

工程实例

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 18. 017

光伏废水二级处理除氟剂选型试验及工程应用

陈 宁¹, 董明甫¹, 孔海霞², 张 林¹, 何文光¹, 尹天平¹,
陈春梅¹, 赵茂杰¹

(1. 四川安州发展集团有限公司, 四川 绵阳 622651; 2. 中国市政工程华北设计研究总院
有限公司 西安分公司, 陕西 西安 710016)

摘 要: 某污水处理厂根据除氟生产工艺需要,对4种除氟剂进行了选型对比试验,认为其中2种(GMS-F3和YYHBL-Ⅱ)满足使用要求。通过除氟剂用量、pH以及PAM添加量等因素控制,可将光伏废水中的F⁻浓度降低到1.5 mg/L以下,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。通过小试能较好地进行除氟剂选型,且所选除氟剂能满足生产达标排放要求,同时该试验数据也能较好地指导生产实践。

关键词: 光伏废水; 除氟剂; 絮凝沉淀法; 工程应用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)18-0100-07

Selection Test of Defluorination Agents for Secondary Treatment of Photovoltaic Wastewater and Engineering Application

CHEN Ning¹, DONG Ming-fu¹, KONG Hai-xia², ZHANG Lin¹, HE Wen-guang¹,
YIN Tian-ping¹, CHEN Chun-mei¹, ZHAO Mao-jie¹

(1. Sichuan Anzhou Development Group Co. Ltd., Mianyang 622651, China; 2. Xi'an Branch,
North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: In accordance with the requirements of the fluoride removal production process at a wastewater treatment plant, four new types of defluorination agents were evaluated systematically. Two of them, GMS-F3 and YYHBL-Ⅱ, meet the usage requirements of the wastewater treatment plant. By controlling factors such as the amount of defluorination agent, pH, and PAM addition, the fluoride ion concentration can be reduced to below 1.5 mg/L, meeting the level A standard of the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). Through experimental research and engineering application data analysis, it has been found that small experiments can effectively select defluorination agents in a wastewater treatment plant, and the selected agents can meet production discharge standards. At the same time, this experimental data can also provide good guidance for production practice.

Key words: photovoltaic wastewater; defluorination agent; flocculation sedimentation method; engineering application

氟化工行业主要以萤石(CaF_2)为原材料生产氢氟酸,再合成各类氟化物,包括有机氟化物、无机氟化物及含氟单体等^[1]。随着新能源、新材料化工产业的不断发展,更多的新材料生产对氟的依赖性越来越强,如光伏行业为了实现对硅片正面和边缘进行刻蚀,以达到去除正面及边缘硼硅玻璃(BSG)的目的,采用的主要原材料之一即为氢氟酸。同时光伏企业也是废水排放大户之一,因此有效处理含氟废水,减少含氟废水排放带来的水体污染和生态环境破坏,降低对动植物及人体的不良影响极为重要^[2]。

四川某污水处理厂正面临光伏行业废水中F⁻达标排放的难题。该光伏企业生产的晶体硅太阳能电池是一种基于选择性载流子原理的隧穿氧化层钝化接触(TOPCon)的太阳能电池,废水在经过光伏企业一级处理后执行《电池工业污染物排放标准》(GB 30484—2013)表1的间接排放标准,即pH为6~9,COD为150 mg/L,SS为140 mg/L,TP为2.0 mg/L,氟化物为8.0 mg/L,TN为40 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为30 mg/L。以2023年6月的原水(光伏企业一级处理出水)水质统计数据为例进行分析。该光伏企业在COD控制方面基本满足进水标准,最高为155 mg/L,最低为36.7 mg/L,平均为104 mg/L,仅6月初出现一次超标现象,对后续进一步处理不会产生明显影响;进水TN最高为9.12 mg/L,最低为1.28 mg/L,平均为5.25 mg/L,满足处理要求;进水TP最高为0.56 mg/L,最低为0.01 mg/L,平均为0.11 mg/L,基本无需处理即可达标排放;原水F⁻浓度最高为11.29 mg/L,最低为2 mg/L,平均为4.77 mg/L,前10天F⁻浓度变化波动大,存在超标现象,后期变化趋势相对稳定。

