

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201906069

松嫩盆地北部林甸地热田供暖尾水处理试验

李永利¹, 于长生^{1,2}, 姜智超¹, 商洁¹, 张丽华¹

(1. 黑龙江省生态地质调查研究院, 黑龙江 哈尔滨 150027;

2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 将混入污染物和杂质的地热尾水直接排向地表水体, 会造成水、土环境污染, 也会造成水资源的浪费。为高效减少地热尾水中污染物, 实现供暖地热尾水的无害化排放, 以林甸县花园镇供暖地热尾水为例, 通过混凝沉淀、超滤、纳滤工艺开展供暖尾水处理的室内实验和中试试验研究, 连续监测获取地热尾水各处理工艺运行参数, 组合工艺稳定运行期间监测到溶解性总固体浓度由 5 824.7 mg/L 降为 432.40 mg/L、氯化物浓度由 3 010.13 mg/L 降为 194.16 mg/L、氟化物浓度由 1.57 mg/L 降为 0.31 mg/L、硼浓度由 4.04 mg/L 降为 1.62 mg/L。确定该区地热尾水处理的组合工艺为采用超滤运行压力为 0.1 MPa, 纳滤膜为陶氏 NF90, 操作压力为 0.60 MPa, 进水量为 0.8 m³/h。室内实验溶解性总固体去除率 90.21%~92.49%, 氯化物去除率 91.63%~93.02%, 氟化物去除率 96.81%, 硼去除率 55.20%~55.69%。中试试验溶解性总固体去除率为 92.62%; 氯化物浓度 200 mg/L, 氯化物去除率为 92.57%; 硼浓度 1.77 mg/L, 硼去除率为 55.7%, 以上实验结果均达到相关规范标准。试验证明本工艺处理松嫩盆地北部林甸地热田供暖尾水是可行的, 解决了供暖尾水处理中资源浪费和尾水回收利用的技术性问题, 为地热资源可持续利用提供了新的途径。

关键词: 松嫩盆地; 林甸地热田; 供暖尾水; 组合工艺; 水处理; 阶梯利用

中图分类号: P314.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)01-0188-07

An experimental study of heating tail water treatment of the Lindian geothermal fields in the Northern Songnen Basin

LI Yongli¹, YU Changsheng^{1,2}, JIANG Zhichao¹, SHANG Jie¹, ZHANG LiHua¹

(1. Heilongjiang General Institute of Ecological Geological Survey and Research, Harbin, Heilongjiang

150027, China; 2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Direct discharge of geothermal tail water mixed with pollutants and impurities to surface water bodies will cause water and soil environmental pollution and waste of water resources. In order to effectively reduce pollutants in geothermal tail water and realize the harmless discharge of geothermal tail water, this paper takes the geothermal heating tail water of the Huayuan Town in Lindian County to the south of Daqing as an example to carry out the experimental study of tail water treatment. Laboratory and pilot tests are conducted on heating tail water treatment by coagulation sedimentation, ultrafiltration and nanofiltration processes. The operating parameters of the geothermal tailwater treatment process are obtained through continuous monitoring. During the stable operation of the combined process, TDS is detected from 5 824.7 mg/L to 432.40 mg/L, chloride from 3 010.13 mg/L to 194.16 mg/L, fluoride from 1.57 mg/L to 0.31 mg/L, and boron from 4.04 mg/L to 1.62 mg/L. The best combined process for determining the geothermal tail water treatment in this area is to use the coagulant PAC with an ultrafiltration operating pressure of 0.1 MPa. The filter membrane Dow NF90 is employed, the operating pressure is 0.60 MPa, and the inflow is 0.8 m³/h. In this study, the TDS removal rate in the laboratory

收稿日期: 2020-01-04; 修订日期: 2020-03-01

第一作者: 李永利(1982-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事地下水资源计算与评价研究。E-mail: liyongli@126.com

通讯作者: 于长生(1973-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: 18724655788@126.com

experiment is between 90.21% and 92.49%, the chloride removal rate between 91.63% and 93.02%, the fluoride removal rate is 96.81%, and the boron removal rate is 55.20%–55.69%. The TDS removal rate in the pilot test is 92.62%, the product water chloride is 200 mg/L, the chloride removal rate is 92.57%, the product water boron is 1.77 mg/L, and the boron removal rate is 55.7%. The above experimental results have reached the relevant standard. The test results confirm that the process of treating tail water in the Lindian geothermal field in southern Songnen Basin is feasible. The treatment solves the technical problems of resource waste and tail water recycling in tail water treatment, and it provides a new way for geothermal resource utilization.

