

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.083



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



紫外线消毒系统中超声波抑垢的机制及参数优化

陈光, 赵志伟, 李莉

(重庆大学环境与生态学院, 重庆 400045)

摘要: 紫外消毒技术因具有无须投加化学药剂、消毒广谱性、产生副产物少等优势越来越受重视, 但石英套管结垢引起的消毒效果难以保障, 成为限制紫外消毒技术发展的瓶颈。在污水厂紫外线消毒渠中搭建中试试验装置, 利用超声波抑制石英套管结垢, 结果表明, 超声波能通过延长结垢诱导期来抑制垢的生成; 以相对紫外线强度为考察对象, 通过单因素试验确定超声波功率、清洗周期、超声时间合适的范围分别在 500~1 000 W、0.5~1.0 d、20~40 min; 对于使用时间为 0、0.5、1、3、5 a 的石英套管, 超声波均有很好的抑垢效果。为了进一步优化参数, 采用 Box-Behnken 设计法和响应面分析方法对主要因素加以优化, 得到了响应面回归模型和最优解。结果表明, 超声波技术抑垢清垢的优化工艺参数为超声波功率 $P=965$ W, 清洗周期 $T=0.5$ d, 超声时间 $t=34$ min, 预测相对紫外线强度最大值为 1.01。通过统计学检验, 模型具有良好的拟合性, 在优化工艺条件下得到的相对紫外线强度预测值与试验值接近, 误差为 1.00%。

关键词: 超声波; 紫外线消毒; 石英套管; 结垢; 响应面法

中图分类号: X703.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2025)01-0221-08

Mechanism and parameter optimization of ultrasonic fouling suppression in ultraviolet disinfection system

CHEN Guang, ZHAO Zhiwei, LI Li

(College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Ultraviolet disinfection technology has attracted more and more attention due to its advantages of no need to add chemicals, broad-spectrum disinfection and less disinfection by-products. However, it is difficult to guarantee the disinfection effect caused by the fouling of quartz sleeves, which has become a bottleneck restricting the development of ultraviolet disinfection technology. In this study, a pilot test device was set up in the ultraviolet disinfection channel of the sewage plant, and ultrasonic waves were used to inhibit the fouling of quartz sleeves. Single factor experiments have determined that the appropriate ranges of ultrasonic power, cleaning cycle, and ultrasonic time are 500-1 000 W, 0.5-1.0 d, and 20-40 min respectively; For quartz sleeves with a service time of 0, 0.5, 1, 3, and 5 years, ultrasonic waves have a good fouling inhibition effect. In order to further optimize the parameters, the Box-Behnken design method and the response surface analysis method were used to optimize the main factors, and the response surface regression model and the optimal solution were

收稿日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51878090)

作者简介: 陈光(1998-), 男, 主要从事水处理技术研究, E-mail: 3387099095@qq.com。

赵志伟(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: hit_zzw@163.com。

Received: 2023-05-09

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51878090)

Author brief: CHEN Guang (1998-), main research interest: water treatment technology, E-mail: 3387099095@qq.com.

ZHAO Zhiwei (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: hit_zzw@163.com.

obtained. The results show that the optimized process parameters of ultrasonic technology for fouling inhibition and cleaning are ultrasonic power $P=965\text{ W}$, cleaning cycle $T=0.5\text{ days}$, ultrasonic time $t=34\text{ minutes}$, and the maximum predicted relative ultraviolet intensity is 1.01. Through the statistical test, the model has a good fit, and the predicted value of the relative ultraviolet intensity obtained under the optimized process conditions is close to the experimental value with an error of 1.00%.

Keywords: ultrasound; ultraviolet disinfection; quartz sleeve; fouling; response surface analysis method

紫外线消毒是一种广泛应用的物理消毒技术,通过细胞的遗传物质(DNA和RNA)吸收紫外线形成嘧啶二聚体来阻止其复制和转录,使得微生物不能新陈代谢而失活^[1];同时光解产生的 $\text{H}\cdot$ 可以破坏细胞膜^[2-3]。紫外线消毒具有无须投加化学药剂、消毒广谱性、产生副产物少等优势,在城镇污水消毒处理中被广泛使用。随着紫外线消毒技术的普及,人们发现紫外线消毒存在一些天然的缺陷,如无持续消毒能力、光复活和石英套管结垢等^[4-6]。紫外线无持续消毒能力可以通过投加少量氯解决,且污水消毒对余氯并没有下限要求;当紫外线剂量足够多时,可以明显削弱病原体光复活的能力。结垢是紫外线消毒系统中决定剂量的最关键问题之一,会直接降低石英套管紫外穿透率,大大降低影响紫外线设备的消毒剂量,导致水质不达标。

目前,对于紫外线抑垢系统常用的有机械清洗、机械化学联合清洗^[7]和超声波清洗^[8]等技术。机械清洗、机械化学联合清洗都具有连续在线清洗、自动化程度高等优点,但处理效果不显著。首先,它们会对石英套管表面产生很大损伤,提高了结垢率;其次,两者对铁垢的去除效果不显著,而铁垢是污垢中吸收紫外线能力较强的金属元素;最后,机械化学联合清洗效果优于机械清洗,但是因化学清洗剂的存在难以应用于自来水消毒。

