

NaCl 溶液闪蒸效率特性数值研究

王为术, 闫 广, 李帅帅

(华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 盐水闪蒸技术广泛应用于海水淡化及海洋温差能发电, 含盐质量分数、给盐液温度和闪蒸压力对闪蒸汽化率和热效率有很大影响。在质量分数为 3.5%~20%、给盐液温度为 30~95℃和闪蒸压力为 1~30 kPa 的范围内, 对 NaCl 溶液闪蒸汽化率和热效率等闪蒸效率特性进行了定量计算研究, 研究得到了盐水含盐质量分数、给盐液温度和闪蒸压力对闪蒸汽化率以及热效率影响的规律。结果表明, 降低含盐质量分数, 提高给盐液温度, 降低闪蒸压力可提高闪蒸汽化率与热效率; 含盐质量分数越高, 造成的热损失越大, 而提高给盐液温度会增大热损失。

关键词: 海洋温差能; 海水淡化; 闪蒸效率; 热效率

中图分类号: P747+.11

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)10-0068-05

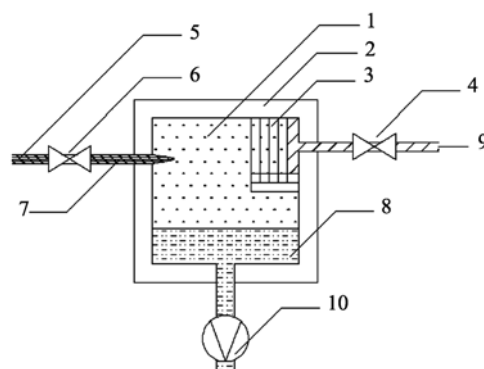
海洋面积占地球面积的 71%, 占地球总水量的 97%, 蕴含巨大能量及水资源, 海洋温差能有很好的经济和环保效益^[1], 而海水淡化是解决人类水资源困境最现实的方法^[2]。盐水闪蒸工艺在海洋温差能利用和海水淡化技术中至关重要, 盐水闪蒸是将盐溶液排向低压空间, 因压力突降盐溶液达到过饱和而发生水快速蒸发, 盐水闪蒸的主要产物为低压水蒸气和浓缩盐水。显然盐水闪蒸效率决定海洋温差发电和海水淡化工艺技术的先进性和经济性。

目前, 针对盐水闪蒸的研究主要集中在盐溶液物性参数、工艺流程、闪蒸系统设计和盐水综合利用评价等方面。Bendaoud^[3]设计了核能海水淡化闪蒸蒸发系统, 刘振华^[4]和吴静波^[5]研究了盐水换热器强化换热特性, 为海水淡化和余热综合技术提供了实验数据, 邓润亚^[6]、沈胜强^[7]、阿迪尔^[8]等对海水淡化系统的能量转化过程进行了定量分析, 张宁^[9]、崔树军^[10]和王战军^[11]主要讨论了海水淡化方案和经济性比较。盐水闪蒸效率可用盐水闪蒸汽化率和热效率来衡量。海水中, Na 盐超过 75%, 笔者针对 NaCl 溶液闪蒸效率的特性, 计算分析了盐溶液质量分数、给盐液温度和闪蒸压力对闪蒸汽化率和热效率的影响规律, 研究结果对盐水闪蒸优化设计和经济运行有指导意义。

1 NaCl 溶液闪蒸的计算方法

典型的闪蒸器结构如图 1 所示, 盐水由给水管 5, 经阀门 6 进入闪蒸室 1, 低压蒸汽经由阀门 4 进入

凝结装置。



1. 闪蒸室; 2. 闪蒸发器壁; 3. 分隔栅; 4. 蒸汽阀; 5. 给水管; 6. 节流阀; 7. 闪蒸原溶液; 8. 闪蒸余液; 9. 闪蒸蒸汽; 10. 泵

1. flash chamber; 2. wall of flash evaporator; 3. separation gate; 4. steam valve; 5. feed pipe; 6. throttling valve; 7. original solution; 8. remnant solution; 9. steam of flash evaporation; 10. pump

