

含悬浮物矿井水微絮凝-多级过滤工艺研究

张溪, 董书宁, 王锐, 王淑璇, 金鹏康

A study of the microflocculation-multistage filtration technology of mine water containing suspended solids

ZHANG Xiyu, DONG Shuning, WANG Rui, WANG Shuxuan, and JIN Pengkang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208080>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

法向应力下土工织物过滤黏土淤堵试验研究

An experimental study of clogging of the geotextile filter system under normal stress

彭善涛, 徐超, 杜春雪, 张鹏程 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 71-76

预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

某铁路隧道底鼓段粉砂质泥岩微宏观物理力学特性研究

A study of the micro-macro-physical and mechanical properties of silty mudstone in the bottom drum section of a railway tunnel

刘超, 袁伟, 路军富, 张钊 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 108-115

基于水力层析法的某煤矿承压含水层叠加放水试验分析

An analysis of sequential water releasing tests of the confined aquifers in a coal mine based on hydraulic tomography

赵瑞珏, 毛德强, 刘再斌, 姬中奎, 曹祖宝 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 1-9

地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析

An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components : A case study triggered by the Qingbaijiang earthquake

顾鸿宇, 王东辉, 李胜伟, 郑万模, 刘港, 向元英, 李丹, 陈能德 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 44-53

多级荷载下弱膨胀土的膨胀变形特性试验研究

An experimental study of expansion deformation characteristics of weak expansive soil under multi-stage load

边加敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 125-133



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202208080

张溪彧, 董书宁, 王锐, 等. 含悬浮物矿井水微絮凝-多级过滤工艺研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 222-230.
ZHANG Xiyu, DONG Shuning, WANG Rui, *et al.* A study of the microflocculation-multistage filtration technology of mine water containing suspended solids[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 222-230.

含悬浮物矿井水微絮凝-多级过滤工艺研究

张溪彧^{1,2}, 董书宁¹, 王锐³, 王淑璇¹, 金鹏康²

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西西安 710054; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西西安 710049; 3. 陕西陕煤曹家滩矿业有限公司, 陕西榆林 719000)

摘要: 针对含悬浮物矿井水处理过程中固液分离困难的问题, 基于核晶凝聚诱导造粒理论, 通过室内试验的研究方法, 开展矿井水微絮凝-多级过滤工艺研究。首先, 通过药剂投加与水利条件调节, 诱导悬浮颗粒与絮凝剂形成共聚物, 形成絮体沉降时间曲线, 通过最优参数选取完成絮体造粒致密化; 其次, 选择石英砂、人造沸石、活性炭、风积沙 4 种过滤介质, 考察不同介质类型及粒径对污染组分脱除效率的影响, 分析固-液界面产生的物理作用及化学反应; 最终, 选取典型矿井开展现场试验, 验证该工艺对于不同污染组分的脱除效果。结果表明: (1) 在微絮凝阶段采用 200 mg/L 的聚合氯化铝及 200 mg/L 的硅藻土联合投加的方式可以大幅度降低沉降时间; (2) 在多级过滤阶段 1~2 mm 石英砂对于浊度去除率可达 97.9%, 而 4 种过滤介质中人造沸石对于无机离子脱除效果最优, 对于 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 去除率分别达到 25.5%、44.1%、69.9%。通过研究成果形成的微絮凝-多级过滤工艺可以大幅度降低矿井水处理过程中的停留时间, 提高固液分离效率, 在此基础上选用天然硅藻土作为成核剂替代聚丙烯酰胺还能有效抑制丙烯酰胺单体的生成, 可降低环境风险。该工艺对于含悬浮物矿井水处理具有良好推广应用价值。

关键词: 矿井水; 微絮凝; 多级过滤; 核晶凝聚; 过滤介质

中图分类号: P641.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0222-09

A study of the microflocculation-multistage filtration technology of mine water containing suspended solids

ZHANG Xiyu^{1,2}, DONG Shuning¹, WANG Rui³, WANG Shuxuan¹, JIN Pengkang²

(1. Xi'an Research Institute, CCTEG, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 3. Shaanxi Coal Caojiatan Mining Co. Ltd., Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: In order to solve the problem of difficult solid-liquid separation in the treatment of mine water containing suspended solids, based on the theory of nuclear crystal coagulation induced granulation, the process of "micro flocculation multi stage filtration" of mine water is studied through laboratory experiments. First of all, through the adjustment of reagent dosage and water conservancy conditions, the suspended particles and flocculants are induced to form a copolymer to form a floc settling time curve, and the floc granulation and densification are completed through the selection of optimal parameters. Secondly, four filter media of quartz sand, artificial zeolite, active carbon and aeolian sand are selected to investigate the effects of different media

收稿日期: 2022-08-30; 修订日期: 2022-09-30

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国煤炭科工集团科技创新创业资金专项项目(2022-2-TD-ZD005)

第一作者: 张溪彧(1993-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事矿井水资源化相关研究。E-mail: zhangxiyu@cctegxian.com

types and particle sizes on the removal efficiency of pollutants, and the physical and chemical reactions generated at the solid-liquid interface are analyzed. Finally, field tests are carried out in typical mines to verify the removal effect of the process on different pollution components. The results show that (1) the sedimentation time can be greatly reduced by adding polyaluminum chloride of 200 mg/L and diatomite of 200 mg/L in the micro flocculation stage. (2) The turbidity removal rate of 1–2 mm quartz sand in the multi-stage filtration stage can reach 97.9%, while the artificial zeolite in the four filter media is the best for the removal of inorganic ions. The removal rates of SO_4^{2-} , HCO_3^- and Na^+ in the filtered water can reach 25.5%, 44.1% and 69.9%, respectively. The micro flocculation multi-stage filtration process formed through the research results can greatly reduce the residence time in the process of mine water treatment and improve the solid-liquid separation efficiency. On this basis, the selection of natural diatomite as nucleating agent instead of polyacrylamide can effectively inhibit the generation of acrylamide monomer and reduce environmental risks. In addition, the process has a certain removal effect on inorganic ions. It is good application value for the treatment of mine water containing suspended solids.

