

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2023.05.015

响应曲面法优化反渗透处理钢铁企业高氯循环水

赵静瑞¹ 张朝晖¹ 邢相栋¹ 折媛¹ 向思羽¹ 郭胜兰²

(1. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055;

2. 宝钢湛江钢铁有限公司, 广东 湛江 524072)

摘 要: 基于反渗透(Reverse Osmosis, RO)技术处理钢铁企业高氯循环水, 研究了响应曲面法设计下温度、压力、pH 值等因素对 RO 膜通量和截留率的影响, 建立数学模型并进行三因素的优化设计分析。结果表明, 各因素对膜通量的影响程度为: 压力>温度>pH 值; 对截留率的影响程度为压力>pH 值>温度; 各因素之间交互作用对膜通量和截留率的影响均为: 温度与 pH 值交互项>压力与 pH 值交互项>温度与压力交互项; 当温度为 26 ℃、压力为 0.7 MPa、pH 值为 8 时, 可得到理论最优的 RO 分离效果: 膜通量为 21.716 L/(m²·h)、截留率为 96.226%。经试验验证, 预测值实际误差较小, 所建模型能较好地对实际情况进行预测。对使用后的 RO 采用 SEM-EDS 手段分析发现, 膜面产生无机污染, 污染物主要成分为钙盐。

关键词: 反渗透; 响应曲面法; 参数优化; 膜污染

中图分类号: TF09

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2023)05-0099-11

Optimal reverse osmosis treatment of high chloride wastewater in iron and steel plants by response surface method

ZHAO Jingrui¹ ZHANG Zhaohui¹ XING Xiangdong¹ SHE Yuan¹ XIANG Siyu¹ GUO Shenglan²

(1. A School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. Zhanjiang Iron & Steel Co., Ltd., Baosteel, Zhanjiang 524072, Guangdong, China)

Abstract: Based on the methamphetamine(RO) technology to technical processing of steel companies, the impact of various factors such as the temperature, pressure, and pH value under the design of the curved surface is studied. The model and of design analysis three factors are optimized. Studies have shown that the impact of various factors on the amount of membrane flux is: pressure>temperature>pH value. The degree of impact on the cutting rate is: pressure>pH value>temperature. The influence of the interaction between various factors on membrane flux and retention rate is: temperature and pH value interaction term>pressure and pH value interaction term>temperature and pressure interaction term. When the temperature is 26 ℃, the pressure is 0.7 MPa, and the pH value is 8, the theoretical optimal RO separation effect can be obtained; the membrane flux is 21.716 L/(m²·h), and the intercept rate is 96.226%. After experimental verification, the actual error of the prediction value is small, indicating that the model can better predict the actual situation. The RO was detected using SEM-EDS and inorganic pollution was found on the membrane surface, most of which are calcium salts.

Key words: reverse osmosis; response surface method; parameter optimization; membrane pollution

收稿日期:2023-06-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174325); 陕西省
创新能力支撑计划项目(2023-CX-TD-53); 陕西省
重点研发计划资助项目(2019TSLGY05-05)

第一作者:赵静瑞, 硕士研究生; E-mail: 2104211114 @
xauat.edu.cn

通信作者:折媛, 博士, 副教授; E-mail: sheyuan@xauat.edu.cn

钢铁工业耗水量约为全国工业总耗水量的 20%^[1,2], 是用水和循环水排放的大户, 其中, 用于设备冷却产生的高氯循环水中, Cl⁻ 含量可达 1~1.5 g/L, 是造成管道堵塞, 阀门、管路等部位侵蚀的主要原因^[3]。高氯循环水的治理技术众多,

其中,膜技术以处理效率高、无污染、操作简单等优势受各大企业青睐^[4]。张文耀等^[5]采用反渗透技术处理氯离子含量为 1 000~3 000 mg/L 的火电厂含盐废水,发现无机盐离子截留率可达到 90%。赵丽娟等^[6]采用以反渗透装置为核心的含盐废水回用工艺处理不锈钢含盐废水,发现系统截留率可以保持在 85%以上。RO 技术可去除循环水中多数无机盐离子^[5],是钢铁企业循环水深度处理的核心^[6],对 RO 膜分离效果的主要影响因素及其相互作用机理进行深入研究,对提高 RO 膜分离效果,实现循环水最小量化有重大意义^[7]。

影响 RO 膜分离效果的因素有许多,但主要影响因素为料液温度、操作压力、料液 pH 值和料液流速^[8]。温度升高时,膜上的高分子聚合物运动剧烈,导致膜孔增大,透水性增强同时,料液黏度和密度降低,扩散性增强,膜面的溶质扩散阻力因此降低,溶质扩散器速率增大^[9];在 pH 值较大时,膜表面基团会产生部分水解,能够吸引水分子的通过,使反渗透效能提高^[10];RO 过程以压力为驱动力^[11],当操作压力增大时,料液透过膜的驱动力增加,能够使 RO 膜通量和截留率增加^[12];流速的改变对于浓差极化现象的缓解会产生一定的正向作用^[13]。国内外相关学者对 RO 膜分离效果的主要因素研究较多,但主要是对料液温度、操作压力和料液 pH 值各因素进行的单因素影响研究,未探究各因素之间的交互作用。响应曲面法(Response Surface Methodology, RSM)是一种优化试验条件,寻求最优工艺参数的方法^[14],适用于受多因素影响的工艺条件优化^[15]。本研究采用 Box-Behnken 实验设计,深入探究了料液温度、操作压力和料液 pH 值各水平之间的交互作用及最优组合的实验验证,并采用 SEM-EDS 分析了无机结垢的表面形貌,目的是为反渗透技术处理钢铁企业高氯循环水提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 原水水质

