

K_2FeO_4 -PAC-PAM 处理地下水中 高浓度硫酸盐的实验研究

王红旺, 崔建国*, 李红艳, 张峰, 王朝旭, 崔佳丽

(太原理工大学环境科学与工程学院, 山西省市政工程研究生教育创新中心, 山西 晋中 030600)

摘要:以 SO_4^{2-} 的去除率作为考察指标, 在高浓度 SO_4^{2-} 模拟地下水中以不同方式投加高铁酸钾 (K_2FeO_4)、聚合氯化铝 (PAC) 和聚丙烯酰胺 (PAM), 考察不同药剂对 SO_4^{2-} 的去除效果, 并对其去除机理进行了分析。研究结果显示, 对于 SO_4^{2-} 浓度为 1 000 mg/L 的原水, 加入 K_2FeO_4 比单独使用 PAC 和 PAM 处理时去除效果显著提高; K_2FeO_4 -PAC-PAM 复合药剂对 SO_4^{2-} 的去除率可达 46.69%; 并且发现 K_2FeO_4 和 PAC-PAM 的投加顺序也会对 SO_4^{2-} 的去除率产生不同程度的影响。在 K_2FeO_4 -PAC-PAM 复合药剂体系中, K_2FeO_4 起到显著的絮凝协同作用, 从而使高浓度硫酸盐通过强化絮凝作用被去除。

关键词:高浓度硫酸盐; 高铁酸钾; 聚合氯化铝; 聚丙烯酰胺; 地下水

中图分类号: X523

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2020)S-0138-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.S.030

Experimental study on treatment of high concentration sulfates in groundwater by K_2FeO_4 -PAC-PAM

WANG Hong-wang, CUI Jian-guo*, LI Hong-yan, ZHANG Feng, WANG Chao-xu, CUI Jia-li

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Graduate Education Innovation Center of Shanxi Institute of Municipal Engineering, Jinzhong 030600, China)

Abstract: In order to increase effectively the utilization value of groundwater with high sulfates content in water-scarce areas and to provide water quality guarantee for industrial water treatment processes such as reverse osmosis, taking the removal rate of SO_4^{2-} as the investigation index, potassium ferrate (K_2FeO_4), polyaluminium chloride (PAC) and polyacrylamide (PAM) are added in different ways in simulated groundwater with high concentration of SO_4^{2-} to investigate the removal effect of different agents on SO_4^{2-} . Removal mechanism is also analyzed. It is shown that for raw water with a concentration of SO_4^{2-} 1 000 mg·L⁻¹, the removal effect is significantly improved after adding K_2FeO_4 than when using PAC and PAM alone; the removal rate of SO_4^{2-} by K_2FeO_4 -PAC-PAM compound agent can reach 46.69%, in which the adding order among K_2FeO_4 , PAC and PAM will also affect the removal rate of SO_4^{2-} to varying degrees. It is found that in K_2FeO_4 -PAC-PAM compound system, K_2FeO_4 plays a significant flocculation synergy, so that high-concentration sulfate is removed by enhanced flocculation.

Key words: high-concentration sulfates; potassium ferrate (K_2FeO_4); polyaluminum chloride (PAC); polyacrylamide (PAM); groundwater

高硫酸盐地下水普遍存在于我国华北地区, 在严重缺水地区高硫酸盐地下水是工业用水的主要补充水源^[1]。但当饮用水中的 SO_4^{2-} 浓度超过 750 mg/L 时会导致腹泻, 长期饮用则可能导致肠胃功能紊乱, 甚至会提高肝癌发病率^[2-3]。过高浓度的 SO_4^{2-} 还会影响反渗透等工艺设备的高效运行, 因此, 工业水处理中往往必须预先降低部分 SO_4^{2-} 浓度。

