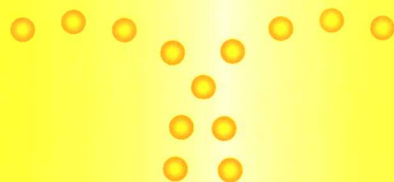


# 热泵 技术及其应用

陈东 谢继红 编著



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

# 热泵技术及其应用

陈东 谢继红 编著



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

· 北京 ·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

热泵技术及其应用/陈东, 谢继红编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 12

ISBN 7-5025-8133-2

I. 热… II. ①陈…②谢… III. 热泵-基本知识  
IV. TQ051.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 157907 号

---

**热泵技术及其应用**

陈东 谢继红 编著

责任编辑: 周 红

责任校对: 李 军

封面设计: 于 兵

\*

化学工业出版社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销  
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷  
三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 字数 430 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8133-2

定 价: 38.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

在生产和生活中，需要热能的地方很多。在生活中，冬季需要热能来供暖，需要热能来烹饪，需要热水来洗浴，需要热空气来干燥衣物；在生产中，牛奶、药品等生产过程中需要热能来杀菌、浓缩和干燥，食品和饮料器具的清洗需要热水，化学品生产、药物提取过程中的溶剂需要热能蒸馏回收和再生，水果、蔬菜需要热水或蒸汽进行漂烫、加工，动物养殖、植物种植、微生物培养需要热能维持合适的环境温度，室内游泳池等健身场所冬季需热能来维持水温……

上述所需热能的温度大多在  $150^{\circ}\text{C}$  以下，制取这些热能的传统方法是燃烧各类燃料或电加热。利用燃料的燃烧制热，不但要消耗大量能源，而且还造成环境污染；采用电能加热看似是一种洁净的方法，但电能基本还是靠燃烧燃料制取的，其获得同样热能所消耗的能源和导致的环境负荷通常更多。那么，有没有制取这类热能的更好方法呢？有，是热泵。

热泵仅需要消耗少量高品位能源（电能或燃料），就能从低温热源（如环境空气、海水、土壤等）中抽取大量低温热能，将其温度升高后“泵送”给用户。其制取热能的能源消耗可比传统方法节省一倍甚至数倍，因此，热泵在制取生产和生活热能的诸多领域，均具有广阔的应用前景。

编写本书的主要目的有三个：一是让更多的人认识热泵；二是让更多的人掌握热泵；三是让更多的人共同拓展热泵的应用领域。

全书的主要内容分为 5 章：第 1 章介绍了热泵的基础知识，包括理论基础知识、热泵的特点、各类热泵简介；第 2 章介绍了蒸气压缩式热泵的性能指标、循环、工质、基本部件、辅助部件和材料、设计及安装调试等内容；第 3 章介绍了溴化锂吸收式热泵的性能指标、循环、工质对、部件、设计及安装调试等内容；第 4 章简要介绍了吸附式热泵的基本循环、性能指标、工质对、设计思路等；第 5 章介绍了热泵在食品生化与制药工业、城市公用事业（包括生活领域）、农副产品种植养殖等方面的应用。全书基本反映了热泵技术的概貌，为工程技术人员掌握和应用热泵技术提供了丰富的参考资料和数据，本书也可作为大学本科高年级学生的选修课教材。

本书第 1 章和第 5 章由谢继红副教授编写，第 2、3、4 章由陈东教授编写，全书由陈东统稿。编写过程中刘荣辉、乔木、许树学、周修茹、苏立娟、尹海蛟、刘冬雪等同学也做了大量的文稿整理和录入工作。

由于作者水平有限，不妥之处在所难免，敬请广大读者斧正。

编者

2006 年 1 月

## 内 容 提 要

本书简要介绍了热泵的历史和发展趋势、制热特点及主要类型，重点介绍了蒸汽压缩式热泵的性能指标、循环、工质、基本部件、辅助部件和材料、设计及安装调试技术，较详细地介绍了溴化锂吸收式热泵的性能指标、循环、工质对、部件、设计及安装调试等内容，也介绍了吸附式热泵的基本循环、性能指标、工质对、设计思路等，并对热泵在食品生化与制药工业、城市公用事业（包括生活领域）、农副产品种植养殖等方面的应用进行了分析。