图 1 闪蒸器结构简图

Fig. 1 Structure sketch of the flash evaporator

相同压力下, 盐溶液的沸点(饱和温度)高于水的沸点, 两者的沸点之差称为溶液的沸点升高, 盐溶液沸点升高的数值随溶液的质量分数及蒸发器中

收稿日期: 2011-09-20; 修回日期: 2011-12-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAA05B03); 河南省高校骨干教师资助计划(2009GGJS-062)

作者简介: 王为术(1972-), 男, 四川省万县人, 硕士生导师, 主要研究方向: 多相流传热, 热工水力, 低质热发电, Email: wang-weishu@ncwu.edu.cn

溶液的液柱高度而变, 质量分数越高, 液柱越高, 沸点升高数值也越大。在闪蒸器中, 盐溶液在闪蒸室上部喷淋, 不存在液柱高度对沸点的影响。

水的物性由美国国家标准和技术协会开发的 Refprop 软件计算, NaCl 溶液的比热由 Coolpack 软件计算。根据文献[12]提供的数据拟合出 NaCl 溶液在标准大气压下的沸点升高与 NaCl 溶液质量分数的关系式(1):

$$\theta = 16.39c + 30.58c^2 - 11.74c^3 \quad (1)$$

式中: c 为溶液中 NaCl 占溶液总质量的百分数, 以下简称质量分数; θ 为 NaCl 溶液在标准大气压下的沸点升高。式(1)计算值与实验数据误差不超过 $\pm 1\%$ 。

其他压力下的 NaCl 溶液沸点升高由吉辛科式计算^[12]:

$$\theta' = f\theta \quad (2)$$

$$f = 0.0162(T' + 273)^2 / r^2 \quad (3)$$

式中 θ' 为所求压力下的沸点升高; θ 为标准大气压下的溶液沸点升高, f 为校正系数, T' 为所求压力下饱和蒸汽温度, r 为所求压力下水的汽化潜热, kJ/kg。

闪蒸汽化率定义为单位质量溶液经闪蒸得到的蒸汽质量。根据能量守恒定律推导闪蒸过程的能量方程为:

$$h_0 = (1-x)h_1 + xh_2 \quad (4)$$

据此可得闪蒸汽化率 x :

$$x = (h_0 - h_1) / (h_2 - h_1) \quad (5)$$

式中, h_0 为原溶液的比焓, kJ/kg; h_1 为闪蒸排液比焓, kJ/kg; h_2 为闪蒸蒸汽比焓, kJ/kg。

闪蒸热效率 η 定义为闪蒸蒸汽焓与原溶液比焓的比值, 则热效率的计算式:

$$\eta = xh_2 / h_0 \quad (6)$$

2 计算结果分析

2.1 NaCl 溶液闪蒸汽化率特性分析

NaCl 溶液质量分数对溶液闪蒸汽化率和热效率存在较大影响, 其主要原因是 NaCl 溶液的沸点升高和比热降低, 沸点升高致使传热温差降低和闪蒸热量损失, 图 2 给出了不同质量分数不同压力下的沸点升高。分析图可见, 在相同压力下 NaCl 溶液沸点升高随质量分数升高而增大, 特别是 NaCl 溶液质量分数在 10%~20% 范围内, 其沸点升高随质量分数

显著升高; 相同质量分数下, 压力越高沸点升高值越大。

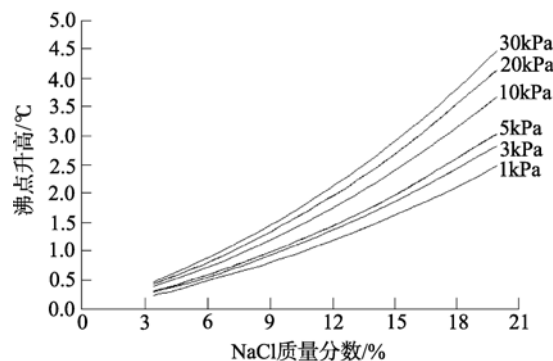


图 2 NaCl 质量分数与溶液沸点升高的关系

Fig. 2 The boiling point elevation of NaCl solution

NaCl 溶液沸点升高会导致闪蒸汽化率的下降, 图 3 给出了 4 kPa 压力下不同给水温度不同质量分数 NaCl 溶液的闪蒸汽化率。分析图可见, 闪蒸汽化率随质量分数升高而降低, 给水温度越高, 闪蒸汽化率越高, 且汽化率与给盐水温呈线性关系。因此, 如何提高闪蒸器进口海水温度是提高海水闪蒸淡化技术经济性的关键。

