# 低温多效蒸馏法海淡装置产品水成本核算及节能运行方式

文/王永辉
国能河北沧东发电有限责任公司

*摘要：低温多效海水淡化装置成品水的能耗主要包括汽耗和电耗两部分（均可折合煤耗）。通过对低温多效海水淡化装置产品水的汽耗、电耗成本核算，找出影响成本的主要因素，指导制定合理的海水淡化装置运行方式，在机组提供的蒸汽量一定的情况下达到节能增效的目的。*

*关键词：低温多效蒸馏法海水淡化；造水比；汽耗；电耗；煤耗*

## 设备概况

国能河北沧东发电有限责任公司一期工程建设2×600 MW亚临界燃煤发电机组，二期工程建设2×660 MW超临界燃煤发电机组，公司工业及生活用水均采用海水淡化制备的成品水，已建一、二、三期工程海水淡化制水量为5.75万$m^3$/d，一、二期工程总淡水用量为2.004万$m^3$/d 。汽轮机四级抽汽取自中压缸末级排汽，抽汽压力0.95 MPa，抽汽温度350 ℃，额定抽汽量175 t/h，最大抽汽量400 t/h。海水淡化抽汽管道采用母管制，四台机组抽汽管道经隔离阀并列和母管连接。

海水淡化制水站一期工程两台1万 t/d低温多效海水淡化设备额定耗汽量为2×50 t/h（引进法国sidom公司技术），二期工程一台1.25万t/d国产化低温多效海水淡化设备额定耗汽量为51 t/h，三期工程一台2.5万t/d国产化低温多效海水淡化设备额定耗汽量为78 t/h，现有海水淡化额定耗汽量共229 t/h。海水淡化装置系统图如图1所示，设备主要参数见表1。

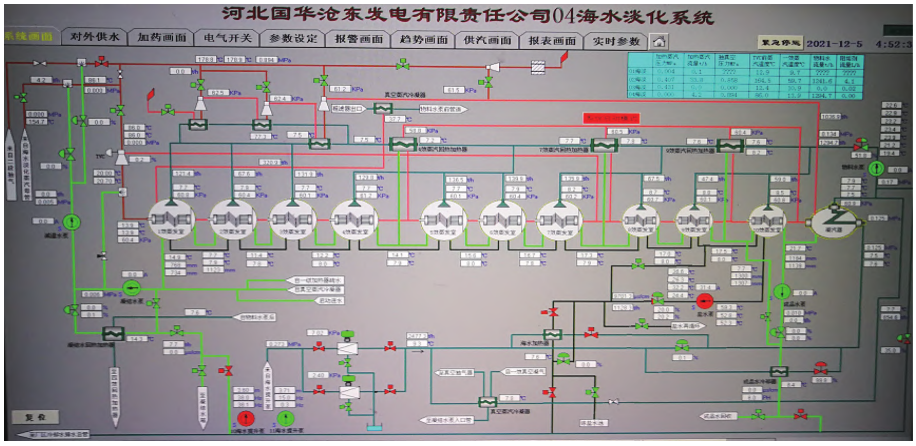


图1　04海水淡化装置系统图

表1　海水淡化设备主要参数

| 项目名称 | 设备参数 | | |
|---|---|---|---|
| 产水量/（万t/d） | 2×1 | 1×1.25 | 1×2.5 |
| 设备型式 | TVC-MED | TVC-MED | TVC-MED |
| 蒸发器组合方式 | 4 | 4+2 | 7+3 |
| 造水比 | 8.3 | 9.5 | 13.5 |
| 进汽压力/MPa | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 进汽温度/℃ | 320 | 320 | 320 |
| 蒸汽消耗量/（t/h） | 50 | 51 | 78 |
| 首效蒸汽流量（额定）/（t/h） | 116 | 124.8 | 150.7 |
| 产品水水质（TDS）/（mg/L） | ＜5 | ＜5 | ＜5 |

## 海水淡化装置成品水成本计算

海水淡化成品水成本包括汽耗量、电耗量、海水成本、产品折旧成本、检修成本、运行管理人工成本等。其中重要部分为汽耗量和电耗量，海水取自渤海湾，成本忽略不计，产品折旧和检修成本、运行管理人工成本为固定支出。