超声波清洗是利用其在传播过程中产生的空化效应等特性,无须添加化学清洗剂就能达到很好的抑垢或除垢效果,目前已经广泛应用于工业生产的诸多领域^[9-10],但当前超声波抑制石英套管结垢的研究相对缺乏,超声波抑垢的机制以及影响因素的研究不够全面,严重阻碍了超声波清洗技术的进一步推广。为此,针对实际污水处理厂中紫外线消毒渠中常见的结垢问题,搭建超声波抑制石英套管结垢装置,对超声波抑垢的机制、影响因素进行研究。

1 试验

1.1 试验装置

试验装置如图1所示,污水处理厂二级处理后的出水进入灯管排架所在的明渠式紫外线消毒渠,经过一段时间后,紫外线灯管表面的石英套管表面

会结垢。将由不锈钢外壳和超声波震头组成的超声波震动棒通过套环固定在实心钢管上,通过链条松紧装置调整链条松紧程度。清洗时开启超声波发生器,通过导线使超声波震动棒发出超声波;同时将电动机通电,链条驱动超声波震动棒在实心钢管上通过齿轮来回移动,实现对石英套管的全面抑垢保证高紫外线透射率。中试现场如图2所示,试验时仅需更换1组紫外灯排架即可。

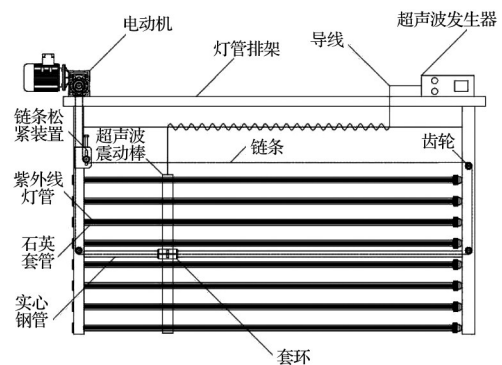


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device



图2 中试现场示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pilot test site

1.2 试验方案及评价指标

1.2.1 试验方案

取已结垢的、相对紫外线强度为0的150 cm石英套管,按照前端、中端和后端的位置各取10 cm长的试验片段,将10 cm长的试验片段放入500 mL烧杯中,使用0.1 mol/L稀盐酸进行溶解,静置8 h取溶液,测量污垢的金属成分。

试验在临沂市第二污水处理厂开展,试验用水为污水厂的二沉池出水。在超声波功率 $P=1\ 000\text{ W}$ 、清洗周期 $T=1.0\text{ d}$ 、超声时间 $t=30\text{ min}$ 的情况下,运行试验装置;同时在距离装置150 cm处设置对照组,无超声波影响,其余参数相同。运行13.5 d

后比较石英套管结垢情况。

分别以超声波功率、清洗周期、超声时间和石英套管使用时间作为单因素变量,研究对超声波抑制石英套管结垢的影响规律。在此基础上,使用响应面分析法,分析各因素的交互作用及最优解。

1.2.2 评价指标

紫外线强度由远方 U-20 辐照计测量,单位为 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。定制一支长 120 cm、截面为直径 5.5 cm 的圆石英套管,测量时先校零再将探头放入石英套管中,深入水中紧贴待测紫外线灯管,待紫外线强度稳定后读数,相对紫外线强度按式(1)计算。每间隔 0.5 d 测定 1 次紫外线强度,每次试验运行 6.5 d。1 根石英套管长 1.5 m,平均分成前端、中端和后端,每次将探头紧贴石英套管表面测量光强。

$$U' = \frac{U_t}{U_0} \quad (1)$$

式中: U' 为相对紫外线强度; U_t 表示 t 时紫外线强度; U_0 表示初始紫外线强度。

2 试验结果与讨论

2.1 石英套管表面垢的成分

从某污水处理厂深度处理工艺中收集已结垢石英套管,分析其中的金属成分,结果如图 3 所示。观察到 Ca 为污垢金属成分中占比最高的部分,占比

89%~91%。这表明,紫外线灯管的热输出导致了 CaCO_3 等化合物因温度升高使得溶解度下降从而在水中析出^[11], 积累在石英套管表面。

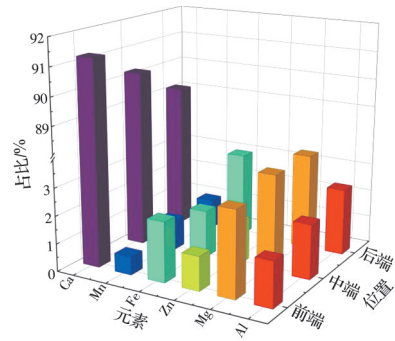


图 3 污垢的金属成分组成

Fig. 3 Metal composition of fouling

除了 Ca 之外,还检测了 Mn、Mg、Fe、Zn 和 Al 等,占比 9%~11%。Fe 的含量虽低,但对实际消毒系统的影响很大。Fe 的摩尔吸光系数是 Ca 的 3 倍以上,吸收紫外线的能力更强^[12];另外,铁垢更难去除,传统的机械-化学联合清洗不能很好地抑垢或除垢。除此之外,Fe、Mn 等元素与 Ca 产生共沉淀,会导致 CaCO_3 的析出结垢。

