

活性氧化铝去除煤化工废水氟化物的性能研究

王吉坤, 李 阳, 刘 敏, 李文博

(煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013)

摘要:为使活性氧化铝更广泛应用于煤化工废水除氟领域,并保证出水氟化物需满足 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类水体要求(水氟化物含量降至 ≤ 1 mg/L),研究了活性氧化铝对煤化工废水除氟性能的影响。选用 1~2 mm 活性氧化铝开展连续除氟试验,研究了活性氧化铝装填量、进水 pH、吸附时间及停留时间对除氟率的影响,获得出水氟含量降至 ≤ 1 mg/L 的最佳试验条件;在最佳工艺条件下对活性氧化铝进行实用性考察;并研究了活性氧化铝除氟的反应动力学。结果表明:活性氧化铝装填量越大,除氟率越大,出水氟化物含量越小,活性氧化铝装填量 ≥ 60 g 时连续吸附 40 h 后出水氟化物含量仍可维持 ≤ 1 mg/L;pH 越小,除氟率越大,当 pH ≤ 6 时连续吸附 40 h 后出水氟化物含量仍可维持 ≤ 1 mg/L;吸附时间越长除氟率越低,吸附时间 ≤ 45 h 时,出水氟化物含量 ≤ 1 mg/L,吸附时间 >45 h 时,出水氟化物含量 >1 mg/L;停留时间越长,除氟率越高,当停留时间 6~8 min 时连续吸附 40 h 后出水氟化物含量均 ≤ 1 mg/L。当活性氧化铝装填量为 60 g,进水 pH ≤ 6 ,停留时间 6~8 min,吸附时间 ≤ 45 h 时,出水氟化物含量可保持在 ≤ 1 mg/L;除氟后的活性氧化铝采用硫酸铝再生后重复试验,出水氟含量仍维持在 1 mg/L 以下,说明活性氧化铝对煤化工废水除氟具有很好的实际应用性;活性氧化铝除氟的反应动力学方程为一级反应,氟含量为 3 mg/L 时吸附效果最好。

关键词:活性氧化铝;煤化工废水;除氟;氟化物;工艺条件;反应动力学

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2020)06-0077-06

Research on removal performance of fluoride from coal chemical wastewater by activated alumina

WANG Jikun, LI Yang, LIU Min, LI Wenbo

(China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to make activated alumina more widely used in the field of coal chemical wastewater defluorination, and ensure that the fluoride of effluent could meet the requirements of class III water body in GB 3838—2002 environmental quality standard for surface water (the fluoride in the effluent is reduced to ≤ 1 mg/L). The experimental effect of activated alumina on the fluoride removal performance of coal chemical wastewater was studied. The continuous defluorination experiment of activated alumina with particle size of 1~2 mm was carried out. The effects of the dosage, pH value of influent, residence time and adsorption time of activated alumina on the defluorination rate were studied to obtain the best experimental conditions for the fluorine content of coal chemical wastewater effluent to be less than or equal to 1mg/L. The "practicality" of activated alumina was investigated under the best technological conditions. Finally, the reaction kinetics of activated alumina for removing fluorine was studied. The experimental results show that the larger the activated alumina loading is, the greater the fluoride removal rate is, and the lower the fluoride content in the effluent is. When the loading amount of activated alumina is ≥ 60 g, the fluoride content in the effluent can still be maintained at ≤ 1 mg/L after 40 h of continuous adsorption; The smaller pH is, the greater the fluoride removal rate is. When the pH is ≤ 6 , the fluoride content in the effluent can still be maintained at ≤ 1 mg/L after 40 h of continuous adsorption; The longer the adsorption time is, the lower the fluoride removal rate is. When the adsorption

收稿日期:2020-07-08;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.EP20070802

基金项目:政府间国际科技创新合作重点专项资助项目(2019YFE0103300)

作者简介:王吉坤(1989—),男,山东聊城人,助理研究员,研究方向为煤矿矿井水及煤化工废水处理。E-mail:304336935@qq.com。通讯作者:李阳,工程师,研究方向为煤化工及废水处理。E-mail:574941209@qq.com

引用格式:王吉坤,李阳,刘敏,等.活性氧化铝去除煤化工废水氟化物的性能研究[J].洁净煤技术,2020,26(6):77-82.

