

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.19.004

不同流向下浊质特性对砂过滤效能及流阻分布影响

贺维鹏^{1,2}, 罗天昊^{1,2}, 施周^{1,2}, 南军³, 马晶伟^{1,2}, 孙祥辉^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 水安全保障技术及应用湖南工程研究中心, 湖南 长沙 410082; 3. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 关于待滤水中浊质特性(如形态和带电性)对不同流向过滤过程的影响机制尚缺乏系统认识,为此,以聚氯化铝(PAC)为混凝剂,采用混凝调控的方式制备含有不同特性浊质颗粒的待滤水,然后通过中试对比研究下向流和上向流过滤在截污效能、流阻分布等方面的差异性,继而系统探讨两种流向条件下的过滤机理。结果表明,相对于下向流过滤,PAC投加量相同时上向流过滤更快地进入稳定阶段,并且随着PAC投加量的增加,上向流过滤的穿透阶段出水浊度增长更快、末期浊度更高;在两种流向条件下,滤后水 UV_{254} 值均随PAC投加量的增加而减小,但相同PAC投加量时上向流过滤的 UV_{254} 值高于下向流过滤,即上向流过滤对腐殖酸的协同去除效果要差;上向流过滤比下向流过滤的水头损失均匀,且总水头损失增速低。

关键词: 上向流过滤; 下向流过滤; 滤后水浊度; 水头损失分布; 协同除污

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)19-0022-07

Impact of Turbidity Characteristics under Varying Flow Directions on Sand Filtration Efficiency and Head Loss Distribution

HE Wei-peng^{1,2}, LUO Tian-hao^{1,2}, SHI Zhou^{1,2}, NAN Jun³, MA Jing-wei^{1,2},
SUN Xiang-hui^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Hunan Engineering Research Center of Water Security Technology and Application, Changsha 410082, China; 3. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: There remains a lack of systematic understanding regarding the influence of turbidity characteristics (e.g., particle morphology and surface charge) in the influent on the filtration process under different flow directions. To address this issue, polyaluminium chloride (PAC) was selected as the coagulant to prepare influent containing turbidity particles with controlled characteristics through coagulation regulation. Subsequently, pilot-scale comparative experiments were conducted to investigate the differences in pollutants removal efficiency and head loss distribution between downflow and upflow filtration processes. Based on these experimental results, the filtration mechanisms under both flow conditions were systematically analyzed. Compared with downflow filtration, upflow filtration reached the stable stage more rapidly under the same dosage of PAC. Furthermore, with an increase in PAC dosage, the effluent turbidity during the breakthrough phase of upflow filtration rose at a faster rate, ultimately resulting in higher final turbidity. Under both flow conditions, the UV_{254} value of the filtered water

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2024JJ5078); 国家自然科学基金资助项目(51308199)

通信作者: 贺维鹏 E-mail: heweipeng@hnu.edu.cn

decreased with increasing PAC dosage. However, at the same PAC dosage, the UV_{254} value in upflow filtration was higher than that in downflow filtration, indicating a relatively weaker synergistic removal efficiency of humic acid in upflow filtration. Additionally, upflow filtration exhibited a more uniform head loss distribution and a slower growth rate of total head loss compared to downflow filtration.

Key words: upflow filtration; downflow filtration; filtered water turbidity; head loss distribution; synergistic removal of pollutants

水中浊质颗粒特性及其对共存污染物的吸附性能,会影响水处理工艺的效能^[1]。作为现代给水处理工艺的核心环节之一,过滤可看作是一个水动力学作用和浊质颗粒物化性质共同参与的复杂过程,滤料对水中污染物的截留效果主要与浊质颗粒特性、滤料表面性质、过滤运行方式和工艺参数等有关^[2]。传统的水流自上而下的过滤方式(简称“下向流过滤”),存在滤层截污能力差、污染物分布不均匀、表层过滤现象严重等问题。相较于下向流过滤,待滤水从滤池底部进入、上部流出的上向流过滤,有着更好的深床过滤效果、更小的水头损失和更长的过滤周期,被认为是一种较为理想的过滤运行方式^[3]。深层过滤目前仍是去除水中浊质颗粒的有效方法,但待滤水中浊质特性(包括形态和带电性)对下向流和上向流过滤运行过程的影响机制,尚缺乏系统认识。