试验用水为某钢铁厂集中水、处理站的高氯循环水,通过 ICP-MS、pH 值和主要离子浓度见表 1。

1.2 试验材料

RO 膜为美国陶氏公司生产的聚酰胺卷式复合膜 BW30-4040,具体参数如表 2 所示。

表 1 某钢铁厂高盐循环水水质

Table 1 High-salt wastewater quality of a steel plant
high-salt wastewater quality of a steel plant

项目	数值
pH 值	8
$\rho(\text{SO}_{4}^{2-})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1 770
$\rho(\text{Cl}^{-})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	16 460
$\rho(\text{Na}^{+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	19 496
$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1 306
$\rho(\text{CO}_3^{2-})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2 749
$\rho(\text{HCO}_3^{-})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1 412

表 2 BW30-4040 膜参数

Table 2 BW30-4040 film parameters

名称	具体参数
膜材料	芳香族聚酰胺
数量/支	1
有效膜面积/ m^2	7.2
最高操作压力/MPa	4.5
稳定脱盐率/%	99.5

试验用盐酸、氢氧化钠、硝酸盐、无水硫酸钠、铬酸钾试剂均为分析纯。

1.3 试验方法

采用实验室自建全回流形式 RO 装置,试验装置如图 1 所示,该装置由原水箱、增压泵、保安过滤器、压力表、RO 膜组件等单元构成,试验料液由高压泵进入 RO 膜元件进行脱盐处理。为保证料液浓度稳定,处理后的浓水和产水分别由浓水管和产水管回流至水箱进行循环。小型反渗透装置由进水水箱、反渗透辅泵、高压泵、反渗透膜元件、压力表、截止阀等单元组成。该装置采用全回流形式,原水由高压泵进入反渗透膜元件进行分离浓缩,处理后的浓水和产水分别经浓水管和产水管回流至进水水箱进行循环。

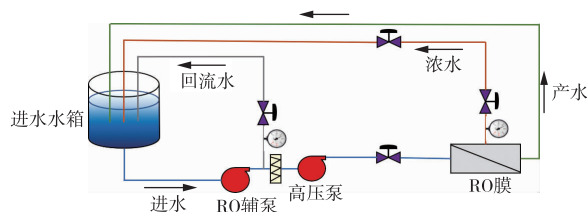


图 1 反渗透试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the reverse osmosis experimental device

1.3.1 单因素试验

以操作温度 25 ℃、操作压力 0.8 MPa、料液 pH 值 8、料液流速 7 LPM、NaCl 浓度 16 g/L 为基础试验条件,在保持其他操作条件不变的情况下,分别改变操作温度、操作压力、料液 pH 值、

料液流速、NaCl 浓度，考察这些因素对反渗透膜脱盐效果(膜通量 J 、截留率 R)的影响以及反渗透膜脱盐效果的变化趋势。

1.3.2 响应曲面试验

根据单因素试验结果，选取对膜脱盐性能影响较显著的三因素进行响应曲面试验，确定影响因素的主次及最佳操作条件。

系统开始运行时，需用自来水预压 1 h，使膜通量保持稳定，再将自来水替换为试验料液，每隔 1 h 取样分析，测定膜通量和截留率。

1.4 相关计算公式

为表征反渗透膜的分离性能，定义膜通量 J (式 1)和 Cl^- 截留率 R (式 2)的计算。

$$J = \frac{V}{S \times t} \quad (1)$$

式中， J 为膜通量， $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ； V 为产水体积， mL ； t 为时间， s ； S 为有效膜面积， m^2 。

