

# 沉淀+反渗透+纳滤技术处理 氯化钛渣废水中试研究

王慧雅\*

(南京工程学院环境工程学院,江苏南京211167)

**摘要:**设计了一套集重金属去除、氯化钠回收、大量固体废物再利用为一体的工艺并进行中试研究。调节 pH 至 6~7 和 9~10 可分别去除大部分  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Sn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等重金属离子,再串联反渗透和纳滤工艺,控制浓缩倍数 5.3 左右时截留率分别为 97.7% 和 99.7%,终端串联的二级纳滤使 NaCl 浓度达到 79 092.5 mg/L。通过实验分析可知,该工艺可对溶液进行提纯、富集,使溶液中的氯化钠浓度、纯度均达到相应标准,从而实现氯化钠的回收利用。

**关键词:**氯化钛渣;反渗透;纳滤;回收利用

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)07-0211-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.07.045

## Pilot study on treatment of titanium chloride slag wastewater by precipitation/reverse osmosis/nanofiltration

WANG Hui-ya\*

(School of Environmental Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** A technology integrating with removing heavy metal, recovering sodium chloride and reusing large amount of solid waste is designed, and pilot study is carried out for it. Most of heavy metal ions such as  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Sn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  can be removed by adjusting pH to 6-7 and 9-10, respectively, and then reverse osmosis and nanofiltration in series. The interception rate reaches 97.7% after reverse osmosis and reaches 99.7% finally as the concentration multiple is controlled at around 5.3. NaCl concentration can reach 79 092.5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  due to the second-stage nanofiltration in series terminal. Through the experimental analysis, it can be known that this process can purify and enrich the solution, and make the concentration and purity of sodium chloride in the solution reach the corresponding standards, so as to realize the recovery and utilization of sodium chloride.

**Key words:** chloride titanium slag; reverse osmosis; nanofiltration; recycle

氯化钛渣是氯化法制钛白粉的中间产物,因强酸性且含有大量各类重金属物质,如铁、铝、锰、铬、钒、钾、钠等,所以很难对其进行处理<sup>[1-3]</sup>。但氯化钛渣中含有大量的有回收利用价值的成分,如氯离子、钠离子、碳粉、其他矿物质等,对于氯化钛渣的处理及回收利用的研究有很重要的意义<sup>[4-6]</sup>。本文中针对氯化钛渣废水的处理及其回收设计了一套集重金属去除、氯化钠回收、大量固体废物的再利用的工艺。该工艺通过调节 pH 沉淀法去除重金属离子,利用陶瓷膜、反渗透膜、纳滤膜等膜工艺对溶液进行提纯、富集,使得溶液中的氯化钠浓度、纯度都达到一定的要求,从而实现氯化钠的回收利用<sup>[7-10]</sup>。本研究对于氯化法钛白粉的生产、自然环境的保护、资源的回收再利用有着十分重要的意义。

## 1 实验

### 1.1 实验仪器

单膜陶瓷膜设备, JW-T-05-13, 江苏久吾高科; 双膜陶瓷膜设备, JW-05-14, 江苏久吾高科; 有机膜低压双膜管并联设备, JW-Y-2540-21, 江苏久吾高科; 有机膜高压双膜管串联设备, JW-Y-4040-17, 江苏久吾高科; 陶瓷膜, 50 nm 17 通道型, 江苏久吾高科; 低压反渗透膜, DURASLICK RO 2540, 美国 GE 公司; 高压反渗透膜, DURASLICK RO 4040, 美国 GE 公司; 纳滤膜, DURASLICK NF 2540, 美国 GE 公司。

### 1.2 实验药剂

氢氧化钠, 四川天原集团; 碳酸钠, 国药集团化

收稿日期:2019-09-18; 修回日期:2020-05-08

基金项目:南京工程学院面上创新项目(CKJB201507)

作者简介:王慧雅(1978-),女,硕士,副教授,研究方向为 PVDF 复合膜的制备及其应用,通讯联系人,025-86118974,54310502@qq.com。

学试剂公司;浓盐酸,威博化工有限公司。

### 1.3 中试步骤

(1)先称取 60 kg 氯化钛渣,按 1:15 加纯水搅拌均匀,用片碱调 pH 至 6~7 浸泡 5 h 以上。

(2)一次过滤:氯化钛渣废水第一次过滤,用陶瓷膜过滤上述的上清液,陶瓷膜的浓液和浸泡的底渣用离心机过滤,得滤液和渣,滤液回到陶瓷膜过滤,渣再次用水清洗浸泡。取第一个滤液样(500 mL)和陶瓷膜浓液样分析,记录下滤液体积。