目前, 去除水中 SO_4^{2-} 的方法主要有药剂法和生物法^[4-5]、膜分离法与离子交换法^[6]、吸附法^[7]等。

但是各种方法都有它们的局限性: 药剂法去除率低, 添加的 $BaCl_2$ 或 $CaCl_2$ 容易造成二次污染, 而且 $BaCl_2$ 具有很强的毒性; 生物法用水量大、耗能大、处理费用高; 膜分离法具有造价高、耗能高、运行成本高且易受污染等缺点; 离子交换法预处理要求严格, 投资较大, 在定期清洗树脂时不仅需要消耗大量的水资源, 排水不当还易造成二次污染; 吸附法的常规吸附剂对无机阴离子的选择性差, 水中阴离子会与 SO_4^{2-} 产生竞争吸附, 使得吸附效率低下, 而且解

收稿日期: 2020-03-16; 修回日期: 2020-05-29

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目 (201701D121126)

作者简介: 王红旺 (1991-), 男, 硕士生, 研究方向为环境污染控制与修复, chao99699@163.com; 崔建国 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向为环境污染控制与修复, 通讯联系人, afh2005@163.com。

析出来的废液也容易造成二次污染。因此寻找高效、经济、环保的SO₄²⁻去除方法仍然是目前水处理研究的热点和难点。

多年来,混凝沉淀技术由于操作步骤简单、成本低且基本不会造成二次污染而得到广泛应用。对于高浓度的SO₄²⁻地下水,预处理程度要求较高,仅仅使用聚合氯化铝(PAC)-聚丙烯酰胺(PAM)混凝沉淀通常达不到预期效果。而高铁酸钾(K₂FeO₄)作为一种集絮凝助凝于一体的绿色高效水处理剂^[8-10],在水处理方面已经得到了有效性证实^[11]。本文针对某企业高硫酸盐地下水(SO₄²⁻浓度为1 000 mg/L),以满足企业现有反渗透系统进水要求(SO₄²⁻浓度小于550 mg/L)为目标,研究利用K₂FeO₄-PAC-PAM去除SO₄²⁻效果,探索高效经济的新型高硫酸盐水预处理药剂体系。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

K₂FeO₄(质量分数为92%)、PAC、PAM、K₂SO₄、NaOH、浓盐酸、乙酸、氨水、氯化钙、铬酸钡、乙醇等药品全部为分析纯,所需配制的溶液全部由Millipore Milli-Q超纯水系统配制。

HJ-6A六联数显控温磁力搅拌器;752N紫外-可见分光光度计;JY 0002电子天平;STP FA2004天平;FE28 pH计;DHG-9070B智能型电热恒温鼓风干燥箱。

1.2 原水水质

配制SO₄²⁻浓度为1 000 mg/L的原水作为模拟高硫酸盐地下水,考察处理后的水质能否满足后序反渗透系统的进水水质要求(SO₄²⁻浓度小于550 mg/L)。

1.3 实验方法

构建使用K₂FeO₄、PAC-PAM、K₂FeO₄-PAC-PAM以及PAC-PAM-K₂FeO₄4个去除SO₄²⁻的实验。在室温下对原溶液进行絮凝-静置-过滤实验,过滤后提取处理好的上清液,测定滤液中残留SO₄²⁻的含量。

以上每组实验在相同条件下分别做3次,所得实验数据的标准偏差均小于5%,该实验有良好的重复性。

1.4 分析方法

采用铬酸钡分光光度法(冷法)来测量分析,使用紫外-可见分光光度计测定残留在滤液中的SO₄²⁻

含量。

2 结果与讨论

2.1 K₂FeO₄对去除SO₄²⁻的影响

室温下取100 mL原水移至150 mL锥形瓶中,pH调节为11.5,投加一定量的K₂FeO₄,以250 r/min快速搅拌5 min,再以80 r/min慢速搅拌絮凝反应25 min,静置沉降30 min后用移液管提取上清液,测定残留在滤液中的SO₄²⁻含量。SO₄²⁻的去除效果如图1所示。