基于已有的研究^[4-5],笔者提出采用混凝调控方式制备含有不同特性浊质颗粒的待滤水,通过中试系统地研究浊质颗粒特性对不同流向过滤过程的截污效能和流阻分布的影响特征,以期深化认识下向流和上向流过滤在过滤机理方面的差异性以及优化过滤工艺提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置

可实现不同流向运行的砂过滤试验装置如图1所示。该装置主要由原水箱(边长为97 cm的立方体)、设有测压管的有机玻璃滤柱(直径为10 cm)以及反冲洗单元等组成。其中,滤柱内承托层高度为15 cm,由上到下分别采用粒径为2~4、4~8、8~16 mm的石英砂,厚度均为5 cm;滤料层高度为80 cm,自上而下在10、30、50、70、80 cm处设5根测压管(编号为1~5),滤料采用单层级配石英砂滤料,颗粒尺寸范围为0.7~2.0 mm,整个滤料层的 d_{10} 和 d_{80} 分别为1.0、1.6 mm。通过控制进水蠕动泵与阀门,分别开

展不同流向运行的砂过滤试验。

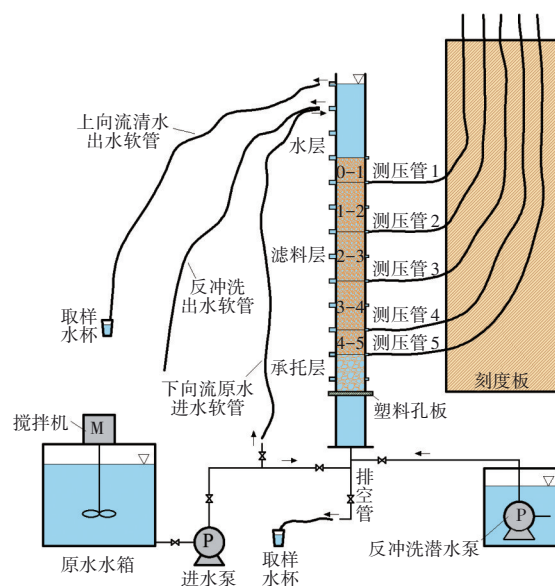


图1 砂过滤试验装置示意

Fig.1 Schematic of sand filtration experimental setup

1.2 含不同特性浊质的待滤水制备

在图1所示的原水箱中,采用高岭土和腐殖酸制备800 L含天然有机物的模拟水样,浊度为 (8.5 ± 0.2) NTU,腐殖酸含量为10 mg/L,并通过加入NaOH和HCl调节初始pH为7.0左右。已有研究表明^[6],混凝剂的投加量影响主导混凝机理,进而形成具有不同带电特性和形态结构的絮体颗粒。基于此,分别向模拟水样中投加6、18、30 mg/L的聚氯化铝(PAC)混凝剂,并在搅拌机的推动作用以下50 r/min搅拌1 min、5 r/min搅拌20 min,通过混凝调控获得含有不同特性浊质颗粒的待滤水。

1.3 试验方法

结合《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)及《上向流滤池设计规程》(CECS 451:2016)的相关要求,不同流向砂过滤试验的滤速均设定为10 m/h。前期试验发现,此滤速下滤料层状态稳定,未出现膨胀现象。下向流过滤试验过程中,采用进水蠕动

泵将混凝调控水样从滤柱上端进水孔注入,每隔2 min测定一次滤后水的浊度和 UV_{254} ;待滤后水水质稳定后,将测量间隔改为10 min,继续测定浊度和 UV_{254} ,同时记录测压管1~5的读数。对于上向流过滤试验,调整滤柱的阀门和管道连接方式,从滤柱下端进水孔将混凝调控水样注入,并按照下向流过滤试验的频次进行水质检测以及测压管读数记录。

无论是下向流还是上向流,过滤结束后均立即进行时长为10 min的单独水反冲洗,依据敏茨和舒别尔特公式,将冲洗强度设置为 $27.6 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。

1.4 分析项目及方法

浊质颗粒特性表征:采用激光粒度仪测定颗粒平均粒径;采用电位分析仪测定混凝调控后水样的Zeta电位;利用Image-Pro Plus 6.0软件处理浊质颗粒照片并导出其面积、周长,通过线性拟合计算颗粒分形维数;使用傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪分析浊质颗粒表面的官能团组成。

