

中压紫外杀菌系统处理火电厂 锅炉补给水的应用研究

徐浩然^{1,2*}, 朱彬源³, 冯向东^{1,2}, 曹 泉³, 杨景焜³, 郑 翔³, 鲁卫哲^{1,2}

(1. 浙江浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311121; 2. 浙江省工业新水源工程中心, 浙江 杭州 311121; 3. 浙江浙能台州第二发电有限责任公司, 浙江 台州 317109)

摘要:开发了中压紫外杀菌系统处理某火电厂锅炉补给水。研究了紫外剂量、进水流量、紫外线作用区域、紫外-药剂协同作用对杀菌效果的影响,开展了长周期运行下对季节性微生物污染的控制,考察了系统连续运行期间的稳定性和经济性。结果表明,23 mJ/cm² 以上的紫外剂量即可使 600 t/h 流量的来水菌落总数保持在 10 CFU/mL 以下,多区域紫外线作用和紫外-药剂协同作用有利于提高杀菌效果。系统连续运行 3 个月以来,在来水菌落总数 7~200 CFU/mL 的波动下,反渗透膜组件保持性能良好,反渗透系统化学清洗周期延长,综合经济效益为节约 28.1 万元/a。

关键词:中压紫外;杀菌;微生物污染;锅炉补给水;火电厂

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)S2-0390-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.S2.080

Application of medium pressure UV sterilization system in treatment of boiler make-up water in thermal power plant

XU Hao-ran^{1,2*}, ZHU Bin-yuan³, FENG Xiang-dong^{1,2}, CAO Xiao³,
YANG Jing-kun³, ZHENG Xiang³, LU Wei-zhe^{1,2}

(1. Zhejiang Energy Group R&D Institute Co., Ltd., Hangzhou 311121, China;

2. Zhejiang Provincial Engineering Center for New Industrial Water Resources, Hangzhou 311121, China;

3. Zhejiang Zheneng Taizhou Second Power Generation Co., Ltd., Taizhou 317109, China)

Abstract: A medium pressure UV sterilization system is developed to treat with boiler make-up water in a thermal power plant. The effects of UV dose, influent flow, UV action area and UV-agent synergism on the sterilization effect are studied. The control on seasonal microbial pollution under a long-term operation is carried out, and the stability and economy of the system during continuous operation are investigated. It is shown that total number of colonies in influent with a flow of 600 tons per hour can be maintained below 10 CFU·mL⁻¹ at a UV dose of more than 23 mJ·cm⁻². Both multi-areas of UV effect and the synergistic effect between UV and agent are conducive to improve the sterilization effect. The reverse osmosis membrane module has maintained a good performance since the system has run continuously for 3 months as total number of colonies in influent fluctuate in the range of 7~200 CFU·mL⁻¹. The chemical cleaning cycle of the reverse osmosis system has been prolonged, and comprehensive economic benefit achieves CNY 281 000 per year.

Key words: medium pressure UV; sterilization; microbial contamination; boiler make-up water; thermal power plant

火电厂利用地表水或地下水制取锅炉补给水,原水中通常含有细菌、病毒和原生动物^[1-2],容易在复杂的制水系统中大量增殖,造成制水系统的微生物污染^[3-4]。对于制水系统常见的超滤系统和反渗透系统,微生物污染会堵塞膜元件和滤芯,影响制水效率和产水品质,对锅炉补给水的安全生产造成威胁^[5-7]。现有微生物污染解决办法主要包括预处理、运行调控、膜材料改性和膜清洗,其中预处理是最直接的微生物控制手段,能够通过降低来水中微生物量或消除来水中微生物活性实现微生物污染防控^[8]。

紫外杀菌技术作为一种来水预处理手段,利用

紫外线破坏 DNA 结构从而使微生物立即死亡或丧失繁殖能力,具有杀菌效率高、能耗低、设备运维简单等优点,受到了科研工作者的广泛关注^[9-11]。紫外杀菌系统应用最广泛的是低压汞灯(LP)和中压汞灯(MP)。低压汞灯只能发射 254 nm 的单色光,对部分种类的细菌杀灭效果不佳,且易发生“光复活”现象^[12]。中压汞灯发射光谱涵盖 200~600 nm,具有更高的功率,所需灯管数量少,反应器体积也更小,是更理想的紫外杀菌处理装置^[13]。

