

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.21.018

CFD模拟用于深床滤池气水联合反冲洗均匀性研究

俞丹丹, 梁 硕, 王艳芝, 赵乔华, 姚清圆, 王陆军
(北京沃尔德斯水务科技有限公司, 北京 102308)

摘 要: 以厦门同安水质净化厂反硝化深床滤池为例,为理论验证滤砖局部设计参数,选取经验化的可实施性效果,同时验证其布水布气的均匀性效果,建立了滤池底部布水布气滤砖的网格模型,对反冲洗曝气实验流程进行计算流体力学(CFD)仿真模拟。结果表明,滤池底部的布水布气系统将空气和水均匀分布在整個滤池平面上,以保证滤池反冲洗效果,布置合理,可为该项目的安装施工提供技术支持,并可直观模拟工程曝气实验效果,避免实际工程中布水布气二次整改。

关键词: 反硝化深床滤池; 计算流体力学; 气水联合反冲洗; 均匀性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)21-0124-06

Investigation of Air and Water Distribution Uniformity during Combined Backwashing in a Deep Bed Filter Using CFD Simulation

YUN Dan-dan, LIANG Shuo, WANG Yan-zhi, ZHAO Qiao-hua, YAO Qing-yuan,
WANG Lu-jun

(Beijing World's Water Technology Co. Ltd., Beijing 102308, China)

Abstract: The experiment was carried out in the denitrification deep bed filter at Tong'an Water Purification Plant in Xiamen to theoretically verify the local designed parameters of the filter bricks, evaluate the empirical feasibility, and assess the uniformity of water and air distribution. A computational grid model was developed to simulate the distribution of water and air through filter bricks located at the bottom of the filter, and computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted to analyze the aeration process in backwashing. The water and air distribution system located at the bottom of the filter ensured uniform dispersion of air and water across the entire filtration plane, thereby enhancing the backwashing efficiency. With an optimized layout design, this system provides technical support for project installation and construction, enabling visual simulation of aeration performance in engineering applications and preventing the need for secondary adjustments of water and air distribution during actual implementation.

Key words: denitrification deep bed filter; computational fluid dynamics (CFD); air-water combined backwashing; uniformity

反硝化深床滤池常被用于污水处理厂提标改造及新扩建项目中。运行过滤时滤池需定时反冲洗,反冲洗对滤料的再生效果能够直接影响过滤性能。

通过在滤池底部铺设透水、透气的滤砖,将空气、水二次分配在整个滤池平面区域,使滤池具有更好的反冲洗效果^[1-2]。随着计算流体力学(CFD)的快速

通信作者: 梁硕 E-mail: 815008931@qq.com

发展,该技术已经成为越来越多研究者用于优化设计的重要手段^[3-6]。CFD技术对水处理构筑物优化设计和运行操作具有指导作用,林慧萍等^[7]使用CFD技术对V型滤池进行模拟,实现了给水空间内部结构优化,提高了中层、底层的给水均匀度。正确的流体动力学设计可提高构筑物效率,并有效降低运营成本^[8]。

目前的工程项目中,深床滤池滤砖铺设的均匀性验证仅通过曝气实验开展,并且存在整改返工情况,无法进行直观预见性判断。现提出基于CFD的模拟方式,对滤池反冲洗布水布气系统进行仿真模拟,直观预测滤砖布置中入口位置及系统内部各孔的流速状态,验证滤砖反冲洗数值选取的可实施性效果,并模拟工程曝气实验,以降低滤砖安装过程中的整改概率。