WANG Jikun, LI Yang, LIU Min, et al. Research on removal performance of fluoride from coal chemical wastewater by activated alumina[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 77-82.



移动阅读

time is ≤ 45 h, the effluent fluoride content is less than or equal to 1 mg/L and when the adsorption time is more than 45 h, the content of fluoride in the effluent is more than 1 mg/L; The longer the residence time is, the higher the fluoride removal rate is. When the residence time is 6–8 min, the effluent will be continuously adsorbed after 40 h, and the fluoride content is ≤ 1 mg/L. When the activated alumina loading is 60 g, the influent pH is ≤ 6 , the residence time is 6–8 min, and the adsorption time is ≤ 45 h, the fluorine content of the outlet water can be kept at ≤ 1 mg/L. The activated alumina after defluorination is regenerated with aluminum sulfate and the experiment is repeated, the effluent fluorine content is still well maintained below 1 mg/L, indicating active oxidation aluminum has a good "practical application" for removing fluoride from coal chemical wastewater. At the same time, the reaction kinetic equation of activated alumina to remove fluoride is a first-order reaction, and the adsorption effect is best when the fluorine content is 3 mg/L.

Key words: activated alumina; coal chemical wastewater; fluoride removal; fluoride; process conditions; reaction kinetics

0 引言

氟是人体所需微量元素之一,但氟过量会引发氟中毒。近年来,水中氟化物含量超标导致氟中毒的事件屡见不鲜。氟含量超标带来的人体健康问题受到重视^[1-5]。世界卫生组织(World Health Organization)规定饮用水中氟化物含量控制在 0.5 ~ 1.5 mg/L^[6]时对人体身体有益;GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》规定饮用水中氟化物的浓度限值为 1.0 mg/L。

水中氟化物的去除方法有沉淀法^[7]、电化学法^[8-9]、膜分离法^[10]、吸附法^[11-14]等。沉淀法是采用钙盐(如氧化钙、氢氧化钙、氯化钙、石灰等)与水中的氟离子形成沉淀除氟,适合处理氟含量过高的煤化工废水,出水氟化物含量可降至 5 mg/L,无法进一步降低;袁西鑫等^[15]研究了混凝沉淀法去除煤化工废水源中的氟,但在煤化工废水处理过程中加入了新的化学药剂,会对煤化工废水产生二次污染。电化学法包括电吸附法、电渗析法、电絮凝法。3种方法均采用电化学原理去除水中的氟化物,操作简单方便,但设备昂贵、管理复杂、能耗较大,限制了其在煤化工废水除氟领域的应用,而适用于饮用水的深度除氟领域。膜分离在除氟领域的方法主要包括反渗透法和纳滤法。膜分离法不仅能很好地去除水中氟化物,还能有效分离控制水中其他有机物、微生物及细菌等,但膜易发生污染及堵塞,导致膜通量下降,寿命变短,限制了其在煤化工废水除氟领域的应用。张威等^[16]采用反渗透技术去除地下水中氟,反渗透除氟效率虽高,但设备投资、建设成本等过高,导致反渗透在煤化工废水除氟领域应用较少。

相比上述方法,吸附法在目前饮用水除氟领域应用最广。吸附法具有吸附效率高、运行费用低、操作简单、占地面积小等优点。常用吸附剂有沸石、活性氧化铝、活性氧化镁、稀土金属氧化物、骨炭、离子交换树脂等。张滢等^[17]采用铝基吸附剂去除饮用水中氟,但铝基吸附剂是将活性组分加入活性氧化

铝上,吸附效率虽高,但铝基吸附剂会导致活性组分磨损进入饮用水源中,增加二次污染。吸附法在煤化工废水除氟领域中研究较少。

由于目前鲜见活性氧化铝去除煤化工废水中氟化物相关研究,因此笔者以山西某煤化工废水为试验水样,以煤炭科学技术研究院有限公司合成的活性氧化铝为吸附剂开展除氟试验研究,开发高效的除氟工艺条件。分析不同工艺条件对除氟率的影响,优化确定最佳工艺条件,最后对活性氧化铝去除煤化工废水中氟化物的实际应用性进行考察,以期工程设计提供参考和借鉴。

