

多级闪蒸海水淡化系统的改进研究

严俊杰, 王金华, 邵树峰, 刘继平

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对供热机组进行电水联产的参数特点, 综合多级闪蒸海水淡化技术(MSF)和低温多效蒸馏海水淡化技术(LT-MED)的优点, 提出了一种多级闪蒸海水淡化的改进系统(MSF-E), 其改进方法是利用供热汽轮机 0.12~0.25 MPa 的供热蒸汽作为热源, 将各级闪蒸室中闪蒸出的二次蒸汽的一部分引到下一级闪蒸室中用来加热循环盐水, 同时以供热机组凝汽器的循环海水代替原海水作为多级闪蒸系统的补充水, 并建立了 MSF-E 系统性能计算数学模型, 分析了参数变化对 MSF-E 系统性能的影响规律. 研究与计算结果表明, 与现有 MSF 装置进行对比, 在引出份额达到理论最大值 0.743 时, 造水比可提高 42.6%, 各级闪蒸室中盐水的质量分数平均下降 22.1%, 可以更好地发挥供热机组进行电水联产的优越性, 为 MSF-E 系统的实际应用奠定了理论基础.

关键词: 电水联产; 多级闪蒸; 海水淡化; 造水比

中图分类号: TK2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)11-1165-04

Improvement of Multi-Stage Flash Seawater Desalination System

Yan Junjie, Wang Jinhua, Shao Shufeng, Liu Jiping

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the parameter characteristics of electricity-water cogeneration, a modified desalination system (Enhanced Multi-Stage Flash, MSF-E) was proposed which considered the advantages of multi-stage flash system (MSF) and low temperature multiple effect desalination system (LT-MED). The main idea is that the 0.12-0.25 MPa steam extracting from steam turbine is used as heat source, a part of flash vapor in flash room is taken into next one to heat the recycling brine, and the system makeup water is supplied by cooling seawater of thermal power unit instead of seawater. The performance calculating model of MSF-E was set up and the influences of parameter on system performance were analyzed. The calculation and research results show that the performance ratio can increase by 42.6% and the brine density in every flash stage can decrease by 22.1% averagely in comparison with conventional MSF system when the flash steam quotient increases to its maximum value 0.743.

Keywords: electricity-water cogeneration; multi-stage flash; seawater desalination; performance ratio

符 号 表

c_p 比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	t 循环盐水温度, $^\circ\text{C}$	α 引出份额	d 产品水
M 质量流量, kg/s	T 闪蒸盐水温度, $^\circ\text{C}$	θ 盐水加热器端温差, $^\circ\text{C}$	j 闪蒸室的级数
n 闪蒸级数	r 汽化潜热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	下标	r 循环盐水
p 抽汽压力, MPa	U 循环倍率	b 排放浓盐水	s 加热蒸汽
P_r 造水比	X 盐水质量分数	cw 补充水	v 闪蒸蒸汽

海水淡化是解决淡水资源短缺问题的一条有效的战略途径,它不仅是某一国家和地区在某一时期的暂时性的局部问题,而且是世界范围内涉及人类生存和社会发展的长远而重大的问题^[1,2]。近年来,将不同的海水淡化方法组合应用,以及将海水淡化装置与火力发电厂结合进行电水联产,以提高淡水产量和降低淡水成本,逐渐成为世界各国的研究热点。在目前各种海水淡化技术中,多级闪蒸(MSF)占有主导地位,其造水规模约占世界上总造水规模的60%,技术比较成熟,而且特别适合热电厂进行电水联产^[3-6]。深入研究MSF系统的性能,对促进MSF系统的合理设计、经济运行和提高火电厂经济性均具有重要意义。

现有MSF系统的闪蒸蒸汽全部在本级的冷凝管外凝结成产品淡水,释放的潜热用于加热本级冷凝管内的循环盐水^[7,8]。低温多效蒸馏海水淡化系统(LT-MED)是将前一个蒸发器蒸发出来的二次蒸汽引入下一蒸发器作为加热蒸汽,并在下一蒸发器中冷凝为产品淡水,热能得以重复利用,造水比几乎按效数成倍增加,其最高盐水温度只有70℃。虽然操作温度低能够避免或减缓设备的腐蚀和结垢,但也正是由于操作温度低于汽轮机抽汽压力所对应的饱和温度,从而产生能位贬值,削弱了电水联产的实际热经济效益。因此,本文针对供热机组进行电水联产的参数特点,综合MSF和LT-MED两种系统的

