

热电厂海水淡化装置分析

宋之平 胡三高 周少祥

(华北电力学院北京研究生部)

〔摘要〕 本文简短地对蒸馏法海水淡化装置进行了分析,提出了热电厂中这种装置的新评价指标,并对设计中的一些特殊问题作了考虑。

关键词 海水淡化 热电联产 多级闪蒸 多效蒸发 节水 余热利用

1 前言

淡水是人类生活与社会生产最重要的资源之一。我国人均淡水资源并不充裕,尤其在北方,水源已是经济发展的严重制约条件。废水净化、苦咸水淡化,尤其是海水淡化是解决水源问题的有效方法之一。在当代淡化技术中蒸馏法用得最多,但需耗大量的热能,如果把海水淡化与热电联产结合起来,将为电厂从一个“用水大户”转变为淡水供应基地提供广阔前景。

本文对热电厂中海水淡化装置设计的一些特殊问题进行了探讨。

2 蒸馏法海水淡化系统

目前技术上成熟、应用也广泛的蒸馏法海水淡化系统主要有两类,一是多效蒸发系统,即ME系统(Multiple-Effect Distillation System),另一是多级闪蒸系统,即MSF系统(Multi-Stage Flash Distillation System)。

ME系统,如图1所示,由一个外热源和一系列的蒸发器、海水预热器以及凝汽器

等主要设备组成。蒸发器的总数称为多效蒸发的“效数”。原海水从凝汽出来后,一部分被排放,另一部分 m_1 作为给水加入系统,经一系列预热器提高温度后进入第一效蒸发器接受外热产生蒸汽。此蒸汽即作为加热介质经给水预热器导至第二效蒸发器使之再次产生蒸汽,而第一效蒸汽则因放热而凝结为淡水。从第二效起,以后各效蒸发器中的过程均类似,即从上一效中接受热量,所产生的蒸汽在下一效中凝为淡水。为使各效的过程得以进行,各效的饱和温度和压力应均效下降。

多级闪蒸系统有贯流式与循环式之分,如图2(a)、2(b)所示。

在循环式MSF系统中,整个闪蒸级分为两段,即回热段与排热段。与此相应,海水也分为两段,一股是经回热段预热供闪蒸用的“循环海水” m_r ,此股海水含盐量(浓度)较高;另一股是供冷却用的原海水,它流过排热段的各级后大部分被排放,另一部分 m_1 作为补给水补充到循环海水中去,以满足物质平衡的要求。从而维持循环海水的初始浓度与初始水量不变。

循环海水经回热段逐级预热提高温度后进入海水加热器接受外热,使其达到顶值温

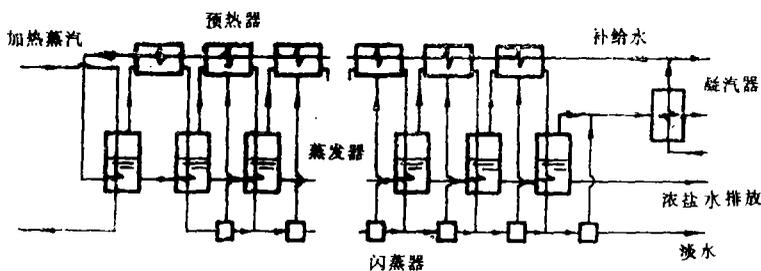


图 1 多效蒸发 (ME) 系统

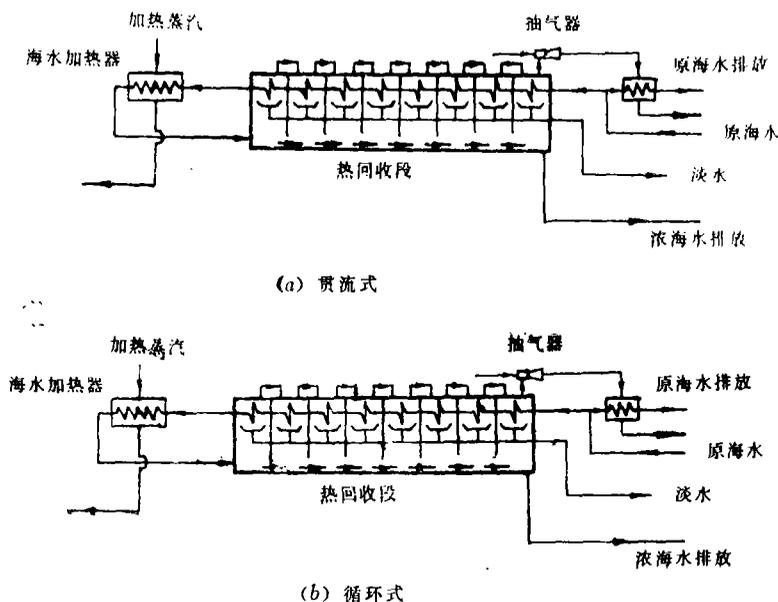


图 2 多级闪蒸 (MSF) 系统

度 t_m ，接着逐级流经闪蒸室，随压力逐级降低而发生闪蒸现象。闪蒸所产生的蒸汽则在相应级预热器中冷凝为淡水。闪蒸到最后，浓度最大的海水一部分被排放，另一部分与被补给的原海水混合后再重复上述过程。

