

以响应面法优化气田含甲醇污水预处理药剂加量

白小芳¹ 肖远牲¹ 于笑丹² 马鹏云¹ 李 军¹

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司延长气田采气二厂; 2. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司)

摘 要 针对延长气田某净化厂的含甲醇污水预处理装置存在结垢严重、腐蚀等问题,利用离子色谱、XRD 等方法对含甲醇污水及再生塔塔板垢样进行分析,在单因素的实验基础上,以含甲醇污水的总铁、浊度为考察的总指标,采用响应面法优化得到氧化剂、碱化剂、絮凝剂及助凝剂 4 种预处理药剂的最佳注入量,最后验证了优化方案的可靠性。研究结果表明:含甲醇污水 pH 值偏低,矿化度较高,易结垢的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量高;再生塔塔板垢样的主要成分为 CaCO_3 、 MgCO_3 ,含量(质量百分比)分别为 64.32% 和 35.58%,说明大量存在的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 是导致甲醇再生装置结垢腐蚀的主要原因。预处理药剂的最佳加量为氧化剂 832.39 mg/L,碱化剂 1 108.64 mg/L,絮凝剂 889.01 mg/L,助凝剂 57.59 mg/L,此时,预测的响应值为 3.525。现场污水经优化处理后 pH 值为 7.4,浊度为 6.8 NTU,总铁含量为 11.04 mg/L,均达到预处理水质指标要求;现场的设备和管线结垢、堵塞情况明显好转,由原来的 1 个月检修两次,降至 3 个月左右检修 1 次。

关键词 含甲醇污水; 预处理; 工艺优化; 响应面法

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2021.05.005

文章编号: 1005-3158(2021)05-0019-07

Optimization of the Dosage of Pretreatment Chemicals for Methanol-containing Wastewater in Gas Fields by Response Surface Methodology

Bai Xiaofang¹ Xiao Yuansheng¹ Yu Xiaodan² Ma Pengyun¹ Li Jun¹

(1. No. 2 Gas Production Plant of Yanchang Gas Field, Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd.;
2. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology)

ABSTRACT In view of the serious scaling and corrosion problems of the methanol-containing wastewater pretreatment device of a purification plant in Yanchang Gas Field, first, ion chromatography, XRD and other methods were used to analyze the methanol-containing wastewater and the scale samples of the regeneration tower tray. Based on the experiment, the total iron and turbidity of the methanol-containing sewage were used as the overall indicators. The response surface optimization was used to obtain the best injection amount of four pretreatment agents such as oxidant, alkalizer, flocculant and coagulant. The reliability of the optimized and improved program was optimized. The results show that the pH of the methanol-containing wastewater is low, the salinity is high, and the content of cations Ca^{2+} and Mg^{2+} that are easy to scale is very high; the scale sample of the regeneration tray is mainly composed of CaCO_3 and MgCO_3 , and the content is 64.32% (w/w) and 35.58% (w/w), indicating that a large amount of Ca^{2+} and Mg^{2+} are the main causes of scaling and corrosion of the methanol regeneration unit. The optimal dosage of pretreatment agent is 832.39 mg/L for oxidant, 1 108.64 mg/L for alkalizing agent, 889.01 mg/L for flocculant, and 57.59 mg/L for coagulant. At this time, the predicted response value is 3.525. After optimized treatment, the on-site sewage has a pH of 7.4, a turbidity of 6.8, and a total iron content of about 11.04 mg/L, which all meet the requirements of pretreatment water quality. The scale and blockage of equipment and pipelines have improved significantly, from the original one Overhauled twice a month, reduced to about once every 3 months.