优点,通过对现有MSF系统进行改进,提出一种多级闪蒸海水淡化的改进系统(MSF-E),旨在提高现有MSF系统的造水比,降低其腐蚀和结垢,同时还建立了性能计算数学模型,以分析参数变化对系统性能的影响规律。

1 多级闪蒸海水淡化系统的改进方法

图1所示为现有的MSF系统,它将闪蒸室分割成热回收段闪蒸室和热排放段闪蒸室两部分。原海水首先进入热排放段闪蒸室的冷凝管用来冷凝闪蒸室里产生的蒸汽,同时海水被加热,从排放段出来的海水大部分返回大海,剩余部分进入到热排放段的末级闪蒸室内,并与闪蒸室内的循环盐水混合,再经盐水循环泵送入热回收段的末级闪蒸室的冷凝管,沿着与闪蒸盐水流动方向相反的方向依次冷凝各闪蒸室里闪蒸出的蒸汽,同时自身也被逐渐加热。循环盐水从第1级闪蒸室的冷凝管出来后,进入盐水加热器被进一步加热,然后进入第1级闪蒸室下部,由于此时其温度大于第1级闪蒸室真空所对应的饱和温度,循环盐水开始闪蒸,闪蒸出的蒸汽向上经丝网除沫器除去盐水滴和泡沫后进入冷凝区进行冷凝,凝结后的水滴落入冷凝器下部的淡水槽成为产品淡水。

图2所示为改进的MSF-E系统,其改进方法如下。

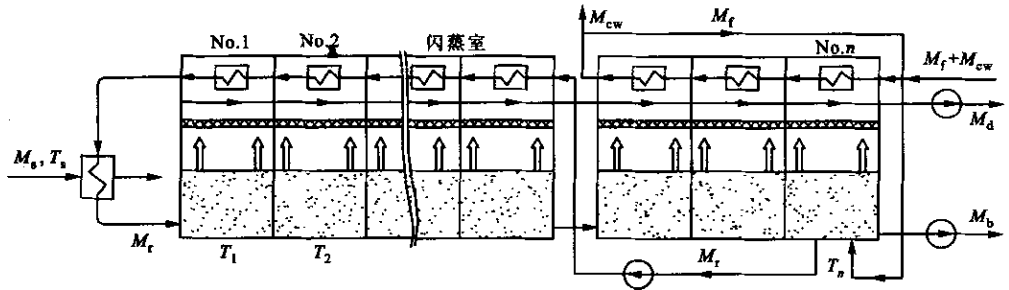


图1 现有的MSF系统示意图

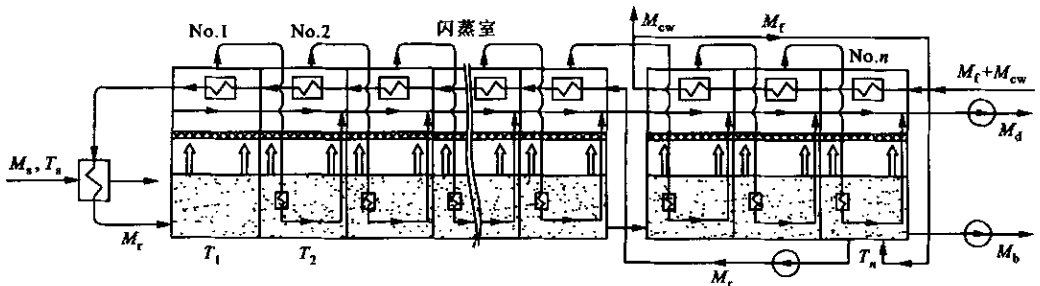


图2 改进的MSF-E系统示意图

(1)在现有 MSF 系统的基础上,结合 LT-MED 系统将二次蒸汽的潜热利用在下一级特点,将各级闪蒸室中闪蒸出的二次蒸汽的一部分引到下一级闪蒸室中用来加热循环盐水,同时二次蒸汽冷凝为产品淡水。

(2)以电厂凝汽器的循环海水代替原海水作为多级闪蒸海水淡化系统的补充水,从而提高补充水的温度,充分利用电厂废热。

2 MSF-E 系统的性能分析模型

2.1 MSF-E 系统的单元数学模型

图 3 所示为 MSF-E 系统第 j 级闪蒸室单元的热工过程模块。每一级闪蒸室的热工过程均包括盐水闪蒸、淡水闪蒸、海水预热、循环盐水流动过程等环节,假设 MSF-E 系统的各级闪蒸室服从等温降分配,并且各级闪蒸蒸汽的汽化潜热相等,从而可以建立 MSF-E 系统的单元模块方程。

