洗强度选取范围;再结合水力模拟,确定可保证滤料不流失且混层分离的水冲控制程序。气冲3 min,不同气反冲洗强度下滤料混层以及滤料运动情况如表1所示。

由表1可知,在气反冲洗过程中,随着气反冲洗强度的逐渐增大,对滤料的搅动能力增加,滤料间出现明显的脉动现象。当反冲洗强度为11.1 L/(m²·s)时,无烟煤和石英砂滤层中均出现小的气孔,表层约1 cm高处无烟煤在气水搅动下向上漂浮约50 cm;继续增加气冲强度,当气冲强度高于13.0 L/(m²·s)时,由于气流在滤料层的快速穿行,被滤料分割的小气泡难以形成大气泡,水层受到气流的扰动,无烟煤层和石英砂上层均出现明显的翻滚、脉动,双层滤料间出现混层现象,混层高度为3~5 cm;当气冲强度达到16.7 L/(m²·s)时,扰动作用增强,滤料层翻滚、碰撞;气冲强度为22.2 L/(m²·s)时,上层5 cm

高处煤层被气流带起,存在滤料流失的风险。因此,在保证滤料充分碰撞、摩擦以及尽量减少混层、流失的前提下,本试验设计下的双层滤池气冲强度可控制在 16.7~20.4 L/(m²·s)。

高速气反冲结束后,滤料层内存在大量空气,根

据试验结果,当气冲强度为 16.7~20.4 L/(m²·s) 时,气泡消失时间需 4~5 min,附着于滤料层内的小气泡,在水冲强度的影响下,会使挟带上来的滤料在气泡破裂时流失或混层。因此,探究了包括厂区水冲控制方式在内的 4 种控制程序,如表 2 所示。

表 1 不同气反冲洗强度下滤料状态

Tab. 1 State of Filter Material under Different Gas Backwashing Intensity

气反冲强度 q_s / [L·(m ² ·s) ⁻¹]	混层高度/cm	滤料流动情况	跑料情况	反应器内气泡消失时间/min
11.1	-	-	表层无烟煤漂浮,高度约为 50 cm	1 min 50 s 后气泡完全消失
13.0	3~5	煤层蠕动	表层无烟煤漂浮,高度约为 60 cm	3 min 50 s 后气泡完全消失
14.8	5~7	煤层明显蠕动	表层无烟煤漂浮,高度约为 60 cm	4 min 10 s 后气泡完全消失
16.7	7~10	煤层和砂层明显蠕动	无烟煤上层 2~3 cm 漂浮,高度为 65~75 cm	4 min 20 s 后气泡完全消失
18.5	10~15	煤层和砂层明显蠕动	无烟煤上层 3~5 cm 漂浮,高度为 65~75 cm	4 min 45 s 后气泡完全消失
20.4	15~20	煤层和砂层明显蠕动	无烟煤上层 5 cm 漂浮,高度为 75~80 cm	4 min 20 s 后气泡完全消失
22.2	15~20	煤层和砂层明显蠕动	无烟煤上层 5 cm 漂浮,高度为 75~80 cm	4 min 32 s 后气泡完全消失

表 2 煤层静置时间对水反冲洗的影响

Tab. 2 Influence of Anthracite Seam Standing Time on Water Backwashing

试验方式	水反冲洗强度 q_w / [L·(m ² ·s) ⁻¹] 及 水反冲洗时间/min	跑料情况	混层现象
1	① $q_{w1}=4.5, t_1=2$ ② $q_{w2}=7.0, t_2=3$ ③ $q_{w3}=17.5, t_3=3\sim4$	无跑料	存在 2~3 cm 的混层
2	① $q_{w1}=4.5, t_1=2$ ② $q_{w2}=7.0, t_2=3$ ③ $q_{w3}=16.0, t_3=3\sim4$	无跑料	存在 8~10 cm 明显混层
3	① $q_{w1}=5.5, t_1=1.5$ ② $q_{w2}=7.0, t_2=3$ ③ $q_{w3}=17.5, t_3=3\sim4$	出现滤料断层现象	存在 2~3 cm 的混层
4	$q_w=6.0, t=15$	存在滤料断层,且有滤料流失现象	存在 8~12 cm 明显混层