本书可供化工、能源、轻工、环境、暖通空调等行业的工程技术人员和设计人员参考，也可作为大学本科高年级学生的学习参考资料。

# 目 录

<b>第 1 章 热泵基础知识</b> .....	1
1.1 理论知识 .....	3
1.1.1 术语约定 .....	3
1.1.2 热力学基础 .....	3
1.1.3 工作介质的热力性质计算方法 .....	8
1.1.4 传递性质及其获取 .....	12
1.1.5 传热学基础 .....	22
1.1.6 液体力学基础 .....	25
1.2 热泵的含义及特点 .....	26
1.3 热泵的历史与发展 .....	27
1.4 热泵的性能指标 .....	28
1.4.1 热泵的制热系数 .....	28
1.4.2 热泵与其他制热装置制热效率的比较 .....	28
1.5 热泵的分类 .....	29
1.5.1 按工作原理分类 .....	29
1.5.2 按驱动热泵所用的能源种类分类 .....	32
1.5.3 按热泵制取热能的温度分类 .....	32
1.5.4 按载热介质分类 .....	32
1.5.5 按热泵与低温热源、高温热汇的耦合方式分类 .....	32
1.6 热泵的低温热源 .....	33
1.6.1 环境空气 .....	33
1.6.2 地下水 .....	34
1.6.3 地表水 .....	35
1.6.4 海水 .....	35
1.6.5 土壤 .....	35
1.6.6 工业废热 .....	37
1.6.7 太阳能 .....	37
1.6.8 地热能 .....	37
1.7 热泵的驱动能源 .....	37
1.7.1 固体燃料 .....	37
1.7.2 液体燃料 .....	38
1.7.3 气体燃料 .....	39
<b>第 2 章 蒸气压缩式热泵</b> .....	45
2.1 蒸气压缩式热泵基础 .....	47

2.1.1	热泵工质的状态变化规律	47
2.1.2	蒸气压缩式热泵的工作原理	47
2.1.3	热泵工质的温 ( $T$ ) -熵 ( $s$ ) 图和压 ( $p$ ) -焓 ( $h$ ) 图	48
2.1.4	蒸气压缩式热泵的循环	49
2.1.5	蒸气压缩式热泵循环的计算	56
2.1.6	蒸气压缩式热泵循环的分析	63
2.1.7	蒸气压缩式热泵循环的改进	66
2.2	蒸气压缩式热泵的工质	68
2.2.1	概述	69
2.2.2	热泵工质的要求	69
2.2.3	工质的热物性	70
2.2.4	工质的环境特性和安全特性	93
2.2.5	典型工质的应用特性	99
2.2.6	热泵工质的设计	110
2.2.7	工质的充注量	115
2.2.8	载热介质	115
2.3	蒸气压缩式热泵的基本部件	117
2.3.1	热泵压缩机	118
2.3.2	冷凝器	143
2.3.3	蒸发器	146
2.3.4	节流部件	150
2.4	蒸气压缩式热泵的辅助部件和材料	156
2.4.1	干燥器与过滤器	156
2.4.2	气液分离器	156
2.4.3	油分离器	156
2.4.4	储液器	157
2.4.5	电磁阀	157
2.4.6	高低压控制器	158
2.4.7	风机	159
2.4.8	泵	162
2.4.9	管路材料	163
2.4.10	保温材料	166
2.5	蒸气压缩式热泵的设计	167
2.5.1	蒸气压缩式热泵设计的主要内容	167
2.5.2	内燃机驱动的热泵系统	167
2.5.3	多级热泵	167
2.5.4	多热源热泵	168
2.5.5	蓄热型热泵	169
2.5.6	蒸气压缩式热泵的设计示例	170