Keywords: Songnen Basin; Lindian geothermal fields; geothermal tail water; combined process; water treatment; cascade utilization

林甸县是地热资源开发利用集中区^[1-4], 地热水中富含多种矿物质和微量元素, 在经过不同方式的利用后, 其尾水中会不同程度的混入其他污染物和杂质, 地热尾水采用直排方式就近进入市政管网。近年来, 随着地热资源的开发利用和尾水的随意排放引起以下问题: (1) 较为清洁的供暖地热尾水资源没有充分利用, 造成资源浪费, 地下水位持续下降, 形成降落漏斗; (2) 地热尾水中的超标基本控制项目进入周边水体, 造成了严重的环境污染, 破坏地表水及其地下水环境^[5-6]。因此, 尾水处理势在必行, 目前地热尾水的处理方法主要有尾水回灌、生物处理法、物化处理法^[7-9]、尾水回灌^[10-15]。然而, 由于破坏热储层、二次污染、成本高等问题, 前人对于地热尾水处理方面的研究多停留在实验室研究阶段, 工程实例较少, 相关工艺技术还处于探索阶段。此外, 不同地域的地热流体水质特征、不同的开发利用途径均造成了尾水水质特征差异较大, 难以直接套用现有工艺对林甸县地热尾水进行处理。

本研究通过林甸地区地热尾水的水质特征和排放现状调研, 筛选林甸地区典型尾水中超标基本控制项目; 依据尾水回用标准设计混凝沉淀工艺、超滤工艺以及纳滤工艺等相应的处理工艺; 通过小试实验和中试试验相结合, 研究工艺的处理效能、超标基本控制项目的去除效率, 优化工艺设计参数和运行控制策略, 使处理后的地热尾水能够达到《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》(GB 20922-2007) 标准, 为林甸地区地热尾水工程化处理回用以及应用推广提供必要的技术支撑和科学依据。

1 研究区概况

1.1 地质概况

松嫩盆地位于我国东北平原北部, 是我国主要大型地热田之一, 是典型的中低温层状热储型地热田,

热储层为白垩系泉头组三、四段, 青山口组, 姚家组。盖层为白垩系嫩江组、明水组, 四方台组及第四系。松嫩盆地地热田地温较高, 地温梯度 $3.5 \sim 4.3$ $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。单井涌水量 $480 \sim 2\,880\text{ m}^3/\text{d}$, 出口温度 $28 \sim 61$ $^{\circ}\text{C}$, 初步估算松嫩盆地地热田年可采地热水资源量 $1 \times 10^8\text{ m}^3$ 以上^[16-19]。

花园镇位于林甸县南端, 距县城 23 km, 中央凹陷区齐家古龙凹陷, 地热田类型属中低温层状热储地热田。热储层为白垩系泉头组三、四段, 青山口组, 姚家组。热源是基底花岗岩体及深部热传导。热流体通道由林甸西断裂、林甸东断裂带, 以及与它们伴生的小断裂构成。

1.2 水化学基本特征

林甸地热田具有溶解性总固体(TDS)浓度大、高氯、高氟、高硼的特征, 且不同构造单元差异较大, 见表 1。

花园镇供暖主要利用林热 45 井, 井深为 2 050 m, 井口温度 55 $^{\circ}\text{C}$, 水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$ 型, pH 值 8.26。本研究选择花园镇地热尾水作为研究对象, 地热尾水检测结果见表 2。

地热尾水中 TDS、氯化物、硼指标高于《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》(GB20922-2007), 超标倍数分别为 1.91、7.6、3.04。为了有效利用地热尾水进行农田灌溉, 需对尾水进行脱盐处理, 重点分析 TDS、氯化物、硼的处理效果, 同时考虑 COD、 BOD_5 、氟化物、悬浮物(SS)、阴离子洗涤剂(LAS)等易超标敏感指标的处理效果。