KEY WORDS methanol-containing wastewater; pretreatment; process optimization; response surface methodology

0 引言

为防止水合物的形成,天然气自集气站外输前需注入甲醇,甲醇与水互溶产生了气田含甲醇污水。为了降低生产成本,甲醇需回收再利用。在不同温度下,甲醇和水的挥发度不同,通常采用精馏工艺进行分离^[1]。但集气站地层水的成分复杂,导致含甲醇污水具有高浊度、高矿化度、高腐蚀性、高含铁量、低 pH 值“四高一低”的显著特点^[2],甲醇回收再利用也有一定难度。因此,含甲醇污水在进入甲醇再生装置前必须进行预处理。

延长气田采气二厂某净化厂有 1 套设计处理能力为 $15 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$ 的含甲醇污水处理装置,包括含甲醇污水预处理单元和再生单元,主要处理从集气站拉运来和净化厂脱硫脱碳装置产生的含甲醇污水。预处理工艺主要是去除含甲醇污水中的 CO_2 、 H_2S 等酸性气体,以及固体悬浮物、乳化油和机械杂质等,为甲醇再生装置安全平稳运行提供保障。甲醇再生利用常压精馏工艺将污水中的甲醇提浓至 95% (质量百分比) 作为产品甲醇,回注水处理至甲醇含量小于 0.1% (质量百分比) 后回注地层^[3]。

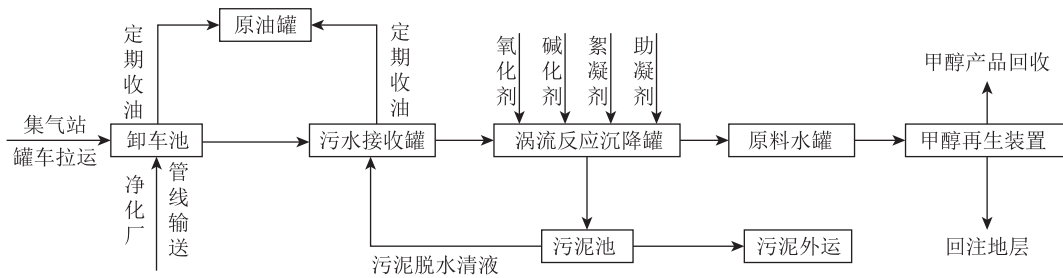


图 1 含甲醇污水预处理工艺流程

1.2 预处理工艺存在的问题

1) 现有 200 m^3 甲醇污水接收罐 1 台,由于罐容偏小,现场转水频繁,污水中乳化油、固体悬浮物等杂质在罐内沉降时间短,导致部分杂质进入涡流反应沉降罐与药剂发生反应,使部分絮体上浮,处理效果变差。

2) 由于含甲醇污水水质的不稳定性,使当前的药剂加入量不能充分满足生产要求,预处理过程中的絮凝效果不佳,导致预处理后的含甲醇污水 pH 值偏低,总铁含量、含油量和浊度均偏高;固体悬浮物等随料液进入甲醇再生单元,使双滤料过滤器滤网堵塞、再生塔塔板腐蚀结垢问题严重,需频繁维修设备。

鉴于目前存在的问题,对预处理工艺中药剂加入量进行优化十分必要。

1 含甲醇污水预处理工艺流程及运行现状

1.1 预处理工艺流程

预处理工艺流程见图 1。从集气站用罐车拉运的含甲醇污水以及净化厂脱硫脱碳装置产生的污水进入卸车池,凝析油、水、机械杂质等经过初步分离后,利用收油器将凝析油定期回收至原油罐;收油后的含甲醇污水经提升泵打入污水接收罐进一步沉降,然后由转水泵打入涡流反应沉降罐,并向涡流反应沉降罐依次加入氧化剂(H_2O_2)、碱化剂(NaOH)、絮凝剂(聚合氯化铝 PAC)及助凝剂(聚丙烯酰胺 PAM),含甲醇污水在该罐内经过反应、沉淀后,涡流反应沉降罐顶部上清液溢流进入原料水罐,涡流反应沉降罐底的污泥定期排往污泥池;污泥脱水清液返回污水接收罐进行再处理,脱水后的污泥外运处理;原料水罐中的含甲醇污水经原料泵提升后进入甲醇再生装置,该装置采用常压精馏工艺,将甲醇和污水进行分离,得到符合装置设计要求的产品甲醇(含量 $\geq 95\%$),回注地层的污水中甲醇含量 $\leq 0.1\%$,从而达到回收甲醇的目的。

