

编者按: 水是人类生存的基础, 淡水资源是一种稀有物质, 海水淡化是解决淡水不能满足人类需求的重要途径。本期发表海水淡化—压汽闪蒸法的技术, 旨在为人类寻找一种利用海水的方法。该技术的发表, 希望引起工程技术人员的关注, 并使该技术在科技工程中得到推广和利用, 同时, 也欢迎对该技术进行讨论, 力求做到百家争鸣, 百花齐放。

压汽闪蒸法海水淡化装置的热力学分析

俞乔力¹, 金从卓^{1,2}, 束鹏程²

(1. 合肥天鹅制冷科技有限公司, 安徽 合肥 230088 2 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 压汽闪蒸法海水淡化装置是实现海水淡化方法的最优技术整合: 提供一种由热效率较高的压汽法, 来驱动产品水质较好的闪蒸法, 这样一种全新、集成的海水淡化工艺; 并兼具投资成本最低、独立闪蒸操作、模块化组合生产等主要技术优势。由于集成技术的成熟而全面, 装置运行安全而可靠, 必将以卓越的技术、良好的经济性, 逐步取代现有各种方法。对压汽闪蒸法海水淡化装置进行了热力学分析, 为进一步开展研究工作奠定了基础。

关键词: 压汽; 闪蒸; 海水淡化; 装置

中图分类号: P747 TU995 文献标识码: B

引言

目前, 占据国际市场主导地位的 4 种海水淡化方法中, 多效蒸馏法和压汽蒸馏法的市场拥有率分别为 4%, 其产品水质均达饮用标准; 而相比之下, 因无蒸馏引发结垢问题的多级闪蒸法和反渗透法, 其市场拥有率就分别高达 41%, 因此结垢问题已成为制约蒸馏法海水淡化装置普及应用的首要矛盾。反渗透法的初投资和造水成本虽然最低, 但其产品水质的不稳定性, 使其难以持续满足饮用标准, 故而应用多局限在工业冷却循环。而多级闪蒸法的产品水质虽然达饮用标准, 但其初投资和造水成本太高, 热效率太低, 也限制其进一步普及应用。因此在现有海水淡化方法中, 同时规避开路热焓过程中二次蒸汽的凝结潜热损失问题、蒸馏法的结垢与腐蚀问题和海水前处理与产品水质不稳定问题, 以进行最优技术整合, 将成为开发新一代海水淡化装置的发展趋势。

