



几种热泵式海水淡化装置的性能比较研究

周景锋¹, 原郭丰², 张立希², 张鹤飞²

(1中航第一飞机研究院, 西安 710089 2西北工业大学 空调所, 西安 710072)

摘要: 对利用蒸发器和冷凝器作为海水淡化系统的冷、热源的热泵式海水淡化装置, 通过数学建模、实验研究、理论计算和数值模拟等方法, 比较了蒸发式冷凝器、水冷式冷凝器及空冷式冷凝器作为热泵冷凝器时的性能参数和电耗率, 得出采用蒸发式冷凝器的水处理设备不仅热泵系统性能系数 (5.535) 明显提高, 而且海水淡化系统的电耗率 (0.191 W/kg) 明显降低。

关键词: 海水淡化; 热泵; 水处理设备

中图分类号: TQ085.47 文献标识码: A 文章编号: 1009-2455(2006)02-0061-04

Performance comparison between different heat pump-type seawater desalination apparatus

ZHOU Jing-feng¹, YUAN Guo-feng², ZHANG Li-xi², ZHANG He-fei²

(1. The First Aircraft Institute of AVIC-1, Xi'an 710072, China 2. Institute of Air-conditioning Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Evaporator and condenser were used as cold and heat source of seawater desalination system in heat pump-type seawater desalination apparatus. The performance parameters and the power consumption of evaporative condenser, water-cooled condenser, air-cooled condenser when used as heat pump condenser were compared through mathematic modeling, experimental research, theoretic calculation and numerical simulation, the results proved that using evaporative condenser could not only improve the performance coefficient of heat pump (5.535) obviously, but also reduce the energy consumption of seawater desalination system (0.191 W/kg) prominently.

Keywords: seawater desalination; heat pump; water treating equipment

海水的淡化和直接利用作为解决水源危机的重要途径, 日益受到各国重视。本文主要对几种不同形式的热泵式海水淡化系统进行理论计算比较。

1 系统组成和工作原理

1.1 系统组成

热泵式海水淡化装置主要由压缩机、冷凝器 (蒸发式冷凝器、或水冷式冷凝器、或风冷式冷凝器)、蒸发器、高效蒸发器等组成, 如图 1 所示。

1.2 工作原理

该系统在进行海水淡化操作时, 气流方向如图 1 所示。分别采用水冷式冷凝器作为热源对海水进行加热、采用风冷式冷凝器作为热源对空气进行加

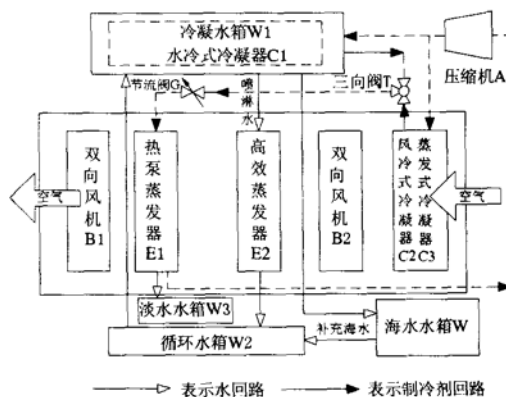


图 1 海水淡化系统流程

Fig. 1 Seawater desalination system flowchart

热或者采用蒸发式冷凝器作为热源对海水进行加热, 同时对空气进行加热加湿; 采用高效蒸发器作



为加湿器对空气进行加湿,采用热泵蒸发器作为冷源对饱和湿空气进行降温除湿。海水喷淋在高效蒸发器表面形成水膜,并与空气进行热湿交换,高温饱和湿空气中的水蒸气在蒸发器表面凝结获得淡水。其中发生的热力过程为空气的加热加湿过程以及饱和湿空气的降温除湿过程。

2 系统数学模型

2.1 高效蒸发器数学模型^[1]

海水质量守恒方程:

$$\partial m_w / \partial \eta + a_m F_e (\omega_s - \omega) = 0 \quad (1)$$

式中: m_w ——海水流量, kg/h;

η ——所选微元体海水的轴向;

a_m ——传质系数, m/s;

F_e ——气液接触面积, m²;

