

某燃煤电厂废水零排放工程设计实例

刘 嘉

中国电子系统工程第四建设有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]燃煤发电一直是我国电力的主要来源,而燃煤发电企业往往也是耗水量和废水排放量大户。时至今日,环保低碳意识逐渐深入人心,国家对环保的重视也上升到前所未有的高度,实现燃煤发电企业的废水零排放,对节约淡水资源,减少废水对天然水体的污染具有重大意义。文中结合某燃煤电厂废水排放的水质、水量及回用需求,对其废水零排放工程设计方案进行了论述。

[关键词]零排放;超滤;纳滤;反渗透;碟管式反渗透;蒸发结晶

DOI: 10.33142/ect.v4i4.19530

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

Design Example of Zero Wastewater Discharge Project in a Coal-fired Power Plant

LIU Jia

The Fourth Construction Co., Ltd. of China Electronics System Engineering, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Coal fired power generation has always been the main source of electricity in China, and coal-fired power generation enterprises are often large consumers of water and wastewater. Today, the awareness of environmental protection and low-carbon has gradually penetrated people's hearts, and the country's attention to environmental protection has risen to an unprecedented height. Achieving zero discharge of wastewater from coal-fired power generation enterprises is of great significance for saving freshwater resources and reducing the pollution of natural water bodies by wastewater. The article discusses the design scheme for zero discharge of wastewater in a coal-fired power plant, taking into account the water quality, quantity, and reuse requirements of the wastewater discharge.

Keywords: zero discharge; ultrafiltration; nanofiltration; reverse osmosis; disc tube reverse osmosis; evaporative crystallization

引言

燃煤电厂是耗水大户也是废水排放大户,以 $2\times 60\text{MW}$ 机组为例,其每天的水耗为 66072m^3 ,相当于一座中小城市的供水量,若循环水浓缩倍率为3.5,则其每天约有 $10000\sim 12000\text{m}^3$ 的冷却塔排水需要外排,另有 $100\sim 200\text{m}^3/\text{h}$ 的工业废水、生活废水等需要处理后外排或回用^[1]。随着人民生活水平的提高,环保低碳意识逐渐深入人心,国家对环保的重视也上升到前所未有的高度,实现燃煤发电企业的废水零排放,对节约淡水资源,减少废水对天然水体的污染具有重大意义。而国家也早已将工业废水零排放技术列入《工业节水十五规划》。

某燃煤电厂项目地点位于华北地区腹地,该地区淡水资源严重匮乏,水体污染问题突出,因此,提高废水回收利用率,实现废水零排放已是大势所趋,对提高该地区水资源、环境质量有重要的积极作用。

1 工程概况

某燃煤电厂机组容量为 $4\times 300\text{MW}$,为减少水耗及废水排量,该厂投产运行后经过技改,增加了循环冷却水排污水深度处理设施,其出水可作为锅炉系统补水,部分反渗透浓水可作为脱硫系统工艺补水,使废水的重复利用率提高,大幅度减少废水排放,但仍有一些废水无法重复利用而外排,主要包括循环冷却水排污水深度处理系统反渗透浓水、脱硫废水、锅炉补给水处理系统离子交换再生废水、凝结水精处理系统混床再生废水。

2 设计水质、水量

零排放处理系统接收的燃煤电厂废水具有硬度大、含盐量高、腐蚀性强等特点,根据业主提供的资料,进入零排放处理系统的废水水量为 126t/h ,经零排放处理系统处理后的产水可作为循环冷却水系统及锅炉补给水系统补水,零排放系统进、出水水质见表1。

3 工艺流程简述

根据零排放处理系统进水水质特点，本工程不仅需要去除原水中的硬度、有机物等，更需要对盐分进行大量消减，若将原水直接送入蒸发结晶系统进行处理，不仅使得设备、基建投资成本和运行成本大幅增加，还会对结晶设备产生腐蚀，并在设备中结垢，导致蒸发结晶系统无法正常运行，因此在蒸发结晶系统前需要增加预处理及浓缩减量处理系统。本工程采用“预处理+膜浓缩+蒸发结晶”工艺对废水进行零排放处理。其流程如下：

