CCPP 机组实施循环水治理项目实现近零排污

张海军,王丽伟

(内蒙古包钢鑫能源有限公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要:文章介绍了 CCPP 机组循环水治理项目,为验证循环水治理项目技术的可行性,制定近零排污、腐蚀、结垢验证方案,确定调试前、后监测指标和参数,保证技术可行、指标可控,还介绍了项目工艺流程、设备(设施)构成和工作原理。解决了调试过程中出现的各类问题,保证循环水治理项目的顺利调试和投产,实现循环水治理项目达到预期——指标可控、近零排污和药剂零添加目标。

关键词:循环水治理;可行性;工艺流程;设备

中图分类号:TK227.6 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2025)06 - 0026 - 05

Near Zero Pollution Discharge Realized by Treatment Project of Circulating Water with CCPP Unit

Zhang Haijun, *Wang Liwei*

(*Inner Mongolia Baotou Steel Xin Energy Co.*, *Ltd.*, *Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *China*)

Abstract: In this paper, the treatment project of circulating water with combined cycle power plant (CCPP) unit is introduced. In order to verify its feasibility of technologies, the proof scheme of near zero pollution discharge, corrosion and scaling is formulated, monitoring indexes and parameters before and after debugging are determined to ensure the technologies to be feasible and indexes to be controllable. Moreover, the process flows, equipment (facility) configuration and working principles are introduced. Various problems during debugging are solved to ensure smooth debugging and operations of the project so as to achieve the anticipated goals of controllable indexes, near zero pollution discharge and zero addition of reagent.

Key words: treatment of circulating water; feasibility; technological process; equipment

包钢 CCPP(燃气——蒸汽联合循环发电机组[1],以下相同)机组于 2008 年投产发电至今,为包钢创造了巨大的发电效益。CCPP 机组使用敞开式循环冷却水系统,循环水在冷却过程中,存在蒸发和飘散损失,为保持吸水井水位,不定期使用一次滤后水补水。一次滤后水质为硬水,在一定温度下,硬水易使设备内部结垢,危及循环水系统设备的安全运行和使用寿命,进一步影响 CCPP 机组的运行稳定。为此,需长期通过加入阻垢剂并依据化验结果排污来维持水质,但排污本身对会浪费水资源。目前,国内发电机组普遍采用敞开式循环冷却水系统,普遍存在类似问题。如果实施循环水治理,治理后

收稿日期:2025 - 07 - 30

作者简介:张海军(1968 -),男,内蒙古包头市人,特级技师,现从事 CCPP 机组的运行、维护和检修工作。

的循环水的指标达标可控,不再投加阻垢剂,实现循环水近零排污,达到节水和药剂零添加的目的。随着水处理技术的发展,原则上可以实现上述目标。该技术采用离子微聚技术、电解吸附技术、浸没式膜过滤技术为主的综合处理工艺。通过前期对技术的分析论证,认为技术可行,制定循环水系统近零排污验证、结垢判定、腐蚀判定等方案,为技术的应用创造条件。

2023 年 10 月,包钢开工建设 CCPP 1#机组循环水治理项目,项目投产后处理循环水规模 300 m^3/h,可有效降低循环水中的 Ca^{2+}(Mg^{2+})含量,将循环水中 Cl^- 含量稳定控制在 500 mg/L 以下,实现循环水系统"不结垢、不腐蚀、近零排污、零药剂添加、指标可控"的综合目标,为机组的长寿命周期、绿色、经济运行提供有力保障。

1　制定可行性验证方案和异常应对措施

1.1　实现零排污

项目实施前,检查发现排污阀门关闭后有漏量,对严密性差的排污阀门进行更换,为循环水治理技术投运后,实现零排污创造条件。

1.2　结垢

调试前,在 CCPP 1#机组凝汽器内部循环水侧部分管板区域进行标记,测量区域内凝汽器管束内径。调试中期,利用机组停机时段,对凝汽器上述区域进行测量和数据比对,管径尺寸无变化;结合调试期间循环水硬度、碱度化验指标和循环水流量、凝汽器循环水侧入口压力和温度参数,与 CCPP 2#机组同期参数比对,化验指标、参数无明显变化,确定循环水治理技术实施不会使循环水系统内设备(设施)结垢增加。

