

庞合鼎 王守谦 阎克智 编

高效节能的热泵技术

原子能出版社

高效节能的热泵技术

庞合鼎 王守谦 阎克智 编

原子能出版社

内 容 提 要

本书比较系统地叙述了有关热泵技术的基本原理、工程应用和经济分析等问题。其内容包括热泵装置、热泵蒸发技术的理论知识,工程设计和操作运行中的有关问题,热泵技术在工业生产中的应用实例,热泵的节能效果的分析比较,以及对工业规模热泵装置进行设计的基本原则等。热泵的推广应用有助于企业的技术改造,将会带来显著的节能效果和经济效益。

本书可供化工、石油、造纸、印染、医药、制糖、环境保护、水处理、核工业等部门及其它科学技术领域从事能源技术工作的科技人员、管理人员、工人参考,也可供大专院校有关专业的师生参考。

高效节能的热泵技术

鹿合鼎 王守谦 阎克智 编

责任编辑 张恩海

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京化工学院印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $5 \frac{3}{8}$ ·字数 142 千字

1985年5月第一版·1985年5月第一次印刷

印数 1—8,200·统一书号: 15175·639

定价: 1.40元

前 言

热泵理论已问世多年，热泵技术突出的节能效果尤为人们所注意。热泵技术在工业上真正得到应用，经历了一段较长的过程。随着国际能源供应日益紧张，能源价格上涨，世界上先进国家已把节能技术提到了一个突出的地位。目前，热泵这一高效节能技术在工业生产中得到了大力推广，它在化工、石油、医药、造纸、核工业、环境工程以及水处理等方面的应用成效尤为显著。随着运行经验的积累，预计这项技术将会有更大的发展。

编者于 1975 年立题研究采用热泵蒸发法处理核工业中的放射性废水以来，1979 年已完成热泵蒸发中间规模试验装置的研制工作，并于 1981 年开始运用该装置，先后对造纸厂黑液和淀粉厂玉米浸泡液进行浓缩，对氯化钡、亚硫酸钠、氯化钙等的制备以及印染废水的净化等进行了可行性实验，都取得了较好的节能效果。该项技术已在 1983 年 1 月由核工业部、轻工业部联合召开的鉴定会上，通过了技术鉴定。

到本世纪末，我国经济建设的目标是：在不断提高经济效益的前提下，力争实现工农业年总产值翻两番，但能源供应量只能翻一番（见赵紫阳总理在全国科学技术奖励大会上的讲话）。在能源如此短缺的情况下，节能问题就显得更为突出。因而，高效节能技术必将在我国工业建设中得到普遍应用和推广。

编者根据自己多年研究热泵蒸发的实践和积累的技术资料，编写了这本小册子。它力图从基本原理到设计应用方面，较系统地论述热泵节能技术。本书如果能对从事能源工作的同志们有所裨益的话，编者便感到欣慰了。

全书经于承泽和孙中汉两同志仔细审定，并得到李恒勤、薛素静两同志的热情帮助，在此对他们表示谢意。

限于编者水平，书中难免有不当之处，欢迎读者批评指正。

编 者

1984年6月

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 热泵的历史	(1)
第二节 什么是热泵	(2)
第三节 热泵的类型及其特点	(3)
一、空气压缩式热泵	(3)
二、蒸汽压缩式热泵	(5)
三、蒸汽喷射式热泵	(5)
四、吸收式热泵	(7)
五、半导体热泵	(9)
第二章 热泵理论	(11)
第一节 热力学定律	(11)
一、热力学第一定律	(11)
二、热力学第二定律	(13)
第二节 热功转换循环过程	(15)
一、热机、制冷机、热泵的循环过程	(15)
二、热泵热力循环系统	(23)
三、工业用热泵循环系统	(31)
第三章 热泵蒸发装置的设计	(37)
第一节 设计的总体考虑	(37)
一、热衡算	(37)
二、溶液的沸点升高	(39)
三、蒸汽的净化与热量的回收	(40)
四、操作压力	(41)
五、物料的特性	(42)

