



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)

煤炭加工与环保



移动扫码阅读

李彦,李光柱,樊林栋,等.高铁酸钾氧化法对焦化废水中煤颗粒的氧化沉降性能研究[J].煤炭科学技术, 2021,49(7):192-196. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.07.026

LI Yan, LI Guangzhu, FAN Lindong, *et al.* Study on oxidation flocculation property of coal particles in coking wastewater by potassium ferrate oxidation process[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7): 192-196. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.07.026

高铁酸钾氧化法对焦化废水中煤颗粒的氧化沉降性能研究

李彦¹,李光柱¹,樊林栋¹,胡培源¹,王艺霏²,段志辉³,李亚男³

(1.中核新能核工业工程有限责任公司,山西太原 030012;2.太原理工大学建筑设计研究院,山西太原 030024;

3.太原理工大学环境科学与工程学院,山西太原 030024)

摘要:焦化废水中的污染物主要由浓度高、粒径小、密度较小、带少量负电荷的碳颗粒物和浓度高、组成复杂、有毒、难降解的有机化合物组成,现有的各种处理工艺很难有效去除这些物质,达到国家一级标准。基于焦化废水无机物和有机物复合污染的特征,利用高铁酸盐的强氧化性和其反应产物铁盐的絮凝性,协同处理含高浓度悬浮态煤颗粒物和溶解态有机化合物的焦化废水,以期为进一步研发焦化废水氧化处理技术提供重要理论依据。选取表面 Zeta 电位指标来反映煤颗粒物的沉降性能,通过测定不同条件下的煤颗粒表面的 Zeta 电位,研究高铁酸钾对煤颗粒的氧化絮凝和沉降效果,考察 pH、Fe(VI)投加量、溶液中无机阳离子浓度及价态对高铁酸钾氧化煤颗粒的影响,并考察高铁酸钾对实际焦化废水中化学需氧量和悬浮物的协同处理效果。结果表明,煤颗粒表面带负电,溶液 pH 越低,煤颗粒沉降性能越好。高铁酸钾的投加对降低煤颗粒表面 Zeta 电位绝对值有一些效果,并且当溶液偏中性时,效果最明显。无机阳离子可在煤颗粒物表面产生压缩双电层,从而降低颗粒表面的 Zeta 电位绝对值,提高颗粒物的沉降效果。实际焦化废水水样中的铬化学需氧量、悬浮物的去除率随 Fe(VI)投加量的增加呈现上升趋势。当 Fe(VI)投加量为 2 mmol/L 时,实际焦化废水中悬浮物去除率已达到 65.44%。可见,高铁酸盐氧化法对实际焦化废水中颗粒物的氧化絮凝效果良好。

关键词:高铁酸钾氧化法;焦化废水;氧化沉降性能;有机污染物

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)07-0192-05

Study on oxidation flocculation property of coal particles in coking wastewater by potassium ferrate oxidation process

LI Yan¹, LI Guangzhu¹, FAN Lindong¹, HU Peiyuan¹, WANG Yifei², DUAN Zhihui³, LI Yanan³

(1. CNNC Xinneng Nuclear Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030012, China; 2. The Institute of Architectural Design and Research of Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. School of Environment Science and Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The pollutants from coking wastewater are mainly coal particles with high concentration, small size, lighter weight and taking a small amount of negative charge, and toxic and refractory organic compounds with high concentration and complex composition. Various existing wastewater treatment processes are difficult to effectively remove these contaminants to meet the national standard. Based on the characteristics of combined pollution of inorganic and organic compounds, The dual role of strong oxidation and coagulation of ferrate(VI) salts is developed to degrade the high concentrations of suspended coking coal particles and dissolved organic matter from coking wastewater, so as to provide an important theoretical basis for the further development of coking wastewater treatment technology. The surface zeta potential was selected to reflect the sedimentation performance of coal particles. By measuring the zeta potential under different conditions, the effect of potassium ferrate oxidation on the flocculation and sedimentation of coal particles was studied. The influence of

收稿日期:2020-10-02;责任编辑:郭鑫

基金项目:山西省基础研究计划资助项目(2015021119,201801D121267);山西省高等学校科技创新资助项目(201802026)