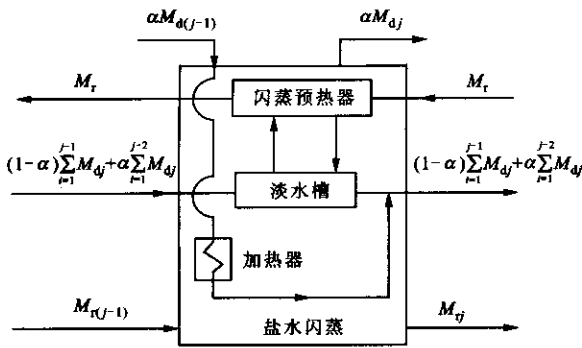


图 3 MSF-E 系统第 j 级闪蒸室单元模块示意图

盐水闪蒸后离开每一级时都有一个温度降 ΔT_{st} ,这个温度降通常称为级间递减温度。在循环盐水顶级和末级温度确定的情况下,按各级等温降原则可计算得到 ΔT_{st} 。如果装置的总级数为 n ,则多级闪蒸装置的级间递减温度为

$$\Delta T_{st} = (T_0 - T_n)/n \quad (1)$$

式中: T_0 为最高盐水温度; T_n 为末级盐水温度。

第 j 级闪蒸室产生的闪蒸蒸汽流量为

$$M_{dj} = \alpha M_{d(j-1)} + \frac{(M_r - \alpha M_{d(j-1)})c_p \Delta T_{st}}{r_{vj}} \quad (2)$$

式中: α 为引出份额,即引到下一级的蒸汽占本级闪蒸蒸汽的份额。

系统总的淡水产量为

$$M_d = \sum_{i=1}^n M_{di} \quad (3)$$

2.2 性能指标

2.2.1 造水比 对于海水淡化系统,造水比 P_r 是

衡量其性能的最重要的参数,它是指蒸发装置淡水总产量与盐水加热器所消耗的蒸汽量之比,其定义为

$$P_r = M_d/M_s \quad (4)$$

MSF-E 系统盐水加热器的热平衡方程为

$$M_s r_s = M_r c_p (T_0 - t_1) \quad (5)$$

式中: t_1 为热回收段闪蒸室第 1 级冷凝管的出口水温。

利用式(2)、(5)可以推导出 MSF-E 系统的造水比为

$$P_r = \frac{n \Delta T_{st} r_s}{r_v (T_0 - t_1)} \cdot \left[\frac{\Psi(\Psi^n - 1)}{n(\Psi - 1)^2} - \frac{1}{\Psi - 1} \right] \quad (6)$$

其中 $\Psi = \alpha(1 - c_p \Delta T/r_v)$

2.2.2 循环倍率 对于多级闪蒸海水淡化系统,循环倍率 U 是衡量其装置性能的重要参数,定义为循环盐水流量与淡水总产量之比

$$U = M_r/M_d \quad (7)$$

由式(2)、(3)、(7),经过推导得到 MSF-E 系统的循环倍率为

$$U = \frac{r_v}{c_p \Delta T} \cdot \frac{n(\Psi - 1)^2}{\Psi(\Psi^n - 1) - n(\Psi - 1)} \quad (8)$$

2.2.3 盐水质量分数 在 MSF-E 系统中,由于海水具有腐蚀性,材料容易腐蚀和结垢,因此在一定条件下,应该尽可能地降低盐水的质量分数。盐水加热器中盐水的质量分数 X_r 是最重要的浓度参数,因为在这里的温度最高,发生结垢的可能性也最大,因此应该尽可能地降低 X_r 。

盐水加热器中 X_r 的表达式为

$$X_r = (M_r - M_d)X_b/M_r \quad (9)$$

式中: X_b 为排放浓盐水的质量分数。

各级闪蒸室中循环盐水的质量分数为

$$X_j = X_r M_r / (M_r - \sum_{i=1}^j M_{di}) \quad (10)$$

3 MSF-E 系统的性能分析

为了定量研究 MSF-E 系统的性能,本文采用表 1 所示的汽水参数,其中盐水加热器热源利用供热机组 0.12~0.25 MPa 的采暖抽汽,对应的盐水加热器汽侧温度为 104~127 °C。利用前面建立的数学模型,可以得到 MSF-E 系统性能的变化规律如图 4~8 所示。

图 4 给出了 MSF-E 系统的 α 对 X_r 的影响规律,其中 α 等于 0 即为传统的 MSF 系统。可以看出,MSF-E 系统相对于 MSF 系统而言, X_r 随着 α 的增