六、其它几个问题	(43)
第二节 蒸汽压缩机	(44)
一、蒸汽压缩机的选用	(44)
二、蒸汽压缩机的类型	(46)
三、蒸汽压缩机的驱动装置	(52)
第三节 蒸发器	(53)
一、蒸发器的型式与应用	(53)
二、蒸发器的设计	(70)
第四节 热交换器	(74)
一、热交换器的型式与特点	(75)
二、热交换器的设计	(81)
第五节 汽液分离捕沫器	(82)
一、干式捕沫器	(83)
二、湿式捕沫器	(90)
第六节 辅助热源	(95)
一、辅助热源的功能	(95)
二、辅助热源的类型	(98)
三、辅助热源的设计	(99)
第七节 设备保温	(99)
一、保温材料	(100)
二、保温层结构	(100)
三、保温层厚度的计算与设计	(102)
第八节 操作与运行	(104)
一、操作程序	(104)
二、监测与控制	(105)
三、运行中的问题	(105)
第四章 热泵的工业应用	(108)
第一节 应用概况	(108)
一、机械压缩式热泵的适用范围	(108)
二、蒸汽喷射式热泵的适用范围	(113)

第二节	热泵在工业上的应用实例	(115)
一、	化工中的应用实例	(115)
二、	造纸厂黑液的浓缩和净化	(120)
三、	放射性废水处理	(126)
四、	海水淡化	(133)
第五章	热泵蒸发的经济分析	(142)
第一节	经济分析的内容	(142)
第二节	经济分析的指标	(144)
一、	实际热泵循环的性能系数 COP	(144)
二、	一次能源利用系数 PER	(145)
三、	能源费用节省率 A	(146)
第三节	热泵蒸发经济分析实例	(147)
一、	热泵蒸发与常规单效蒸发的对比	(148)
二、	热泵蒸发与工厂现行蒸发的经济对比	(149)
三、	国外热泵蒸发经济对比举例	(151)
四、	几点看法	(153)
第六章	热泵蒸发与节约能源	(155)
第一节	节约能源的意义	(155)
第二节	我国的能源政策和特点	(156)
第三节	广泛的余热资源	(158)
第四节	广阔的前景	(160)
一、	热泵的特点	(160)
二、	热泵供热的经济分析	(161)
三、	推广热泵和节约能源	(162)

第一章 概 述

本章主要介绍热泵的发展历史、什么是热泵、热泵的种类及其特点。

第一节 热泵的历史

十九世纪二十年代，法国青年工程师卡诺研究了一个特殊的循环，称之为卡诺循环。卡诺早期的著作及卡诺循环的研究为热泵技术奠定了理论基础。到了十九世纪五十年代，英国物理学家威廉·汤姆逊(后来叫凯尔文)在这个理论基础上首先提出了热泵的概念^{[1][2]}。

汤姆逊最先提出了一种实用热泵系统(亦称热能放大器)。它用空气作为工作介质，将空气抽入气缸中进行膨胀使其降温降压。然后通过一个空气-空气热交换器，在这里吸收环境空气中的热量，吸热后的空气经压缩机压缩，使其温度高于环境温度，最后将这些热空气输送到需要采暖的建筑物内。汤姆逊设想，有一种装置可以从沸腾溶液中抽出蒸汽，用压缩的方法加入外加热能使其温度升高，然后再将潜热传给较冷的沸腾溶液。他最早提出了蒸汽压缩的概念。但由于当时的压缩机效率过低而无法实现这个设想。最早将这一概念用于实际的是沃思(Wirth)的热压缩系统，这个系统包括一台透平压缩机和一台蒸发器，被称为“自动蒸发器”，这种系统出现于十九世纪。

在第二次世界大战前，适于工业用热泵的设计和示范性装置都已制造出来。后来因为世界大战的爆发及其它种种原因，工作进展极为缓慢。但在这一时期，小型空调热泵试验装置仍有所进展^{[3][4]}。在大战期间，由于军事上的需要，淡化海水用的小型热泵蒸发装置发展得很快，出现了数以千计的这类装置。五十年代热泵技术已在造纸工业的黑液浓缩过程中有了普遍应用，化工生产上也采用这一技术来制备无机盐或进行溶液的浓缩^[5]。到了六十年代，联邦德国和法国用机械压缩式热泵技术处理了核研究中心的放射性废液。

七十年代资本主义世界发生能源危机以来，不少国家对热泵这一节能技术又产生了浓厚的兴趣，在工业生产中积极引用它。到目前为止，热泵技术已成功地应用于化工、食品、造纸、医药以及木材加工工业等领域。

解放后，我国在热泵技术方面也做了一些研究工作，然而只着重于小型空调式热泵的研制。从七十年代起一些高等院校和科研单位对工业用热泵进行了探索性的研究，并积极开发这项技术。1975—1979年间，中国科学院原子能研究所，建成了一套半工业规模的试验性热泵蒸发装置，日处理能力为6t。目前已将这套设备用于造纸厂黑液的浓缩、净化，亚硫酸钠和氯化钡的制备，淀粉厂玉米浸泡液的浓缩，以及处理染料废水，放射性模拟废水的实验工作，所有实验均达到了预期的效果。