Keywords: mine water; micro flocculation; multistage filtering; nuclear crystal coagulation; filter medium

近年来,我国煤矿企业矿井水资源利用率逐年提升,但是距离有关部门的要求仍有一定差距,而制约矿井水利用的重要因素就是水污染引发的环境风险。为了推进陇东、宁东、蒙西、陕北、晋西等能源基地的煤炭矿井水综合利用,必须开展矿井水主要污染组分高效脱除技术研究^[1-2]。悬浮物超标是矿井水处理面临最为广泛的问题,多通过构建地面水处理设施进行去除。但由于矿井水悬浮物粒径较小,在絮凝后需较长停留时间完成沉降,当来水水质出现波动,无法精确调控絮凝剂投加量,水中团聚的絮体受剪切力影响再次发生脱稳而分散于水体中,造成出水水质不达标^[3]。

絮凝法是含悬浮物处理的必要手段,可分为3个阶段,即混合阶段、絮体生长阶段和稳定(或破碎)阶段^[4]。常规絮凝法多通过投加絮凝剂的方式降低水中悬浮颗粒表面电位,从而致使微粒团聚沉降,达到固液分离的目的,但是需要较长的停留时间完成絮体沉降,当来水水质出现波动,往往与设计停留时间存在较大偏差,给整个水处理系统造成一定影响。“微絮凝”是指在含有细小悬浮颗粒的矿井水中,通过投加絮凝剂形成多个微小的聚集基团,并结合接触过滤或直接过滤,完成水体污染物的脱除,具有停留时间短,工艺简单的优势,而区分“絮凝”与“微絮凝”的实质就是通过调节药剂种类与投加量缩短沉降时间,迅速降低水体浊度^[5]。微絮凝作为一个重要的阶段在污水处理过程中起着重要的作用,Colomer等^[6]研究表明控制微絮凝阶段时间可以使微絮凝体体积更大、结构更紧凑;Wang等^[7]通过试验的手段研究了微絮凝阶段絮体成长模型,结果表明通过控制剪切力可以显著影响

絮体分形维度,在改变絮凝剂和助凝剂的投加比例的基础上可以有效控制絮体密度,进而提升固液分离效果;张雷等^[8]发现了絮凝剂的种类和投加量对于絮体生长起关键性作用,但目前在微絮凝过程中对于胶体稳定性控制欠佳,因此亟需开发低耗时的絮凝剂,目前常用聚丙烯酰胺(PAM)作为助凝剂,可以有效缩短沉降时间,但是其水解产生的丙烯酰胺(AM)单体为一级致癌物,对人体具有较大危害。硅藻土是一种硅质岩石,其自身天然无毒,已广泛地应用于印染、造纸等工业废水处理领域^[9],作为成核剂一方面可以密实絮凝体,改善絮凝体形状,另一方面使用硅藻土替代PAM,可以有效降低AM产生的环境风险。

此外,微絮凝后的接触过滤更是固液分离关键的一步^[10],吴正淮等^[11]研究了过滤介质粒径影响下的脱除效率,发现了粒径越低、孔隙度越高、过滤效果越好,但是会引发介质堵塞而影响过滤效果;李伟光等^[12]发现了“微絮凝-强化过滤”工艺中滤料的种类和粒径对于污染组分的脱除效率影响较大,但目前该工艺较少用于矿井水处理,开发适宜于矿井水处理的工艺至关重要。石英砂是当前国内水厂过滤常用的滤料之一,它具有成本低、取材容易、机械强度高、化学性能稳定、截污能力强、效益高、使用周期长等优点^[13]。沸石是一种天然的包含碱金属和碱土金属的水合硅铝酸盐矿石,其储量大、价格便宜,是重要的非金属矿产资源。经测定,沸石的比表面积可达 $10\text{ m}^2/\text{g}$,从而决定其具有优异的吸附性能^[14]。天然沸石的形式为由 SiO_4^{4-} 和 AlO_4^{5-} 四面体组成的三维晶体网络,每个四边形的角均与4个氧原子共享相邻的四元晶体。四面体结构的 Al^{3+} 取代 Si^{4+} 后会使得一个氧原子得不到电子

而产生负电荷,为了保持电中性,会吸引带正电的碱金属阳离子,而这些金属阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 等)与硅铝骨架结合力较弱,易与水中的阳离子发生离子交换而不破坏沸石结构^[15]。沸石的吸附、离子交换性能可实现对污染物的去除,因此常将沸石作为滤池的填料。活性炭是碳的同素异形体,较大比表面积赋予它出色的吸附能力^[16]。风积沙是在风力驱动的作用下,由于搬运、沉积作用而积淀的沙层,广泛分布在我国西部鄂尔多斯盆地矿区,有研究表明风积沙可以作为良好的过滤介质滤除水中部分污染物,具有成本低廉的优势^[17]。

基于此,本研究在分析环境因素的前提下,系统剖析了微絮凝-多级过滤工艺的适用性,在此基础上开展试验研究,通过调整混凝药剂投加及水力条件改善微絮凝阶段絮体生长环境,对比不同滤料的种类和粒径对过滤端污染物去除效率,最终形成适宜于含悬浮物矿井水处理的工艺路线,完善了矿井水处理基础理论,可为含悬浮物矿井水处理提供技术指导。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

聚合氯化铝(PAC)、硅藻土、石英砂、沸石、活性炭等购于福晨(天津)化学试剂有限公司;矿井水取自我国西部陕北煤炭基地某大型井工煤矿中央水仓;风积沙取自我国西部陕北煤炭基地某大型井工煤矿工业广场。