1 项目概况

厦门同安水质净化厂四期工程设计规模为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,深度处理工艺采用高效沉淀池+反硝化深床滤池+接触消毒池工艺,出水水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准,其中 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$ 。反硝化深床滤池工程设备安装规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其设计进水 $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$ 、 $\text{SS} \leq 20 \text{ mg/L}$,要求出水 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$ 、 $\text{SS} \leq 5 \text{ mg/L}$ 。滤池格数为8格,单格池体尺寸为 $19.50 \text{ m} \times 4.88 \text{ m}$ 。单块滤砖标准尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 $1224 \text{ mm} \times 270 \text{ mm} \times 320 \text{ mm}$,材质为高密度聚乙烯(HDPE)低发泡成型产品。滤砖气孔孔径为 $3.0 \sim 3.5 \text{ mm}$,开孔率为 $0.015\% \sim 0.021\%$;水孔的长 $\times$ 宽为 $6 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$,水孔开孔率为 $0.4\% \sim 0.5\%$;面层开孔率为 $0.5\% \sim 1.5\%$ 。单格滤池滤砖布置进行二次详细设计,滤砖铺设15列,单列按长度方向布置15块,单格滤池共铺设225块。设计气反洗强度为 $90 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、水反洗强度为 $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,计算分布到单列滤砖中的反冲洗气体流量为 $0.1586 \text{ m}^3/\text{s}$,反冲洗水流量为 $0.0264 \text{ m}^3/\text{s}$ 。滤池承托层采用天然鹅卵石,有效粒径为 $3 \sim 20 \text{ mm}$,5级级配,填充厚度为 0.45 m 。滤料采用天然海砂,有效粒径为 $1.70 \sim 3.35 \text{ mm}$,滤料层填充厚度为 1.83 m 。滤池反洗周期为 24 h 。

2 研究方法

2.1 网格和模型

该项目的反硝化深床滤池分8格并列运行,各

滤池内滤砖按池长方向呈长条状均匀布置,因此本次进行等量分解,将单格滤池内滤砖按列并联的方式分解为15条,单条处于中心轴线处的滤砖底部开长方形孔洞,用于反冲洗进水,将空气支管插入滤砖中,用于反冲洗进气,滤砖内布水布气孔分布与实际完全相符合。默认滤池内并列滤砖处于相同的环境条件下,反冲洗布水布气系统进入单列滤砖腔内进行“丁字型”流场对称分布,按实际工程比例(1:1)建立单条中一半部分滤砖布水布气网格模型,模拟反冲洗气水联合曝气实验。模型设置处理规模为 $416.7 \text{ m}^3/\text{d}$,模型总体由7.5块滤砖拼接而成,总体尺寸(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 $9.18 \text{ m} \times 0.27 \text{ m} \times 0.32 \text{ m}$,进气管尺寸为DN50,1/2进气面积,进水孔洞规格(长 $\times$ 宽)为 $0.28 \text{ m} \times 0.10 \text{ m}$ 。

2.2 模拟参数及边界条件

数值模拟采用了压力基隐式瞬态求解器,结合VOF^[9-10]模型追踪气液界面。主相为空气,副相为液态水。两相界面张力系数设为 0.072 N/m 。流体黏性流动采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟。求解基于SIMPLE算法,各方程的收敛残差标准为0.001。操作环境参数设置为标准大气压,并考虑重力加速度。瞬态计算时间步长固定为 0.01 s ,总计算步数为40000步,单步最大迭代次数为20次。

气体入口为速度入口,设置 72.47 、 36.32 m/s 两种工况速度,空气体积分数为100%;液体入口同为速度入口,对应速度分别为 0.470 和 0.235 m/s ,水的体积分数为100%。出口采用压力出口,表压设为0,并关闭回流。

3 结果与分析

3.1 网格无关性和时间无关性分析

距滤砖表面 1 cm 沿池面长度方向等距布置测点,参照滤砖表面孔位置划分为4排,以各测点的速度大小来验证模拟结果的可靠性,各测点分布情况与混合流速如图1所示。可以看出,模拟结果与实验结果沿长度方向的分布趋势高度相似,考虑到受限于加工精度或测量仪器的误差,模拟结果与实验结果的整体误差在 $5.33\% \sim 8.64\%$ 范围内,该误差值较小,说明模拟计算结果具有较高的可靠性。选取计算稳定时的进液口平均压力作为变量进行网格与时间无关性验证,以压力绝对值小于1%时的网格数为依据,最终计算的网格数选为 15×10^6 个。

