

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.02.020

# 钢铁冷轧线含铬废水处理及同步资源化利用

张一博, 李孟, 杜宁, 李嘉伟, 张倩  
(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 针对某钢铁厂冷轧机组排放的含铬废水中Cr(VI)浓度达标但总铬不能稳定达标、铬泥作为危废出厂等问题,采用纤维吸附技术从源头对Cr(VI)进行回收,确保出水水质达标,并通过基于离子交换技术的转化系统实现Cr(VI)的资源化利用。通过试验确定吸附系统的最优吸附周期与转化系统的最适pH值。系统优化后,出水Cr(VI)及总铬浓度分别保持在0.048、0.1 mg/L以下,满足《钢铁工业水污染物排放标准》(GB 13456—2012);与原工艺相比,无需再外加药剂调节pH值,极大地节省了处理成本;铬泥产量减少90%以上;产生的重铬酸液可实现资源化利用,据统计产生的综合经济效益可达520.6万元/a。

**关键词:** 含铬废水; Cr(VI)回收; 资源化利用

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)02-0110-06

## Treatment and Synchronous Utilization of Chromium-containing Wastewater in Steel Cold Rolling Production Line

ZHANG Yi-bo, LI Meng, DU Ning, LI Jia-wei, ZHANG Qian

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Aiming at the problems such as the total effluent chromium other than Cr(VI) could not meet the standard stably in the chromium-containing wastewater discharged from a steel cold rolling units and the chromium sludge has to be shipped outside the factories as hazards wastes, the fiber adsorption technology was employed to ensure the effluent quality to meet the requirement of national sewage discharge standard, and the ion exchange technology was used to realize resource utilization of Cr(VI). Based on the pilot test, the suitable operation period of the adsorption system and pH of the ion exchange system were determined. After system optimization, the effluent concentrations of Cr(VI) and total Cr kept below 0.048 mg/L and 0.1 mg/L respectively, which meet the *Discharge Standards of Water Pollutants for Iron and Steel Industry* (GB 13456-2012). Compared with the original process, it is not necessary to adjust the pH, thus greatly saving the treatment costs. Additionally, the output of chromium sludge is reduced by over 90%, and the accumulated and conversed chromate solution can be utilized. According to the statistics, the comprehensive economic benefit can approach to 5.206 million yuan/a.

**Key words:** chromium-containing wastewater; Cr(VI) recovery; resource utilization

基金项目: 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室开放基金资助项目(2019-06)

通信作者: 李孟 E-mail: limeng189@126.com

近年来,我国钢铁工业迅速发展,面临着既要保持经济快速增长又要节水减排、保护环境生态平衡的双重压力,而冷轧生产线作为钢铁行业的主要发展方向之一,在钢板涂层工序的涂料残余、机组检修和地面冲洗等工序产生种类较多、成分复杂、难处理的含铬废水,其主要成分Cr(VI)的毒性在铬的不同价态化合物中最强,当水中Cr(VI)含量>0.1 mg/L时,就会使人体产生不同程度的病变<sup>[1-2]</sup>。针对含铬废水处理系统的优化升级与改造成为目前钢铁行业废水处理的重点和难点之一<sup>[3-4]</sup>。

某钢铁厂目前采用传统的还原沉淀法处理含铬废水:先投加焦亚硫酸钠等还原剂将Cr(VI)还原成Cr(Ⅲ),再通过投加Ca(OH)<sub>2</sub>调节废水pH值,使其形成Cr(OH)<sub>3</sub>沉淀去除<sup>[5]</sup>,处理工艺见图1。

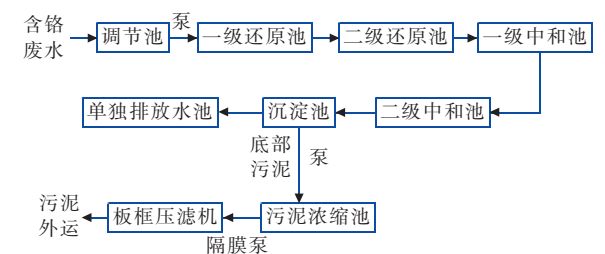


图1 含铬废水处理工艺流程  
Fig.1 Flow chart of chromium-containing wastewater treatment process