(3)水洗:氯化钛渣第二次过滤后的渣再次水洗,用 RO 清液(量不够用纯水)90 kg 进行洗涤,搅拌均匀浸泡 5 h 以上。

(4)二次过滤:氯化钛渣第二次过滤,用陶瓷膜和离心机二次过滤混合后得滤液和渣,记录下滤液体积。

(5)二次中和:用 NaOH 和碳酸钠将滤液 pH 调至 9~10,记下用量。

(6)二次中和渣过滤:对以上的中和渣浆料用陶瓷膜进行过滤,得到滤液和渣,记下滤液体积。

(7)对以上二次陶瓷膜清液用浓盐酸调 pH 至 4~5。

(8)低压反渗透:采用反渗透膜进行单价离子的浓缩试验。考察通量、压力、离子截留率、浓缩倍数随过滤时间的变化趋势。低压反渗透浓缩 5.3 倍

左右,记最终的清液和浓液的离子浓度和电导率。低压反渗透清液用作第二次泡渣。

(9)一次纳滤:低压反渗透浓液过纳滤,浓缩倍数取 3~10 倍。

(10)高压反渗透:取纳滤清液过高压反渗透,浓缩 2~5 倍,压力 8~10 MPa,取清液和浓液。高压反渗透清液用作第二次泡渣。

(11)二次纳滤:将高压反渗透浓液过第二次纳滤,取清液做检测,浓液循环至下一批次第二次泡渣。

本中试实验工艺流程和设备流程如图 1、图 2。

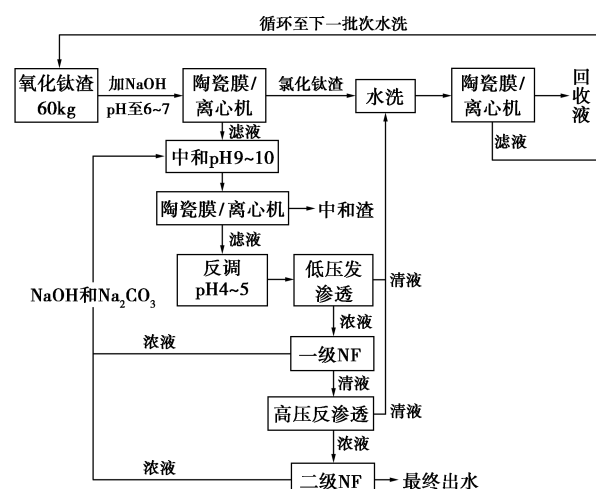


图 1 工艺流程

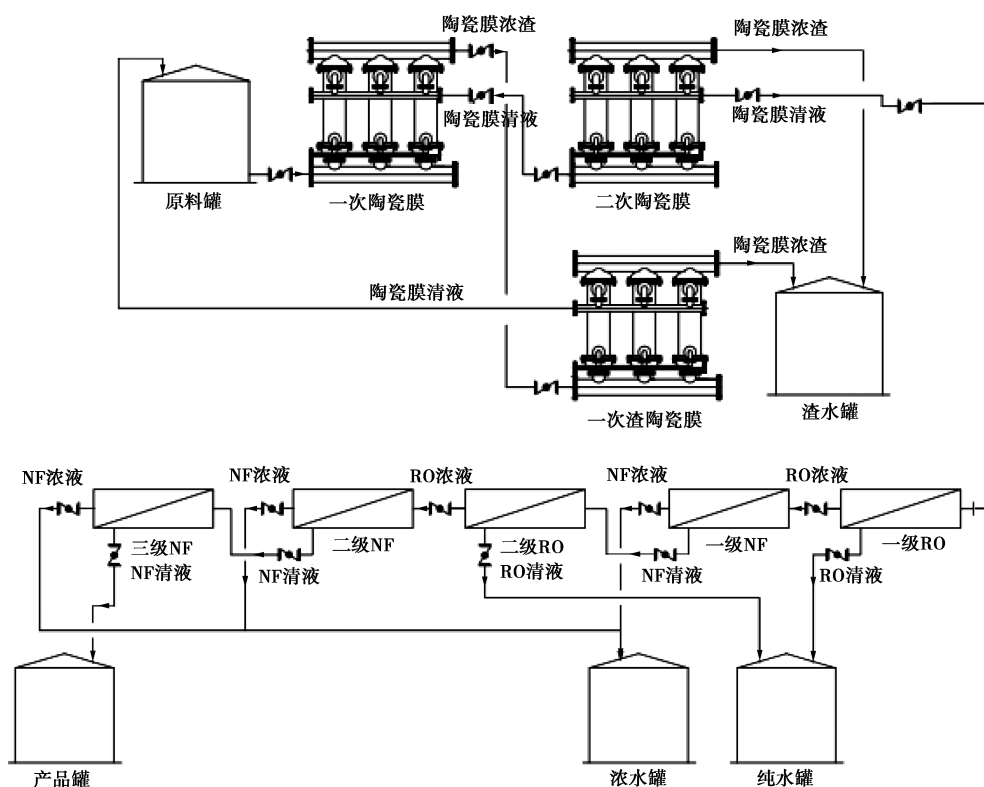


图 2 设备流程

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉淀

实验中将沉淀工艺分为2步进行,第一步将氯化钛渣一次水洗浆液使用片碱调节 pH 至 6~7,第二步将一次陶瓷膜清液使用碳酸钠以及氢氧化钠调节 pH 至 9~10。

从表 1 数据可知,一次沉淀调 pH 6~7 时,可以将  $\text{Sn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cr}$ (各价态)、 $\text{Ti}^{4+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Sb}$ (各价态)以及大部分的  $\text{Cu}^{2+}$  除去。而物料中的  $\text{Mn}$ (各价态)、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等金属离子在二次沉淀中被去除。

表 1 各金属离子氢氧化物沉淀完全沉淀 pH

金属离子	沉淀 pH	金属离子	沉淀 pH