1 试验

1.1 主要仪器与试剂

仪器:氟化物测定仪、氟化物吸附装置、pH计、分析天平。

试剂:工业 1~2 mm 活性氧化铝、硫酸(AR)、硫酸铝(AR)、氟化物测定试剂。

试验用活性氧化铝是煤炭科学技术研究院有限公司自主合成产品。活性氧化铝物性参数为:粒径 1~2 mm,比表面积 275 m²/g,孔容 0.48 cm³/g,堆积密度 0.68 g/cm³。

1.2 原水水质

试验采用山西某煤化工废水,水质指标见表 1。

表 1 水质指标分析

Table 1 Analysis of water quality indicators

水质指标	含量	水质指标	含量
pH	8.26	BOD 含量/(mg · L ⁻¹)	20.3
COD 含量/(mg · L ⁻¹)	57	硫化物含量/(mg · L ⁻¹)	0.03
氟化物含量/(mg · L ⁻¹)	2.54	硫酸盐含量/(mg · L ⁻¹)	124
石油类含量/(mg · L ⁻¹)	13.6	六价铬含量/(mg · L ⁻¹)	<0.004
SS 含量/(mg · L ⁻¹)	34	氯化物含量/(mg · L ⁻¹)	88
挥发酚含量/(mg · L ⁻¹)	2.9	锰含量/(mg · L ⁻¹)	0.03

由表 1 可知,废水中氟化物含量为 2.54 mg/L,远超 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》规定出

水氟化物 ≤ 1 mg/L的要求,需进行活性氧化铝除氟试验,将氟化物降至 ≤ 1 mg/L。

1.3 试验方法

1)考察不同反应条件(活性氧化铝加入量、停留时间、pH、吸附时间)对除氟率的影响规律,确定煤化工废水出水氟化物降至 ≤ 1 mg/L时最佳工艺条件。

2)最佳试验条件下,考察活性氧化铝去除煤化工废水氟化物的实际应用性。

1.4 试验装置及处理流程

氟化物吸附装置如图1所示,吸附柱由有机玻璃制成,柱内径20 mm,高度500 mm,有效容积 157 cm^3 ,填充体积 85 cm^3 。柱内装有活性氧化铝,通过计量泵将水样由储液罐送至吸附柱顶部,通过反应柱出水阀门控制停留时间,除氟后出水从反应柱底部流出。进出水氟含量采用氟含量测定仪测定。

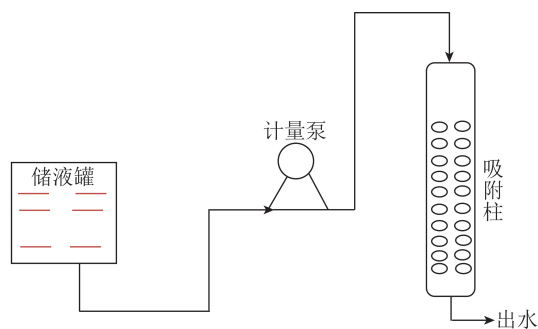


图1 吸附除氟装置

Fig.1 Adsorption defluorination device

2 结果与讨论

2.1 活性氧化铝加入量对氟化物去除率的影响

活性氧化铝加入量对煤化工废水氟化物去除率的影响显著。氧化铝加入量越大,氟化物去除率越高,但会增加吸附剂成本和除氟成本。考虑煤化工废水氟化物去除率及活性氧化铝加入成本,有必要研究活性氧化铝加入量对煤化工废水除氟率的影响规律。停留时间6 min,将煤化工废水pH调至6。活性氧化铝加入量分别为20、40、60、80、100 g。开展连续除氟试验40 h,每5 h采集水样检测水中氟化物含量,结果如图2所示。