水质参数及滤层水头损失测定:采用台式浊度仪测定浊度;采用紫外可见分光光度计测定 UV_{254} ;根据相邻测压管读数的差值,测算不同编号滤层的水头损失。

2 结果与分析

2.1 待滤水中浊质特性对比

在PAC投加量分别为6、18、30 mg/L条件下制备的待滤水样中浊质颗粒特性见表1。现有混凝理论认为,原水中的胶体颗粒带有负电荷,而铝盐在中性条件下的水解产物以电中性氢氧化铝聚合物 $[\text{Al}(\text{OH})_3]_n$ 为主,同时也会形成部分带正电的羟基配合物,均会对混凝的主导机理产生影响^[7]。由表1可知,在PAC投加量为6 mg/L条件下,混凝调控后水样的Zeta电位仍为负值,表明此时尚处于混凝过程的稳定区,较强的静电斥力阻碍了浊质颗粒间的碰撞黏结,最终形成粒径较小的浊质颗粒^[8]。

表1 不同PAC投加量下混凝调控水样中浊质颗粒特性

Tab.1 Characteristics of turbidity particles in coagulated waters at diverse PAC dosages

项目	PAC投加量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	6	18	30
Zeta电位/mV	-12.3	0	3.5
平均粒径/ μm	3.359	4.282	4.418
分形维数	1.552 2	1.750 0	1.379 7

当PAC投加量增至18 mg/L时,混凝调控水样呈电中性,在压缩双电层与吸附电中和作用的双重驱动下,形成粒径更大、结构更为致密的浊质颗粒。此外,前人研究发现,在零电点附近混凝体系内颗粒之间的排斥势能较小,有利于颗粒聚集并形成较大粒径的凝聚体^[8],这很好地解释了PAC投加量为18 mg/L条件下浊质颗粒平均粒径较大。当PAC投加量为30 mg/L时,形成了表面带正电荷的浊质颗粒,其分形维数较其他两种工况的都要小,表明此时水样中浊质颗粒结构最为松散。这是由于混凝剂投加量过高时,混凝过程处于再稳区或者卷扫区,在网捕卷扫和吸附架桥等主导作用下颗粒快速凝聚并形成结构松散的凝聚体^[7]。

2.2 砂滤过程中滤后水水质时变特征

2.2.1 滤后水浊度时变特征

不同PAC投加量对应的过滤过程中,滤后水浊度随过滤时间的变化如图2所示。

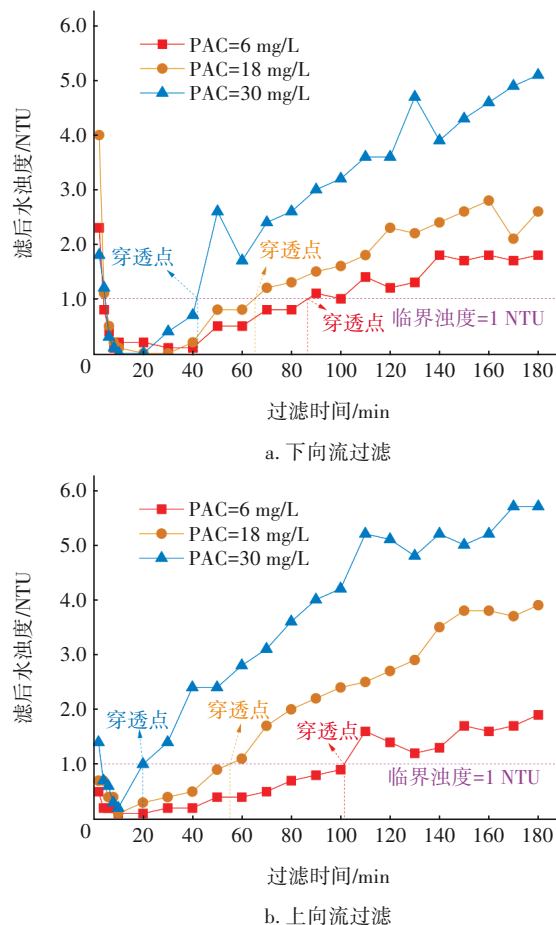


图2 不同流向过滤过程中滤后水浊度随时间的变化

Fig.2 Variation of filtered water turbidity with time during filtration at different flow directions