1.2 试验方法

搭建矿井水微絮凝-多级过滤试验装置(图 1),分别包括原水、微絮凝系统、多级过滤系统、储水槽。其中原水和储水槽为 PVC 塑料桶。微絮凝系统主体是 1 个 5 L 的有机玻璃圆柱筒,上部开设有圆形槽口,用于放置搅拌叶片,并于顶部设置溢流堰。多级过滤系统是由 3 根内径为 10 cm、高 30 cm 的有机玻璃柱

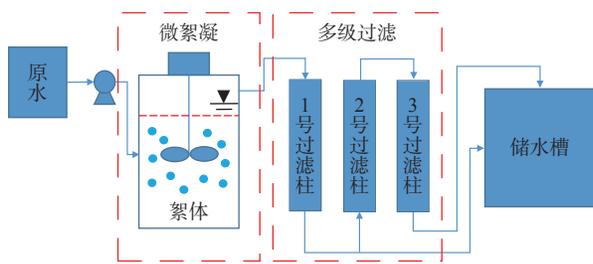


图 1 微絮凝-多级过滤试验装置流程图

Fig. 1 Flow chart of microflocculation-multistage filtration experimental device

和储水槽、流量泵、进出水管路等组成,有机玻璃柱分别填充粒径为 1~2 mm、2~4 mm、4~8 mm 的石英砂、沸石以及风积沙、活性炭的滤料装柱,填充高度为 8 cm。

过滤试验操作步骤如下:(1)考虑取样难度及反应容器容量,单次试验矿井原水量设定为 2 L,泵送入微絮凝系统,向系统中单独投加 PAC,分别投加不同质量 PAC,控制投加 PAC 质量浓度为 100, 200, 300, 400, 500, 600 mg/L,记录随着混凝剂质量浓度增加的沉降时间;(2)进而采用 PAC 和硅藻土联合投加。投加 PAC 质量为 200 mg,同时联合投加不同质量硅藻土,控制硅藻土质量浓度为 100, 200, 300, 400, 500, 600 mg/L,研究投加不同质量浓度药剂对于沉降时间的影响,并通过调整叶片搅拌速率创造高剪切力完成固液两相充分混合;(3)最终经过微絮凝系统的水从 1 号过滤柱经进水管通过重力自流自上而下流过滤柱,流量的大小由流量泵控制为 2 L/min,过滤后的水经排水管至 2 号过滤柱,2 号过滤柱流量控制为 1 L/min,出水排至 3 号过滤柱,3 号过滤柱流量控制为 0.5 L/min,过滤参数见表 1,记录每次试验用水的过滤时间并对过滤后水样进行分析,分析方法及指标见表 2。

表 1 试验运行参数

过滤柱	滤速/($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	滤柱直径/m	截面积/ m^2	流量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)
1号过滤柱	4	0.1	0.03	2
2号过滤柱	2	0.1	0.03	1
3号过滤柱	1	0.1	0.03	0.5

表 2 分析测试方法

指标	主要仪器或测定方法	参照标准
浊度	HACH2100P型浊度仪	
Cl^{-} 质量浓度	硝酸银容量法	《生活饮用水卫生标准》
SO_4^{2-} 质量浓度	硫酸钡比浊法	(GB 5749—2022) ^[18]
Na^{+} 质量浓度	火焰原子吸收分光光度法	
HCO_3^{-} 质量浓度	酸碱滴定法	《地下水水质分析方法》(DZ/T
溶解性总固体(TDS)	重量法	0064—2021) ^[19]

2 测试结果

2.1 原水物化指标

相较于其他工业废水污染物,矿井水指标相对单一,主要为浊度及部分无机离子,其中浊度超标较为严重,原因主要是由于在井下巷道流动过程中卷扫了

部分岩屑、煤粉等, 而无机离子多来源于地下水, 因此选择它们进行重点分析。矿井水水质指标测试结果见表 3。

表 3 某矿井原水水质指标
Table 3 Quality index of raw water of a mine

指标	浊度 /NTU	质量浓度/(mg·L ⁻¹)				TDS/(mg·L ⁻¹)
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	
结果	93.6	128	71	310	546	835

2.2 沉降时间

随着絮体质量的增加, 沉降时间逐渐降低, 当 PAC 投加量为 500 mg/L 时, 沉降时间达到了最低的 199 s, 伴随着投加量的继续增加, 水中团聚的絮体由于再稳作用发生破碎, 致使沉降时间增加至 249 s; 而当 PAC 与硅藻土联合投加, 硅藻土投加量为 200 mg/L 时可以大幅缩短沉降时间至 42 s, 伴随着硅藻土质量浓度的继续增加沉降效果改善不够明显, 当硅藻土质量浓度大于 300 mg/L 时, 沉降时间逐渐延长(图 2)。

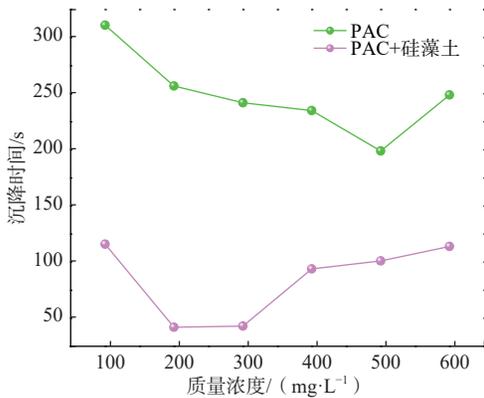
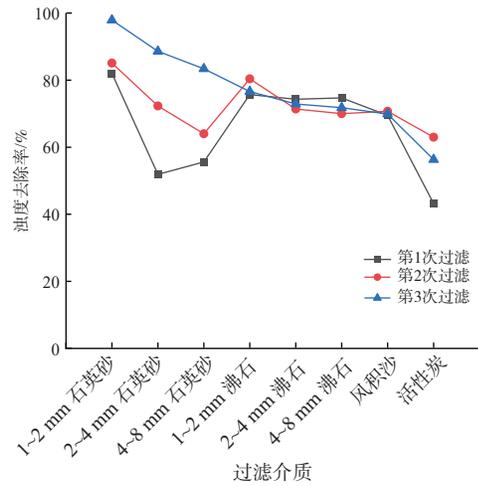