作者简介:李彦(1977—),女,山西五台人,高级工程师,硕士。E-mail: 15003407418@126.com

通讯作者:李亚男(1983—),女,山西吕梁人,副教授,博士。E-mail: yanan88191@163.com

pH、Fe(VI) dosage and inorganic salts on the oxidation process were investigated, and the purification effect of ferrate(VI) process on the oxidation flocculation of actual coking wastewater was evaluated. The results show that the surface of coal particles was negatively charged, and the lower the pH value of the solution, the closer the Zeta potential on the surface of coal particles approached zero and the better the settlement of coal particles. The addition of ferrate(VI) has some effect on reducing the absolute value of Zeta potential on the surface of coal particles, and the effect is most obvious when the solution is neutral. Inorganic cations can compress the double electric layers on the surface of coal particles, thus reducing the absolute Zeta potential and improving the settlement of coal particles. The removal rates of COD_{Cr} and SS in actual coking wastewater samples increased with the increase of Fe(VI) dosage. When Fe(VI) dosage is 2 mmol/L, the actual removal rate of SS in coking wastewater has reached 65.44%, indicating that the flocculation effect of high ferrate process on particulate matter in coking wastewater is good.

Key words: potassium ferrate Oxidation; coking wastewater; oxidation flocculation property; organic contaminants

0 引 言

我国煤储量大,焦炭总产量约为 4.7 亿 t/a^[1],居世界领先水平。煤焦行业在生产过程中带来了严重的环境问题,其中废水污染尤为突出。一方面,废水排放量大,年排放量约占工业废水总排放量的 5%^[2]。另一方面,废水构成复杂。焦化废水中不仅含有浓度高、粒径小、密度较小、带少量负电荷的碳颗粒物,还含有浓度高、组成复杂、有毒、难降解的有机化合物,和氨、氟化物、硫氰化物、氰化物等无机化合物^[3-4]。其中,碳颗粒主要来源于湿法洗煤工艺产生的煤泥水。目前,煤泥水的处理方法主要有微波法、电絮凝法、重力、气浮浓缩法、加药法等。这些方法各有优点,但存在能耗较高、占地面积大、效率低、实际应用性能差等缺点^[5-9]。研究表明,颗粒物的沉降性能不仅受到其本身性质的影响,而且在很大程度上也会受到环境因素,如 pH、温度、硬度等的影响^[10-11]。要达到较为理想的絮凝效果,不能只靠阳离子的中和作用或絮凝剂的絮凝作用,当两者结合时,悬浮的颗粒物质才能有效地絮凝^[12]。焦化废水中有机污染物的处理方法主要有吸附法、电解法、化学氧化法、高级氧化法、微生物法等。这些方法也各有优点,但存在处理成本较高、二次污染^[13],电极材料少、寿命短、能耗大^[14],可能产生一些副产物^[15],O₃溶解度小,Fenton 受 pH 影响大^[16],有效微生物低,出水水质易波动,污泥处理成本较高等^[17-18]问题。

高铁酸盐 Fe(VI) 是强氧化剂,其氧化化合物生成的最终还原产物为 Fe(III),具有絮凝作用^[19]。利用 Fe(VI) 处理焦化废水,可达到有机污染物的氧化降解和煤颗粒物的絮凝沉降双重效果^[20]。DLVO 理论表明,煤颗粒物表面的 Zeta 电位能反映其沉降性能,该值越接近于 0 mV,颗粒物质越容易絮凝沉降。因此,研究选取表面 Zeta 电位指标来反映煤颗粒物的沉降性能,通过测定不

同条件下的 Zeta 电位,研究高铁酸钾氧化法对煤颗粒的氧化絮凝和沉降效果,考察 pH、Fe(VI) 投加量、无机盐离子对高铁酸钾氧化煤颗粒的影响,以及高铁酸钾对实际焦化废水的氧化絮凝效果,以期为实际焦化废水中悬浮态碳颗粒物和有机污染物的协同处理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

试验所用试剂主要有高铁酸钾(纯度大于 97%)、甲醇(液相色谱级)、硫酸亚铁、亚硫酸钠、氢氧化钠、盐酸、硼砂、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠(分析纯),试验用水为超纯水。试验用煤为山西清徐某焦化厂的生产用煤。煤颗粒表面 Zeta 电位的测定采用 Zeta 电位仪,pH 调节采用 pH 计,温度调节采用数显恒温磁力搅拌水浴锅。