2.2 超声波抑垢的机制

图 4 为中试设备在不同条件下相对紫外线强度变化图,分别为超声波清洗组与对照组。

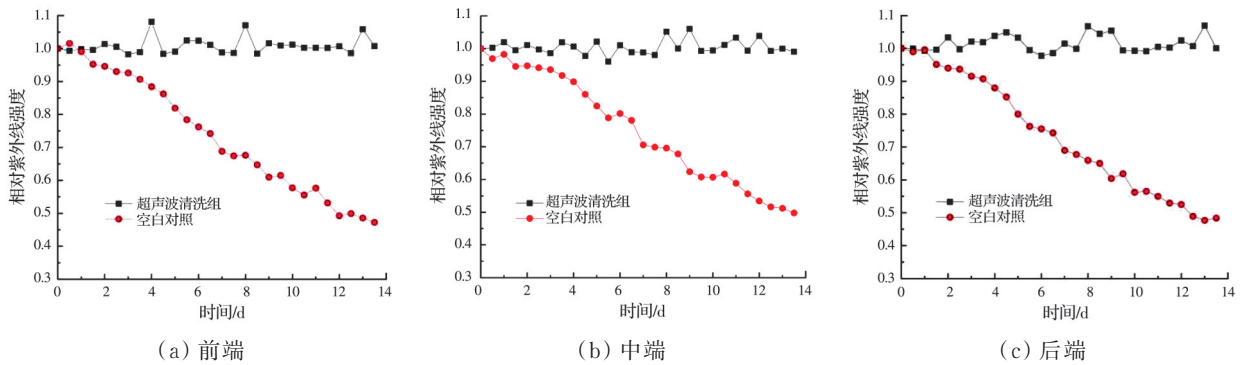


图 4 不同条件下相对紫外线强度变化图

Fig. 4 The relative UV intensity changes under different conditions

取超声波清洗组、对照组运行不同天数的石英套管碎片进行 SEM 扫描,如图 5 所示,其中图 5(a)~(e)、图 5(f)~(j) 分别代表在超声波条件、对照组运行不同天数下的扫描结果。在对照组结垢的初始阶段,第 1 天的相对紫外线强度维持在 1 左右,并没有污垢产生,如图 5(f) 所示,这一时间段主要是成垢粒子在固体表面形成晶核,即结垢处于诱导期,需要一定时间才能产生结垢,再积累在石英套管表面;到第 4 天,相对紫外线强度下降到 0.85,初始污垢已经形成,如图 5(h) 所示,石英套管表面为溶质

分子提供了更多的附着位点,污垢开始稳定增长,相对紫外线强度开始快速下降;到第 13 天,相对紫外线强度只有 0.49,石英套管表面已经被污垢覆盖,如图 5(j) 所示,紫外线灯已经逐渐丧失消毒能力。

石英套管表面结垢的形成有一系列显著特点^[13],其中之一就是诱导期,表现在相对紫外线强度上就是其值维持在 1.00 左右。在表面形成沉积物之前,成垢粒子必须从水溶液转移到石英套管表面,如果预先形成大粒径颗粒,会通过重力作用附着在表面。一旦附着在表面,就会产生新的附着

