

21世纪高等院校教材



制冷原理与技术



王如竹 丁国良 吴静怡 连之伟 谷波 编



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书首先介绍制冷与低温的热力学基础,然后介绍制冷技术、低温原理与技术、空气调节原理与技术,最后还介绍了制冷空调中的计算机仿真与控制。

本书适用于热能与动力工程专业、制冷与低温工程专业的本科教学,也可以作为建筑环境与设备专业本科的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

制冷原理与技术/王如竹等编. —北京:科学出版社,2003

(21世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-011342-X

I. 制… II. 王… III. ①制冷-理论②制冷技术 IV TB6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 027187 号

策划编辑:钟 谊/文案编辑:吴伶伶/责任校对:包志虹

责任印制:刘芳平/封面设计:陈 敬

 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年8月第一版 开本: B5(720×1000)

2003年8月第一次印刷 印张: 35 1/2

印数: 1—3 000 字数: 712 000

定价: 48.00元(含光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

前 言

近十余年来,制冷与低温技术飞速发展,传统行业与信息产业得到了有效的结合,制冷空调技术和产品日新月异。新型热力循环得到应用,新型制冷压缩机得到发展,微电子技术已经应用到制冷产品的各个方面,仿真技术在制冷空调系统设计中得到推广应用,制冷空调技术与能源有效利用实现了真正结合,CFCs 替代促进了天然工质的开发研究和应用,各类热泵技术得到空前发展。这些可以归结为制冷技术的系统化、信息化和绿色化。

有关制冷原理及技术的教材国内已经比较多,但从现有情况看:①一些新的已经获得应用的原理与技术未能得到展现,用人单位感觉学生对新技术的了解普遍不够;②教材中,制冷原理及设备的介绍往往分开,低温技术教材也单独存在,作为制冷原理及技术的应用领域——空调往往在教材中不予考虑,可以这么说,制冷、空调、低温被分割成三个不同的领域;③控制技术在制冷空调及低温技术教材中没有得到重视,而这正是目前专业教材跟不上技术发展的重要原因;④现有教材均是根据原制冷设备及低温技术专业的设置编写的,专业口径窄,知识面不足,不能满足现在热动力工程大专业办学需求。

这本适合热动力工程学制冷专业的教材《制冷原理与技术》与现有教材有许多不同,书中所反映的专业方向与知识面大大拓宽,各类新技术和原理得到了充分体现,与热动力工程基础课程衔接良好。本教材还配有电子版多媒体课件,为新一轮教学改革创造了基础。

参加编写的人员均为一线的年轻教授,他们都长期从事制冷、空调及低温技术的教学与科研。编写人员的有机结合能够将“制冷原理与技术”所覆盖的内容进行较好的阐述。本书可以说是将目前小专业办学的几门课程的教材“制冷原理及设备”、“空气调节基础”、“低温技术”、“制冷空调的自动控制”整合成的一本较为系统的专业教材,去掉了原来各教材的重复部分。参加本书编写的有:王如竹(第1章1.1节、1.2节1.2.5、1.3节;第2章2.2节;第3章),丁国良(第2章2.1节2.1.1~2.1.3和2.1.5;第5章5.1节),吴静怡(第2章2.1节2.1.4;第5章5.2节),连之伟(第4章)和谷波(第1章1.2节1.2.1~1.2.4;第2章2.3节)。

根据现代教学的发展要求,本书配备了电子教材,它能强化学生教学并促进师生交流。电子版多媒体教材也是由大家合作完成。

本书适用于热能与动力工程专业、制冷与低温工程专业的本科教学,也可以作为建筑环境与设备本科专业的教学参考书。

编 者

2003年1月10日

目 录

前言

第 1 章 制冷与低温的热力学基础	1
1.1 制冷与低温原理的热工基础	1
1.1.1 制冷与低温原理的热力学基础	1
1.1.2 制冷与低温的获得方法	15
1.1.3 制冷与低温温区的划分	24
1.2 制冷与低温工质	31
1.2.1 制冷剂的发展、应用与选用原则	31
1.2.2 制冷剂命名	33
1.2.3 制冷剂的物理化学性质及其应用	36
1.2.4 常用制冷剂	41
1.2.5 低温液体的性质	49
1.3 制冷技术与学科交叉	56
1.3.1 空气调节	56
1.3.2 人工环境	57
1.3.3 食品冷冻与冷冻干燥	58
1.3.4 低温生物医学技术	59
1.3.5 低温电子技术	59
1.3.6 机械设计	60
1.3.7 红外遥感技术	60
1.3.8 加工过程	60
1.3.9 材料回收	60
1.3.10 火箭推力系统与高能物理	61
第 2 章 制冷技术	62
2.1 蒸气压缩式制冷	62
2.1.1 蒸气压缩式制冷循环	62
2.1.2 蒸气压缩式制冷循环的热力计算	72
2.1.3 蒸气压缩式制冷系统的构成	91
2.1.4 蒸气压缩式制冷装置的自动调节	114
2.1.5 蒸气压缩式制冷的应用	170
2.2 吸收和吸附式制冷	199