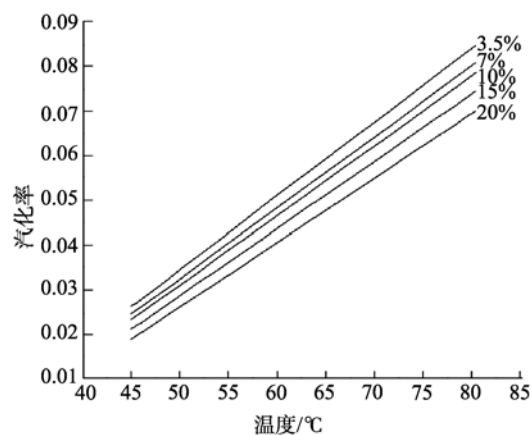


图 3 质量分数与给盐液温度对闪蒸汽化率的影响

Fig. 3 The influences of mass fraction and feed salt solution temperature to the flash evaporation rate

压力是溶液饱和温度的决定因素, 对闪蒸汽化率有很大影响, 图 4 给出了不同给盐液温度, 7%NaCl 溶液在 1~30 kPa 闪蒸压力下的汽化率。分析图可见, 随着闪蒸压力的升高, 闪蒸汽化率迅速下降。因此, 在闪蒸、多级闪蒸海水淡化机组运行中, 负压的建立与维持是保证海水淡化顺利进行的關鍵。

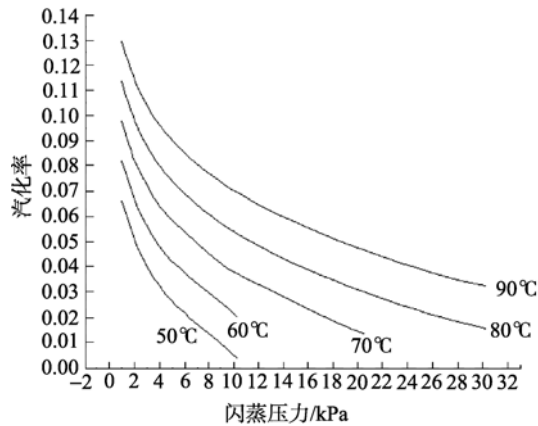


图4 闪蒸压力与给水温度对汽化率的影响

Fig. 4 The influences of flash evaporation pressure and feed salt solution temperature to the flash evaporation rate

2.2 NaCl 溶液闪蒸热效率特性分析

提高闪蒸器入口海水温度可提高闪蒸汽化率,从而提高了闪蒸的热效率。开式海洋温差发电的热源为海洋表面的热海水,温度约 30℃,其闪蒸汽化率为 0.12%,热效率为 2.5%,当将入口水温提高至 70℃时,热效率升高至 61.06%,图 5 为 4kPa 闪蒸压力下各质量分数 NaCl 溶液的闪蒸热效率。分析图可见,随着给盐液温度的升高,热效率升高明显,低质量分数溶液闪蒸热效率较高,超过 60℃,各质量分数 NaCl 溶液的闪蒸热效率趋于相同。因此,提高闪蒸器进口海水温度以扩大温差是海洋温差发电能否实现商业化大规模应用的关键。

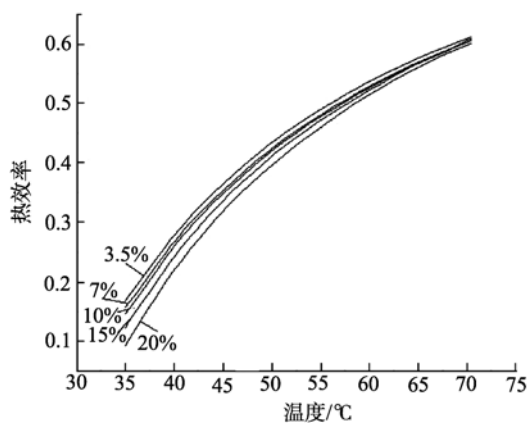


图5 质量分数与给盐液温度对热效率的影响

Fig. 5 The influences of mass fraction and feed salt solution temperature to the thermal efficiency