以《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中出水浊度限值为1 NTU的要求作为判断过滤周期的依据,将各个过滤过程均划分为3个阶段:滤后水浊度尚未达到稳定的初滤阶段、出水浊度达到要求(小于1 NTU)的稳定阶段、出水浊度超过限值(1 NTU)的穿透阶段。与相同PAC投加量对应的下向流过滤相比,上向流过滤的初滤水浊度更低,且更快地进入稳定阶段。究其原因,可能是上向流过滤的水流流向和反冲洗运行时一致,进水对滤层造成的扰动较小,有助于反冲洗结束后过滤过程中出水浊度较快地稳定下来^[6]。

无论是下向流过滤还是上向流过滤,稳定阶段滤后水浊度均是先在一段时间内稳定于某一个值附近,之后随着过滤的进行,浊度开始上升并达到穿透点(1 NTU)。不同PAC投加量下浊度的稳定值较为接近,但维持浊度稳定的时间(或稳定阶段的持续时间)却存在差异。具体表现为,对于两种过滤方式的稳定阶段,持续时间均随PAC投加量的增大而缩短,即更快地达到穿透点。这主要是由于PAC投加量增大时,待滤水中浊质颗粒较大(见表1),这些颗粒极易迅速堵塞下向流过滤时的表层滤料或上向流过滤时的底层滤料内的小尺寸空隙,并在筛滤作用下形成泥膜,导致出水浊度快速增加^[3]。

由图2还可以看出,穿透阶段滤后水浊度均随过滤的进行,以近似线性趋势迅速升高,并且对于任一过滤运行方式,较大的PAC投加量均对应着较快的浊度平均增长速度、较高的过滤末期浊度。已有研究表明,脱附是滤后水中颗粒物的主要来源,粒径越大的浊质颗粒具有更高的脱附率。结合表1可知,较高PAC投加量条件下形成的浊质颗粒,因其粒径较大而容易发生脱附,成为诱发出水浊度较高的原因之一。此外,PAC投加量为30 mg/L条件下形成的浊质颗粒,会在滤料表面形成带正电荷的沉积物层,排斥后来的浊质颗粒并阻止其被滤料截留,成为穿透阶段加快浊度增长的主要原因。相较于下向流过滤,上向流过滤的穿透阶段出水浊度增长更快且末期浊度均较高,这可能是由于下向流过滤过程中自上而下的水流会对滤料产生压实作用,进一步减小滤料的空隙率,有助于阻碍待滤水中浊质颗粒穿透滤料进入滤后水;而上向流过滤时自下而上的水流,对滤料能够起到一定程度的支撑作用,不利于阻碍浊质颗粒穿透滤料层^[9]。

2.2.2 滤后水 UV_{254} 变化

对于图2所示的各过滤过程中初滤开始、稳定开始、稳定平稳、穿透开始、过滤结束的相应时刻,分别取样并测定滤后水的 UV_{254} 值,结果如图3所示。可知,无论是下向流还是上向流过滤,3种PAC投加量下出水 UV_{254} 值均在一定范围内波动,并且稳定开始、稳定平稳等时刻的滤后水 UV_{254} 值较小,而穿透开始和过滤结束时的出水 UV_{254} 值较大,这表明滤柱在穿透阶段不仅失去了对浊度的稳定去除作用,同时也降低了协同去除有机污染物的稳定性。这可能是由于随着滤料层的堵塞和滤料表面泥膜的形成,滤料颗粒的吸附能力同样受到抑制,致使其对腐殖酸的去除能力变差。