$\text{Fe}^{3+}$	3.2	$\text{Al}^{3+}$	4.7
$\text{Cr}$ (各价态)	5.6	$\text{Cu}^{2+}$	6.7
$\text{Mn}$ (各价态)	9.6	$\text{Mg}^{2+}$	10.6
$\text{Zn}^{2+}$	8.04	$\text{Sb}$ (各价态)	1.85
$\text{Ti}^{4+}$	2.33	$\text{Pb}^{2+}$	9.04
$\text{Sn}^{2+}$	2.57		

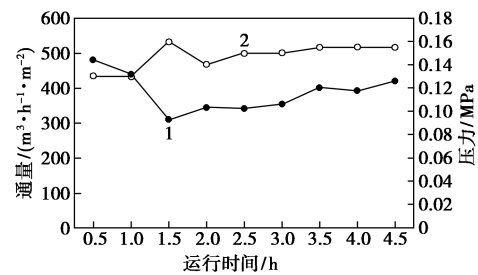
#### 2.1.1 一次沉淀

进行实验时,称取 60 kg 氯化钛渣,加 900 L 纯水进行水洗,充分搅拌以后,静置 6 h,将浆液通过陶瓷膜过滤,对于底渣进行板框压滤。

将氯化钛渣水洗浆液用氢氧化钠调整 pH 至 6~7,使水中部分金属离子发生沉淀,如  $\text{Sn}^{2+}$ 、 $\text{Sn}^{4+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Cr}$ (各价离子)、 $\text{Cu}$ (各价离子)等。使水中大量的悬浮物发生沉淀,发生明显的上下分层现象,上层呈现无色清液,下层为沉淀以及底渣。将上清液通过陶瓷膜过滤,实验数据如表 2 所示,并且将下层沉淀及底渣通过板框压滤。通过图 3 观察可

表 2 一次沉淀陶瓷膜运行数据

时间	温度/°C	流量/(L·h <sup>-1</sup> )	压力/MPa	通量/(L·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )
9:00	17	2680	0.130	480
9:30	18	2600	0.130	440
10:00	19	2950	0.160	310
10:30	20	2920	0.140	345
11:00	22	2920	0.150	341
11:30	20	2870	0.150	354
12:00	20	2910	0.155	401
12:30	19	2880	0.155	392
13:00	19	2880	0.155	421



1—通量;2—压力

图 3 一次沉淀陶瓷膜压力及通量随时间变化折线图

得,通量在刚开始进行过滤时有一定的下降,压力有一定的上升。当过滤一段时间以后,通量以及压力趋于稳定,没有发生大幅度的变化。可以说明该沉淀处理有利于工艺的长期稳定运行,达到了实验目的。