原水中COD、TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均可通过前端的A²O生化处理达标排放,问题在于F⁻浓度无法通过生化处理达标,而且低浓度的F⁻处理难度相对较大。该工业园区污水处理厂尾水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,即:COD为50 mg/L,BOD₅为10 mg/L,SS为10 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为5(8) mg/L,TN为15 mg/L,TP为0.5 mg/L,pH为6~9,F⁻浓度按1.5 mg/L控制。可以看出,该污水处理厂需要对原水的各项指标进一步处理后才能达标排放,尤其是对F⁻进行深度处理。唐佳伟等^[3]指出:F⁻的深度处理主要影响因素有pH、

温度、接触时间、吸附剂的投加量以及溶液中共存的阴离子等。

针对F⁻的深度处理,选择4种除氟剂进行研究,并对比各种除氟剂在不同投加量、不同终点pH控制及不同PAM投加量条件下的除氟效果,为深度处理含氟废水的除氟剂选型以及指导生产实践提供基础数据。

1 试验材料与仪器

① 试验材料

试验用含氟废水取自四川某光伏企业TOPCon生产线一级处理后出水(原水),pH为6.0~9.0,F⁻浓度<8.0 mg/L,考虑异常情况,将F⁻浓度放大到15.0 mg/L;工业级氢氧化钠溶液30%;阳离子聚丙烯酰胺(PAM)。

除氟剂类型及有效成分:GMS-F3,改性铝铁硅聚合物;RK-CF1,聚合铝盐类,有效成分为聚合氯化铝;RK-CF6,聚合铝盐类,有效成分为聚合硫酸铝;YYHBL-Ⅱ,一种氧化铝型复合除氟剂,有效成分为硫酸铁复合改性的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

② 试验及检测仪器

试验仪器:六联搅拌器/磁力搅拌器(HJ-6)、1 L烧杯、量筒、玻璃棒、移液枪、胶头滴管、电子天平、滤纸、药勺等。

检测仪器:pH计(雷磁pHs-3c,上海仪电科学仪器股份有限公司)、F⁻检测计(PXSJ-216F,上海仪电科学仪器股份有限公司)。

2 试验过程及检测方法

2.1 试验过程

① 除氟剂种类及用量的影响

初步测定原水中F⁻浓度为7.7 mg/L,在1#~4#4个1 000 mL烧杯中分别加入1 000 mL原水水样,置于搅拌器上。在室温条件下,分别按照设计投加量(0.6、0.7、0.8、0.9 g)将除氟剂(GMS-F3、RK-CF1、RK-CF6、YYHBL-Ⅱ)投入原水中,控制转速为200 r/min,搅拌5 min,分别添加氢氧化钠溶液,调节pH为6.0~7.0,添加3 mg阳离子PAM,控制转速为60 r/min,搅拌0.5 min,静置20 min,取上层清液检测F⁻浓度。

② pH对除氟效果的影响

余文娟^[4]指出,不同的除氟剂对pH的响应范围可能不同,因此采用对比试验寻找不同除氟剂响应

的最佳pH。室温下取20个1 000 mL的干燥烧杯,编号为1#~20#。分别向每个烧杯中添加F浓度为7.7 mg/L的1 000 mL原水后,置于六联搅拌器上进行试验,分别投加除氟剂GMS-F3、RK-CF1、RK-CF6、YYHBL-Ⅱ于1#~5#、6#~10#、11#~15#、16#~20#原水烧杯中,每个烧杯除氟剂的投加量均为0.7 g,控制转速为200 r/min,搅拌5 min,添加工业级氢氧化钠溶液,调节pH为5.5~5.6、6.1~6.3、6.5~6.6、6.8~6.9、7.1~7.3后,再添加3 mg的阳离子PAM,控制转速为60 r/min,搅拌0.5 min,静置20 min,取上层清液检测F浓度。