表 1 计算所用的汽水参数

n	30
p_s/MPa	0.12~0.25
$X_f/\%$	3.448 3
$X_b/\%$	7
t_{cw}/C	5~24
t_b/C	40
θ/C	7

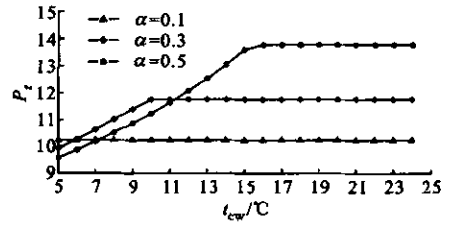


图 8 补充水温度对造水比的影响规律

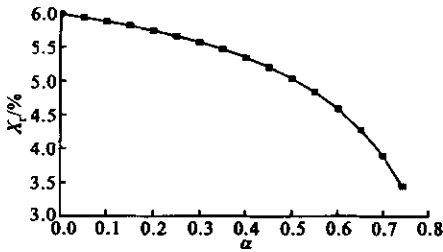


图 4 引出份额对盐水加热器中盐水质量分数的影响规律

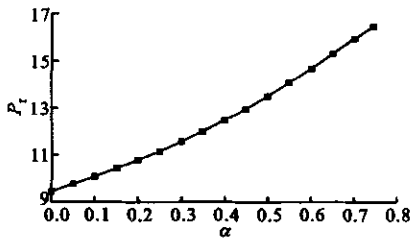


图 5 引出份额对造水比的影响规律

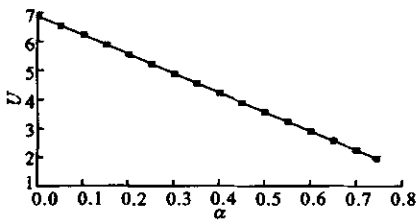


图 6 引出份额对循环倍率的影响规律

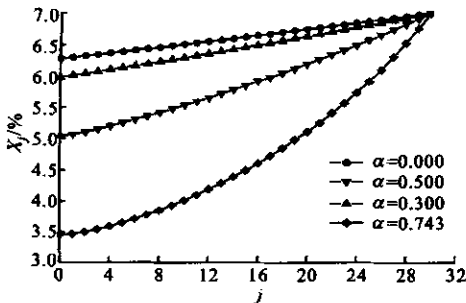


图 7 引出份额对各级循环盐水质量分数的影响规律

大而减小. 当末级闪蒸室的浓盐水全部排放时, X_r 减小到最小值, 即为补充水的入口质量分数 X_f , 此时对应的 α 为理论最大值 0.743.

图 5、6 给出了 MSF-E 系统的 α 对 P_r 和 U 的影响规律. 可以看出, 随着 α 从 0 增大到 0.743, P_r 从 9.46 增大到 16.47, 增加了 42.6%, 同时 U 下降了 71.3%, 可以大量节省系统的电耗.

图 7 给出了 MSF-E 系统的 α 对 X_j 的影响规律. 可以看出, 增大 α 可以减小 X_j , 从而可减缓系统的腐蚀和结垢, 有利于系统安全运行.

图 8 给出了 MSF-E 系统的 t_{cw} 对 P_r 的影响规律. 可以看出, MSF-E 系统在 t_{cw} 大于临界温度时, 随着 t_{cw} 的升高, P_r 不变, 在 t_{cw} 小于临界温度时, P_r 随着 t_{cw} 的升高而减小. 本文提出的 MSF-E 系统以供热机组凝汽器的循环海水代替原海水作为补充水, t_{cw} 约升高 10 °C, 这样可以避免由于 t_{cw} 变化导致 P_r 减小的缺点, 从而使系统的产水量更加稳定、可靠, 更好地发挥了供热机组进行电水联产的优越性.

4 结 论

在对传统的 MSF 系统进行分析研究的基础上, 针对供热机组进行电水联产的参数特点, 综合 MSF 和 LT-MED 两种系统的优点, 利用供热汽轮机 0.12~0.25 MPa 的供热蒸汽作为热源, 提出了一种 MSF 的改进系统 MSF-E, 并建立了其性能数学模型. 与现有的 MSF 系统进行对比, MSF-E 系统在引出份额达到理论最大值 0.743 时, 各级闪蒸室中盐水的浓度平均下降了 22.1%, 造水比提高了 42.6%, 且在提高造水比的同时, 系统循环倍率下降了 71.3%, 从而大大地节省了系统的电耗. 同时, MSF-E 系统以供热机组凝汽器的循环海水代替原海水作为补充水, 可以使系统避免由于补充水温度变化导致造水比下降的缺点, 达到了系统产水量更加稳定、可靠之目的. 这些研究结果对 MSF-E 系统的实际应用具有重要意义.