由图2可知,活性氧化铝装填量越大,除氟率越大,出水氟化物含量越小,维持出水氟含量 ≤ 1 mg/L的吸附时间越长。连续开展吸附试验40 h,活性氧化铝装填量 ≤ 60 g的出水氟含量 ≥ 1 mg/L,活性氧化铝装填量 ≥ 60 g的出水氟含量仍维持 ≤ 1 mg/L。氧化铝短时间除氟时,氟离子与氧化铝表面具有高

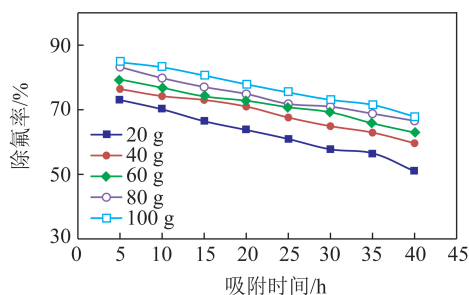


图2 活性氧化铝装填量对除氟率的影响

Fig.2 Effect of activated alumina filling dosage on the fluoride removal rate

结合能的活性点位迅速结合,从而除氟迅速升高并达到吸附饱和;但装填量继续增加时高结合能的活性位点数下降,低结合能活性位点数增多并占据主导,且氧化铝的增加导致颗粒间碰撞机会增加,从而不利于吸附。

综上,除氟率随活性氧化铝装填量的增加而提高,并在较长时间内出水氟化物含量可维持 ≤ 1 mg/L,但装填量增加导致吸附成本增加。考虑煤化工废水氟化物去除率及活性氧化铝加入成本,活性氧化铝装填量选择60 g。

2.2 pH值对氟化物去除率的影响

活性氧化铝加入量60 g,停留时间6 min,将煤化工废水pH分别调至5.0、5.5、6.0、6.5、7.0时,开展连续除氟试验40 h,每5 h采集水样检测水中氟化物含量,考察pH对煤化工废水氟化物去除率的影响,结果如图3所示。

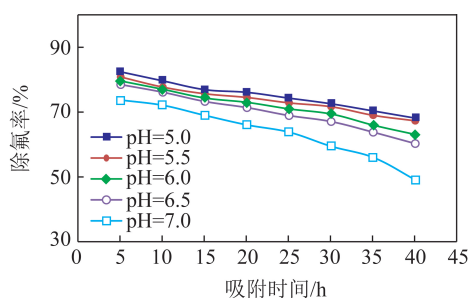


图3 pH对除氟率的影响

Fig.3 Effect of pH on the fluoride removal rate

由图3可知,pH越小,除氟率越大;维持出水氟含量 ≤ 1 mg/L的吸附时间越长。连续开展吸附试验40 h,pH ≥ 6 的出水氟含量 ≥ 1 mg/L,pH ≤ 6 的出水氟含量仍维持 ≤ 1 mg/L。酸性条件下的氧化铝带正电荷,对氟离子吸附能力较强;而碱性条件下,水中氢氧根离子与氟离子的离子半径相近,互相竞争活性位点,产生同离子抑制效应,同时正电荷数量减少,对氟离子吸附能力减弱,从而导致除氟率降低。

综上,活性氧化铝除氟率随pH降低而增加,但

pH 过低会增加酸的成本。考虑煤化工废水氟化物去除率及硫酸加入成本,实际除氟工艺选择硫酸调节进水 $\text{pH} \leq 6$ 。

2.3 吸附时间对氟化物去除率的影响

活性氧化铝加入量为 60 g,停留时间 6 min,将煤化工废水 pH 调至 6,开展连续除氟试验 60 h,每 5 h 采集水样检测水中氟化物含量,考察吸附时间对煤化工废水氟化物去除率的影响,结果如图 4 所示。