注: q_{w1} 、 q_{w2} 、 q_{w3} 分别表示第一阶段、第二阶段、第三阶段水冲强度, L/(m²·s); t_1 、 t_2 、 t_3 表示第一阶段、第二阶段、第三阶段水冲时间, min。

由表 2 可知,结合现场试验,在气冲结束后,水反冲阶段需先以较小反冲洗强度 $q_{w1}=4.5$ L/(m²·s) 反冲排除滤料及孔隙内的气泡,防止滤料上气泡夹带着轻质的无烟煤上浮,发生滤料流失,这与刘辉等^[16]研究结论一致。然后梯度提升水反冲洗强度,完成排泥与混层的恢复。基于水反冲洗 CFD 模拟,将水冲强度 q_{w3} 控制为 17.5 L/(m²·s),保证了两层滤料分别处于完全流化状态,利用滤料的级配与密度差异,将混层的滤料重新分层,混层高度降至 2~3 cm。在水冲强度 $q_{w3}=16.0$ L/(m²·s) 时,根据试

验结果,此时石英砂层砂粒运动的速度相对缓慢,掺杂的滤料无法高效分离,仍存在 8~10 cm 的明显混层,这也与 CFD 模拟结果相符。

2.3 气水反冲洗效果

2.3.1 气反冲洗强度对反冲洗效果的影响

基于 2.2 小节确定的气冲强度范围,在气冲时间为 3 min,水冲在第一种控制条件下时,探究气反冲洗强度对反冲洗效果的影响,如图 6 所示。

由图 6 可知,气洗时间为 3 min,水冲为第一种控制条件下,随着气反冲洗强度的增加滤层含泥量

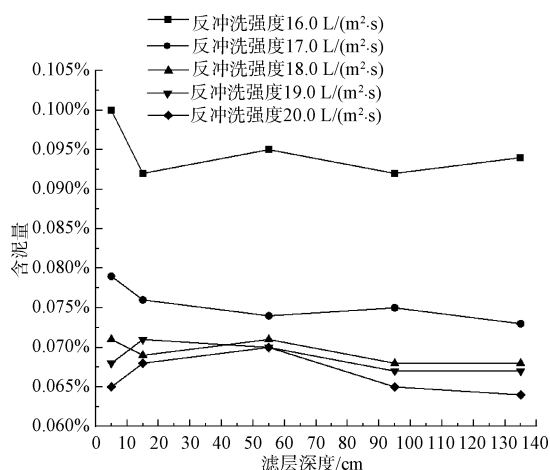
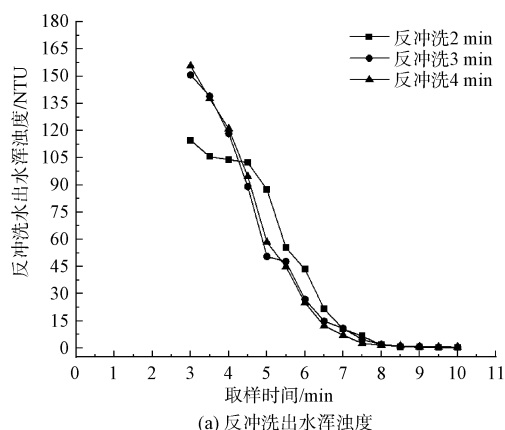