2.6	蒸气压缩式热泵的安装调试与维护	178
2.6.1	工具与材料	178
2.6.2	基本安装操作	178
2.6.3	机组调试	180
2.6.4	机组检修	181
2.6.5	机组故障分析及排除	184
<b>第3章</b>	<b>吸收式热泵</b>	<b>189</b>
3.1	吸收式热泵基础	191
3.1.1	吸收式热泵的基本构成	191
3.1.2	吸收式热泵的工作过程	192
3.1.3	吸收式热泵的热平衡	192
3.1.4	吸收式热泵的热力系数	193
3.1.5	吸收式热泵的分类	193
3.1.6	吸收式热泵的基本特点	194
3.2	吸收式热泵的工质对	194
3.2.1	对循环工质的要求	194
3.2.2	对吸收剂的要求	195
3.2.3	工质对溶液的成分表示及性质变化	195
3.2.4	水-溴化锂工质对的性质	196
3.2.5	溴化锂吸收式热泵的特点	205
3.3	吸收式热泵的循环及其计算分析	206
3.3.1	吸收式热泵的循环简介	206
3.3.2	单效溴化锂吸收式热泵的循环及其计算分析	209
3.3.3	双效溴化锂吸收式热泵的循环及其分析	216
3.3.4	第二类吸收式热泵的循环及其计算分析	220
3.4	吸收式热泵的结构和流程	229
3.4.1	单效吸收式热泵的结构	229
3.4.2	双效吸收式热泵的结构和流程	231
3.5	吸收式热泵的部件	234
3.5.1	发生器	234
3.5.2	吸收器	236
3.5.3	冷凝器	237
3.5.4	蒸发器	237
3.5.5	溶液热交换器	237
3.5.6	工质节流部件	238
3.5.7	凝水换热器	238
3.5.8	抽气装置	238
3.5.9	屏蔽泵	238
3.5.10	燃烧装置	239



3.5.11 安全装置	242
3.6 吸收式热泵的设计	243
3.6.1 设计步骤	243
3.6.2 循环图的绘制	243
3.6.3 吸收式热泵的设计简例	244
3.7 吸收式热泵的安装调试与维护	248
3.7.1 吸收式热泵的安装简介	248
3.7.2 吸收式热泵的调试简介	248
3.7.3 吸收式热泵的维护	251
<b>第4章 化学热泵</b>	<b>253</b>
4.1 吸附式热泵基础	255
4.1.1 简介	255
4.1.2 基本的间歇型吸附式热泵	255
4.1.3 基本的连续型吸附式热泵	257
4.1.4 吸附式热泵的性能指标	258
4.1.5 吸附式热泵的特点	258
4.2 吸附式热泵的吸附剂-工质对	259
4.2.1 吸附剂	259
4.2.2 循环工质	260
4.2.3 典型吸附剂-工质对	261
4.3 吸附式热泵的设计分析	261
4.3.1 设计的基本考虑内容	261
4.3.2 各部件的分析	262
<b>第5章 热泵的应用</b>	<b>265</b>
5.1 热泵在食品生化及制药工业中的应用	267
5.1.1 热泵干燥装置	267
5.1.2 热泵蒸发浓缩和蒸馏装置	274
5.1.3 工艺热水的热泵制取装置	275
5.2 热泵在城市公用事业中的应用	276
5.2.1 热泵供暖系统	276
5.2.2 热泵海水淡化系统	280
5.2.3 热泵式低压蒸汽或高温热水生产系统	280
5.3 热泵在其他领域的应用分析	281
5.3.1 在工业余热回收中的应用分析	281
5.3.2 在种植养殖及农副产品加工储藏中的应用分析	282
<b>主要参考文献</b>	<b>283</b>



# 第1章

## 热泵基础知识



## 1.1 理论基础知识

### 1.1.1 术语约定

图 1-1 是某热泵工作的示意。

简而言之，热泵就是以消耗少量高品质能源  $W$ （如电能）为代价，把大量低温热能  $Q_L$  变为高温热能  $Q_H$  的装置。

为便于下文说明，对照图 1-1，就几个基本术语约定如下。

(1) 低温热源 向热泵提供低温热能的热源，如环境空气、地下水、土壤、海水、工业废热等。

(2) 高温热汇 需要高温热能的热用户。

(3) 热泵工质 在热泵中循环流动的工作介质，在不引起误解时，可简称为工质或循环工质。

(4) 低温载热介质 将低温热源的低温热能输送给热泵的介质。

(5) 高温载热介质 将热泵制取的高温热能输送给热用户的介质。

(6) 热泵工作介质 热泵工质、低温载热介质、高温载热介质统称为热泵的工作介质，在不引起误解时，可简称为工作介质。

(7) 低温热源温度 图中  $T_L$ 。

(8) 高温热汇温度 图中  $T_H$ 。

(9) 低温热源输热量 图中  $Q_L$ 。

(10) 热泵制热量 图中  $Q_H$ 。

(11) 热泵耗功量 图中  $W$ 。

### 1.1.2 热力学基础

#### 1.1.2.1 热泵工作介质的状态

热泵工作介质通常有五种状态：过冷液、饱和液、湿蒸气、饱和气、过热气。以水为例，在 1 大气压 (1atm) (1atm=101325Pa, 下同) 下其各状态示意如图 1-2 所示。