2.2.1	吸收和吸附	199
2.2.2	吸收式循环	212
2.2.3	吸附式制冷循环	232
2.3	其他形式的制冷循环	243
2.3.1	空气制冷	243
2.3.2	热电制冷	247
2.3.3	蒸气喷射式制冷循环	252
第3章	低温原理与技术	256
3.1	气体液化与分离	256
3.1.1	气体液化	256
3.1.2	气体分离和纯化系统	281
3.1.3	膜分离技术	303
3.1.4	空气分离系统	304
3.2	低温制冷机	320
3.2.1	焦耳-汤姆逊制冷系统	320
3.2.2	膨胀机制冷系统	324
3.2.3	斯特林制冷机	327
3.2.4	维尔米勒制冷机	329
3.2.5	索尔凡制冷机	331
3.2.6	吉福特-麦克马洪制冷机	332
3.2.7	脉冲管制冷机	336
3.2.8	热声制冷机	345
3.2.9	吸附式制冷机	348
3.2.10	磁制冷	370
3.2.11	稀释制冷机	374
3.3	低温绝热	375
3.3.1	低温绝热原理	375
3.3.2	堆积绝热	376
3.3.3	高真空绝热	377
3.3.4	真空粉末(或纤维)绝热	379
3.3.5	高真空多层绝热	380
3.3.6	高真空多屏绝热	382
3.3.7	各类绝热方法的比较	386
3.3.8	低温储运	386
3.3.9	低温绝热容器的设计方法	391
第4章	空气调节原理与技术	395

4.1	集中式空调系统	395
4.1.1	空气调节的基础知识	395
4.1.2	空调系统负荷的确定	407
4.1.3	空调系统新风量与总风量的确定	416
4.1.4	空气处理及其设备	420
4.1.5	空气调节系统	422
4.1.6	空调房间气流组织	434
4.2	半集中式空调系统	437
4.2.1	风机盘管机组	437
4.2.2	诱导器系统	443
4.2.3	水环热泵系统	447
4.3	分散式空调系统	450
4.3.1	窗式空调器	450
4.3.2	柜式空调器	453
4.3.3	家用中央空调系统	455
4.4	附录	459
4.4.1	湿空气的密度、水蒸气压力、含湿量和焓	459
4.4.2	湿空气焓湿图	461
4.4.3	夏季空调日平均温度、日较差及室外设计计算温度表	462
4.4.4	夏季通过单层 3mm 厚普通玻璃进入室内的太阳辐射热	463
4.4.5	几种构造的传热系数 K	465
4.4.6	设备负荷强度系数	468
4.4.7	照明负荷强度系数	468
4.4.8	人员负荷强度系数	469
第 5 章	制冷空调中的计算机仿真与控制	470
5.1	制冷空调中的计算机仿真	470
5.1.1	仿真技术简介	470
5.1.2	简单对象的建模	471
5.1.3	单级压缩蒸气制冷理论循环的计算机分析	473
5.1.4	单级压缩蒸气制冷装置的计算机模拟	475
5.1.5	制冷装置优化与计算机辅助设计简介	494
5.2	制冷空调系统中的计算机控制	503
5.2.1	制冷空调计算机控制系统的组成	503
5.2.2	制冷空调计算机控制系统的输入输出技术	508
5.2.3	人机接口及抗干扰技术	510
5.2.4	计算机 PID 控制技术在制冷空调系统中的应用	527

5.2.5 现代控制理论在制冷空调系统中的应用	535
5.2.6 单片机在制冷空调系统中的应用	547
5.2.7 PLC 在制冷空调系统中的应用	552
参考文献	558