虽然中压紫外系统在水处理中具有显著的优势,但目前在火电厂未有工业化应用。火电厂制水系统常通过投加杀菌剂来防止微生物大量滋生,但

氧化性杀菌剂易对反渗透膜造成氧化性破坏,非氧化性杀菌剂价格十分昂贵且易引起环境污染,因此迫切需要一种新型微生物污染防治技术。本研究搭建了一套中压紫外杀菌系统,并在典型火电厂开展了锅炉补给水杀菌处理现场实验,考察了系统运行效果并核算了运行成本。

1 实验部分

1.1 实验用水

某沿海火电厂(以下简称火电厂)以海水为水源,采用海水淡化工艺生产锅炉补给水,主要制水工艺为澄清-砂滤-超滤-一级反渗透-二级反渗透。火电厂原采用投加次氯酸钠杀菌剂的方式控制制水系统微生物污染,并在一级反渗透系统前投加亚硫酸氢钠还原剂。火电厂典型海水水质见表1。

表1 火电厂海水一级反渗透进水水质

水质 指标	pH	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	菌落总数/ (CFU $\cdot\text{mL}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
海水	7.2	14500	30	336	0.074

1.2 实验方法

火电厂锅炉补给水制水系统安装了5套中压紫外杀菌装置,其中3套安装在反渗透系统保安过滤器前、反渗透提升泵后的进水母管上(以下简称1A反渗透紫外、1B反渗透紫外、1C反渗透紫外),2套安装在超滤系统进水母管上、碟片过滤器前(以下简称1A超滤紫外和1B超滤紫外),各套紫外系统均以管道法兰式连接。

每套中压紫外杀菌装置均装有两根4.2 kW高强度中压紫外灯,单套设备最大流量600 t/h。每套设备都设置观察孔用于观察紫外灯套管结垢情况,配置了DPM物理清洗系统,可就地手动启动或设置清洗阈值自动清洗。每套设备预留CIP清洗阀,可外接化学清洗装置进行酸洗。紫外灯管外设置石英玻璃套管,停运时可取出单独清洗。

5套中压紫外系统控制系统各自独立,每套系统都有两种运行模式,分别为功率模式和节能模式。以功率模式运行时,系统将根据设定的功率恒定运行。以节能模式运行时,紫外剂量将根据来水透光率和流量实时调整。在检测到流量大于30 t/h时,紫外系统将自动投运,以保证杀菌效果。在检测到流量小于30 t/h时,紫外系统将自动停运,以防止设备过热烧毁。

实验过程中,在制水系统不同位置通过标准无

菌取样方法取水样。将样品装入无菌取样袋后,24 h内开展菌落总数分析和其他相关检测。

1.3 分析方法

水中菌落总数检测根据《生活饮用水标准检验方法 微生物指标》(GB/T 5750.12—2006)执行,主要设备为生化恒温培养箱(HPS-280)。

反渗透膜组件性能检测根据《海洋监测规范 第4部分:海水分析》(GB/T 17378.4—2007)和《卷式反渗透膜组件测试方法》(HY/T 107—2017)。利用反渗透膜组件性能测试装置,在海水膜标准检测条件下[氯化钠浓度($32\,000\pm 1\,000$) mg/L, pH(7.0 ± 0.5), 温度(25.0 ± 1.0) $^{\circ}\text{C}$, 压力(5.50 ± 0.05) MPa],检测反渗透膜组件的脱盐率和回收率。

2 结果与讨论

2.1 紫外剂量对杀菌效果的影响

保持超滤1A母管流量为(600 ± 10) t/h,超滤1A紫外以功率模式运行。控制紫外灯工作效率分别为25%、40%、60%、80%、100%,控制紫外光剂量分别为14、23、34、46、57 mJ/cm^2 ,取样分析超滤1A紫外进水口和出水口的菌落总数。

从图1可以看出,系统杀菌效果随紫外剂量的增大而提升。对于菌落总数为35 CFU/mL的来水,23 mJ/cm^2 以上的紫外剂量都能使出水菌落总数小于10 CFU/mL,46 mJ/cm^2 以上的紫外剂量能使杀菌率达100%。