ω , ω_s ——空气的含湿量和饱和空气含湿量, g/kg [干空气]。

海水能量守恒方程:

$$c_w \partial (m_w t_w) / \partial \eta + a_m F_e (h_s - h_a) = 0 \quad (2)$$

式中: c_w ——海水的比热, kJ/(kg·°C);

t_w ——海水温度, °C;

h_a , h_s ——湿空气的焓和饱和空气的焓, kJ/kg [干空气]。

空气质量守恒方程:

$$m_a \partial \omega / \partial \xi = a_m F_e (\omega_s - \omega) \quad (3)$$

式中: m_a ——空气流量, kg/h;

ξ ——所选微元体空气的轴向。

空气能量守恒方程:

$$m_a \partial h_a / \partial \xi = a_m F_e (h_s - h_a) \quad (4)$$

2.2 风冷式冷凝器数学模型

单位时间内热泵的制热量

$$Q_h = \varepsilon_h W_e \quad (5)$$

式中: Q_h ——热泵制热量, W;

ε_h ——制热系数;

W_e ——压缩机功率, W。

单位时间内空气带走的热量 (忽略热量散失)

$$Q_a^i = m_a (h_{aout}^i - h_{ain}^i) \quad i = 1, 2, \dots \quad (6)$$

式中: Q_a^i ——第 i 步长时间内空气带走的热量, W;

h_{ain}^i , h_{aout}^i ——第 i 个时间段进出口空气的焓值, kJ/kg [干空气]。

单位时间内空气能量平衡方程 (忽略热量散失)

$$Q_h = Q_a^i + m_a c_p (t_i^i - t_i^{i-1}) \quad i = 1, 2, \dots \quad (7)$$

式中: c_p ——空气的比热, kJ/(kg·°C);

$t_i^i - t_i^{i-1}$ ——第 i 个时间段空气的温度变化量, °C。

i ——步长。

风冷式冷凝器的空气的温度:

$$t_i^i = t_i^{i-1} + (Q_h - Q_a^i) / (m_a \cdot c_p)$$

2.3 水冷式冷凝器数学模型

单位时间内热泵的制热量:

$$Q_h = \varepsilon_h W_e \quad (8)$$

单位时间内空气带走的海水热量:

$$Q_{aw}^i = m_a (h_{awout}^i - h_{awin}^i) \quad i = 1, 2, \dots \quad (9)$$

式中: Q_{aw}^i ——第 i 步长时间内空气带走的热量 (海水和空气之间的热交换量), W;

h_{awin}^i , h_{awout}^i ——第 i 步长时间内高效蒸发器进出口的空气焓值, kJ/kg [干空气]。

单位时间内海水能量平衡方程 (忽略热量散失)

$$Q_h = Q_{aw}^i + m_w c_w (t_w^i - t_w^{i-1}) \quad i = 1, 2, \dots \quad (10)$$

式中: $t_w^i - t_w^{i-1}$ ——第 i 个时间段喷淋海水的温度变化量, °C。

水冷式冷凝器的海水温度:

$$t_w^i = t_w^{i-1} + (Q_h - Q_{aw}^i) / (m_w \cdot c_w)$$

2.4 蒸发式冷凝器数学模型^[2]

假设 $F_e' = \varepsilon F_e$, 则有:

空气质量守恒方程:

$$m_a \partial \omega / \partial \eta = a_m F_e' (\omega_s - \omega) \quad (11)$$

式中: F_e' ——气液接触面积, m²。

空气能量守恒方程:

$$m_a \partial h_a / \partial \eta = a_m F_e' (h_s - h_a) \quad (12)$$

海水质量守恒方程:

$$\partial m_w / \partial \eta = -a_m F_e' (\omega_s - \omega) \quad (13)$$

海水能量守恒方程:

$$c_w \partial (m_w t_w) / \partial \eta = F_e q_h - a_m F_e' (h_s - h_a) \quad (14)$$

式中: q_h ——单位面积的热量, W/m²。

2.5 热泵蒸发器数学模型

单位时间内的制冷量:

$$Q_c = \varepsilon_c W_e \quad (15)$$

式中: Q_c ——热泵制冷量, W;

ε_c ——制冷系数。

在蒸发器前后, 空气的能量守恒方程:

$$Q_c = m_a (H_{ach}^i - H_{acout}^i) \quad (16)$$

式中: H_{ach}^i , H_{acout}^i ——第 i 步长时间内热泵蒸发器进出口的湿空气焓值, kJ/kg [干空气]。

蒸发器出口的湿空气焓值:



$$H_{\text{acout}}^i = Q_c \cdot m_a - H_{\text{acin}}^i$$

热泵蒸发器淡水产量:

$$M_{\text{fw}}^i = m_a (\omega_{\text{acin}}^i - \omega_{\text{acout}}^i) \quad (17)$$