③ PAM添加量对除氟效果的影响

杨严^[5]指出,若PAM用量不足则达不到应有效果,用量过大不但增加成本而且会降低处理效果,降低沉降速率。考虑到PAM添加量对降低运行成本以及缩短水力停留时间具有一定的指导意义,因此采用对比试验寻找不同的除氟剂在最佳pH情况下对PAM投量的响应效果。取16个1 000 mL的干燥烧杯,编号为1#~16#。分别向每个烧杯中添加1 000 mL的F浓度为7.7 mg/L的原水后,置于六联搅拌器上进行试验,分别投加除氟剂GMS-F3、RK-CF1、RK-CF6、YYHBL-Ⅱ于1#~4#、5#~8#、9#~12#、13#~16#原水烧杯中,每个烧杯中除氟剂的投加量均为0.7 g,控制转速为200 r/min,搅拌5 min。搅拌完成后添加氢氧化钠溶液,调节pH为6.0~6.6,再分别添加2.5、3.0、3.5、4.0 mg的阳离子PAM,控制转速为60 r/min,搅拌0.5 min,静置20 min,取上层清液检测F浓度。

2.2 检测方法

F浓度检测方法:《水质 氟化物的测定 离子选择电极法》(GB 7484—87)。

3 结果与讨论

3.1 不同除氟剂投加量的影响

除氟剂的添加量直接影响除氟效果^[6]。在进水F浓度为7.7 mg/L时,分别添加4种不同的除氟剂(GMS-F3、RK-CF1、RK-CF6、YYHBL-Ⅱ),控制除氟剂的添加量分别为0.6、0.7、0.8、0.9 g,含氟废水中F的去除效果与除氟剂添加量之间的关系如图1所示。

通过絮凝沉淀法处理后,出水水质均能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—

2002)的一级A标准,F浓度为1.5 mg/L。

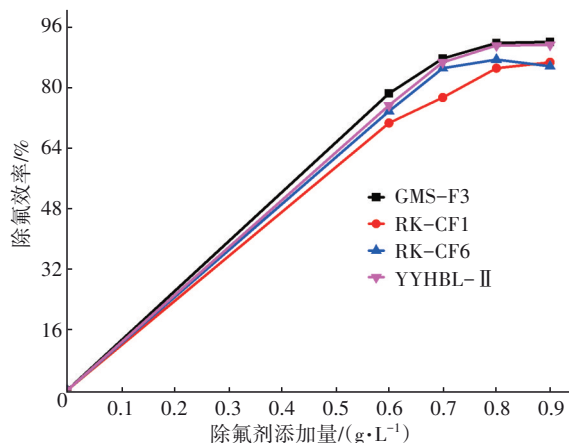


图1 除氟剂添加量对除氟效果的影响

Fig.1 Impact of defluorination agents amount on effectiveness of fluoride removal

从图1可以看出,随着4种除氟剂添加量的增加,除氟效率均显著提升。当除氟剂添加量大于0.8 g/L后,单位除氟剂增加量对除氟效率的影响减缓。考虑经济效益,GMS-F3的最佳添加量为0.7 g/L,除氟率高达87.6%;RK-CF1的最佳添加量为0.8 g/L,除氟率高达85.05%;RK-CF6的最佳添加量为0.8 g/L,除氟率最高达87.32%;YYHBL-Ⅱ的最佳添加量为0.7 g/L,除氟率最高达86.6%。通过对比不同除氟剂的除氟效果发现,GMS-F3和YYHBL-Ⅱ的除氟效果较好,主要是因为YYHBL-Ⅱ为铁盐改性的聚合铝盐,GMS-F3为改性铝铁硅聚合物。