本工程原水经调节池调节水量及水质后进入高密度澄清池进行软化处理,以降低原水的硬度、碱度及 COD,澄清池出水通过投加盐酸调节 PH 后进入软化水池,经提升泵送入过介质过滤器去除水中悬浮物等大颗粒杂质后进入超滤给水池,在通过超滤给水泵进入超滤系统以进一步去除胶体、大分子有机物及细菌等,超滤产水进入超滤产水并送入纳滤系统,纳滤膜可截留钙、镁、硫酸根等二钾离子,其浓水通过硫酸钠碟管式反渗透系统进行浓缩减量后送入硫酸钠蒸发结晶系统,结晶产品为低纯度无水硫酸钠结晶盐,纳滤产水进入反渗透系统再次浓缩,其浓水进入氯化钠碟管式反渗透系统进行浓缩减量后送入氯化钠蒸发结晶系统,结晶产品为较高纯度的氯化钠结晶盐,反渗透产水、碟管式反渗透产水及蒸发结晶系统冷凝水可回用作为循环冷却水系统及锅炉补给水系统补水,实现全厂废水零排放。

本设计方案自动化程度高, 占地面积小, 能耗较低, 且水中盐分已被大部分去除, 不会随着水的循环利用而逐渐累积, 因此不会产生严重的电化学腐蚀。

4 主要处理单元设计方案

4.1 预处理系统

4.1.1 高密度澄清池

高密度澄清池由快速搅拌池、反应池及澄清沉淀池组成。

原水经调节池提升泵提升首先流入快速搅拌池,与混凝剂(聚合硫酸铁)及氢氧化钠接触后进行混凝,池中的快速搅拌机连续运行,可提高混凝速度,也避免了矾花的沉淀。

反应池可分为混合区和推流区，混合区内设置搅拌器，位于圆形导流筒中央，经预混凝的原水与来自污泥浓缩区的回流污泥混合后进入导流筒底部，通过搅拌器将原水、回流污泥及在搅拌器下部加入的絮凝剂（聚丙烯酰胺）混合均匀，并为聚合电解质的分散及絮凝提供需要的能量，以达到快速凝聚的效果。搅拌器的转速应确保混合物搅拌充足和絮凝良好，如果转速过高，矾花有被打碎的危险，太低则污泥有可能在反应区内沉淀，因此搅拌系统需要高流速（大约比处理流速高 10 倍）以均匀地分散能量并在相对高速的状态下运行，且不会破坏矾花。^[2] 经搅拌反应后的出水进入推流区，水流向上，矾花在此增大。原水通过整个反应区后获得大量高密度均质的矾花，这种高密度矾花允许沉淀区的沉淀速度较大而不影响出水水质。

表1 零排放系统进、出水水质

项目	pH 值	ρ (电导率) / ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	ρ (Ca^{2+}) / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (Mg^{2+}) / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (全硅) / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (SO_4^{2-}) / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (Cl^-) / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (氨氮) / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (COD) / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水水质	6~8	≤ 29000	≤ 2100	≤ 1450	≤ 50	≤ 2980	≤ 9500	≤ 10	≤ 300
出水水质	6.5~7.5	≤ 1500	≤ 0.6	≤ 0.6	≤ 0.4	≤ 90	≤ 350	≤ 0.8	≤ 12

