低温多效蒸馏海水淡化系统内板式换热器在线清洗方案的研究与应用

文/王志胜　王　丰　庞明金　王秋田　赵兴君
国能河北沧东发电有限责任公司

摘要：针对某滨海电厂25 000 t/d低温多效蒸馏海水淡化装置系统内板式换热器污堵现象，设计了一套在线清洗方案，介绍了电磁脉冲清洗技术和在线清洗工艺。通过该项技术的应用，成功解决了板式换热器污堵后换热效率低、拆卸困难和备件费用高等问题，为大型低温多效海水淡化装置系统内板式换热器提供经验。

关键词：低温多效蒸馏海水淡化；板式换热器；在线清洗；电磁脉冲

低温多效蒸馏海水淡化技术（LT-MED）是指在真空情况下，盐水的最高蒸发温度低于70 ℃的淡化技术，其特征是将一系列的水平管喷淋降膜蒸发器串联起来，用一定量的蒸汽输入通过多次的蒸发和冷凝，后面一效的蒸发温度均低于前面一效，从而得到多倍于蒸汽量的蒸馏水的淡化过程。该技术对水温控制要求较高，因此系统内设有大量的换热设备。板式换热器以占用面积少、换热效率高和节省投资等优点，为低温多效蒸馏海水淡化装置广泛采用，如图1所示。

污垢是在板式换热器表面上和流体中所发生的质量传递、动量传递以及换热现象相互作用的后果。通常污垢会导致板式换热器传热性能降低、压降增大，甚至加剧腐蚀，最终导致板式换热器完全失效，因此板式换热器需要定期进行清洗。

板式换热器传统的方法是拆卸清洗，面临清洗费用高、清洗工期长、密封点数量庞大和回装工艺要求高等难点，海水淡化装置长时间的停运会严重影响用户供水。而板式换热器电磁脉冲在线清洗技术，可以在装置运行的情况下不拆卸板式换热器进行在线清洗，有效解决板式换热器污堵后换热效率低、拆卸困难和备件费用高等问题。

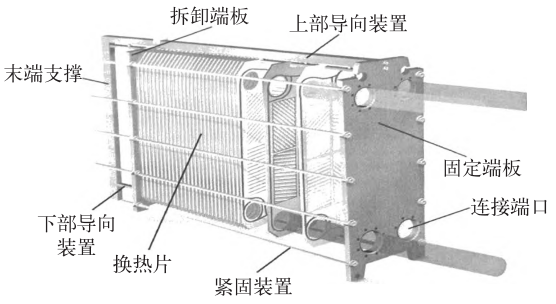

图1　板式换热器构造图

设备评估

1. 设备简介

国内某滨海电厂04低温多效海水淡化装置系统主要包括蒸发器本体、物料水系统、冷却海水系统、盐水系统、凝结水系统、成品水系统、化学加药系统和抽真空系统。其中物料水系统是整个低温多效海水淡化系统的海水来源，海水经过海水加热系统喷入蒸发器，运行流程如图2所示。

在该系统中，板式换热器主要利用物料海水对第1效冷凝水的冷却设备冷凝水冷却器、利用浓盐水余热加热物料海水的海水预热器以及利用物料海水对蒸馏水的冷却设备蒸馏水冷却器，各板式换热器相关参数见表1。