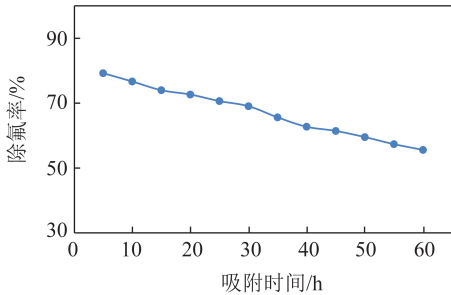


图4 吸附时间对除氟率的影响

Fig.4 Effect of adsorption time on the fluoride removal rate

由图 4 可知,吸附时间越长除氟率越低。吸附时间 ≤ 45 h 时,出水氟化含量 ≤ 1 mg/L,吸附时间 >45 h 时,出水氟含量 >1 mg/L。试验进水氟含量虽不变,但活性氧化铝的活性位点数却随吸附时间的延长而减少,导致氟化物缺少被吸附的“空间”,从而除氟率降低。

综上,活性氧化铝除氟率随吸附时间的增长而降低。考虑煤化工废水氟化物去除率及运行成本,实际除氟工艺吸附时间达 45 h 后需对活性氧化铝再生处理。

2.4 停留时间对氟化物去除率的影响

活性氧化铝加入量 40 g,将煤化工废水 pH 调至 6,通过反应柱出水口阀门控制停留时间为 2、4、6、8 min,开展连续除氟试验 40 h,每 5 h 采集水样检测水中氟化物含量,考察停留时间对煤化工废水氟化物去除率的影响,结果如图 5 所示。

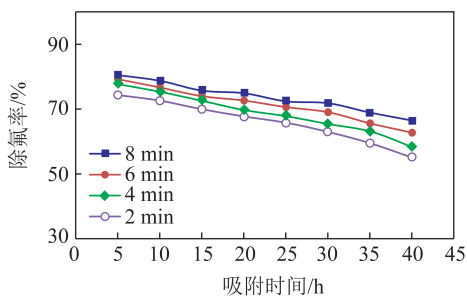


图5 停留时间对除氟率的影响

Fig.5 Effect of residence time on the fluoride removal rate

由图 5 可知,停留时间越长,除氟率越高。开展

连续吸附试验 40 h,停留时间 6、8 min 时,出水氟含量均 ≤ 1 mg/L,停留时间为 2、4 min 时,出水氟含量均 >1 mg/L。停留时间长,流速越慢,氟离子与活性氧化铝的接触传质时间越长,除氟率越高。

综上,活性氧化铝的除氟率随停留时间的延长而升高。考虑煤化工废水氟化物去除率及运行成本,实际除氟工艺停留时间应控制在 6~8 min。

3 活性氧化铝除氟实用性效果

采用 1~2 mm 活性氧化铝在最佳试验条件下(活性氧化铝装填量 60 g,进水 $\text{pH} \leq 6$,停留时间 6 min)开展连续除氟试验,吸附时间 45 h,吸附后对活性氧化铝采用 1%~2% 的硫酸铝溶液进行再生处理,再生后的催化剂重新开展吸附试验,试验条件不变。每次试验均在吸附 45 h 后取样测定水中氟化物含量。共计再生 10 次,考察活性氧化铝最佳除氟效果,结果如图 6 所示。

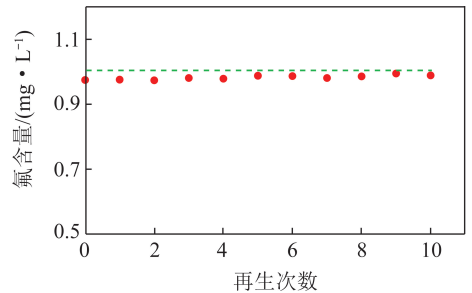


图6 再生次数对出水氟含量的影响

Fig.6 Effect of regeneration times on fluoride content in effluent

由图 6 可知,在最佳试验条件下,采用 1~2 mm 活性氧化铝开展连续除氟试验,每次试验 45 h,除氟后的活性氧化铝采用硫酸铝再生后重复进行试验,出水氟含量仍在 1 mg/L 以下。说明采用活性氧化铝对煤化工废水除氟具有很好的“实际应用性”。

4 反应动力学分析

对氟含量 2、3、4、5 mg/L 的模拟水样开展吸附试验,研究吸附反应动力学。装填量 60 g,进水 $\text{pH} \leq 6$,停留时间 6 min。每 1 h 采集出水检测氟含量,吸附时间 5 h,结果见表 2。