贯流式MSF系统比较简单，其冷却用的原海水全部流往预热器和海水加热器，并经逐级闪蒸后被全部排放。

3 蒸馏法海水淡化系统的热性能

通常，蒸馏法海水淡化装置的热性能用

所谓性能比 (Performance Ratio) 来表征。性能比有不同的表现形式，但其实质指的是生产淡水的“热耗率” q [kJ/kg淡水]，只要 q 值确定，性能比也就随之确定。

经推导，图 1 所示的 n 效ME 系统的热耗率为：

$$q_{ME} = (m_f/m_d)_{ME} \overline{C_p} (\Delta\theta^n + \epsilon) + \frac{1}{n} (\overline{r} + 0.5\overline{C_p}\Delta T) \quad (1)$$

式中， m_f 、 m_d 分别为海水补给水量和淡水水量； $\overline{C_p}$ 为多效蒸发温度区间 $\Delta T = t_m - t_{b,n}$ 范围内海水平均比热； ϵ 为海水沸点升高值； \overline{r} 为二次蒸汽的平均汽化潜热，由文献[4]

确定, $\Delta\theta''$ 为回热器端差。

对于贯流式MST系统, 若总级数为 n , 且级间温降 (Δt) 平均分配, 则热耗率为:

$$q(m_f/m_d)\bar{C}_p[(\Delta T/n) + \Delta\theta'' + \varepsilon] \quad (2)$$

循环式MSF系统的热耗率为:

$$q_r = (m_r/m_d)\bar{C}_p[(\Delta T/n) + \Delta\theta'' + \varepsilon] \quad (3)$$

4 蒸馏法海水淡化系统方案的比较

根据 (1), (2), (3) 式, 如果ME系统的效数与MST系统的级数相等, 二者的 ΔT 和 $\Delta\theta''$ 也分别相等, 则从热性能 q 的角度, 一般情况前者均优于后者。ME系统的热耗率对效数特别敏感, 保证低热耗率的主要措施是增加效数, 不过效数太多会使换热面积急剧增加。使用ME系统的另一限制因素是结垢。一般情况下, ME系统的结垢较之MSF系统要难于控制得多。

MSF系统最重要的特点是沸腾海水与换热面不接触, 从而使结垢得以缓解。MSF系统的热耗率也可以通过增加级数来降低, 若热耗率维持定值, 继续增加级数, 换热面积反而会下降。

5 热电厂中的MSF系统

我们所探讨的MSF系统具有如下特点: 它装置在大容量的火力发电厂中, 由汽轮机的抽汽作为该系统的外热源, 而相对于汽轮机的主蒸汽量而言抽汽份额不大。在这种情况下有如下几个问题值得考虑。

5.1 热性能指标

如上所述, 蒸馏法海水淡化装置的热性能通常以淡水热耗率为基础用性能比加以表征。性能比的定义^[1]是:

$$R \equiv r/q \quad (4)$$

常用的有三种性能比, 一是把 r 取为环境温度

下水蒸汽的汽化潜热; 二是把 r 取为 1055 kJ (100 Btu); 三是把 r 取为单位质量加热蒸汽放热过程中的焓差。三种性能比实质一样, 都没有计及能量的品位。

在热电厂中, 能量品位至关重要。为了计及能量品位, 人们曾以不同形式把焓 (Exergy) 引入性能指标^[1,4,6], 然而焓只体现能量做功的理论可能性, 与实际的做功量还有一定的距离。因此我们提出一个新的性能指标作为热电厂中蒸馏法海水淡化系统热性能的判据, 这个指标叫做淡水功耗率 (Electricity-Equivalent Consumption Rate), 其定义是:

$$EECR \equiv W/M_d \quad (5)$$

其中 W 表示为了取得 m_d 的淡水, 由于汽轮机为淡化装置抽汽以及供给它附加的厂用电等原因而使得电厂少送出的电。这个指标与焓效率或焓耗率不同, 与某些文献上所说的电一水比 (Power Water Ratio) 也不同, 其优点在于它不仅体现了所耗能量的品位, 而且定义式中分子 (代价) 与分母 (产品) 都是电厂所直接关心的量。在现代焓经济学优化分析中, 人们常把系统中的能流转换为焓流, 进而把焓流转换为金钱流。在第二步转化中, 加热蒸汽的成本往往难于确定。对于以发电为主造水为辅的热电厂中, 应用我们的指标后, 单位量淡水耗能的成本 C_{d1} 可以很方便而合理地由发电成本 C_w 转换过来:

$$C_{d1} = C_w \times EECR \quad (6)$$

从而方便了焓经济学优化。

5.2 海水的顶值温度问题

t_m 越高则性能指标越好。对于燃用化石燃料的独立海水淡化系统, 这样的指标是说明问题的, 提高海水顶值温度的确能节约燃料, 简化设备, 降低造水成本。因此, 一般总希望 t_m 高些, 它的取值与其说是取决于热性能, 不如说是取决于防垢条件。

热电厂中的海水淡化装置性能用传统指标衡量具有片面性, 必须用新指标 EECR 来

评价。就MSF系统而言，换热主要是在预热器（即回热器）、海水加热器和凝汽器中进行。在总换热量、平均传热温差大致相同的条件下，淡水功耗率对顶值温度 t_m 的数值很不敏感。初步计算表明，当 t_m 由118℃降至67℃，其功耗率仅提高3%左右，热耗率则提高140%之巨（见图3）。

上述分析给了我们一个巨大的自由度；

对热电厂中的海水淡化装置，顶值温度可以在相当广的范围内选取，它的最佳值主要不取决于热力或传热性能，可以更多地从其它的角度考虑。如选取低的 t_m 值对防垢是极其有利的。

5.3 贯流式MSF系统

提高海水顶值温度与对补充原海水进行预处理（防止垢的形成）是两个相互联系的

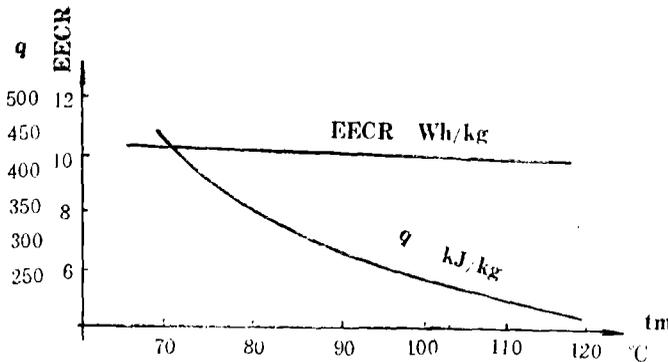


图3 EECR与顶值温度的关系及其与热耗率的比较

$$\Delta\theta'' = 2^\circ\text{C}, \Delta t = 2.5^\circ\text{C}, n = \Delta T / \Delta t, t_{bn} = 36^\circ\text{C}$$

问题。为了降低预处理费用，就要求减少原海水的补充量。循环式MSF与贯流式MSF系统相比，最主要的优点是前者大大降低了原海水的补充量。循环式MSF系统中的补给水相对量 (m_f/m_d)，取决于最终排放的海水浓度或海水浓缩率，根据 t_m 的高低，取值范围在2左右，贯流式补给水的相对量 m_f/m_d 则不同，它的数值由热平衡决定，一般在7以上，而且 t_m 越低，其值越高。

不可忽视的是贯流式MSF系统具有独特的优点，它运行简单，所需的过程控制量少，一般用磷酸盐控制结垢就可取得良好的效果，在海水顶值温度低时，可在运行的相当期限内不需化学药剂。因此对于热电厂中的MSF系统，贯流式的方案不应轻易舍弃。

6 展望

在我国沿海地区，热电联产与海水淡化

的结合有可能把电厂从一个“耗水大户”转变为淡水供应基地。作为淡水供应基地需要满足三个条件：一是水质要符合要求；二是水量要足够大；三是水的生产成本不能过高。

当代采用较广的淡化技术主要是蒸馏法、反渗透法与电渗析法。反渗透法生产的水质约为350 ppm，电渗析法不能除去不带电荷的杂质，而蒸馏法得到的水质可达3—5 ppm。

从水量上看，根据我们的测算^[6]，一座5×300 MW容量的电厂日产淡水量根据海水顶值温度的不同，可达100~200万吨之间，大致相当于引滦济津的水量。

本文提出的“淡水功耗率 EECR”是评价热电厂中海水淡化系统热性能的一个较科学的指标。通过以这一指标为基础的分析显示，海水的顶值温度 t_m 不一定是越高越好，而是有较广的选择自由度。这样就大大拓宽