1.3 预处理工艺改进措施

1) 为提高除油效果,在卸车池内新增 1 套浮动收油装置,通过收油泵有效去除污水中的原油,并将其输送至原油罐。

2) 将原有 200 m^3 甲醇罐改为含甲醇污水接收罐,并在其上部增加收油器,两具罐轮换进水,增加油水沉降分离时间。

3) 利用响应面法选择最佳药剂加入量,使预处理后的水质达到该净化厂含甲醇污水处理装置的工艺设计指标,进一步解决装置存在的堵塞、腐蚀结垢等问题。

2 含甲醇污水预处理工艺研究

2.1 含甲醇污水组成成分检测

利用 TMZ9-IC1000 离子色谱对该净化厂预处理前的含甲醇污水水样进行检测分析,结果见表 1。

表 1 含甲醇污水组成成分 mg/L(pH 值除外)

名称	含量	名称	含量
K ⁺	773.5	HCO ₃ ⁻	316.7
Na ⁺	10 390	CO ₃ ²⁻	—
Ca ²⁺	10 200	pH 值	5.6
Mg ²⁺	2 074.5	总硬度(以 CaCO ₃ 计)	33 984
Ba ²⁺	992.4	总铁	45
Sr ²⁺	712	矿化度	67 256
F ⁻	12.8	含油量	285
Cl ⁻	43 556	固体悬浮物	800
SO ₄ ²⁻	4.2		

由表 1 可知,含甲醇污水的 pH 值偏低,矿化度高,易结垢的 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量很高,而钙、镁的碳酸盐是结垢的主要成分;易结垢的 SO₄²⁻ 含量很低, HCO₃⁻ 含量比较高,会导致金属出现点蚀现象的 Cl⁻ 含量高达 43 556 mg/L。

2.2 含甲醇污水结垢分析

甲醇再生单元的双滤料过滤器滤网堵塞和再生塔塔板结垢情况见图 2 和图 3。



图 2 滤网堵塞外观



图 3 塔板垢样外观

为研究甲醇再生装置易结垢、易腐蚀的主要原因,采用日本理学公司(Rigaku)D/Max-2400 粉末 X 射线衍射仪对甲醇再生塔塔板的垢样物相结构进行了检测分析,其 XRD 图谱如图 4 所示。

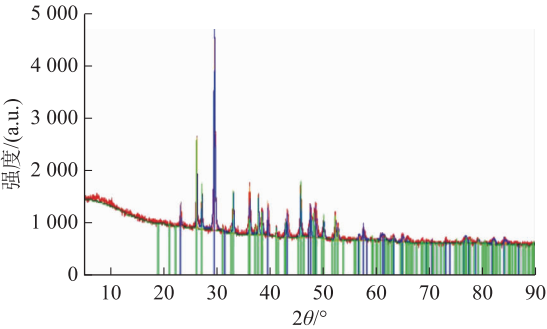


图 4 再生塔塔板垢样的 XRD 图谱

由图 4 可知,再生塔塔板垢样的主要成分是 CaCO₃ 和 MgCO₃,含量分别为 64.32%(质量百分比)和 35.58%(质量百分比),这表明大量存在的 Ca²⁺、Mg²⁺ 是导致甲醇再生装置结垢腐蚀的主要原因,沉积在金属表面的 CaCO₃、MgCO₃ 会严重堵塞管道,部分还会与铁原子形成无数个微型原电池,形成结垢型腐蚀,加剧金属腐蚀^[4],这与含甲醇污水组成成分的检测结果一致。

2.3 药剂注入量的优化研究

含甲醇污水预处理工艺中,加入氧化剂是为了氧化亚铁离子,降低污水中总铁离子含量;碱化剂的作用是调节污水的 pH 值,去除含甲醇污水中 CO₂、H₂S 等酸性气体;絮凝剂的作用是为了破坏污水中胶体的稳定性,使污水中的胶体和细小悬浮物聚集成具有可分离特性的絮凝体^[5];助凝剂的作用是为了提高絮凝剂处理效果。