一台海水淡化设备，海水成本为0（不计算取水泵耗电量），则制水成本（吨水煤耗）=汽耗+电耗，最终以吨水煤耗衡量海水淡化设备的综合经济性。

根据海水淡化装置造水比定义：（海水淡化制水量－汽耗量）/汽耗量=平均造水比

造水比是1 t动力蒸汽量进入海水淡化装置可以产出的成品水量（t），造水比越大，汽耗越小。在相同产水量条件下，采用造水比不同的设备造水，消耗的动力蒸汽量相差很大。

1. 汽耗理论计算所需原始参数

主蒸汽流量$D_2$=1 803.938 t/h；主蒸汽焓$h_a$=398.9 kJ/kg；主给水焓$i$=1 202.3 kJ/kg；再热蒸汽流量$D$=1 505.538 t/h；再热蒸汽焓（热）（冷）$i_{21}$=3 538.8 kJ/kg、$i_n$=3 017.5 kJ/kg；锅炉效率$n_a$=93.78%；管道效率$n_a$=99%；制水抽汽量$D$=50 t/h；制水抽汽焓$i$=3 115.6 kJ/kg；制水回水焓$i$=289.23 kJ/kg（按蒸发器进口30 KPa饱和水焓计）；乏汽焓$i$=2 584 kJ/kg；主蒸汽熵$S$=6.42 kJ/kg·℃；再热蒸汽熵（热）（冷）$S_{21}$=7.31 kJ/kg·℃、$S_2$=6.50 kJ/kg·℃；制水抽汽熵$S$=7.36 kJ/kg·℃；乏汽熵$S$=7.65 kJ/kg·℃($X$=0.98)；主汽轮机排汽温度$T$=273.15+32.52=305.67K；主汽轮机排汽焓$i$=23 419 kJ/kg($X$=0.91)；主汽轮机排汽熵$S$=7.69 kJ/kg℃($X$=0.91)；标煤低位发热量$D$=29 308 kJ/kg；每吨标准煤价格按650元计。

2. 额定参数理论制水标准煤耗及燃料成本计算

利用热量法（好处归电法）计算制水标准煤耗及燃料成本

1）汽机总热耗$Q=D(i_x-i)+D(i=-i)$l/(nan)
=[1 803.938×10(398.9－1 202.3)+1 505.536×10×3 538.8－3 017.5)]/(0.9 378×0.99)=5.11×10(kJ/kg)

2）汽机标准煤耗$B=Q$/0m=5.11×10/29 308=1.74×10(kg)

3）汽机制水抽汽总热耗$Q=D(i-i_n)$1/(nan)=[50×10°(3 115.8－289.23)/(0.9378×0.99)=1.52×10 kJ/h)

4）汽机制水抽汽总热耗比$q=Q/0$=1.52×102/5.11×10=0.0297

5）每吨制水抽汽标准煤耗$b=q\times B$/500.029 7×1.74×10/50=103.4 kg

6）每吨淡水制水标准煤耗。1.0万t/d海水淡化装置，其造水比为8.33，每吨淡水制水标准煤耗为103.4/8.33=12.41 kg,则每吨淡水制水燃料成本为12.41×650/1 000=8.07元；1.2万t/d海水淡化装置,其造水比为10，每吨淡水制水标准煤耗为103.4/10=10.34 kg，则每吨淡水制水燃料成本为10.34×650/1 000=6.72元；2.5万t/d海水淡化装置，其造水比为13，每吨淡水制水标准煤耗为103.4/13=7.95 kg，则每吨淡水制水燃料成本为7.95×650/1 000=5.17元。

即在每吨标准煤价格650元时，生产1 t成品水，造水比为10的海水淡化装置比造水比为13的海水淡化装置成本高出6.72－5.17=1.55元；同理，造水比为8.33的海水淡化装置比造水比为13的海水淡化装置成本高出8.07－5.17=2.9元。

3. 海水淡化实际成本核算试验

2021年8月17—19日，本公司委托河北电力研究院进行海水淡化制水成本核算试验，试验时间为120 min/工况，试验负荷分为240 MW、300 MW和480 MW，试验工况见表2。根据试验期间汽耗量和产水量统计计算，试验结果为吨水平均标准煤耗约6.5 kg（汽耗成本折算）。