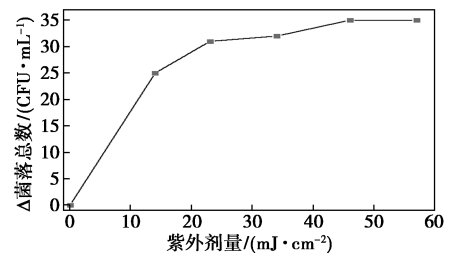


图1 紫外剂量对杀菌效果的影响

2.2 进水流量对杀菌效果的影响

保持超滤1A紫外以功率模式运行,维持紫外灯工作效率50%,在进水流量分别为300、350、400、450、500、550、600 t/h时,取样分析超滤1A紫外进水口和出水口的菌落总数。

由图2可知,系统杀菌效果随来水流量增大而减弱。对于菌落总数为35 CFU/mL的来水,即使在600 t/h的最高流量下,仍然能够保证出水菌落总数小于10 CFU/mL。在紫外灯输出功率不变的前提下,进水流量与紫外剂量呈反比,即控制较小流量有

助于提高杀菌效果。

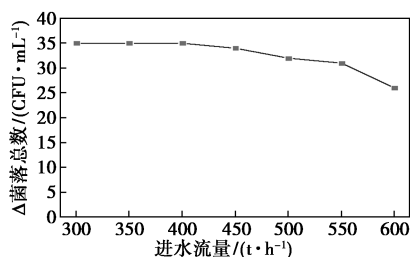


图 2 进水流量对杀菌效果的影响

2.3 紫外线作用区域对杀菌效果的影响

在来水质基本不变的前提下,调整 8 个工况开展实验:工况 1,保持所有紫外设备关闭;工况 2,保持超滤 1A 紫外开启,其他紫外关闭;工况 3,保持超滤 1B 紫外开启,其他紫外关闭;工况 4,保持反渗透 1A 紫外开启,其他紫外关闭;工况 5,保持反渗透 1B 紫外开启,其他紫外关闭;工况 6,保持反渗透 1C 紫外开启,其他紫外关闭;工况 7,保持超滤 1A 紫外和超滤 1B 紫外开启,其他紫外关闭;工况 8,保持超滤 1A 紫外、超滤 1B 紫外和反渗透 1A 紫外开启,其他紫外关闭。保持每个工况运行 24 h,所有紫外系统均以功率模式运行,在运行紫外设备进水取样阀、运行紫外设备出水取样阀、反渗透进水取样阀、反渗透浓水取样阀、超滤水箱、超滤前池取样分析菌落总数,结果见表 2。

表 2 中压紫外杀菌系统使用效果 CFU/mL

编号	清水池菌落总数	超滤水箱菌落总数	紫外设备进口菌落总数	紫外设备出口菌落总数	反渗透进水菌落总数	反渗透浓水菌落总数
工况 1	30	33	—	—	46	70
工况 2	30	3	35	0	10	12
工况 3	30	5	32	0	9	9
工况 4	30	34	31	0	1	7
工况 5	30	25	28	0	2	7
工况 6	30	31	28	0	2	5
工况 7	30	2	—	—	2	4
工况 8	30	3	—	—	1	3

工况 2~工况 6 的实验结果表明,对于菌落总数为 30 CFU/mL 的来水,单套紫外设备都能较好地进行了杀菌,紫外设备出口菌落总数都为 0。但由于紫外系统没有持续性杀菌效果,因此在反渗透进水和反渗透浓水中仍检测出了一定数量的菌落。由于超滤两根母管同启同停,因此超滤 1A 紫外和超滤 1B

紫外同时开启具有更好的杀菌效果(工况 7)。当来水经过超滤紫外和反渗透紫外共同处理时,后端反渗透系统的残留菌落总数最低(工况 8)。

对于菌落总数较低的来水,仅开超滤紫外或仅开反渗透紫外,都能起到较好的杀菌效果。同时开启超滤紫外和反渗透紫外,能有更好的杀菌效果保障。

2.4 紫外线与杀菌剂协同杀菌效果

停止次氯酸钠杀菌剂加药 7 d 并维持其他 5 套紫外设备全开,取样检测制水系统各位置的微生物污染情况(工况 1)。保持次氯酸钠杀菌剂加药 7 d 并维持其他 5 套紫外设备全开,取样检测制水系统各位置的微生物污染情况(工况 2)。实验结果见表 3。