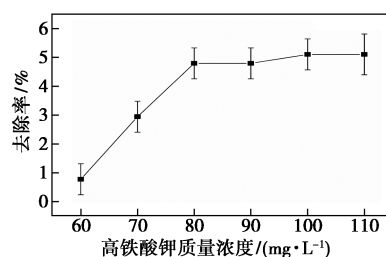


图1 K₂FeO₄质量浓度对SO₄²⁻去除率的影响

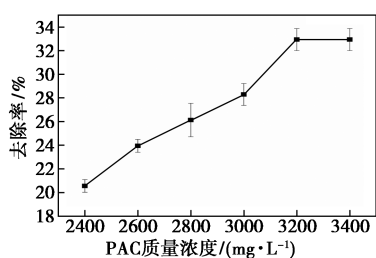
图1显示,单独投加K₂FeO₄时对SO₄²⁻的去除效果不佳,去除率范围为0.77%~5.1%。当K₂FeO₄质量浓度为60 mg/L时,SO₄²⁻去除率仅为0.77%;随着K₂FeO₄质量浓度的增加,SO₄²⁻去除率有一定程度的增加;当K₂FeO₄超过一定质量浓度后,SO₄²⁻去除率趋于平缓。这是由于K₂FeO₄在pH=11.5的强碱性溶液中会水解产生Fe⁵⁺和Fe⁴⁺等^[12-13]高价态铁离子,这些中间态高电荷水解产物有着强大的网状结构,对离子有一定的网捕作用,而且K₂FeO₄最终会形成具有较强吸附能力的Fe(OH)₃胶体^[14-15],当K₂FeO₄质量浓度增大时,形成的Fe(OH)₃胶体也逐渐增多,使絮凝作用得到加强,因此SO₄²⁻的去除率有一定的增加。然而,由于水中没有还原性物质,靠水解而生成的Fe(OH)₃有限,所以其对SO₄²⁻的去除率很低,而且Fe(OH)₃胶体对SO₄²⁻的吸附很快达到平衡,加之水解作用随着K₂FeO₄质量浓度的增加而减弱,因而SO₄²⁻的去除率也随着K₂FeO₄投加量的增加而趋于平缓。

2.2 PAC-PAM对去除SO₄²⁻的影响

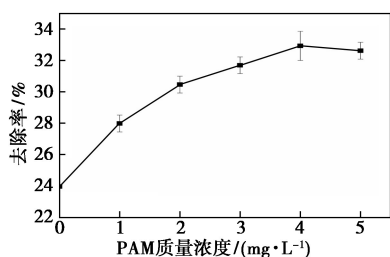
常温下,在150 mL锥形瓶中加入100 mL原水,调节原水pH至11.5,先加入一定量的PAC,待PAC和原溶液混合均匀时再加入PAM溶液助凝,然后以250 r/min快速搅拌5 min,再以80 r/min慢速搅拌絮凝反应25 min,静置沉降30 min后用移液管提取

上清液,测定残留在滤液中的 SO_4^{2-} 含量。

在 pH 为 11.5、PAM 质量浓度为 4 mg/L、PAC 质量浓度为 2 400~3 400 mg/L 的条件下, SO_4^{2-} 的去除率如图 2(a) 所示。在 pH 为 11.5、PAC 质量浓度为 3 200 mg/L、PAM 质量浓度为 0~5 mg/L 的条件下, SO_4^{2-} 的去除率如图 2(b) 所示。