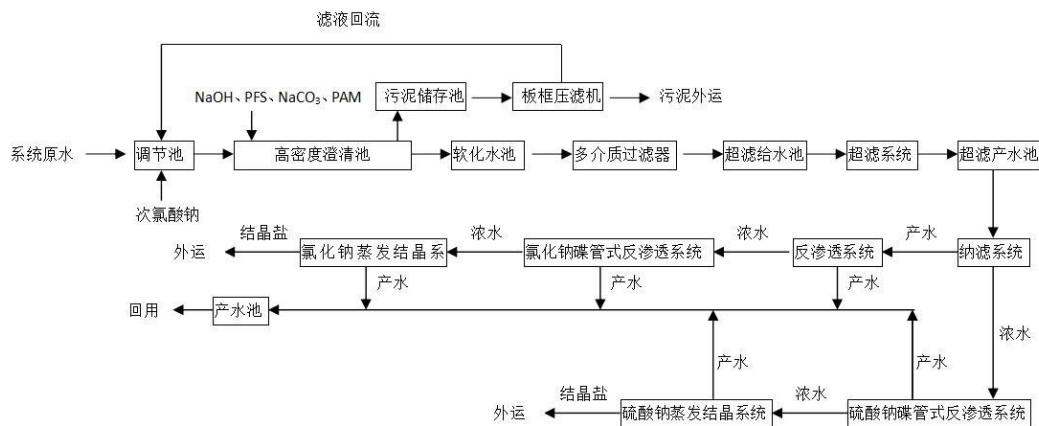


图 1 废水零排放流程图

澄清沉淀池包括预沉区、浓缩区和斜管沉淀区,反应池出水在进入面积较大的预沉区时流速减慢,以避免矾花被破坏和产生涡流,也使大量的悬浮物在此区域内沉淀。逆流式斜管沉淀区可将剩余的矾花沉淀,澄清水经集水槽系统收集后流入软化水池。沉淀污泥聚集在沉淀池下部,通过刮泥机将污泥收集至污泥浓缩区,浓缩区分为两层,分别位于排泥斗的上部和下部,上部污泥作为回流污泥经污泥输送泵输送至反应池下部进水管与原水混合,以加速反应池内矾花的生长以及增加矾花的密度。污泥在上部停留时间为数小时,之后进入排泥斗,排泥斗内的污泥浓度至少为 $20\text{g/L}^{[2]}$,无需进行再浓缩,可直接排至污泥储存池并送至污泥脱水机内进行脱水。

软化水池中的澄清池产水通过泵打入多介质过滤器去除大粒径物质后进入超滤给水池。

污泥储存池内的污泥通过污泥进料泵输送至板框压滤机内,产生的泥饼外运处理,滤液回流至调节池。

4.1.2 超滤装置

超滤膜的孔径为 $0.05\mu\text{m}\sim 1\text{nm}$,操作压力一般为 $0.2\sim 0.4\text{MPa}$,膜的透过速率为 $0.5\sim 5\text{m}^3(\text{m}^2\cdot\text{d})$,能够分离分子质量为 $500\sim 1000000$ 道尔顿的大分子和胶体分子^[3]。

本工程超滤装置包括超滤膜组件、膜壳压力容器、膜架、超滤反洗系统、超滤化学清洗系统。经软化、过滤的原水进入超滤装置,出水的浊度、COD 等被有效去除,保障了后续膜浓缩系统的稳定运行。

超滤装置采用全流过滤模式,运行采用保持产水量恒定即恒流控制方式,超滤膜跨膜压差(TMP)将随着过滤过程的进行不断升高,因此需要每隔一段时间,就进行气擦洗辅助反洗,来控制 TMP 的升高。在膜丝表面截留的固体颗粒,通过定期的气擦洗辅助反洗加以去除,这种反洗不必加入任何的化学清洗剂。固体污染物在定期的气擦洗辅助反洗中被除去,因此避免了其在膜丝附近的沉积。吸附在膜丝表面而不能被反洗去除的污染物,通过在线的化学加强反洗(CEB)去除。在化学加强反洗过程中,在反洗水加入少量的化学药剂,通过短时间的浸泡(通常为 $5\sim 10\text{min}$)后,将化学药剂排出,超滤膜可以恢复到接近初始状态。另外,还需要对超滤膜系统进行定期的就地离线化学清洗(CIP),以彻底去除污染物,恢复超滤膜性能,CIP 药剂采用氢氧化钠、次氯酸钠、盐酸、柠檬酸等。