图 2 单一投加 PAC 与联合硅藻土沉降时间比较

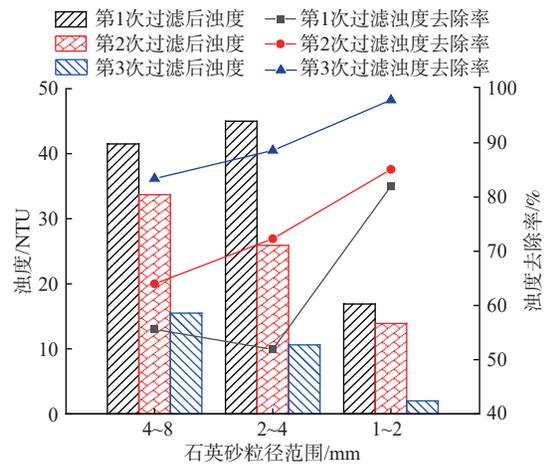
Fig. 2 Comparison of settling time between single PAC and combined diatomite

2.3 出水浊度

控制初始进水流量恒定, 对比分析经过三级过滤后 4 种过滤介质对于浊度的去除率, 如图 3(a) 所示, 其中石英砂的除浊效果明显优于其他 3 种过滤介质, 三级过滤后浊度去除率最高可达 97.9%。石英砂粒径由 4~8 mm、2~4 mm 降低至 1~2 mm 后, 石英砂滤料对出水浊度去除效果明显提升。第 1 次过滤控制滤速为 4 m/h, 石英砂粒径为 4~8 mm、2~4 mm、1~2 mm 时, 浊度去除率分别为 55.6%、51.9%、82.0%。在控制滤速下进行第 2 次过滤, 浊度去除率随石英砂粒径的减小而增加, 浊度去除率由 64.0%、72.3% 增至 85.1%。第 3 次过滤与第 2 次过滤浊度去除率也



(a) 不同滤料对于浊度去除率的影响



(b) 石英砂粒径对于浊度去除率的影响

图 3 不同滤料对浊度的去除效果

Fig. 3 Removal effect of different filter media on turbidity

呈现相同规律, 在控制滤速为 1 m/h、石英砂粒径 1~2 mm 时, 滤后出水平均浊度低至 2.0 NTU, 浊度去除率达 97.9%。经风积沙过滤后水体浊度较为稳定, 浊度在 69.5~70.7 NTU 之间波动, 去除率保持在 70% 左右, 与沸石滤料过滤下浊度去除率相差不大, 见图 3(b)。

2.4 出水无机离子

如图 4(a) 所示, 原水中 Cl⁻ 离子平均质量浓度为 128 mg/L, 经 1~2 mm、2~4 mm、4~8 mm 的石英砂及沸石、风积沙过滤后 Cl⁻ 质量浓度分别升高为 136, 130, 138, 129, 130, 134, 140 mg/L, 相应增加了 6.3%、1.6%、7.8%、0.8%、1.6%、4.7%、9.4%。而活性炭对水中 Cl⁻ 具有去除效果, 过滤前后 Cl⁻ 质量浓度从 128 mg/L 降至 104 mg/L, 去除率为 18.8%。

如图 4(b) 所示, 过滤后水体中 SO₄²⁻ 质量浓度及去除率保持在较为稳定的范围内, SO₄²⁻ 质量浓度为 48~52.8 mg/L, 去除率在 25.5%~32.2% 范围内波动。石英