2 试验设计及运行参数

本研究从工艺运行稳定性、适用性和经济性 3 个角度考虑, 选用混凝沉淀工艺、超滤工艺以及纳滤工艺开展相应研究。

首先分别在混凝沉淀、超滤、纳滤 3 个处理单元

表 1 地热水化学特征
Table 1 Characteristics of the
geothermal water /($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

地热井代号	TDS	氯化物	氟化物	硼
林热3井	2 478.24	380.30	8.00	4.227 0
林热4井	2 222.05	399.07	8.00	3.812 0
林热5井	2 504.02	434.76	7.00	4.159 5
林热10井	2 529.45	298.44	5.23	—
林热11井	7 129.31	3 416.96	1.375	5.931 6
林热12井	2 568.59	324.82	4.630	5.244 2
林热14井	5 400.69	2 607.32	1.840	7.408 2
林热15井	7 267.77	3 707.67	0.580	6.746 2
林热16井	6 669.91	3 354.56	0.520	1.731 1
林热18井	6 990.02	3 619.40	0.175	5.167 8
林热45井	5 535.69	2 649.69	1.57	4.04
林热49井	2 644.62	397.32	6.90	—
林热50井	2 638.71	401.68	6.15	—
林热51井	2 649.04	392.96	4.65	—
林热52井	2 628.64	406.04	6.15	—
评价标准	<2 000	<350	<2.0	<1.0

注:评价标准为《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》(GB 20922-2007)。

表 2 花园镇地热尾水水质特征
Table 2 Water quality characteristics of the geothermal tail
water in the Huayuan Town

水质指标	评价标准	供暖尾水检测值
BOD ₅	<80	<0.5
LAS	<8.0	<0.05
氯化物	<350	3 010
镉	<0.01	<0.005
铅	<0.2	0.09
锌	<2.0	<0.05
挥发酚	<1.0	<0.000 3
三氯乙醛	<0.5	<0.08
SS	<90	<5
总汞	<0.001	<0.000 1
铜	<1.0	<0.01
氰化物	<0.5	<0.001
COD	<180	0.57
pH	<5.5-8.5	8.38
硫化物	<1.0	<0.005
总砷	<0.1	<0.007
石油类	<10	<0.01
氟化物	<2.0	1.57
粪大肠菌群	<40 000	<2
丙烯醛	<0.5	<0.019
TDS	<2000	5 820
六价铬	<0.1	<0.004
苯	<2.5	<0.02
硼	<1.0	4.04

注:pH值无量纲,粪大肠菌群单位为个/L,其他单位均为mg/L。

单体试验研究的基础上获取相关技术参数,继而连续运行实验。

2.1 室内实验处理工艺及参数选取

室内实验采用的处理工艺流程为:地热尾水首先进入调节池中进行水质水量的均质调峰,而后进入混凝沉淀系统中,通过投加混凝剂和助凝剂的方式去除COD、BOD₅、SS、LAS,其出水进入超滤系统中进一步去除SS及浊度,继而进入纳滤系统去除供暖尾水中的TDS、氯化物、硼完成脱盐过程。超滤系统反洗水进入混凝沉淀反应器中进行处理后返回调节池中。

2.1.1 混凝沉淀

实验以聚合氯化铝(PAC)为混凝剂,以聚丙烯酰胺(PAM)为助凝剂,药剂采用蠕动泵投加,投药罐采用1 L有机玻璃制成,药剂混合采用小型搅拌器。其中PAM投加量固定,为0.1 mg/L,在进水中加入硅藻土,控制SS为100±10 mg/L,进水量为0.5 L/h,通过控制混凝剂PAC的投加量确定最佳投加浓度。

由图1可知,PAC的最佳投加量为30 mg/L,进水SS浓度103.2 mg/L,此时SS去除率为83.15%,出水SS浓度16.88 mg/L。随着PAC投加量的增加,SS去除率逐渐增高,当PAC投加量约为25~30 mg/L时,SS去除率出现拐点,继续投加PAC,SS去除率增加不明显。