第二节 什么是热泵

概括地说，凡是能把低温处的热量送往高温处成为可用能，以供生活、生产需要的装置，统称为热泵。

众所周知，水会自动地从高处流向低处；热也同样的能从高温处自动地传向低温处。可是通常要想把低处的水送往高处，一般都采用机械泵来完成这样的工作，人们就把这种输送水的机械泵称为水泵。那么，要想把低温处的热量吸出来并送往高温处，使其成为有用的热能，在生产上一般都采用压缩机，所以人们就把这种输送热量的压缩机叫做热泵。我们借助于热泵，就能广泛地利用低温热源来获得高温，满足各种需要，如进行蒸发单元操作、干燥、取暖、食品消毒及药物浓缩等等。

要想实现热泵供热，必须要有一套和它相匹配的设备，如蒸发器、压缩机、冷凝器、膨胀阀，连同工作介质组成一个完整的工作循环系统。以上仅是以压缩式热泵为例来说明热泵的简单概念，除了压缩式热泵之外还有其它类型的热泵。

第三节 热泵的类型及其特点

热泵供热必须要有一套巧妙而相匹配的设备，由于所采用的设备的种类不同便构成了不同类型的热泵生产流程。一般有如下几种：（1）空气压缩式热泵；（2）蒸汽压缩式热泵；（3）蒸汽喷射式热泵；（4）吸收式热泵；（5）半导体热泵。

一、空气压缩式热泵

空气压缩式热泵是以空气作为工作介质的。这种热泵主要是根据气体本身的温度随其压力的增高而升高，随压力的降低而下降的原理来设计的。它由空气压缩机、膨胀机、热

• • •

交换器、冷却器所组成，其循环如图 1-1 所示。工作时，压缩机将工作介质空气由点 1 的压力 P_1 压缩到点 2 的压力 P_2 ，空气的温度相应地由点 1 的 T_1 升高到点 2 的 T_2 ，然后进入冷却器，将热量 q_1 释放给高温的用热场所，而温度下降到点 3 的 T_3 ；冷却后的空气进入膨胀机内进行绝热膨胀，膨胀后的压力降到点 4 的 P_4 ，并输出外功(膨胀的外功回送到压缩机的轴上)，同时温度也由 T_3 下降到点 4 的 T_4 ；经膨胀冷却的空气进入热交换器，从环境吸取热量 q_2 ，等压升温到 T_1 再进入压缩机，这就完成了一个完整的供热循环过程。

假设每公斤空气排向高温热源的热量为 q_1 ，而从低温热源吸取的热量为 q_2 ，则循环所消耗的净功为： $W = q_1 - q_2$ ，kJ/kg。

则供热系数为

$$e_h = \frac{q_2 + W}{W} = \frac{q_2}{W} + 1 = e_r + 1$$

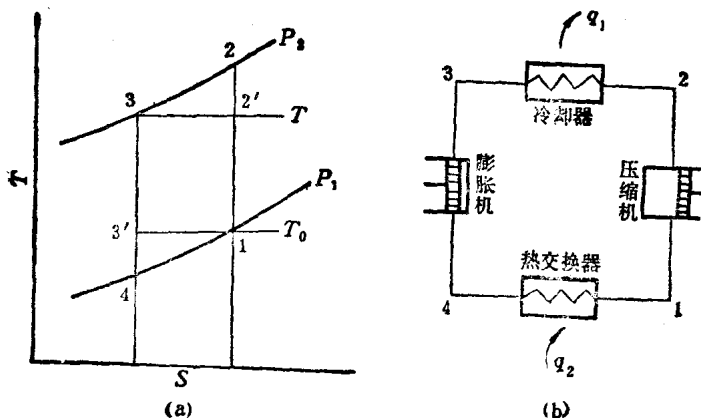


图 1-1 空气压缩式热泵循环图

(a) 温-熵图；(b) 循环示意图。

式中： e_h ——供热系数；

e_r ——制冷系数。

空气压缩式热泵的特点是，工作介质为空气，无毒无污染，对生物及人类无危害，易于取得；压缩机可采用普通空气压缩机。但由于空气的比热小，所以从低温热源吸取的热量少，供热量不大，因而一般用得不多。