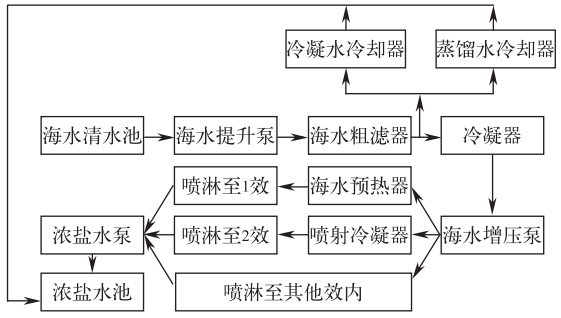

图2　某电厂04海水淡化装置物料海水流程图

表1　某电厂04海水淡化板式换热器设备相关参数

设备名称	设备型号	换热片数量/片	换热面积/m^2	换热片尺寸/mm	换热片材质	冷热流进出口管通径/mm	工作压力/MPa	设计压力/MPa
冷凝水冷却器	ALFA LAVAL M15-BFG	287	213.5	1 800×600	Ti	150	0.45	1.0
海水预热器	ALFA LAVAL T45-MFM	486	1 639.02	3 400×1 350	Ti	450	0.26	1.0
蒸馏水冷却器	ALFA LAVAL M30-FM	253	558.6	2 800×1 050	Ti	350	0.3	1.0

2. 设备评估

04海水淡化装置各效物料水流量呈降低趋势。其中1效流量为345 t/h，额定流量为425 t/h，物料水母管与04蒸发器海水增压泵之间压力由正常的0.27 MPa升至0.31 MPa，确定其中间过电流的板式换热器04蒸发器海水预热器污堵。

由于该电厂位于华北地区渤海湾，其所在位置的海水温度在海生物繁殖季节相对适宜，加之城市生活和工业污水的排放导致海水富营养化，为贻贝、藤壶以及水螅虫等海洋生物提供了良好的生存环境。尽管已对海水的前置系统设置了物理过滤装置，并在海水提升泵后加入氧化性杀生剂进行化学灭活，但是效果不尽理想。它们的卵、幼虫依然会在繁殖季节随海水通过粗滤器滤网大量涌入后置系统，滞留于板式换热器狭窄的缝隙中生长繁殖，继而形成大量生物粘泥堵塞板式换热器，使得换热效率大幅降低，水头损失增加，严重影响海水淡化装置的安全稳定运行，如图3所示。

图3　某电厂04海水淡化装置系统内板式换热器污堵情况

通过对该电厂附近海域的长期监测和跟踪，主要污损海洋生物的生长繁殖周期一般发生在春夏秋三季，入冬后海洋生物不再繁殖（见表2），因此入冬前进行板式换热器冲洗工作尤为重要。

表2　某电厂主要污损海洋生物的生长和繁殖周期

生物种类	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
贻贝												
藤壶												
水螅虫												

根据该厂企业标准《低温多效蒸馏海水淡化装置检修导则》，板式换热器冲洗项目作为计划检修项目每年进行一次，一般采取传统的拆卸清洗方法，但这种清洗方式存在以下几方面的问题。

1）海水淡化装置运行受限。当下该厂海水淡化装置供水量日益增加，入冬前正值外供水高峰期，停运机会少之又少，由于系统内大型板式换热器拆卸清洗需要5～10个工作日，因此，当板式换热器发生污堵后，一般采取临时过冬措施，如部分开启盐水旁路至物料海水管线阀门，使温度较高的浓盐

水与物料海水混合，但这却加大了蒸发器能耗。同时，由于浓盐水中Cl^-含量较高，蒸发器换热管腐蚀风险增加。

2）能损增加。由于板式换热器的污堵更易产生结垢和泥沙沉积，板片间隙缩小，造成换热效果大幅下降，水阻加大，同时增加冷却水耗量和厂用电损耗。

3）长时间的垢物沉积会导致换热器腐蚀泄漏，缩短换热器使用寿命。

4）拆卸清洗费工、费料。大型板式换热器解体后逐片清洗，检修中需要更换大量的密封圈和板片，不仅回装十分困难、耗工耗时，而且增加材料费用（进口备件费用更高）。以该厂04海水淡化海水预热器为例，按每年至少拆卸检修一次，4年左右密封圈备件要全部更换，仅密封圈备件费用就需要约47万元（不考虑板片损坏更换），折合每年材料成本为11.8万元。考虑到各海水淡化装置板式换热器大小、换热片数量以及清洗面积等影响因素，人工清洗费用不尽相同，但仅04海水淡化装置每年板式换热器的维修成本就需30万元以上。