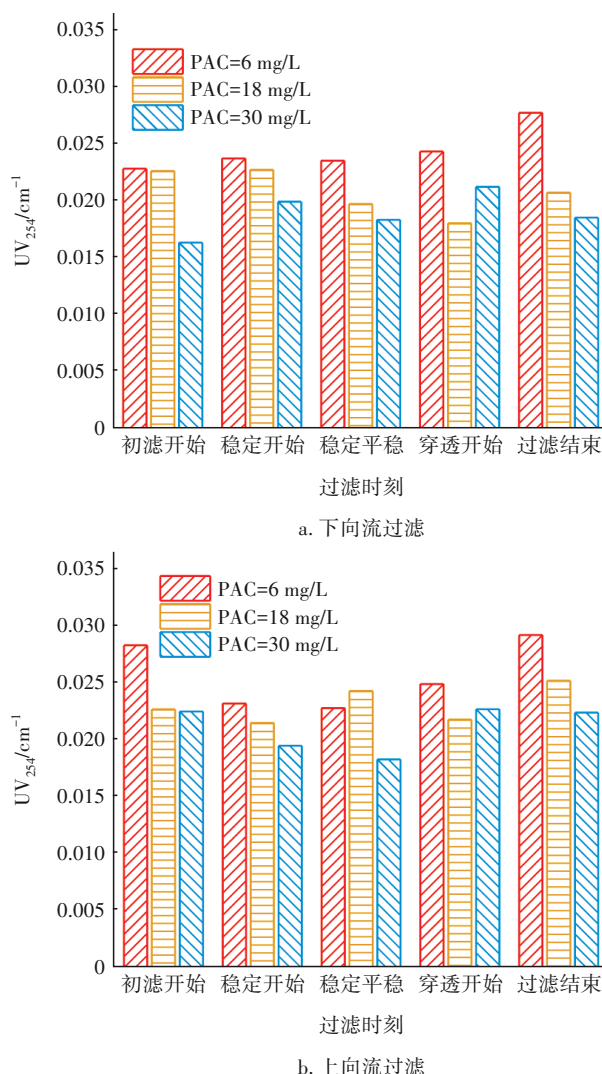


图3 不同流向过滤过程中滤后水 UV_{254} 的变化

Fig.3 Variation of filtered water UV_{254} during filtration at different flow directions

由图3还可以看出,在两种流向过滤过程的各代表性时刻,不同PAC投加量下滤后水 UV_{254} 值基本上呈现如下关系: $PAC=6\text{ mg/L}>PAC=18\text{ mg/L}>PAC=30\text{ mg/L}$ 。通常认为,水中天然有机污染物(NOM)的去除途径主要有两种:一是NOM表面的负电荷被中和,形成易于沉淀的络合物;二是NOM被无定形金属氢氧化物吸附去除^[8]。根据表1中的数据,PAC投加量为 6 mg/L 时形成的浊质颗粒带负电荷,而且粒径较小、结构相对密实,在发挥电中和作用与吸附NOM方面都不如其他两种投加量下形成的浊质颗粒,最终导致此条件下滤后水的 UV_{254} 值较大;PAC投加量为 30 mg/L 时形成的浊质颗粒带正电荷,而且粒径较大、结构疏松,能够较好地发挥上述两种作用,从而极大地降低了滤后水的 UV_{254} 值。另外,在相同过滤时刻,3种PAC投加量条件下上向流过滤的滤后水 UV_{254} 值均高于下向流过滤,这表明相较于下向流过滤,上向流滤柱对腐殖酸的协同去除效果略差。

2.3 砂滤过程中滤层水头损失变化

如图1所示,滤柱内滤料层自上而下由5个分滤层组成,编号分别为0-1(10 cm)、1-2(20 cm)、2-3(20 cm)、3-4(20 cm)、4-5(10 cm),并且在分滤层交界处均设有测压管。通过记录测压管的实时读数,由相邻测压管的读数差来测算不同编号分滤层在初滤开始、稳定开始、稳定平稳、穿透开始、过滤结束时的分层水头损失(如图4所示),用以考察浊质特性对不同流向过滤过程中各分滤层水头损失变化的影响。