1.2 试验方法

1.2.1 煤颗粒制备及溶液配制

煤颗粒制备:采集太原某焦化厂煤块,用粉碎机将煤块打成粉末,过 200 目筛(74 μm),最终得到煤颗粒粒径小于 74 μm。高铁酸钾储备液:称取 0.019 8 g 的高铁酸钾溶于硼砂-盐酸缓冲溶液(pH=9)中,并用该缓冲液定容至 100 mL,得到 0.001 mol/L 的 Fe(VI) 储备液,于 4 ℃ 冷藏保存不超过 24 h。无机盐溶液配制:NaCl、CaCl₂、MgCl₂ 溶液的配制均以磷酸盐缓冲溶液作为溶剂。

1.2.2 试验方法

采用单因素试验分别考察 pH 对高铁酸钾氧化煤颗粒的影响、K₂FeO₄ 投加量对煤颗粒表面 Zeta 电位的影响以及无机盐离子对高铁酸钾氧化煤颗粒的影响,每组试验重复 3 次。pH 对高铁酸钾氧化煤颗粒的影响:控制温度为 25 ℃,煤颗粒物质量浓度为 50 g/L,Fe(VI) 投加量为 1 mmol/L,分别调节 pH 为 3.6、4.5、5、6、7,静置 1 h,取上清液,测定煤颗粒表面的 Zeta 电位。Fe(VI) 投加量对高铁酸钾氧化煤

颗粒的影响:控制温度为 25 ℃,煤颗粒物浓度为 50 g/L,调节 pH 为 5,Fe(VI)投加量分别为 0、0.0003、0.0005、0.001、0.002、0.003 mol/L,静置 1 h,取上清液,测定煤颗粒表面的 Zeta 电位。无机盐离子对高铁酸钾氧化煤颗粒的影响:控制温度为 25 ℃,煤颗粒物质量浓度为 50 g/L,调节 pH 为 5,Fe(VI)投加量为 0.0005 mol/L,加入无机盐 NaCl、CaCl₂或 MgCl₂(投加量分别为 0.001、0.002、0.003、0.004 mol/L),静置 1 h,取上清液,测定煤颗粒表面的 Zeta 电位。高铁酸钾投加量对焦化废水氧化絮凝效果的影响:采集太原某焦化厂原水,控制温度为 25 ℃,pH 为 7.13(焦化废水的 pH),Fe(VI)投加量分别为 0.002、0.004、0.006、0.008、0.01 mol/L,反应 40 s,反应终止后静置 1 h,取上清液测定化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)等水质指标。其中,COD、SS 测定参照《水和废水监测分析方法》(第四版)进行。

2 结果与分析

2.1 煤颗粒表面性质

将制备得到的煤颗粒进行 X 射线衍射(图 1)分析以确定煤颗粒表面的基本性质。由图 1 可知,煤颗粒中含有多种物质,包括碳(C₆₀、C₇₀、C)、二硝酰胺铵、硝酸脲、钴(主要存在形式为碳化钴、氮化钴、单质钴)。煤颗粒表面含有各种易发生化学反应的官能团,决定了其电负性。使用红外光谱分析法来进一步探索煤颗粒表面官能团类型,如图 2 所示。可见,煤颗粒表面主要含有羟基(OH)、醛基(CHO)、双键(C=C)等易于发生氧化反应的官能团。