#### 2.1.2 二次沉淀

将一次陶瓷膜清液进行收集后,用碳酸钠调节 pH 至 9~10,使清液中剩余的重金属离子发生沉淀,主要去除水中的  $\text{Mg}^{2+}$  以及各价锰离子。

陶瓷膜工艺属于整套工艺的预处理,将含有大量重金属离子以及各种固态杂质的氯化钛渣废水进行膜分离处理,使废水变成符合高压有机膜设备处理的清液<sup>[11-14]</sup>。陶瓷膜工艺中需对氯化钛渣进行水洗、调 pH 沉淀、静置等处理,且易发生膜污染现象,因此该处理环节是决定整个工艺能否进行大批量连续化生产的关键。

从表 3 中可发现,通量随时间变化非常小,从最开始的 550 L/(h·m<sup>2</sup>) 下降到结束时的 525 L/(h·m<sup>2</sup>),而且通量较大,说明该沉淀物料易过滤,膜污染较小。图 4 表明压力随时间变化也较小,从开始时的 0.12 MPa 到结束时的趋于稳定的 0.15 MPa。二次沉淀时的过滤效率也大幅提升,膜污染现象减轻。并且通量以及压力随时间变化很小,适合设备长期大批量的运行。

表 3 二次沉淀陶瓷膜运行数据

时间	温度/°C	流量/(L·h <sup>-1</sup> )	压力/MPa	通量/(L·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )
10:55	17	3000	0.125	550
11:25	20	4200	0.155	541
11:55	19	4400	0.145	555
13:10	17	4000	0.185	540
13:40	18	4000	0.150	530
14:10	20	4000	0.150	525

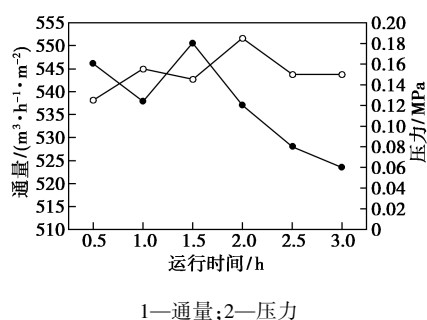


图 4 二次沉淀陶瓷膜压力及通量随时间变化折线图

### 2.2 反渗透

本实验中反渗透工艺的目的在于,使物料中的氯化钠经过低压反渗透和高压反渗透,浓缩倍数控制在 5.3 左右,氯化钠的浓度达到目标要求。同时经过低压和高压反渗透后,物料中其他杂质的浓度也上升,再经过纳滤工艺可以最大程度地提高物料的纯度,在保证物料纯度的同时提高氯化钠的浓度。

在经过二次沉淀以后,物料的 pH 在 9~10,随着重金属离子的浓度越来越高,部分重金属离子在较高 pH 的环境下会达到溶度积发生沉淀反应,产生不溶于水的盐结晶。反渗透膜对于物料的固含量要求非常高,如果物料中含有大量的结晶物质,会对反渗透膜造成非常严重的膜损伤,易使反渗透膜失去反渗透效果。

因此,需先将二次陶瓷膜清液用浓盐酸调节 pH 至 4~5,使物料呈弱酸性。pH 调整的目的在于使物料中的 OH<sup>-</sup> 降低,减少浓缩过程中沉淀物的析出,避免了对反渗透膜的损坏<sup>[15-16]</sup>。

结合表 4 和图 5 可以发现,膜通量随着时间逐渐下降,从开始反渗透时的 108 L/h 到结束时的 54 L/h;由于通量太低,所以对反渗透设备进行清洗,通量恢复到 112 L/h,在结束时又下降到 41.4 L/h。而压力随着时间的上升呈现增长趋势,从一开始的 3.1 MPa 到结束时的 3.5 MPa。经过分析可得,反渗透工艺随着物料浓缩倍数的逐渐提升,膜通量下降迅速;但是由于工厂中为大批量连续性生产,物料会不断地进行回流、循环、混合,浓缩倍数不会提升得非常快,通量也不会降低很多。

表 4 低压反渗透水通量

时间	温度/℃	流量/(L·h <sup>-1</sup> )	进口压/出口压/MPa	回流流量
9:30	16	108.0	3.2/3.0	1.0
10:00	18	90.0	2.8/2.6	1.1
10:30	24	93.6	2.8/2.6	1.1