GMS-F3改性铝铁硅聚合物本身显酸性,原水基本呈弱碱性或中性,当原水中加入GMS-F3后,导致GMS-F3的水解,经过水解后形成疏松多孔的氢氧化铝胶体甚至氢氧化铝沉淀,氢氧化铝沉淀在沉降过程中一方面会卷扫水中的F⁻,絮团和胶粒共沉淀,另一方面胶粒表面会吸附Fe³⁺,增加了胶粒表面的有效电荷,从而提高了除氟剂的吸附作用。

YYHBL-Ⅱ是一种氧化铝型的复合除氟剂。氧化铝对水中阴离子的交换能力依次为OH⁻>F⁻>SO₄²⁻>HCO₃⁻>Cl⁻>I⁻,说明SO₄²⁻与F⁻的离子交换很容易发生^[7]。同时,结构中的—OFe²⁺为反应过程提供了更多的正电荷,易与F⁻产生静电相互作用,OH⁻与F⁻存在竞争关系,因此在弱酸性条件下F⁻更易与OH⁻发生交换作用。

针对YYHBL-Ⅱ产品,设计了F浓度在2.0~

11.0 mg/L之间波动,对2~3 mg/L之间的浓度取中间值2.5 mg/L,3~4 mg/L之间的浓度取中间值3.5 mg/L进行做图,以此类推,不同梯度F⁻浓度与除氟剂添加量的关系见图2。

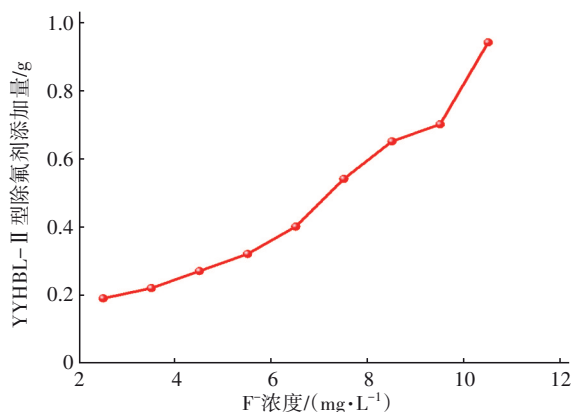


图2 F⁻浓度对除氟剂添加量的影响

Fig.2 Effect of F⁻ concentration on the addition of defluorination agents

由图2可知,一定F⁻浓度范围内的除氟剂添加量取该范围内平均值,其中除氟剂的添加量为0.19~0.94 g。在F⁻浓度为7 mg/L的情况下,除氟剂的增量基本呈线性关系,但在F⁻浓度>7 mg/L时,除氟剂的添加量明显增加,尤其是当F⁻浓度>10 mg/L时最为显著。综合考虑,后续试验选用YYHBL-II作为目标除氟剂。

3.2 pH对除氟效果的影响

在酸性(pH<5)条件下,活性炭对F⁻的吸附效果更好^[8],而在弱酸性或中性条件下(pH为7),氧化铝对F⁻的吸附效果较好,除氟效率最高达到85.9%。试验过程中发现,在含氟废水中添加除氟剂和PAM、pH为4.5时,几乎看不到矾花,只能看到一些细小的颗粒,且静置30 min后也无明显的泥水分离现象,但是当调节pH为6.0左右时就能看到明显的大块矾花。试验探究了pH为5.5~8.0条件下不同除氟剂对F⁻的去除情况,见图3。

结果显示,各种新型除氟剂对pH都有一定的依赖性,但所选的4种除氟剂对pH的响应要求几乎都在6.0~6.6之间。主要是在pH<4.0的条件下,F⁻与H⁺结合形成了HF,在溶液中部分电离导致HF无法吸附在带正电荷的除氟剂表面,从而降低了除氟效果。当pH为4.0~6.0时,随着pH的升高,氟更多以离子形态存在,加强了带负电荷的F⁻与带正电荷的除氟剂胶体之间的吸附作用,从而提高了F⁻