$$R = \frac{C_R - C_P}{C_R} \times 100\% \quad (2)$$

式中， R 为氯离子截留率； C_R 为原水中的 Cl^- 浓度， mg/L ； C_P 为产水中 Cl^- 浓度， mg/L 。

2 单因素试验结果与讨论

图 2 为改变操作温度、操作压力、料液 pH 值、料液流速、NaCl 浓度等条件下，反渗透膜脱盐效果的变化趋势图。

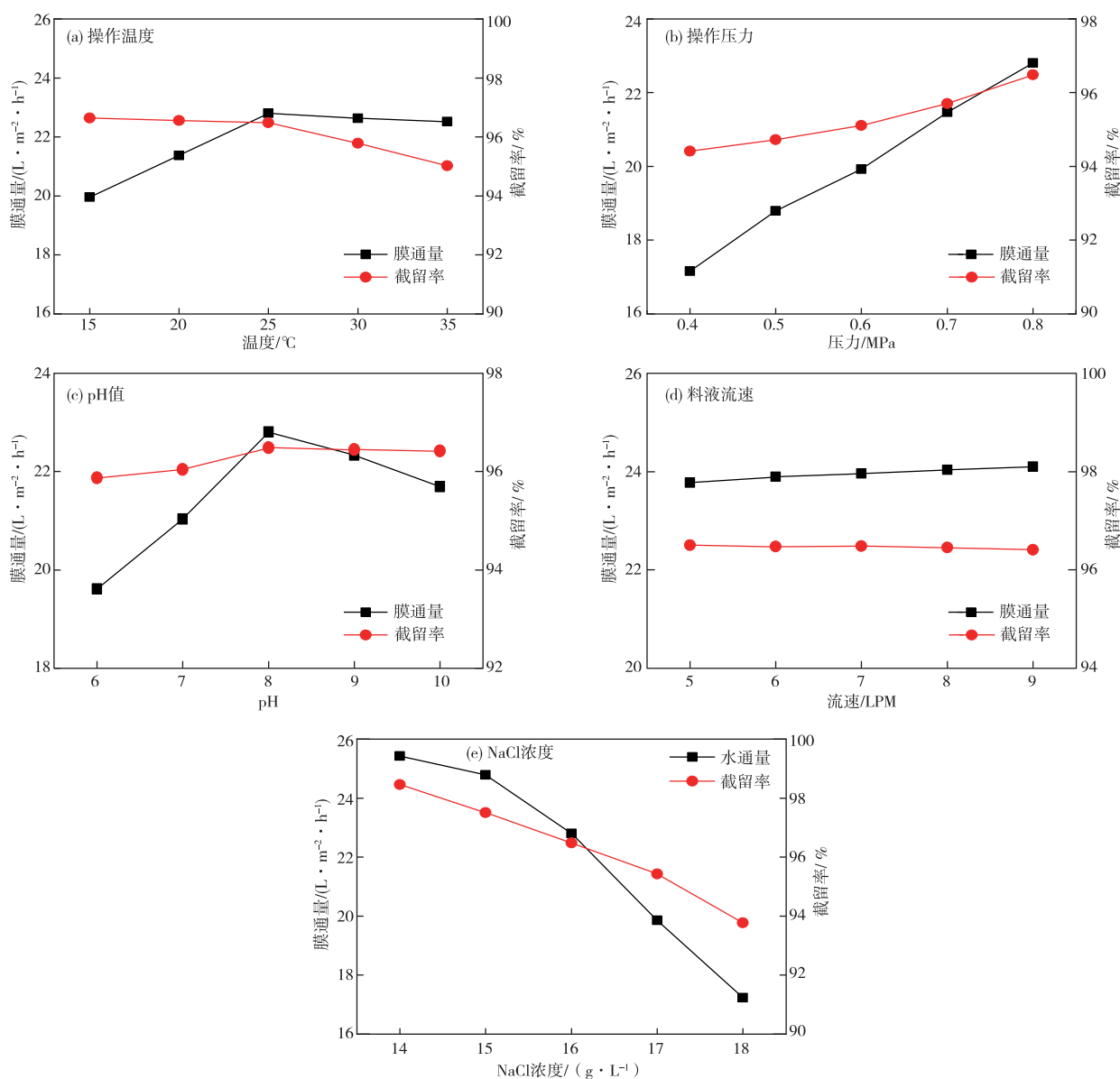


图 2 反渗透膜脱盐效果的变化趋势

Fig. 2 Change trend of desalination effect of reverse osmosis membrane

由图 2 可知,在基础试验条件下,当操作温度从 15 ℃ 升高到 25 ℃ 的过程中,膜通量从 19.96 L/(m²·h)增大到 22.80 L/(m²·h);当温度从 25 ℃ 升高到 35 ℃ 的过程中,膜通量基本保持稳定,而截留率则一直保持降低,且在 25 ℃ 之后降低趋势明显增大;pH 值由 6 上升至 10 的过程中,在温度为 25 ℃ 及 pH 值为 8 时,出现膜通量的极大值;反渗透膜通量和截留率随操作压力的增大,呈明显上升趋势,而反渗透膜通量和截留率随料液流速的改变基本保持稳定;NaCl 浓度的增加会导致反渗透膜脱盐效果明显下降。总体来看,操作温度、操作压力、料液 pH 值和 NaCl 浓度对反渗透膜通量和截留率的影响较大,料液流速对反渗透膜通量和截留率基本没有影响,但由于高氯循环水中的氯离子浓度一般为定

值,并不考虑将 NaCl 浓度作为响应因素。因此,选用操作温度、操作压力、料液 pH 值进行后续响应曲面试验。

3 响应曲面试验及结果分析

3.1 响应曲面设计及试验结果

采用 BBD 原理设计试验,以操作温度(A)、操作压力(B)、料液 pH 值(C)为设计变量(表 3),分别进行了单因素试验,以获取后续响应曲面试验的参数范围。以 RO 膜通量(J)和截留率(R)为目标函数,以+1、0、-1 作为各因素的高、中和低水平,设计 3 因素 3 水平的响应曲面试验,共 17 组试验,每个试验点重复 3 次,取平均值。表 4 为响应面设计试验设计及结果。

表 3 响应面设计因素及水平

Table 3 Response surface experiment factors and levels

水平	因素		
	温度(A)/℃	压力(B)/MPa	pH 值(C)
-1	20	0.7	7
0	25	0.8	8
1	30	0.9	9

表 4 试验设计与结果

Table 4 Reverse osmosis experimental protocol and results

试验号	因素			$J/(L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	R/%
	A	B	C		
1	-1	1	0	21.30	96.38
2	0	0	0	21.56	96.23
3	1	1	0	22.80	96.27
4	1	0	1	22.21	95.72
5	0	1	-1	21.70	96.31
6	-1	-1	0	18.86	95.85
7	0	0	0	21.56	96.23
8	-1	0	-1	18.96	95.65
9	0	0	0	21.56	96.23
10	0	-1	1	20.56	95.65
11	0	1	1	23.00	96.18
12	-1	0	1	20.26	95.85
13	0	0	0	21.56	96.23
14	1	-1	0	20.36	95.74
15	0	0	0	21.56	96.23
16	1	0	-1	20.46	95.85
17	0	-1	-1	19.26	95.78

3.2 模型的建立与分析

采用 Design-Expert 软件对表 4 的数据进行多元回归分析,J 和 R 对温度(A)、压力(B)、料液

pH 值(C)的二次多项式模型如下式:

$$J = 21.56 + 0.8062A + 1.22B + 0.7062C + 0.0650AB + 1.05AC + 0.075BC - 0.2967A^2 -$$

$$\begin{aligned} &0.0758B^2-0.0908C^2 \qquad \qquad \qquad (3) \\ &R=96.23-0.0187A+0.2650B-0.2417C+ \\ &0.0975AB-0.0825AC+0.0250BC- \\ &0.8250BD-0.1913A^2+0.2012B^2-0.2712C^2 \end{aligned}$$

(4)

数值表示各参数对反渗透膜性能的影响程度，正负号分别表示协同效应和拮抗效应。采用方差分析确定二次回归模型的显著性和适应度，以及显著的相互作用对响应值(*J*、*R*)的影响。对多项式模型的方差分析见表5、表6。