排放出水中的含铬浓度执行《钢铁工业水污染物排放标准》(GB 13456—2012),其中Cr(VI)<0.05 mg/L,总铬<0.1 mg/L。在实际生产运行过程中,存在冷轧各机组排放的含铬废水排水量指标偏高,含铬废水处理系统出水Cr(VI)浓度达标但总铬浓度不能稳定达标,含铬污泥以危废出厂致使污泥处置成本巨大,造成资源浪费等问题。

针对该厂含铬污泥不出厂的要求及实现降低

处置成本和资源化利用的目标进行了深入的分析研究,通过将纤维吸附技术与离子交换技术联用,可使废水处理和Cr(VI)资源化回收利用集于一体,跳出了传统废水处理的思维模式,直接从源头对含铬车间废水进行减量化处理与回用,实现了对有价资源的高效利用、节水减排、降本增效的目标,确保了工序生产安全运行,既满足了产品质量的需求,又提升了钢铁行业的清洁生产水平。

1 吸附转化工艺原理

在钢铁厂冷轧各机组废水排放口加装Cr(VI)吸附转化系统,从源头对Cr(VI)进行回收利用。Cr(VI)吸附转化系统主要包含两部分核心处理设备:纤维吸附系统和铬酸钠溶液转化系统。

① 纤维吸附系统:含铬废水中Cr(VI)通常以铬酸根或重铬酸根形式存在,当含铬废水流过纤维吸附交换器中的纤维柱时,溶液中的Cr(VI)被吸附在功能纤维上实现对其浓缩与富集;纤维柱在饱和吸附之后通过解吸及活化使功能纤维得到再生,重新具备吸附Cr(VI)的能力。

② 铬酸钠溶液转化系统:通过向纤维吸附系统中加入NaOH溶液解吸得到的铬酸钠溶液进入氢离子型阳离子交换树脂<sup>[6]</sup>。溶液中的Na<sup>+</sup>被吸附到树脂上,同时树脂上原来携带的H<sup>+</sup>进入溶液内,Na<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>溶液即转化为高纯度H<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>溶液,经过简单处理后可以直接用于电镀、皮革、印染等行业,实现了对Cr(VI)资源的回收利用。

2 含铬废水水质、水量

根据调研及取样分析,该钢铁厂所产生的含铬废水主要包含钢铁喷涂、酸洗、清洗等工序产生的废水,主要含有硼酸、磷酸、硅酸、硫酸、铁、铬等物质,主要指标见表1。

表1 含铬废水水量、水质  
Tab.1 Chromium-containing wastewater quantity and quality

项 目	水量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	pH值	温度/ ℃	Cr(VI)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg·L <sup>-1</sup> )	BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	总铁/ (mg·L <sup>-1</sup> )
含铬废水	70~75	2~3	≤50	100~350	2 100	0.5~1.5	1~2.5	0.3~0.8	10~25	0.3~0.8

有文献表明<sup>[7-9]</sup>,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的存在对纤维吸附Cr(VI)具有重要影响。在废水中Cr(VI)以Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>、HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup>和CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>三种形式存在,离子交换纤维对共存离子的吸附顺序为Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>>HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Cl<sup>-</sup>,由于含铬废水pH值为2~3,呈强酸性,因此Cr(VI)主

要以Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>和HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup>形式存在,能够被离子纤维优先吸附并可将已经吸附的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>交换下来,达到较好的吸附效果。同时对取自废水收集池的含铬废水进行了验证性试验,结果表明其他共存离子的进、出水浓度几乎不变,该离子纤维对Cr(VI)具有良好