的去除率。当溶液pH继续升高时,OH⁻与F⁻的竞争增强,削弱了F⁻与带正电荷的除氟剂胶体之间的吸附作用,导致溶液中F⁻的浓度反而升高。

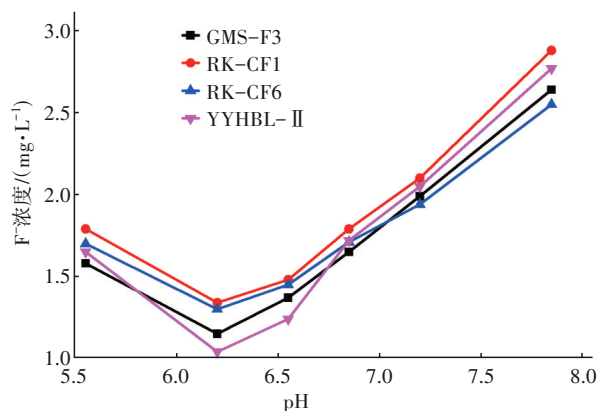


图3 除氟剂对pH的响应曲线

Fig.3 Response curve of defluorination agents to pH

为了进一步论证相同F⁻浓度下不同pH条件对除氟剂添加量的影响,分别控制pH为6.0~7.0和7.0~8.5,达到出水排放标准(F⁻为1.5 mg/L),选择YYHBL-II产品为代表进行试验,结果见图4。

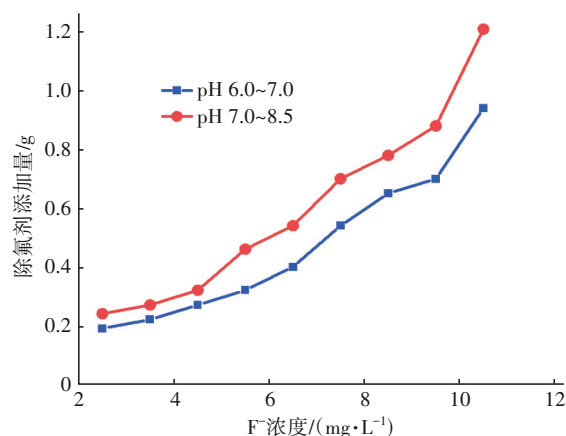


图4 同一梯度F⁻浓度下除氟剂添加量与pH之间的关系

Fig.4 Relationship between the addition amount of defluorination agents and pH at the same gradient F⁻ concentration

在不同浓度的含氟废水中,控制pH条件,得出pH为6.0~7.0时所需除氟剂投加量均小于pH为7.0~8.5时。

3.3 PAM添加量对除氟效果的影响

PAM的添加量与除氟效果有一定的关系^[9]。阳离子PAM投加量分别为2.0、2.5、3.0、3.5 mg,控制转速一定,澄清后测定F⁻浓度,具体数据见图5。图5表明,各种除氟剂在PAM添加量增加时,除氟效果

都有所提升,但变化效果不是很明显。当提高PAM添加量以后,泥水分离时间更短,分层效果更好。究其原因,一方面是除氟剂水解以后产生难溶于水的沉淀或者胶体,利用疏松多孔的结构吸附水中的颗粒物及带正电荷的阳离子,使自身带上正电荷,再利用静电作用吸引废水中的 F^- ;另一方面是利用PAM分子链上的氢键、静电作用以及分子间作用力吸附颗粒,吸附架桥起主要作用,高分子链上会连接若干悬浮物颗粒,被形象地称作架桥作用^[10],在搅拌过程中将颗粒物交联在其表面,产生矾花的颗粒度增大,而且沉降的时间明显缩短,减少了水力停留时间,为光伏废水二次处理节省了沉淀池的容积或在建成的沉淀池中显著提高产能。从经济角度考虑,控制PAM的投加量为2.5 mg/L,如果水力停留时间减少,可以适当提高PAM的投加量以降低水量变化带来的冲击负荷。