表 3 紫外线与杀菌剂协同杀菌效果 CFU/mL

取样点	工况 1	工况 2
清水池	20	9
1A 超滤紫外进口	23	8
1A 超滤紫外出口	0	0
1B 超滤紫外进口	21	5
1B 超滤紫外出口	1	0
超滤产水箱	8	4
1A 反渗透紫外进口	7	2
1A 反渗透紫外出口	0	0
1A 反渗透进水	3	0
1A 反渗透浓水	11	3
1B 反渗透紫外进口	5	3
1B 反渗透紫外出口	0	0
1B 反渗透进水	2	1
1B 反渗透浓水	9	3
1C 反渗透紫外进口	10	0
1C 反渗透紫外出口	2	0
1C 反渗透进水	2	0
1C 反渗透浓水	11	2

如表 3 所示,在没有杀菌剂作用的情况下(工况 1),制水系统的微生物菌落总数控制效果较好。利用紫外系统杀菌处理后,除反渗透浓水外,其他取样点的菌落总数均不超过 10 CFU/mL。微生物无法透过反渗透膜,因此在浓水侧会有一定程度的富集,导致反渗透浓水菌落总数相对偏高。在杀菌剂与紫外线协同作用的情况下(工况 2),制水系统的微生物菌落总数控制情况更佳,微生物几乎被完全杀灭。结合火电厂实际情况,仅使用紫外系统,停止

杀菌剂投加,是更具有合理性和经济性的微生物控制方法。杀菌剂和紫外线的共同使用,能够作为一种应急手段处理来水微生物突增的特殊情况,也可以作为一种深度清洁手段定期为制水系统彻底杀菌。

2.5 长周期运行效果

保持杀菌剂加药停止,1A超滤紫外、1B超滤紫外、1A反渗透紫外、1B反渗透紫外开启,1C反渗透紫外关闭。其中超滤紫外以功率模式(100%)运行,反渗透紫外以节能模式(紫外剂量 $50\text{ mJ}/\text{cm}^2$)运行。2021年9月9日—12月9日期间保持连续运行3个月,定期取样分析水质并监测反渗透系统运行状态。

2.5.1 季节性微生物污染

火电厂制水系统来水为海水,水质受季节性影响波动较大。夏季微生物繁殖较快,来水菌落总数最高可达 $500\text{ CFU}/\text{mL}$;冬季微生物繁殖很慢,来水菌落总数通常不到 $10\text{ CFU}/\text{mL}$ 。紫外杀菌系统在2021年9月—12月的连续运行期间,来水菌落总数在 $7\sim 200\text{ CFU}/\text{mL}$ 范围内,紫外系统杀菌处理效果如图3所示。

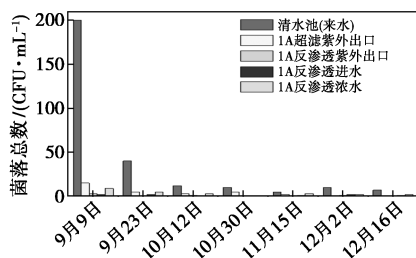


图3 来水水质对杀菌效果的影响

设备运行初期为夏季(9月),来水微生物较多(菌落总数 $200\text{ CFU}/\text{mL}$),紫外系统能够较好地杀灭水中的微生物,保证反渗透进水和反渗透浓水中的菌落总数小于 $10\text{ CFU}/\text{mL}$ 。设备运行后期为冬季,来水微生物很少,超滤和反渗透系统始终保持正常运行,未发生显著微生物污染。

该结果表明,中压紫外杀菌系统能够很好地应对来水水质波动,有效解决电厂制水系统季节性微生物污染问题。

2.5.2 对反渗透膜组件的影响

连续运行3个月后,对反渗透膜组件进行检查。取新反渗透膜、1A一级反渗透系统某列第一支膜、1B一级反渗透系统某列第一支膜、1C一级反渗透系统某列第一支膜,进行反渗透膜组件性能检测(表4)。以上4只反渗透膜均为同品牌反渗透膜,