1.3　腐蚀及应对措施

调试前,在冷却塔循环水出口篦子处,挂碳钢(设备和管路材质为碳钢)、304 不锈钢(煤冷水和闭式水板换板材质为 304 不锈钢)和 316 不锈钢(凝汽器内部管束材质为 316 不锈钢)材质的挂片。调试中,检查挂片,发现碳钢挂片发生腐蚀,其它材质挂片未见腐蚀。根据治理技术原理,循环水在电解罐内电解过程中,产生的氯气因分子量大不能全部抽出,由于氯气有易溶于水的特点,溶于水的氯气反应生成盐酸和次氯酸,这两种化学产物会对碳钢挂片产生腐蚀。针对发现的问题,采取的措施有:

(1)在电解罐内放置气泡石,增加鼓气量,减少氯气的再次溶解;

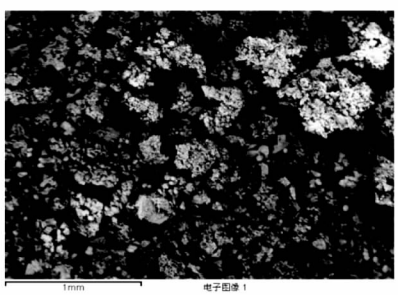
(2)在电解罐排气口增加抽气管路和抽气风机,加大抽气量;

(3)将垂直插入膜池的排水口改为水平管路布置,封堵出口,在水平管路下部隔 250 mm 开孔,在膜池矮墙上装风机对流出的水进行吹风,减少水中的溶解氯气。采取上述措施后挂片腐蚀减轻,后又在排污池顶部安装脱气塔(原技术中没有),膜过滤器出来的水经过脱气塔脱气(氯气),彻底消除挂片腐蚀现象。

1.4　循环水中的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 的降低效果

定期检查电解罐,可以看到罐壁内侧有一层白色附着物,后对附着物进行扫描电镜分析,用电镜不同量程(100 μm、200 μm、300 μm、1 mm)扫描。因数据量较大,仅附 1 mm 检测数据和图像。如图 1 所示,主要成分为 Ca^{2+}、Mg^{2+} 等,同时,对排污池底沉积物使用压滤机压出了固体废物,证明循环水治理技术可以降低循环水的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量。

元素	重量	原子	化合物	化学式
	百分比	百分比	百分比	
Na K	0.23	0.23	0.32	Na_2O
Mg K	30.59	28.39	50.72	MgO
Al K	0.51	0.43	0.97	Al_2O_3
Si K	4.78	3.84	10.22	SiO_2
Cl K	0.58	0.37	0.00	
Ca K	26.43	14.88	36.98	CaO
Fe K	0.15	0.06	0.21	Fe_2O_3
O	36.72	51.80		
总量	100.00			



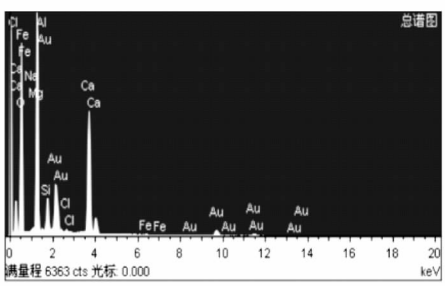


图 1　扫描电镜检测数据和图像

2 工艺流程

如图 2 所示，CCPP 机组循环水泵将吸水井中的水供出，一路水进入 CCPP 机组冷却设备，后经冷却塔冷却流入吸水井，完成水循环；循环水治理技术是利用循环水旁路进行水处理，循环水进入电解罐电解，降低水中的 Cl^-、Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量。电解罐出水经膜过滤器过滤后，泵将水供入脱气塔，经脱气塔脱去除溶解于水中的氯气后流入吸水井，完成循环水处理。其中，电解罐内电解产生的沉积物直接排入排污池；膜过滤器过滤产生的垢水（污水）抽送到排污池。沉淀物和垢水（污水）在排污池沉淀，沉淀后的上层清水通过泵抽入膜池，实现清水回用；排污池内的沉淀物通过压滤，实现固体废物外排。