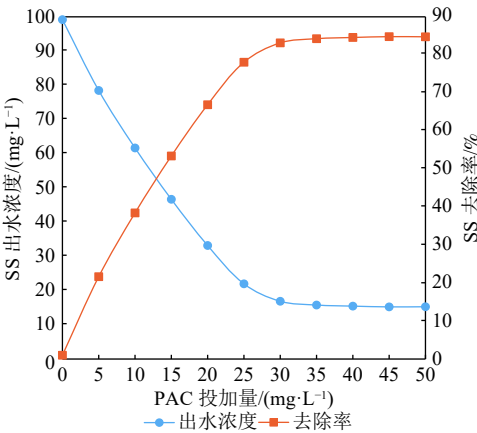


图 1 PAC 投加量与地热尾水 SS 去除率关系
Fig. 1 Relationship between PAC dosage and SS removal rate of
the geothermal tail water

2.1.2 超滤

实验设置进水量为0.5 L/h,选取膜组件的操作压力变化范围0.06~0.15 MPa,其出水流量随压力变化影响,见图2。当压力从0.06 MPa增加到0.15 MPa时,超滤膜通量从60.4 L/(m²·h)提高到128.7 L/(m²·h),提

高操作压力可明显增加超滤渗透通量, 压力与膜通量呈现线性关系。综合考虑膜通量和能耗, 选取 0.1 MPa 作为超滤运行压力, 此时超滤通量为 85.7 L/(m²·h), 不但获得超滤较高通量, 且保持了较低能耗。

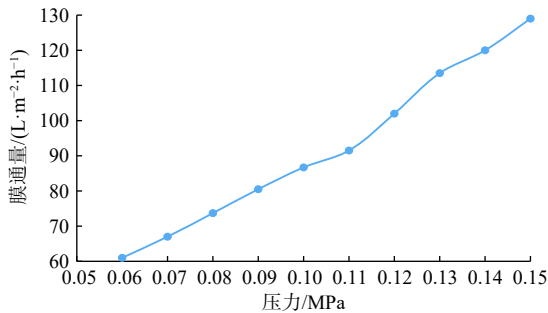


图 2 超滤膜通量随压力和时间变化
Fig. 2 Changes in ultrafiltration membrane flux with pressure and time

超滤在操作压力变化范围内, 其出水悬浮物浓度变化趋势, 见图 3。超滤实验过程中, 水分子及离子在压力作用下透过膜进入出水端, 温泉尾水中的 SS 通过筛分效应截留于浓水端。当超滤进水悬浮物浓度 16.1 mg/L 时, 超滤出水 SS 浓度都小于检测限, 随着压力增加, 出水中 SS 浓度稳定, 出水 SS 浓度主要受超滤膜性能影响。

超滤膜通量随时间变化如图 4 所示。超滤浓差极

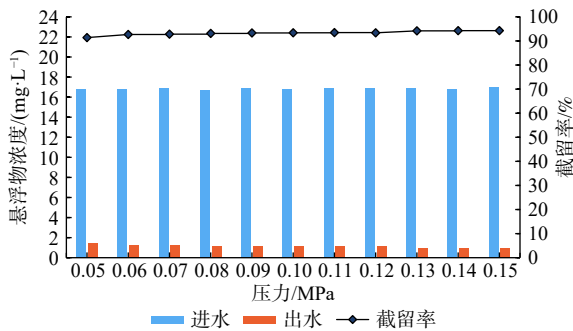


图 3 超滤出水 SS 浓度随压力变化
Fig. 3 Variation in SS concentration in ultrafiltration effluent with operating pressure

化现象使得过滤初期超滤膜通量下降明显, 运行 10 min, 由 82.56 L/(m²·h) 下降到 78.32 L/(m²·h), 随着过滤进行, 通量下降幅度逐渐减缓, 从 10 min 运行到 30 min, 进一步下降到 75.71 L/(m²·h)。超滤在稳定运行期间, 试验进水量为 0.8 m³/h, 超滤的出水率能够稳定在 95%, 如图 4 所示。由于松嫩盆地北部林甸地热田地热尾水中 SS 含量低, SS 浓度长期处于检测限以下 (<5 mg/L), 最高不超过 12 mg/L, 供暖尾水经过超滤处理后 SS 浓度能够降低至检测限以下, 且能够保持稳定。