其中1A、1B和1C反渗透膜服役时间均为4年。

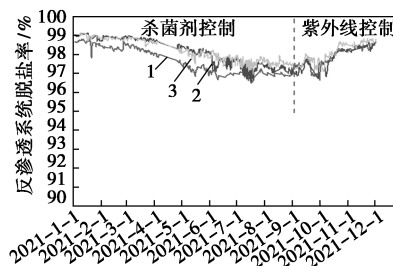
表4 反渗透膜组件性能测试

位置	服役时长/a	脱盐率/%	回收率/%
未使用	0	99.5	9.0
1A一级反渗透系统	4	98.5	8.9
1B一级反渗透系统	4	98.7	9.4
1C一级反渗透系统	4	98.7	9.3

实验结果显示,3只旧反渗透膜脱盐率均超过98.5%,回收率均超过8.9%,与新反渗透膜相比有一定性能衰减(脱盐率99.5%,回收率9.0%)。1A、1B、1C3只旧反渗透膜脱盐率和回收率相似,端盖处的污染程度接近。以上结果说明在紫外杀菌系统运行的情况下,反渗透膜组件未受到显著的微生物污染。

2.5.3 对反渗透系统的影响

图4为2021年火电厂1A、1B和1C反渗透系统脱盐率(在线表计)。2021年1月1日—9月8日期间,反渗透系统通过杀菌剂(次氯酸钠)投加控制微生物,1A反渗透系统脱盐率在96.49%~98.81%范围内波动,1B反渗透系统脱盐率在96.61%~99.15%范围内波动,1C反渗透系统脱盐率在96.97%~99.15%范围内波动。2021年9月9日—12月9日期间,反渗透系统通过中压紫外系统产生的紫外线控制微生物,1A反渗透系统脱盐率在96.65%~98.68%范围内波动,1B反渗透系统脱盐率在96.75%~98.68%范围内波动,1C反渗透系统脱盐率在97.11%~98.84%范围内波动。两个阶段反渗透系统脱盐率水平大致相当,说明针对火电厂的实际来水,紫外线杀菌效果与次氯酸钠杀菌效果差别不大。1A和1B反渗透脱盐率未大幅领先1C反渗透,可能是由于来水中微生物较少,仅超滤紫外就已能够有效防止微生物污染。

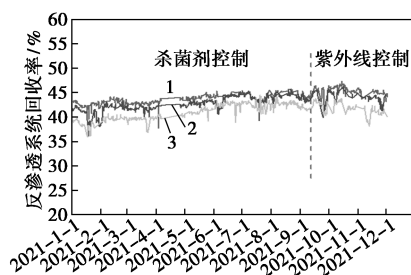


1—1A一级反渗透;2—1B一级反渗透;3—1C一级反渗透

图4 火电厂反渗透系统脱盐率

图5为2021年火电厂1A、1B和1C反渗透系

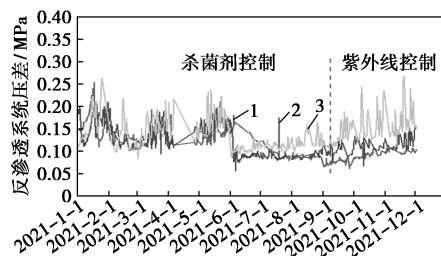
统产水回收率(在线表计)。2021年1月1日—9月8日期间,反渗透系统通过杀菌剂(次氯酸钠)投加控制微生物,产水回收率在36.1%~46.0%。2021年9月9日—12月9日期间,反渗透系统通过中压紫外系统产生的紫外线控制微生物,产水回收率在37.8%~47.5%。应用中压紫外杀菌系统后,反渗透系统产水率有所提高。1A和1B反渗透系统的回收率全年都高于1C反渗透系统,该结果与1C反渗透紫外未启用无关。