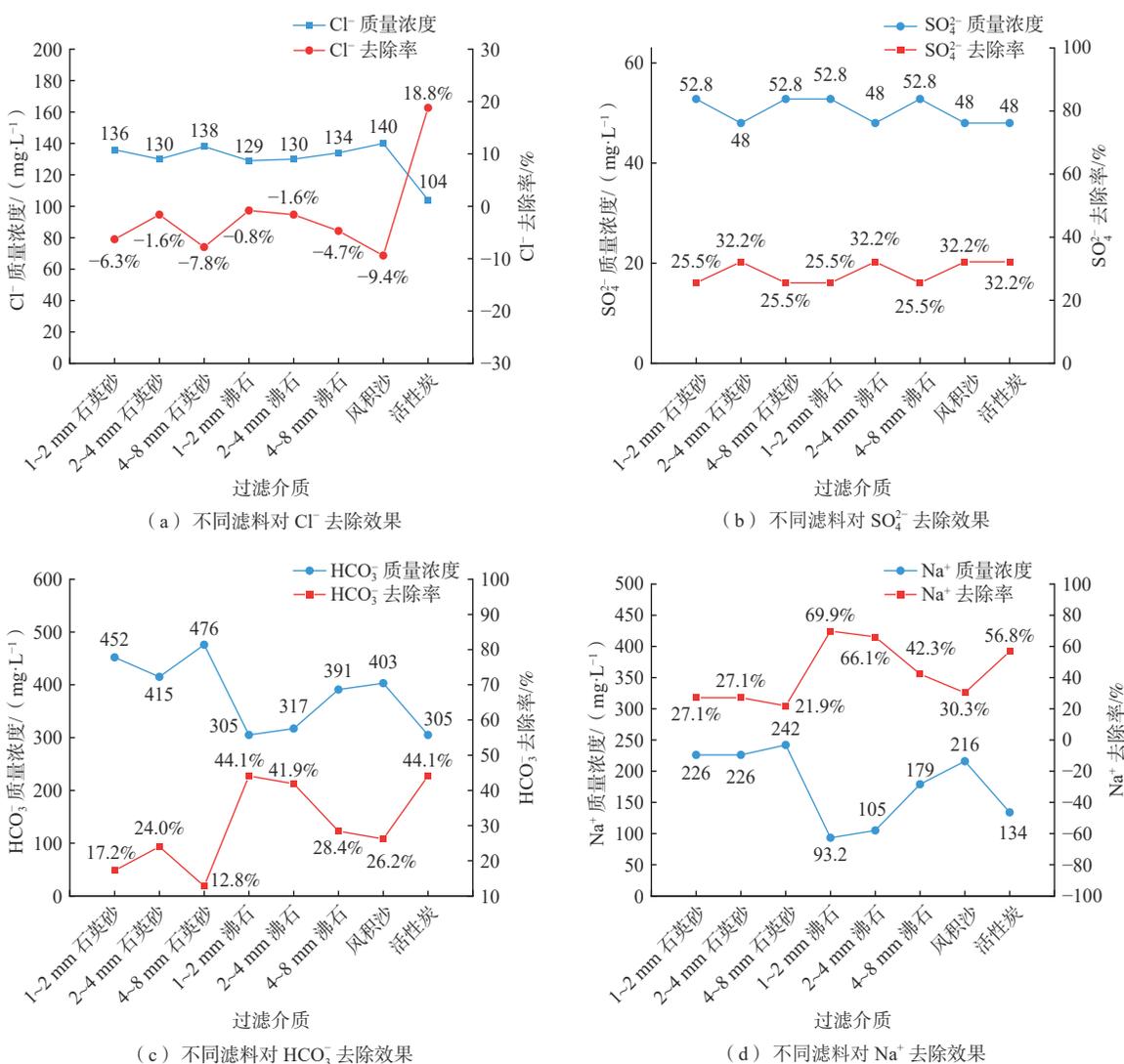


图 4 不同滤料对无机离子的去除效果

Fig. 4 Removal effect of different filter materials on inorganic ions

砂、沸石的粒径变化和滤料种类不同对SO₄²⁻的去除影响不明显。

如图 4(c)所示,对于HCO₃⁻去除效果最好的是1~2 mm 沸石和活性炭,3次循环过滤后出水中HCO₃⁻质量浓度均为305 mg/L,去除率为44.1%,接下来依次是2~4 mm 沸石>4~8 mm 沸石>风积沙>2~4 mm 石英砂>1~2 mm 石英砂>4~8 mm 石英砂,出水中HCO₃⁻质量浓度依次为317,391,403,415,452,476 mg/L,相对应的去除率依次为41.9%、28.4%、26.2%、24%、17.2%、12.8%。沸石粒径由1~2 mm、2~4 mm增至4~8 mm后,滤后出水中HCO₃⁻去除率由44.1%、41.9%降至28.4%。

如图 4(d)所示,对于Na⁺去除效果最好的是1~2 mm 的沸石,经3次循环过滤后出水中Na⁺质量浓度降至93.2 mg/L,去除率高达69.9%。接下来去除率

依次是2~4 mm 沸石>活性炭>4~8 mm 沸石>风积沙>1~2 mm 石英砂=2~4 mm 石英砂>4~8 mm 石英砂,出水中HCO₃⁻质量浓度依次为105,134,179,226,226,242 mg/L,相对应的去除率依次为66.1%、56.8%、42.3%、27.1%、27.1%、21.9%。即随着沸石滤料粒径依次增大,水中Na⁺质量浓度依次升高,去除率呈现依次减小的趋势。沸石粒径为1~2 mm、2~4 mm、4~8 mm时滤后出水中Na⁺的质量浓度分别为93.2,105,179 mg/L,去除率依次为69.9%、66.1%、42.3%。

石英砂、沸石、风积沙、活性炭滤料对TDS都有一定的去除效果(图5)。其中活性炭对TDS的去除效果最好,出水中TDS质量浓度为524 mg/L,去除率为37.2%。其次去除效果较为显著的是不同粒径的沸石,1~2 mm、2~4 mm、4~8 mm 沸石滤后出水中TDS

质量浓度分别为 564, 584, 632 mg/L, 去除率依次为 32.5%、30.1%、24.3%。通过风积沙过滤后水中的 TDS 质量浓度为 696 mg/L, 去除率 16.6%, 低于活性炭去除率 20.6%。

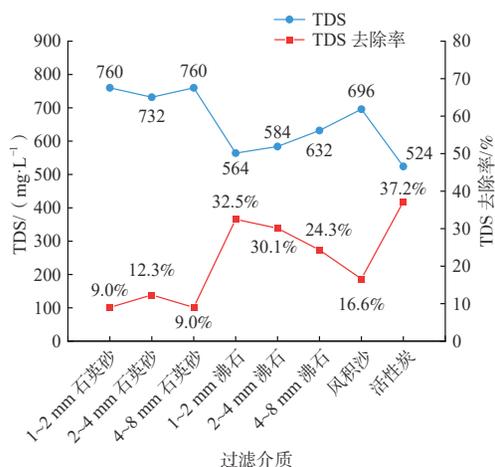


图 5 不同滤料对 TDS 的去除效果

Fig. 5 Removal effect of different filter materials on TDS

3 分析与讨论

3.1 微絮凝对絮体沉降时间的影响

在微絮凝阶段单一投加 PAC 与联合投加“PAC+硅藻土”的沉降时间呈现较大差异,其中单一投加 PAC 时,沉降时间呈现先降低后增加的趋势,这是由于随着 PAC 投加量的不断增加,水中悬浮颗粒不断吸附在絮体表面。硅藻土是具有较大比表面积、高表面能的成核剂,能吸引脱稳颗粒相互靠拢、聚集,脱稳颗粒在硅藻土表面完成逐一被吸附的过程,形成密实化的絮凝体沉降,硅藻土的添加更有利于“球状”絮凝体的形成,显著提高絮凝体的沉降速率^[19]。

