



## 多级海水热泵供热系统的特性与应用分析

苏立娟, 陈 东, 谢继红, 刘冬雪  
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

**摘 要:** 海水的温度稳定, 蕴含着容量巨大的热能, 可利用海水的热能, 通过热泵制取中、低温度的热水. 对单级海水热泵系统的工作原理进行了研究, 重点分析了两级海水热泵系统的特性, 导出了两级海水热泵系统总耗电量的计算公式, 利用该公式对换热器的面积进行了优化, 得出了冷凝器的最佳面积值及其他各关键参数. 此外, 对海水热泵系统与常规燃煤锅炉制取中低温热能进行了计算比较, 得出结果: 采用燃煤锅炉制热时, 制取 1MJ 热能的费用为 0.031 元; 利用海水热泵系统制热时, 每制取 1MJ 热能所需的费用为 0.023 元, 表明海水热泵系统在能源效率和经济性上有明显的综合优势.

**关键词:** 海水; 热泵; 供热; 热水

**中图分类号:** P743.4; TK121    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-6510 (2007) 02-0054-04

## Analysis of the Characteristics and Applications of Multi-stage Seawater Heat Pump Systems

SU Li-juan, CHEN Dong, XIE Ji-hong, LIU Dong-xue

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The temperature of seawater is steady and the thermal energy in it is abundant. The thermal energy of the seawater may be used to produce the moderate or low temperature heat water by the heat pump for many applications. Based on a brief introduction to the working principle of a single-stage seawater heat pump system, the characteristics and parameters of the two-stage seawater heat pump system were analyzed and optimized, the total electricity consumption of the two-stage seawater heat pump system was gained by the formula, and the area of the heat exchangers was optimized, and then the optimal area of them was calculated as well as the other key parameters. In addition, the technical and economic parameters of the seawater heat pump system were compared with the traditional boiler using coal as fuel when low or moderate temperature heat energy is needed. It turned out that the heat energy cost for 1 MJ is about 0.031Yuan and 0.023 Yuan respectively for the traditional coal boiler and the seawater heat pump system. So the seawater heat pump system is more competitive than the boiler on both energy efficient and economic aspects.

**Keywords:** sea water; heat pump; heating; warm water

海水在一年四季的温度相对稳定<sup>[1]</sup>, 可用作制冷热泵装置的冷热源, 从而实现高效绿色的供冷和供热<sup>[2,3]</sup>, 尤其在北方的冬季, 可利用海水热泵系统制取不同温度的热水来满足生活与工业的各种需要. 与常规的燃煤供热相比, 海水热泵供热在技术(能源效率)、经济(初投资和运行费用)、环境(大气污染)等方面具有较强的综合竞争力, 可为近海地区和企业提供一

种较好的制热模式.

随着能源紧张和环境保护要求的提高, 海水热泵技术近年在国内外均得到了快速的发展, 美国、加拿大、瑞典等对海水热泵技术已做了较多的工作, 如取、排水口的位置及管道的敷设, 对海水的腐蚀性、冬季海水温度过低等问题提出了解决对策. 我国青岛和大连等地也已开始了海水热泵供暖的探索<sup>[4]</sup>.

收稿日期: 2006-12-20; 修回日期: 2007-01-15

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(043605511); 天津市高等学校科技发展基金资助项目(20040713)

作者简介: 苏立娟(1982—), 女, 天津人, 硕士研究生.

由于不同国家和地区能源价格和近海海水资源条件的不同,海水热泵在我国的应用和推广还有许多课题需要研究.本文在前人研究的基础上,提出制取中、低温热水的方案,并在对单级海水热泵工作原理进行简要介绍的基础上,着重对两级海水热泵系统的关键参数进行优化分析,对海水热泵与燃煤锅炉制取中低温热能的技术及经济特性进行计算比较.

## 1 海水热泵系统的工作原理

以单级海水热泵系统为例,其工作原理如图1所示.

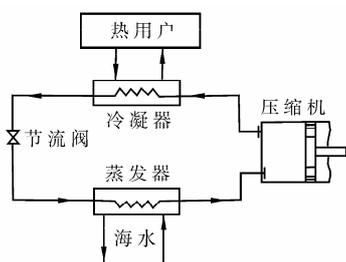


图1 单级海水热泵系统的工作原理

Fig.1 Working principle of a single-stage seawater heat pump system

如图1所示,设冬季海水温度为 $5^{\circ}\text{C}$ ,该温度的海水进入蒸发器,在蒸发器中将热量传给低温热泵工质,设工质温度为 $0^{\circ}\text{C}$ ,海水则被冷却为 $3^{\circ}\text{C}$ 排出蒸发器.蒸发器中的热泵工质吸收海水的热量后由液态变为气态,进入压缩机,被压缩机升温升压后进入冷凝器,在冷凝器中热泵工质在适当温度(如 $30^{\circ}\text{C}$ )下冷凝放热,并通过载热介质将制取的热能(如 $25^{\circ}\text{C}$ )输送给热用户.高压的液态工质进入节流阀,经节流变为低温低压的饱和液与饱和气的混合物(温度为 $0^{\circ}\text{C}$ ,且通常饱和液的质量分数在60%以上),进入蒸发器再吸收海水热量,并开始下一个循环,实现以海水为低温热源的连续制热.