1—1A 一级反渗透;2—1B 一级反渗透;3—1C 一级反渗透

图 5 反渗透系统回收率

图 6 为 2021 年火电厂 1A、1B 和 1C 反渗透系统给水和浓水的压差(在线表计)。2021 年 1 月 1 日—9 月 8 日期间,反渗透系统通过杀菌剂(次氯酸钠)投加控制微生物,平均清洗周期为 5.2 d。2021 年 9 月 9 日—12 月 9 日期间,反渗透系统通过中压紫外系统产生的紫外线控制微生物,平均清洗周期为 5.6 d。应用中压紫外杀菌系统后,反渗透清洗周期较之前有延长,反渗透污染情况得到了一定程度的改善。1A 和 1B 反渗透清洗周期与 1C 反渗透接近,说明在现有来水水质条件下,已开启超滤紫外的前提下再开启反渗透紫外,不能有效降低反渗透系统化学清洗频率。



1—1A 一级反渗透;2—1B 一级反渗透;3—1C 一级反渗透

图 6 火电厂反渗透系统压差

连续运行 3 个月后,通过对制水系统全流程的典型区域检查,包括清水池壁、超滤水箱内壁、保安过滤器滤芯及相关的管路阀门处,均未发现明显的微生物污染现象。

综上所述,应用中压紫外杀菌系统控制微生物污染,能够保持反渗透系统脱盐率基本不变,小幅提升产水回收率,并一定程度延长化学清洗周期。在现有水质条件下(来水菌落不足 100 CFU/mL),仅使用超滤紫外就能够保证制水系统不被微生物污染。

2.6 经济效益评估

中压紫外杀菌系统运行成本为电费。单支灯管满负荷运行功率为 2.2 kW,此外控制系统也有少量电耗。5 套中压紫外系统全开,以 2 套超滤紫外功率模式、2 套反渗透紫外节能模式运行,总功率约为 16 kW,年运行费用约 3.4 万元。中压紫外杀菌系统投运后,原有超滤系统前的次氯酸钠杀菌剂和原有反渗透系统前的亚硫酸氢钠还原剂可以停加。每年可节约杀菌剂费用 2.2 万元,还原剂费用 13.3 万元。此外,应用该系统后平均每年能够减少反渗透膜更换约 40 支,节约反渗透膜更换费用 16 万元。

综合以上经济效益,中压紫外杀菌系统的运行成本约 3.4 万元/a,相比原有加药杀菌工艺(年运行成本 31.5 万元/a)节约成本 28.1 万元/a(表 5)。

表 5 火电厂制水系统杀菌工艺经济性核算 万元/a

	加药杀菌工艺	紫外杀菌工艺
电	0	3.4
次氯酸钠	2.2	0
亚硫酸氢钠	13.3	0
反渗透膜(增量)	16.0	0
合计	31.5	3.4

3 结论

针对火电厂制水系统微生物污染问题,设计并采用中压紫外系统对来水进行杀菌处理。研究表明,23 mJ/cm² 以上的紫外剂量在 600 t/h 的最高流量下即可使来水菌落总数由 35 CFU/mL 下降至 10 CFU/mL 以下。同时开启超滤紫外和反渗透紫外具有更好的杀菌效果,紫外杀菌和药剂杀菌协同作用下效果更佳。3 个月连续稳定运行的结果显示,中压紫外杀菌技术替代原有的加药杀菌技术,能够应对来水水质波动(菌落总数 200 CFU/mL 以内),保证反渗透膜组件的脱盐率和回收率,一定程度上延长反渗透系统化学清洗周期。整套中压紫外系统运行综合经济效益为节省 28.1 万元/a,且能减少杀菌剂和还原剂的使用,延长反渗透膜组件的使用寿命,兼具经济效益和环境效益。

(下转第 398 页)

综上,反应器在使用新型内置积垢器前后压降变化趋势有明显改变,容垢能力大幅提高,装置加工负荷得到极大提升,运行周期得以延长。

4 内置积垢器设计、安装、使用及检修注意事项

(1)在设计前要对反应器的封头高度、内径、支撑板规格等相关尺寸进行复核和强度核算等。设计时要充分考虑反应器长期高温运转产生的永久变形问题。由于内置积垢器零配件较大,设计时需要充分考虑到热膨胀问题,避免出现热膨胀变形影响使用。