式中: ω_{acin}^i , ω_{acout}^i ——第 i 步长时间段时蒸发器进出口空气的含湿量, g/kg [干空气]。

M_{fw}^i ——第 i 步长时间段时蒸发器表面凝结下来的淡水量, kg

3 数值模拟和实验分析

根据系统数学模型, 给定参数, 压缩机选用涡旋式压缩机 (额定功率 450 W)、制冷剂采用 R22、环境温度为 25℃ 和海水温度为 20℃, 风机功率为 30 W, 可以对热泵蒸发器、热泵冷凝器和整个海水淡化系统进行性能分析, 并得到各参数对系统性能变化的影响。对以下 4 种形式的海水淡化系统进行了数值模拟, 即: ① 水冷式冷凝器作为热源; ② 风冷式冷凝器作为热源; ③ 蒸发式冷凝器作为热源; ④ 蒸发式冷凝器与高效蒸发器的结合。

计算结果和实验结果比较如图 2 至图 6 所示。在分析某一参数对淡水产量的影响时, 保持其它参数不变。

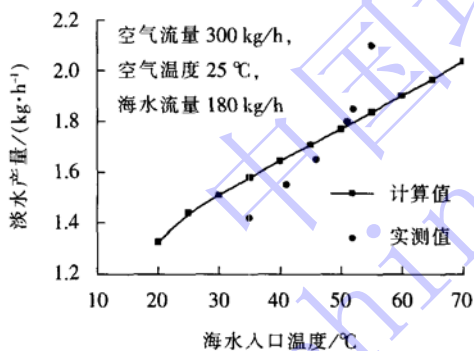


图 2 海水温度与淡水产量的关系

Fig. 2 Effect of seawater temperature on fresh water production

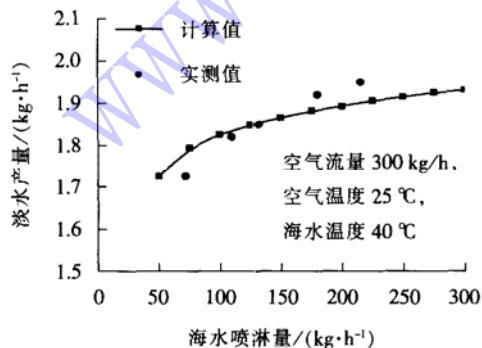


图 3 海水喷淋量与淡水产量的关系

Fig. 3 Effect of seawater flow rate on fresh water production

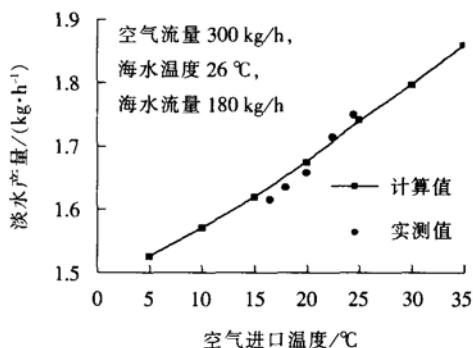


图 4 空气温度与淡水产量的关系

Fig. 4 Effect of air temperature on fresh water production

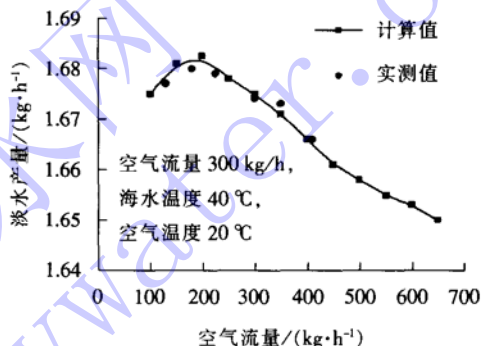


图 5 空气流量与淡水产量的关系

Fig. 5 Effect of air flow rate on fresh water production

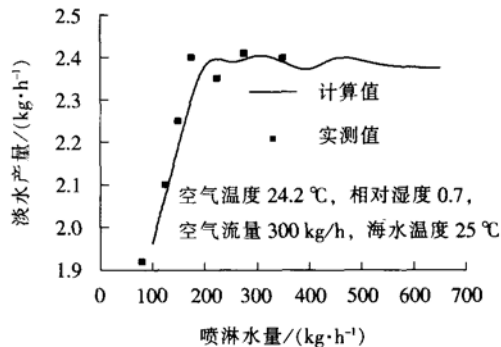


图 6 喷淋水量与淡水产量之间的关系

Fig. 6 Effect of seawater flow rate on fresh water production

图 2、图 3 为水冷式冷凝器系统的参数变化对淡水产量影响的实验值和模拟结果的比较。图 4、图 5 为风冷式冷凝器系统的参数变化对淡水产量影响的实验值和模拟结果的比较。图 6 为蒸发式冷凝器系统的参数变化对淡水产量影响的实验值和模拟结果的比较。由图可知, 实验结果和计算模拟结果基本一致。说明计算机分析程序基本可以反映各个参数变化对系统性能的影响情况。表 1 就 4 种形式的热泵性能系数和电耗率进行了比较。

表 1 4种形式的热泵性能系数和电耗率比较^③
Tab 1 Performance coefficient and energy consumption ratio of four-type heat pump

项目名称	风冷式冷凝器+高效蒸发器	水冷式冷凝器+高效蒸发器	蒸发式冷凝器	蒸发式冷凝器+高效蒸发器
冷凝温度/℃	50	40	35	35
制冷系数 (max)	3.378	4.214	5.091	5.091