当海水热泵制热系统按上述参数运行时,其逆卡诺循环的制热性能系数(制热量与耗电量之比)为10.1.设系统的实际制热性能系数为逆卡诺循环的60%时,则其制热性能系数为6.06,即消耗1J电能可从海水中抽取5.06J(温度为 $5^{\circ}\text{C}$ )的热能,共制取获得6.06J(温度为 $25^{\circ}\text{C}$ )的热能提供给热用户,其能源效率远高于传统的燃烧装置或直接电加热装置.

上述海水热泵系统在夏季通过四通阀将循环工质流向进行转换,也可用于以海水为低温冷源的高效制冷.

## 2 两级海水热泵系统的分析与优化

在居民生活和工业生产中,往往需要不同温度的热能,且需求量通常相差很大.以居民小区的热水供应为例,在冬季既需要大量的 $20^{\circ}\text{C}$ 左右的清洗用低温热水(厨房用水、卫生间用水、游泳池用水等),这类热用户称为低温热用户;也需要一定量的 $40^{\circ}\text{C}$ 左右的洗浴及供暖用中温热水(家庭浴室用水、地板采暖所需的热热水等),这类热用户称为中温热用户.此时的海水热泵系统宜采用两级方案,其工作原理如图2所示.

由图2可见,由一级压缩机、一级冷凝器、一级节流阀和一级蒸发器构成两级海水热泵系统的第一级,第一级直接从海水中吸收热量,升温至适当温度后大部分供给低温热用户,小部分供给第二级热泵.第二级热泵由二级压缩机、二级冷凝器、二级节流阀和二级蒸发器组成,从一级冷凝器中吸收热量,升温后供给中温热用户.

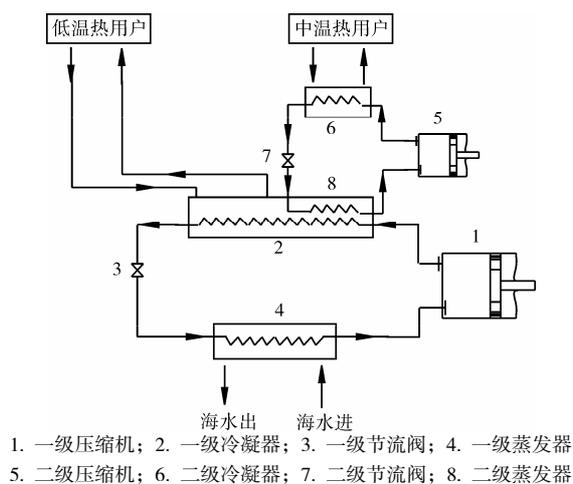


图2 两级海水热泵系统的工作原理

Fig.2 Working principle of a two-stage seawater heat pump system

两级海水热泵系统的热泵工质均可采用目前价格低、配套部件齐全、对环境的影响也较小的R22.压缩机的选用对小型机组可考虑活塞式或涡旋式,对中型机组可考虑螺杆式,当热用户需热量较大时,可采用多机组并联或模块化机组组合的方式.节流部件对小型机组可选用毛细管,对中型机组可选用热力膨胀阀,当机组的调控性要求高时,也可采用电子膨胀阀<sup>[5]</sup>.

海水热泵系统的蒸发器和冷凝器均可采用套管式换热器,也可考虑板式或螺旋板式<sup>[5]</sup>.但一级蒸发器

由于与海水接触,应具有较好的耐蚀性,可考虑采用钛材料<sup>[6]</sup>,一级冷凝器(内含二级蒸发器)和二级冷凝器均可采用紫铜材料。

当海水温度、低温热用户的需热温度、中温热用户的需热温度一定,且蒸发器、冷凝器的总面积(即换热器的总投资)也一定时,各蒸发器和冷凝器的面积分配存在一个最佳值。以一级冷凝器(内含二级蒸发器)和二级冷凝器的面积最佳分配为例进行分析。