2.3.1 单因素实验

吕雷等^[6]以污水除铁率、透光率为考察指标,对预处理加药量进行了优化,得到最佳加药量,现场应用效果较好。周玉荣等^[7]以预处理前后总铁含量、浊度以及 pH 值变化为考察指标,筛选出含甲醇污水预处理药剂配方及加量,改造后污水预处理运行效果良好。故本文以含甲醇污水中的总铁含量和浊度为考察指标,利用浊度测定仪、分光光度计测定总铁含量和浊度,当满足净化厂含甲醇污水预处理水质指标总铁含量<8 mg/L、浊度<6 NTU 时,预处理效果较好。利用单因素实验考察氧化剂、碱化剂、絮凝剂及助凝剂的加入量对含甲醇污水中的总铁含量和浊度的影响。

1) 氧化剂(H_2O_2)注入量对预处理效果的影响

在 NaOH 浓度为 750 mg/L , PAC 浓度为 $1\,000 \text{ mg/L}$, PAM 浓度为 40 mg/L 的条件下, 考察加入不同浓度的 H_2O_2 对含甲醇污水预处理效果的影响, 结果如图 5 所示。

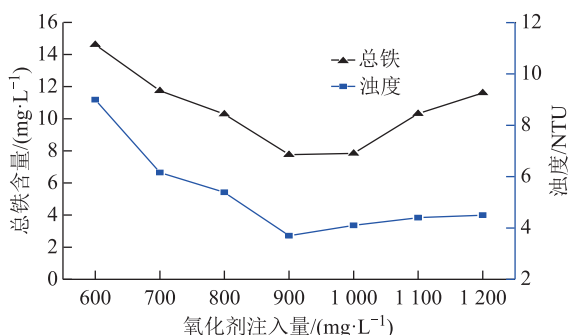


图 5 氧化剂注入量对预处理效果的影响

由图 5 可以看出, 含甲醇污水的浊度、总铁含量随 H_2O_2 注入量的增加呈先减小后逐渐升高的趋势。这是因为氧化剂的注入促使 Fe^{2+} 及其化合物进一步沉降, 总铁及浊度持续下降; 当超过临界注入量 900 mg/L 时, 弱酸性 H_2O_2 溶液具有抑制 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 水解的作用, 造成总铁含量、浊度不降反升的现象。故选择 H_2O_2 最佳注入量为 900 mg/L 。

2) 碱化剂(NaOH)注入量对预处理效果的影响

在 H_2O_2 浓度为 900 mg/L , PAC 浓度为 $1\,000 \text{ mg/L}$, PAM 浓度为 40 mg/L 的条件下, 考察加入不同浓度 NaOH 对含甲醇污水预处理效果的影响, 结果如图 6 所示。

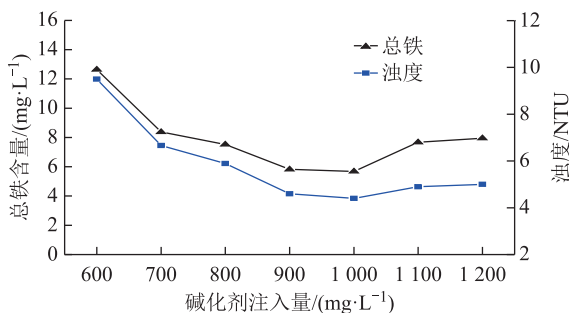


图 6 碱化剂对预处理效果的影响

由图 6 可以看出, 含甲醇污水的浊度、总铁含量随 NaOH 注入量的增加呈先减小后趋于平缓的趋势。 NaOH 的注入提高了污水 pH 值, 使 Fe^{2+} 转化为微溶于水的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, 总铁及浊度得到大幅度降低; 同时铁离子多以三价离子形式存在, NaOH 加入有助于其形成红褐色沉淀物, 从而降低总铁浓度, 浊度也随之降低^[8]; 当 NaOH 超过注入量临界值 $1\,000 \text{ mg/L}$

时, 溶液趋于碱性化, HCO_3^- 发生反应, Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 及 Ca^{2+} 发生沉淀反应, 浊度升高和总铁含量变化平缓, 故选择 NaOH 最佳注入量为 $1\,000 \text{ mg/L}$ 。

