



矿业科学学报

JOURNAL OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

含细颗粒悬浮物矿井水的混凝沉淀参数优化

侯斌, 秦浩铭, 刘昊, 徐东莹, 贾舒涵, 张周爱, 王建兵

Parameter optimization of coagulation and sedimentation for fine suspended solids removal from mine water

引用本文:

侯斌, 秦浩铭, 刘昊, 徐东莹, 贾舒涵, 张周爱, 王建兵. 含细颗粒悬浮物矿井水的混凝沉淀参数优化[J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(2): 278–285.

HOU Pin, QIN Haoming, LIU Hao, et al. Parameter optimization of coagulation and sedimentation for fine suspended solids removal from mine water[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(2): 278–285.

您可能感兴趣的其他文章

1. 煤矿地下水库对矿井水净化机理研究进展

引用本文: 蒋斌斌, 李井峰, 吴敏, 等. 煤矿地下水库对矿井水净化机理研究进展[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(2): 137–145.

2. 响应曲面法优化含氟矿井水处理及除氟机理研究

引用本文: 章丽萍, 安逸云, 吴二勇, 等. 响应曲面法优化含氟矿井水处理及除氟机理研究[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(6): 782–792.

3. 咖啡渣生物质炭的制备及其对矿井水中氟离子的去除研究

引用本文: 侯斌, 李佳兴, 张春晖, 等. 咖啡渣生物质炭的制备及其对矿井水中氟离子的去除研究[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(6): 746–754.

4. 难沉降钨矿选矿废水处理研究

引用本文: 章丽萍, 吴胜念, 宋学京, 等. 难沉降钨矿选矿废水处理研究[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(6): 687–695.

5. 煤基复合絮凝剂对高浊度高矿化度矿井水的絮凝效果研究

引用本文: 蒋斌斌, 高昊, 杜坤, 等. 煤基复合絮凝剂对高浊度高矿化度矿井水的絮凝效果研究[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(6): 681–686.

侯嫔,秦浩铭,刘昊,等. 含细颗粒悬浮物矿井水的混凝沉淀参数优化[J]. 矿业科学学报,2024,9(2):278-285. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024.02.014

HOU Pin, QIN Haoming, LIU Hao, et al. Parameter optimization of coagulation and sedimentation for fine suspended solids removal from mine water [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(2): 278-285. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024.02.014

含细颗粒悬浮物矿井水的混凝沉淀参数优化

侯嫔¹, 秦浩铭¹, 刘昊¹, 徐东莹¹, 贾舒涵¹, 张周爱², 王建兵¹

1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100013;
2. 神华宝日希勒能源有限公司, 内蒙古呼伦贝尔 021025

摘要:针对宝日希勒露天煤矿矿井水中悬浮颗粒物粒径小、难去除的问题,采用单因素与正交实验方法确定了混凝沉淀工艺的最佳参数,分析了矿井水中细颗粒物的混凝机理。结果表明,混凝沉淀的最佳工艺参数为聚合氯化铝(PAC)投加量 50 mg/L,非离子型聚丙烯酰胺(NPAM)投加量 5.0 mg/L,快速搅拌(300 r/min)时间 1 min,慢速搅拌(50 r/min)时间 8 min,静置时间 5 min;在最佳工艺条件下,悬浮物(SS)质量浓度为 5.0 mg/L,去除率为 99.1%,相比单独投加 PAC 时,10 μm 以下的细颗粒物去除率提高了 25.9%,矿井水的 ζ 电位由 -40.9 mV 降低至 -16.3 mV,说明细颗粒物的混凝机理主要为 PAC 吸附电中和作用和聚丙烯酰胺(PAM)吸附架桥作用。

关键词: 矿井水; 细颗粒; 悬浮物; 混凝沉淀; 参数优化; ζ 电位; 混凝机理

中图分类号: X751

文献标志码: A

文章编号: 2096-2193(2024)02-0278-08

Parameter optimization of coagulation and sedimentation for fine suspended solids removal from mine water

HOU Pin¹, QIN Haoming¹, LIU Hao¹, XU Dongying¹, JIA Shuhan¹, ZHANG Zhouai², WANG Jianbing¹

1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. Shenhuabao Rixile Energy Co., LTD, Hulunbuir Inner Mongolia 021025, China

Abstract: In response to the issue of small particle size and difficult removal of suspended particles in the mine water of Baorixile open-pit coal mine, this study probed into the optimal parameters of the coagulation and precipitation process through single-factor and orthogonal experiments, and explored the mechanism behind the coagulation of fine particles in mine water. The optimal process parameters for coagulation and precipitation include: 50 mg/L of polyaluminum chloride (PAC), 5.0 mg/L of non-ionic polyacrylamide (NPAM) under 1 minute of rapid stirring (300 r/min), 8 minutes of slow stirring (50 r/min), and 5 minutes of settling. Under these optimum process conditions, the concentration of suspended solids (SS) is 5.0 mg/L with a removal efficiency of 99.1%. Compared to the sole addition of PAC, the removal efficiency of fine particles below 10 μm increased by 25.9%. Additionally, the ζ potential of the mine water decreased from -40.9 mV to -16.3 mV, indicating that the coagulation mechanism of fine particles is mainly attributed to the adsorption and charge neutralization of PAC and the

收稿日期: 2023-08-29 修回日期: 2023-11-28

基金项目: 山西省重点研发计划(202102090301006); 中央高校越崎青年学者“资助计划”(2020QN09); 国家重点研发计划(2018YFC0406404-5); 神华宝日希勒能源有限公司研究项目(CSIEZC190104242)

作者简介: 侯嫔(1985—), 女, 内蒙古包头人, 副教授, 博士, 主要从事新型给水、排水处理方面的研究工作。Tel: 15001063238, E-mail: phou.beijing@cumt.edu.cn

bridging effect of PAM.