的选择吸附性,废水中其他物质不会对其产生竞争性吸附。

### 3 吸附转化系统结构与运行参数

按照含铬废水车间处理能力,确定设计进水量为  $70 \sim 83 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\text{Cr(VI)}$  为  $100 \sim 350 \text{ mg/L}$ 。由于该钢铁厂冷轧生产线含铬废水 SS 高达  $2\,100 \text{ mg/L}$ , 需先通过调节池及两级过滤器再进入纤维吸附柱。工艺流程如图 2 所示。

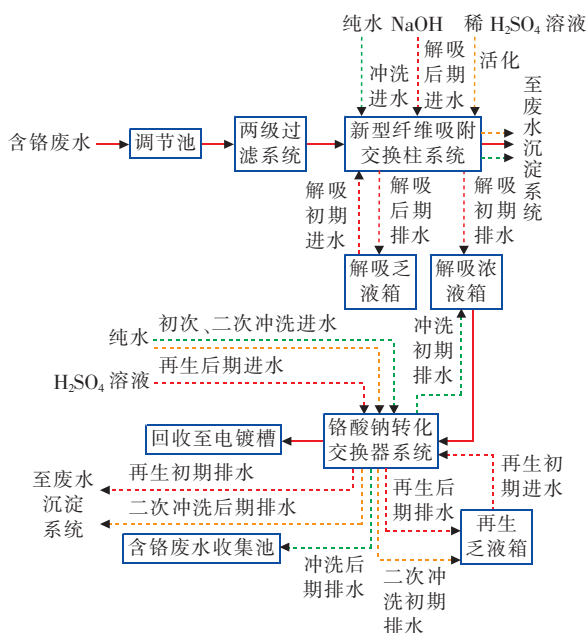


图2 吸附转化法回收Cr(VI)的工艺流程

**Fig.2 Flow chart of the recovery of Cr(VI) by adsorption conversion method**

### 3.1 新型纤维吸附系统

该系统主要由4套新型纤维吸附柱组成,如图3所示。

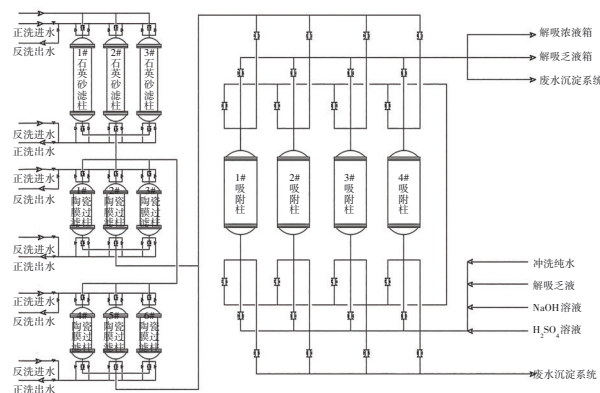


图3 纤维吸附交换系统

**Fig.3 Fiber adsorption exchange system**

废水经过预处理后进入纤维吸附交换器系统,主要处理单元结构与运行参数如下:

① 调节池。钢筋混凝土结构,尺寸为12 m×6 m×7 m,HRT为6 h。主要功能:使含铬废水进入系统前有较为稳定的流量和均匀的水质,充分发挥处理系统的吸附效果。

② 事故池。钢筋混凝土结构,尺寸为 24 m×6 m×7 m,HRT 为 12 h。主要功能:用于储存在短时间内进水水质突然恶化的含铬废水,避免对后续吸附系统带来过高的冲击负荷。