热泵系数 (max)	4.378	5.214	6.091	6.091
有效利用系数	0.6	0.6	0.6	0.6
水泵功率/W	15	15×2	15	15×2
制冷 (制热)量/W	1 520 (1 963)	1 896 (2 341)	2 290 (2 740)	2 290 (2 740)
热泵性能系数	3.070 (3.965)	3.717 (4.590)	4.626 (5.535)	4.626 (5.535)
淡水产量/kg	1.459	1.838	2.358	2.365
电耗率/(W·kg ⁻¹)	0.339	0.277	0.191	0.228

注：热泵性能系数中的 2 个数据分别对应制冷 (制热) 量。

4 结论

通过 4 种热泵式海水淡化系统的热泵性能系数 COP 及电耗率 (衡量热泵式海水淡化装置优劣的指标) 的比较, 可以发现以蒸发式冷凝器作为海水淡化系统的热源效果最佳, 其热泵性能系数要明显高于其它两种形式, 电耗率也要小许多。这种热泵作为新型家用海水淡化系统, 从技术上讲是可行的, 在改善系统工作环境方面以及提高系统性能方面都有着明显的优势。

参考文献:

[1] 李增耀. 新型太阳能海水淡化装置的研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 1997.
[2] 周景锋. 基于蒸发式冷凝器的热泵式海水淡化技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
[3] 张祉祐. 制冷原理与设备 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987.

作者简介: 周景锋 (1978—), 男, 陕西户县人, 助理工程师主要研究制冷空调系统和环境控制系统, (电话) 029-86832764 (电子邮箱) jingfeng_zhou@163.com.

• 信息与动态 •

外排污水适度处理回用技术在炼化企业节水减排工作中发挥作用

石油化工科学研究院在 2000 年和 2002 年开发成功的炼化企业达标外排污水适度处理回用循环水成套技术, 在先后 18 套循环水系统成功应用中, 显示出良好效果:

节水减排效果显著。炼化达标外排污水经适度处理后, 再采用先进的水质稳定技术使其回用循环水系统, 企业可降低 35% 左右的总取水, 减少约 70% 以上的总排污, 如湛江东兴炼油厂采用该技术后, 外排污水全部回用于循环水系统, 使加工吨原油取水和排污分别降低到 0.51 t 和 0.1 t; 镇海炼油厂循环水系统全部采用外排污水, 使加工吨原油取水和排污分别降低到 0.36 t 和 0.09 t, 优于国际先进水平的 0.5 t 和 0.2 t。

运行稳定、处理效果好。达标外排污水经适度处理回用技术在湛江东兴炼油厂 5 年多的运行, 镇海炼化 3 年多的运行结果表明, 外排污水适度处理回用循环水系统后, 腐蚀速率、粘附速率和细菌总数等主要技术指标均优于中国石化使用新鲜水的考核要求。

投资少、运行费用低。达标外排污水适度处理回用循环水技术的工程投资和回用吨污水运行费用仅为外排污水深度处理技术的 20%。

操作简单、管理方便。达标外排污水适度处理回用技术的流程短, 与使用新水相比, 只增加杀菌和过滤两步, 易于操作和管理。