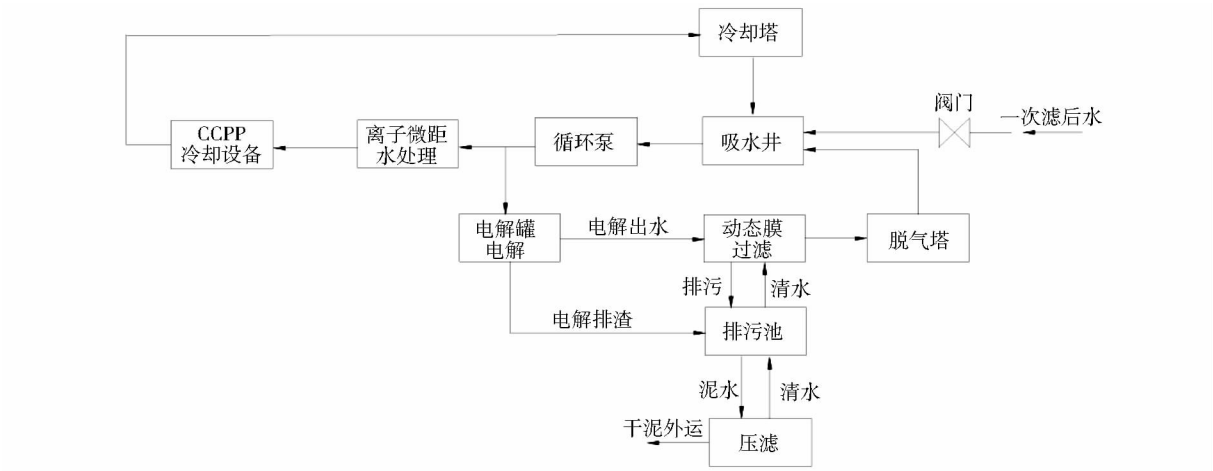


图 2 循环水治理技术工艺流程图

3 循环水治理系统组成和工作原理

3.1 循环水治理系统

由离子微聚[2]系统、电解吸附系统、膜过滤系统、脱气塔、排污池和压滤机等设备（设施）组成。

3.1.1 离子微聚系统

离子微聚系统由控制主机、信号主机和离子微聚环组成。

在循环水泵出口母管和循环水增压泵出口管路上分别安装离子微聚环，通过控制主机、信号主机使离子微聚环产生量子波[3]能量。当量子波能量耦合到水里后，水中最外层电子吸收量子波能量发生移位，相应的质子对其吸引力变小，其它离子的质子对发生移位的电子吸引力增强，同类离子间相互斥力变小，吸引力增大。当发生碰撞时，会逐渐的聚合在一起，在量子波的作用下，水中的 Ca^{2+}（Mg^{2+}），由原来的随机游离态，变成同类离子聚合体。该聚合体达到一定大小时，在水中发生水合作用，同类 Ca^{2+}（Mg^{2+}）团外围被水分子包围，相当于给 Ca^{2+}（Mg^{2+}）加入了一层隔离膜，不与 CO_3^{2-} 结合，实现防垢效果。当 Ca^{2+}（Mg^{2+}）没有聚合到与水发生水合作用程度时，水中 Ca^{2+}（Mg^{2+}）与 CO_3^{2-} 等阴离子形成文石结构的松散凝块。当水受热或压力降低时，这些松散的凝块在水中变成小晶体悬浮在水中，不易附着于设备（管道）壁内侧随水移动，实现防垢的效果。对于已经形成的 $CaCO_3$，由于是逐步结晶沉积形成，$CaCO_3$ 分子间的范德华力较小，分子中电子旋转频率较小，易与量子波发生干涉，因此当量子波作用到 $CaCO_3$ 上时，可以逐步地消除较弱的分子间力，使分子晶体脱落，产生除垢的效果。通过量子波的衍射作用，直接作用于微生物内部，产生灭菌效果。

3.1.2 电解吸附系统

电解吸附系统由电解罐、阳极、伺服电机、刮渣刀和电解罐控制（恒压、恒流）装置组成。其中，电解罐为一个直径 800 mm，高度 1 800 mm，碳钢制成的圆柱状容器，外壳为阴极。钛基三维网涂抹多种贵金属构成阳极，置于电解罐内与电解罐外壳绝缘。

电解罐的控制装置（恒压、恒流）在电解罐的阴、阳极施加脉动直流电场，当循环水进入电解罐后，循环水发生电解反应。在电场作用下，阴极附近形成高浓度的 OH^- 富集区域。化学反应方程式如下：

$$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2\uparrow + 2OH^- \quad \text{（析氢反应）} \quad (1)$$

这种升高的 pH 环境,使容易结垢的矿物质预先结垢,并从水中析出。阴极析出物主要以 $CaCO_3$ 和 $Mg(OH)_2$ 组成的混合物为主。化学反应方程式如下:

$$Mg^{2+} + 2OH^- \xlongequal{} Mg(OH)_2\downarrow \quad (垢) \qquad (2)$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \xlongequal{} CaCO_3\downarrow \quad (垢) \qquad (3)$$