③ 两级过滤器。为防止废水中悬浮杂质对纤维吸附柱的损伤,设置两级过滤器。

a. 第一级为石英砂填料过滤器,3台,通过阀门的启闭实现两两并联运行。均质石英砂填料粒径2~4 mm,滤速10 m/h;石英砂过滤器高3 m,直径2.3 m,填料高1.4 m,水泵:IH80-50-200输送泵;出水SS $\leq$ 5 mg/L,可以脱除90%以上的SS。石英砂过滤器通过监测进、出口压差参数自动进行反洗,当压差达到0.07 MPa时,对过滤器进行强制反洗。反洗采用气水混合反冲洗,气洗强度为12~15 L/(s $\cdot$ m<sup>2</sup>),同时水以10~15 m/h的流速进行气水混合反洗15 min左右;反洗结束后用冲洗水进行正洗至出水SS为1 mg/L并保持10 min后冲洗结束,过滤器进入待机状态。

b. 第二级为高密度滤芯陶瓷膜过滤器,6台,5台同时并联运行,可以彻底拦截穿透石英砂过滤器的细小SS颗粒。该过滤器采用36通道氧化铝、氧化锆陶瓷滤芯,每个过滤器由5组平行的膜单元构成,每个膜单元由4个装有106根膜管的膜壳并联组成,膜管尺寸: $\varnothing 50\text{ mm}\times 1\,200\text{ mm}$ (膜面积 $0.28\text{ m}^2$ ),膜孔径 $60\text{ nm}$ ,纯水膜通量为 $658\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ;可以脱除98%以上的SS,出水 $\text{SS}\leq 1\text{ mg/L}$ 。膜面流速控制在 $3\sim 4\text{ m/h}$ ;当过滤器中流速降低至 $3\text{ m/h}$ 以下,对过滤器进行停机反洗:在 $0.02\text{ MPa}$ 的压力下用冲洗水进行反冲洗至出水流速稳定,再用复合清洗剂(烷基酚聚氧乙烯醚、十二烷基苯磺酸钠、三乙醇胺等)对过滤器浸泡 $2\sim 4\text{ h}$ ,最后用清水水正洗,将污染物有效去除,待膜通量稳定后进入待机状态。

④ 吸附纤维交换柱。设4套吸附装置,吸附纤维交换柱设在吸附塔中。吸附塔尺寸: $R=3.0\text{ m}$ 、 $H=4.0\text{ m}$ ;吸附纤维材质:腈纶基纤维(化学接枝,聚丙烯腈含量 $>85\%$ )与多乙烯多胺反应并用HCl质子



化形成多胺纤维[相比于传统单一基团纤维结构,多胺基结构能够提供更多的基团共同参与Cr(VI)吸附],纤维直径40~60  $\mu\text{m}$ ,胺基交换容量(6.7 $\pm$ 0.5) mmol/g,多胺纤维对Cr(VI)的饱和吸附量约320 mg/g,穿透吸附量约250 mg/g;吸附塔材质:碳钢Q235+PE(钢衬PE),吸附柱内流速为2.4~2.9 m/h;水泵:IH80-50-200输送泵;吸附纤维柱工作时,3套处于串联吸附状态,同时有一套处于解吸操作或备用状态。

### 3.2 铬酸钠溶液转化系统

铬酸钠溶液转化交换器内装填有阳离子交换树脂,其系统组成与吸附系统类似,由铬酸钠解吸浓液箱进水。

主要处理结构与运行参数:阳离子交换树脂,含4套阳离子交换树脂转化柱,工作时2套处于串联转化状态,1套处于冲洗、再生操作状态,1套处于备用状态。树脂骨架为苯乙烯基共聚物,活性基团为磺酸基,粒径 $\leq 1.2$  mm,膨胀率 $\leq 10\%$ ,总交换容量2.0 mmol/mL,交换柱尺寸为 $R=1.2$  m、 $H=3$  m,交换柱材质为碳钢Q235+PE(钢衬PE),交换柱内流速为2.15 m/h。

当阳离子交换树脂吸附完成后,依次通过冲洗水、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ (质量分数为4%~10.2%)、纯水对阳离子交换树脂进行冲洗并恢复其活性。

通过对系统末端转化柱的pH值进行在线监测来确定阳离子交换树脂转化周期,当转化柱串联系统末端出水pH值 $>1.5$ 时,此时阀门自动启闭使待机转化柱接入转化柱串联系统末端,串联首端吸附柱进入冲洗再生状态,经过多次监测单个纤维柱吸附周期6~8 h。