Key words: mine water; fine particles; suspended matter; coagulation and precipitation; parameter optimization; ζ potential; coagulation mechanism

悬浮物含量高在矿井水中普遍存在。矿井水悬浮物的主要成分是粒径极为细小的煤粉和岩尘^[1],其去除是治理矿井水的难点之一^[2],为了达标排放,污水处理厂使用的混凝剂投加量通常超过常规值的1~2倍^[3]。因此,为了提高细颗粒悬浮物的去除率并减少混凝剂的投加量,有必要对影响混凝沉淀效果的因素进行研究。

影响混凝沉淀效果的因素中,混凝剂与助凝剂的种类与投加量是关键因素^[4]。在混凝沉淀工艺中,混凝剂PAC与助凝剂PAM的应用最为广泛。李福勤等^[5]利用混凝、沉淀、过滤工艺处理邢台某矿矿井水,向水中加入80 mg/L PAC与0.4 mg/L PAM后进行澄清过滤,过滤后出水浊度降到10 NTU以下。PAC与PAM的复配投加对矿井水处理具有良好的混凝沉淀效果,但对于去除矿井水中细颗粒悬浮物的研究还较少^[6]。

混凝剂与助凝剂的水解是细颗粒悬浮物去除的关键。以PAC与PAM为例,PAC水解能够产生带有正电荷的羟基聚合物,在颗粒表面起到压缩双电层作用,降低颗粒的 ζ 电位,使颗粒脱稳,再通过电中和吸附架桥作用形成絮体沉淀^[7]。但对于粒径小于25 μm 的细颗粒悬浮物,常规PAC投加量难以与细颗粒物发生良好的压缩双电层作用,而过量投加又会导致带正电荷的基团吸附在颗粒表面,使颗粒表面电荷异号、脱稳的颗粒发生再稳现象^[8]。所以在使用PAC的同时,需使用助凝剂PAM来提高细颗粒物的去除率^[9]。PAM属于高分子有机聚合物,能够提高絮体间的吸附架桥作用^[10],还能使脱稳后的细小絮团通过网捕卷扫作用形成更大更紧密的絮体,增加絮体密度、加快沉淀速率、减少水力停留时间^[11]。

为了提高矿井水中细颗粒悬浮物的去除率,通过单因素与正交实验,考察了单独投加混凝剂与PAC/PAM复配投加对混凝沉淀效果的影响。并对混凝前后的颗粒粒径、 ζ 电位和pH值的变化进行研究,对混凝沉淀工艺参数进行优化,同时初步阐述了PAC与PAM对矿井水中细颗粒悬浮物的去除机理。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

1.1.1 实验试剂

本实验选用的无机高分子混凝剂有PAC、聚合硫酸铁(PFS)和聚合氯化铝铁(PAFC),分别购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司、天津市鼎盛鑫化工有限公司和上海麦克林生化科技有限公司。有机高分子助凝剂有阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)、阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)和非离子型聚丙烯酰胺(NPAM),分别购自山东优索化工科技有限公司、天津市致远化学试剂有限公司和上海麦克林生化科技有限公司。实验中所有标准溶液均用Thermo Scientific仪器制备的高纯水配制,实验所用其他化学试剂均为分析纯。

1.1.2 实验水样

实验中使用的水样取自神华宝日希勒露天煤矿1号矿坑涌水,其中SS质量浓度为540 mg/L,pH值为7.24,化学需氧量(COD_{Cr})为323 mg/L,总溶解性固体(TDS)质量浓度为837 mg/L,氟离子、氯离子、硫酸根离子的质量浓度分别为0.09、123.98、51.91 mg/L,总铁、总锰、总砷的质量浓度分别为0.085、0.034、0.096 mg/L。

1.2 实验方法

1.2.1 混凝沉淀实验方法

实验采用混凝沉淀烧杯试验方法(《中国工程建设标准化协会标准:CECS 130—2001》)。首先取6个1 000 mL烧杯,将其置于六联搅拌器上,向烧杯中注入800 mL原水;然后将配置好的混凝剂同时加入对应的烧杯中,进行混凝搅拌并开始计时;混凝搅拌分为两个阶段:第一个阶段为快速搅拌阶段,转速为 n_1 ,时间为 t_1 ;第二个阶段为慢速搅拌阶段,转速为 n_2 ,时间为 t_2 ;最后静置一段时间 t_3 后,取烧杯中的上清液进行数据测定。