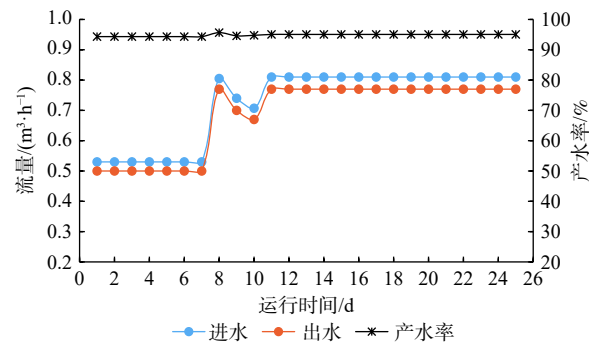


图 4 超滤进水量及出水率随时间变化
Fig. 4 Change in ultrafiltration water in take and water production rate with time

2.1.3 纳滤

根据供暖尾水的水质特征, 分别选用 NF20、TS80 及 NF90 三种纳滤膜进行处理效能研究, 实验表明 NF90 较 NF20、TS80 处理效果好。在进水量为 0.5 L/h 时, 当操作压力从 0.2 MPa 提高到 0.60 MPa 时, 各项指标均满足《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》(GB20922-2007) 标准 (表 3), 3 种膜对 TDS、氯化物、氟化物、硼截留率随压力增加而增大, 见图 5。

2.1.4 运行参数确定

室内实验设计的混凝沉淀、超滤、纳滤综合工艺是可行的。其中混凝沉淀工艺运行参数为: 助凝剂 PAM 投加量固定浓度 0.1 mg/L, 混凝剂 PAC 的最佳投加浓

表 3 纳滤膜处理效果

Table 3 Processing effect of the nanofiltration membrane										
	进水/(mg·L ⁻¹)	NF20纳滤膜		TS80纳滤膜			NF90纳滤膜			
		出水/(mg·L ⁻¹)	截留率/%	出水/(mg·L ⁻¹)	截留率/%	出水/(mg·L ⁻¹)	截留率/%	出水/(mg·L ⁻¹)	截留率/%	出水/(mg·L ⁻¹)
TDS	5 824.7	3 003.61	5.80	48.42	2 545.43	23.71	56.30	432.40	91.17	92.58
氯化物	3 010.13	1 413.89	5.71	53.03	1 437.2	23.85	53.43	194.16	90.38	92.33
氟化物	1.57	0.34	64.78	78.18	0.41	62.01	76.17	0.31	76.29	86.13
硼	4.04	2.21	31.43	45.29	1.83	36.22	54.59	1.62	51.16	59.90