## 4 系统运行参数的优化

为了确定纤维吸附系统的最优工况,在现场进行了连续运行试验研究,确定了吸附柱的最优吸附周期及转化柱的最适pH值。

### 4.1 吸附柱吸附周期的确定

吸附纤维交换柱吸附周期通过监测吸附柱末端出水Cr(VI)浓度来确定。系统内部采用纤维柱分时段运行,通过阀门自动启闭将串联首端完成吸附的纤维柱退出工作系统,进入冲洗解吸再生阶段,同时将再生后的纤维柱接入串联工作系统的末端,保证串联工作系统中同时有3根吸附柱运行。

进水Cr(VI)浓度保持在350 mg/L左右,监测纤维柱在不同工况下吸附系统末端出水Cr(VI)浓度的变化,结果见表2。

表2 不同工况下纤维柱的出水Cr(VI)浓度

Tab.2 Effluent Cr(VI) concentration of fiber column under different working conditions

每个纤维柱工作时间/h	5	6	7	8	9	10
末端出水Cr(VI)浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.037	0.038	0.040	0.042	0.048	0.121

由表2可知,单个纤维柱工作时间在9 h以内,出水Cr(VI)浓度能够满足排放标准,工作时间超9 h后吸附效果逐渐减弱,无法满足《钢铁工业水污染物排放标准》(GB 13456—2012)中Cr(VI)浓度 $<0.05$  mg/L的要求,因此最终确定单个纤维柱工作时间为9 h。

### 4.2 转化柱pH值的确定

铬酸根离子在不同pH值下存在多种形态,其中重铬酸( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ )是可用于电镀、皮革、印染等各类行业的重要生产原料,因此本研究将通过调控转化柱内的pH值,提高重铬酸根的转化率,实现资源化利用。为此,采用FT-IR红外光谱仪测定不同pH值下溶液中铬酸根离子的不同形态,评价转化柱的运行效率<sup>[6]</sup>,结果如图4所示。

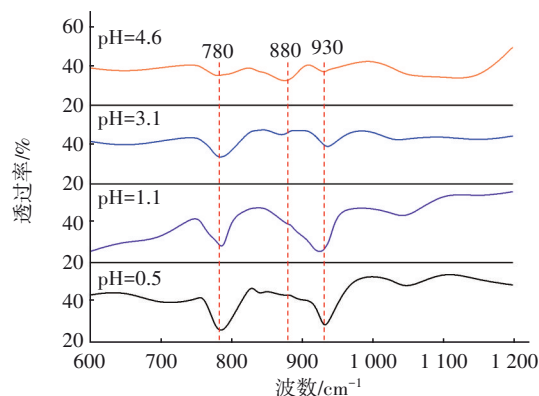


图4 不同pH值下转化系统出水的红外谱图

Fig.4 FT-IR spectrum of the effluent from the conversion system at different pH values

由图4可知,溶液pH值由0.5增至4.6时,在880  $\text{cm}^{-1}$ 处 $\text{CrO}_4^{2-}$ 的 $\text{Cr}=\text{O}$ 键振动特征峰峰值逐渐增强,溶液中 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 向 $\text{CrO}_4^{2-}$ 转化, $\text{CrO}_4^{2-}$ 浓度增大,同时可观察到出水溶液颜色逐渐变成橙黄色。pH值 $<1.1$ 时,可明显观察到780  $\text{cm}^{-1}$ 和930  $\text{cm}^{-1}$ 处的

$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 的 $\text{Cr}=\text{O}$ 键特征峰, $\text{CrO}_4^{2-}$ 的 $\text{Cr}=\text{O}$ 键振动特征峰几乎消失,此时 $\text{Cr}(\text{VI})$ 以 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 形态存在,且随着 $\text{pH}$ 值继续降低,峰值变化趋势不大。考虑到实际运行过程中转化系统进水初始 $\text{pH}$ 值为2~4,且经过转化树脂后出水 $\text{pH}$ 值为0.7~1.2,能够确保出水 $\text{Cr}(\text{VI})$ 主要以 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 形式存在,因此确定无需再投加酸碱调节 $\text{pH}$ 值,即可满足含铬废水资源化的需求。