11:00	24	81.0	2.7/2.5	1.1
11:30	26	69.0	2.8/2.6	1.1
13:00	24	75.6	2.9/2.7	1.2
13:30	26	79.2	2.9/2.7	1.2
14:00	30	73.5	2.9/2.7	1.3
15:00	32	54.0	3.2/3.0	1.3
9:00	18	112.0	3.2/3.0	1.2
9:30	18	108.5	3.6/3.4	1.0
10:30	20	102.6	3.2/3.0	1.1
11:00	28	82.8	3.4/3.2	1.1
11:30	28	74.0	3.4/3.2	1.1
13:00	23	82.8	3.5/3.3	1.1
13:30	28	63.2	3.6/3.4	1.1
14:00	26	61.2	3.5/3.3	1.1
15:00	29	50.4	3.5/3.4	1.1
15:30	36	41.4	3.6/3.4	1.1

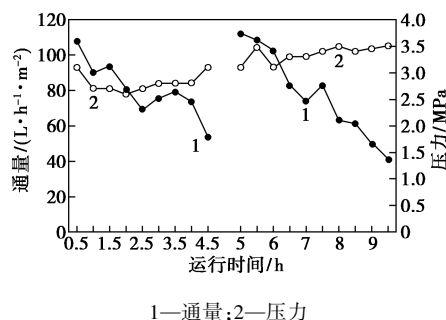


图 5 低压反渗透压力水通量折线图

通过表 5 发现,膜通量开始时随着压力的逐渐提高同步增长;结合图 6 可发现,当反渗透进行到中间时,通量逐渐下降,从最高时的 375 L/h 到结束时的 135 L/h。而设备压力人为地从 4.6 MPa 到结束时的 11.05 MPa。

表 5 高压反渗透水通量

时间	温度/℃	流量/(L·h <sup>-1</sup> )	进口压/出口压/MPa	通量/(L·h <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )
15:10	23	1500	4.7/4.5	275
15:30	23	1800	6.2/6.0	300
15:45	25	1600	7.2/7.0	330
16:00	25	1600	8.1/8.0	375
16:10	26	1700	10.1/10.0	255
16:15	27	1700	10.1/10.0	180
16:30	28	1750	11.1/11.0	135

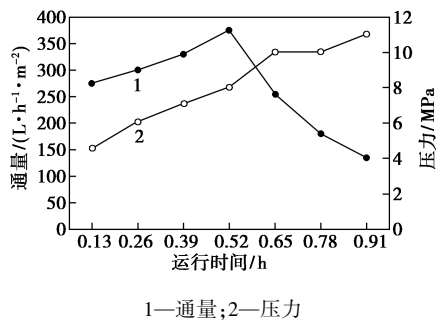


图6 高压反渗透水通量压力折线图

保持高压反渗透高压力高通量的目的:当通量降低到 100 L/h 左右时,由于浓缩倍数的提升,反渗透膜的截留率会降低;所以当通量下降时提高设备的压力,可以保证反渗透膜的截留率,使氯化钠尽可能地截留在浓液之中,从而使氯化钠的浓度最大化地提高。

### 2.3 纳滤

在本实验中共有两级纳滤,分别在低压分渗透

后和高压反渗透后。低压反渗透后经过纳滤,是因为经过低压分渗透后,浓液中的重金属离子经过反渗透的作用被富集浓缩,使得重金属离子的浓度升高数倍。如果在进入到高压反渗透继续浓缩,很有可能会生成沉淀物质,由于高压反渗透设备的压力非常高,如果物料中含有颗粒状杂质会对反渗透膜产生严重的破坏<sup>[17-18]</sup>。同时不能透过反渗透膜的杂质浓度也升高,为了去除物料中除氯化钠的其他高价盐及杂质,需要经过一级纳滤除去这些杂质。由于去除率并非 100%,所以还会有一定浓度的金属离子残留在物料中。而二级纳滤在高压反渗透之后,因为高压反渗透后物料再次浓缩,重金属离子浓度升高。在整个工艺的末端串联二级纳滤,进一步降低重金属离子浓度,使物料的纯度到达相应要求,最终获得的浓液会被送至氯碱厂。表6为本中试实验中各处理单元出水的离子浓度。以二级纳滤清液数据为最终目标(加粗标出)。