(1) 过冷液 如图 1-2 (a) 所示，当工作介质液体的温度低于饱和温度时，称为过冷液（工作介质在某压力下的沸点称为该压力下的饱和温度。对于水，在 1 大气压，即 1atm 下其沸点为 100℃）。

(2) 饱和液 如图 1-2 (b) 所示，当工作介质液体的温度等于饱和温度且刚开始产生气泡时，称为饱和液。

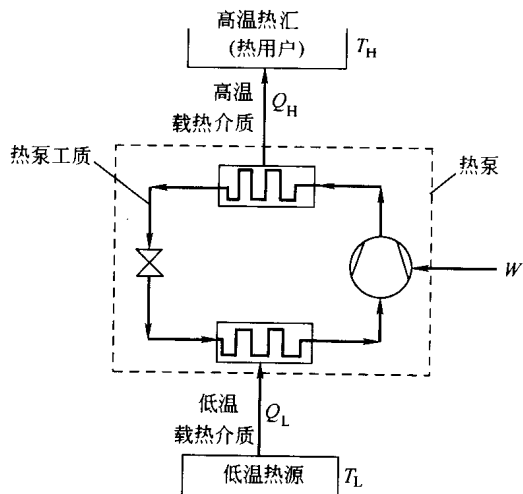


图 1-1 某热泵工作的示意

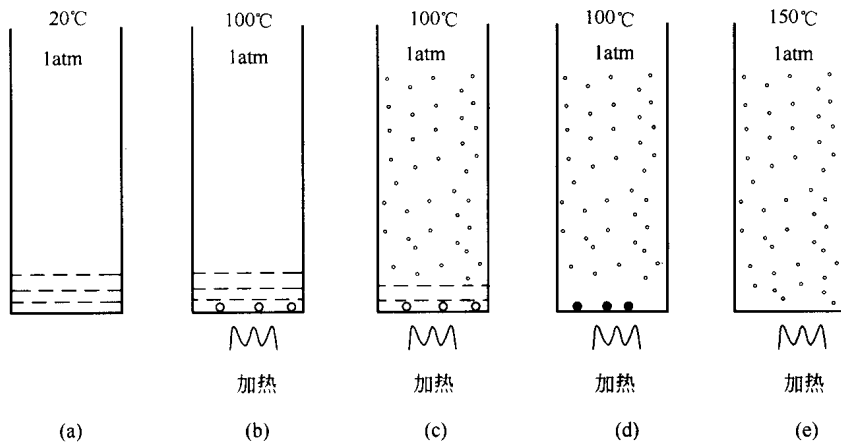


图 1-2 水在 1 大气压 (1atm) 下的各状态示意

(3) 湿蒸气 如图 1-2 (c) 所示, 当工作介质液体的温度等于饱和温度, 且已产生较多蒸气而处于气液共存状态时, 称为湿蒸气 (通常水的蒸气写为蒸汽)。

(4) 饱和气 如图 1-2 (d) 所示, 当工作介质蒸气的温度等于饱和温度, 且饱和液将要被气化完毕时, 此时的蒸气称为饱和气, 也称为饱和蒸气、干饱和蒸气、干饱和气等。

(5) 过热气 如图 1-2 (e) 所示, 当工作介质蒸气中已无饱和液, 且蒸气温度高于饱和温度时, 称为过热气, 也称为过热蒸气。

工作介质的压力不同, 其饱和温度也不同, 但状态变化的过程是相似的 (通常压力越高, 所对应的饱和温度越高, 水及其他工质均遵循这一规律)。

### 1.1.2.2 工作介质的状态参数

状态参数是表征工作介质热力状态的参数。热泵分析和设计中常用的状态参数有: 温度、压力、比容 (密度的倒数)、内能、焓、熵等。

(1) 温度 温度是衡量工作介质冷热程度的参数, 一般用符号  $T$  或  $t$  表示, 常用单位有 K (开尔文)、 $^{\circ}\text{C}$  (摄氏度) 和  $^{\circ}\text{F}$  (华氏度), 相互间的换算如下。