同时,电解过程降低了循环水中的 Ca^{2+}(Mg^{2+})和 CO_3^{2-} 浓度,在罐体内壁(阴极)逐渐产生析出物的沉积。当沉积物到一定厚度时,手动启动电解罐刮刀装置,装于罐体顶部的电动机转动,推动刮刀,将罐体内壁的沉积物从电解罐内壁刮下,沉积物经电解罐的排污管路排到排污池,从而降低水中的 Ca^{2+}(Mg^{2+})含量。刮沉积物的周期可以根据沉积物的厚度人为设置,也可在控制系统中设置自动完成。电解罐阳极附近,循环水中的一部分 Cl^- 转化成 Cl_2 不断从水中溢出,降低了循环水中的中 Cl^- 含量。电解罐的上部有脱气腔,外部设置抽气装置,抽气装置运行使气腔处于负压状态,加速氯气析出,提高循环水中 Cl^- 的去除率。化学反应方程式如下:

$$2Cl^- \longrightarrow Cl_2\uparrow + 2e^- \quad (析氯反应) \qquad (4)$$

3.1.3　膜过滤系统

膜过滤系统由膜过滤器和膜池组成。

膜过滤器结构如图 3 所示,膜过滤器置于膜池内,对电解水进行过滤,降低水的浊度。当膜池水位升高且有溢流现象时,判定为膜过滤器过滤效率降低,可以用水(空气)对膜过滤器进行反洗(膜管内部通带压水或带压空气,将附着于膜管表面的污垢物冲掉)恢复膜过滤器的性能。膜池主要是放置膜过滤器和存储电解水。对于膜池内的沉积物,定期用排污泵排至排污池进行沉淀。

3.1.4　脱气塔

脱气塔属于调试期间新增加设施,脱气塔的构造与机械通风冷却塔类似。脱气塔主要是为了解决循环水电解处理后,产生的氯气溶解于水中,产生腐蚀。

3.1.5　排污池

对电解罐排出的沉积物和膜池内部过滤的沉积物进行存放和沉淀,将沉淀后变清的水利用水泵送回膜池,实现清水再利用。

3.1.6　压滤装置

对排污池内的沉淀物进行压滤,实现固体废物外运。

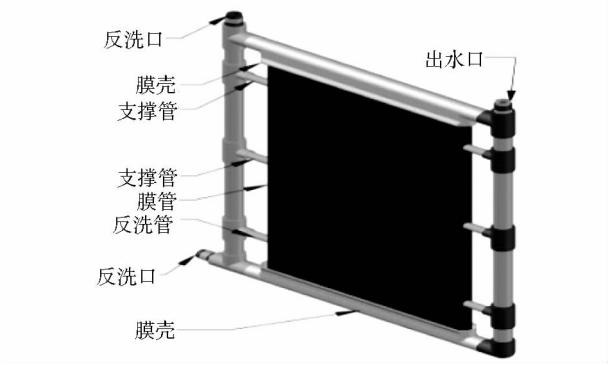


图 3　膜过滤器结构

4　化验项目和监控参数

4.1　化验项目和取样化验时间

化验项目包括循环水的硬度、碱度、循环水中 Cl^- 含量和补水中 Cl^- 含量。其中,12 小时取样化验一次循环水的硬度、碱度;6 小时取样化验一次循环水、补水 Cl^- 含量。

4.2　监控参数、记录时间和比对

监控参数有 CCPP 1#机组循环水流量、吸水井液位、凝汽器循环水侧入口压力和温度参数,2 小时记录一次。CCPP 1#和 2#机组工况完全相同,实时与 CCPP 2#机组进行数据比对,发现异常及时反馈、分析处理。由于调试用时近 6 个月,相关数据量非常大,本文不再附相关验证数据。

4.2.1　循环水中 Cl^- 含量超过 500 mg/L

调试初期,CCPP 1#机组循环水 Cl^- 含量持续增长,不断调整电解罐电压(电流)和优化参数配合,效果并不明显,循环水中 Cl^- 含量最高达到 684 mg/L,只能通过排污将 Cl^- 含量降到 500 mg/L 以下。通过数据比对发现 Cl^- 含量超过 500 mg/L 时,通过调整已不能将 Cl^- 含量降到 500 mg/L 以下,只能排污;通过数据比对发现吸水井液位低且波动大,都会使 Cl^- 含量升高,保持液位维持在 7.2 ~ 7.3 m,Cl^- 含量可控制在小于 500 mg/L 范围内。

4.2.2　补水 Cl^- 含量超过 115 mg/L

当补水 Cl^- 含量超过 115 mg/L,已超过设计要求(补水 Cl^- 含量小于 100 mg/L),数据比对发现,吸水井液位维持在 7.2 ~ 7.3 m,无法将循环水 Cl^- 含量控制在 500 mg/L 以下,只能排污降低循环水的 Cl^- 含量。调试期间(近 6 个月)检测到补水 Cl^- 含量并不稳定,最低为 90 mg/L,最高达到 221 mg/L。查看历年循环水补水化验记录,Cl^- 含量最低为