## 5 运行效果及经济分析

### 5.1 运行效果

经过一段时间的运行与调试后,将本系统加入正式生产线,冷轧车间排放废水中的 $\text{Cr}(\text{VI})$ 及总铬浓度能够稳定达标。含铬废水 $\text{Cr}(\text{VI})$ 为200~350 mg/L,经过吸附转化系统后,冷轧车间出水 $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度保持在0.03~0.048 mg/L,车间废水处理系统出水总铬在0.1 mg/L以下,满足《钢铁工业水污染物排放标准》(GB 13456—2012)。该系统正式运行后的进、出水 $\text{Cr}(\text{VI})$ 60 d的监测结果见图5。

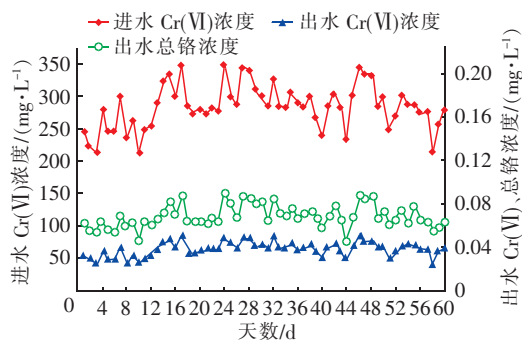


图5 进、出水 $\text{Cr}(\text{VI})$ 浓度变化

Fig.5 Concentration change of  $\text{Cr}(\text{VI})$  in influent and effluent

### 5.2 资源转化利用效果

吸附转化系统加入正式生产线后,铬泥的月均产量由83.4 t降为8.1 t,减少了90%以上,避免了每年大量的铬泥危废出厂;每月可产出重铬酸溶液210.8 t,溶液 $\text{pH}$ 值维持在1左右,所产出的铬酸溶液相当于铬酸酐投加量为60~85 g/L的溶液。由《电镀铬工艺》(HB/Z 5072—1992)标准可知,重铬酸溶液经过不同程度的浓缩处理后可销售至电镀装饰铬、硬铬等企业;还可将高浓度浓缩液补充至本厂区内电镀槽液(铬酸的质量浓度约为400 g/L),仅此一项就可节省铬酸酐13万元/月。

### 5.3 经济效益分析

对含铬废水车间加入吸附转化系统前后的铬泥外送费、产品外销费等进行分析,结果见表3(运行时间按每年300 d计算)。

表3 经济效益分析与对比

Tab.3 Analysis and comparison of economic benefit

万元 $\cdot\text{a}^{-1}$

项 目	传统工艺	转化吸附系统	节约成本
铬泥外送费	442	42.9	399.1
总药剂费	76.2	44	32.2
产品外销费		50(收入)	50(收入)
自来水、管网维护等综合费用	72.3	33	39.3
总计			520.6

由表3可知,在新工艺中无需再投加药剂对 $\text{pH}$ 值进行调节;药剂投加量大大减少,每年按运行300 d计算,可节省药剂费约32.2万元/a;铬泥的出厂处置费用为5300元/t,经过吸附转化系统后铬泥产生量减少了753 t,节省成本约399.1万元/a。

此外,在资源化利用方面,系统产出的铬酸溶液能够直接用于厂区内内部电镀车间,剩余的重铬酸溶液通过包装外售至兄弟企业可产生约5万元/月的额外收入;另外,吸附转化系统用水量相比于原工序大幅减少,按自来水价为0.31元/ $\text{m}^3$ 计算,每月可节省约3175元;同时免交了排水管网建设与维护管理费、因出水水质不稳定而可能的超标外排环保罚款等费用。考虑扣除 $\text{Cr}(\text{VI})$ 吸附转化系统的安装运行与维护折旧(按10年折旧计,折旧费40万元/a),并依此按运行时间为每年300 d计算,共计节省处理费约520.6万元/a。