1 压汽闪蒸法的提出和工艺流程

本研究提出一种由热效率最高的压汽法, 来驱动产品水质较好的闪蒸法, 这样一种全新、集成的压汽闪蒸法海水淡化工艺, 其工艺流程如图 1 所示。

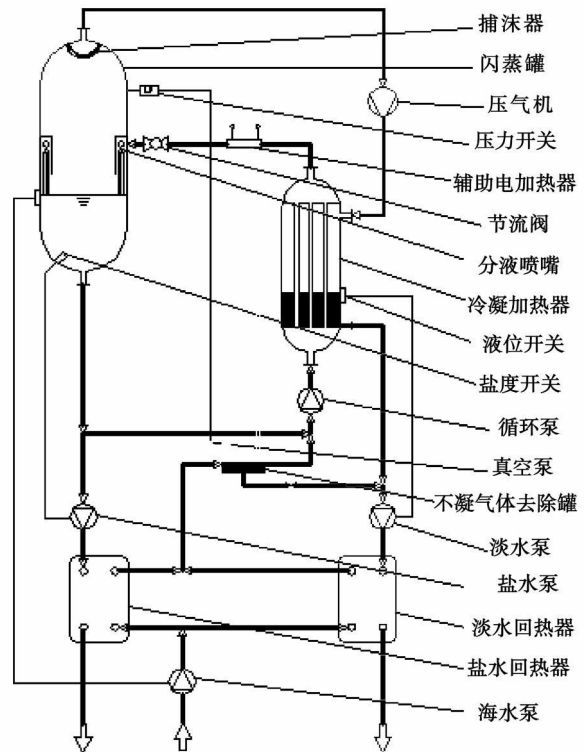


图 1 压汽闪蒸法海水淡化装置

1.1 预热循环盐水

预热闪蒸罐中的循环盐水, 以达节流前盐水温

收稿日期: 2009-06-30 修订日期: 2009-11-13

作者简介: 俞乔力 (1963-) 男, 满族, 辽宁大连人, 合肥天鹅制冷科技有限公司研究员, 博士后。

度 99.2 °C;

1.2 循环盐水以降温显热提供闪蒸潜热

开启压汽机使闪蒸罐降压, 循环盐水经节流后降温到闪蒸后盐水温度 97 °C, 以显热作为水的闪蒸潜热, 生成 96 °C 二次蒸汽。

1.3 循环盐水回收凝结潜热

二次蒸汽被压汽机压缩 13.419 kPa 后升温到 109.6 °C 过热蒸汽, 然后流进冷凝加热器的冷凝侧, 在 100 °C 凝结温度下等压释放潜热, 并成为质量浓度 2 mg/L, 100 °C 的纯净淡水, 由淡水泵取用; 同时闪蒸罐中的循环盐水由循环泵驱动, 流经冷凝加热器的加热侧, 回收蒸汽过热显热、凝结潜热后, 从 97 °C 重新加热到 99.2 °C; 最后经节流阀进入闪蒸罐内再次循环闪蒸。

1.4 补充海水回收淡水及盐水显热

20 °C、质量浓度 34 500 mg/L 的补充海水流经并联的淡水回热器和盐水回热器的海水侧, 回收淡水及盐水显热; 再流经不凝气体去除罐的海水侧, 回收不凝气体所含水蒸气的凝结潜热; 最后经汇流三通与循环盐水混合, 重新注入循环泵进口。

综上所述: 压汽闪蒸法仅需外界输入 9 kJ/kg 轴功, 稍加压缩从节流盐水中闪蒸而出的二次蒸汽, 以提高其压力、温度、热焓后, 再输入到冷凝加热器的冷凝侧, 作为加热蒸汽使用, 便可重复利用 2 244 kJ/kg 汽化潜热; 由于构成闭路二次蒸汽潜热循环, 就使装置在稳定运行时的驱动能耗降到最低, 其中二次蒸汽的压缩功恰好补偿取用淡水和排放盐水带走的部分显热以及装置热损, 从而实现独立的闪蒸操作; 同时补充海水还充分回收淡水和盐水中的排放显热及不凝气体所含水蒸气的凝结潜热, 以使热效率进一步提高。

2 压汽闪蒸法的热力学分析

2.1 定义

闪蒸—闪急蒸馏的简称. 循环盐水在高压下加热到一定温度后, 经节流而引入压力低于该盐水温度所对应饱和水蒸气压力的闪蒸罐内, 以使盐水成为过热水而降低自身温度, 提供的显热让部分水以绝热方式急速气化, 所产生的二次蒸汽再引入冷凝器中凝结为淡水, 同时回收全部冷凝热, 用于预热循环盐水。

海水—未经闪蒸工艺流程处理的天然海水。

盐水—已经闪蒸工艺流程处理后的浓缩海水。

淡水—经工艺流程中闪蒸出二次蒸汽及其冷凝过程而获得符合标准的饮用水。

2.2 概念集成

蒸馏法的缺点是由于盐水在加热壁面蒸发所导致的壁面结垢问题, 需经常清洗并采用严格的防垢措施, 而闪蒸法正是为解决蒸馏法结垢问题而发展起来的技术。由于盐水不在加热壁面蒸发, 因此结垢慢且易清洗、操作更可靠、易于大型化、操作弹性大及可利用低位热能, 从而成为海水淡化中的领先技术, 因此, 该技术一经问世就很快得到发展, 广泛应用于海水淡化、电厂锅炉给水、工业废水和矿井苦咸水的处理与回收, 以及印染工业、造纸工业废碱液的回收等。所以, 采用热效率较高的压汽法, 来驱动产品水质较好的闪蒸法, 以集成一种全新、最优的压汽闪蒸法海水淡化工艺, 使其兼具投资成本最低、独立闪蒸操作、模块化组合生产等众多技术优势。