3) 絮凝剂(PAC)注入量对预处理效果的影响

在 H_2O_2 浓度为 900 mg/L , NaOH 浓度为 $1\,000 \text{ mg/L}$, PAM 浓度为 50 mg/L 的条件下, 考察加入不同浓度的 PAC 对含甲醇污水预处理效果的影响, 结果见图 7。

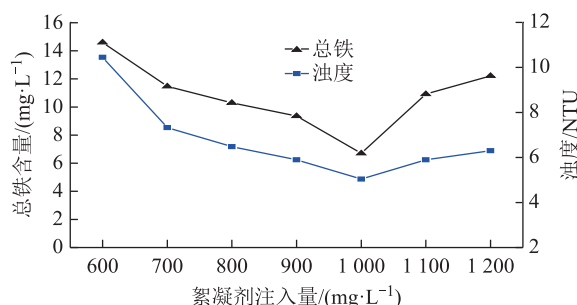


图 7 絮凝剂对预处理效果的影响

由图 7 可以看出, 含甲醇污水的浊度、总铁含量随 PAC 注入量的增加呈先减小后逐渐升高的趋势。这是因为絮凝剂加入有助于含甲醇污水中难以沉淀的胶体颗粒黏合聚集、长大直至自然沉淀, 净化效果明显。当絮凝剂过量时, 絮凝剂水解时产生大量的正电荷离子, 导致水中胶体所带电荷由负变正, 产生“胶体保护”作用, 使脱稳胶粒电荷变号或使胶粒被包卷而重新稳定, 常称为“再稳”现象^[9], 同时使污水中 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} , 导致含甲醇污水的总铁含量、浊度出现上升现象。故选择 PAC 最佳注入量为 $1\,000 \text{ mg/L}$ 。

4) 助凝剂(PAM)注入量对预处理效果的影响

在 H_2O_2 浓度为 900 mg/L , NaOH 浓度为 $1\,000 \text{ mg/L}$, PAC 浓度为 $1\,000 \text{ mg/L}$ 的条件下, 考察加入不同浓度的 PAM 对含甲醇污水预处理效果的影响, 如图 8 所示。

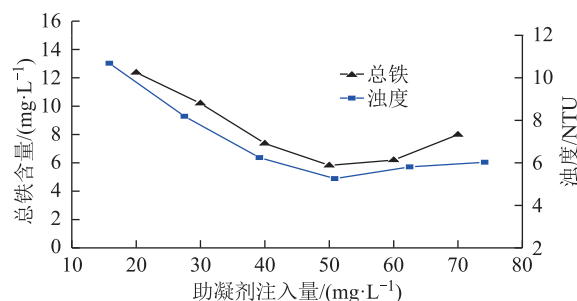


图 8 助凝剂对预处理效果的影响

由图 8 可以看出, 含甲醇污水的浊度、总铁含量随 PAM 注入量的增加呈先减小后趋于平缓的趋

势。这是因为助凝剂有助于含甲醇污水中悬浮物及分散颗粒相互作用生成絮状体,在沉降过程中尺寸和质量不断增大,最终加速沉淀达到了脱除悬浮物的目的。当投药量适当时,污水中悬浮的胶体粒子之间会产生有效的吸附架桥作用,并形成絮凝体;若过量,则架桥作用所必须的粒子表面吸附活性减小,架桥因而变得困难,同时,由于粒子间相互排斥作用出现分散稳定现象^[10],出现矾花变大,絮体不易沉降甚至污泥上浮现象,使污水预处理效果降低,浊度逐渐上升。故选择 PAM 最佳注入量为 50 mg/L。

2.3.2 响应面实验设计及分析

1) 响应面(Box-Behnken)实验设计

根据单因素实验结果,选取对含甲醇污水浊度影响较为显著的 4 个单因素:氧化剂(A)、碱化剂(B)、絮凝剂(C)、助凝剂(D)的注入量为自变量,甲醇污水

的总指标(总铁含量和浊度都是化工生产过程中的重要衡量指标,权重均取值 0.5)为响应值来进行响应面分析^[11-13],其因素和水平见表 2。

表 2 响应面分析因素水平 mg/L

因素	水平		
	-1	0	1
A	700	900	1 100
B	800	1 000	1 200
C	800	1 000	1 200
D	30	50	70

本次设计了 4 因素 3 水平共 29 个实验点,使用 Box-Behnken 中心组合设计实验方案,借助实验设计软件 Design-Expert 绘制响应面曲线,设计方案见表 3,分析结果见表 4。