计算步长对数值的稳定性和模拟结果亦有影响,在选取网格条件下,针对0.001~0.1 s范围,同样以进液口平均压力为变量验证步长的独立性,最终选取时间步长为0.01 s。

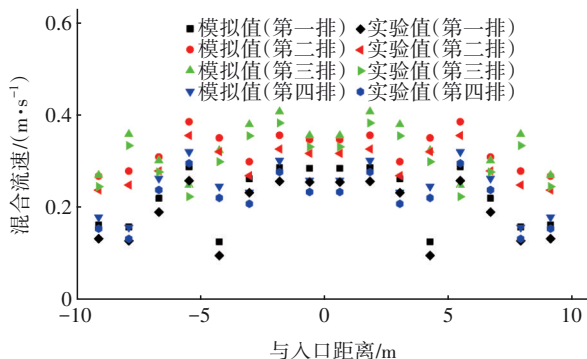


图1 模拟与实验的结果

Fig.1 Results of simulation and experiment

3.2 反洗强度优化结果分析

分别设置反洗强度为设计反洗强度和降低50%的反洗强度参数进行模拟。模拟结果长截面速度云图如图2所示。

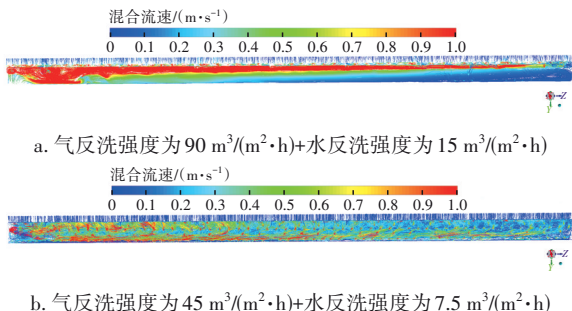


图2 长截面速度云图

Fig.2 Velocity cloud maps of long cross section

从图2可以看出,设计反洗强度的均匀性状态优于降低50%反洗强度的。采用设计反洗强度时表面孔混合流速较大,气水混合态从表面孔喷出,先达到均匀的布水布气状态,反洗时间短,同时配水配气均匀。分析原因,反洗强度越大,布水布气系统内存留的水更容易从滤砖内被赶出去,反洗水和反洗空气快速填充整条滤砖腔体内,使表面孔出气和出水达到均匀喷出的状态。因此当气反洗强度为 $90 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、水反洗强度为 $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,符合滤池反洗强度要求,故最终以设置设计强度参数模拟的结果进行分析。

3.3 滤砖内布水布气模拟流线

模型设置底部进水,反冲洗气管顶部距离滤砖

内部顶标高18 cm处进气,空气和水独立进入滤砖内部,空气从滤砖上部进入将水压向下部,之后水从下部水孔分散进入滤砖二次分布腔,两相之间互不干扰,减少了局部损失。滤砖内流线的具体情况如图3所示。

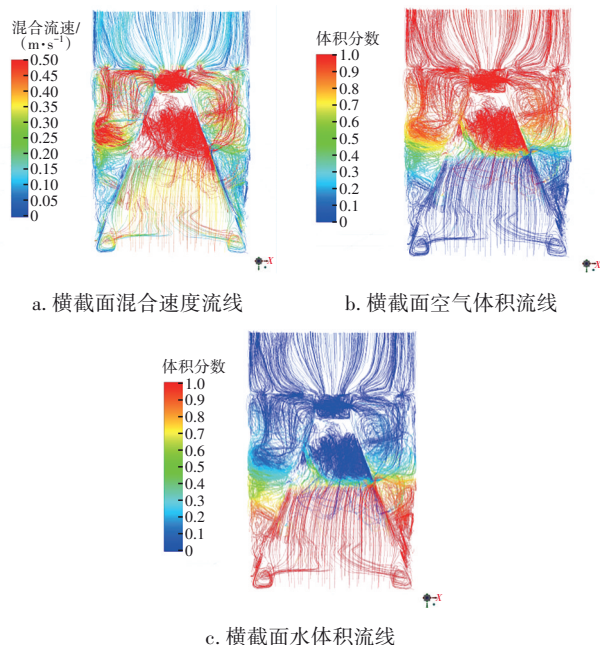


图3 滤砖内流线

Fig.3 Streamline inside filter bricks

从图3可以看出,在反冲洗过程中,空气速度高,从顶部分布,由上部气孔流出,最终从顶部孔喷出。水总体分布在底部,在滤砖腔体内分布后从水孔流出并进入二次分布腔形成气水混合物,最终和空气一起混合并从顶部分散孔处均匀喷出。