二、蒸汽压缩式热泵

蒸汽压缩式热泵是以系统中工作介质的物态变化，即汽化吸热，冷凝放热的特性来实现供热的。它由蒸发器、压缩机、冷凝器和节流阀以及系统中的循环工作介质所组成，其循环如图 1-2 所示。这种热泵是生产中用得较多的一种。

实际的蒸汽压缩式热泵循环，是以对蒸汽状态的工作介质进行压缩做功作为补偿，以干蒸汽压缩代替湿蒸汽压缩过程。在设备方面以简单的节流阀代替复杂的膨胀机。其原理见第二章。

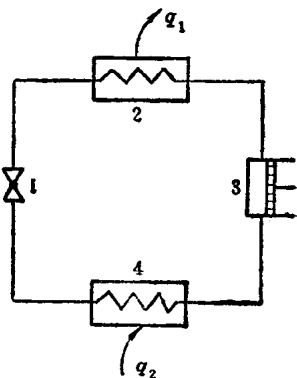


图 1-2 蒸汽压缩式热泵循环图

1. 节流阀；2. 冷凝器；3. 压缩机；4. 蒸发器。

三、蒸汽喷射式热泵

蒸汽喷射式热泵和蒸汽压缩式热泵都属于以蒸汽为工作介质的压缩式热泵。两者的区别是：蒸汽喷射式热泵是以消耗热能作为补偿来工作的，而蒸汽压缩式热泵则是以对工作介质做功为补偿的。喷射式热泵用喷射器达到对蒸汽的压缩，

而压缩式热泵则用压缩机实现对蒸汽的压缩。

在喷射式热泵循环中，可以水、氨、氟利昂作为工作介质。一般用水的较多，因为水的汽化潜热大，无毒，无危险，价格低廉又极易获得，化工生产上用的喷射式热泵几乎都以水为工作介质。

工业生产上用的喷射式热泵有闭式循环(如图 1-3 所示)和开式循环(如图 1-4 所示)两种。由锅炉来的高压蒸汽同蒸发器中出来的二次蒸汽在喷射器出口处混合，一同在喷射器的扩压器中被压缩。然后，进入蒸发器的加热室中，在此释出其潜热，使蒸发器内的溶液继续沸腾蒸发，而蒸汽本身则被冷凝。冷凝液流入收集槽后再用泵送回锅炉房或者作为净化水排掉。

喷射式热泵循环的特点是，不用压缩机而用简单的喷射器，不消耗机械能和电能，而消耗高压蒸汽的热能。但由于耗汽量大，其经济性差，所以在有充足废汽可利用的场所较为合适。

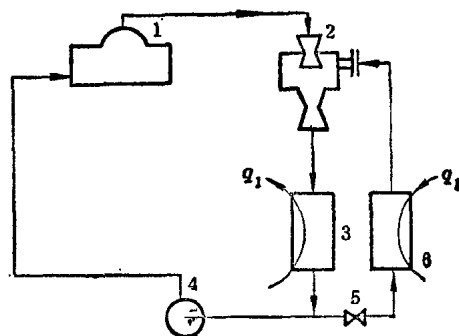


图 1-3 喷射式热泵闭式循环图

1. 锅炉；2. 喷射器；3. 冷凝器；4. 水泵；5. 节流阀；6. 蒸发器。

四、吸收式热泵

吸收式热泵是利用溶液的特性来完成工作循环和实现供热的。它和喷射式热泵一样，以消耗热能为补偿，所以是一种以热能为主要动力的热泵。它用的工作介质是一种二元溶液。

这种溶液由两种相互溶解，而沸点截然不同的物质所组成。在这种情

况下，溶液中沸点较低，受热容易挥发的物质就是溶质（制冷剂），而沸点较高的就是溶剂（吸收剂）。这类热泵常用的溶液有：以水为溶剂的氨水溶液，以水为溶质的溴化锂溶液。二元溶液所以能制热，就是利用溶质在溶液中，溶解度随温度而改变的特性，即在一定压力下，温度愈高溶解度愈小，从而产生所需要的高压蒸汽；反之，温度愈低溶解度愈大，易于被吸收溶解。其循环系统一般由发生器、冷凝器、调节阀、蒸发器和吸收器等组成。

现以溴化锂吸收式热泵的工作过程为例来说明吸收式热泵的一般工作原理（如图 1-5 所示）^[6]。

溴化锂稀溶液流入发生器 1 中，被传热管内流过的工作蒸汽（余热蒸汽或余热水）加热，溶液中的水分不断汽化为制冷剂水蒸气，从而使剩余的溶液浓度提高，变为浓溶液流入发生器中的吸收液储液器中，然后再用泵送入吸收器 2 中。