1.2.2 分析方法

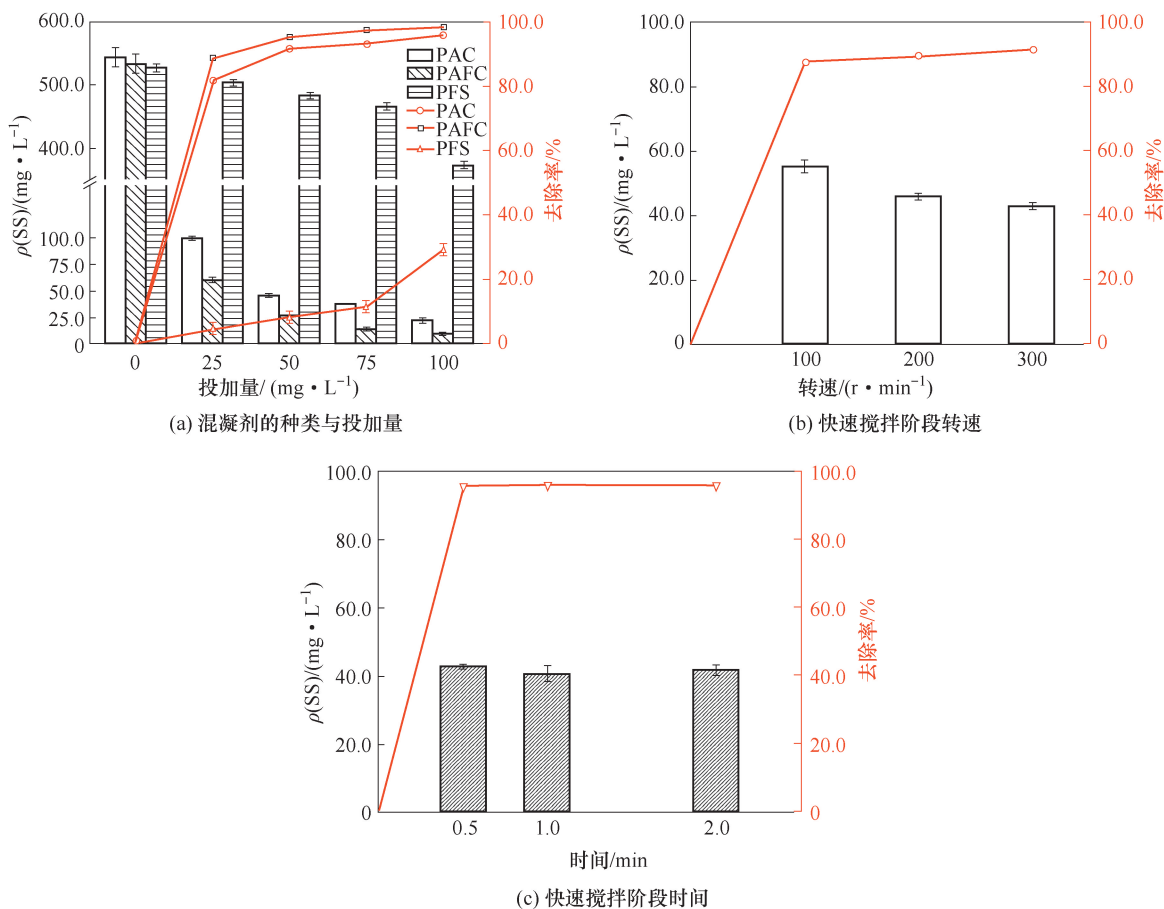
研究中SS的测定采用《煤矿水中悬浮物的测定方法:MT/T 805—1999》; ζ 电位的测定使用

Zetasizer Nano-Z Zeta 电位分析仪;悬浮颗粒粒径分布的测定使用马尔文 Ms 2000 激光粒度分析仪;悬浮颗粒物计数的测定使用罗湾 LWL-5 颗粒计数器。

2 结果与讨论

2.1 单独投加混凝剂对混凝沉淀效果的影响

混凝剂的种类与投加量、快速搅拌阶段转速与时间对混凝沉淀效果的影响,实验结果如图 1 所示。



($\rho(SS_0) = 540 \text{ mg/L}; n_1 = 300 \text{ r/min}; t_1 = 2 \text{ min}; n_2 = 50 \text{ r/min}; t_2 = 8 \text{ min}; t_3 = 10 \text{ min}$)

图 1 单独投加混凝剂对混凝沉淀效果的影响

Fig. 1 Effects of different reaction conditions on the efficiency of coagulation and sedimentation with PAC alone

由图 1(a)可以看出,当混凝剂的投加量从 25 mg/L 增加到 100 mg/L 时,SS 去除率逐渐提高,且当投加量为 100 mg/L 时,SS 去除率达到最高,其中 PAFC 的为 97.0%,PAC 的为 96.3%,PFS 的为 31.5%。PAFC 对 SS 去除率最高,这主要是因为其兼有铝盐的优良混凝效能和铁盐的强吸附活性及快速沉淀的优点^[12],但其价格昂贵。传统铝盐(PAC)的混凝沉淀效果要优于铁盐(PFS),这主要是因为铝盐的水解产物 Al_{13} 即 $[AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(H_2O)_{12}]^{7+}$,是去除水体颗粒物最为优势的混凝形态。 Al_{13} 带有较高的正电荷,可以与带负电荷的细颗粒物发生强烈的电中和反应^[13],而铁盐的水解产物对细颗粒物的电中和能力有限^[14],所以 PFS 对 SS 去除率最低。从 SS 去