(2)在安装过程中,必须保证支撑梁的水平度和安装的牢固度,否则将严重影响日后的使用效果。所有的热膨胀缝、安装过程中产生的缝隙必须使用耐火陶瓷纤维绳塞紧、塞实,避免出现流体短路现象。积垢器安装过程中需防止积垢剂散落,并保证积垢器必须紧固到位,防止使用过程中出现倾倒现象。

(3)使用过程中严格控制升温、升压、降温、降压速度,避免损坏内置积垢盘。特别是开工阶段,控制进油速度,避免进油量突然增大,造成积垢器冲翻或倾斜。

(4)反应器检修或催化剂撤头时,由于内置积垢盘的积垢器筒体直接沉积了大量垢物,不易直接拆除,需要先清理出垢物。由于该设备零配件较多、

专利构件较多,拆卸过程需特别注意零配件的保存,避免丢失。

5 结论

(1)装置反应器由于焦粉、二烯烃结焦堆积至反应器顶部形成高压降,需对反应器内构件进行改造,增加反应器容垢能力,改善物料流态,延长装置运行周期。

(2)新型内置积垢器可显著改善第一床层顶部分布器的流态,亦可大大增加容垢能力,进而实现延长装置开工周期的目的。

(3)新型内置积垢器投用后,装置压降变化较小,加工负荷得到提升,降低停工撤头的频次,可作为现阶段延长装置运行周期的一项措施。

参考文献

- [1] 马洋,吴浩,马雪鸿,等.FH-98 与 FH-40C 催化剂在焦化汽油加氢装置上的应用对比[J].石油炼制与化工,2016,47(8):20-21.
- [2] 李立权.焦化汽油单独加氢技术工程化的问题及对策[J].炼油技术与工程,2012,41(1):14-20.
- [3] 李大东.加氢处理工艺与工程[M].北京:中国石化出版社,2004:946-950.
- [4] 高娜.焦化汽油加氢装置运行问题及对策[J].炼油技术与工程,2016,46(8):23-26.
- [5] 王岩,彭德强,刘杰,等.新型内置集垢器技术开发与应用[J].石油炼制与化工,2016,47(9):98-101.■

(上接第 394 页)

参考文献

- [1] 张占梅,陈斌,宋英豪.城市再生水作火电厂锅炉补给水对预处理系统的影响[J].水处理技术,2016,42(4):87-90.
- [2] 范唯,郑得鸣.全膜法在湖南某发电厂锅炉补给水处理中的应用[J].工业水处理,2019,39(4):109-112.
- [3] 万国晖,杨永强.废水回用膜系统污染监测研究[J].现代化工,2015,35(4):170-174.
- [4] 李亚娟,卢剑,许臻,等.某火电厂锅炉补给水处理系统运行故障分析及解决措施[J].水处理技术,2020,46(2):133-136.
- [5] 郑猛,吴青芸,周浩媛,等.海水淡化反渗透膜微生物污染及防控研究进展[J].膜科学与技术,2015,35(1):123-130.
- [6] 冯礼奎,李广辉,葛雪静,等.反渗透预处理系统微生物污染原因分析及处理[J].工业水处理,2016,36(3):103-105.
- [7] 高伟,梁恒,李圭白.微生物本身对超滤膜污染的影响因素研究[J].给水排水,2013,49(5):115-119.
- [8] 李睿涵,黄李金鸿,黄万抚,等.影响反渗透膜生物污染的因素及控制方法[J].水处理技术,2019,45(12):19-25.
- [9] 刘博,王运宏,巫寅虎,等.紫外线消毒对再生水中微生物生长分泌特性的影响[J].环境工程,2020,38(2):28-34.
- [10] 邵青,王颖,李晶,等.紫外/臭氧工艺在水处理中的技术原理及研究进展[J].中国给水排水,2019,35(14):16-23.
- [11] 田芳,陆昱,郭光,等.中压紫外/氯水处理工艺过程中氯的分解规律[J].环境工程学报,2021,15(2):572-579.
- [12] 刘淑琳,唐玉霖.城市污水处理厂紫外线消毒常见问题控制及发展趋势[J].中国给水排水,2017,33(22):24-28.
- [13] 文尚胜,左文财,周悦,等.紫外线消毒技术的研究现状及发展趋势[J].光学技术,2020,46(6):664-670.■