图 6 给出了 50~90℃, 7%NaCl 溶液在 1~30 kPa

闪蒸压力下的热效率。分析图可见,随着闪蒸压力的升高,闪蒸热效率迅速下降,在相同的闪蒸压力下提高给水温度,闪蒸热效率有明显的提高。开式海洋温差发电机组的蒸汽压力越低,则设备越庞大,造价越高昂,降低机组的经济性和可行性,所以存在最佳压力,一般取 4 kPa 为开式海洋温差发电的运行压力。

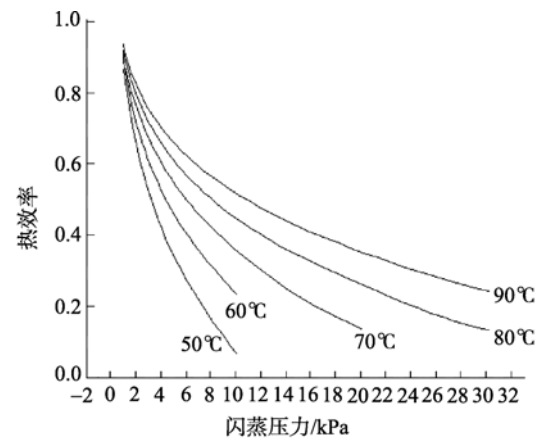


图6 闪蒸压力与给盐液温度对热效率的影响

Fig. 6 The influences of flash evaporation pressure and feed salt solution temperature to the thermal efficiency

2.3 NaCl 溶液闪蒸系统热损失分析

由图 3 和图 5 可知, NaCl 溶液质量分数升高对闪蒸效率存在不良影响。图 7 比较了 4 kPa 压力下 1kg 水与不同质量分数 NaCl 溶液经闪蒸得到的蒸汽焓。

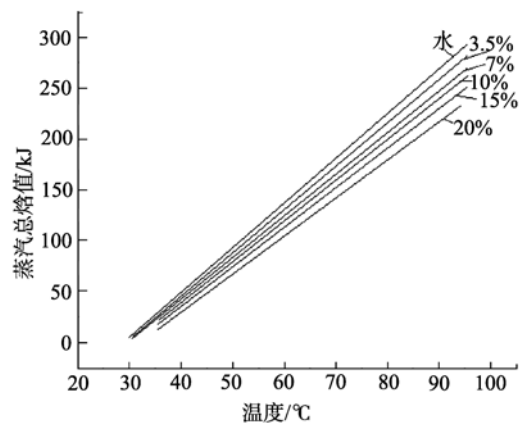


图7 闪蒸蒸汽焓

Fig. 7 The enthalpy of flash evaporation steam

闪蒸热损失 Q_{lose} 定义为 1kg 水与盐溶液在相同的入口温度与闪蒸压力下得到的闪蒸蒸汽焓值之差,

kJ/kg:

$$Q_{\text{lose}} = x_w h_w - x_s h_s \quad (7)$$

h_w 、 h_s 为相同入口温度水与 NaCl 溶液的比焓,
 x_w 、 x_s 为同工况下水与 NaCl 溶液的闪蒸汽化率。

图 8 给出了 4 kPa 压力下不同入口温度不同质量分数 NaCl 溶液的闪蒸热损失。分析图可见, 相同给盐液温度下, 热损失随着质量分数的增加而增大; 相同质量分数溶液闪蒸热损失随给水温度升高而增大。