3.4 滤砖内布水布气体积云图与分析

3.4.1 滤砖内布气系统云图与分析

不同位置横截面空气体积云图如图4所示(从左到右依次为距离入口0.2、1、2、3、4、5、6 m)。滤砖内空气体积分布与水体积分布相反。反洗布气通过中间进气空气管插入到滤砖一次分配腔体上方附近,由于气体的密度比水小,所以空气的流向是主动向上分布,但是为保证在滤砖平面的布气均匀性,滤砖腔体内设置气挡板,使空气充满滤砖一次分配腔体内的上方,当滤砖一次分配腔体上方均匀布满气后,形成稳定的腔体气体压强,然后通过出气孔进入二次分布腔体中,进行均匀分散,实现气体的S型流场,最终均等分配至滤砖表面孔中出气。

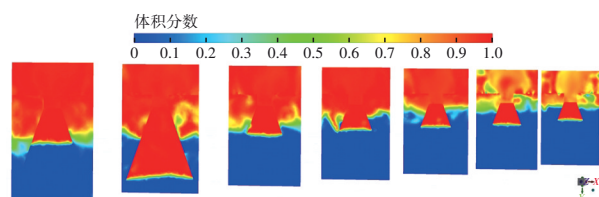


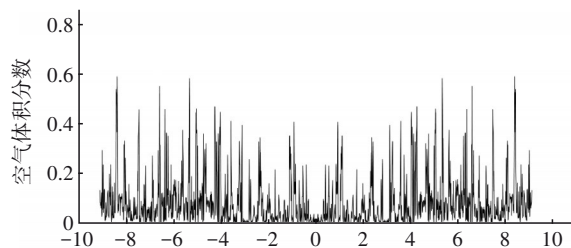
图4 不同位置横截面空气体积分云图

Fig.4 Air volume cloud maps of cross section at different positions

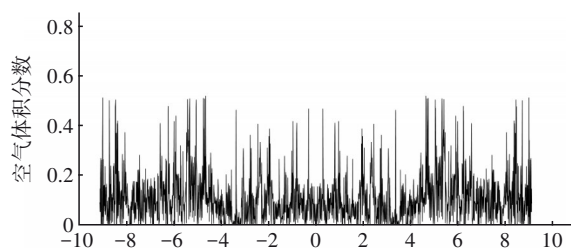
气体沿着滤砖长度方向均匀分配气体压力,减弱进气管强冲击力的影响,在滤砖腔体内经过一次分配布气,二次分布布气后,滤砖表面出气孔平均空气体积分数如图5所示。滤砖表面孔出气体积分数占比20%~60%,沿长度方向相对均匀地分配在滤砖表面各出气孔出气,最终为滤池反冲洗布气均匀性、滤池运行过程中功能性作用的发挥提供了保障。