2.3 压汽闪蒸法流程的热力学描述

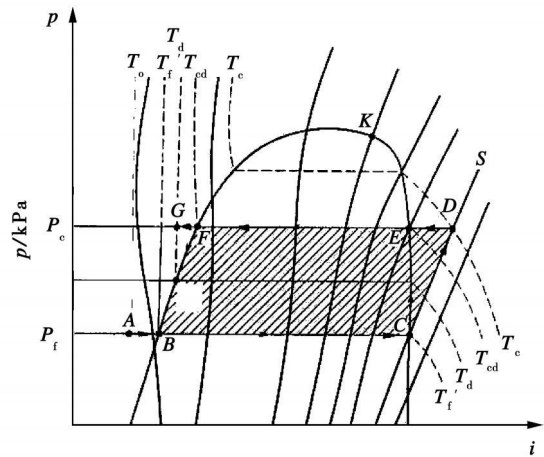


图 2 压汽闪蒸法流程 P—i 曲线
A—海水; P_f, T_0 ; B—闪蒸罐饱和水; P_f, T_f ; C—闪蒸罐饱和水蒸气; P_f, T_f' ; D—压缩后过热蒸汽; P_e, T_g ; E—冷凝加热器饱和水蒸气; P_e, T_{ef} ; F—冷凝加热器饱和水; P_e, T_{ef} ; G—冷凝加热器过冷水; P_e, T_d

如图 2 所示, 由海水泵加压到压力 P_h 环境温度 T_0 的海水 A 在流经并联的淡水回热器和盐水回热器时, 回收其排放显热, 流经串联的不凝气体去除罐时, 回收真空泵所抽水蒸气所排放的凝结潜热, 海水两级预热而升温后, 在自动排气阀中排放不凝气体, 然后与循环盐水混合, 流经循环泵、冷凝加热器和辅助电加热器, 以回收加压蒸汽的过热显热、凝结潜热及经电加热后, 而升温到 T_g 然后经节流而在闪蒸罐内因过热而闪蒸出饱和二次蒸汽 C 其对应饱和水 B 其中的二次蒸汽 C 经压气机绝热压缩到

过热蒸汽 D后, 流经冷凝加热器, 释放蒸汽过热显热给循环盐水后成为饱和水蒸气 E 释放凝结潜热给循环盐水后成为饱和水 F 释放凝结水过冷显热给循环盐水后成为过冷水 G 如此完成压汽闪蒸法的闭路二次蒸汽潜热循环。

2.4 闭路二次蒸汽潜热循环

如图 1 所示, 循环盐水节流后因过热而在闪蒸罐中闪蒸出的二次蒸汽具有很高热焓, 直接冷凝必然导致装置需另取外部高品位热源, 而为保持装置的热量平衡, 又需向环境排放与取热等值的低品位热焓。因此依照气体绝热压缩过程中温度升高的热力学原理, 通过压气机来同时提高二次蒸汽的压力、温度和热焓后, 就可作为加热蒸汽而送至冷凝加热器中, 以在凝结成淡水的同时, 其潜热也全部回收用于加热另一侧的循环盐水, 以使其温度重新升高, 以备再次循环节流。循环盐水由于回热而升温, 通过节流、过热而闪蒸出二次蒸汽, 而二次蒸汽又经压缩和凝结使循环盐水重新回热, 如此循环往复就构成压汽闪蒸法的闪蒸—压缩—凝结—加热—闪蒸: 闭路二次蒸汽潜热循环。通过该循环可使装置仅需补充少量压汽功耗, 就可重复利用二次蒸汽的高热焓, 装置既无需补充外部热量, 也无需排放内部热焓; 而所需的压缩比则取决于冷凝加热器中的传热温差, 与节流过程的闪蒸温差之和。