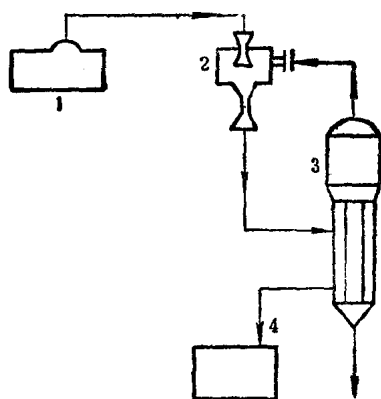


图 1-4 喷射式热泵开式循环图

1. 锅炉；2. 喷射器；3. 蒸发器；4. 冷凝水槽。

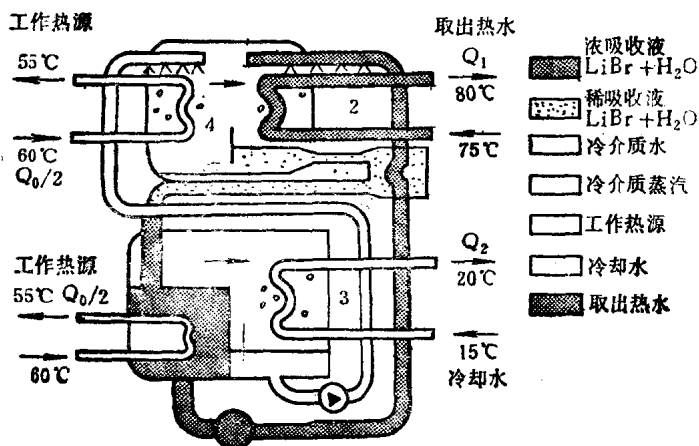


图 1-5 溴化锂吸收式热泵工作原理图

1. 发生器；2. 吸收器；3. 冷凝器；4. 蒸发器。

另一方面，发生器中所产生的制冷剂水蒸气，在冷凝器 3 中受到管内冷却水的冷却，凝结成制冷剂水后，由泵送入蒸发器 4 的喷洒装置里，均匀地喷洒到蒸发器加热管簇的外表面，被加热管内流过的工作蒸汽（余热蒸汽或余热水）加热而汽化成水蒸气后，再流向吸收器。

溴化锂浓溶液被送到吸收器里的喷洒装置中，均匀地喷洒到传热管簇外表面上，吸收从蒸发器来的制冷剂蒸汽，在吸收过程中，放出吸收热，利用此热量来加热传热管内流过的热水。热水所获得的热量就是热泵向高温场所提供的热量。

吸收式热泵的优点是，可以利用低温热源，如工厂废汽和废热作为热源，转动部件少，耗电量少，无噪音，但缺点是热效率低。

五、半 导 体 热 泵^[7]

半导体热泵又称温差电热泵或热电式热泵。下面简单介绍这种热泵的工作原理。

半导体热泵的工作原理如图 1-6 所示，把一个 P 型半导体元件和一个 N 型半导体元件用铜联接片焊接而成电偶对，当直流电流从 N 型半导体流向 P 型半导体时，接头 1，

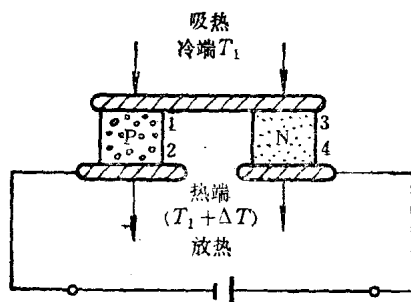


图 1-6 半导体热泵电偶对工作原理图

3 附近要产生电子，空穴对，使接头处的内能减少，温度降低，并从周围介质吸热，此端称为冷端，而在接头 2，4 处电流方向相反，电子，空穴对在接头附近复合，使接头处内能增加，温度升高，并且向周围介质放热，这个接头称为热端。如果将电流方向反过来，则冷端和热端将互换。

由于一个电偶对产生的电热效应较小，所以实际上是将数十个电偶对串联而成。将冷端放在一起，热端放在一起称为热电堆，如图 1-7 所示。

半导体热泵的特点是没有机械运转部件，无噪声，无振动，体积小，重量轻。因此，在车、船、核潜艇、卫星站、飞机、地下建筑中得到广泛的应用。但由于半导体材料性能