## 6 结论

某钢铁厂生产线加入 $\text{Cr}(\text{VI})$ 吸附转化系统后总体运行效果较好,铬泥产量明显减小,能够对 $\text{Cr}(\text{VI})$ 进行源头回收并资源化利用得到铬酸溶液。通过对吸附系统的最优吸附时间与转化系统的最适 $\text{pH}$ 值的确定,出水 $\text{Cr}(\text{VI})$ 及总铬浓度分别保持在0.048、0.1 mg/L以下,稳定达到《钢铁工业水污染物排放标准》(GB 13456—2012)。吸附转化系统不仅能够达到水质排放标准,而且可带来巨大的环保与经济效益,为 $\text{Cr}(\text{VI})$ 的源头回收与资源化利用提供了新的思路。

## 参考文献:

- [1] 杜宁,余太平,何延召,等. 冶金工业含铬废水处理工艺优化及改造应用[J]. 中国给水排水,2020,36(17): 90-94.
- DU Ning, YU Taiping, HE Yanzhao, *et al.* Optimization and application of chromium containing wastewater treatment in metallurgy industry [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(17): 90-94 (in Chinese).
- [2] 岳丽芳,王春慧,周红星,等. 钢铁企业综合废水处理及回用工程实例[J]. 水处理技术, 2019, 45(3): 133-136.
- YUE Lifang, WANG Chunhui, ZHOU Hongxing, *et al.* Engineering project of comprehensive wastewater treatment and reuse of iron and steel enterprise [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(3): 133-136 (in Chinese).
- [3] PRASETYANINGRUM A, JOS B, DHARMAWAN Y, *et al.* The influence of electrode type on electrocoagulation process for removal of chromium (VI) metal in plating industrial wastewater [J]. Journal of Physics (Conference Series), 2018, 1025: 012126.
- [4] 范力,张建强,程新,等. 离子交换法及吸附法处理含铬废水的研究进展[J]. 水处理技术, 2009, 35(1): 30-33.
- FAN Li, ZHANG Jianqiang, CHENG Xin, *et al.* Progress of treatment of wastewater containing chromium by ion-exchange method and adsorption method [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(1): 30-33 (in Chinese).
- [5] 艾恒雨,韩璐,卫博,等. 铁屑/CO<sub>2</sub>体系处理含铬(VI)废水的研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(23): 111-113.
- AI Hengyu, HAN Lu, WEI Bo, *et al.* Treatment of chromium (VI)-containing wastewater by iron scrap / CO<sub>2</sub> system [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(23): 111-113 (in Chinese).
- [6] 刘桂华,张玉峰,周秋生,等. 铬酸钠溶液酸化过程研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1227-1232.
- LIU Guihua, ZHANG Yufeng, ZHOU Qiusheng, *et al.* Acidification process of sodium chromate solution [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(4): 1227-1232 (in Chinese).
- [7] 何炳林,黄文强. 离子交换与吸附树脂[M]. 上海:上海科技教育出版社, 1995: 155-168.
- HE Binglin, HUANG Wenqiang. Ion Exchange and Adsorption Resin [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House, 1995: 155-168 (in Chinese).
- [8] SHARMA S K, PETRUSEVSKI B, AMY G. Chromium removal from water: a review [J]. Journal of Water Supply (Research and Technology-Aqua), 2008, 57(8): 541-553.
- [9] 黄文强. 吸附分离材料[M]. 北京:化学工业出版社, 2005: 95-102.
- HUANG Wenqiang. Adsorption Separation Material [M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2005: 95-102 (in Chinese).

作者简介:张一博(1996- ),男,河南郑州人,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制。

E-mail: 1158606392@qq.com

收稿日期:2021-01-06

修回日期:2021-03-10

(编辑:衣春敏)

深入实施乡村振兴战略,促进人水和谐