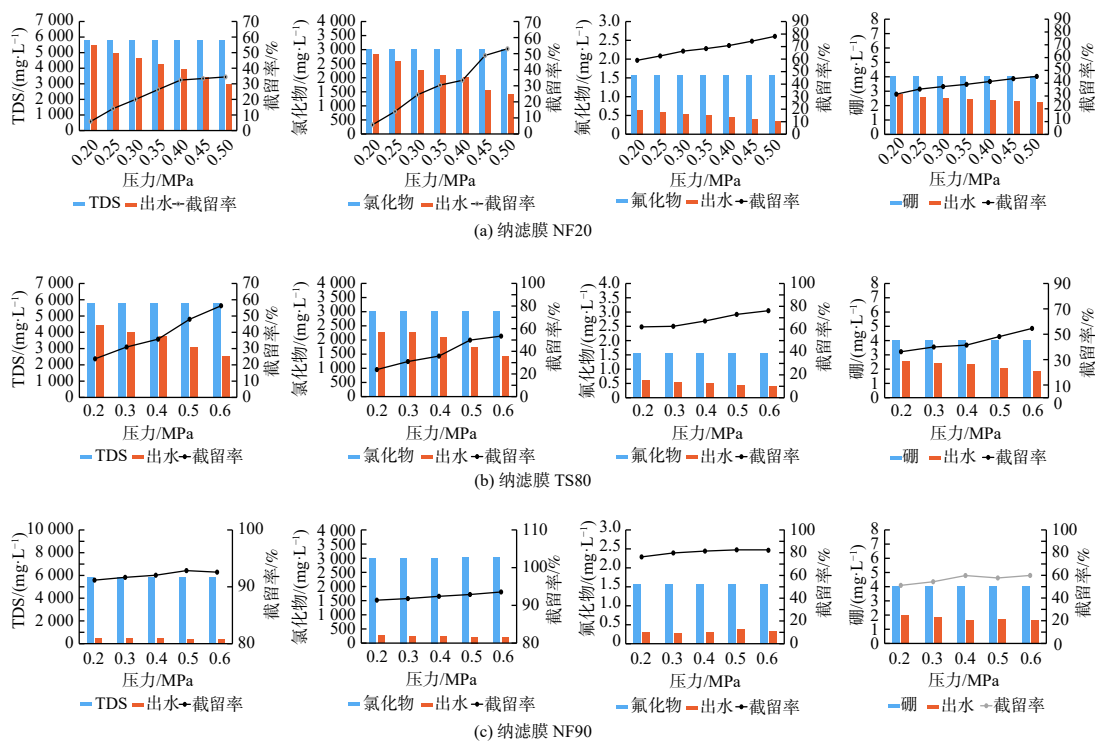


图 5 压力对纳滤膜 NF20、TS80 和 NF90 截留率的影响

Fig. 5 Effect of pressure on the rejection of nanofiltration membrane (NF20, TS80 and NF90)

度 30 mg/L; 超滤工艺运行参数为: 运行压力 0.1 MPa; 纳滤工艺运行参数为: 选用陶氏 NF90 纳滤膜, 运行压力为 0.60 MPa。

2.2 中试试验处理工艺及参数选取

根据室内实验获取的运行参数, 结合供暖尾水水质特征, 由于供暖地热水的进水中化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD₅)、阴离子表面活性剂(LAS)3 项指标的含量低于检测限值, 为降低运行成本, 中试试验在室内实验的基础上删除混凝沉淀工艺环节。

中试试验采用的处理工艺流程为: 出水进入超滤膜系统去除悬浮物, 然后进入纳滤系统将供暖尾水中的溶解性总固体(TDS)、氯化物和硼进行去除完成脱盐过程。超滤膜系统反冲洗水和经过适当处理的纳滤膜浓水统一排放至市政排水系统中, 进水量由小试试验的 0.5 L/h 提高到 800 L/h。

3 处理效能分析

3.1 室内实验处理效能分析

为检验工艺长期运行的处理效果, 工艺稳定运行后分不同时段分别取样化验, 检测结果见表 4。TDS 去除率 90.21%~92.49%, 氯化物去除率 91.63%~93.02%, 氟化物去除率 96.81%, 硼去除率 55.20%~55.69%, 均

达到《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》(GB 20922-2007) 标准。

表 4 处理不同时长后的水质指标残留量
Table 4 Basic control project
test results for different times

水质指标	处理前含量	不同时段出水残留量		
		第2天	第10天	第22天
TDS	5 820	437	466	570
氯化物	3 010	216	210	252
氟化物	1.570	0.025	0.027	0.027
硼	4.04	1.81	1.79	1.81

3.2 中试试验处理效能分析

纳滤在不同回收率情况下处理能力见表 5, 经分析纳滤 65% 回收率下处理效果最好, 在该回收率下运行 3 个月, 纳滤出水的 TDS 浓度 430 mg/L, TDS 的去除率为 92.62%, 出水氯化物浓度 200 mg/L, 氯化物的去除率为 92.57%, 出水硼浓度 1.77 mg/L, 硼去除率为 55.7%。

经过 4 个月中试试验稳定运行, 出水水质随时间的延长出现轻微下降, TDS 浓度 460 mg/L, 去除率为 92.04%; 氯化物浓度 220 mg/L, 去除率为 91.88%; 硼浓度 1.93 mg/L, 去除率为 51.4%。纳滤稳定运行期间情况见图 6。

表 5 不同回收率下的纳滤处理效果及去除率

Table 5 Nanofiltration treatment effect and removal rate under different recovery rates