表 3 响应面实验设计方案

序号	响应面因素水平				总指标	序号	响应面因素水平				总指标
	A	B	C	D			A	B	C	D	
1	-1	-1	0	0	4.06	16	1	0	1	0	3.35
2	1	1	0	0	4.77	17	0	0	-1	-1	4.98
3	0	0	1	-1	3.13	18	0	1	0	-1	4.49
4	0	0	1	1	3.70	19	0	0	0	0	1.78
5	1	-1	0	0	3.56	20	-1	0	-1	0	5.27
6	0	1	1	0	3.92	21	0	0	0	0	1.71
7	1	0	0	-1	3.84	22	0	0	0	0	2.21
8	0	1	0	1	4.84	23	-1	0	1	0	3.49
9	0	0	0	0	1.85	24	-1	0	0	1	4.49
10	0	0	0	0	2.14	25	0	-1	1	0	2.78
11	1	0	0	1	4.56	26	0	1	-1	0	5.34
12	-1	0	0	-1	4.63	27	0	0	-1	1	4.31
13	-1	1	0	0	4.79	28	0	-1	0	1	4.13
14	0	-1	-1	0	4.49	29	1	0	-1	0	4.41
15	0	-1	0	-1	3.56						

由表 3 和表 4 可知,通过对各因素进行拟合后,得到的回归方程见式(1)。

$$Y = 1.94 - 0.19 \times A + 0.46 \times B - 0.70 \times C + 0.12 \times D + 0.12 \times AB + 0.18 \times AC +$$

$$0.21 \times AD + 0.073 \times BC - 0.055 \times BD + 0.31 \times CD + 1.23 \times A^2 + 1.17 \times B^2 + 0.97 \times C^2 + 1.16 \times D^2$$

(1)

式中:Y 为含甲醇污水的总指标响应值。

表 4 不同自变量条件下响应值的方差分析

方差来源	平方和	均方和	F 值	显著水平 P	显著性	方差来源	平方和	均方和	F 值	显著水平 P	显著性
模型	31.42	2.24	66.21	<0.000 1	***	CD	0.38	0.38	11.34	0.004 6	**
A-A	0.42	0.42	12.34	0.003 4	**	A ²	9.81	9.81	289.45	<0.000 1	***
B-B	2.59	2.59	76.29	<0.000 1	***	B ²	8.86	8.86	261.34	<0.000 1	***
C-C	5.92	5.92	174.75	<0.000 1	***	C ²	6.15	6.15	181.39	<0.000 1	***
D-D	0.16	0.16	4.82	0.045 5	*	D ²	8.72	8.72	257.44	<0.000 1	***
AB	0.058	0.058	1.7	0.213 4		残差	0.47	0.034			
AC	0.13	0.13	3.82	0.070 8		失拟误差	0.27	0.027	0.55	0.797 2	不显著
AD	0.18	0.18	5.46	0.034 9	*	纯误差	0.2	0.05			
BC	0.021	0.021	0.62	0.444		总离差	31.89				
BD	0.012	0.012	0.36	0.559 7							

注:①***代表 $P>F$, P 值小于 0.000 1 为极显著;②**代表 $P>F$, P 值小于 0.01 为高度显著;③*代表 $P>F$, P 值小于 0.05 为显著。

由表 4 可知,回归方程的 F 值为 66.21,其显著水平 $P<0.000 1$,远低于 0.05,说明回归模型显著。回归方程的拟合度、预测拟合度、校正拟合度的 r 值分别为 0.985 1,0.940 6,0.970 2,故该模型预测结果