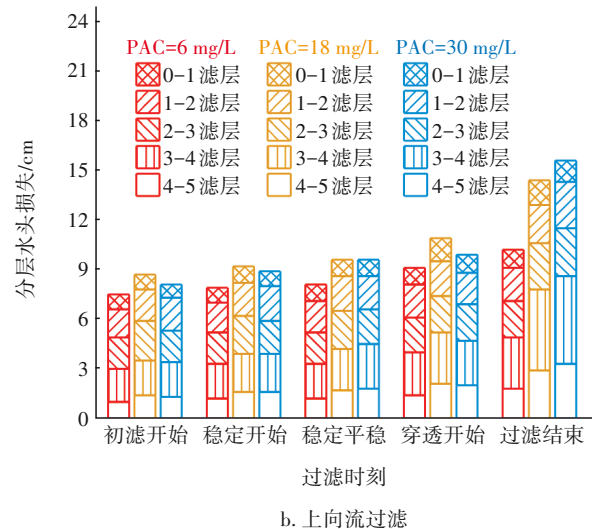
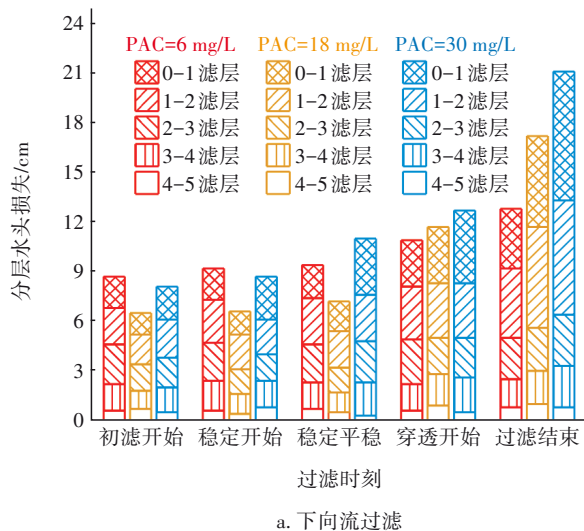


图4 不同流向过滤过程中各分层水头损失的变化

Fig.4 Variation of each layer head loss during filtration at different flow directions

从图4(a)可以看出,在不同PAC投加量对应的下向流过滤过程中,水头损失主要分布在靠近进水端的30 cm滤层内,即分滤层0-1和1-2中,并且两个分滤层的水头损失之和高于靠近出水端分滤层2-3、3-4、4-5的总水头损失。随着下向流过滤的进行,这种差异将更加明显,整个滤料层内流阻分布更不均匀。具体表现为,相同PAC投加量下靠近进水端的两个分滤层的水头损失随过滤时间不断增大,而靠近出水端的3个分滤层的水头损失增幅极小,这表明下向流过滤过程中滤柱内靠近进水端30 cm的滤料起到主要的截污作用。由图4(b)可以看出,不同于下向流过滤,上向流过滤过程中各过滤时刻水头损失在不同分滤层内分布的均匀性较好,并且随着上向流过滤过程的进行,不同PAC投加量下靠近进水端30 cm滤层(即分滤层3-4和4-5)的水头损失增长速度要比靠近出水端分滤层0-1、1-2、2-3的都要快,表明分滤层3-4和4-5截留的浊质颗粒相对较多。

总体而言,无论是下向流还是上向流,都是滤柱内靠近进水端30 cm的滤料层发挥主要截污作用,致使出水端滤料的水头损失总是低于进水端滤料的水头损失,并且随着PAC投加量的增大,上述差异变得更加显著。不同的是,自上而下的水流促使过滤过程中截留的污染物主要分布于上层滤料,表层过滤现象更为严重,而自下而上的水流有利于底层滤料发挥主要的截污作用,具有更好的深层过

滤效果。此外还发现,在相同PAC投加量条件下,上向流过滤的总水头损失增速、过滤结束时的总水头损失均低于下向流过滤,可能是由于与下向流过滤过程中沿水流方向各分滤层不同,上向流过滤时滤料层内由粗到细的滤料分布引起的水头损失增量较小,同时在初滤阶段积累的水头损失也较小,这均利于缓解滤层杂质分布不均匀的问题,继而优化滤层流阻分布并提高滤层的含污能力^[3,5]。