纳滤回收率/%	TDS		氯化物		硼	
	含量/(mg·L ⁻¹)	去除率/%	含量/(mg·L ⁻¹)	去除率/%	含量/(mg·L ⁻¹)	去除率/%
60	408	92.98	184	93.38	1.65	58.4
65	423	92.23	194	93.54	1.70	57.1
70	470	91.91	202	93.31	1.76	56.2
75	501	91.38	208.22	93.30	1.83	54.4
80	526	90.97	225	92.76	1.89	53.7

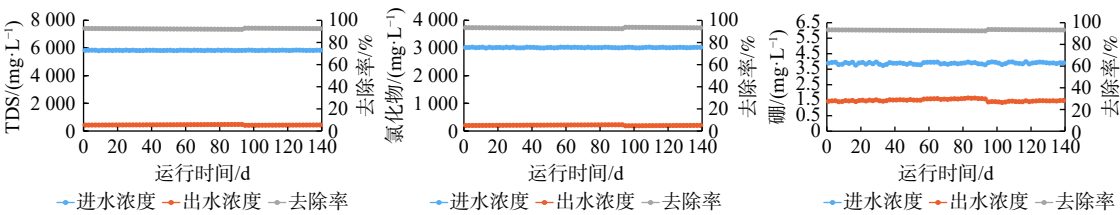


图 6 稳定运行时纳滤对尾水中 TDS、氯化物、硼的截留

Fig. 6 TDS, chloride, boron interception of geothermal tail water during the nanofiltration stable operation

4 结论

(1)室内设计混凝沉淀、超滤、纳滤组合工艺。工艺运行参数为:助凝剂 PAM 投加量固定浓度 0.1 mg/L, 混凝剂 PAC 的最佳投加浓度 30 mg/L;超滤运行压力为 0.1 MPa;选用陶氏 NF90 纳滤膜,操作压力为 0.60 MPa。TDS 去除率 90.21%~92.49%,氯化物去除率 91.63%~93.02%,氟化物去除率 96.81%,硼去除率 55.20%~55.69%,且均达到相关标准。

(2)优化中试试验工艺流程,将进水量由小试试验的 0.5 L/h 提高到 0.8 m³/h,出水的 TDS 浓度 430 mg/L, TDS 的去除率为 92.62%;出水氯化物浓度 200 mg/L,氯化物的去除率为 92.57%;出水硼浓度 1.77 mg/L,硼去除率为 55.7%。可以满足相关标准。说明本工艺运行参数用来处理松嫩盆地北部林甸地热田地热尾水是可行的。

参考文献 (References):

[1] 任洪国,李海红.大庆市地热资源现状及发展对策研究[J].节能,2018,37(6):28-31. [REN Hongguo, LI Haihong. Research on the current situation and development countermeasures of geothermal resources in Daqing City[J]. Energy Conservation, 2018, 37(6): 28-31. (in Chinese with English abstract)]

[2] 吴海宝.林甸县温泉项目群社会评估研究[D].大庆:东北石油大学,2013. [WU Haibao. Research on social assessment of hot spring project group in Lindian County [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013. (in

Chinese with English abstract)]

[3] 秦凤翔,王瑛瑋.黑龙江省林甸县地热资源开发调查报告[J].经济研究参考,2011(16):41-44. [QIN Fengxiang, WANG Yinghui. Investigation report on the development of geothermal resources in Lindian County, Heilongjiang Province[J]. Review of Economic Research, 2011(16): 41-44. (in Chinese with English abstract)]

[4] 张汉沛,朱林.关于大庆油田地热资源综合利用的几点思考[J].石油石化节能,2018,8(2):42-43. [ZHANG Hanpei, ZHU Lin. Some thoughts on comprehensive development and utilization of geothermal resources in Daqing oilfield[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2018, 8(2): 42-43. (in Chinese with English abstract)]

[5] 薛宇泽.地热资源开发利用中的主要环境问题分析[J].环境与发展,2018,30(5):206. [XUE Yuze. Analysis of main environmental problems in the development and utilization of geothermal resources[J]. Inner Mongolia Environmental Protection, 2018, 30(5): 206. (in Chinese with English abstract)]

[6] 胡彩萍.探析地热资源开发引起的环境地质问题[J].工程建设与设计,2017(10):137-138. [HU Caiping. Exploring on environmental geological problems caused by geothermal resources development[J]. Construction & Design for Project, 2017(10): 137-138. (in Chinese with English abstract)]