2.5 补充海水的显热回热

补充海水经预处理后经分流三通, 送至两台并联的淡水回热器和盐水回热器的海水侧, 被另一侧高温的取用淡水和排放盐水的显热所分别预热, 再经汇流三通相互混合, 然后流经不凝气体去除罐的海水侧, 被另一侧真空泵所抽不凝气体中, 水蒸气的凝结潜热继续预热, 经显热、潜热两级预热而升温, 有助于补充海水在自动排气阀中释放、富集并排出不凝气体; 然后经汇流三通与循环盐水相混合, 注入循环泵进口。

2.6 压汽闪蒸法的热流分布

常压下且压缩比 1.15 时, 依据对压汽闪蒸法海水淡化工艺装置的能量平衡分析, 得出其热流分布如图 3 所示, 从图中可以看出:

- (1) 把二次蒸汽凝结潜热回用的冷凝加热器, 其换热量定义为 100%;
- (2) 所选压气机功耗 W 为 7.7%, 假定热效率 39%, 则装置的输入热功为 3.0%, 未输入装置的能量为 4.7%;
- (3) 电加热 E 补入装置的热量为 0.1%;

(4) 由淡水回热器的换热量, 查得淡水显热回热量 9.52%, 而排出装置的淡水显热 0.63%;

(5) 由盐水回热器的换热量, 查得盐水显热回热量 9.52%, 而排出装置的盐水显热 0.63%;

(6) 随补充海水而进入装置的海水显热为 0.01%;

(7) 排出装置的热损为 2.8%;

(8) 随不凝气体而排出装置的气体显热为 0.04%。

根据图 3 的压汽闪蒸法热流分布情况, 同时验证了由提高了压力和温度的二次蒸汽, 替代装置所需补充的外部高品位热能, 将使装置在能量平衡时, 无须再向环境排放等额的二次蒸汽凝结潜热。换言之, 正是通过闭路二次蒸汽潜热循环及补充海水显热回热, 使得装置只需补充 7.7% 的功耗来压缩二次蒸汽, 略微提高其品质, 即可重复利用 100% 的二次蒸汽高热焓来独立维持闪蒸操作。

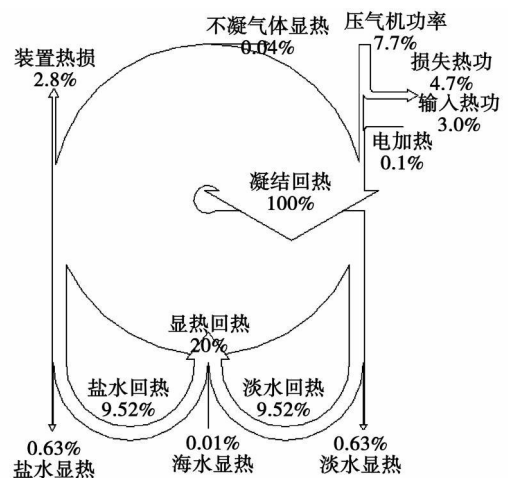


图 3 压汽闪蒸法的热流分布

2.7 热效率 η

从热量平衡的角度分析, 压气闪蒸法需补充少量电功来压缩二次蒸汽, 略微提高其品质, 既无需补充外部的高品位热量, 也无需向环境排放低品位凝结潜热, 就可独立维持闪蒸操作。常压闪蒸时, 如冷凝加热器中最大传热温差 4°C , 压气机只需给 1 kg 二次蒸汽提供 $8\sim 9\text{ kJ}$ 功耗, 使其压缩到饱和温升 5°C , 即可使其 2244 kJ 凝结潜热得以重新利用, 热效率得到提高。当二次蒸汽由 100 kPa 压缩到 120 kPa 时, 压气机所需理论绝热功耗仅为 6.8 kWh/m^3 , 对应的理论热效率高达 80%, 尽管实际热效率较低, 但大型装置的约为 40%。此外利用回热器使补充海水充分回收淡水和盐水的排放显热, 又进一