表5 膜通量回归方程各项式方差分析

Table 5 Analysis of variance for the regression equation of membrane flux

方差来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
模型	24.000 0	9	2.670 0	36.67	<0.000 1
<i>A</i>	5.200 0	1	5.200 0	719.06	<0.000 1
<i>B</i>	11.910 0	1	11.910 0	1 646.4	<0.000 1
<i>C</i>	3.990 0	1	3.990 0	551.75	<0.000 1
<i>AB</i>	0	1	0	0.002 4	1.000 0
<i>AC</i>	0.050 6	1	0.050 6	7.000 0	0.033 1
<i>BC</i>	0	1	0	0.007 9	1.000 0
<i>A</i> ²	2.030 0	1	2.030 0	28.200	<0.000 1
<i>B</i> ²	0.005 5	1	0.005 5	0.765 0	0.410 8
<i>C</i> ²	0.652 8	1	0.652 8	90.26	<0.000 1

表6 截留率回归方程各项式方差分析

Table 6 Analysis of variance for the regression equation of intercept rate

方差来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
模型	1.080 0	9	0.120 5	34.97	<0.000 1
<i>A</i>	0.002 8	1	0.002 8	0.816 1	0.396 4
<i>B</i>	0.561 8	1	0.561 8	163.01	<0.000 1
<i>C</i>	0.004 5	1	0.004 5	1.31	0.290 1
<i>AB</i>	0	1	00	0	1.000 0
<i>AC</i>	0.027 2	1	0.027 2	7.900	0.026 1
<i>BC</i>	0	1	0	0	1.000 0
<i>A</i> ²	0.154 0	1	0.154 0	44.69	0.000 3
<i>B</i> ²	0.001 9	1	0.001 9	0.551 7	0.481 8
<i>C</i> ²	0.309 8	1	0.309 8	89.89	<0.000 1

表5~6中，*F*值是组间均方与组内均方的比值，*P*值是相应*F*值下的概率值，*P*值反映了该因素的显著性，一般以*P*<0.000 1为高度显著，*P*<0.05为显著。由表5~6可知，模型具有较好的回归效果(*P*<0.000 1)和较好的显著性(*F*=36.67, 34.97)，*A*、*B*、*C*对膜通量的影响高度显著；三因素对膜通量的影响大小为*B*>*A*>*C*。*B*对截留率影响高度显著，*A*、*C*对截留率影响显著；三因素对截留率的影响大小为*B*>*C*>*A*。交互项*AC*对膜通量和截留率交互作用最为显著，而

交互项*AB*、*BC*对膜通量和截留率的影响并不显著。

表7为模型的回归方差可信度分析。图3为膜通量和截留率的实测值与预测值对比图。由表7及图3可知，模型对*J*和*R*的拟合度分别为0.997 9、0.978 2，拟合度接近于1，说明拟合数据的试验值和预测值误差较小，模型的拟合程度较好。水通量和截留率的实测值分布点位于直线上或紧挨直线两侧，两者相关度较高。根据拟合度和预测对比，该模型可用于对试验过程进行优化和预测。

表7 回归方差的可信度分析

Table 7 Reliability analysis of regression variance

	拟合度 <i>R</i> ²	校正系数 <i>R</i> _{adj} ²	变异系数 <i>C.V.</i> / %
<i>J</i>	0.997 9	0.995 2	0.404 4
<i>R</i>	0.978 2	0.950 3	0.061 1

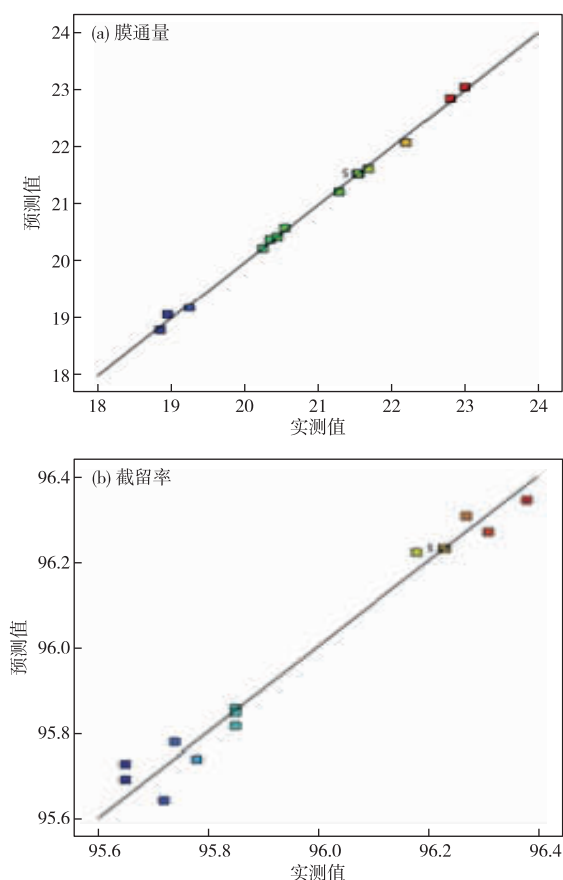


图3 膜通量和截留率实测值与预测值对比

Fig. 3 Comparison between measured and predicted values of membrane flux and intercept rate

3.3 响应曲面分析

根据回归方程中各因素对截留率和膜通量的影响作响应曲面图和等高线图。图4~9所示为AC、BC、AC对反渗透膜分离效果的等高线图和响应曲面图。响应曲面的最高点和最小椭圆中心点代表响应值在考察范围内存在极值^[16,17]。

3.3.1 对膜通量模型响应曲分析

图4为pH值为8时，温度与压力交互作用对膜通量影响的等高线图和响应曲面图。由图4可知，最高膜通量集中在右上角，表明在试验范围内提高温度和压力均能提高膜通量。当温度为25℃时，随着压力增加，水通量呈缓慢上升趋势；而当压力为0.8 MPa时，随温度的升高，水通量呈先上升后下降的趋势，但变化趋势较小。曲面在压力方向上的斜率明显大于在温度方向上的斜率，说明压力对膜通量的影响更加显著。响应曲面的等高线图可反映因素间的交互作用，由图4(b)可以看出，温度与压力并不存在制约关系，所以两者的交互作用并不明显。