因此，有必要研究一种海水淡化装置大型板式换热器的在线清洗技术，不仅能在不解体板式换热器的前提下对其内部污堵的淤泥、污垢以及海洋生物进行高效清洗，提高换热效率，而且可提高检修效率，节省检修费用，延长设备使用寿命。

电磁脉冲清洗技术

1. 电磁脉冲清洗技术原理

SWM系列电磁脉冲清洗机是一种基于在线情况（Clean in Place，CIP）技术的高效在线清洗设备，可在不拆卸板式换热器情况下进行在线清洗工作，提高换热效率，减少人工清洗时间和材料费用。SWM系列电磁脉冲清洗机结合了板式换热器的结构特点，采用电磁脉冲多相流清洗技术和化学清洗技术，通过板式换热器自身系统的固定管路以及加装的临时管路，与需要清洗的生产设备相连，建立相对封闭的清洗系统和排污系统，应用智能化控制系统产生脉冲波浪冲刷板片，可在海水淡化装置运行中，不解体板式换热器的前提下对其进行快速清洗。

2. 电磁脉冲清洗技术功能

SWM脉冲循环清洗装置（见图4）具体可实现以下功能：

1）电磁脉冲多相流、正反向清洗功能。

2）化学循环清洗与电磁脉冲混合清洗功能。

3）换热器停机清洗与干燥保养功能。

4）具有一机多用功能，适用于多台板式换热器的在线清洗。

5）具有符合国家化学清洗导则与标准的腐蚀挂片试验与检测功能。

6）PLC智能化控制，触摸屏显示，一键操作式自动化运行，操作简单、可靠，具有设置、数据记忆、报警、保护、保养提示等多项功能。

图4　SWM脉冲循环清洗装置

3. SWM脉冲循环清洗装置应用特点

1）清洗过程安全可靠。气水脉冲产生的多相流压力为0.2～0.4 MPa，远低于换热器的设计压力。

2）清洗效率高。大型板式换热器每次清洗十数小时就可完成清洗，有效清除垢物和杂物，保持换热器清洁。

3）使用操作方便。控制系统采用软操和硬操结合，触摸屏显示，画面流程清晰友好，数据记录齐全，并配有保养提示和帮助菜单，方便日常维护保养和人员操作。

4）化学清洗符合DL/T 523—2017《化学清洗缓蚀剂应用性能评价指标及试验方法》、DL/T 957—2017《火力发电厂凝汽器化学清洗及成膜导则》等电力行业标准。清洗药剂根据换热器垢样和清洗导则复合配制，清洗过程采用进口pH指示仪监测，清洗废液中和排放，整个清洗过程安全可控。

5）生产环境文明、良好。由于不需要解体清洗，装置与换热器进出水管路接口连接即可使用，不占用过多位置，系统集成度高，全封闭运行，现场不存在跑、冒、滴、漏问题。

清洗方案

1. 清洗时间的选择

夏季是低温多效蒸馏海水淡化系统内板式换热器清洗的最佳时机。由于夏季物料海水温度较高（16～24 ℃），满足1效海水进效喷淋条件，届时可全面隔离海水预热器进行在线清洗工作；而冷凝水冷却器以及蒸馏水冷却器只需关注冷流介质温度，因此可进行全时段清洗。

2. 清洗模型的设计建立

根据04海水淡化系统内板式换热器自身系统的固定管路设计建立清洗模型，如图5所示。

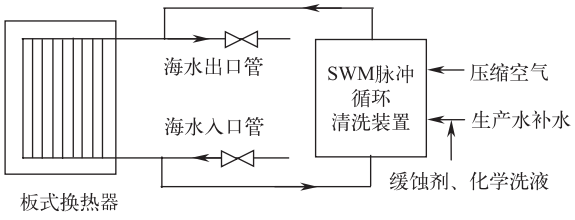

图5　某电厂04海水淡化装置板式换热器在线清洗模型

在线清洗装置的清洗管与板式换热器物料海水侧进口管道阀门后接入（DN150，PN1.6）并于海水侧出口管道阀门前接入（DN150，PN1.6）；气源与附近检修用压缩空气接口相连（DN50，PN1.6）；补充水源为生产水至海水淡化补水管路（DN100，PN1.6）；电源选用380 V检修电源；排污水经过中和处理后排至排水沟（DN100，PN1.6）。