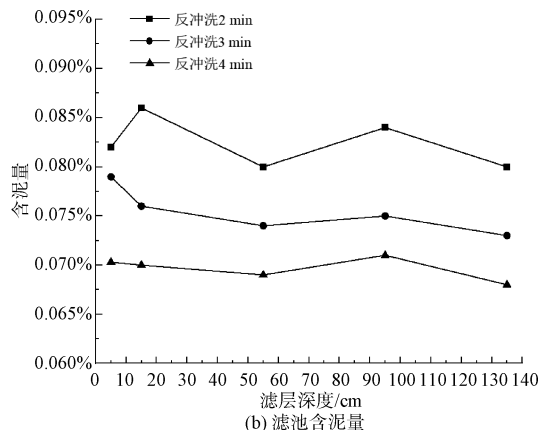
图6 反冲洗强度对反冲洗效果的影响

Fig. 6 Impact of Backwash Intensity on Backwash Result

逐渐减少,且同一反冲洗强度下,各滤层深度含泥量



(a) 反冲洗出水浑浊度



(b) 滤池含泥量

图7 反冲洗时间对反冲洗效果的影响

Fig. 7 Effect of Backwashing Time on Backwashing Result

由图7(a)可知,初始浑浊度随着气反冲洗时间的延长而升高,表明在长时间的剪切作用下,可使滤料表面淤泥剥落更彻底。结合图7(b)可知,气冲时间增加,反冲洗后滤层含量逐渐降低,且各滤池深度处的含泥量均小于0.1%。因此,综合运行与经济控制条件,气洗时间控制为3 min,水冲第三阶段控制为3 min。

因此,对于本文中的滤池,最佳气水反冲洗条件为:气冲阶段, $q_s = 17.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $t = 3 \text{ min}$;水冲阶段, $q_{w1} = 4.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $t_1 = 2 \text{ min}$, $q_{w2} = 7.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $t_2 = 3 \text{ min}$, $q_{w3} = 17.5 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $t_3 = 3 \text{ min}$ 。

2.4 工程应用

将确定的最佳运行参数应用于济阳某水厂的一组滤池反冲洗控制中,应用组与未应用组的滤池各滤料层含泥量以及反冲洗后的滤池出水浑浊度对比

基本相同。在气冲强度为 $16.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,滤层深度为5 cm处含泥量为0.1%,比气冲强度为 $17.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的含泥量0.079%提高了21%,说明低气冲强度无法保证滤料充分碰撞、摩擦;参照美国芝加哥滤料含泥量评判标准,含泥量低于0.1%时,表示滤层清洗达到最优状态^[12],在反冲洗强度为 $20.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,滤层深度135 cm处含泥量可降至0.064%。因此,综合运行与经济控制条件,将气洗强度控制为 $17.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.3.2 气反冲洗时间对反冲洗效果的影响

基于2.2小节确定的参数范围和水冲控制方式,探究在气冲强度为 $17.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,水冲为第一种控制条件下,反冲洗时间对反冲洗效果的影响如图7所示。

如图8所示。

由图8(a)可知,工程应用组滤池含泥量相较于未应用组明显降低,且应用组在各滤层深处含泥量较为均匀,含泥量为0.077%~0.082%;未应用组各滤层深度处变化较大,滤层深度为5 cm处含泥量为0.11%且与135 cm处含泥量相差0.024%。这是因为厂区在水反冲洗时,水冲强度不足,导致滤料无法彻底冲洗。应用后,滤池可保持沿深度方向实现最优滤料状态,恢复双层滤料的截污能力,滤池反冲洗周期由48 h延长至72 h。

此外,在原有反冲洗控制方式下,水厂单格反冲洗耗水量为 352 m^3 ,每次水洗总耗水量为 2816 m^3 ;工程应用后,单格反冲洗耗水量降至 330 m^3 ,每次水洗总耗水量为 2640 m^3 。结合反冲洗周期的延长,计算年度反冲洗耗水量可降低 192720 m^3 。