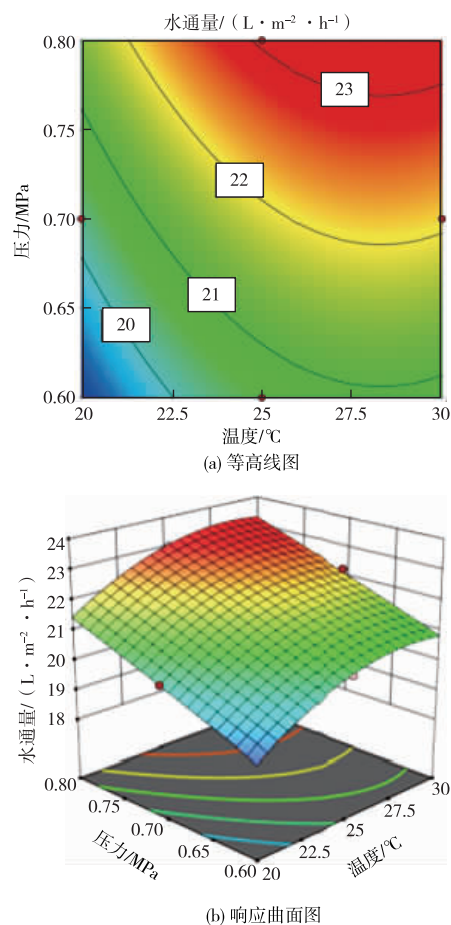


图4 温度与压力对膜通量的响应曲面图

Fig. 4 Temperature and pressure to response curved surface diagram of membrane flux

图5为温度为25℃时，压力与pH值交互作用对膜通量影响的等高线图和响应曲面图。由图5可知，当压力为0.8 MPa时，膜通量随pH值的增加而缓慢增大后减小，趋势不明显；当pH值为8时，压力的增大会引起膜通量的增加，增加趋势并不明显。在pH值大于7.5时，等高线逐渐稀疏，说明在pH值大于7.5时，压力与pH值交互作用较弱。曲面在pH值方向上的斜率明显大于在压力方向上的斜率，说明pH值对膜通量的影响更加显著。

图6为压力为0.8 MPa时，温度与pH值交互作用对膜通量影响的等高线图和响应曲面图。由图6可知，当温度为25℃时，膜通量随pH值的增加先增大后减小；当pH值为8时，膜通量随温度的增加先增大后减小。由等高线图可以看出曲面斜率较大，说明温度与pH值交互作用对膜通量的影响显著。

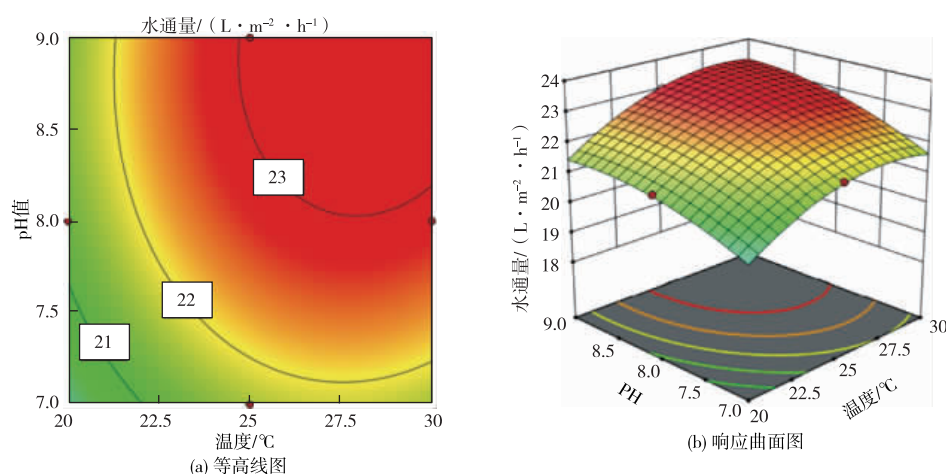


图5 压力与 pH 对膜通量的响应曲面图

Fig. 5 Pressure and pH value response curved surface diagram of the amount of membrane flux