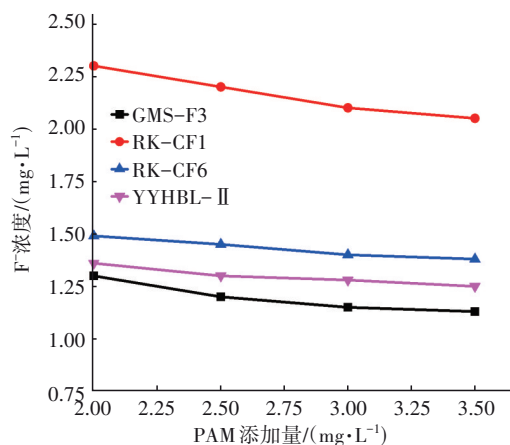


图5 PAM添加量对除氟效果的影响

Fig.5 Effect of PAM addition amount on fluoride removal effect

3.4 小试结论

① 4种新型除氟剂对比试验结果表明,GMS-F3、YYHBL-II药剂的投加量相对较少,具有一定优势,通过控制反应的pH和PAM添加量,能有效降低废水中的 F^- 浓度,达到 $F^- \leq 1.5$ mg/L的标准。

② 所选4种除氟剂,均在溶液pH为6.0~6.6的响应范围内除氟效果更佳。

③ 除氟剂GMS-F3和YYHBL-II在相同水质情况下,PAM的投加量控制在2.5 mg/L为宜。

4 试验结果的工程应用

该污水处理厂所接纳光伏废水 F^- 浓度控制在8

mg/L左右,通过专管直接输送到厂。污水处理厂利用提升泵站将所接收的废水泵入生化池,经过 A^2/O 工艺处理后输送到一体化除氟设备,具体工艺流程见图6。

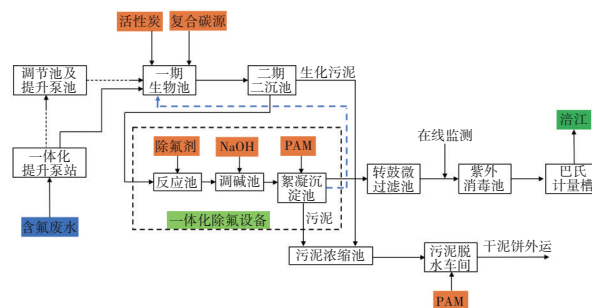


图6 光伏废水深度处理工艺流程

Fig.6 Advanced treatment process of photovoltaic wastewater

从图6可以看出,一体化除氟设备主要分3个工段:反应池、调碱池和絮凝沉淀池。废水到达反应池后pH约为6.0~9.0。由于除氟剂本身显酸性,添加一定量的除氟剂后pH有所下降,当pH降到6.0以下时,在调碱池添加一定量的NaOH溶液,将pH调回6.0~9.0,最后在絮凝沉淀池内添加2.5 mg/L的PAM至出水 F^- 浓度达标。

pH对除氟剂用量有显著影响,如表1所示。

表1 pH及 F^- 浓度对除氟剂用量影响的试验数据

Tab.1 Experimental data of influence of pH and F^- concentration on defluorination agents dosage

pH	F^- 浓度/(mg·L ⁻¹)	除氟剂消耗/(kg·m ⁻³)
6.0~7.0	2~3	0.19
	3~4	0.22
	4~5	0.27
	5~6	0.32
	6~7	0.40
	7~8	0.54
7.0~8.5	2~3	0.24
	3~4	0.27
	4~5	0.32
	5~6	0.46
	6~7	0.54
	7~8	0.70

常规进水 F^- 浓度为5~6 mg/L,当pH为6.0~7.0时,除氟剂的消耗约为0.32 kg/m³;当pH为7.0~8.5时,除氟剂的消耗约为0.46 kg/m³,除氟剂用量相差26%左右。因此,在工程应用中尽可能将pH控制在