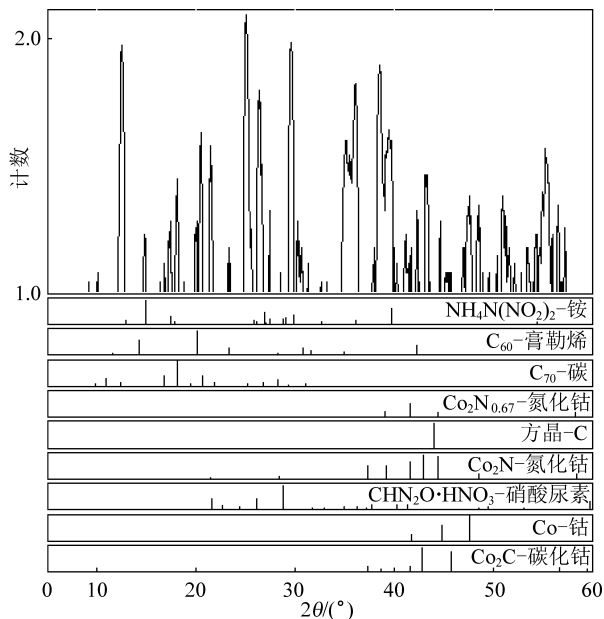


图 1 煤颗粒表面 X 射线衍射结果

Fig.1 X-ray diffraction results of coal particle surface

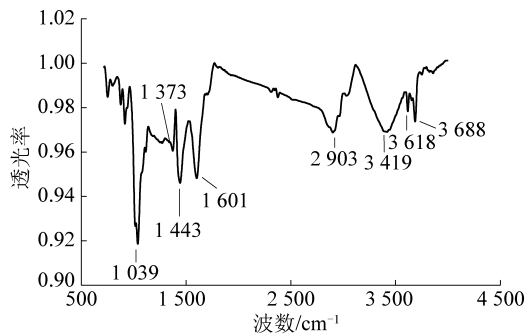


图 2 煤颗粒表面红外光谱分析

Fig.2 Surface infrared spectrum analysis of coal particles

2.2 pH 对高铁酸钾氧化煤颗粒的影响

设置未投加 Fe(VI)和投加 Fe(VI)2 个试验组,来研究煤颗粒表面 Zeta 电位随 pH 的变化情况,如图 3 所示。由图 3 可知,煤颗粒表面带负电,且电负性随 pH 的升高而增加。pH 越低,Zeta 电位越趋于零。随着 pH 的增加,Zeta 电位不断增大但逐渐趋于平缓,这与毕梅芳等^[21]的研究结果一致。这主要是因为 pH 的变化引起了煤颗粒物表面基团的变化。在低 pH 条件下,水溶液中的氢离子会与煤颗粒物表面的带负电基团发生中和反应(如煤颗粒表面的游离羟基易得电子而成为 OH⁻),煤颗粒表面电负性降低。而在较高 pH 条件下,较多的 OH⁻会使颗粒表面电负性增加。根据 DLVO 理论,Zeta 电位的绝对值越大,颗粒间的斥力越大,絮凝和沉降越困难。因此,在本试验中,pH 越低,煤颗粒的絮凝沉降效果越好。

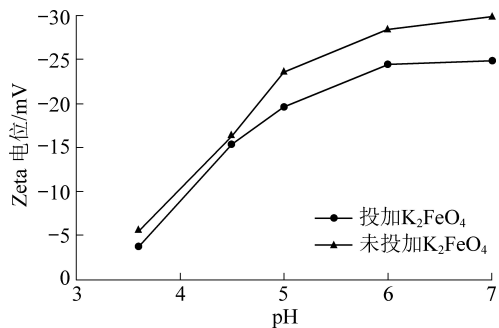


图 3 煤颗粒表面 Zeta 电位随 pH 的变化

Fig.3 Variation of Zeta potential on surface of coal particles with pH

图 3 还表明,Fe(VI)的加入在一定程度上可降低煤颗粒表面的 Zeta 电位绝对值。当溶液 pH 为 6~7 时,Fe(VI)的氧化效果最为明显;而当溶液 pH 为 3.6~4.5 时(酸性条件下),Fe(VI)的氧化效果较为一般。在低 pH 条件下,Fe(VI)的氧化还原电位 ORP 较高,稳定性较差,使其未能及时与煤颗粒发生氧化反应而发生自分解产生 Fe(III)^[22]。此时,还原产物 Fe(III)的网捕作用占主导。因此,溶液上

清液中煤颗粒表面的 Zeta 电位变化不明显。当 pH 在 6~7 时,高铁酸钾的稳定性较酸性条件有所增强,与煤颗粒较充分接触,氧化其表面的负电基团,从而降低颗粒表面的电负性。