3.2 不同过滤介质对浊度的去除效率

石英砂的除浊效果明显优于其他 3 种过滤介质,这是由于在表面作用下它与水中悬浮颗粒发生吸附作用,能够在水流运移过程中拦截大量的悬浮物质。而活性炭对于浊度的去除率最高可达 63%,这是由于其自身较小的粒径与密度,容易在水流作用下被卷扫携带运移至出水中引起浊度升高^[20]。此外过滤介质的粒径也显著影响浊度去除率,这是因为当滤料体积是定值时,在相同类型的过滤条件下,滤料粒径与滤层滤料总表面积成反比,即细粒石英砂的粒径更小,能有效地增加滤料的表面积,悬浮颗粒穿越滤层可能的接触次数就越高,截留能力越强,对出水浊度的控制更为有利^[21]。随着滤料粒径增大,滤料颗粒

间的孔隙尺度加大,有效孔隙空间也相应增加,过水通道尺度也越大,对水中细小杂质颗粒去除效果随之降低。

3.3 不同过滤介质对无机离子的去除效率

对于石英砂、沸石、风积沙 3 种介质,经过微絮凝-多级过滤后出水中的 Cl⁻ 质量浓度较原水有一定程度升高,对 Cl⁻ 没有去除效果。分析原因是微絮凝过程采用 PAC 联合硅藻土投加的方式,其中 PAC 是由铝酸钙粉、盐酸、铝矾土以及铁粉等原材料制成,化学通式为 [Al₂(OH)_nCl_{6-n}]_m。当 PAC 投加至原水水解后产生大量的 Cl⁻ 存在于絮体中在过滤时被截留,少量的 Cl⁻ 随着水流穿透滤层,造成出水中 Cl⁻ 质量浓度较原水升高^[22]。活性炭除碳元素外,还含有 2 种混合物,一是以化学键结合的元素,如氢和氧。氢和氧的存在对活性炭的性质有很大的影响,因为这些元素与碳以化学键结合,而使活性炭的表面积上有了各种有机官能团形式的氧化物及碳氢化物,这些氧化物及碳氢化物使得 Cl⁻ 与活性炭发生化学作用,表现为活性炭在吸附过程中的选择吸附特性^[23]。

石英砂、沸石、风积沙、活性炭对 SO₄²⁻ 都具有一定的去除效果,这是由于过滤是一个表面化学、胶体化学和水流动力共同作用的复杂过程,悬浮物通过迁移和附着 2 个过程完成去除。过滤介质因为其高表面积,良好的吸附能力,通过范德华力、双电层力、化学键力和某些特殊的化学吸附力将 SO₄²⁻ 粘附在滤料或者悬浮物颗粒表面。粘附作用来源于滤料与水中污染物表面物理化学性质形成的相互作用力^[24]。

对于 HCO₃⁻ 去除效果较好的过滤介质是沸石和活性炭,沸石晶体结构内部存在着空洞和孔道,其体积约占沸石晶体总体积的 50% 以上,每克沸石的内表面积可达千余平方米,决定其具有优良的吸附性。活性炭由于自身发达的孔隙结构和巨大的比表面积,赋予其较强的吸附能力。通常活性炭颗粒中的孔隙占颗粒总体积的 70%~80%。因此,沸石与活性炭都具有发达的孔隙,对 HCO₃⁻ 都具有一定程度的吸附能力。当沸石滤料粒径依次增大时,出水中 HCO₃⁻ 去除率依次减小。

通过不同滤柱循环过滤后出水中 Na⁺ 都有一定的去除效果。沸石铝氧四面体带有一个负电荷,而骨架孔穴中含有阳离子,这样在阳离子的周围便形成了强大的电场,因此沸石的吸附力不仅有强大的色散力,还有较大的静电力。正是由于这种静电力的关系,沸

石中的阳离子与水中其他离子进行可逆交换, 静电场发生变化, 从而可以改变它的吸附性能。活性炭内部具有晶体结构和孔隙结构, 表面也有一定的化学结构, 活性炭吸附性能不仅取决于活性炭的物理结构, 还取决于活性炭表面的化学结构。活性炭表面有丰富的官能团, 例如羰基、羧基、内酯基、羟基、醚、苯酚、环酮等。对于阳离子吸附交换, 活性炭表面的含氧官能团起到了积极的作用^[25], 粒径不同的沸石对 Na⁺ 的去除效果与 HCO₃⁻ 去除效果呈现出相同的规律, 究其原因, 小粒径的沸石具有较大比表面积决定其更高效的吸附能力。不同粒径的石英砂对 Na⁺ 离子去除率较稳定, 这是由于在水中石英砂常常带有表面负电荷, 能吸附带正电荷的离子, 然而石英砂不属于多孔材料, 内表面积很小, 其比表面积仅为约 50 cm²/g, 难以与 Na⁺ 发生显著的吸附作用, 且沸石微孔分布均匀, 从而使整个滤层都具有截污能力, 而石英砂深层截污能力较差。

3.4 不同过滤介质对 TDS 的去除效率

TDS 是水质分析中常用的指标之一, TDS 与各离子之间的联系可以综合反应水质的成因。相关分析是研究 2 个或 2 个以上处于同等地位随机变量间的相关关系的统计分析方法, 通过 SPSS 软件可以实现对矿井水不同指标的相关性分析, 进而深入分析 TDS 与其他无机因子的内在关系, 揭示本工艺对于不同无机离子的脱除机制。结合采样点 Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、Na⁺ 离子质量浓度利用 SPSS 软件得到各离子间的相关系数矩阵, 见表 4。

可见 TDS 与 Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、Na⁺ 之间都存在明显的正相关关系, 与 Cl⁻、SO₄²⁻ 存在显著的相关性, 相

表 4 相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix

离子种类	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	TDS
Cl ⁻	1	0.942	0.667	0.833	0.972
SO ₄ ²⁻		1	0.402	0.785	0.972
HCO ₃ ⁻			1	0.731	0.484
Na ⁺				1	0.719
TDS					1