表6 各处理单元处理效果

mg/L

分析指标	一次陶瓷膜清	二次陶瓷膜清	低压RO清	低压RO浓	低压RO截留率%	高压RO混清	高压RO浓	高压RO截留率%	NF1清	NF1浓	NF2清	NF2浓
Ba	1.608	1.699	0.07	7.703	99.1	0.151	13.23	98.86	0.299	12.54	0.048	3.042
Cr	0.004	0.001	—	0.015	100	—	0.026	100	0.002	0.104	0.001	0.006
Mn	0.008	0.007	0.007	0.068	89.7	0.007	0.086	91.25	0.025	0.347	0.003	0.103
Pb	0.025	—	0.022	0.236	91.53	—	0.008	0.008	—	—	0.002	—
Si	0.189	0.168	—	0.315	100	0.55	0.586	5.17	0.080	1.747	0.354	0.287
Ti	—	0.023	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sn	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	0.032	—	0.005
Zn	0.076	0.047	0.049	0.059	—	0.067	0.271	75.18	0.114	0.133	0.092	0.134
Al	29.54	33.85	0.444	160.8	99.73	0.133	288	99.95	0.407	1198	0.084	17.62
Ca	101.5	96.64	13.74	469.3	99.21	11.32	827.2	98.63	34.07	3295	0.903	154.8
Mg	1.537	0.504	1.225	1.55	21.29	0.352	3.947	91.08	0.639	30	0.899	8.138
Fe	0.026	0.041	0.047	0.091	56.04	0.003	0.202	98.5	0.002	0.706	0.003	0.048
Cu	0.012	0.005	0.003	0.003	100	—	0.028	100	0.003	0.012	—	0.012
Sr	0.965	0.941	—	4.615	100	0.095	8.116	98.83	0.162	30.4	0.046	1.034
V	0.013	0.015	—	0.013	100	0.012	0.023	—	—	0.081	0.003	0.003
Na	2408	2427	53.41	13030	99.59	664.3	23310	97.15	20080	28600	14190	23810
B	0.051	—	0.284	0.199	—40	—	0.419	100	0.254	0.596	0.219	0.251
K	18.55	18.29	7.179	88.06	91.86	7.525	152.5	95.07	123.4	188.4	93.41	156.2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	11.11	12.54	5.21	19.14	72.78	6.29	26.64	76.39	25.75	39.32	19.5	27
CL <sup>-</sup>	3988.13	3748.84	106.35	10103.25	98.95	909.29	59288.48	97.45	27651	46262.25	80235.3	9902.35
HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	65.46	0	0	8.18	100	8.18	40.91	80	0	0	0	8.18
NaCl	6124.7	6173.0	135.8	33141.5	99.59	1689.6	75801.5	97.15	51073	72743.47	79092.5	10159.3

### 3 结论

设计沉淀+反渗透+纳滤多级组合工艺处理氯化钛渣,由实验数据可知本工艺不仅可使氯化钛渣废水达标排放,更可回收利用金属离子,实现固废资源化。根据各单元水质分析结果,得出以下结论。

(1)氯化钠的最终浓度为 79 092.5 mg/L,约为 7.9%,与最终目标 8% 只差 0.1%,可以说实验基本成功。因为考虑到工厂连续化大批量生产,盐的浓度会逐渐循环越来越高,在工厂中较容易实现 8%。

(2)各种金属离子以及硫酸根离子浓度均未超过上限,表明出水的纯度也达到了目标要求。

(3)在纳滤工艺中,目标离子氯离子的截留率较高,达到了 37.67%。因为纳滤膜本不能截留住氯离子,但是由于氯离子浓度较高,且设备压力不够,所以氯离子有小部分被截留在纳滤浓液中。但是由于该工艺为闭路循环,所以氯离子还在整个体系之中,没有浪费。

#### 参考文献

- [1] 廖鑫,杨绍利,马兰,等.钛白粉制备技术的研究及发展[J].粉末冶金技术,2019,(2):147-152.
- [2] Meng Jiaqing, Wu Jiexia, Zhu Jianhong, et al. Worldwide patent distribution of titanium dioxide by chlorination process[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2014, 46(1): 11-13, 16.
- [3] Liu Feisheng, Xie Gang, Yu Zhanliang, et al. Research and development of titania powders by chlorination technology[J]. Materials Review, 2014, 28(15): 113-118.
- [4] He Siqi, Peng Tongjiang, Sun Hongjuan. Titanium recovery from Ti-bearing blast furnace slag by alkali calcination and acidolysis[J]. JOM, 2019, 71(9): 3196-3201.
- [5] Lakshmanan V I, Sridhar R, Chen J, et al. Development of mixed-chloride hydrometallurgical processes for the recovery of value metals from various resources[J]. Transactions of the Indian

Institute of Metals, 2016, 69(1): 39-50.