表2　海淡装置成本核算试验工况表

| 负荷/MW | 工况 | 备注 |
|---|---|---|
| 480 | 纯凝工况运行 | 停止补水，停吹灰和排污 |
| 480 | 投运四列海水淡化装置 | 均匀补水，停吹灰和排污 |
| 480 | 投运第一列海水淡化装置 | 均匀补水，停吹灰和排污 |
| 480 | 投运第二列海水淡化装置 | 均匀补水，停吹灰和排污 |
| 480 | 投运第三列海水淡化装置 | 均匀补水，停吹灰和排污 |
| 480 | 投运第四列海水淡化装置 | 均匀补水，停吹灰和排污 |
| 300 | 投运第一、二列海水淡化装置 | 均匀补水，停吹灰和排污 |
| 240 | 投运第一、二列海水淡化装置 | 均匀补水，停吹灰和排污 |
| 240 | 纯凝工况运行 | 停止补水，停止吹灰和排污 |

4. 以04海水淡化装置平均工况57 t/h进汽量为例计算吨水电耗

以04海水淡化装置为例计算平均出力工况下的吨水电耗，进而将吨水电耗和吨水汽耗进行对比，找出成品水制水成本的主要影响因素。

根据图2、图3的PI系统数据统计04海水淡化装置各台泵的电流（单位：A）平均值和流量（单位：t/h）见表3。

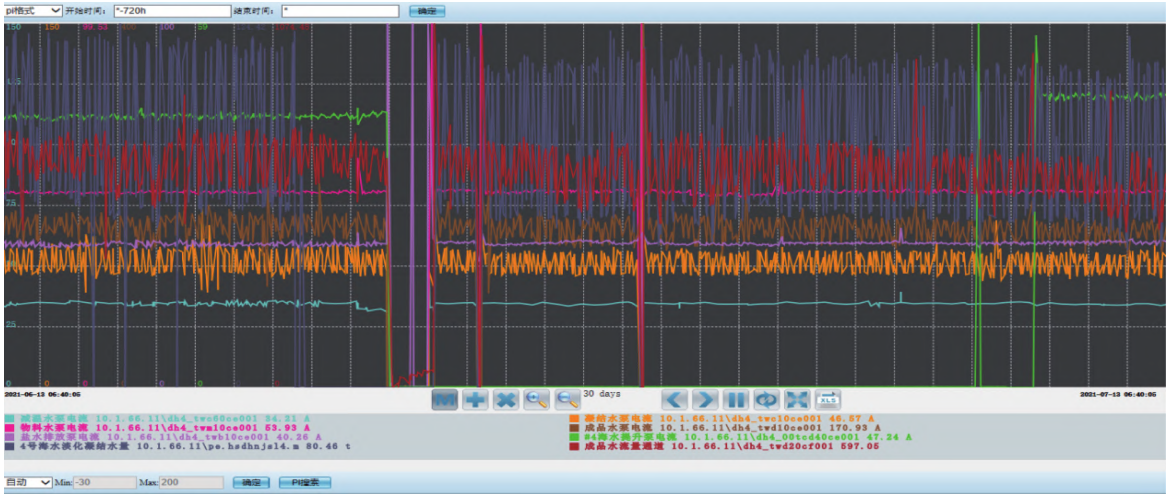

图2　04海水淡化进汽量57 t/h各泵电流表曲线

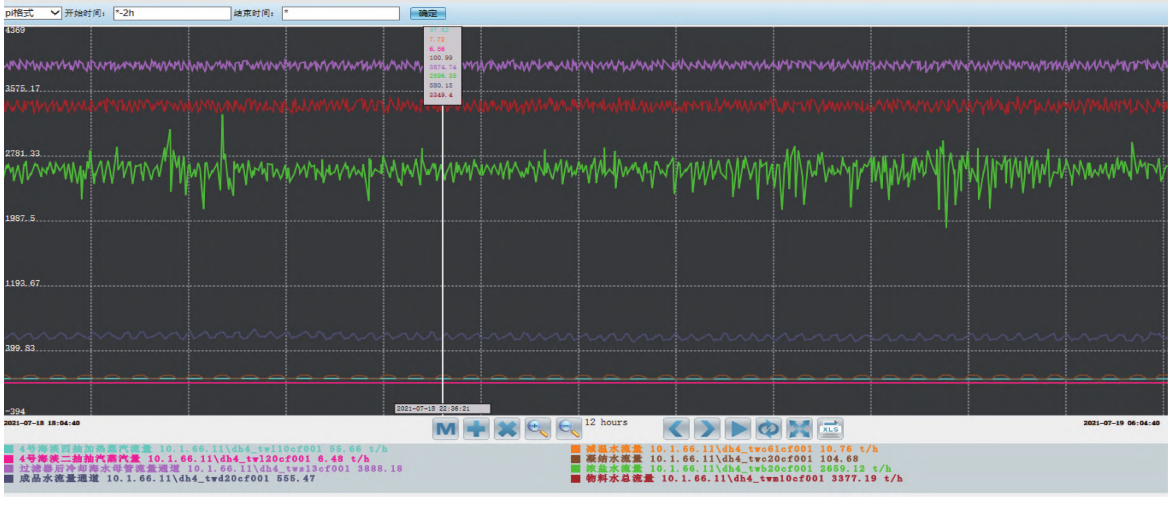

图3　04海水淡化装置进汽量57 t/h各流量参数表

表3　04海水淡化装置动力设备电流和流量数据统计表

| 凝结水泵电流/A | 减温水泵电流/A | 蒸馏水泵电流/A | 海水提升泵电流/A | 增压泵电流/A | 盐水泵电流/A | 加热蒸汽量/（t/h） | 抽真空蒸汽量/（t/h） | 粗滤器后海水流量/（t/h） | 物料水流量/（t/h） | 凝结水产量/t | 蒸馏水产量/t |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 50.5 | 33.9 | 164.5 | 47.6 | 54.0 | 40.3 | 57 | 6.5 | 3 870 | 3 370 | 85 | 580 |

已知条件：

电动机电流为$I$，电机额定功率为$W$，时间为$h$，计算：