除率来看,PAC 比 PAFC 仅低了 0.7%;从经济性的角度来看,PAC 的单价仅为 PAFC 的一半^[15]。因此,选择 PAC 作为混凝剂。

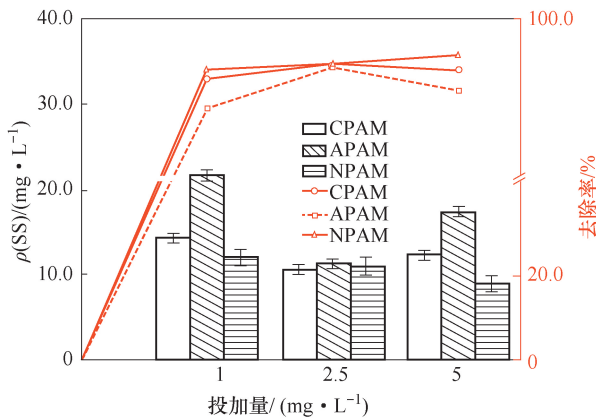
由图 1(b)可以看出,当转速从 100 r/min 增加到 300 r/min,SS 去除率逐渐提高,且转速 300 r/min 时(G 值为 124.1 s^{-1}),SS 去除率达到最高,为 92.2%。这一结果表明:在快速搅拌阶段,转速的增加一方面有利于混凝剂的水解,能够增加混凝剂与细颗粒物的碰撞概率;另一方面能使生成的絮体均匀分散,通过吸附架桥作用形成更大的絮体^[16]。因此,选择快速搅拌阶段转速为 300 r/min。

由图 1(c)可以看出,当快速搅拌阶段时间从 0.5 min 增加到 2.0 min,SS 去除率先升高后降低,且当时间为 1.0 min 时,SS 去除率达到最高,为

96.1%。这一结果表明,在快速搅拌阶段,转速较大的条件下,搅拌时间过长时细小的絮体容易被打碎,从而影响SS的去除效果。因此,选择快速搅拌阶段时间为1.0 min。

2.2 PAC/PAM 复配投加对混凝沉淀效果的影响

为进一步提高细颗粒悬浮物的去除率,考察了无机混凝剂和有机助凝剂复配投加对混凝沉淀效果的影响。无机混凝剂选择PAC,有机助凝剂选择高分子PAM,包括CPAM、APAM和NPAM 3种,其中分子量均为 1.2×10^7 ,结果如图2所示。



$\rho(SS_0) = 540 \text{ mg/L}; \rho(\text{PAC}) = 50 \text{ mg/L};$
 $n_1 = 300 \text{ r/min}; t_1 = 2 \text{ min}; n_2 = 50 \text{ r/min}; t_2 = 8 \text{ min}; t_3 = 10 \text{ min}$

图2 PAC/PAM 复配投加对混凝沉淀效果的影响
 Fig.2 Effect of PAC/PAM ratio on the efficiency of coagulation and sedimentation

由图2可以看出,当助凝剂投加量从1.0 mg/L增加到5.0 mg/L时,CPAM与APAM对SS去除率先升高后降低,NPAM对SS去除率逐渐提高,去除率由高到低依次为PAC/NPAM(98.3%)、PAC/CPAM(98.0%)、PAC/APAM(97.9%)。阳离子型PAM效果要优于阴离子型,这主要是因为CPAM能够水解产生带有正电荷的基团,除了发挥网捕卷扫作用,还能吸附中和颗粒表面的负电荷。但随着投加量的提高,混凝沉淀效果逐渐变差,这主要是因为CPAM与APAM产生的带电基团增加,使脱稳颗粒出现再稳现象。而NPAM的分子链上没有带电的基团,投加量的增加提高了NPAM的吸附架桥作用,有利于絮体的沉淀^[17]。

2.3 PAC/NPAM 复配投加的正交优化

为了得到混凝沉淀工艺的最优参数,选用“四因素、三水平”正交实验。正交实验设计与结果见表1,其中“四因素”分别为PAC+NPAM的投加量(A)、快速搅拌阶段转速(B)、快速搅拌阶段时间(C)和静置时间(D),响应值(Y)为每组样品的SS

去除率。

表1 正交实验设计与结果

Table 1 Design and results of orthogonal experiment

样品	A/(mg·L ⁻¹) (PAC, NPAM)	B/ (r·min ⁻¹)	C/ min	D/ min	Y/%
1	50, 5.0	100	0.5	5	98.0
2	50, 5.0	200	1.0	10	94.9
3	50, 5.0	300	2.0	20	98.6
4	50, 2.5	100	1.0	20	74.7
5	50, 2.5	200	2.0	5	46.0
6	50, 2.5	300	0.5	10	36.0
7	50, 1.0	100	2.0	10	16.0
8	50, 1.0	200	0.5	20	10.7
9	50, 1.0	300	1.0	5	56.7
k ₁	97.51	50.53	48.22	66.89	—
k ₂	52.22	62.89	75.42	48.98	—
k ₃	27.78	64.09	53.87	61.64	—
R	69.73	13.56	27.20	17.91	—
较好水平	A ₁	B ₃	C ₂	D ₁	—