(a) PAC 质量浓度对 SO_4^{2-} 去除率的影响



(b) PAM 质量浓度对 SO_4^{2-} 去除率的影响

图 2 PAC-PAM 质量浓度对 SO_4^{2-} 去除率的影响

从图 2 中可以看出,在使用 PAC 絮凝和 PAM 助凝时,对 SO_4^{2-} 的去除率影响比较大。如图 2(a) 所示,在 PAM 固定不变的情况下,PAC 对 SO_4^{2-} 的去除率的变化范围为 20.56%~32.93%,随着 PAC 质量浓度的增加,对 SO_4^{2-} 的去除率不断增大,当 PAC 的质量浓度超过 3 200 mg/L 时,对 SO_4^{2-} 的去除率趋于平缓。这是由于 PAC 在水解过程中产生 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 凝胶,对 SO_4^{2-} 具有吸附沉降的作用,同时 PAC 会水解产生吸附架桥作用,从而促使 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 形成较大的絮体,使可溶性物质和悬浮物等得以沉降^[16]。当投加的 PAC 较少时,水解产生的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 凝胶较少,形成较小的絮体或者根本无法形成絮体, SO_4^{2-} 去除率较低;当 PAC 加入量增大时,形成的絮体也会变大,提高了 SO_4^{2-} 的去除率;但当 PAC 投加量超出一定范围时,溶液中絮体和絮凝剂所带的电荷持平,使絮体难以沉降,导致对 SO_4^{2-} 的去除效果减弱^[17-18]。

从图 2(b) 中可以看出,在 PAC 固定不变的情况下,PAM 对 SO_4^{2-} 的去除率变化范围为 23.96%~32.93%。当 PAM 质量浓度增加时,对 SO_4^{2-} 的去除效果明显提升,这是由于 PAM 在胶体表面可以产生

强烈的吸附作用,同时在胶粒之间形成桥联,因此有效提高了对污染物的去除率。但当 PAM 投加量超出一定范围时, SO_4^{2-} 去除率反而下降,这主要是因为 PAM 在水中产生吸附桥联作用,当投加量过多时,多个高分子链会把胶体团团围住,使胶体没有多余的部分去吸附其他高分子链,形成了无吸附能力的稳定颗粒^[19],从而降低了对 SO_4^{2-} 的去除率。所以,PAC 和 PAM 都有一个最佳投加量,使 SO_4^{2-} 的去除率达到最高,过高或过低的投加量都会影响处理效果。

2.3 K_2FeO_4 -PAC-PAM 复合体系对去除 SO_4^{2-} 的影响

常温下,在 150 mL 锥形瓶中加入 100 mL 原水,调节原水 pH 至 11.5,投加一定量的 K_2FeO_4 溶液,充分摇匀,先加入 PAC 絮凝,再加入 PAM 溶液助凝,以 250 r/min 快速搅拌 5 min,再以 80 r/min 慢速搅拌絮凝反应 25 min,静置沉降 30 min 后用移液管提取上清液,测定残留在滤液中的 SO_4^{2-} 含量。

在 pH 11.5、PAC 质量浓度为 3 200 mg/L、PAM 质量浓度为 4 mg/L、 K_2FeO_4 质量浓度为 60~110 mg/L 的条件下, SO_4^{2-} 的去除效果如图 3(a) 所示。在 pH 为 11.5、 K_2FeO_4 质量浓度为 80 mg/L、PAM 质量浓度为 4 mg/L、PAC 质量浓度为 2 400~3 400 mg/L 的条件下, SO_4^{2-} 的去除效果如图 3(b) 所示。在 pH 为 11.5、 K_2FeO_4 质量浓度为 80 mg/L、PAC 质量浓度为 3 200 mg/L,改变 PAM 质量浓度为 0~5 mg/L 的条件下, SO_4^{2-} 的去除效果如图 3(c) 所示。

如图 3 所示,在 PAC 和 PAM 絮凝前投加 K_2FeO_4 对 SO_4^{2-} 的去除率变化范围为 40.04%~46.69%,与上述实验中单独使用 K_2FeO_4 和 PAC-PAM 相比, K_2FeO_4 -PAC-PAM 复合絮凝对 SO_4^{2-} 的去除率显著提高。复合体系对 SO_4^{2-} 的去除率比单独使用 K_2FeO_4 提高了近 10 倍,比 PAC-PAM 提高了约 42%。由此可知, K_2FeO_4 与 PAC-PAM 的协同絮凝作用对 SO_4^{2-} 的去除效果显著。