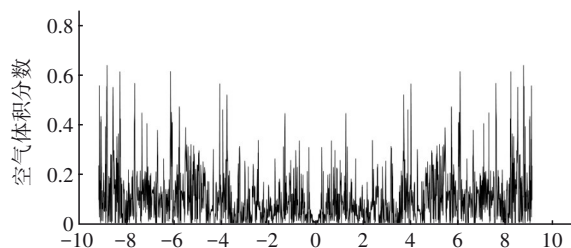
a. 滤砖出气孔位置



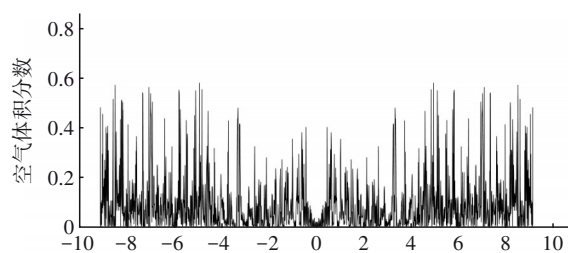
b. 第一排



c. 第二排



d. 第三排



与入口距离/m

e. 第四排

图5 滤砖表面出气孔平均空气体积分数的变化

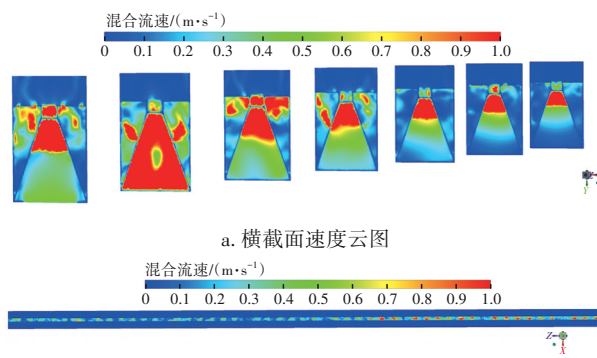
Fig.5 Change in average air volume fraction at surface exit of filter bricks

3.4.2 滤砖布水系统云图与分析

横截面水体积分布与空气体积分布相反。滤砖内反洗水在一次分配腔时,空气进入后将水位整体向下压,由于空气挤压,水分布由进水口向四周扩散的趋势是反洗水体积分布由低到高、压力由低到高向四周分布,到二次分布腔后,滤砖表面孔出水体积分数大部分占40%~80%左右,沿滤砖长度反向水分布均匀,说明滤砖在布水过程中一次分配腔和二次分布腔相互抵消体积、压力分布不均匀,最终反洗时进入滤砖表面布水时可实现均匀分配。

3.5 滤砖内分布混合速度云图与分析

横截面速度云图和长平面速度云图如图6所示(从左到右依次为距离入口0.2、1、2、3、4、5、6 m)。



a. 横截面速度云图

b. 长平面速度云图

图6 横截面速度云图和长平面速度云图

Fig.6 Cloud maps of sectional and long plane velocities

在气水联合反洗过程中,气水分配为在一次分配腔内,气和水的流速都比较快,随着与入口距离的增加,速度有减弱的趋势。因为一次分配腔内随入口更远的方向,设置有一次分配腔和二次分布腔连通孔,气体和液位分别从远端更多的开孔处流出,一次配水不能达到均匀分配,在二次分布腔内,进行二次分布,并且滤砖顶部回水孔则由于负压产

生逆向补偿,从而补偿沿长度方向上的整体压力,最终水和气体在每个扩散孔处分布均匀。

滤砖单排出气孔轴线方向的表面流速如图7所示。滤砖上孔与孔的间距为0.05 m,由于网格划分质量条件的限制,默认滤砖表面上的多个流速峰值均为孔中心流速。从图7可以看出,整个滤砖长度方向的表面流速相对均匀,说明通过布水布气的二次分配,最终水和气体在每个扩散孔处分布相对均匀。但在距离入口4~5 m处,孔流速有降低趋势,初步认为滤砖在气体分布过程中,进气的气压较大,将腔体中的水瞬间挤压出滤砖外,造成腔体内气压不稳的情况,仅通过气挡板维持一定压力,导致孔出气流速有所降低后再升高。截取单块滤砖进行分析,从中截取距离反冲洗进水进气口1.8~3.1 m处的滤砖表面混合流速,此处为单块滤砖表面孔轴线方向的表面速度,可以看出,单块滤砖单排23个孔中,70%的孔流速为2.0~3.5 m/s,30%的孔流速为0.5~1.0 m/s,相近孔之间依然能够向低流速方向扩散,使得最终滤砖表面流速相对均匀。