由表1可以看出,混凝沉淀的最佳工艺参数为:PAC投加量50 mg/L, NPAM投加量5.0 mg/L,快速搅拌阶段时间1 min,快速搅拌阶段转速300 r/min,静置时间5 min,此时SS去除率最高。根据正交实验所得到的最优条件进行实验验证,结果如图3所示。正交实验最优条件下,混凝沉淀后SS的浓度从原水的540 mg/L降低为5.0 mg/L,SS去除率达到99.1%。另外,相比污水处理厂的PAC与PAM的投加量(200 mg/L+10 mg/L),PAC/NPAM的实验复配成本仅为污水处理厂的25%。

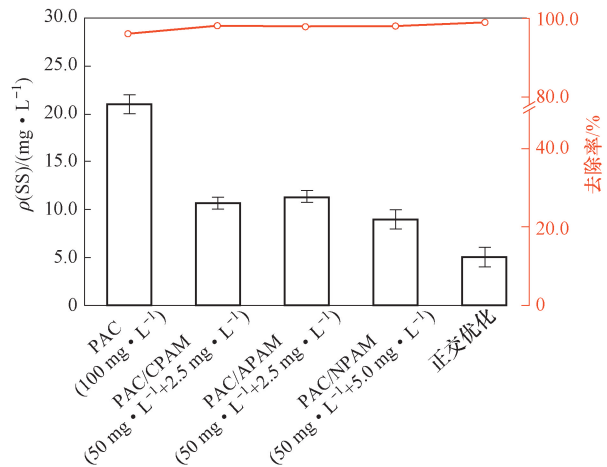


图3 单因素实验与正交实验的混凝沉淀效果对比

Fig.3 Comparison of coagulation and sedimentation efficiency using single factor and orthogonal experiment

2.4 颗粒粒径对混凝沉淀效果的影响

矿井水中颗粒的粒径分布及不同粒径范围的

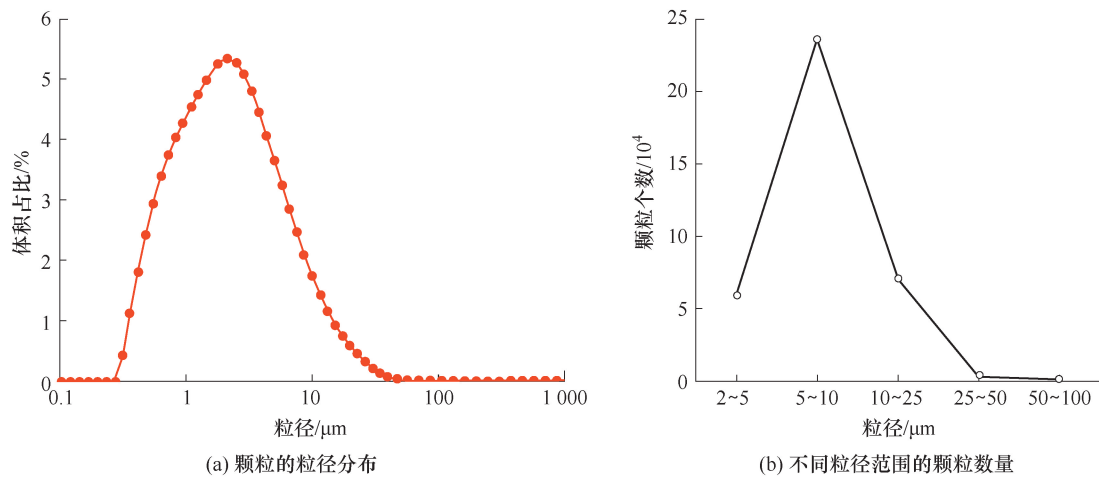


图4 矿井水中不同粒径颗粒的个数与体积占比

Fig. 4 Particle size distribution and counting in mine water

由图4(a)可知,矿井水中粒径为2 μm 颗粒的体积占比最高,为5.3%;2~5 μm 颗粒的体积占比为29.0%;5~10 μm 颗粒的体积占比为25.7%。由图4(b)可知,2~5 μm 的颗粒个数为59 582个,占全部数量的15.3%,5~10 μm 的颗粒个数为236 956个,占全部数量的60.9%。

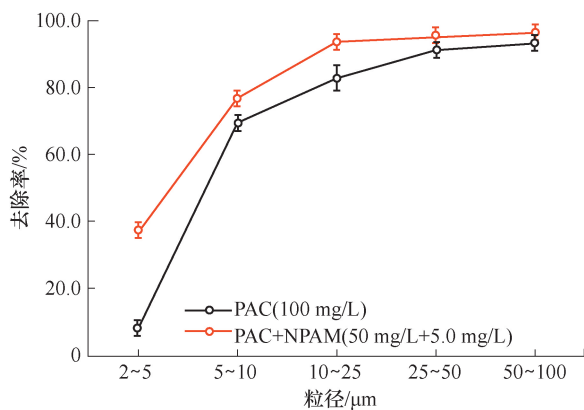


图5 不同混凝剂对不同粒径颗粒物的去除效果

Fig. 5 Removal efficiency of suspended solids with different particle sizes by different coagulants

由图5可以看出,PAC/NPAM的复配投加对不同粒径颗粒的去除率均要高于单独投加PAC。PAC/NPAM复配投加对不同粒径颗粒的去除率依次为37.0%、76.8%、93.6%、94.9%和96.3%。PAC对不同粒径颗粒的去除率依次为8.3%、69.4%、82.7%、91.1%和93.0%。助凝剂的投加使得10 μm 以下的细颗粒物的去除率提高了25.9%。