[7] 任加国,高宗军,武倩倩,等.高盐度地热尾水处理的试验研究[J].工程勘察,2010,38(9):36-38. [REN Jianguo, GAO Zongjun, WU Qianqian, et al. Experimental

- study on geothermal tail water with high salinity[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(9): 36–38. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 阮晓卿, 周军, 陆继来, 等. 超滤+反渗透+电渗析浓缩处理高盐印染废水中试研究[J]. 污染防治技术, 2018, 31(3): 46–52. [RUAN Xiaoqing, ZHOU Jun, LU Jilai, et al. Pilot-scale Study on Treatment of Dyeing Wastewater by Using UF-RO-ED Combined Process[J]. Pollution Control Technology, 2018, 31(3): 46–52. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 郑桂森, 李良景, 吕金波. 北京地热开采中的尾水氟处理方法[J]. 地质通报, 2019, 38(2): 397–403. [ZHENG Guisen, LI Liangjing, LYU Jinbo. Research on method of processing tail water in geothermal exploration in Beijing[J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(2): 397–403. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 安军红. 高原地热尾水回灌技术的现状及发展前景浅析[J]. 中国设备工程, 2017, 24: 137–138. [AN Junhong. Analysis on the status quo and development prospects of plateau geothermal tailwater recharge technology[J]. China Plant Engineering, 2017, 24: 137–138. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 单蓓蓓, 郑西来, 乔振基, 等. 人工回灌过程中含水介质物理堵塞的试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(10): 97–101. [SHAN Beibei, ZHENG Xilai, QIAO Zhenji, et al. Experimental study of aquifer physical clogging during artificial recharge process[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(10): 97–101. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 高宗军, 徐海龙, 夏璐. 地下水人工回灌含水介质微生物堵塞试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 8–16. [GAO Zongjun, XU Hailong, XIA Lu. An experimental study of bioclogging of aquifer media during artificial reinjection of groundwater[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 8–16. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 潘俊, 宋佳蓉, 王昭怡, 等. 硫酸盐还原菌和铁细菌对回灌堵塞影响的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 31–36. [PAN Jun, SONG Jiarong, WANG Zhaoyi, et al. Test on the influence of sulfate reducing bacteria and iron bacteria on the clogging of recirculation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 31–36. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王学鹏, 刘欢, 蒋书杰, 等. 沉积盆地砂岩热储回灌试验研究——以山东禹城市为例[J]. 地质论评, 2020, 66(2): 485–492. [WANG Xuepeng, LIU Huan, JIANG Shujie, et al. Reinjection experimental research on sedimentary basin sandstone reservoir: A case study of Yucheng City, Shandong[J]. Geological Review, 2020, 66(2): 485–492. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张永杰, 束龙仓, 温忠辉, 等. 人工回灌对地下水年龄分布规律的影响[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 8–14. [ZHANG Yongjie, SHU Longcang, WEN Zhonghui, et al. Effect of artificial recharge on groundwater age distribution[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 8–14. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 姜洪, 闵丽霏, 黄林, 等. 松辽盆地干热岩地热资源潜力初探[J]. 矿产保护与利用, 2014(1): 10–14. [LOU Hong, MIN Lifei, HUANG Lin, et al. Study on potential of geothermal resources of hot dry rock in Songliao basin[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2014(1): 10–14. (in Chinese)]
- [17] 金飞. 黑龙江省肇州县肇州镇地热资源评价与研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013. [JIN Fei. The evaluation and research of Zhaozhou County town of geothermal resources in Heilongjiang Province[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)]
- [18] 汪在君. 松辽盆地北部的地热资源及其开发利用方向[J]. 自然资源学报, 2003, 18(1): 8–12. [WANG Zaijun. The geothermal resource of the northern Songliao Basin and direction for its development and utilization[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(1): 8–12. (in Chinese)]
- [19] 姜智超. 黑龙江省绥化市地热田地热资源评价及合理开发利用[D]. 长春: 吉林大学, 2015. [JIANG Zhichao. Geothermal Resource Evaluation and Reasonable Development and Utilization of Geothermal Field in Suihua City, Heilongjiang Province[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