2.4 不同流向过滤机理分析

为进一步揭示混凝调控形成浊质特性的差异,利用FTIR光谱仪对浊质颗粒表面的官能团组成进行测定,结果如图5所示。

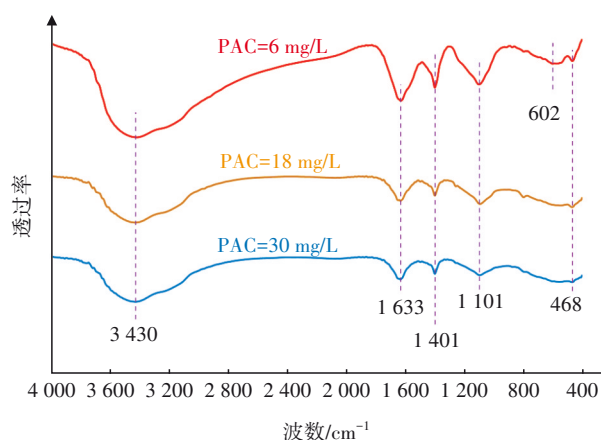


图5 不同PAC投加量下形成的浊质颗粒FTIR分析

Fig.5 FTIR analysis on turbidity particles formed at diverse PAC dosages

由图5可知,不同PAC投加量形成浊质的表面官能团种类基本一致。具体而言,3种浊质颗粒均在3430和1633 cm^{-1} 附近具有较强的吸收峰,分别对应O—H键的拉伸和弯曲振动,表明浊质表面存在羟基;在1401 cm^{-1} 附近具有较强的吸收峰,这归因于脂肪族C—H的变形、酚醛O—H拉伸或COO—的对称拉伸,均是腐殖质的典型峰;在1101 cm^{-1} 附近具有较强的吸收峰,这缘于Al—O键(Al水解产物)的弯曲振动;在602和468 cm^{-1} 附近观察到揭示Al—O键振动特性的吸收带,该能带主要分配给Al—O的拉伸振动。上述各典型峰的高低,可定性反映特定键或官能团的含量。对于不同PAC投加量下O—H键和Al—O键的吸收峰,6 mg/L时较强,而18和30 mg/L时均较弱,并且后两种投加量条件下602 cm^{-1} 处Al—O键拉伸振动的峰基本消失,这说明Al—O键的化学环境发生了改变。究其原因,

可能是较高PAC投加量条件下浊质颗粒表面已被其他物质所覆盖,间接反映了形成的颗粒对腐殖酸具有较强的吸附能力,这与2.2.2节中PAC投加量增大有利于降低滤后水 UV_{254} 值的结论相符。

图6展示了不同流向过滤对浊质颗粒的去除过程。在图6(a)所示的下向流过滤过程中,浊质颗粒更多地分布于表层滤料,致使滤料层上部区域的堵塞情况相对严重。对于本研究粒径范围的浊质颗粒,大部分颗粒主要受到拦截或沉降作用的影响。结合前人研究成果,在拦截或沉降作为过滤过程中颗粒的主导迁移机理时,单个收集器的效率随着颗粒尺寸的增加而升高,但滤料尺寸的增大不利于过滤效果的提升。由表1可知,随着PAC投加量的增加,待滤水中浊质颗粒的粒径更大,这样的浊质更容易在下向流过滤中被表层的小粒径范围滤料截留^[10],从而表现出更为显著的表层过滤作用,这也是图4(a)中较高的PAC投加量下滤柱内分层流阻分布变得更不均匀的主要原因。与下向流过滤相比,图6(b)所示的上向流过滤过程中浊质颗粒在滤层深度方向的分布更为均匀,这有利于提升滤层的含污能力,从而使得上向流过滤在较高PAC投加量下表现出更短的稳定阶段,以及在相同总过滤运行时间下获得更高的末期出水浊度。

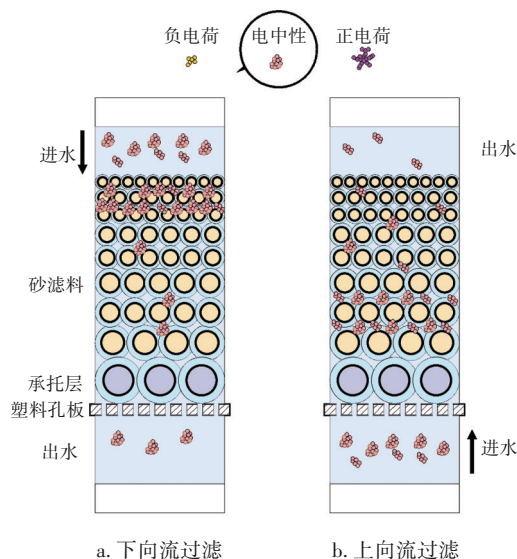


图6 不同流向过滤机理示意

Fig.6 Filtration mechanism at different flow directions

已有研究发现^[4,9],上向流过滤过程中自下而上的水流,可能会将较大的浊质颗粒打散成较小的颗粒,导致一部分亚微米级颗粒在滤柱中形成,此时

扩散迁移作用的影响也同时存在。在以扩散作为颗粒的主导迁移机理时,小粒径滤料对待滤水中存在的亚微米级浊质颗粒的去除效果要优于大粒径滤料。前文已述,上向流过滤主要依靠滤柱下层较粗滤料来进行截污,此时势必会有更多的亚微米级浊质颗粒进入滤料层更深区域,也会对稳定阶段的维持时间产生显著影响。