2.3 Fe(VI)投加量对高铁酸钾氧化煤颗粒的影响

图 4 为煤颗粒表面 Zeta 电位随 Fe(VI)投加量的变化情况。可见,煤颗粒表面 Zeta 电位随 Fe(VI)投加量的增加呈现出先降低后升高的趋势。Zeta 电位绝对值的最低值(Fe(VI)投加量为 0.0005 mol/L)为 15.76 mV,而最高值(Fe(VI)投加量为 0.0003 mol/L)为 24.92 mV,比未投加 Fe(VI)时高 2.31 mV,此时溶液的 pH 值较未投加 Fe(VI)时高 0.13。Fe(VI)的大量投加可导致溶液碱性增加,而 Zeta 电位的绝对值又会随溶液 pH 的升高而增大。因此,当 Fe(VI)的用量增加时,pH 会增加,虽然变化幅度不大,但煤颗粒表面 Zeta 电位对 pH 变化的敏感性增大了 Zeta 电位的绝对值。

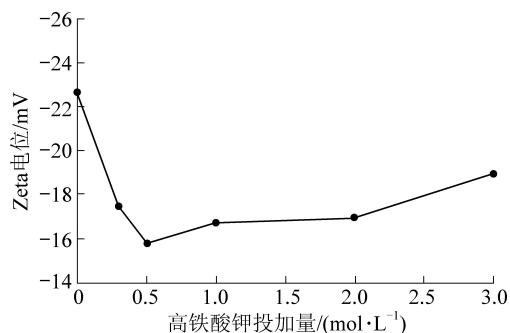


图 4 煤颗粒表面 Zeta 电位随 Fe(VI)投加量的变化

Fig.4 Variation of Zeta potential on surface of coal particles with Fe(VI) dosage

2.4 无机盐离子对高铁酸钾氧化煤颗粒的影响

溶液中无机盐离子浓度会对煤颗粒凝聚性产生影响,因此,研究不同浓度、不同价态无机盐离子(Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})对高铁酸钾氧化煤颗粒的影响,如图 5 所示。在试验浓度范围内,随着 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 含量的增加,经 Fe(VI)氧化后煤颗粒的表面 Zeta 电位值趋于零。可见,高价无机阳离子可以通过静电吸引进入颗粒表面,取代其表面的低价阳离子,并压缩双电层。溶液中存在的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 越多,Zeta 电位越接近零,溶液氧化沉降后的上清液也越澄清。然而,溶液中过量的无机阳离子会使煤颗粒表面的 Zeta 电位由负值变为正值。此时,颗粒间以静电斥力为主,絮凝沉降性能变差。

此外,无机阳离子的价态越高,对 Zeta 电位的影响作用越大。例如,当加入 0.002 mol/L 的 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 后,煤颗粒表面的 Zeta 电位绝对值由 15.76 mV 分别降至 14.47、7.67 和 7.00 mV。 Na^+ 、

Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的加入不仅会对煤颗粒表面产生压缩双电层作用,而且在相同投加量下,二价阳离子的压缩双电层作用要强于一价阳离子的。

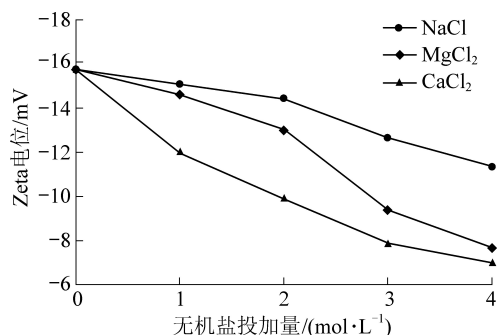
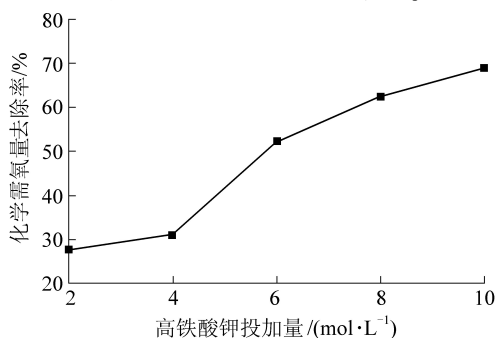