如图 3(a) 所示,随着 K_2FeO_4 投加量的增加, SO_4^{2-} 的去除率先逐渐增大后趋于平缓,可见, K_2FeO_4 的加入对 PAC-PAM 絮凝去除 SO_4^{2-} 有一定的促进作用。原因为:一是 K_2FeO_4 在 pH=11.5 强碱性条件下溶于水后会水解出活性较高、具有网状结构的 Fe^{5+} 和 Fe^{4+} ,这些中间态高电荷产物对 SO_4^{2-} 具有网捕作用,而且可压缩并电中和溶液中的胶态

杂质扩散层^[20], 最终的 K_2FeO_4 还会还原成 $Fe(OH)_3$ 胶体, 这对水中 SO_4^{2-} 的去除都有着积极作用; 二是强氧化性的 K_2FeO_4 可与 PAM 发生氧化还原反应, 最终 K_2FeO_4 被还原后生成大量的 $Fe(OH)_3$ 胶体, $Fe(OH)_3$ 胶体具有絮凝和吸附两种作用, 并可通过吸附溶液中形成的絮体或较小的颗粒杂质来增强自身的沉降性能, 达到进一步去除 SO_4^{2-} 的目的; 三是 K_2FeO_4 产生的具有网状结构的中间态高电荷产物和 PAC-PAM 相结合产生絮体, 形成比单独使用 PAC-PAM 更大的絮体, 絮凝效果得以强化, 絮体沉降性提高, 从而提高污染物的去除率。

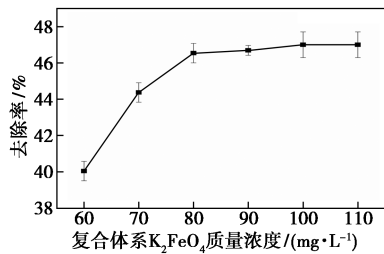
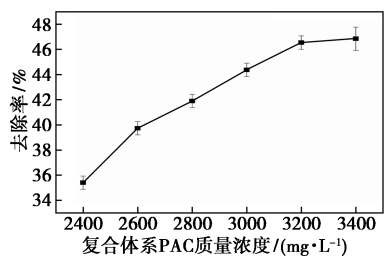
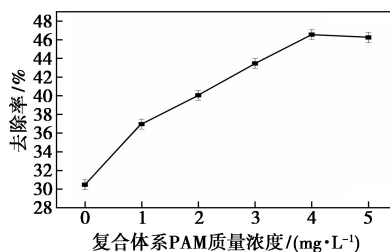
(a) K_2FeO_4 质量浓度对 SO_4^{2-} 去除率的影响(b) PAC 质量浓度对 SO_4^{2-} 去除率的影响(c) PAM 质量浓度对 SO_4^{2-} 去除率的影响

图3 K_2FeO_4 -PAC-PAM 复合体系对 SO_4^{2-} 去除率的影响

如图3(b)所示, 在一定范围内, 当 PAC 的投加量增加时, SO_4^{2-} 的去除率也会相应提高。PAC 和 PAM 也会对 K_2FeO_4 的絮凝效果起到强化作用, 以提高溶液中污染物的去除率。

如图3(c)所示, 当 K_2FeO_4 和 PAC 浓度一定时, 随着 PAM 投加量的增大, SO_4^{2-} 的去除率呈先大幅增加后略微减小的趋势, 当 PAM 质量浓度为

4 mg/L 时, 对 SO_4^{2-} 的去除效果最好。

综上所述, K_2FeO_4 -PAC-PAM 复合絮凝体系对水中 SO_4^{2-} 的处理效果更佳。

2.4 改变 K_2FeO_4 与 PAC-PAM 投加顺序对去除 SO_4^{2-} 的影响

通过改变 K_2FeO_4 与 PAC-PAM 的投加顺序来探讨其对 K_2FeO_4 与 PAC-PAM 之间协同作用的影响。在 pH 为 11.5、PAC 质量浓度为 3 200 mg/L、PAM 质量浓度为 4 mg/L、 K_2FeO_4 质量浓度为 60~110 mg/L 的条件下, 以 250 r/min 快速搅拌 5 min, 再以 80 r/min 慢速搅拌絮凝反应 25 min, 静置沉降 30 min 后用移液管提取上清液, SO_4^{2-} 的去除效果如图4所示。