颗粒数量如图4所示。单独投加PAC和复配投加PAC/NPAM对细颗粒物的去除结果如图5所示。

2.5 ζ 电位对混凝沉淀效果的影响

混凝沉淀不同阶段 ζ 电位的变化情况,包括单独投加PAC时、PAC/NPAM的复配投加时和矿井水处理厂运行时的混凝沉淀不同阶段 ζ 电位的变化,实验结果如图6所示。

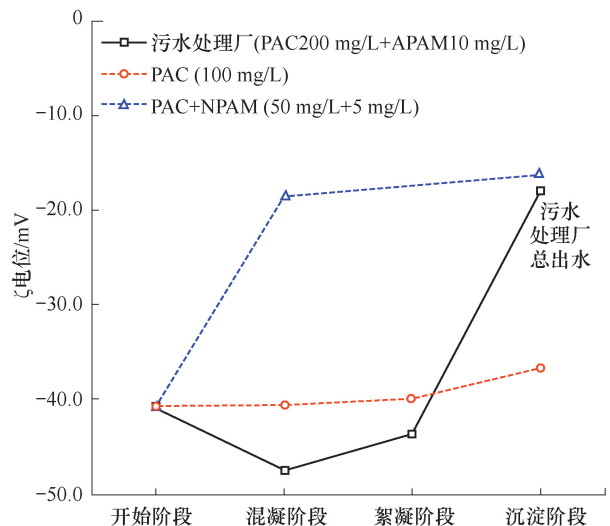


图6 混凝沉淀过程中 ζ 电位的变化

Fig. 6 The ζ potential changes in coagulation experiments

由图6可以看出,单独投加PAC时,随着混凝沉淀的进行, ζ 电位逐渐升高,由原水的-40.7 mV变为-36.7 mV,这一结果主要是因为PAC水解产生的羟基铝离子,通过压缩双电层作用降低矿井水中细颗粒物表面的 ζ 电位,使颗粒脱稳,产生絮体并逐渐沉淀^[18]。

复配投加PAC/NPAM时,随着混凝沉淀的进

行, ζ 电位逐渐升高, 但升高的幅度要远大于单独投加 PAC 时, ζ 电位由原水的 -40.9 mV 变为 -16.3 mV , 这与实际矿坑污水处理厂出水的 ζ 电位 -17.9 mV 接近。这一结果主要是因为 NPAM 通过吸附架桥和网捕卷扫作用, 使一些还未脱稳的颗粒相互联结形成絮体, 与已经形成的絮体迅速凝聚成更大的絮体, 加快了沉淀过程^[19]。

污水处理厂实际运行时, 在混凝阶段 ζ 电位出现了降低的情况, 这可能与过量使用阴离子型的助凝剂有关, 大量的带有负电荷的基团吸附在颗粒表面, 降

低了颗粒表面的 ζ 电位。另外, 由于实际取样的困难, 污水处理厂沉淀阶段的水样实际为经过活性炭过滤灌及消毒罐之后的总出水, 此时 ζ 电位的显著升高, 主要与消毒阶段使用消毒剂有关^[20-22]。

2.6 混凝沉淀的机理分析

矿井水中细颗粒悬浮物的去除主要依靠混凝剂的压缩双电层和吸附电中和作用。助凝剂的复配使用, 能够通过吸附架桥和网捕卷扫作用增强细颗粒悬浮物形成絮体的能力。PAC/PAM 去除悬浮颗粒物的机理如图 7 所示。