（交流电）$P=1.732UI\cos\varphi=1.732\times0.85UI=1.472UI$

每小时耗电量：$P=(1.472\times380)\times(50.5+33.9+164.5)+(1.472\times6000)\times(47.6+54.0+40.3)$

$=139168(W)+1253260(W)=1392428(W)$

$=1392.4(kW)$

吨水电耗为：1392.4/（580+85）=2.09（kW·h）

以本公司发电标准煤耗296 g/（kW·h）计算：

折合煤耗：$2.09\times296=618g=0.618$ kg（电耗成本折算）

5. 汽耗成本和电耗成本对比分析

折合标准煤耗0.618 kg（电耗成本折算），折合标准煤耗约6.5 kg（汽耗成本折算）。

6.5/0.618=10.52，所以得出结论为，电耗成本不及汽耗成本的1/10，在成本对比计算方面以汽耗成本为主要因素。

## 节能运行方式

造水比$P_r$=净产水总量$M_d$/消耗蒸汽量$M_s$=[（蒸馏水产量+凝结水产量）－消耗蒸汽量]/消耗蒸汽量

吨水汽耗=消耗蒸汽量/[（蒸馏水产量+凝结水产量）－消耗蒸汽量]

即对于一台海水淡化设备，从造水比的定义来看，就相当于吨水汽耗的倒数。

假设来海水流量一样（M）t/h，即海水提升泵每小时电耗一样Gt（kW·h），造水比越大，则蒸馏水产量越大，盐水产量越小，汽耗量越小，相对成品水成本越低，运行经济性越优。

电厂运行中，总体为降低成品水制水成本，根据设计理论值，因此优先运行04海水淡化装置（造水比13），当造水量不足时，才依次开启03海水淡化装置（造水比10）和一期两台（01、02）海水淡化装置（造水比8.33）。在多台海水淡化装置同时运行时，由于机组负荷的变化，在海水淡化装置总的进汽量受限情况下，应该将进汽量偏斜于造水比大的海水淡化装置。随着海水淡化装置运行时间累计，换热面结垢量逐渐增大，导致设备造水比下降，实际生产中，根据每月参数统计数据计算的实际造水比安排最经济运行方式。

同时，为节能增效，海水淡化装置运行中必须保证足够的阻垢剂加药量，防止换热面结垢。设备停运超过48 h应该及时进行盐水侧防垢清洗。

因此，以上通过对四台海水淡化装置不同造水比、吨水汽耗、吨水电耗（折算煤耗）等指标的数据分析，制定不同制水量下四台海水淡化装置的最佳经济运行方式，才是节能增效和经济运行的最优方式。EA