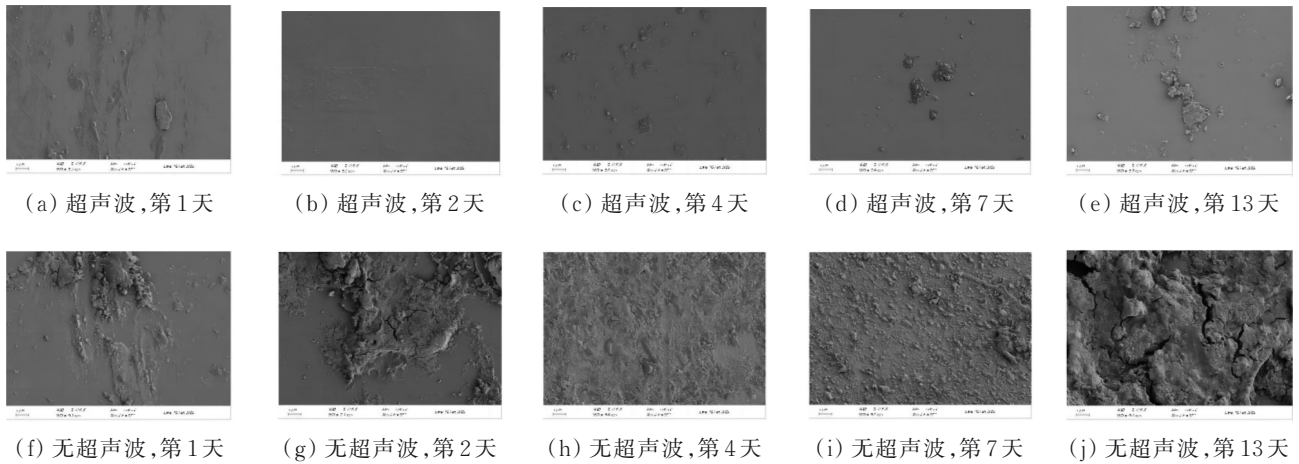


图 5 有/无超声波条件下石英套管结垢的 SEM 图片

Fig. 5 SEM pictures of fouling on quartz sleeves under ultrasonic conditions

点,石英套管表面不断被污垢覆盖,此时相对紫外线强度开始下降。

对比超声波清洗组结垢的各阶段,相对紫外线强度均维持在 1.00 左右,SEM 图片表明,试验中的石英套管表面基本上无结垢现象,表明石英套管结垢一直处在诱导期,此时污垢不足够坚固,难以承受侵蚀,超声波的空化效应很容易去除这些“新垢”,大大延长了结垢的诱导期,可以有效抑垢。

2.3 单因素试验

2.3.1 超声波功率

以超声时间 30 min、清洗周期 1.0 d 为体系,通过调控不同的超声波功率(分别为 100、300、500、700、1 000 W)来考察不同超声波功率对超声波抑垢效果的影响,结果如图 6 所示。以图 6(a)前端为例(下同),随着超声波功率的增加,最终的相对紫外线强度越高,说明超声波清洗的效果越好。当超声波功率为 100 W 时,最终的相对紫外线强度仅约 0.75;当超声波功率在 500~1 000 W 时,最终的相对紫外线强度超过 0.95。

改变超声波功率实际上调整了超声波的声压幅值。所谓声压,是指某一点在声场中某一瞬时的

压强与无声波存在时的静压强之差^[14]。声压的改变会影响空化场的压强和气含率,当提高超声波功率时,声压幅值增大,水体的汽含率升高。此时,在超声波的正压区,超声波传递的能量对空化泡的膨胀作用更显著,空化泡的体积增大;而在负压区,超声波传递的能量对空化泡的压缩作用加强,增加了空化泡减小的体积量。这种周期性变化必然导致空化泡体积变化频率提高、变化幅度增加,运动更加剧烈,但也延长了空化泡的振动周期。即提高超声波功率会增加声压幅值,促进空化效应。

但超声波功率并不是越高越好。超声强度有一个临界值,超过这个临界值,气泡往往会变得太大,在振动周期中没有足够的时间进行坍塌。此外,高超声强度会产生大量的气泡,它们会在超声波换能器表面聚集从而形成一道屏障,束缚了超声能量的进一步传播,导致抑制作用,超声波空化效应的效率整体上降低,削弱了对远离声源的污垢的抑垢效果^[15]。同时功率越大,共振与剪切力作用越激烈,造成被清洗设备的损伤。因此,超声波功率还需要在 500~1 000 W 进行进一步优化。

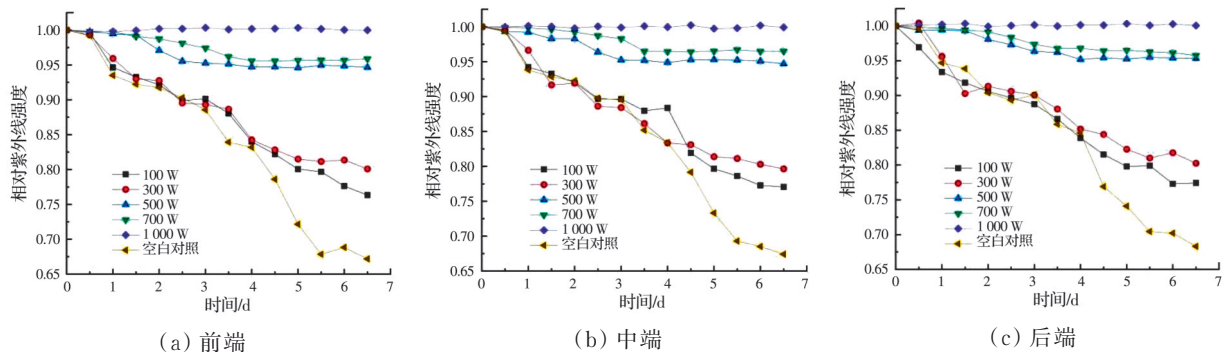


图 6 超声波功率对超声波抑垢效果的影响

Fig. 6 Effect of ultrasonic power on ultrasonic cleaning effect

2.3.2 清洗周期

试验中以超声波功率 1 000 W、清洗时间 30 min 为体系,通过调控不同的清洗周期(分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 d)来考察不同清洗周期对超声波

抑垢效果的影响,结果如图 7 所示。清洗周期为 0.5~1.0 d 时,相对紫外线强度维持在 1.00 左右;当清洗周期在 1.0~3.0 d 时,相对紫外线强度缓慢下降,且在每次超声波运行后会出现反弹。