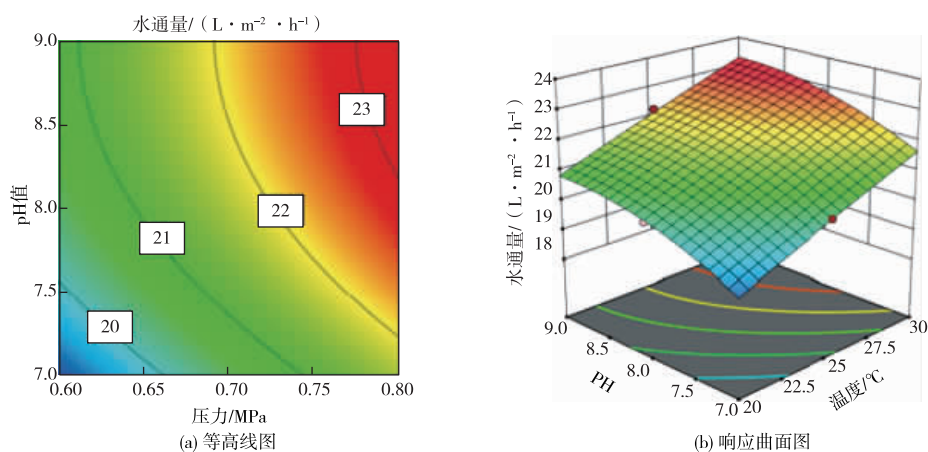


图6 温度与 pH 值对膜通量的响应曲面图

Fig. 6 Temperature and pH value response curved surface diagram of membrane flux

3.3.2 对截留率模型响应曲分析

图7为pH值为8时，温度与压力交互作用对截留率影响的等高线图和响应曲面图。由图7可知，当温度为25 $^{\circ}\text{C}$ 时，随压力的增大，截留

率明显升高；当压力为0.8 MPa时，随温度升高。截留率先增大后减小。压力大于0.75 MPa时，出现截留率的最大值。曲面在压力方向上的

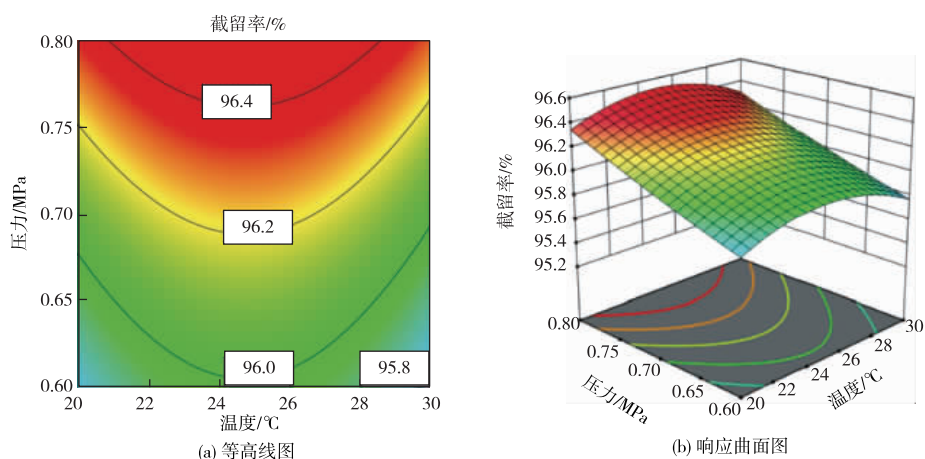


图7 温度与压力对截留率的响应曲面图

Fig. 7 Temperature and pressure to the intercept rate response curved surface diagram

斜率明显大于在温度方向上的斜率,说明压力对截留率的影响更加显著。压力增大后,RO膜的截留效果明显增强。

图8为温度为25℃,pH值与压力交互作用对截留率影响的等高线图和响应曲面图。由图8可知,当压力为0.8MPa时,随pH值的增大,截留率先增大后减小;而当pH值为8时,随压力的增加,截留率逐渐增加,且等高线逐渐密集,说明在压力较大时,pH值与压力交互作用对截留率的

影响较强。曲面在压力方向上的斜率明显大于在pH值方向上的斜率,说明压力对截留率的影响更加显著。

图9为压力为0.8MPa时,pH值与温度交互作用对截留率影响的等高线图和响应曲面图。当pH值为8时,随温度的升高,截留率先增大后减小;当温度为25℃时,随pH值的增大,截留率先增大后减小。从等高线图可以看出,pH值与温度之间的交互作用最为显著。

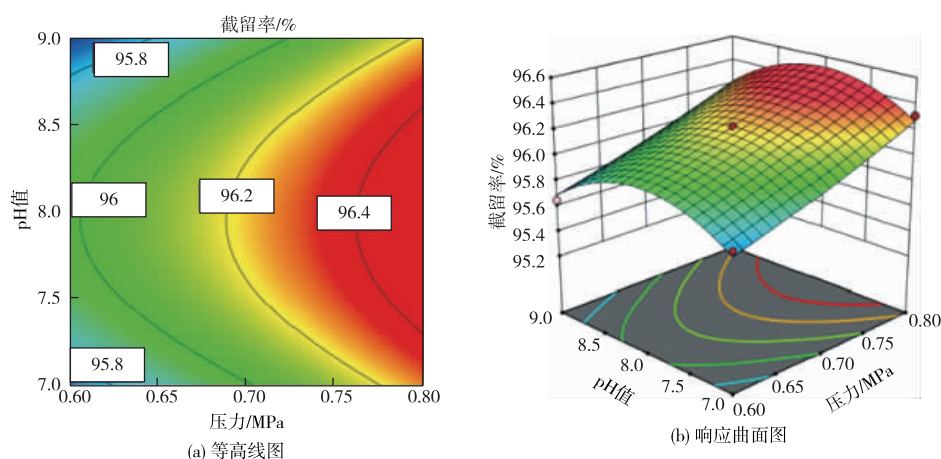


图8 压力与pH值对截留率的响应曲面图

Fig. 8 Pressure and pH value response curved surface diagram of the amount of intercept rate

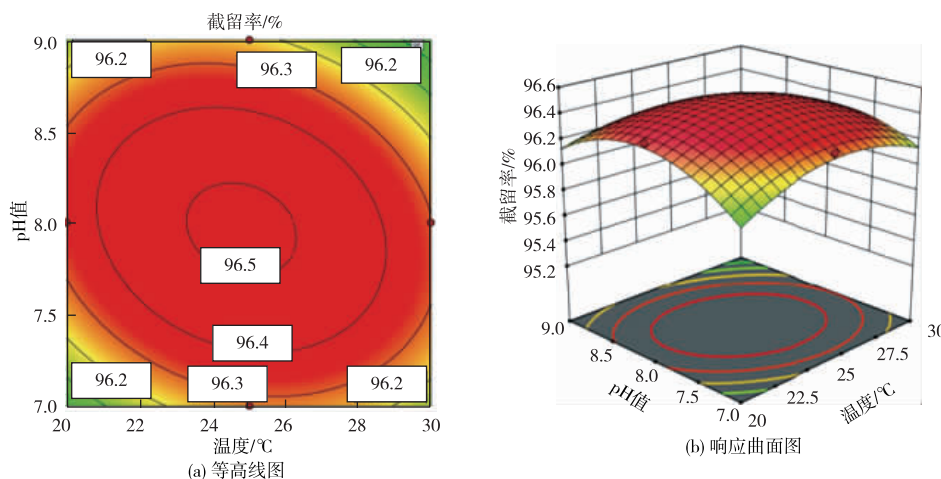


图9 温度与pH值对截留率的响应曲面图

Fig. 9 Temperature and pH value response curved surface diagram of intercept rate