合理、有效。
2)响应面等高线图分析
在响应面设计基础上,得到二次回归方程的等高线图,见图 9。

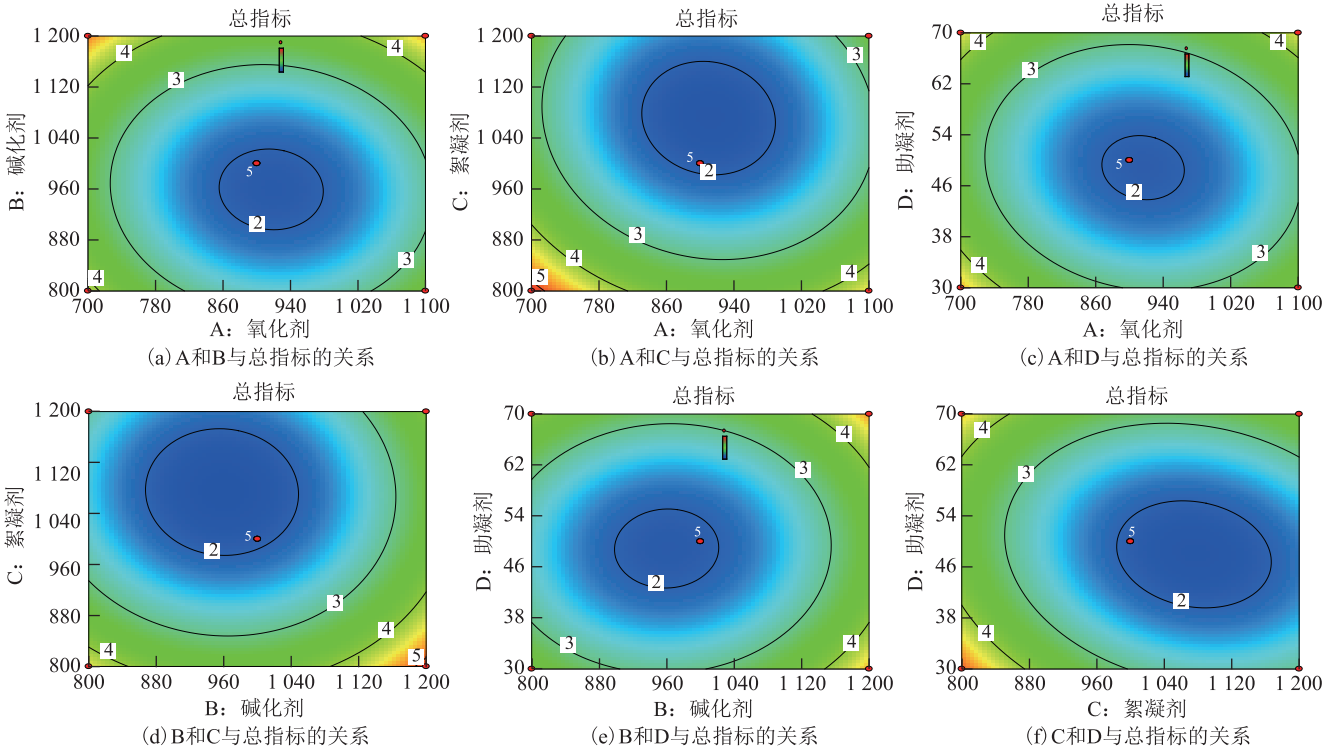


图 9 响应面回归等高线

由图 9 可知,氧化剂与碱化剂、氧化剂与絮凝剂注入量之间有明显的交互作用,絮凝剂注入量对响应值的影响最为显著,等高线图中曲线反应的结果与表 4 的分析结果十分吻合。据 F 值与显著水平可得出,

各因素对响应值含甲醇污水的总指标的影响顺序为絮凝剂>碱化剂>氧化剂>助凝剂。
以 Design-Expert 软件提供的预测结果为基础,同时考虑成本投入、环境保护等相关因素,得到最佳注入

量为:氧化剂 832.39 mg/L,碱化剂 1 108.64 mg/L,絮凝剂 889.01 mg/L,助凝剂 57.59 mg/L,此时,预测的响应值可以达到 3.525。

在上述最优条件下平行实验 3 次,含甲醇污水的响应值总指标分别为 3.6,3.9,3.8,平均值为 3.77,结果与模型预测值相近,表明该分析方法具有一定准确度。