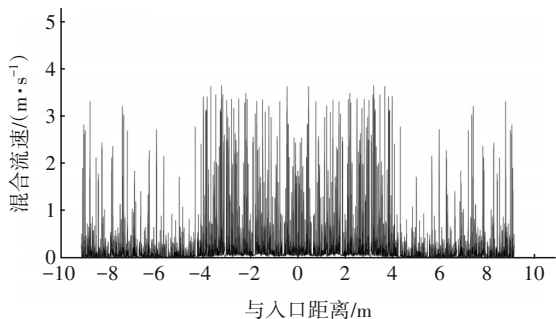


图7 滤砖单排出气孔轴线方向的表面流速

Fig.7 Surface velocity of single outlet hole of filter bricks

在模拟联合反冲洗过程中,气体的体积分布在一次分配腔上方,水的体积分布在一次分配腔下方,气从三角侧板上排的气孔流出,进入到二次分布腔内,水从三角侧板底部水孔流到二次分布腔内,中间孔则为气水同时混合出孔,可判断在实际反冲洗过程中,气和水的体积分布能够在滤砖内达到均匀,中间孔为气水混合孔,可以同时出气和出水,最终速度达到补偿,仿真模拟结果和实际运行时的状态分布能够达到相对吻合。并且在滤砖长度方向上看出,各孔的速度相对契合稳定。因此,仿真模拟流程亦证明滤砖在滤池内按此铺设时,可以达到均匀布水布气的效果。滤池底滤砖铺施工完成后,从滤池内滤砖布水布气效果可以看出,

曝气实验气泡稳定。

滤砖内水孔中心横向轴线方向流速如图8所示。单块滤砖单侧斜面上有8个水孔,流速峰值多为孔中心流速。可以看出,模拟的整个滤砖长度方向出水孔流速均匀,大部分反冲洗水均从底部布水孔流出。截取单块滤砖进行分析,8个水孔的流速分别为1.11、1.02、1.04、1.05、1.03、1.11、1.05、1.10 m/s,流速均匀。

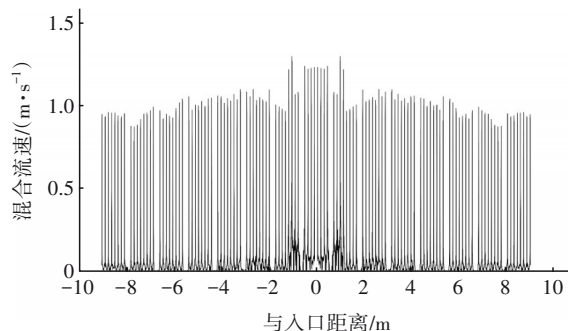


图8 滤砖内水孔中心横向轴线方向流速

Fig.8 Velocity in direction of horizontal axis of water hole center in filter bricks

滤砖上层出气孔中心横向轴线方向混合流速如图9所示。

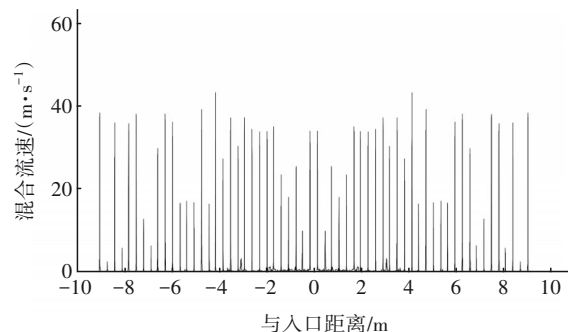


图9 滤砖上层出气孔中心横向轴线方向混合流速

Fig.9 Mixed velocity in direction of horizontal axis of upper layer of filter brick vent

单块滤砖单侧斜面上有4个气孔,流速峰值多为孔中心流速。可以看出,模拟的整个滤砖长度方向气孔的流速总体较均匀,但与水孔流速相比,稳定性较差。原因可能是气体容易被压缩,易受流体扰动影响。截取单块滤砖进行分析,4个气孔的流速分别为34.1、33.9、34.7、37.7 m/s,流速较快。