参照图2,设一级蒸发器内热泵工质的蒸发温度为 $T_{e1}$ ;低温热用户的需热温度为 $T_{s1}$ ;二级蒸发器内热泵工质的蒸发温度 $T_{e2}$ ;中温热用户的需热温度为 $T_{s2}$ ;一级冷凝器内热泵工质的冷凝温度为 $T_{c1}=T_{s1}+\Delta T_1$ ;二级冷凝器内热泵工质的冷凝温度为 $T_{c2}=T_{s2}+\Delta T_2$ 。

对一级冷凝器(内含二级蒸发器)有

$$Q_1 = kF_1\Delta T_1 \quad (1)$$

式中: $Q_1$ ——一级冷凝器内的传热量, W;

$K$ ——传热系数, W/( $m^2 \cdot K$ );

$F_1$ ——一级冷凝器的传热面积,  $m^2$ ;

$\Delta T_1$ ——一级冷凝器的传热温差, K。

一级冷凝器内分两部分,一部分是低温热用户的载热介质与热泵工质换热,另一部分是二级蒸发器内的热泵工质与一级冷凝器内的热泵工质换热,此处取两部分的传热温差均为 $\Delta T_1$ 。

对二级冷凝器有

$$Q_2 = kF_2\Delta T_2 \quad (2)$$

式中: $Q_2$ ——二级冷凝器内的传热量, W;

$F_2$ ——二级冷凝器的传热面积,  $m^2$ ;

$\Delta T_2$ ——二级冷凝器的传热温差, K。

且有

$$F = F_1 + F_2 \quad (3)$$

式中 $F$ 为一级冷凝器(内含二级蒸发器)和二级冷凝器的总面积,是定值,单位为 $m^2$ 。

一级热泵的耗电量 $P_1$ (单位为W,且取实际热泵的制热性能系数 $COP_1$ 为逆卡诺循环热泵制热性能系数 $COP_{carnot1}$ 的60%,取 $T_{e1}=273K$ , $T_{s1}=293K$ , $T_{s2}=313K$ , $T_{e2}=293K$ )为

$$P_1 = \frac{Q_1}{COP_1} \quad (4)$$

$$COP_1 = 0.6COP_{carnot1} \quad (5)$$

$$COP_{carnot1} = \frac{T_{c1}}{T_{c1} - T_{e1}} = \frac{293 + \Delta T_1}{20 + \Delta T_1} \quad (6)$$

二级热泵的耗电量 $P_2$ (单位为W,取实际热泵的制热性能系数 $COP_2$ 为逆卡诺循环热泵制热性能系数 $COP_{carnot2}$ 的60%)为

$$P_2 = \frac{Q_2}{COP_2} \quad (7)$$

$$COP_2 = 0.6COP_{carnot2} \quad (8)$$

$$COP_{carnot2} = \frac{T_{c2}}{T_{c2} - T_{e2}} = \frac{313 + \Delta T_2}{20 + \Delta T_2} \quad (9)$$

设两级海水热泵系统的总耗电量为 $P$ (单位为W),即有

$$P = P_1 + P_2 \quad (10)$$

由式(1)一式(10),可得

$$P = \frac{5Q_1(20kF_1 + Q_1)}{3(293kF_1 + Q_1)} + \frac{5Q_2(20kF_2 + Q_2)}{3(313kF_2 + Q_2)} \quad (11)$$

将式(11)对 $F_1$ 求导数,令导数为0,并整理,即可获得两级海水热泵系统的总换热器面积 $F$ 为定值和总耗电量 $P$ 为最小时的一级冷凝器最佳面积的计算式为

$$F_1 = \frac{313\sqrt{273kFQ_1} + (\sqrt{273} - \sqrt{293})Q_1Q_2}{293\sqrt{293kQ_2} + 313\sqrt{273kQ_1}} \quad (12)$$

得到一级冷凝器的面积 $F_1$ 后,即可由式(3)得到总面积 $F$ 为定值时二级冷凝器的最佳面积 $F_2$ 。

设一级冷凝器的换热量 $Q_1=100$  kW,二级冷凝器的换热量 $Q_2=30$  kW,一级冷凝器和二级冷凝器的传热系数 $k=500$  W/( $m^2 \cdot K$ ),一级冷凝器和二级冷凝器的总面积 $F=60$   $m^2$ ,代入式(12)和式(3),可得

$$F_1=46.4 \text{ m}^2 \quad F_2=13.6 \text{ m}^2$$

由式(1)和式(2)可得此时一级冷凝器和二级冷凝器中的传热温差为

$$\Delta T_1=4.3^\circ\text{C} \quad \Delta T_2=4.4^\circ\text{C}$$

由式(4)一式(6)、式(7)一式(9)及式(10)可得

$$P_1=13.6 \text{ kW} \quad P_2=3.8 \text{ kW} \quad P=17.4 \text{ kW}$$

由于二级热泵冷凝器传热量为 $Q_{s2}=Q_2=30$  kW,二级压缩机功率 $P_2=3.8$  kW,故二级蒸发器的传热量为 $Q_{E2}=Q_2-P_2=26.2$  kW,故一级冷凝器提供给低温热用户的热量为 $Q_{s1}=Q_1-Q_{E2}=73.8$  kW。