- [6] 余代权.四氯化钛生产中废渣的回收利用实践[J].钛工业进展,2002,(1):42-46.
- [7] 涂弈州,李慧强,杨平.工业废水中重金属离子处理方法与零排放分析概述[J].四川化工,2015,18(2):47-49.
- [8] 陈红盛,叶裕才,白庆中,等.聚合物辅助陶瓷膜处理重金属废水[J].膜科学与技术,2005,25(6):45-50.
- [9] Nuray Ates, Nigmet Uzal. Removal of heavy metals from aluminum anodic oxidation wastewaters by membrane filtration[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(22): 22259-22272.
- [10] Tao Shan, Xu Yandong, Gu Jianqiang, et al. Preparation of high-efficiency ceramic planar membrane and its application for water desalination[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2018, 7(2): 117-123.
- [11] 刘祥,李琛.膜分离工艺在重金属废水处理中的研究现状[J].四川化工,2013,(4):16-19.
- [12] Chougui A, Zaiter K, Belouatek A, et al. Heavy metals and color retention by a synthesized inorganic membrand[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2014, (7): 817-822.
- [13] Ali A, Ahmed A, Gad A. Chemical and microstructural analyses for heavy metals removal from water meida by ceramic membrane filtration[J]. Water Sci Technol, 2017, 75(2): 439-450.
- [14] 刘欢,何德文,朱佳.陶瓷膜短流程工艺处理重金属废水[J].化工进展,2015,34(9):3467-3471,3494.
- [15] Laure Dramas, Jean-Philippe Croue. Ceramic membrane as a pre-treatment for reverse osmosis: Interaction between marine organic matter and metal oxides[J]. Desalination and Water Treatment, 2013, 51: 7-9.
- [16] Yurcjevskii E B, Solodyannikov V V. Computational-experimental verification of technologies of utilizaiton of the concentrate formed in the reverse osmosis water demineralization cycle[J]. Thermal Engineering, 2018, 65(7): 487-492.
- [17] Dr Ahmed F Al-Alawy, Miqat Hasan Salih. Comparative study between nanofiltration and reverse osmosis membranes for the removal of heavy metals from electroplating wastewater[J]. University of Baghdad Engineering Journal, 2017, 23(4): 1-21.
- [18] Liu Feini, Zhang Guoliang, Meng Qin, et al. Performance of nanofiltration and reverse osmosis membranes in metal effluent treatment[J]. Chinese Jouranal of Chemical Engineering, 2018, 16(3): 441-445. ■

(上接第 210 页)

(4)RSVP 流程保持较高的乙烷回收率和 CO<sub>2</sub> 冻堵裕量是以增加外输气中丙烷等重组分摩尔分数为代价。预冷分离温度保持在 10~15℃且预冷分离器液相分流比保持在 60%~80%较为适宜。

#### 参考文献

- [1] Campbell R E, Wilkinson J D. Hydrocarbon gas processing: US, 5568737A[P]. 1996-10-29.
- [2] Foglietta J H, Haddad H, Mowrey E R, et al. Cryogenic process utilizing high pressure absorber column: US, 6712880B2[P]. 2004-03-30.
- [3] Getu M, Mahadzir S, Long N V D, et al. Techno-economic analysis of

potential natural gas liquid (NGL) recovery processes under variations of feed compositions[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(7): 1272-1283.

- [4] Mark A. Hydrocarbon gas processing: US, 6516631B1[P]. 2001-08-10.
- [5] John Mark, Santa Ana. Ethane recovery methods and configurations for high carbon dioxide content feed gases: US, 20070300031 A1[P]. 2007-12-27.
- [6] John Mark, Santa Ana. Ethane recovery methods and configurations: US, 20160187058A1[P]. 2016-06-30.
- [7] Tahmasebi S, Abbasabadi A B, Chasemi N, et al. Investigation of various feed conditions on NGL recovery plant energy and exergy performance: A case study[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 83-89. ■