图 5 Fe(VI)氧化煤颗粒后颗粒表面 Zeta 电位与溶液中阳离子的关系

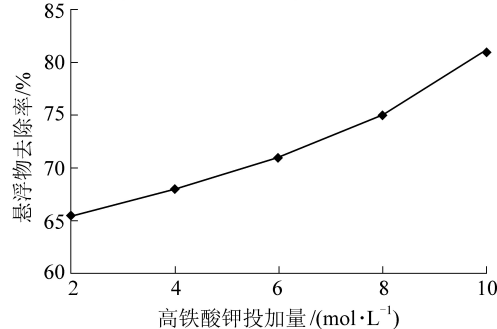
Fig.5 Relationship between Zeta potential on surface of Fe(VI) oxidized coal particles and cations in solution

2.5 Fe(VI)投加量对氧化絮凝效果的影响

以山西某焦化厂的生产废水为研究对象,考察 Fe(VI)投加量对该焦化废水处理效果的影响,验证高铁酸盐氧化法对实际焦化废水中煤颗粒的氧化絮凝效果。该焦化废水原水的 pH 为 7.13,氨氮为 28.4 mg/L, COD_{Cr} 为 768 mg/L,SS 为 10.6 mg/L。图 6 为不同 Fe(VI)投加量对实际焦化废水中 COD 和 SS 的处理效果。



(a) 化学需氧量随 Fe(VI)投加量变化



(b) 悬浮物随 Fe(VI)投加量

图 6 废水水质指标随 Fe(VI)投加量的变化

Fig.6 Change of wastewater quality index with Fe(VI) dosage

可见,随着 Fe(VI)投加量的增加,焦化废水水样中的 COD_{Cr} 、SS 的去除率呈现上升趋势。当 Fe(VI)投加量为 0.002 mol/L 时,SS 去除率已达到

65.44%。可见,低浓度的 Fe(VI) 即可对实际焦化废水中悬浮物有较好的氧化絮凝效果。

3 结 论

1) 溶液 pH 变化对煤颗粒表面 Zeta 电位的影响非常明显,pH 越低,Zeta 电位越趋于零,煤颗粒的沉降效果越好。

2) Fe(VI) 的加入在一定程度上可降低煤颗粒表面的 Zeta 电位绝对值。当溶液 pH 为 6~7 时, Fe(VI) 对煤颗粒的氧化效果最为明显。

3) 无机阳离子可通过压缩双电层的作用,降低煤颗粒表面的 Zeta 电位绝对值,改善煤颗粒的氧化絮凝沉降性能。

4) 实际焦化废水水样中的 COD_{Cr} 、SS 的去除率随着 Fe(VI) 投加量的增加呈现上升趋势。当 Fe(VI) 投加量为 0.002 mol/L 时,实际焦化废水中 SS 去除率已达到 65.44%。

参考文献(References):

- [1] LI J, JING W, SUN H, *et al.* Advanced treatment of biologically treated coking wastewater by membrane distillation coupled with pre-coagulation[J]. *Desalination*, 2016, 380: 43–51.
- [2] ZHAO J L, JIANG Y X, YAN B, *et al.* Multispecies acute toxicity evaluation of waste waters from different treatment stages in a coking wastewater – treatment plant [J]. *Environ Toxicol Chem*, 2014, 33(9): 1967–1975.
- [3] 邢林林, 张景志, 姜安平, 等. 焦化废水深度处理技术综述[J]. *工业水处理*, 2017, 37(2): 1–6; 55.
XIN Linlin, ZHANG Jingzhi, JIANG Anping, *et al.* Summary on the advanced treatment technology of coking wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, 37(2): 1–6; 55.
- [4] 黄源凯, 韦朝海, 吴超飞, 等. 焦化废水污染指标的相关性分析[J]. *环境化学*, 2015(9): 1661–1670.
HUANG Yuankai, WEI Chaohai, WU Chaofei, *et al.* The correlation analysis of pollution indexes in coking waste water[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(9): 1661–1670.
- [5] 杨延军. 我国选煤厂煤泥水处理技术现状与发展方向[J]. *山东煤炭科技*, 2018, (2): 171–173.
YANG YanJun. The current situation and development direction of coal slime water treatment in coal preparation plant in China[J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2018, (2): 171–173.
- [6] 张建成, 刘利波. 混凝剂在选煤厂煤泥水处理中的应用及机理研究[J]. *中国煤炭*, 2018, 44(1): 89–93.
ZHANG Jiancheng, LIU Libo. Mechanism study and application on coagulant of coal slurry treatment in coal preparation plant [J]. *China Coal*, 2018, 44(1): 89–93.
- [7] 王卫东, 李 昭, 严 蕾, 等. 微波辐照改变煤泥水沉降过滤性能的机理[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(S2): 503–507.
WANG Weidong, LI Zhao, YAN Lei, *et al.* Separating characteristics of coal and water with microwave irradiation preprocessing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(S2): 503–507.
- [8] 林 喆, 杨 超, 沈正义, 等. 高泥化煤泥水的性质及其沉降特