6.0~7.0。

表2统计了该污水处理厂2023年6月14日—28日部分工程应用数据,主要包括进出水F⁻浓度、pH以及除氟剂和PAM消耗量。对比表1、2可以看出,试验出水pH不同,除氟剂的添加量也有一定的差别,而且pH偏高,除氟剂的用量也偏高,如F⁻浓度为5~6 mg/L时,pH为6.0~7.0的试验数据为0.32

kg/m³,与表2中6月14日工程应用数据0.400 kg/m³偏差20%,pH为7.0~8.5时,试验数据用量为0.46 kg/m³,与表2中6月26日、27日的工程数据0.529 kg/m³和0.445 kg/m³偏差分别为13.0%和3.4%。数据偏差较大的主要原因是开始调试时,担心出水水质超标,因此药剂的投加量偏高,随着运行的不断优化,后期的数据基本趋于正常。

表2 光伏废水处理工程应用数据

Tab.2 Application data of photovoltaic wastewater treatment project

时间	F ⁻ 浓度/(mg·L ⁻¹)		pH		处理水量/m ³	除氟剂消耗/(kg·m ⁻³)	PAM消耗/(g·m ⁻³)
	进水	出水	进水	出水			
6月14日	5.005	0.391	7.73	6.46	590	0.400	3.39
6月15日	4.310	0.791	8.11	6.62	630	0.405	3.33
6月16日	2.501	0.322	7.73	6.32	3 982	0.320	3.03
6月17日	3.715	0.463	7.92	6.49	3 016	0.290	2.76
6月18日	6.866	0.914	7.29	6.35	2 359	0.524	2.54
6月19日	4.239	0.567	7.95	6.29	5 464	0.299	2.38
6月20日	7.392	0.792	7.68	6.54	3 350	0.608	2.36
6月21日	6.254	1.050	7.25	7.31	3 957	0.561	2.55
6月22日	4.201	0.788	7.37	6.78	1 813	0.331	2.58
6月23日	3.492	0.342	7.39	6.42	4 037	0.322	2.47
6月24日	2.436	0.843	7.29	7.65	2 638	0.364	2.46
6月25日	3.953	0.965	7.29	7.25	3 522	0.572	2.39
6月26日	5.117	0.845	8.18	8.33	3 183	0.529	2.45
6月27日	5.551	0.647	7.37	7.26	2 460	0.445	2.55
6月28日	7.185	1.329	7.93	7.94	2 919	0.758	2.15

再如表1中F⁻浓度7~8 mg/L时,pH在6.0~7.0的试验数据为0.54 kg/m³,与表2中6月20日工程应用数据为0.608 kg/m³偏差11.2%,pH为7.0~8.5时,表1中试验数据用量为0.70 kg/m³,与表2中6月28日工程应用数据0.758 kg/m³偏差7.7%。表1中试验数据与表2中6月20日、28日数据的一致性也是非常明显,同样也存在工程应用中药剂的投加量高于试验数据10%左右,可见试验数据中除氟剂的添加比例对生产实践有一定的指导意义。从表1、2数据可以看出,除氟剂消耗相差10%左右,具体原因表现在两方面:一方面试验为静态试验,而工程应用则为动态数据,静态试验的泥水分离效果更好;另一方面试验在水力停留时间上相对固定且较长(20 min),而工程应用时水力停留时间相对较短(不足20 min),因此在药剂量方面工程应用的数据必然需要适当提升。

6月14日—17日,PAM的用量也是依据试验数

据适当提高,确保出水水质达标,运行几天后,PAM投加量向试验投加量数据(2.5 g/m³)靠近。从6月17日以后的运行数据调整看,工程应用数据与试验数据基本一致,可见PAM的试验数据指导意义更加明显。