关系数均为 0.972, 与 HCO₃⁻、Na⁺ 离子间的相关系数为 0.484 以及 0.719, Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、Na⁺ 都对 TDS 质量浓度有一定贡献。

4 案例分析

基于本研究成果, 以西部矿区某煤矿为典型案例, 构建矿井水微絮凝-多级过滤工艺(图 6), 首先将 PAC 加入预沉调节池中, 以增加悬浮颗粒的粒径大小, 充分混合后水被泵送到斜管沉淀池, 随即加入 200 mg/L PAC 和 200 mg/L 硅藻土, 出水(约 680 m³/h)可用于洗煤, 其余的矿井水进入石英砂滤池, 脱除水体浊度, 该水(约 520 m³/h)主要用于矿山降尘和防火, 剩余的水(约 240 m³/h)泵送进入人造沸石过滤层脱除部分无机离子。在连续运行 72 h 后分别对进出水进行取样分析(表 5), 结果显示浊度去除率可达到 98.10%。此外对于矿井水无机离子皆有一定脱除效果, 其中 Na⁺、HCO₃⁻ 去除率分别达到 60.28% 与 34.64%, 接近于本文试验研究中的 69.90% 与 44.10%, 猜测由于现场矿井涌水量较大而无法达到试验约束的停留时间, 因而未能使无机离子充分与过滤介质接触, 而 Cl⁻ 呈现略微上升趋势, 与试验结果较为一致。SO₄²⁻ 与 TDS 皆呈现略微下降趋势, 去除率分别达到 20.00% 与 15.70%, 说

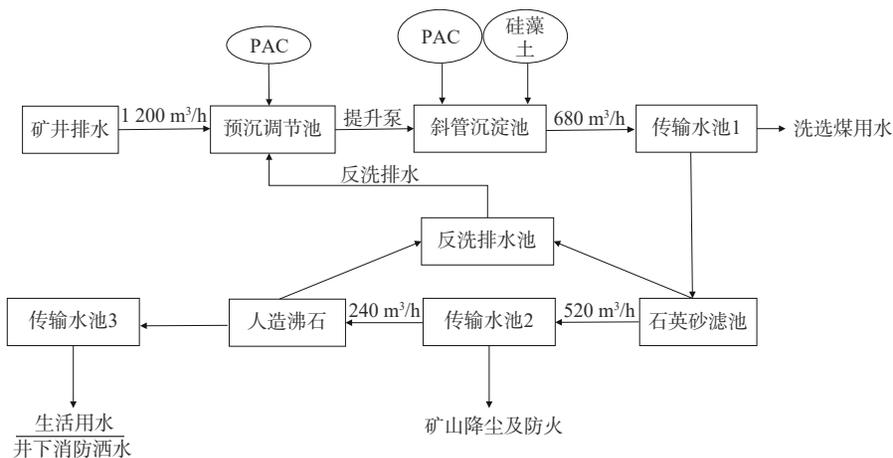


图 6 西部某矿井微絮凝-多级过滤工艺路线

Fig. 6 Micro-flocculation-filtration process route of a mine in a western mining area

表 5 微絮凝-多级过滤实际处理效果
Table 5 Correlation coefficient matrix

	浊度/NTU	质量浓度/(mg·L ⁻¹)				TDS/(mg·L ⁻¹)
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	
进水	105	128	85	560	335	968
出水	2	144	68	366	121	816

明本工艺在实际运行过程中既能有效脱除水体悬浮物质,而且对于部分无机离子具有一定脱除效果。

5 结论

(1)微絮凝-多级过滤工艺中通过采用 200 mg/L PAC 及 200 mg/L 硅藻土联合投加的方式可以有效缩短水中絮体沉降时间,提高固液分离效率,降低环境风险;

(2)石英砂对于矿井水浊度脱除效果最优,出水平均浊度低至 2.0 NTU,人造沸石对于部分无机离子脱除效果最优,对于 SO₄²⁻、HCO₃⁻、Na⁺去除率分别达到 25.5%、44.1%、69.9%,脱除效率与过滤介质粒径成反相关关系;

(3)对于含有悬浮物和无机离子等复合污染物的矿井水,微絮凝-多级过滤工艺具有良好的应用效果,能够在大幅度降低矿井水浊度的同时脱除部分无机离子,具有一定推广应用价值。

参考文献 (References) :

- [1] 张进德,田磊,裴圣良. 矿山水土污染与防治对策研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(2): 157 – 163. [ZHANG Jinde, TIAN Lei, PEI Shengliang. A discussion of soil and water pollution and control countermeasures in mining area of China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 157 – 163. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李圣品,李文鹏,殷秀兰,等. 全国地下水水质分布及变化特征 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 1 – 8. [LI Shengpin, LI Wenpeng, YIN Xiulan, et al. Distribution and evolution characteristics of national groundwater quality from 2013 to 2017[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(6): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 何绪文,杨静,邵立南,等. 我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策 [J]. *煤炭学报*, 2008, 33(1): 63 – 66. [HE Xuwen, YANG Jing, SHAO Linan, et al. Problem and countermeasure of mine water resource regeneration in China[J]. *Journal of China Coal*