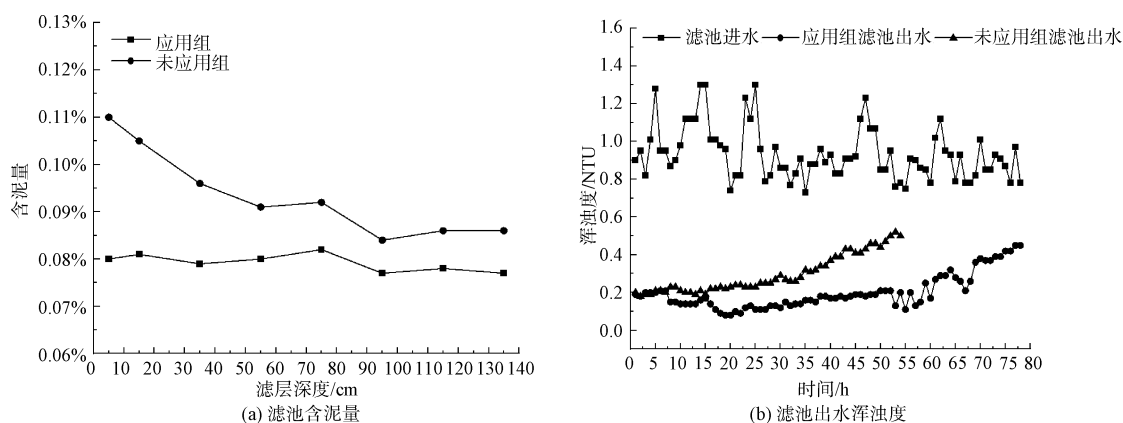


图8 工程应用前后滤池含泥量和滤池出水浑浊度对比

Fig. 8 Comparison of Mud Content and Turbidity of Filter Effluent before and after Engineering Application

3 结论

(1) CFD 模拟结果表明:对于无烟煤和石英砂层高均为 700 mm,石英砂有效粒径 $d_{10}=0.8\text{ mm}$,无烟煤有效粒径 $d_{10}=1.5\text{ mm}$ 的双层滤料滤池,在水温为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,反冲洗强度为 $17.5\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,无烟煤和石英砂层均膨胀流化,并形成稳定的环流,在水力作用下无烟煤与石英砂分层。

(2) 气水反冲洗试验结果表明:该滤层设计下,控制气冲阶段, $q_s=17.0\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, $t=3\text{ min}$;水冲阶段,基于 CFD 模拟结论,控制 $q_{w1}=4.5\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $t_1=2\text{ min}$, $q_{w2}=7.0\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $t_2=3\text{ min}$, $q_{w3}=17.5\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $t_3=3\text{ min}$,可保证滤料充分碰撞、摩擦,减少滤料流失,恢复气冲阶段形成的混层。

(3) 在工程中应用,在最佳参数下,厂区反冲洗后滤池含泥量降至 0.08% 左右,过滤周期延长至 72 h,年度反冲洗耗水量减少 $192\ 720\text{ m}^3$ 。

参考文献

[1] CESCÓN A, JIANG J Q. Filtration process and alternative filter media material in water treatment[J]. Water, 2020, 12(12): 3377.

[2] CHEREMISINOFF N P. Handbook of water and wastewater treatment technologies [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

[3] SANCHEZ N P, SKERIOTIS A T, MILLER C M. Assessment of dissolved organic matter fluorescence PARAFAC components before and after coagulation-filtration in a full scale water treatment plant [J]. Water Research, 2013, 47(4): 1679-1690.

[4] SANYAOLU B O. Comparative performance of a pumice dual media filter and a conventional rapid sand filter[J]. Journal of

Natural Sciences Engineering & Technology, 2010, 9(1): 137-146.

[5] GRACIANO-URIBE J, PUJOL T, HINCAPIÉ-ZULUAGA D A, et al. Bed expansion at backwashing in pressurised porous media filters for drip irrigation: Numerical simulations and analytical equations [J]. Biosystems Engineering, 2022, 223: 277-294. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2022.09.008.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 室外给水设计标准:GB 50013—2018[M]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of outdoor water supply engineering: GB 50013—2018 [M]. Beijing: China Planning Press, 2018.

[7] 陆先镭, 胡远来, 贺卫宁, 等. 翻板滤池反冲洗存在问题及解决措施[J]. 工业用水与废水, 2017, 48(2): 53-56.

LU X L, HU Y L, HE W N, et al. Existing problems of shutter filter backwashing and solving measures thereof [J]. Industrial Water & Wastewater, 2017, 48(2): 53-56.

[8] LI Y, HE G W, YU B, et al. DEM-CFD modeling and simulations of hydrodynamic characteristics and flow resistance coefficient in fixed-bed reactors [J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2021, 8: 100167. DOI: 10.22541/au.160990464.47300966/v1.

[9] FARD M G, STIRIBA Y, GOURICH B, et al. Euler-Euler large eddy simulations of the gas-liquid flow in a cylindrical bubble column [J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 369: 110823. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2020.110823.