3.3.3 最佳操作条件及试验验证

以上分析表明,RO膜的分离效果受温度、压力、pH值影响。通过Design-expert软件进行计算分析,得到最优参数组合,即进水温度为26℃、压力为0.7MPa、pH值为8时,得到理论最优的RO分离效果:膜通量21.716 L/(m²·h)、截留

率96.226%。对此优化参数进行试验验证,在此最优条件下进行三次试验,结果如表8所示,得到反渗透膜的膜通量和截留率为21.559 L/(m²·h)和96.14%,试验结果与预测值误差较小,证实了预测的可靠性。

表 8 最优参数实验室验证结果

Table 8 Laboratory validation results of optimal parameters

项目	膜通量/(L·m ⁻² ·h ⁻¹)	截留率/%
1	21.244	96.22
2	22.098	96.07
3	21.335	96.12
均值	21.559	96.14

3.4 反渗透膜微观形貌与元素组成

图 10 为渗透膜使用前后的 SEM 图像，图 11 为相应渗透膜的能谱及元素分析图。

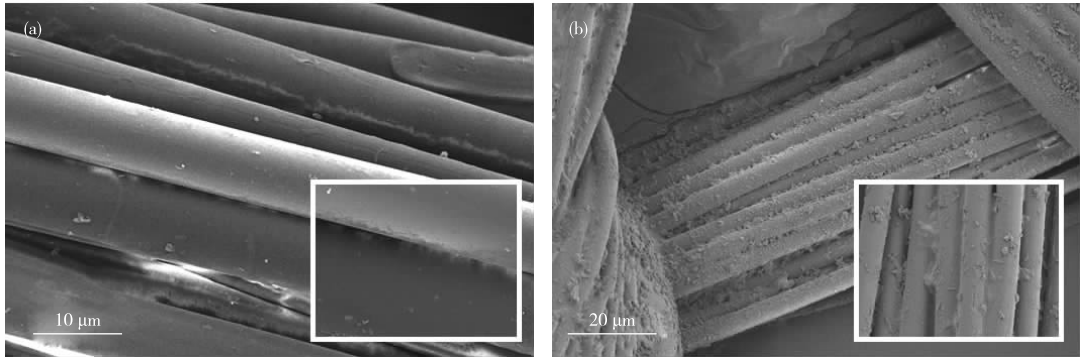


图 10 渗透膜使用前(a)、使用后(b)渗透膜的 SEM 图像

Fig. 10 SEM images of permeable membranes before(a)and after use(b)

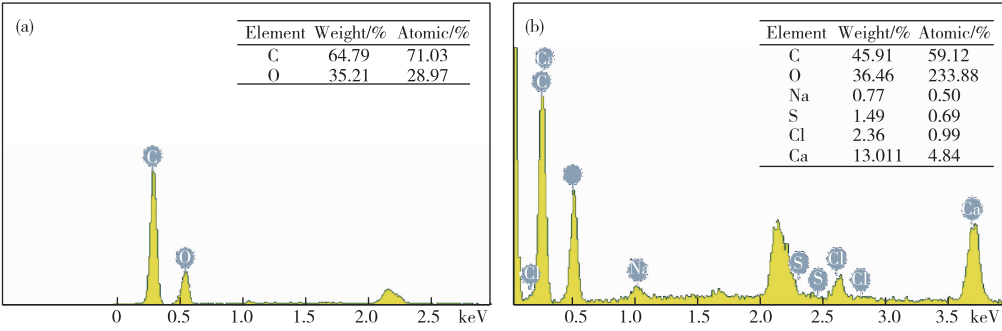


图 11 渗透膜使用前(a)、使用后(b)渗透膜的能谱及元素分析图

Fig. 11 EDS spectra and elemental analysis of permeable membranes before(a)and after use(b)

4 结论

1)针对某钢铁企业高氯循环水，采用 Design-expert 软件，以截留率和膜通量为响应值建立二次响应曲面模型，回归方程 P 值均小于 0.001， R^2 均大于 0.90，模型显著且拟合度较高，能较好地对污染物的去除进行分析和预测。

2)根据方差分析，考察因素对膜通量的影响程度为：压力(B)>温度(A)>pH 值(C)；对截留率的影响程度为压力>pH 值>温度；各因素之间交互作用对膜通量和截留率的影响均为： $AC>BC>AB$ 。

从图 10 可以看出，渗透膜使用前其表面未见明显结垢污染，而使用后的渗透膜表面可见清晰的污染物覆盖，进一步放大发现膜表面产生大量块状及条状晶体。由图 11 可以看出，渗透膜未使用时仅含有 C、O 元素(N、H 因仪器原因未计入)，而使用后的渗透膜表面出现了 Na、S、Cl、Ca 的无机盐阳离子，因此可以认为膜表面产生了无机污染，根据元素分析结果，Ca 元素占比 13.01%，比重较大，说明无机污染物主要成分为钙盐。

3)当温度为 26 ℃、压力为 0.7 MPa、pH 值为 8 时，可得到理论最优的 RO 分离效果：膜通量 21.559 L/(m²·h)、截留率 96.14%。预测值实际误差较小，模型能较好地对实际情况进行预测。

4)反渗透膜使用后期表面产生无机污染，膜表面无机结垢为 Na、S、Cl、Ca 的无机盐化合物，且其中大部分为钙盐。

参考文献

[1] 王福龙, 姜剑, 罗富金. 钢铁企业综合循环水处理与回用工程设计及管理研究[J]. 给水排水, 2014, 40(3): 48-51.