综上,该二级海水热泵系统为低温热用户制取的 $20^\circ\text{C}$ 的低温热能为 $73.8$  kW,为中温热用户制取的 $40^\circ\text{C}$ 的中温热能为 $30$  kW,总制热量为 $103.8$  kW,总耗电量为 $17.4$  kW。

### 3 海水热泵系统的技术与经济指标计算

当采用燃煤制热时,设煤的燃烧热为 $23$  MJ/kg,锅炉的热效率为 $70\%$ ,取煤价为 $500$  元/吨,即 $0.5$  元/kg<sup>[7]</sup>,则用煤制取 $1$  MJ热能的费用为

$$0.5 \div (23 \times 0.7) = 0.031 \text{ 元/MJ}$$

采用海水热泵制热时,由上节的典型数据可知,二级海水热泵系统的综合制热性能系数为

$$COP_{av} = \frac{Q}{P} = \frac{Q_{s1} + Q_{s2}}{P_1 + P_2} \approx 6.0 \quad (13)$$

即消耗 1 MJ 电能可制取热能 6.0 MJ. 取电价为 0.5 元/(kW·h), 即 0.139 元/MJ<sup>[8]</sup>. 利用海水热泵系统制热时,每制取 1MJ 所需的费用为  $0.139 \div 6 = 0.023$  元/MJ.

海水热泵制热与燃煤锅炉制热的技术经济指标的综合对比如表 1 所示.

表 1 海水热泵制热与燃煤锅炉制热的技术经济指标对比  
Tab.1 Technical and economic parameters of the seawater heat pump and coal boiler

制热方式	制热系数(制取/消耗)	费用/元·MJ <sup>-1</sup>
燃煤锅炉	0.7	0.031
海水热泵	6.0	0.023

因此,制取中低温热能时,海水热泵系统在能源效率和经济性上比常规的燃煤锅炉有明显的优势.此外,电能是一种较清洁的能源,利用海水热泵制热对环境的影响很小,这对环保要求严格的大中城市而言,尤其具有吸引力.

当二级海水热泵制取的热能温度  $T_{s1}$ 、 $T_{s2}$  和热能的用量  $Q_{s1}$ 、 $Q_{s2}$  与本文中所取的典型数据不同,以及当热用户需要更高温度的热能(如 80℃左右,用于普通暖气片供暖、工业漂洗及杀菌等场合)而采用三级海水热泵系统时,其技术及经济特性的分析与指标计算也可参考本文的方法进行.

## 4 结 语

本文对二级海水热泵制取中低温热水的系统方

案及其技术特性进行了较深入的分析,对其关键参数进行了优化,导出了两级海水热泵系统的总耗电量  $P$  的计算公式,得出了冷凝器面积的最佳值,并计算了其他各性能参数.此外,对二级海水制冷热泵系统与常规的燃煤锅炉制热进行了技术和经济指标的计算分析,表明海水热泵制取中低温热能时在能源效率、经济性等方面均具有较强的竞争力,具有良好的应用前景.

## 参 考 文 献:

- [1] 郭 琨. 海洋手册[M]. 北京: 海洋出版社, 1984: 91.
- [2] Yik F W H, Burmett J, Prescott I. Predicting air-conditioning energy consumption of a group of buildings using different heat rejection methods [J]. Energy and Buildings, 2001, 33 (2): 151—166.
- [3] 陈 东, 谢继红, 李满峰. 以海水为冷热源的城市集中冷暖工程分析[J]. 天津轻工业学院学报, 2003, 18 (2): 53—56.
- [4] 蒋 爽, 李 震, 端木琳, 等. 海水热泵系统的应用及发展前景[J]. 节能与环保, 2005 (10): 11—14.
- [5] 陈 东, 谢继红. 热泵技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 45—155.
- [6] 乔 木. 海水制冷热泵系统的理论与实验研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2006: 48—52.
- [7] 于 舰. 电煤价格放开 1 月煤价上涨[N/OL]. (2006-03-02) [2006-08-20]. <http://news.sohu.com/20060302/n242096848.shtml>.
- [8] 申屠青南. 发改委公布各地电价调整方案[N/OL]. (2006-07-03) [2006-08-20]. <http://www.finance.sina.com.cn/g/20060703/05432698820.shtml>.