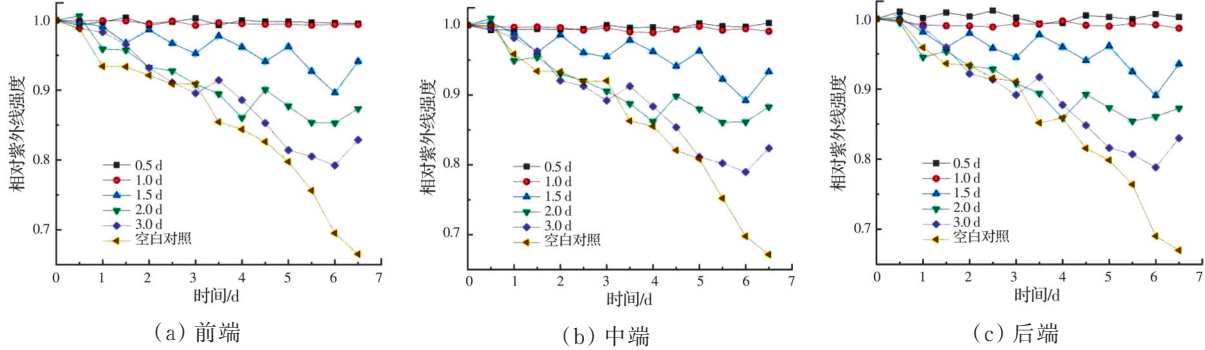


图 7 清洗周期对超声波抑垢效果的影响

Fig. 7 Effect of cleaning cycle on ultrasonic cleaning effect

结垢处于诱导期时,污垢不会完全覆盖石英套管表面,而且此时其与石英套管表面的黏附强度较弱,所以在诱导期通过超声波的空化效应很容易去除这些“新垢”^[16-17]。然而,当结垢处于诱导期末期或者处于生长期时,石英套管表面已经出现大量结垢现象甚至表面已经完全被污垢层覆盖,污垢与石英套管表面的黏附程度已经很强。在这种情况下,超声波空化效应所产生的高温高压对污垢的剥离作用弱。所以清洗周期在 1.5~3.0 d 时,相对紫外线强度已经不能维持在 1.00,呈现波动式下降的现象,在超声波震动棒运行时,相对紫外线强度会回

升,但总体仍呈下降趋势,超声波仅仅延缓了石英套管表面被污垢完全覆盖的时间。综上所述,超声波抑制石英套管结垢的清洗周期要在 0.5~1.5 d 进行进一步优化。

2.3.3 超声时间

试验中以超声波功率 1 000 W、清洗周期 1.0 d 为体系,通过调控超声时间(分别为 10、20、30、40、50 min)来考察不同超声时间对超声波抑垢效果的影响,结果如图 8 所示。超声时间越长,抑垢效果越好。当超声时间为 30 min 时,最终相对紫外线强度约为 1.00;当超声时间延至 50 min 时,相对紫外线强度始终保持在 1.00 左右。

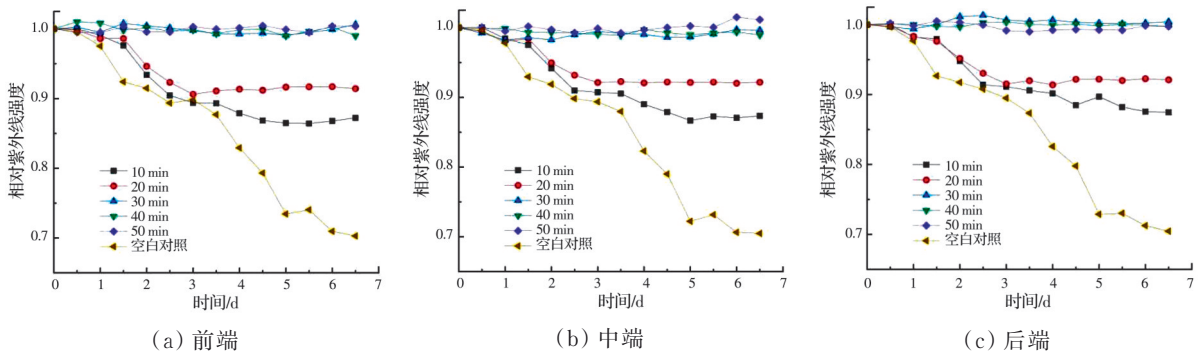


图 8 超声时间对超声波抑垢效果的影响

Fig. 8 Effect of ultrasonic time on ultrasonic cleaning effect

在结垢诱导期加入超声波,随着超声时间的不断增加,结垢颗粒剥蚀累积量相应提高,直到超过其在石英套管表面的附着量,结合图 8 相对紫外线强度的变化情况可以看出,加入超声波后,前期其数值缓慢下降,经过一段时间后保持不变,此时剥蚀量与结垢量几乎相等。