3) 现场试验

含甲醇污水预处理系统改造完成后,根据预处理药剂的最佳注入量,进行了现场试验。试验结果表明:改造后所需预处理药剂除氧化剂增加了 11%,其余 3 种药剂减少了约 33%,预计该系统每年可节约药剂费用 25 万余元。含醇污水预处理加药量调整后,预处理后的含甲醇污水 pH 值明显升高,由 5.5 上升为 7.4,污水浊度和总铁含量显著下降,浊度由 19.7 NTU 降低至 6.8 NTU,总铁含量由 29.79 mg/L 降低至 11.04 mg/L。

改造后预处理运行效果明显,延长了甲醇回收的平稳运行时间,精馏塔检修后,由原来的两周后出现堵塞现象延长至 40 d 以上还能正常运行。当打开该塔进料口处,检查发现塔盘表面光洁,无明显结垢现象。同时设备和管线的结垢、堵塞情况明显好转,由原来的 1 个月检修两次,降至 3 个月左右检修 1 次。

3 结 论

1) 含甲醇污水中大量存在的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 是导致甲醇再生装置结垢腐蚀的主要原因。

2) 以含甲醇污水的总铁含量、浊度为考察的总指标,采用响应面优化得到氧化剂、碱化剂、絮凝剂及助凝剂各因素对响应值总指标的影响顺序为:絮凝剂>碱化剂>氧化剂>助凝剂;最佳注入量为:氧化剂 832.39 mg/L,碱化剂 1 108.64 mg/L,絮凝剂 889.01 mg/L,助凝剂 57.59 mg/L,此时,预测的响应值为 3.525,实验值为 3.77,模型十分吻合。

3) 现场试验结果表明,现场水质各项指标均有了较大变化,处理后 pH 值为 7.4,浊度为 6.8 NTU,总铁含量为 11.04 mg/L,均达到预处理水质指标要求,设备及相关管线的腐蚀结垢情况明显好转。

参 考 文 献

- [1] 王遇冬.天然气处理与加工工艺[M].北京:石油工业出版社,1999:1-13.
- [2] 单巧利,李勇,张超,等.长庆气田甲醇污水水质特点分析[J].油气田环境保护,2012,22(6):47-49.
- [3] 孙华超,吴伟然,朱德春,等.大牛地气田含醇污水处理工艺效果评价[J].中国石油和化工标准与质量,2017,37(6):120-121.
- [4] 黄鹤.气田含醇污水预处理工艺优化研究[D].西安:西安石油大学,2018:14-21.
- [5] 王新强,吕乃欣,高燕,等.陕北气田采出污水处理方法及工艺研究[J].石油与天然气化工,2011,40(4):406-409.
- [6] 吕雷,马天奇,张淑侠,等.气田甲醇污水处理装置的运行优化[J].环境工程学报,2020,14(4):1113-1118.
- [7] 周玉荣,张成虎,薛永强,等.榆林气田含油含醇污水处理工艺改造效果评价[J].天然气工业,2008(2):139-141.
- [8] 高生军,宋绍富,屈撑囤,等.浊度控制法处理油田出水技术研究与应用[J].油田化学,2009,26(1):42-45.
- [9] 严瑞.水处理剂应用手册[M].北京:化学工业出版社,2000:25-26.
- [10] 刘军.聚丙烯酰胺在工业废水处理中的应用[J].广西轻工业,2009,25(7):98-99.
- [11] 田颖,王学魁,高毅颖,等.响应面法优化钡盐转化法重铬酸钠的制备工艺[J].化工进展,2011,30(11):2388-2392.
- [12] 刘剑青,肖小年,许英伟,等.响应面法优化薑头中皂苷得到提取工艺研究[J].食品工业科技,2013,34(1):254-257.
- [13] 王娜,黄雪萍,张昆,等.气田含油含醇污水预处理运行参数优化[J].石油化工应用,2011,30(4):73-76.

(收稿日期 2021-04-08)

(编辑 刘晓辉)

环 境 保 护

从 我 做 起