5 结论

- ① 通过试验及工程分析,本项目所选用除氟剂的除氟效率均在86%以上,能够满足将8 mg/L的含氟废水处理到1.5 mg/L,实现达标排放。
- ② 废水经投加除氟剂、碱液、PAM处理后的出水pH不同,除氟剂的添加量也不同,控制处理后的出水pH为6.0~7.0时,除氟剂的添加量相对较少。
- ③ 光伏废水二次处理除氟剂选型试验结果在工程应用中取得良好效果,对光伏废水处理的生
- 产实际具有一定指导意义。
- ④ 通过试验数据与工程应用实践数据对比,

试验数据的除氟剂用量提高10%左右,与工程应用数据基本一致,因此除氟剂的试验数据对工程应用具有较好的指导意义。

参考文献:

- [1] 张茂生. 氟化工可持续供应链管理问题与对策研究[J]. 化工管理, 2022(31):8-10.
ZHANG Maosheng. Study on the problems and countermeasures of sustainable supply chain management in fluorochemical industry [J]. Chemical Management, 2022(31):8-10(in Chinese).
- [2] ARYA S, SUBRAMANI T, VENNILA G, *et al.* Health risks associated with fluoride intake from rural drinking water supply and inverse mass balance modeling to decipher hydrogeochemical processes in Vattamalaikarai River basin, South India [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43(2): 705-716.
- [3] 唐佳伟, 张锁, 刘兆峰, 等. 吸附法去除矿井水中 F⁻ 研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023(5):269-283.
TANG Jiawei, ZHANG Suo, LIU Zhaofeng, *et al.* Research progress in the removal of fluoride ions from mine water by adsorption method [J]. Coal Science and Technology, 2023(5):269-283(in Chinese).
- [4] 余文娟. 化学沉淀法去除饮用水中微量超标的氟、硬度及硫酸根[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
YU Wenjuan. Use Chemical Precipitation to Remove Excess Fluoride, Hardness and Sulfate from Drinking Water[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012(in Chinese).
- [5] 杨严. 混凝-MAP法应用于垃圾渗滤液中的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
YANG Yan. Experimental Study on Application of Coagulation-MAP Method to Landfill Leachate [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011 (in Chinese).
- [6] 雷蕾, 赵婧男, 张成鑫, 等. 新型化学除氟剂处理含氟工业废水效果研究[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(3):99-101.
LEI Lei, ZHAO Jingnan, ZHANG Chengxin, *et al.* Study on the effect of new chemical fluoride removal agent on the treatment of fluorine-containing industrial wastewater [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(3):99-101(in Chinese).
- [7] 张勤虎, 陈年来, 王洪杰, 等. 不同铝源羟基氧化铝除氟性能及机理研究[J]. 工业用水与废水, 2015, 46(4):23-28.
ZHANG Qinhu, CHEN Nianlai, WANG Hongjie, *et al.* Defluorination performance of AlOOH with different aluminum sources and mechanism thereof[J]. Industrial Water & Wastewater, 2015, 46(4): 23-28 (in Chinese).
- [8] 张曼, 李多松, 王可. 吸附法去除火电厂冲灰水氟离子的研究[J]. 广东化工, 2011, 38(3):152-153.
ZHANG Man, LI Duosong, WANG Ke. Study on removing fluoride ion in ash sluicing water of thermal power plant by adsorption process [J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(3):152-153(in Chinese).
- [9] 刘旭. 沉淀-吸附组合工艺处理工业含氟废水的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2023.
LIU Xu. Research on Precipitation-adsorption Combined Process for Treatment of Industrial Fluorinated Wastewater [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023(in Chinese).
- [10] LUO Y L, YANG Z H, XU Z Y, *et al.* Effect of trace amounts of polyacrylamide (PAM) on long-term performance of activated sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(1/2):69.

作者简介: 陈宁(1978-), 男, 四川绵阳人, 本科学历, 高级工程师, 主要从事化学工程方向研究。

E-mail: yhcouse@sina.com

收稿日期: 2023-07-06

修回日期: 2023-08-14

(编辑: 衣春敏)