超滤装置产水进入超滤产水池,经纳滤给水泵提升后进入膜浓缩系统。

4.2 膜浓缩系统

4.2.1 纳滤装置

纳滤膜最早出现于 20 世纪 70 年代末,是介于超滤膜和反渗透膜之间的压力驱动膜,曾被称为低压反渗透膜或疏松反渗透膜,纳滤膜由于其特殊的孔径范围和制备的特殊化处理(如复合化、荷电化),使其具有特殊的分离性能,对二价离子和多价离子及相对分子质量在 $200\sim 2000$ 之间,分子大小约 1nm 的溶解组分有较高的截留能力,去除率达 90%以上,而二价单价离子和小分子的截留率相对较低,小于 80%^[4]。

超滤装置产水通过纳滤高压泵加压进入纳滤装置,纳滤装置为二段式,一段纳滤膜组件浓水经纳滤增压泵增压进入二段纳滤膜组件,利用纳滤膜对二价离子和多价离子的截留作用,将其浓水送入硫酸钠碟管式反渗透系统进行进一步浓缩处理,纳滤装置产水中氯化钠含量较高,需要进入反渗透系统进行进一步浓缩。

4.2.2 反渗透装置

反渗透是目前最精密的膜法液体分离技术,它能截留所有溶解性盐及分子量大于 100 的有机物,但允许水分子透过,脱盐率一般可达 98%以上。可以从液体混合物(主要是水溶液)中除去 $0.0003\sim 0.0012\mu\text{m}$ 大小的溶质分子膜,即可去除水溶液中除氢离子、氢氧根离子外的其他无机离子及低分子有机物。

纳滤装置产水由反渗透高压泵增压输入反渗透装置,装置为三段式,一段反渗透膜组件浓水经后续两台增压泵增压后分别顺序进入二段、三段反渗透膜组件进行浓缩,反渗透装置的浓水中氯化钠含量较高,可送至氯化钠碟管式反渗透系统进行浓缩处理,产水进入产水池。

纳滤、反渗透系统运行时,净水垂直透过纳滤、反渗透膜,原水中的盐分及其他胶体污染物因净压作用将被浓缩于膜表面,并被未透过的水流沿膜表面平行的方向带走,纳滤、反渗透系统在运行过程中能够在正常运行的同时完成自清洗过程。膜组件长期运行后,会受到某些难以冲洗掉的污染,如长期的微量盐分结垢和有机物的积累而造成膜组件性能的下降,运行压力升高,所以必须用化学药品进行清洗,以恢复其正常的除盐能力。纳滤、反渗透一般每 $1\sim 4$ 个月清洗一次,每次清洗 $2\sim 5\text{h}$ 。纳滤、反渗透系统各设置一套清洗装置,由 2 台清洗泵、1 台清洗保安过滤器及化学清洗药箱组成,清洗均采用分段清洗的方式,以达到最佳的清洗效果。当纳滤、反渗透系统停机时,因膜内部的水已经处于浓缩状态,在静止状态下,容易造成

膜组件的污染,因此还需要用反渗透产品水冲洗膜表面,以防止污染物沉积在膜表面,影响膜的性能,因此每次系统停机时,需要进行延时停机冲洗。化学清洗废水回流至调节水池。

4.2.3 碟管式反渗透系统

碟管式反渗透是反渗透的一种形式,是专门用来处理高浓度污水的膜组件,其核心技术是碟管式膜片膜柱。把反渗透膜片和水力导流盘叠放在一起,用中心拉杆和端板进行固定,然后置入耐压套管中,就形成一个膜柱。纳滤、反渗透浓水分别通过增压泵打入硫酸钠碟管式反渗透系统及氯化钠碟管式反渗透系统膜柱内,从导流盘与外壳之间的通道流到组件的另一端,在另一端法兰处,纳滤、反渗透浓水通过通道流入导流盘中,被处理的液体以最短的距离快速流过滤膜,之后 180 度逆转到另一膜面,再从导流盘中心的槽口流入下一个导流盘,从而在膜面形成由导流盘圆周到圆心再到圆周,再到圆心的折返路线,浓缩液最后从进液端法兰处流出,透过液通过中心收集管不断排出。