[10] 费祥麟. 高等流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.

FEI X L. Advanced fluid mechanics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989.

(下转第 116 页)

参考文献

- [1] YANG H, TONG X, GOU D F. Study on the waterlogging operation effects of InfoWorks ICM dispatching strategies [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 228: 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202122801009.
- [2] LI H F, LU L J, HUANG X F. An optimal design strategy of decentralized storage tank locations for multi-objective control of initial rainwater quality [J]. Water Supply, 2020, 20(6): 2069-2081.
- [3] 张伟, 钱静, 李田, 等. 水力模型辅助合流制系统改造及其运行效果评估[J]. 中国给水排水, 2015, 31(7): 114-118. ZHANG W, QIAN J, LI T, et al. Reconstruction of combined sewer system with help of hydraulic model and its performance assessment [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(7): 114-118.
- [4] WENG H T, LIAW S L. An optimization model for urban sewer system hydraulic design [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2011, 30(1): 31-42.
- [5] 张留臻, 王辉, 谭琼, 等. 水力模型用于干线对区域排水系统运行影响的研究 [J]. 中国给水排水, 2017, 33(15): 122-125. ZHANG L L, WANG H, TAN Q, et al. Application of hydraulic model in assessment of influence of safe operation of SSP II on regional drainage systems [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(15): 122-125.
- [6] 彭海琴, 张留臻. 上海污水干线总管网络模型构建与调度研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2020(1): 143-146, 158. PENG H Q, ZHANG L L. Study on construction and operation of sewage main network model in Shanghai [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2020(1): 143-146, 158.
- [7] 谭琼, 张建频, 徐贵泉, 等. 河道泵闸与市政泵站应对内涝的联动运行优化调度 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(19): 124-128. TAN Q, ZHANG J P, XU G Q, et al. Optimal combined operation of municipal pumping stations and river pump gates for flooding control [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 124-128.
- [8] 谭琼, 时珍宝, 张建频, 等. 大型合流制污水干管优化运行研究 [J]. 给水排水, 2011, 47(11): 97-101. TAN Q, SHI Z B, ZHANG J P, et al. Research on the optimal operation of large-scale combined sewage mains [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 47(11): 97-101.
- [9] 廖青桃, 谭琼, 时珍宝, 等. 城市污水处理厂厂网联动平稳输送运行优化研究 [J]. 给水排水, 2016, 52(12): 20-24. LIAO Q, TAN Q, SHI Z B, et al. Research on the optimization of smooth conveying operation of urban sewage treatment plant and plant network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(12): 20-24.
- [10] XU S R, AN H Y, HUANG M L. Numerical simulation and optimization of uniform media filter backwashing in filter [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(6): 2111-2118.
- [11] OGAWA S, UMEMURA A, OSHIMA N. On the equations of fully fluidized granular materials [J]. Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Physik Zamp, 1980, 31(4): 483-493.
- [12] 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. ZHOU C, ZHANG J F, HE H, et al. Analysis of the interception effect and backwashing effect of sand filters on particulate matter in water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(9): 33-38.
- [13] 严煦世, 范谨初. 给水工程 [M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. YAN X S, FAN J C. Water supply engineering [M]. 4th ed. Beijing: China Construction Industry Press, 1999.
- [14] 许仕荣, 安浩颖, 黄茂林. 均质滤料滤池反冲洗数值模拟及优化 [J]. 安全与环境学报, 2023, 23(6): 2111-2118.
- [15] 王珊, 张克峰, 张奔, 等. 煤砂滤池反冲洗优化及自控系统研究 [J]. 给水排水, 2017(s1): 33-36. WANG S, ZHANG K F, ZHANG B, et al. Research on optimization of backwashing and automatic control system for coal sand filter [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017(s1): 33-36.
- [16] 刘辉, 熊岚, 许建华. 防止煤砂双层滤料滤池跑煤的反冲洗方式 [J]. 净水技术, 2001, 20(4): 36-38. LIU H, XIONG L, XU J H. Backwashing process to prevent anthracite loss in dual media filter [J]. Water Purification Technology, 2001, 20(4): 36-38.

(上接第 75 页)