极催化剂层中的液态水含量升高;

(2) 阴极中液态水的存在,加剧了氧气的浓差极化,淹没了反应活性点,降低了电池阴极的性能;

(3) 升高电池的加湿温度或提高电流密度,质子交换膜中的水分含量升高;

(4) 充分水合后的质子交换膜可提高质子传导率,进而提高电池阴极的性能。

参考文献:

- [1] Bernardi D M, Verbrugge M W. A mathematical model for the solid-polymer-electrode fuel cell [J]. J Electrochem Soc, 1992, 139(1):2 477-2 491.
- [2] Bernardi D M, Verbrugge M W. Mathematical model of a gas diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte [J]. AIChE J, 1991, 37(1):1 151-1 163.
- [3] Springer F E, Zawodzinski T A, Gottesfeld S. Polymer electrolyte fuel cell model [J]. J Electrochem Soc, 1991, 138(1):2 334-2 342.
- [4] Fuller T F, Newman J. Water and thermal management in solid-polymer-electrolyte fuel cells [J]. J Electrochem Soc, 1993, 140(1):1 218-1 225.
- [5] Nguyen T V, White R E. A water and thermal management model for proton-exchange-membrane fuel cells [J]. J Electrochem Soc, 1993, 140(1):2 178-2 186.
- [6] Gurau V, Liu H, Kakac S. Two-dimensional model for proton exchange membrane fuel cells [J]. AIChE J, 1998, 44(1):2 410-2 422.
- [7] Zhou T, Liu H. A general three-dimensional model for proton exchange membrane fuel cells [J]. Int J Trans

Phenomena, 2001, 3(1):177-198.

- [8] Wang Z H, Wang C Y, Chen K S. Two-phase flow and transport in the air cathode of proton exchange membrane fuel cells [J]. J Power Sources, 2001, 94(1):40-50.
- [9] You L, Liu H. A two-phase flow and transport model for the cathode of PEM fuel cells [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45(1):2 277-2 287.
- [10] Lin Guangyu, He Wensheng, Nguyen T V. Modeling liquid water effects in the gas diffusion and catalyst layers of the cathode of a PEM fuel cell [J]. J Electrochem Soc, 2004, 151(12):A1 999-A2 006 .
- [11] Wei B, Wang S L, Yi B L, et al. Influence of electrode structure on the performance of a direct methanol fuel cell [J]. J Power Sources, 2002, 106(1):364-369.
- [12] Hu M R, Gu A Z, Wang M H, et al. Three dimensional, two-phase flow mathematical model for PEM fuel cell [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(1): 1 861-1 882.
- [13] Hu G L, Fan J R, Chen S, et al. Three-dimensional numerical analysis of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) with conventional and interdigitated flow fields [J]. J Power Sources, 2004, 136(1):1-9.
- [14] Sun H, Liu H T, Guo L J. PEM fuel cell performance and its two-phase mass transport [J]. J Power Sources, 2005, 143(1):125-135.
- [15] Rowe A, Li X. Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells [J]. J Power Sources, 2001, 102(1):82-96.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 1168 页)

参考文献:

- [1] 高从堦,陈国华. 海水淡化技术与工程手册[Z]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 55-62.
- [2] 王世昌. 海水淡化工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 8-14.
- [3] 周少祥, 胡三高, 宋之平. MSF 多级闪蒸海水淡化系统的建模与仿真[J]. 热能动力工程, 2002, 17(5): 506-508.
- [4] 阿迪尔 M S, 朱 华, 屠传经. 给水温度对 MSF 海水淡化系统性能的影响[J]. 浙江大学学报, 1999, 33(6):650-652.
- [5] 胡三高, 周少祥, 梁双印, 等. MSF 海水淡化系统热

经济学优化分析[J]. 水处理技术, 2000, 26(1):13-17.

- [6] 汤纪忠. 滨海地区电厂的海水淡化技术[J]. 中国电力, 1996, 29(1):28-31.
- [7] El-Dessouky H T, Ettouney H M, Al-Roumi Y. Multi-stage flash desalination: present and future outlook[J]. Chemical Engineering Journal, 1999, 73(2): 173-190.
- [8] El-Dessouky H T, Alatiqi I, Ettouney H. Process synthesis: the multi-stage flash desalination system [J]. Desalination, 1998, 115(2):155-179.

(编辑 荆树蓉)