- WANG F L, JIANG J, LUO F J. Design and management of comprehensive wastewater treatment and reuse in steel enterprises[J]. Water Resources Management, 2014, 40(3): 48-51.
- [2] 周晓龙, 吴戈. 我国钢铁企业水资源利用概况[J]. 给水排水, 2013, 49(增刊1): 336-340.
- ZHOU X L, WU G. Overview of water resources utilization in iron and steel enterprises in China[J]. Water Resources Management, 2013, 49 (Sup. 1): 336-340.
- [3] 张晓英, 李素芹, 雷海萍, 等. 钢铁工业循环水中氯离子脱除工艺技术探讨[J]. 钢铁, 2022, 57(3): 153-159.
- ZHANG X Y, LI S Q, LEI H P, et al. Discussion on removal of chloride ion from circulating water in iron and steel industry[J]. Iron & Steel, 2022, 57(3): 153-159.
- [4] MELLITI E, VAN DER BRUGGEN B, EIFIL H. Combined iron oxides and gypsum fouling of reverse osmosis membranes during desalination process[J]. Journal of Membrane Science, 2022, 635 (5): 120-128.
- [5] 张文耀, 治卿, 王焕伟. 高效反渗透组合工艺在火电厂废水零排放中的应用[J]. 给水排水, 2017, 53(11): 55-57.
- ZHANG W Y, ZHI Q, WANG H W. Application of high efficiency combined reverse osmosis process in zero discharge of wastewater in thermal power plant[J]. Water Resources Management, 2017, 53(11): 55-57.
- [6] 赵丽娟, 邵启运, 解清杰. 反渗透在不锈钢制品生产废水零排放工程中的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(17): 94-99.
- ZHAO L J, SHAO Q Y, XIE Q J. Application of reverse osmosis for treatment of stainless steel production wastewater in a zero discharge project[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(17): 94-99.
- [7] 陈霞明, 李莹. 纳滤膜分离水中低浓度全氟化合物的研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(13): 76-85.
- CHEN X M, LI Y. Separation of low concentration perfluorinated compounds by NF membranes [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(13): 76-85.
- [8] 汪健生, 张丁凡, 刘雪玲. 海洋温差能辅助潜艇反渗透海水淡化系统研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 394-398.
- WANG J S, ZHANG D F, LIU X L. Research on ocean temperature difference energy assisted submarine reverse osmosis seawater desalination system[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(10): 394-398.
- [9] CALABRO P S, GEBILI E, MEONI C, et al. Effect of the recirculation of a reverse osmosis concentrate on leachate generation: a case study in an Italian landfill[J]. Waste Management, 2018, 76: 643-651.
- [10] 李晨璐, 郭雅妮, 李玉林, 等. 煤化工循环水反渗透处理系统的运行效果及膜污染分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3464-3476.
- LI C L, GUO Y N, LI Y L, et al. Study of the operating efficiency and membrane fouling of reverse osmosis process in coal chemical wastewater treatment[J]. Acta Scientiarum Circumstantiae, 2021, 41(9): 3464-3476.
- [11] 吉生军, 严正星. 预处理-反渗透耦合工艺深度处理印染循环水[J]. 现代化工, 2021, 41(8): 214-217.
- JI S J, YAN Z X. Advanced treatment of dyeing wastewater by pretreatment-revers osmosis coupling process [J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(8): 214-217.
- [12] 贾晓凤, 刘玉慧. 响应曲面法优化超声振动辅助ELID复合内圆磨削 ZTA 陶瓷的边界损伤长度[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(5): 938-946.
- JIA X F, LIU Y H. Optimization of boundary damage length in ultrasonic vibration assisted electrolytic in-process dressing internal grinding of ZTA ceramics by response surface methodology[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021, 50(5): 938-946.
- [13] 杨蓉, 朱丽峰, 张媛, 等. 基于响应曲面法的半水硫酸复合改性除磷研究[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(12): 2316-2322.
- YANG R, ZHU L F, ZHANG Y, et al. Removal of arsenic by complex modification of calcium sulfate hemihydrate based on response surface method[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48 (12): 2316-2322.
- [14] 刘永鹤, 彭金辉, 孟彬, 等. 莫来石晶须长晶径比影响因素的响应曲面法优化[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(3): 403-408.
- LIU Y H, PENG J H, MENG B, et al. Parameter optimization for aspect ratio of mullite whiskers by response surface method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(3): 403-408.
- [15] LI Y F, LI M C, XIAO K, et al. Reverse osmosis membrane autopsy in coal chemical wastewater treatment: Evidences of spatially heterogeneous

- fouling and organic inorganic synergistic effect[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 118-124.
- [16] WANG S Y, CHEN Y F, ZHOU H, et al. Calcium carbonate scaling in forward osmosis-for textile reverse osmosis concentrate treatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 35: 1-7.
- [17] 周梅, 白金婷, 郭凌志, 等. 基于响应曲面法的煤矸石地聚物注浆材料配比优化[J]. 材料导报, 2023, 37(20): 22020068. DOI: 10. 11896/cldb. 22020068.
- ZHOU M, BAI J T, GUO L Z, et al. Optimization of grouting material proportion of coal gangue geopolymer based on response surface methodology[J]. Materials Reports, 2023, 37 (20): 22020068. DOI: 10. 11896/cldb. 22020068.
- [18] 洪磊. 基于响应曲面法的某硫化铅锌矿选铅矿选工艺优化试验[J]. 矿冶, 2019, 28(3): 39-44.
- HONG L. Optimization of lead process for the beneficiation of a lead-zinc ore based on response surface methodology [J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(3): 39-44.
- [19] 段邵君, 孙玉柱, 宋兴福, 等. 响应曲面法优化碳酸锂反应结晶工艺[J]. 化工学报, 2017, 68(11): 4169-4177.
- DUAN S J, SUN Y Z, SUN X F, et al. Optimization of reactive-crystallization process of lithium carbonate based on response surface methodology[J]. CIESC Journal, 2017, 68(11): 4169-4177.

(编辑: 王爱平)