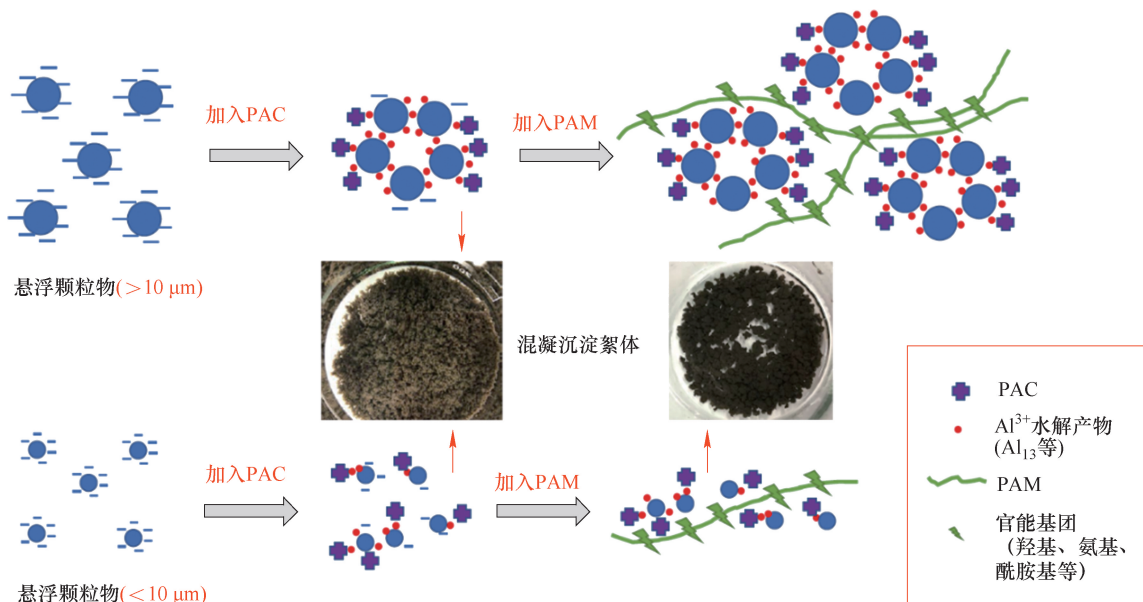


图7 PAC/PAM去除悬浮颗粒物机理示意图

Fig. 7 Removal mechanism of suspended solids using PAC/PAM

对比3种不同混凝剂对SS去除效能发现, PAC对SS去除率要低于PAFC, 说明铁盐的引入有利于SS的去除。PAFC水解产生了铁铝羟基聚合物, 提高了对细颗粒物的吸附电中和能力; 混凝前后 ζ 电位的变化较小, 也说明PAC对颗粒表面负电荷的中和能力有限。

考察3种不同类型助凝剂对SS去除效能的影响, 发现非离子型NPAM的复配投加的效果最好。与单独投加混凝剂相比, NPAM的投加将10 μm以下的颗粒物去除率提高了25.9%。NPAM能够通过所含的非离子型官能基团(羟基、氨基、酰胺基等)与颗粒表面形成氢键, 使颗粒吸附到NPAM的分子链上, 再通过分子链的吸附架桥和网捕卷扫作用形成更大的絮体; NPAM处理矿井水时 ζ 电位变化大, 也是因为NPAM能够将带有电荷的细颗粒物吸附在分子链上, 相比阳离子与阴离子型的PAM更具有适用性。

3 结论

通过混凝沉淀实验方法研究了单独投加混凝剂、PAC/PAM复配投加对混凝沉淀效果的影响; 并对PAC/NPAM复配投加条件进行了正交优化; 分析了颗粒粒径、 ζ 电位对混凝沉淀效果的影响; 最后对混凝沉淀的机理进行了分析。结论如下:

(1) 正交优化后的含细颗粒悬浮物矿井水混凝工艺参数为: PAC投加量为50 mg/L, NPAM投加量为5.0 mg/L, 快速搅拌阶段转速为300 r/min (G 值 = 124.1 s^{-1}), 快速搅拌1 min, 慢速搅拌阶段转速为50 r/min (G 值 = 28.3 s^{-1}), 慢速搅拌8 min, 静置阶段时间为5 min。在正交实验最优条件下, 混凝沉淀后SS的浓度为5.0 mg/L, SS去除率最高达到99.1%。PAC/NPAM的实验复配成本仅为污水处理厂的1/4。

(2) PAC/NPAM复配投加对细颗粒悬浮物的

去除效能优于单独投加 PAC。投加 NPAM 对矿井水中 10 μm 以下的细颗粒悬浮物的去除率相比单独投加 PAC 提高了 25.9%；矿井水中 ζ 电位由 -40.9 mV 降低至 -16.3 mV。

(3) 矿井水中细颗粒悬浮物的去除, 主要是依靠混凝剂的压缩双电层和吸附电中和作用; 助凝剂的复配使用能够通过吸附架桥和网捕卷扫作用, 提高细颗粒悬浮物形成絮体的能力。