3 结论

① 不同PAC投加量下混凝调控形成的待滤水中浊质颗粒在带电性和形态特征等方面均存在显著差异,这与混凝过程的主导作用机理相关。

② 与下向流过滤相比,PAC投加量相同时上向流过滤更快地进入稳定阶段,并且随着PAC投加量的增加,上向流过滤的穿透阶段出水浊度增长更快、末期浊度更高。

③ 无论是下向流还是上向流过滤,各代表性过滤时刻的滤后水 UV_{254} 值基本上随着PAC投加量的增加而减小。在相同过滤时刻,不同PAC投加量时上向流过滤的滤后水 UV_{254} 值均高于下向流过滤,这表明上向流滤柱对腐殖酸的协同去除效果略差。

④ 不同于下向流过滤,上向流过滤过程中各时刻水头损失在不同分滤层内分布的均匀性较好,同时相同PAC投加量下上向流过滤的总水头损失增速以及过滤结束时的总水头损失均较低。

参考文献:

- [1] SONG S, RONG L, DONG K, *et al.* Particle-scale modelling of fluid velocity distribution near the particles surface in sand filtration [J]. *Water Research*, 2020, 177: 115758.
- [2] 窦韩, 黄廷林, 程亚. 人工强化负载锰氧化物滤料去除地下水中氨/锰中试[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(3): 15-22.
DOU Han, HUANG Tinglin, CHENG Ya. Ammonia/manganese removal from groundwater by artificially enhanced manganese oxide filter media [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(3): 15-22 (in Chinese).
- [3] BOTARI A, BERNARDO L D. Hydrodynamic analysis of particle collection efficiency: comparing downflow and upflow filtration [J]. *Acta Scientiarum-Technology*, 2012, 34(2): 167-175.
- [4] JEGATHEESAN V, VIGNESWARAN S, LEE S H. Deposition of submicron particles in deep bed filtration under unfavorable surface conditions [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2005, 22(1): 142-146.
- [5] SALKAR V D, TEMBHURKAR A R. Experimental evaluation of ripening behavior down-flow vs. up-flow rapid sand filters [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20: 1221-1227.
- [6] 陈亮, 李守淳, 李莉莉, 等. PACI和CTS对水华微囊藻混凝-过滤的影响[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(10): 3315-3324.
CHEN Liang, LI Shouchun, LI Lili, *et al.* Influence of PACI and CTS on the removal of *Microcystis flos-aquae* using coagulation-filtration [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(10): 3315-3324 (in Chinese).
- [7] 李砂, 黄智研, 卢钊, 等. 强化混凝耦合改性沸石过滤处理微污染水[J]. *水处理技术*, 2024, 50(4): 111-116, 123.
LI Sha, HUANG Zhiyan, LU Fan, *et al.* Enhanced coagulation coupled with modified zeolite filtration for treating trace contaminated water [J]. *Technology of Water Treatment*, 2024, 50(4): 111-116, 123 (in Chinese).
- [8] DUAN J, GREGORY J. Coagulation by hydrolysing metal salts [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003, 100/102: 475-502.
- [9] QI W K, GUO Y L, XUE M, *et al.* Hydraulic analysis of an upflow sand filter: tracer experiments, mathematical model and CFD computation [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 104: 460-472.
- [10] 李路野, 陈伟雄, 沈玉东. 微絮凝-高速深层过滤技术用于污水处理厂提标改造[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(22): 73-77.
LI Luyue, CHEN Weixiong, SHEN Yudong. Application of micro-flocculation and high-speed deep filtration technology in upgrading and reconstruction of sewage treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(22): 73-77 (in Chinese).

作者简介: 贺维鹏(1983-), 男, 山西稷山人, 博士, 副教授, 主要研究方向为高效低能耗颗粒介质及膜过滤工艺优化。

E-mail: heweipeng@hnu.edu.cn

收稿日期: 2024-04-28

修回日期: 2024-05-26

(编辑: 刘贵春)