根据表 2 做 $\ln C-t$ (浓度对数与吸附时间关系)图,吸附除氟的动力学如图 7 所示。根据图 7,不同初始浓度的反应动力学方程见表 3。

由图 7 可知,不同初始氟含量下, $\ln C-t$ 呈线性相关,即活性氧化铝除氟为一级反应。由表 3 可知,氟含量为 3 mg/L 的表观速率常数为 0.1265 h^{-1} ,高于其他氟含量下的表观速率常数,说明氟含量 3 mg/L 的吸附效果最好。

表2 不同浓度含氟模拟水样下试验出水氟含量

Table 2 Fluorine content in effluent under different fluorine-containing simulated wastewater

时间/h	氟含量/(mg·L ⁻¹)			
	2 mg/L	3 mg/L	4 mg/L	5 mg/L
1	0.36	0.42	0.53	0.62
2	0.29	0.38	0.49	0.55
3	0.28	0.31	0.45	0.51
4	0.26	0.28	0.42	0.46
5	0.25	0.26	0.38	0.43

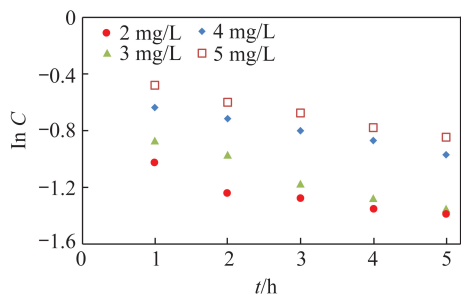


图7 浓度对数与时间关系

Fig.7 Relationship between logarithm of concentration and adsorption time

表3 不同初始浓度下的动力学方程

Table 3 Kinetic equations of different initial concentrations

初始浓度/(mg·L ⁻¹)	一级动力学方程	相关系数 R ²
2	$y = -0.083 8x - 1.001 6$	0.870 5
3	$y = -0.126 5x - 0.745 9$	0.972 5
4	$y = -0.082x - 0.550 5$	0.997 3
5	$y = -0.091 1x - 0.400 8$	0.991 7

5 结 论

1) 研究不同试验条件(活性氧化铝装填量、pH值、吸附时间、停留时间)对煤化工废水除氟率的影响。活性氧化铝装填量增加,进水 pH 降低,停留时间越长,除氟率越高;除氟率随着吸附时间的延长而逐渐降低。

2) 活性氧化铝吸附煤化工废水氟化物试验研究中,为保证出水氟含量 ≤ 1 mg/L,确定最佳试验条件为:活性氧化铝装填量 60 g,进水 pH ≤ 6 ,停留时间 6~8 min,吸附时间 ≤ 45 h。

3) 采用 1~2 mm 活性氧化铝开展连续除氟试验,除氟后的活性氧化铝采用硫酸铝再生后重复进行试验,出水氟含量仍维持在 1 mg/L 以下。证明采用活性氧化铝对煤化工废水除氟具有很好的实际应用性。

4) 采用不同氟含量下的模拟水样开展吸附试

验研究反应动力学研究,发现活性氧化铝除氟的反应动力学方程为一级反应,且氟含量 3 mg/L 时吸附效果最好。

参考文献(References):