仿真模拟结果证明,滤砖在滤池内按此铺设时,可达到均匀布水布气的效果。与未进行模拟优化的项目相比,曝气实验的气泡更稳定,布水布气效果更均匀。

4 结论

① 通过CFD模拟验证厦门同安水质净化厂反硝化深床滤池池底布水布气系统中滤砖布置的合理性,结果表明,在设计参数下滤砖将空气和水相对均匀地分布在整个滤池平面,保证了滤池的反冲洗效果。项目施工完成后,曝气实验的气泡稳定,证实了该方法的有效性。

② CFD模拟技术的引入能够更方便、更直观地预测实际工程中反冲洗效果,以提前判断入口位置及性能,可更好地指导工程设计及安装,同时降低了实际工程中滤砖安装后的二次整改概率,为实际工程实施提供了保证。

参考文献:

- [1] 史永浩,巢猛,盛德洋,等.反冲洗效果对滤池综合过滤性能的影响研究[J].给水排水,2021,47(S1):52-58.
SHI Yonghao, CHAO Meng, SHENG Deyang, *et al.* The effect of backwash on the comprehensive filtration performance [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021,47(S1): 52-58(in Chinese).
- [2] 王悦,王海,石烁辉,等.反硝化滤池反冲洗效能综合影响因素及微生物种群[J].中国给水排水,2021,37(1):76-80.
WANG Yue, WANG Hai, SHI Shuohui, *et al.* Comprehensive influencing factors of backwashing efficiency of denitrifying biofilter and its microbial community [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 76-80(in Chinese).
- [3] 侯宗宗,王要伟,王宾宾,等.自动反冲洗过滤器流场数值模拟分析[J].过滤与分离,2017,27(4):27-31.
HOU Zongzong, WANG Yaowei, WANG Binbin, *et al.* Numerical simulation and analysis of flow field in automatic back-flushing filter[J]. Journal of Filtration & Separation, 2017, 27(4): 27-31(in Chinese).
- [4] 张国杰.基于CFD的活性炭-沸石双层过滤器的优化设计研究[D].太原:太原理工大学,2021.
ZHANG Guojie. Research on the Optimization Design of Activated Carbon-Zeolite Double-layer Filter Based on CFD [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021(in Chinese).
- [5] ROEGIERS J, WALSEM J V, DENYS S. CFD- and radiation field modeling of a gas phase photocatalytic multi-tube reactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 338: 287-299.
- [6] XIANG P, WAN Y H, WANG X, *et al.* Numerical simulation and experimental study of electrocoagulation grid flocculation tank [J]. Water Science and Technology, 2018, 78(3/4): 786-794.
- [7] 林慧萍,许仕荣,黄茂林,等.基于CFD的V型滤池进水分渠配水均匀度优化[J].中国给水排水,2019,35(15):59-62,67.
LIN Huiping, XU Shirong, HUANG Maolin, *et al.* Optimization of water distribution uniformity of inlet distribution channel in V-type filter based on CFD [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(15): 59-62,67 (in Chinese).
- [8] SANCHEZ F, REY H, VIEDRINA A, *et al.* CFD simulation of fluid dynamic and biokinetic processes within activated sludge reactors under intermittent aeration regime[J]. Water research, 2018, 139: 47-57.
- [9] 樊台祥. BAF曝气管道系统设计优化的数值模拟研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2016.
FAN Taixiang. Numerical Simulation Study of BAF Aeration Pipe System and Design Optimization [D]. Ma' anshan: Anhui University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [10] 王丽杰. 曝气生物滤池气液两相流数值模拟及脱氮实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
WANG Lijie. Numerical Simulation of Gas-Liquid Two Phase Flow of BAF and Denitrification Experimental Study [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014(in Chinese).

作者简介:负丹丹(1991-),女,河北唐山人,硕士,高级工程师,主要从事市政污水深度处理工艺设计与研究工作。

E-mail:1042443743@qq.com

收稿日期:2024-12-31

修回日期:2025-03-04

(编辑:任莹莹)