碟管式模组的优良性能依赖于品质优良的反渗透膜片和导流盘,导流盘表面有一定方式排列的凸点,使处理液形成湍流,增加透过速率和自清洗功能,导流盘将膜片夹在中间,处理液快速切向流过膜片表面^[5]。

硫酸钠碟管式反渗透系统及氯化钠碟管式反渗透系统的产水进入产水池,硫酸钠碟管式反渗透系统浓水进入硫酸钠蒸发结晶系统,氯化钠碟管式反渗透系统浓水进入氯化钠蒸发结晶系统。

4.3 蒸发结晶系统

本设计方案蒸发结晶系统采用机械蒸汽再压缩技术,是指重新借助蒸发浓缩环节形成的二次蒸汽的冷凝潜热,进一步缩减蒸发浓缩环节能耗的一种先进节能技术,其基本原理是把蒸发器蒸发形成的二次蒸汽在蒸汽压缩机机械压缩的作用下使其温度、压力得以提升,进而使提升了热焓的二次蒸汽转至蒸发系统化,以对生蒸汽进行补充甚至全面替代^[6]。

本设计方案采用降膜式机械蒸汽再压缩蒸发结晶系统,由蒸发器和结晶器两部分组成,碟管式反渗透系统浓水首先送到机械蒸汽再压缩蒸发器中进行浓缩,浓缩后的浓盐水送至强制循环结晶器系统进一步浓缩结晶,将水中的盐分结晶成固体,蒸馏水进入产水池,硫酸钠蒸发结晶

系统结晶生成的固体盐分经离心分离、干燥后为纯度较低的硫酸钠混盐,可外运至可接收此部分混盐的企业进行处理或作为生产原料再利用,氯化钠碟管式反渗透系统可结晶生成纯度较高的氯化钠固体,经离心分离、干燥后可作为产品进行对外销售。

4.4 产品水回用

反渗透系统、硫酸钠碟管式反渗透系统及氯化钠碟管式反渗透系统的透过液产水,硫酸钠蒸发结晶系统及氯化钠蒸发结晶系统的蒸馏水作为产水储存于产水池,通过回用水泵输送至循环冷却水系统及锅炉补给水系统,作为其补水。

5 结论

本工程通过“预处理+膜浓缩+蒸发结晶”的零排放处理工艺,使得企业废水全部得到处理,不对外排放,每年减少废水外排约 111 万 t, COD 减少外排约 330t,缓解了当地水体污染严重的现状,环境效益显著。零排放系统产水全部回用,减少了企业新鲜水的用量,通过对氯化钠和硫酸钠的分离回收,减少了固体废物的处置费用,并预计每年可产出氯化钠约 7800t 作为商品对外出售,创造了可观的经济效益。

[参考文献]

- [1]莫华,吴来贵,周加桂.燃煤电厂废水零排放系统开发与工程应用[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2013(11):1368-1372.
 - [2]蒋玖璐,李东升,陈树勤.高密度澄清池设计[J].给水排水,2002,28(9):27-29.
 - [3]何文杰.安全饮用水保障技术[J].天津建设科技,2005,15(4):27-28.
 - [4]阎光明,李桂枝.纳滤膜在水处理中的应用[J].环境工程,2001,19(1):23-25.
 - [5]左俊芳,宋延冬,王晶,等.碟管式反渗透(DTRO)技术在垃圾渗滤液处理中的应用[J].膜科学与技术,2011,31(2):110-115.
 - [6]王建,夏兴洪,周红,等.机械蒸汽再压缩技术在高盐废水处理中的应用与发展[J].机械管理开发,2016,31(1):93-95.
- 作者简介:刘嘉(1986.02—),毕业于山西大学环境工程专业,现就职于中国电子系统工程第四建设有限公司化工石化工程设计院,给排水室主任,高级工程师。