了方案选择范围,为降低淡水成本开辟了更多的道路。

结垢问题在高温、高浓度下才变得难于对付。人们使用ME系统最重要的顾虑是它对结垢比较敏感。 t_m 降低后由于化学预处理的要求也随之降低,有可能采用更高的 m_f/m_d (即更多的补给水量),因而浓度也会降低。在这些条件下,ME系统可以作为重要的待选方案而加以认真的考虑。

相对于MSF系统,ME系统最重要的优点是它的传热系数高。这一点对大型装置尤为有利,因为容量越大,换热面积的大小对投资费用的影响越明显。泵功小、运行费用低是它的另一重要优点。此外,在热电厂中,我们希望与汽轮发电机联合运行的海水淡化装置具有峰谷调节作用,即能适应电负荷的变化改变产水所需的供汽量。ME系统的变荷响应能力远高于MSF系统,如果计及峰谷电的电价差,则这种响应能力有利于降低淡水成本。海水顶值温度 t_m 的降低,使蒸馏法的温度限 ΔT 变小,这对MST系统会导致热耗率 q 的急剧增高,而对ME系统则很少影响。这意味着从功耗率的角度, t_m 的下降反而对ME系统的热性能更为有利。改善ME系统热性能的另一根本途径就是减少效间温差,增加效数。

在当今的ME系统中,老式的浸管式蒸发器已过时,主要是向新型的薄膜沸腾式蒸发器发展。这种蒸发器的最重要特点是传热系数高,而且这个高数值不需要用大的传热温差去换取。这一点从热力学角度来看具有

很大的吸引力。其中,横管式喷淋膜蒸发器具有很大的发展前景,这种蒸发器结构简单紧凑,不需异型管。

海水顶值温度的降低,对管材的选取也带来了极为有利的条件。已有若干厂家用铝管作蒸发器,要求的加热蒸汽温度不超过 75°C [2,3]。使用价廉的铝管就有可能在 t_m 较低的情况下仍使用较多的效数以提高其热性能。铝管的使用将对降低淡水成本具有重大意义。

参考文献

- 1 Spiegler K S et al. Principles of desalination. Academic Press, 1980
- 2 Zaku Ahmed et al. Application potential of a modified alumiaum alloy in Arabia Gulf Desalination Plants. Desalination, 1983
- 3 Pachter M et al. Operating experience of two multi-effect-desalination pilot plants using aluminum heat transfer tubes. 4th Intern. Symp. on fresh water from the sea, 1973
- 4 胡三高. 热电合产海水淡化装置的可行性研究. 硕士论文,华北电力学院北京研究生部,1984,12
- 5 周少祥. MSF多级闪蒸海水淡化装置国产化的可行性研究与方案论证. 硕士论文,华北电力学院北京研究生部,1989,12
- 6 向先好. 热电联产海水淡化系统分析. 硕士论文,华北电力学院北京研究生部,1989,12
- 7 Arshad Hassan Khan. Desalination processes and multistage flash distillation practice. Elsevier Science Publishers B.V., 1986.

Analysis of a Sea Water Desalination Plant Incorporated in a Thermal Power Plant

Song Zhiping, Hu Sangao, Zhou Shaoxiang

(Beijing Graduate School under North China Electric Power Institute)

Abstract

After a brief description of the characteristics of the most commonly used distillation type sea water desalination plants this paper proposes a new criterion for evaluating such plants incorporated in a cogeneration power plant. On the basis of the proposed criterion some special points are taken into account for the design of the said desalination plants.

Key words: *desalination of sea water, cogeneration power plant, multi-stage flash distillation, water saving, waste heat utilization*

(上接第36页)

An Experimental Study of Jacketed Stack Thermal Calculation

Gu Ruiying, Zhang qaing, Du Kangrong

(Xian Institute of Metallurgy & Construction Engineering)

Lu Maosheng, Zhu Weirong

(Northwest Electric Power Design Institute)

Abstract

An on-site measurement program has been carried out for the jacketed stack at Shiheng Power Plant and numerous thermal engineering data have been collected with a set of formulas being deduced from fundamental principles of thermal engineering on the basis of the measured data. The said formulas can provide a sound basis for the engineering design of jacketed stacks.

Key words: *jacketed stack, temperature distribution, measurement, calculation*

(上接第49页)

(6)

2 James H. Milton, Roy M Leach, Marine Steam Boilers, 1979

参 考 文 献

1 新良田. 浅论垢下碱性腐蚀. 热能动力工程, 1983

(梁源沂 编辑)