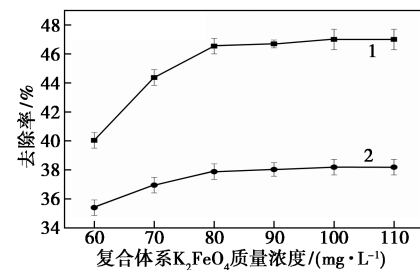
1—先加 K_2FeO_4 ; 2—后加 K_2FeO_4

图4 K_2FeO_4 与 PAC-PAM 投加顺序对 SO_4^{2-} 去除率的影响

图4显示, K_2FeO_4 与 PAC-PAM 的投加顺序对 SO_4^{2-} 的去除有明显影响。后加 K_2FeO_4 时 K_2FeO_4 -PAC-PAM 复合絮凝体系对 SO_4^{2-} 的去除率变化范围为 35.4%~38.19%, 明显高于单独投加 K_2FeO_4 和组合使用 PAC-PAM 的效果。而先投加 K_2FeO_4 再加入 PAC-PAM 对 SO_4^{2-} 的去除率更高。原因有3点: 一是先投加 K_2FeO_4 时, 在 pH 为 11.5 的强碱性环境下, K_2FeO_4 稳定性相对较好, K_2FeO_4 由 Fe^{6+} 还原为 Fe^{3+} 的过程中会产生具有网捕作用的中间态高电荷水解产物以及生成具有很强絮凝吸附能力的 $Fe(OH)_3$ 胶体; 二是产生的高正价态的网状结构水解产物能有效压缩并电中和溶液中的胶态杂质扩散层, 从而使水中的 SO_4^{2-} 更易被去除; 三是 K_2FeO_4 产生的具有网状结构的中间态高电荷产物和 PAC-PAM 相结合产生絮体, 发生协同絮凝作用, 形成的絮体比只投加 PAC-PAM 时更大, 加强了絮凝效果, 使 SO_4^{2-} 的去除率得到进一步提高。而后投加 K_2FeO_4 对 SO_4^{2-} 的去除效果相对较低, 主要原因有两方面: 一是先加入 PAC-PAM 会使溶液的 pH 降

低,而 K_2FeO_4 在较低 pH 溶液中不易生成网状结构的 Fe^{5+} 和 Fe^{4+} ;二是 PAM 具有还原性,极易和具有强氧化性的 K_2FeO_4 反应生成 $Fe(OH)_3$ 胶体,同样不易生成具有网状结构的 Fe^{5+} 和 Fe^{4+} ,协同絮凝效果相对较弱,从而使 SO_4^{2-} 的去除率降低。

综上所述,在 K_2FeO_4 与 PAC-PAM 混合絮凝体系中,先加入 K_2FeO_4 比先加入 PAC-PAM 对水中 SO_4^{2-} 的去除效果更好。

3 结论

(1) K_2FeO_4 -PAC-PAM 复合絮凝体系在去除水中 SO_4^{2-} 时, K_2FeO_4 的作用有两个,一是自身还原的产物具有絮凝吸附效果,二是对 PAC-PAM 絮凝起到协同作用。

(2) K_2FeO_4 -PAC-PAM 复合絮凝体系能有效提高水中 SO_4^{2-} 的去除效果, K_2FeO_4 、PAC 以及 PAM 质量浓度的不同会对去除率产生影响, K_2FeO_4 质量浓度为 80 mg/L、PAC 质量浓度为 3 200 mg/L 以及 PAM 投加量为 4 mg/L 时去除率最佳,达到 46.69%。

(3) K_2FeO_4 -PAC-PAM 复合絮凝体系按先加 K_2FeO_4 后加 PAC-PAM 的顺序去除 SO_4^{2-} 效果最好,处理后的 SO_4^{2-} 质量浓度可以满足后序反渗透系统的进水要求;同时也说明 K_2FeO_4 对 PAC-PAM 存在协同絮凝作用。