- [1] 朱其顺,许光泉.中国地下水氟污染的现状与研究进展[J].环境科学与管理,2009,34(1):42-44.
ZHU Qishun, XU Guangquan. The current situation and research progress of ground water fluorine pollution in China[J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(1): 42-44.
- [2] 胡涛,李亚云.含氟废水的净化技术研究[J].云南环境科学,2006,25(1):57-59.
HU Tao, LI Yayun. Study on purifying technology of fluoride wastewater[J]. Yunnan Environment Science, 2006, 25(1): 57-59.
- [3] 赵印英,孟国霞,杨丽霞.山西农村饮水高氟水问题及处理措施分析[J].山西水利科技,2010(3):16-17.
ZHAO Yinying, MENG Guoxia, YANG Lixia. On the problems of heavy fluorine compound in Shaanxi's rural water-drinking and analyzing the treatment measures[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2010(3): 16-17.
- [4] 郝阳,孙殿军,魏红联,等.中国大陆地方性氟中毒防治动态与现状分析[J].中国地方病学杂志,2002,21(1):66-71.
HAO Yang, SUN Dianjun, WEI Honglian, et al. Analysis on the control trends and present state of endemic fluorosis in china mainland[J]. Chinese Journal of Endemiology, 2002, 21(1): 66-71.
- [5] 赵琰.煤中氟测定方法解析及改进[J].煤质技术,2019(1):19-21.
ZHAO Yan. Analysis and improvement of determination method of fluorine in coal[J]. Coal Quality Technology, 2019(1): 19-21.
- [6] WHO(World Health Organization). Guidelines for drinking water quality(vol.II): Health criteria and supporting information[M]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 1984.
- [7] 王振宇,王金生,滕彦国,等.高氟地下水混凝沉淀降氟试验研究[J].水文地质工程地质,2004(5):42-45.
WANG Zhenyu, WANG Jinsheng, TENG Yanguo, et al. An experimental study of coagulative precipitation process for fluoride removal from high fluoride-bearing groundwater[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004(5): 42-45.
- [8] AMOR Z, BARIOU B, MAMERI N, et al. Fluoride removal from brackish water by electrodialysis[J]. Desalination, 2001, 133(3): 215-223.
- [9] LOUNICI H, BELHOCINE D, GRIB H, et al. Fluoride removal with electro-activated alumina[J]. Desalination, 2004, 161(1/3): 287-293.
- [10] 张威,杨胜科,费晓华.反渗透技术去除地下水中氟的方法[J].长安大学学报(自然科学版),2002,22(6):116-118.
ZHANG Wei, YANG Shengke, FEI Xiaohua. Treating fluorine ions in underground water with reverse osmosis[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002, 22(6): 116-118.

- [11] 周春琼,邓先和,刘海敏,等.吸附法处理含氟水溶液的研究与应用[J].水处理技术,2006,32(1):1-5.
ZHOU Chunqiong,DENG Xianhe,LIU Haimin, et al.Treatment of aqueous solution containing fluoride by absorption process[J]. Technology of Water Treatment,2006,32(1):1-5.
- [12] 王吉坤,蒋雯婷,杜松,等. 活性氧化铝对矿井水除氟性能的试验研究[J].能源环境保护,2019,33(4):17-21.
WANG Jikun,JIANG Wenting,DU Song, et al.The experimental study on adsorption of fluoride ions inl mine water by activated alumina[J]. Energy Environmental Protection, 2019, 33(4): 17-21.
- [13] 王东田,尹方平,杨兰.改性活性氧化铝的除氟效能及再生方法研究[J].工业水处理,2010,30(6):55-58.
WANG Dongtian,YIN Fangping,YANG Lan.Research on the defluoridation capacity and regeneration of modified activated alumina[J].Industrial Water Treatment,2010,30(6):55-58.
- [14] WU Daoji,LI Qiumei,YIN Mengmeng, et al.Experiment on Al_2O_3 in removing fluorin of groundwater[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2007,46:331-332.
- [15] 袁西鑫,李明玉,薛永强,等.强化混凝去除饮用水源水中的氟[J].暨南大学学报(自然科学版),2013,34(3):306-310.
YUAN Xixin,LI Mingyu,XUE Yongqiang, et al. Removal of fluorine form drinking water by enhanced coagulation[J]. Journal of Jinan University(Natural Science), 2013,34(3):306-310.
- [16] 张威,杨胜科,费晓华.反渗透技术去除地下水中氟的方法[J].长安大学学报(自然科学版),2002,22(6):116-118.
ZHANG Wei,YANG Shengke,FEI Xiaohua.Treating fluorine ions in underground water with reverse osmosis [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002, 22(6): 116-118.
- [17] 张滢,张景成,崔自敏.铝基吸附剂去除饮用水中氟的研究进展[J].环境科学与技术,2012,35(4):93-98.
ZHANG Ying,ZHANG Jingcheng,Cui Zimin.Development of alumina-based materials in defluoridation of drinking water[J].Environmental Science and Technology,2012,35(4):93-98.