$$\text{摄氏度: } \{t\}_{\text{C}} = \{T\}_{\text{K}} - 273.15$$

$$\text{华氏度: } \{t\}_{\text{F}} = \frac{9}{5} \{T\}_{\text{K}} - 459.67$$

(2) 压力 单位面积上所受的力称为压力, 一般用  $p$  表示, 压力的单位有 Pa (帕斯卡)、atm (大气压)、MPa (兆帕)、kPa (千帕)、bar (巴)、mmHg (毫米汞柱)、mmH<sub>2</sub>O (毫米水柱) 等, 相互间的换算如下。

$$\text{牛顿/平方米: } 1\text{N/m}^2 = 1\text{Pa}$$

$$\text{巴: } 1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

$$\text{毫巴: } 1\text{mbar} = 10^2\text{Pa}$$

$$\text{千帕: } 1\text{kPa} = 10^3\text{Pa}$$

$$\text{兆帕: } 1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

$$\text{标准大气压: } 1\text{atm} = 101325\text{Pa}$$

工程大气压:  $1 \text{at} = 98066.5 \text{Pa}$

千克力/平方厘米:  $1 \text{kgf/cm}^2 = 98066.5 \text{Pa}$

毫米汞柱 (Torr, 托):  $1 \text{mmHg} = 133.324 \text{Pa}$

毫米水柱:  $1 \text{mmH}_2\text{O} = 9.806375 \text{Pa}$

磅力/平方英寸 (psi):  $1 \text{lbf/in}^2 = 6895 \text{Pa}$

工作介质的压力一般用压力表测量, 压力表的读数简称为表压  $p_b$ 。当工作介质的实际压力 (也称绝对压力)  $p$  高于大气压力  $p_a$  时 (大气压力通常取为  $101325 \text{Pa}$ ), 实际压力为大气压力与表压之和

$$p = p_a + p_b \quad (1-1)$$

当工作介质的实际压力低于大气压力时, 表压 (此时为真空表读数) 表示真空度, 实际压力为大气压力与表压之差

$$p = p_a - p_b \quad (1-2)$$

如无特别说明, 公式计算中用到的工作介质压力一般指实际压力。

(3) 密度 密度是单位体积工作介质的质量, 为比容  $v$  的倒数, 一般用  $\rho$  表示, 常用单位有  $\text{kg/m}^3$  (千克/立方米)、 $\text{lb/ft}^3$  (磅/立方英尺) 等, 相互间的换算如下。

吨/立方米:  $1 \text{t/m}^3 = 1000 \text{kg/m}^3$

千克/升:  $1 \text{kg/L} = 1000 \text{kg/m}^3$

克/立方厘米:  $1 \text{g/cm}^3 = 1000 \text{kg/m}^3$

磅/立方英寸:  $1 \text{lb/in}^3 = 27680 \text{kg/m}^3$

磅/立方英尺:  $1 \text{lb/ft}^3 = 16.01845 \text{kg/m}^3$

(4) 内能 是系统中分子动能和势能的总和, 总内能一般用  $U$  表示, 单位质量工作介质的内能一般用  $u$  表示, 常用单位有  $\text{J/kg}$  (焦/千克)、 $\text{kJ/kg}$  (千焦/千克)、 $\text{kcal/kg}$  (千卡/千克)、 $\text{Btu/lb}$  (英制热单位/磅) 等, 相互间的换算如下。

千焦/千克:  $1 \text{kJ/kg} = 1000 \text{J/kg}$

千卡/千克:  $1 \text{kcal/kg} = 4186.8 \text{J/kg}$

英制热单位/磅:  $1 \text{Btu/lb} = 2326 \text{J/kg}$

(5) 焓 工作介质的总焓一般用  $H$  表示, 单位质量工作介质的焓一般用  $h$  表示。设工作介质的内能为  $u$ , 压力为  $p$ , 比容为  $v$ , 则焓的定义式为

$$h = u + pv \quad (1-3)$$

焓的单位与内能相同。

(6) 熵 表示系统中工作介质分子有序程度的参数, 总熵一般用  $S$  表示, 单位质量工作介质的熵一般用  $s$  表示, 熵的单位为  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  (焦/千克·开)、 $\text{Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F})$  [英制热单位/(磅·华氏度)]等, 相互间的换算如下。