80 mg/L、最高为 120 mg/L,大部分时间维持在100 mg/L以下。补水为外供水源且供水部门且未实施 Cl^- 含量高的处理措施,补水 Cl^- 含量高的情况也只能被动接受。

4.2.3 排污方式的选择

对于 CCPP 1#、2#机组的 EP(湿式电除尘),针对多年前已实施循环水综合利用改造。EP 用水量为 20 m^3/h,改造方式是通过加装阀门和管路。在循环水系统需要排污时,将 CCPP 机组 EP 用水(用于冲洗 EP 阴、阳极板的附着物用水)水源,由一次过滤后水切换到循环水。通过 EP 使用循环水减少一次滤后水的观察,实现节水。通过多年使用,EP 使用循环水并不会对 EP 的运行有影响。检测到补水中 Cl^- 含量超过 115 mg/L 且小于 140 mg/L 时,循环水中 Cl^- 含量还在继续增大时,将 CCPP 1#机组 EP 水源由一次滤后水切换到循环水,循环水中 Cl^- 含量可以控制在小于 500 mg/L 范围内。当补水中 Cl^- 含量大于 140 mg/L 时,除 EP 使用循环水外,还需要排污才能将循环水中 Cl^- 含量控制在小于 500 mg/L范围内。

5 节水创效

循环水治理技术的使用,从根本上改变了传统敞开式循环水系统运行时,必须采用排污和加阻垢剂的运行模式,实现了水资源利用效率的提升。项目投运后,CCPP 1#机组年节水量达 38.14 万 m^3,按照一次过滤后水单价为 6.12 元/m^3,年节约水费约为 233.42 万元。同时,零药剂添加计算减少了阻垢剂、杀菌剂等化学药剂的使用成本(年节约人工、药剂费用约 15 万元),并规避了化学排污对周边环境的污染风险,循环水治理技术的实施产生了良好的经济效益与环境效益。

6 结束语

鉴于 CCPP 1#机组循环水治理技术投运后达到的预期效果,2025 年 7 月,CCPP 2#机组循环水治理项目开工建设。解决了 1#机组调试过程中出现的问题。同时,提升了水处理能力,当补水中 Cl^- 含量大于 140 mg/L 时,也可以实现循环水的“近零排污”。

循环水治理技术的使用,实现近零排污,节省了水资源和加药剂费用,但敞开式循环水系统在运行过程中,存在蒸发损失、飘散损失。为维持吸水井水位,循环水系统还需大约为 200 m^3/h 左右的补水量,造成水资源的消耗。如果把敞开式循环水系统改造为闭式循环水系统,就可以真正实现水资源的零消耗。改造成闭式水系统存在的问题是水的冷却和水处理,如果探索把冷却技术应用到闭式循环水的冷却上,再把闭式循环水的水质更换为软水(除盐水),闭式循环水系统就不再需要水处理和排污,将彻底解决循环水系统内设备(设施)的结垢问题,真正实现生产过程的节能降耗,为发电厂循环水系统的绿色升级提供可复制的技术范例。

参 考 文 献

[1] 杨顺虎. 燃气 - 蒸汽联合循环发电设备及运行[M]. 中国电力出版社,2003.

[2] 武冠英,吴一弦. 控制阳离子聚合及其应用[M]. 化学工业出版社,2005.

[3] 张新安. 量子波本质探讨[M]. 西安交通大学出版社,2014.

(上接第 25 页)

参 考 文 献

[1] 魏国良,刘曙光,韩峰,等. 包钢带式球团配加外购高硅矿可行性试验研究[J]. 包钢科技,2025,51(3):29 - 32.

[2] 刘吉涛,张国成,罗果萍,等. 包钢氧化球团回转窑结圈原因研究[J]. 烧结球团,2013,38(5):31 - 35.

[3] 付国伟,邬虎林. 包钢球团配加废镁碳砖开发镁质氧化球团的试验研究[J]. 烧结球团,2016,41(4):34 - 38,61.

[4] 张红强,张婧,罗果萍,等. 硫含量对白云鄂博铁精矿球团显微结构及抗压强度的影响[J]. 烧结球团,2018,43(3):52 - 57,62.

[5] 付国伟,白晓光,吕志义. 包钢石灰石型碱性球团试验研究[J]. 包钢科技,2022,48(5):15 - 19.