可见,增加超声时间可以提高超声波抑垢的效

果,但是超声时间越长,耗电成本就越高,也会降低超声波震动棒的使用寿命。结合经济性原则,考虑超声时间为 20~40 min 进行进一步优化。

2.3.4 石英套管使用时间

以超声波功率 1 000 W、清洗周期 1.0 d 为体系,通过调控超声时间为 30 min,使用运行时间不同的石英套管,考察超声波的抑垢效果,结果如图 9 所

示。对于使用时间为 0、0.5、1、3、5 a 的石英套管,最终相对紫外线强度均在 0.90 以上,分别为 1.00、

0.97、0.95、0.93、0.92,说明超声波对使用时间不同的石英套管均有很好的抑垢效果。

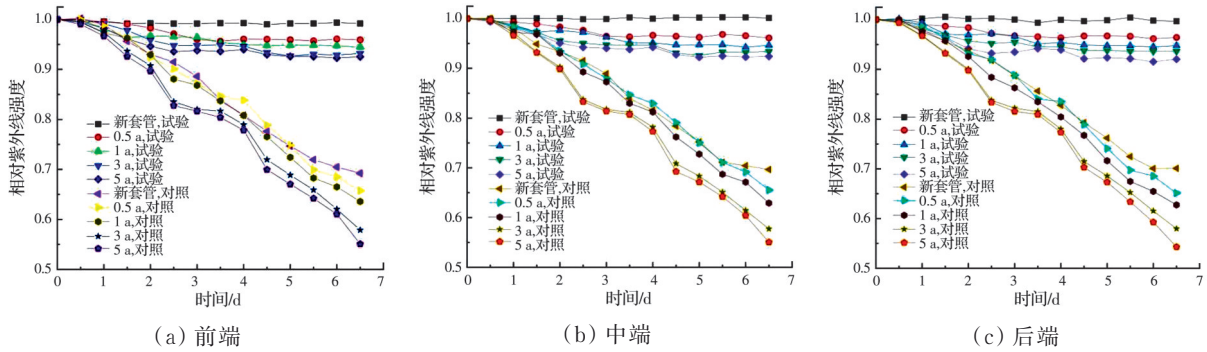


图 9 石英套管使用时间对超声波抑垢效果的影响

Fig. 9 Effect of the service time of the quartz sleeve on the effect of ultrasonic cleaning

石英套管使用时间不同,造成其表面相对粗糙度不同。石英套管使用时间越长,表面划痕、“孔洞”越多,为成垢粒子提供了更多的附着点,结垢更快。引入超声波会减薄石英套管表面的水体动力边界层,进而削弱成垢粒子的表面黏附力,致使更多粒子直接暴露于水体中,达到更佳清洗效果。

试验结果说明,超声波可以通过大范围的空化效应,阻碍成垢粒子在划痕、“孔洞”处的附着,可以很好地抑制“永久性结垢”。

2.4 响应面试验

2.4.1 因素选取与 BBD 试验设计

响应面分析包括 3 个层面^[18]:首先,考察显著性因素,依据文献研究或单因素试验确定最优水平,选择合适的实验设计方法;其次,构建适用模型,进行显著性检验,得到拟合方程;最后,对模型进行求解,得到最优解,了解各因素对响应变量的影响。总而言之,就是实验设计、模型拟合和过程优化^[19]。

根据单因素实验结果,在超声波抑制石英套管结垢的过程中,石英套管使用时间影响不大,影响其抑垢效率的主要因素为超声波功率、清洗周期和超声时间,分别以 A、B、C 表示,用 1、0、-1 对每个因素的最大值、平均值和最小值进行编码,以相对紫外线强度为响应变量 Y,如表 1 所示。

表 1 响应面试验因素及水平

Table1 Response surface test factors and levels

水平	A:超声波功率/W	B:清洗周期/d	C:超声时间/min
水平-1	500	0.5	20
水平 0	750	1.0	30
水平 1	1 000	1.5	40

项式线性回归二次方程,具体函数关系式见式(2)。

$$Y = 0.560176 + 0.000687A + 0.0543804B + 0.006446C - 0.000052AB + 0.00000716053AC - 0.000974BC - 0.000000498984A^2 - 0.015944B^2 - 0.000157C^2 \quad (2)$$

式中:Y为相对紫外线强度;A为超声波功率P;B为清洗周期T;C为超声时间t。

二次回归模型的方差分析结果如表 2 所示。方差分析:模型 P 值 < 0.050 0,表明该模型具有显著性,与试验数据的拟合精度高,可以进行后续的优化设计;失拟项 P 值 > 0.050 0 表明不显著,说明模型在被设计的回归区域中拟合较好。

表 2 二次回归模型的方差分析结果

Table2 Analysis of variance results of quadratic regression model

项目	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	0.018 0	9	0.002 0	28.85	0.000 1	显著
A	0.005 1	1	0.005 1	74.34	<0.000 1	显著
B	0.004 2	1	0.004 2	60.18	0.000 1	显著
C	0.001 6	1	0.001 6	22.52	0.002 1	显著
AB	0.000 2	1	0.000 2	2.43	0.162 9	
AC	0.001 3	1	0.001 3	18.52	0.003 6	显著
BC	0.000 1	1	0.000 1	1.37	0.280 1	
A ²	0.004 1	1	0.004 1	59.17	0.000 1	显著
B ²	0.000 1	1	0.000 1	0.966	0.358 3	
C ²	0.001 0	1	0.001 0	15.08	0.006 0	显著
剩余误差	0.000 5	7	0.000 1			
失拟项	0.000 2	3	0.000 1	1.35	0.376 6	
纯误差	0.000 2	4	0.000 1			
总误差	0.018 5	16				