千焦/(千克·开):  $1 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 1000 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

卡/(千克·开):  $1 \text{cal}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 4.1868 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

千卡/(千克·开):  $1 \text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 4186.8 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

千瓦·小时/(千克·开):  $1 \text{kW} \cdot \text{h}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 3.6 \times 10^6 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

英制热单位/(磅·华氏度):  $1\text{Btu}/(\text{lb}\cdot^{\circ}\text{F})=4186.8\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

(7) 比热容 单位质量的工作介质温度升高  $1^{\circ}\text{C}$  时所吸收的热量, 也简称为比热。常用的有定压比热容  $C_p$  (压力恒定时的比热容) 和定容比热容  $C_v$  (比容恒定时的比热容), 比热容的单位与熵相同。

当工作介质接近理想气体状态 (温度明显高于工作压力下的饱和温度) 时, 工作介质在状态变化时的内能、焓、熵变化及定压比热容与定容比热容间的关系分别为

$$u_2 - u_1 = C_v(T_2 - T_1) \quad (1-4)$$

$$h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1) \quad (1-5)$$

$$s_2 - s_1 = C_v \ln(T_2/T_1) + R \ln(v_2/v_1) = C_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1) \quad (1-6)$$

$$C_p - C_v = R \quad (1-7)$$

式中,  $R$  为气体常数,  $R=8.3144\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ,  $1\text{mol}=M\text{g}$ ;  $M$  为工作介质的相对分子质量。

当液态工作介质的压力不太高时, 定压比热容和定容比热容相近, 式 (1-5) 也可用于计算液态工作介质的焓变化。

内能、焓、熵的基准点 (零点) 由人为设定, 不同研究者提供的物性数据表中其基准点可能不同, 在使用时需特别注意。

#### 1.1.2.3 工作介质的状态方程

工作介质的状态参数之间有着内在的联系。反映工作介质的温度、压力、比容之间关系的方程, 称为工作介质的状态方程。

利用工作介质的状态方程及理想气体状态下的定压比热容, 就可计算各个热力参数, 如已知温度、压力时计算比容、内能、焓、熵等。

工程中应用较多的状态方程有理想气体状态方程、立方型方程 (如 PR 方程)、硬球微扰型方程 (如 CSD 方程)、维里展开型方程 (如 BWR 方程) 等。其中理想气体状态方程的形式为

$$pv = RT \quad (1-8)$$

式中  $p$ ——实际压力, Pa;

$v$ ——比容,  $\text{m}^3/\text{mol}$ ;

$R$ —— $8.3144\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ;

$T$ ——温度, K。

#### 1.1.2.4 热力学基本定律

(1) 热力学第一定律 热力学第一定律的基本含义是热能和机械能相互转换时总量守恒。设工作介质稳定流过某部件时, 换热量为  $q(\text{kJ}/\text{kg})$ , 所做功为  $w(\text{kJ}/\text{kg})$ , 在进口处的焓为  $h_1(\text{kJ}/\text{kg})$ , 在出口处的焓为  $h_2(\text{kJ}/\text{kg})$ , 则有

$$q = h_2 - h_1 + w \quad (1-9)$$

利用上式并结合具体部件的特点, 可得热泵中部件或辅助设备的特征能量方程。

① 锅炉或各种热交换器。

$$q = h_2 - h_1 \quad (1-10)$$

② 汽轮机、燃气轮机、蒸汽轮机或膨胀机等做功机械。

$$w = h_1 - h_2 \quad (1-11)$$

③ 压缩机、泵或风机等耗功机械。

$$w = h_2 - h_1 \quad (1-12)$$

④ 喷管。设工作介质进喷管的速度为  $c_1$ ，出喷管的速度为  $c_2$ ，有

$$c_2^2 - c_1^2 = 2(h_1 - h_2) \quad (1-13)$$

⑤ 阀、孔板或毛细管等节流部件。

$$h_2 = h_1 \quad (1-14)$$

(2) 热力学第二定律 热力学第二定律的基本含义是自然界的一切过程都具有方向性，包括热能的传递过程、热能与机械能的转换过程等。对热能传递，热力学第二定律可表述为：热能不会自发地、不付代价地从低温物体传到高温物体。因此，热泵工作需要消耗少量的高品位能源。