- Society*, 2008, 33(1): 63 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 范荣桂,王会川,邓岚,等. 基于微絮凝的矸石渣深床过滤处理矿井废水试验研究 [J]. *给水排水*, 2013, 49(3): 140 – 143. [FAN Ronggui, WANG Huichuan, DENG Lan, et al. Experimental study on coal gangue slag filter based on micro-flocculation filtration for mine wastewater treatment[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013, 49(3): 140 – 143. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 金鹏康,王晓昌. 天然有机物的混凝特性研究 [J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2000, 32(2): 155 – 159. [JIN Pengkang, WANG Xiaochang. A study on the characteristics of coagulation of natural organic matters[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2000, 32(2): 155 – 159. (in Chinese with English abstract)]
- [6] COLOMER J, PETERS F, MARRASÉ C. Experimental analysis of coagulation of particles under low-shear flow[J]. *Water Research*, 2005, 39(13): 2994 – 3000.
- [7] WANG Zhenbei, NAN Jun, JI Xiaoyu, et al. Effect of the micro-flocculation stage on the flocculation/sedimentation process: the role of shear rate[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1183 – 1191.
- [8] 张雷,李思强,苗月. 采用微絮凝—过滤工艺处理油田采出水 [J]. *化工环保*, 2010, 30(2): 156 – 158. [ZHANG Lei, LI Siqiang, MIAO Yue. Treatment of oilfield wastewater by microflocculation-filtration process[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2010, 30(2): 156 – 158. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 尤兆玮,孙昕. 精细过滤及硅藻土助滤剂的应用 [J]. *过滤与分离*, 2005, 15(2): 32 – 35. [YOU Zhaowei, SUN Xin. Application of diatomite filter aid in filtration[J]. *Journal of Filter & Separator*, 2005, 15(2): 32 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 赵奎霞,李晓粤,张传义. 微絮凝——直接过滤技术的研究与应用进展 [J]. *环境保护科学*, 2003, 29(5): 12 – 14. [ZHAO Kuixia, LI Xiaoyue, ZHANG Chuanyi. Study and application progress of micro-flocculation-direct filtration technology[J]. *Environmental Protection Science*, 2003, 29(5): 12 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 吴正淮. 低温低浊度水净化技术的应用与发展 [J]. *中国给水排水*, 1989, 5(5): 43 – 46. [WU Zhenghuai. Application and development of low temperature and low turbidity water purification technology[J]. *China Water &*

- Wastewater, 1989, 5(5): 43 – 46. (in Chinese).]
- [12] 李伟光, 吕龙义, 张泽, 等. 微絮凝强化两级过滤工艺处理复合污染地下水的效能分析 [J]. 净水技术, 2021, 40(11): 41 – 48. [LI Weiguang, LYU Longyi, ZHANG Ze, et al. Analysis on effectiveness of enhanced two-stage filtration process with micro-flocculation for compound polluted groundwater treatment[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(11): 41 – 48. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 聂水源, 吕小梅, 李继, 等. 纤维与石英砂过滤技术的比较研究 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 141 – 145. [NIE Shuiyuan, LYU Xiaomei, LI Ji, et al. Comparison between fiber and sand filtration technology[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(1): 141 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李德生, 张金萍. 沸石滤料对黄河原水的处理效果 [J]. 中国给水排水, 2002, 18(12): 37 – 38. [LI Desheng, ZHANG Jinping. Treatment effect of zeolite filter material on raw water of the Yellow River[J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(12): 37 – 38. (in Chinese).]
- [15] MURASE H, IMAI T, INOHARA T, et al. Use of zeolite filter in portable equipment for recovering SF/sub 6/in SF/sub 6// N/sub 2/mixtures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 166 – 173.
- [16] 兰淑澄. 活性炭水处理技术 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991. [LAN Shucheng. Activated carbon water treatment technology[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1991. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 姬亚东. 陕北煤矿区矿井水资源化及综合利用研究 [J]. 地下水, 2009, 31(1): 84 – 86. [JI Yadong. Study on comprehensive utilization of coal mine water resources in the coal mine area of North Shaanxi[J]. Ground Water, 2009, 31(1): 84 – 86. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2022[S]. [National Health Commission of the People's Republic of China. Standards for drinking water quality: GB 5749—2022[S]. (in Chinese)]
- [19] 张瑶瑶. 油田压裂废水的核晶凝聚诱导造粒混凝技术研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015. [ZHANG Yaoyao. Study on the nucleation-induced pellet in the coagulation process and its application in the oilfield fracturing wastewater treatment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 郑福灵, 张金松, 曲志军, 等. 微絮凝直接过滤处理污水处理厂二级出水的中试研究 [J]. 给水排水, 2009, 45(增刊 1): 119 – 122. [ZHENG Fuling, ZHANG Jinsong, QU Zhijun, et al. Pilot study on treatment of secondary effluent from sewage treatment plant by micro-flocculation direct filtration[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(Sup 1): 119 – 122. (in Chinese)]
- [21] 刘世念, 胡勇有, 阎佳, 等. 多介质过滤-活性炭过滤-MBR 工艺深度处理城市中水回用火电厂工业用水研究 [J]. 水处理技术, 2015, 41(3): 68 – 70. [LIU Shinian, HU Yongyou, YAN Jia, et al. Advanced treatment of municipal reclaimed water for industrial water use in thermal power plant by multi-media filtration-activated carbon-membrane bioreactor combined technology[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(3): 68 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 汤鸿霄. 羟基聚合氯化铝的絮凝形态学 [J]. 环境科学学报, 1998, 18(1): 1 – 10. [TANG Hongxiao. Flocculation morphology for hydroxyl polymer of poly-aluminum chloride[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998, 18(1): 1 – 10. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 文婕, 孙文晶, 杨文. 氧化改性活性炭吸附脱氮选择性研究 [J]. 功能材料, 2013, 44(20): 2954 – 2958. [WEN Jie, SUN Wenjing, YANG Wen. Effects of oxidative modification of carbon surface on selective removal of nitrogen compounds from model fuel[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(20): 2954 – 2958. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 杨晓东, 顾安忠. 活性炭吸附的理论研究进展 [J]. 炭素, 2000(4): 11 – 15. [YANG Xiaodong, GU Anzhong. Developments of theoretical research of absorption on activated carbons[J]. Carbon, 2000, (4): 11 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 胡记杰, 肖俊霞, 任源, 等. 焦化废水原水中有机污染物的活性炭吸附过程解析 [J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1567 – 1571. [HU Jijie, XIAO Junxia, REN Yuan, et al. Adsorption process of organic contaminant in untreated coking wastewater by powdered activated carbon[J]. Environmental Science, 2008, 29(6): 1567 – 1571. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 宗爽