步提高其热效率。冷凝加热器中传热对数平均温差 $\Delta\theta_R$ 、闪蒸温降 $T_{TOP} - T_R$ 、盐水沸点升高 BPE 装置散热、进出物料的热焓差以及机械损失等, 都会增加压气机的实际功耗。

3 结 论

由上述热力学分析可知, 压汽闪蒸法海水淡化装置, 作为现有海水淡化方法的最优技术整合, 其工艺优点分别为:

(1) 闭路二次蒸汽潜热循环和补充海水的显热回热, 使装置的驱动能耗降至最低, 耗电仅为 $7 \sim 15 \text{ kWh/m}^3$, 造水成本仅为 $4.5 \sim 8.5 \text{ 元/m}^3$; 其中二次蒸汽的压缩功耗, 恰好补偿产品淡水和排放盐水带走的部分显热及装置热损, 从而实现独立的闪蒸操作;

(2) 装置仅需压气机和循环泵的电驱动, 即可补偿装置的散热损失, 因此能源形式单一、方便, 无需水蒸气和冷却水等动力来源, 尤其适用于供汽不便和水源缺乏的地方;

(3) 通过简单的工艺流程就可达到多级闪蒸法或多效蒸馏法同样高的造水比 τ 。根据节流前盐水温度 T_{TOP} 的不同取值, 其等效造水比 τ 可达 $15 \sim 20$ 。故而其装置简单、紧凑、模块化, 可设计成舰载、

车载等便携式装置;

(4) 循环盐水的加热过程与闪蒸过程前、后分离, 使其防垢性能优异;

(5) 模块化组合的规模生产容量可达 $10^5 \text{ m}^3/\text{d}$;

(6) 集成技术成熟且操作弹性大, 装置运行安全、稳定、可靠, 可利用低位热能;

(7) 无需海水预处理, 没有添加剂对淡水的二次污染, 可处理有机物污染过的海水, 产品水质达饮用标准, 可用于蒸馏水生产及废水处理等;

(8) 虽在流程上比压汽蒸馏法多出一台设备, 却成倍降低多项技术指标, 从而提高产品的可靠性与普适性。

参考文献:

- [1] 王世昌. 海水淡化工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [2] 高从塔, 陈国华. 海水淡化技术与工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] 王世昌. 海水淡化多级闪蒸过程参数分析[J]. 海水淡化, 1979(1): 1-17.
- [4] 王世昌. 化工百科全书第六卷: 海水淡化[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994.

(本文责任编辑 孙显辉)

新技术、新产品

韩国海军巡逻艇装用 IM500燃气轮机

据《Gas Turbine World》2009年3~4月号报道, GEMarine将供应 Samsung Techwin IM500燃气轮机, 用于驱动属于海军高速巡逻艇计划第二阶段的韩国海军 PK(X)巡逻艇。

Samsung Techwin是一个针对韩国市场的被授权的 GEMarine System Supplier(GE船用系统供应厂商)。

GE燃气轮机将用于 CODAG(柴燃并车使用联合装置)结构中。IM500航改型船舶燃气轮机的额定输出功率约为 $4\,176 \text{ kW}$, 耗油率为 0.271 kg/(kWh) 。