2.4.2 二次回归模型及方差分析

采用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析,拟合得到各因素关于一二次效应及交互效应的多

从结果来看,一次项 A、B、C 及二次项 A²、C² 对超声波抑垢效果有显著的影响,交互作用 AC 也有显著的影响。在研究的 3 个因素中,对超声波抑

垢效果影响的显著性大小依次为超声波功率>清洗周期>超声时间。

2.4.3 显著性分析

在软件 Design-Expert13 中可以得出预测值与实际值的分布图、残差的正态概率分布图和残差与预测值的分布图,如图 10 所示。图 10(a)表明预测

值与实际值对应关系图基本在一条直线上;图 10(b)表明残差的正态功率也大部分在一条直线上,说明模型的适应性较好;图 10(c)表明残差与预测值的对应关系模糊、无明显规律,说明模型是显著的。从图 10 可以看出,响应面法设计模型分析超声波抑制石英套管结垢的显著性高。

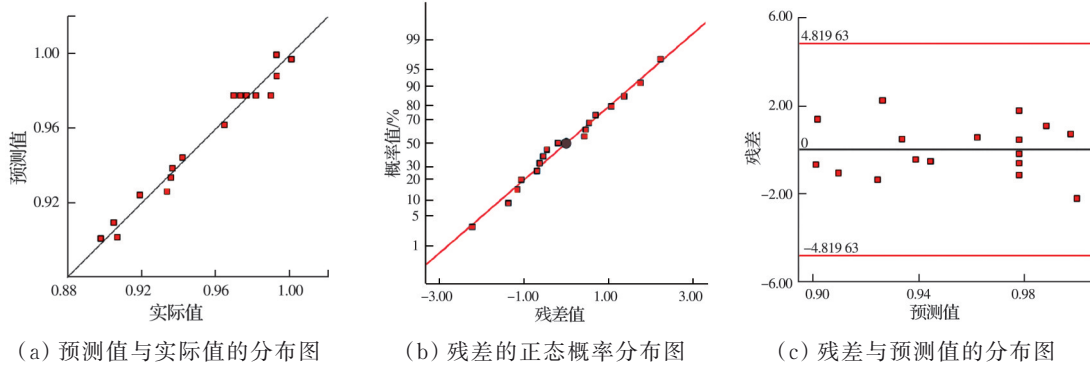


图 10 显著性分析

Fig. 10 Significance analysis

2.4.4 交互效应分析

因素 AC(超声波功率 P 与超声时间 t) 的三维立体响应曲面图和二维等高线图如图 11 所示。在清洗周期 T 不变的条件下,超声波功率 P 与超声时间 t 有一定的交互作用;从响应曲面图可以看出,增大超声波功率 P 与超声时间 t ,相对紫外线强度随之提

高,相对紫外线强度存在极大点,极大点出现在超声波功率 P 在 600~1000 W、超声时间 t 在 20~40 min 的范围内。

2.4.5 最优解及试验验证

从响应曲面图和等高线图可以观察到二次回归模型的最优解,即可根据图像确定超声波抑制石英套管结垢的最佳运行参数范围。分别对 A 、 B 、 C 求导,联立求解,所得结果即为最佳运行参数,得到超声波功率 $P=965$ W,清洗周期 $T=0.5$ d,超声时间 $t=34$ min,得到相对紫外线强度最大值为 1.01。

根据优化结果,结合现场试验调控条件,得出运行的最优参数为:超声波功率 $P=965$ W,清洗周期 $T=0.5$ d,超声时间 $t=34$ min。运行超声波清洗石英套管结垢的试验,最终得到相对紫外线强度为 1.00,与预测值的相对误差为 1.00%,表明该模型能够很好地拟合实验数据,相关性明显,可以精确地预测响应值。即采用响应面法应用于超声波抑制石英套管结垢工艺参数的优化合理。

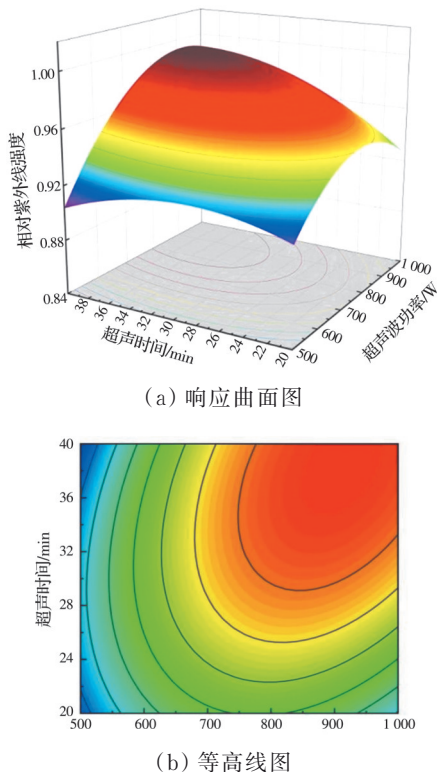


图 11 超声波功率 P 与超声时间 t 的交互效应图

Fig. 11 Interaction diagram of ultrasonic power P and ultrasonic time t

3 结论

针对搭建的超声波中试试验平台,利用污水厂二沉池出水为原水,进行了紫外消毒系统的超声波抑垢试验,得到以下主要结论:

1)Ca 代表了污垢金属成分中占比最高的部分,在 89%~91%;Mn、Mg、Fe、Zn 和 Al 等占比较低,在 9%~11%。

2)超声波功率、清洗周期、超声时间对超声波清洗效果有明显的影 响;石英套管使用时间则影响

较小,说明对“永久性结垢”也有很好的清洗效果。

3) 超声波可以通过延长结垢诱导期来抑制石英套管结垢。

4) 根据响应面分析试验,超声波功率的二次方、超声时间的二次方、超声波功率 \times 超声时间也有显著影响。最佳运行条件为超声波功率 $P=965\text{ W}$,清洗周期 $T=0.5\text{ d}$,超声时间 $t=34\text{ min}$ 。

参考文献

- [1] 王黛瑶, 李恩, 李刚, 等. 饮用水紫外-氯联合消毒工艺研究进展[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 94-101.
WANG D Y, LI E, LI G, et al. Research progress of ultraviolet-chlorine combined disinfection process for drinking water [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(10): 94-101. (in Chinese)
- [2] HALLMICH C, GEHR R. Effect of pre- and post-UV disinfection conditions on photoreactivation of fecal coliforms in wastewater effluents [J]. Water Research, 2010, 44(9): 2885-2893.
- [3] BOSSHARD F, RIEDEL K, SCHNEIDER T, et al. Protein oxidation and aggregation in UVA-irradiated Escherichia coli cells as signs of accelerated cellular senescence [J]. Environmental Microbiology, 2010, 12(11): 2931-2945.
- [4] FITZHENRY K, CLIFFORD E, ROWAN N, et al. Bacterial inactivation, photoreactivation and dark repair post flow-through pulsed UV disinfection [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 41: 102070.
- [5] 符家瑞, 周艾珈, 刘勇, 等. 我国城镇污水再生利用技术研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(1): 18-24, 37.
FU J R, ZHOU A J, LIU Y, et al. Research progress of urban sewage reclamation technology in China [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(1): 18-24, 37. (in Chinese)
- [6] 郑毅豪, 李梦凯, 张军, 等. 市政污水紫外线消毒运行效果的影响因素分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(20): 14-19.
ZHENG Y H, LI M K, ZHANG J, et al. Analysis of influencing factors on the operation effect of ultraviolet disinfection of municipal sewage [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(20): 14-19. (in Chinese)
- [7] 孙文俊, 吕东明. 紫外线技术在我国城镇给排水处理中应用的挑战和趋势[J]. 净水技术, 2023, 42(3): 1-6.
SUN W J, LÜ D M. Challenge and trend of UV technology application in urban water supply and drainage treatment at home [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 1-6. (in Chinese)
- [8] 徐元哲, 吴路光. 一种智能水体紫外杀菌装置: CN208182766U [P]. 2018-12-04.
XU Y Z, WU L G. An intelligent ultraviolet sterilization device for water bodies: CN208182766U [P]. 2018-12-04. (in Chinese)
- [9] LIMA J F, VILAR E O. The use of ultrasound to reduce cathodic incrustation [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(3): 963-969.
- [10] BHASARKAR J B, CHAKMA S, MOHOLKAR V S. Investigations in physical mechanism of the oxidative desulfurization process assisted simultaneously by phase transfer agent and ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 24: 98-106.
- [11] COTO B, MARTOS C, PEÑA J L, et al. Effects in the solubility of CaCO_3 : Experimental study and model description [J]. Fluid Phase Equilibria, 2012, 324: 1-7.
- [12] WAIT I W, BLATCHLEY E R III. Model of radiation transmittance by inorganic fouling on UV reactor lamp sleeves [J]. Water Environment Research, 2010, 82(11): 2272-2278.
- [13] MACADAM J, PARSONS S A. Calcium carbonate scale formation and control [J]. Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology, 2004, 3(2): 159-169.
- [14] QASIM M, DARWISH N N, MHIYO S, et al. The use of ultrasound to mitigate membrane fouling in desalination and water treatment [J]. Desalination, 2018, 443: 143-164.
- [15] 张艾萍, 张恒, 张越. 超声波除垢的影响因素分析[J]. 热能动力工程, 2017, 32(7): 130-134, 144.
ZHANG A P, ZHANG H, ZHANG Y. Analysis and outlook on the influencing factors of ultrasonic descaling [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(7): 130-134, 144. (in Chinese)
- [16] PENG J, QIU Y, GEHR R. Characterization of permanent fouling on the surfaces of UV lamps used for wastewater disinfection [J]. Water Environment Research, 2005, 77(4): 309-322.
- [17] MESSER M, ANDERSON K, ZHANG X A, et al. Effect of surface roughness on mixed salt crystallization fouling in pool boiling [J]. Desalination and Water Treatment, 2022, 274: 219-229.
- [18] MYERS R H, MONTGOMERY D C, ANDERSON-COOK C M. Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments [M]. 4th edition. Beckyand James: John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- [19] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
LI L, ZHANG S, HE Q, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8): 41-45. (in Chinese)