#### 1.1.2.5 气体工作介质的基本热力过程

(1) 定容过程 工作介质在状态变化过程中比容保持不变，压力与温度成正比。工作介质在定容过程中的换热量为

$$q = C_v(T_2 - T_1) \quad (1-15)$$

(2) 定压过程 工作介质在状态变化过程中压力保持不变，比容和温度成正比。工作介质在定压过程中的换热量为

$$q = C_p(T_2 - T_1) \quad (1-16)$$

(3) 定温过程 工作介质在状态变化过程中温度保持不变，比容和压力成反比。工作介质在定温过程中的换热量和做功量为

$$q = w = RT \ln(p_1/p_2) \quad (1-17)$$

当压缩机采用水冷却时，压缩过程近似为定温过程，其理论耗功量可由式 (1-17) 计算。

(4) 绝热过程 工作介质在状态变化过程中与外界无热量交换（可逆的绝热过程为定熵过程），绝热过程中温度、压力、比容间的关系为

$$(T_1/T_2) = (v_2/v_1)^{\kappa-1} \quad (1-18)$$

$$(p_1/p_2) = (v_2/v_1)^{\kappa} \quad (1-19)$$

式 (1-18) 和式 (1-19) 中  $\kappa$  为绝热指数，其定义式为

$$\kappa = C_p/C_v \quad (1-20)$$

工作介质在绝热过程中的做功量为

$$w = \frac{\kappa}{\kappa-1} R(T_1 - T_2) \quad (1-21)$$



当压缩机采用空气冷却时，压缩过程近似为绝热过程，其理论耗功量可由式 (1-21) 计算。

式 (1-17)、式 (1-18)、式 (1-21) 中温度的单位必须为 K，R 可为  $8.3144\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

### 1.1.3 工作介质的热力性质计算方法

工作介质的热力性质一般是指温度、压力、比容或密度、焓、熵等热力学状态参数。当工作介质为理想气体时，其热力性质计算可用式 (1-4)、式 (1-5)、式 (1-6)、式 (1-8) 计算；当工作介质为非理想气体时，其计算方法为：

工作介质的热物性常数 → 理想气体定压比热容方程 → 状态方程 → 饱和蒸气压方程 → 焓、熵

#### 1.1.3.1 热物性常数

##### (1) 热物性常数简介

① 标准沸点。工作介质在一个大气压下的沸腾温度，用  $T_b$  表示。

② 临界参数。工作介质的温度升高时，其饱和压力升高，饱和气的密度增大，饱和液的密度降低，当饱和气与饱和液的密度相等时，此时的温度称为临界温度  $T_c$ ，压力称为临界压力  $p_c$ ，密度称为临界密度  $\rho_c$ ，临界密度的倒数称为临界比容  $v_c$ ，上述参数统称为临界参数。

③ 临界压缩因子。通常用  $Z_c$  表示，定义式为

$$Z_c = \frac{p_c v_c}{RT_c} \quad (1-22)$$

式中，临界压力  $p_c$  的单位为 Pa；临界温度  $T_c$  的单位为 K；临界比容  $v_c$  的单位为  $\text{m}^3/\text{mol}$ ；R 为  $8.3144\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

④ 偏心因子。是反映工作介质分子大小及形状的参数，用  $\omega$  表示，其定义式为

$$\omega = -\lg(p_r) \big|_{T_r=0.7} - 1.0 \quad (1-23)$$

式中， $p_r$  为对比压力， $T_r$  为对比温度，其定义式为

$$p_r = \frac{p}{p_c} \quad (1-24)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (1-25)$$

$(p_r) \big|_{T_r=0.7}$  是指对比温度为 0.7 时的对比压力。

⑤ 偶极矩。表示分子极性大小的参数，一般用  $\mu$  表示。

热物性常数可在化工、热工手册中查得，也可用基团贡献法估算。

(2) 热物性常数的估算式 对标准沸点、临界参数、偏心因子，其估算式为

$$T_b = \sum_i \Delta T_{bi} + 147.95 \quad (\text{K}) \quad (1-26)$$

$$T_c = T_b / \left( \sum_i \Delta T_{ci} + 0.5888 \right) \quad (\text{K}) \quad (1-27)$$

$$p_c = \left[ 100 / \left( \sum_i \Delta p_{ci} + 11.89 \right) \right]^2 \quad (\text{bar}) \quad (1-28)$$