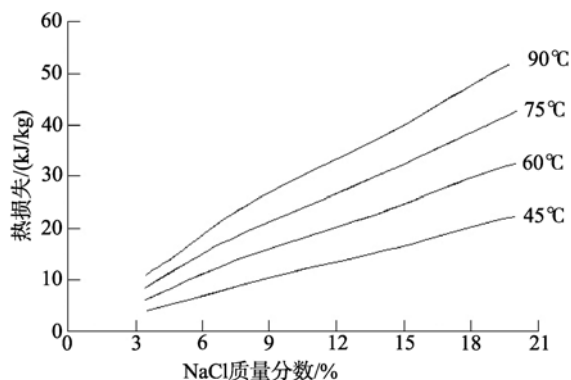


图 8 热损失

Fig. 8 The thermal loss

3 结论

通过对 NaCl 溶液闪蒸效率特性计算与研究, 可以得到以下结论:

(1) 质量分数、给盐液温度与闪蒸压力是闪蒸汽化率的决定因素。保持较低的质量分数, 提高给盐液温度, 维持较低的闪蒸压力可保证较高的盐水闪蒸汽化率。

(2) 质量分数、给盐液温度与闪蒸压力是闪蒸热效率的决定因素。质量分数越低, 给盐液温度越高, 闪蒸压力越低则闪蒸热效率越高。

(3) 闪蒸热损失随质量分数和给盐液温度的提高而增大。

参考文献:

- [1] 王迅, 李赫, 谷琳. 海水温差能发电的经济和环保效益[J]. 海洋科学, 2008, 32(11): 84-87.
- [2] 范迪, 王娟, 迟宏. 海水资源开发及综合利用浅析[J]. 海洋科学, 2008, 32(3): 91-95.
- [3] Ali Bendaoud, 张达芳, 郑文祥. 用于海水淡化堆的闪蒸器蒸汽发生系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(8): 1035-1037.
- [4] 刘振华, 秋雨豪. 紧凑型滚压强化管束内水和盐水的沸腾强化换热特性[J]. 上海交通大学学报. 2004, 38(10): 1627-1630.
- [5] 吴静波. 低压下浓盐水沸腾及强化传热的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [6] 邓润亚. 海水淡化系统能量综合利用与经济性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2009.
- [7] 沈胜强, 张会, 刘晓华. 低温多效蒸发海水淡化装置的计算分析[J]. 节能, 2005, 6: 10-13.
- [8] 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]. 浙江工业大学学报(工业版), 1999, 33(6): 650-653.
- [9] 张宁, 苏营营, 苏华, 等. 海水淡化中浓海水的综合利用研究[J]. 海洋科学, 2008, 32(6): 85-88.
- [10] 崔树军, 韩慧茹, 邓会宁, 等. 海水淡化副产浓海水综合利用方案的探讨[J]. 盐业与化工, 2008, 1: 36-42.
- [11] 王战军, 高宏, 王海伦, 等. 空间蒸发技术在海水淡化中的应用研究[J]. 海洋工程, 2005, 23(1): 103-106.
- [12] 天津大学化工原理教研室. 化工原理(上) [M]. 第二版. 天津: 天津科学技术出版社, 1987: 1-451.

Numerical study on the characteristics of flash evaporation efficiency of NaCl solution

WANG Wei-shu, YAN Guang, LI Shuai-shuai

(North China Institute of water conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

Received: Sep., 20, 2011

Key words: Ocean thermal energy; Desalination of seawater; Flash evaporation rate; Thermal efficiency

Abstract: Flash evaporation technology is widely used in desalination of seawater and ocean thermal power generation. Mass fraction of solution, feed salt solution temperature and flash evaporation pressure have great influence on the flash evaporation rate and thermal efficiency. Within the range of salt mass fraction from 3.5% to 20%, feed salt solution temperature from 30°C to 95°C, and flash evaporation pressure from 1 to 30 kPa, flash evaporation efficiency characteristics of flash evaporation rate and thermal efficiency were calculated and analyzed. The influences of salt mass fraction, feed salt solution temperature and flash evaporation pressure on the efficiency characteristics were discussed. The results showed that the flash evaporation rate and thermal efficiency were increased with the decrease of salt mass fraction. The flash evaporation rate and thermal efficiency were increased with the increase of feed salt solution temperature. However, the decrease of flash evaporation pressure can increase the flash evaporation rate and thermal efficiency. Salt mass fraction and thermal loss were increased with the increase of feed salt solution temperature.

(本文编辑: 康亦兼)