3. 清洗过程中的化学监督

清洗期间严密监视清洗液数据，保证：化学清洗液浓度控制在1.5%，缓蚀剂浓度控制在0.3%～0.35%，清洗液温度在38～42℃，具体监督项目和要求见表3。

表3　板式换热器化学清洗过程中化学监督项目和要求

清洗步骤	监督项目	控制要求	分析频率
水冲洗	外观	澄清无杂质	冲洗结束时
化学清洗	清洗液浓度清洗液pH值Ca^{2+}浓度	浓度1.5% pH值1～1.5 Ca^{2+}浓度	每0.5 h
化学清洗后水冲洗	外观、pH值	澄清无杂质、pH≥4.0	冲洗结束时
水冲洗后中和	pH值	pH值6～9	每1 h

板式换热器在线清洗方案的实施与效果检查

1. 板式换热器在线清洗方案的实施

某电厂根据低温多效蒸馏海水淡化装置在线清洗模型，采用氨基磺酸作为清洗剂，添加清洗助剂及缓蚀剂对04海水淡化装置系统内三台板式换热器进行了在线清洗，期间对清洗各项参数进行化验，确定清洗终点。海水预热器累计清洗时间为15 h，蒸馏水冷却器累计清洗时间为12 h，冷凝水冷却器累计清洗时间为8 h。

2. 板式换热器在线清洗效果检查

为验证本次脉冲冲洗效果，关闭海水预热器盐水、海水侧进出口门，对海水预热器进行了在线解体检查，整个板式换热器内部非常洁净，未发现有藤壶、贝壳、藻类等海洋生物残渣以及污泥，清洗后情况如图6所示。

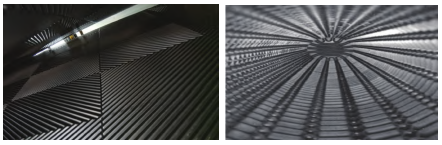

图6　某电厂04海水淡化装置板式换热器在线清洗效果

失重法测定SWM在线清洗装置腐蚀指示片平均腐蚀速度和总腐蚀量，结果见表4。腐蚀指示片的金属平均腐蚀速度均小于1 g/(m^2·h)、总腐蚀量均小于10 g/m^2，所有缓蚀数据均优于电力行业相关标准。

表4　腐蚀指示片试验结果

试验材料	腐蚀速度g/[(m^2·h)]	行业标准	总腐蚀量/(g/m^2)	行业标准
钛试片	0.007 8	1	0.05	10

根据该厂04海水淡化运行数据统计，经过电磁脉冲清洗后，在额定进汽工况下，盐水旁路至物料海水温度控制阀开度由洗前的20%降至5%，物料水母管与04蒸发器海水增压泵之间压力恢复至0.27 MPa，海水预热器清洗效果良好；蒸馏水、冷凝水回收温度由洗前的45.8 ℃降至洗后的40.5 ℃，蒸馏水、冷凝水冷却器清洗效果明显。

结束语

板式换热器传统的清洗方式不仅检修时间长、人工及备件费用昂贵，而且检修机会少、回装工艺要求高，检修难度较大。应用电磁脉冲在线清洗技术，成功解决了板式换热器污堵后换热效率低、拆卸困难和备件费用高等问题，为大型低温多效海水淡化装置系统内板式换热器的安全稳定运行和节能降耗提供了宝贵的经验。EA