GE将在安装、航海试验和试运行整个期间给 Samsung Techwin造船厂和韩国海军提供技术保障。

IM500是一型双轴燃气轮机, 由燃气发生器和自由动力涡轮组成并具有冷端驱动的能力。14级轴流压气机提供 $14.5:1$ 的压比。

IM500已驱动各种各样的推进系统, 诸如在丹麦海军 Stanflex 300 巡逻艇上的 CODAG 联合装置、日本海军分别用于 IchiGo 级导弹艇和 Hayabusa 巡逻艇的 CODOG(柴燃交替使用联合装置)和 COGAG(燃烧并车使用联合装置)。IM500驱动装置也使用在香港营运的两艘 Foilca 高速商业用渡船上。

(吉桂明 摘译)

mal Energy & Power — 2010 25 (1). — 102 ~ 106

By using test and numerical simulation methods studied was the influence of hydrogen content on the diffusion combustion characteristics of a hydrogen/methane mixture fuel. It has been found that under the precondition of keeping the total heating value unchanged, the increase in hydrogen content has not caused a remarkable change in flame length. This is the result of a joint action of the increase of the hydrogen content, which will result in a tendency to shorten the flame and the increase of the fuel flow rate, which will lead to a tendency to lengthen the flame. The highest temperature of all the fuel flames happens in the return flow zone. With an increase of the hydrogen content, the flame in the high temperature zone becomes higher and higher in the axial direction. The flame stability is notably enhanced with an increase of the hydrogen content. The results of the OH concentration distribution measured by PLIF (Planar laser induced fluorescence) show that with an increase of the hydrogen content, the boundary at the root of the flame becomes more and more clear, indicating that the combustion at the root grows in intensity ever strongly. The NO_x emissions concentration assumes an exponent ascending tendency and corresponds with the variation tendency of the flame temperature when the hydrogen content in the fuel is increased. When the hydrogen content of the fuel increases from 0% to 80%, the NO_x concentration relatively increases by 46%. When the hydrogen content increases from 80% to 100%, the NO_x concentration relatively increases by 48%. From such a standpoint, the fuel with a hydrogen content of 80% is perhaps more advantageous than pure hydrogen fuel. Key words: hydrogen; methane; diffusion flame; hydrogen content; combustion characteristics

不可逆反渗透分离过程的性能分析 = Performance Analysis of an Irreversible Reverse Osmosis Separation Process [刊, 汉] / SHU Liwei, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (Postgraduate School, Naval University of Engineering, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25 (1). — 107 ~ 111

On the basis of a model for an inner reversible reverse osmosis process and with a further consideration of the influence of the friction loss of the reverse osmosis module (pressure drop), the flow resistance and efficiencies of a water pump and water turbine on the performance of a reverse osmosis separation process, set up was a model for an irreversible reverse osmosis separation process. Moreover, an investigation of the process has been performed by using the theory of finite time thermodynamics and the working principle of a fluid flow based work doing device. It has been found that to increase the pure water recovery rate or the efficiency of the water pump can enhance the thermal efficiency of the system. To boost the material feeding pressure or improve the efficiency of the water turbine can increase the pure water flow rate. However, the friction loss of the reverse osmosis module exercises a relatively small influence on the system performance. In the meantime, it has been proven that there exists a maximal value of the power consumed by the reverse osmosis separation process, i.e. the conversion rate of a mechanical energy to a chemical one has a maximal value. Key words: reverse osmosis process; irreversible efficiency; separation power; energy loss rate; finite time thermodynamics

压汽闪蒸法海水淡化装置的热力学分析 = A Thermodynamic Analysis of a Pressurized-steam Flash Evaporation Method-based Seawater Desalination Plant [刊, 汉] / CHOU Qiao-li, JIN Cong-zhuo (Hefei Swan Refrigeration Science and Technology Co., Ltd., Hefei, China, Post Code: 230088), JIN Cong-zhuo, SHU Peng-cheng (Xian Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010 25 (1). — 112 ~ 115

Key words: pressurized steam; flash evaporation; seawater desalination; plant