参考文献

- [1] 王勇, 吴丽, 王雪冬. 化学混凝法处理阜新矿区矿井水试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 203-208.
WANG Yong, WU Li, WANG Xuedong. Experimental study on chemical coagulation of mine water in Fuxin Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 203-208.
- [2] 景长勇, 张尊举, 雷兆武, 等. 磁混凝沉淀工艺处理煤矿矿井水实验研究[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(10): 79-82, 99.
JING Changyong, ZHANG Zunju, LEI Zhaowu, et al. Experimental study on treatment of coal mine water by magnetic coagulation sedimentation process [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2022, 48(10): 79-82, 99.
- [3] 陈雄山, 樊少武, 马超, 等. 混凝法去除矿井水浊度的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(10): 118-120, 123.
CHEN Xiongshan, FAN Shaowu, MA Chao, et al. Experiment study on coagulation method applied to reduce turbidity of mine water[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(10): 118-120, 123.
- [4] 章丽萍, 吴胜念, 宋学京, 等. 难沉降钨矿选矿废水处理研究[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(6): 687-695.
ZHANG Liping, WU Shengnian, SONG Xuejing, et al. Study on treatment of difficult settling wastewater from tungsten mineral processing[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 5(6): 687-695.
- [5] 李福勤, 贾玉丽, 孟立, 等. 高悬浮物矿井水混凝试验及应用[J]. 能源环境保护, 2016, 30(3): 20-22.
LI Fuqin, JIA Yuli, MENG Li, et al. Coagulation test and application of the high suspended solids mine water[J]. Energy Environmental Protection, 2016, 30(3): 20-22.
- [6] 杨建, 王皓, 王甜甜, 等. 矿井水地下储存过程中典型污染组分去除规律: 以内蒙古敏东一矿为例[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2918-2925.
YANG Jian, WANG Hao, WANG Tiantian, et al. Removal law of typical pollution components during underground storage of mine water; taking Mindong No. 1 Mine Inner Mongolia as an example [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2918-2925.
- [7] WANG Xi, XU Hui, WANG Dongsheng. Mechanism of fluoride removal by AlCl_3 and Al_{13} : The role of aluminum speciation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 398: 122987.
- [8] SUN Cuizhen, QIU Jinwei, ZHANG Zhibin, et al. Coagulation behavior and floc characteristics of a novel composite poly-ferric aluminum chloride-polydimethyl diallylammonium chloride coagulant with different $\text{OH}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{3+})$ molar ratios [J]. Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2016, 74(7): 1636-1643.
- [9] 何绪文, 张晓航, 李福勤, 等. 煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 4-11.
HE Xuwen, ZHANG Xiaohang, LI Fuqin, et al. Comprehensive utilization system and technical innovation of coal mine water resources [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 4-11.
- [10] 郑铭灏, 赵飞, 张净瑞, 等. PAC-PAM 复合絮凝剂处理燃煤电厂脱硫废水的研究 [J]. 现代化工, 2022, 42(5): 178-182.
ZHENG Minghao, ZHAO Fei, ZHANG Jingrui, et al. Study on PAC-PAM compound flocculant for treatment of desulfurization wastewater from coal-fired power plants [J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(5): 178-182.
- [11] 朱阳阳, 金二锁, 宋君龙, 等. 两性聚丙烯酰胺的性质、合成与应用研究进展 [J]. 化工进展, 2015, 34(3): 758-766, 789.
ZHU Yangyang, JIN Ersuo, SONG Junlong, et al. Progress in properties, synthesis and applications of amphoteric polyacrylamide [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(3): 758-766, 789.
- [12] 赵恒, 李望, 牛泽鹏, 等. 赤泥制备聚合氯化铝铁及其吸附性能研究 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(5): 64-68, 82.
ZHAO Heng, LI Wang, NIU Zepeng, et al. Preparation and adsorption properties of polyaluminum ferric chloride from red mud [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2019, 47(5): 64-68, 82.
- [13] 王东升, 安广宇, 刘丽冰, 等. Al_{13} 的分子学及其在环境工程中的应用 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(6): 1565-1584.
WANG Dongsheng, AN Guangyu, LIU Libing, et al. Molecules of Al_{13} and its application in environmental engineering [J]. Chinese Journal of Environmental En-

- gineering,2018,12(6):1565-1584.
- [14] 刘鹏宇,夏传,常青,等. 聚合硫酸铁混凝消除水中有机氯的研究[J]. 中国环境科学,2015,35(8):2382-2392.
- LIU Pengyu,XIA Chuan,CHANG Qing,et al. The removal of OCPs in water by coagulation with poly ferric sulfate[J]. China Environmental Science,2015,35(8):2382-2392.
- [15] 李庭,李井峰,杜文凤,等. 国外矿井水利用现状及特点分析[J]. 煤炭工程,2021,53(1):133-138.
- LI Ting,LI Jingfeng,DU Wenfeng,et al. Current status and characteristics of mine water reuse in foreign countries[J]. Coal Engineering,2021,53(1):133-138.
- [16] 李福勤,豆硕超,高珊珊,等. 多重混凝沉淀处理高悬浮物矿井水试验及应用[J]. 煤炭工程,2023,55(4):102-106.
- LI Fuqin,DOU Shuochao,GAO Shanshan,et al. Experiment and application of multiple coagulation and sedimentation treatment of mine water with high suspended solids[J]. Coal Engineering,2023,55(4):102-106.
- [17] 张海波,陈岚岚,杨艳平,等. 聚丙烯酰胺的合成及应用研究进展[J]. 高分子材料科学与工程,2016,32(8):177-181,190.
- ZHANG Haibo,CHEN Lanlan,YANG Yanping,et al. Progress on synthesis and application of polyacrylamide[J]. Polymer Materials Science & Engineering,2016,32(8):177-181,190.
- [18] WANG Pin,JIAO Ruyuan,LIU Libing,et al. Optimized coagulation pathway of Al_{13} :effect of in situ aggregation of Al_{13} [J]. Chemosphere,2019,230:76-83.
- [19] 韩瑞,吕宪俊,李琳,等. 非离子絮凝剂对微细粒尾矿絮凝沉降的影响[J]. 中国矿业,2016,25(5):97-101.
- HAN Rui,LÜ Xianjun,LI Lin,et al. The impact of non-ionic flocculant on the settling performance of micro-fine tailings[J]. China Mining Magazine,2016,25(5):97-101.
- [20] 文宗. 残留消毒剂对多孔介质中病原体的影响探究[D]. 长春:吉林大学,2022.
- WEN Zong. Study on the effect of residual disinfectant on pathogens in porous media[D]. Changchun:Jilin University,2022.
- [21] 羊丽萍. 预氧化强化混凝处理低温低浊高有机物水库水的效能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- YANG Liping. Efficiency of preoxidation enhanced coagulation of low temperature and low turbidity reservoir water containing high organic matters[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2018.
- [22] 叶淑娟,何占航,洪广峰,等. 化学消毒剂对污水处理系统中游离细菌表面 zeta 电位的影响[J]. 中国消毒学杂志,2006,23(5):415-418.
- YE Shujuan,HE Zhanhang,HONG Guangfeng,et al. Influence of chemical disinfectant on zeta potential of free bacterial surface in sewage treatment system[J]. Chinese Journal of Disinfection,2006,23(5):415-418.

(责任编辑:陈贵仁)