参考文献

- [1] 王熹,王湛,杨文涛,等.中国水资源现状及其未来发展方向展望[J].环境工程,2014,32(7):1-5.
- [2] 董建忠,刘杏媚,万小英.沙县饮用水水质与居民死因的相关性研究[J].环境与健康杂志,2001,18(6):375-376.
- [3] Sheikholeslami R, Al-Mutaz I S, Tan S, et al. Some aspects of silica polymerization and fouling and its pretreatment by sodium aluminate, lime and soda ash[J]. Desalination, 2002, 150(2): 85-92.
- [4] McCauley C A, O'Sullivan A D, Milke M W, et al. Sulfate and metal removal in bioreactors treating acid mine drainage dominated with iron and aluminum[J]. Water Res, 2009, 43(4): 961-970.
- [5] Özdemir M, Cetişli H. Sulfate removal from alunitic kaolin by chemical method[J]. Ind Eng Chem Res, 2005, 44(9): 3213-3219.
- [6] 刘伟源. A400 和 D301 离子交换树脂去除饮用水中硫酸盐的比較研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 2013.
- [7] 刘桂荣, 廖立兵. 柱撑蒙脱石吸附水中硫酸根离子的实验研究[J]. 矿物学报, 2001, 21(3): 470-472.
- [8] Liu G M, Jia X, Jia F A. Oxidation treatment of phenol contaminated soil using potassium ferrate (K_2FeO_4) [J]. Advanced Materials Research, 2013, 800(2): 98-102.
- [9] 赵胜勇, 刘菲. 高铁酸钾氧化处理水中苯酚的研究[J]. 工业用水与废水, 2016, 47(1): 25-27.
- [10] Sharma V K, Zboril R, Varma R S. Ferrates: Greener oxidants with multimodal action in water treatment technologies [J]. Acc Chem Res, 2015, 48(2): 182-191.
- [11] Jiang J Q, Panagouloupoulos A, Bauer M, et al. The application of potassium ferrate for sewage treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2006, 79(2): 215-220.
- [12] 潘萌. Fe^{6+}/Fe^{3+} 固定剂对土壤中 Cu^{2+} 吸附性能影响的实验研究[D]. 太原: 太原理工大学环境科学与工程学院, 2015.
- [13] 韩琦, 董文艺. 新型高效水处理剂高铁酸钾的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(12): 200-205.
- [14] Li W, Yu N, Liu Q, et al. Enhancement of the sludge disintegration and nutrients release by a treatment with potassium ferrate combined with an ultrasonic process [J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 699-704.
- [15] Pallier V, Feuillade-Cathalifaud G, Serpaud B, et al. Effect of organic matter on arsenic removal during coagulation/flocculation treatment [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 342(1): 26-32.
- [16] Zhang Z, Jing R, Shuran H E, et al. Coagulation of low temperature and low turbidity water: Adjusting basicity of poly aluminum chloride (PAC) and using chitosan as coagulant aid [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 206: 131-139.
- [17] Zhang P, Wu Z, Zhang G, et al. Coagulation characteristics of poly aluminum chlorides PAC-Al 30 on humic acid removal from water [J]. Separation and Purification Technology, 2008, 63(3): 642-647.
- [18] 张新妍, 崔建国, 李红艳, 等. K_2FeO_4 -PAC-PAM 同时去除污水中氨氮、总磷和 COD_{Cr} 的研究 [J]. 应用化工, 2019, 48(10): 2358-2362.
- [19] 商平, 刘涛利, 孔祥军. PAC 与 PFS 复合混凝沉淀法预处理垃圾渗滤液 [J]. 中国给水排水, 2011, 27(1): 65-67.
- [20] 马维超. 高铁酸盐去除水中双酚 A 和磷酸盐的效能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 2011. ■

欢迎浏览《现代化工》网站 <http://www.xdhg.com.cn>