性[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(2): 312–315.

LIN Zhe, YANG Chao, SHEN Zhengyi, *et al.* The properties and sedimentation characteristics of extremely sliming coal slime water [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(2): 312–315.

[9] 李复明, 陈启构, 胡达清. 应用竖流式浓缩池降低脱硫废水含固率的实践明[J]. *浙江电力*, 2011(10): 53–55.

LI Fuming, CHEN Qigou, HU Daqing. Application of vertical flow concentration tank to reduction of solid content in desulphurization waste water[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2011(10): 53–55.

[10] KAI L C, MENACHEM E. Influence of humic acid on the aggregation kinetics of fullerene (C_{60}) nanoparticles in monovalent and divalent electrolyte solutions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 309: 126–134.

[11] MENG Zhiyong, HASHMI Sara M, ELIMELECH Menachem. Aggregation rate and fractal dimension of fullerene nanoparticles via simultaneous multiangle static and dynamic light scattering measurement [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 392: 27–33.

[12] 周晓朋, 李 怡, 李艳坤, 等. 基于 Zeta 电位分析的滨海淤泥质吹填土泥浆絮凝试验研究[J]. *水道港口*, 2015, 36(1): 65–71.

ZHOU Xiaopeng, LI Yi, LI Yankun, *et al.* Flocculation experiment study of muddy dredger fill in seaside on zeta potential [J]. *Journal of Waterway And Harbor*, 2015, 36(1): 65–71.

[13] BHATNAGAR A, SILLANPAA M. Removal of natural organic matter (NOM) and its constituents from water by adsorption: a review[J]. *Chemosphere*, 2017, 166: 497–510.

[14] MOUSSET E, HUGUENOT D, VAN HULLEBUSCH E D, *et al.* Impact of electrochemical treatment of soil washing solution on PAH degradation efficiency and soil respirometry [J]. *Environ Pollut*, 2016, 211(6): 354.

[15] RUBIO CLEMENTE A, TORRESPALMA R A, PENUELA G A. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous environment by chemical treatments: a review[J]. *Science and Total Environment*, 2014, 478(8): 201–225.

[16] CHENG M, ZENG G, HUANG D, *et al.* Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: a review[J]. *Chem Eng J*, 2016, 284: 582–598.

[17] MORETTI C J, NEUFELD R D. PAH partitioning mechanisms with activated sludge[J]. *Water Res*, 1989, 23(1): 93–102.

[18] LI J, LUO C, ZHANG D, *et al.* Autochthonous bioaugmentation modified bacterial diversity of phenanthrene degraders in PAH-contaminated wastewater as revealed by DNA-stable isotope probing[J]. *Environ Sci Technol*, 2018, 52(5): 2934–2944.

[19] JIANG J Q. Advances in the development and application of ferrate (VI) for water and wastewater treatment[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2014, 89: 165–177.

[20] SONG Y R, MA J W. Oxidation of inorganic contaminants by ferrates (VI): a review[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 361–363: 662–665.

[21] 毕梅芳, 王怀法, 余 萍. 煤泥水溶液化学环境对絮凝效果影响的研究[J]. *洁净煤技术*, 2009, 15(3): 24–26.

BI Meifang, WANG Huaifa, YU Ping. Study on the effect of slime solution chemical circumstance on flocculation [J]. *Clean Coal Technology*, 2009, 15(3): 24–26.

[22] LAKSONO F B, KIM I K. Study on 4-bromophenol degradation using wet oxidation in-situ liquid ferrate (VI) in the aqueous phase[J]. *Desalination & Water Treatment*, 2017, 58: 391–398.