第 1 章 制冷与低温的热力学基础

1.1 制冷与低温原理的热工基础

1.1.1 制冷与低温原理的热力学基础

1.1.1.1 热力学第一定律

能量守恒与转换定律是自然界的基本规律之一。它指出：自然界中的一切物质都具有能量，能量不可能被创造，也不可能被消灭；但能量可以从一种形态转变为另一种形态，且在能量的转化过程中能量的总量保持不变。热力学第一定律是能量守恒与转换定律在热现象中的应用，它确定了热力过程中热力系与外界进行能量交换时，各种形态能量数量上的守恒关系。

1.1.1.1.1 热力学能和总能

法定计量单位中热力学能的单位是焦耳，用符号 J 表示；热力学能用符号 U 表示，1kg 物质的热力学能称比热力学能，用符号 u 表示，比热力学能的单位是 J/kg。

根据气体分子运动学说，热力学能是热力状态的单值函数。在一定的热力状态下，分子有一定的均方根速度和平均距离，就有一定的热力学能，而与达到这一热力状态的路径无关，因而热力学能是状态参数。由于气体的热力状态可由两个独立状态参数决定，所以热力学能一定是两个独立状态参数的函数，即

$$u = f(T, v) \quad \text{或} \quad u = f(T, p); \quad u = f(p, v) \quad (1-1)$$

除热力学能外，工质的总能量还包含工质在参考坐标系中作为一个整体，固有宏观运动速度而具有动能，因有不同高度而具有位能。前一种能量称之为内部储存能，后两种能量则称之为外部储存能。热力学能和机械能是不同形式能量，但是可以同时储存在热力系统内。我们把内部储存能和外部储存能的和，即热力学能与宏观运动动能及位能的总和，叫做工质的总储存能，简称总能。

若总能用 E 表示，动能和位能分别用 E_k 和 E_p 表示，则

$$E = U + E_k + E_p \quad (1-2)$$

若工质的质量为 m ，速度为 c_i ，在重力场中的高度为 z ，则宏观动能为

$$E_k = \frac{1}{2} mc_i^2$$

重力位能为

$$E_p = mgz$$

式中, c_f 、 z 是力学参数, 它们只取决于工质在参考系中的速度和高度。

这样, 工质的总能可写成

$$E = U + \frac{1}{2} mc_f^2 + mgz \quad (1-3)$$

1kg 工质的总能, 即比总能 e , 可写为

$$e = u + \frac{1}{2} c_f^2 + gz \quad (1-4)$$

1.1.1.1.2 能量的传递和转化

能量从一个物体传递到另一个物体可有两种方式: 一种是做功, 另一种是传热。借做功来传递能量总是和物体的宏观位移有关。如气缸中的工质膨胀对活塞做功, 只有通过工质和活塞的分界面的宏观位移才有可能。这种位移停止了, 做功也就停止了。做功的结果是工质把一部分能量传递给了活塞和飞轮, 成为它们的动能。同时, 工质的能量就减少了与此完全相应的一个数量。反之, 当活塞压缩工质做功时, 飞轮和活塞把它们的动能传递给工质, 使工质的能量增加。借传热来传递能量就不需要有物体的宏观移动。当热源和工质接触时, 接触处两个物体中杂乱运动的质点进行能量交换, 结果是高温物体把能量传递给低温物体, 传递能量的多少用热量来度量。

由上面分析可知, 一般说来, 在做功过程中往往伴随着能量形态的转化。在工质膨胀推动活塞做功的过程中, 工质把热力学能传递给活塞和飞轮, 成为动能, 此时热力学能转变成了机械能。当过程反过来进行时, 活塞和飞轮的动能(机械能)又转变成了工质的热力学能。进一步还可看出, 热能变机械能的过程实际上是由两类过程所组成。一是能量转换的热力学过程, 在此过程中, 首先由热能传递转变为工质的热力学能, 然后由工质膨胀把热力学能变为机械能, 转换过程中工质的热力状态发生变化, 能量的形式也发生变化。二是单纯的机械过程, 在此过程中, 由热能转换而得的机械能再变成活塞和飞轮的动能, 若考虑工质本身的速度和离地面高度的变化, 则还变成工质的动能和位能, 其余部分则通过机器轴对外输出。

功的形式除了膨胀功或压缩功这类与系统的界面移动有关的功外, 还有因工质在开口系统中流动而传递的功, 这种功叫做推动功。对开口系统进行功的计算时需要考虑这种功。

图 1-1(a)所示为工质经管道进入气缸的过程。设工质的状态参数是 p 、 v 、 T , 用 p - v 图中点 C 表示, 移动过程中工质的状态参数不变。工质作用在面积为 A 的

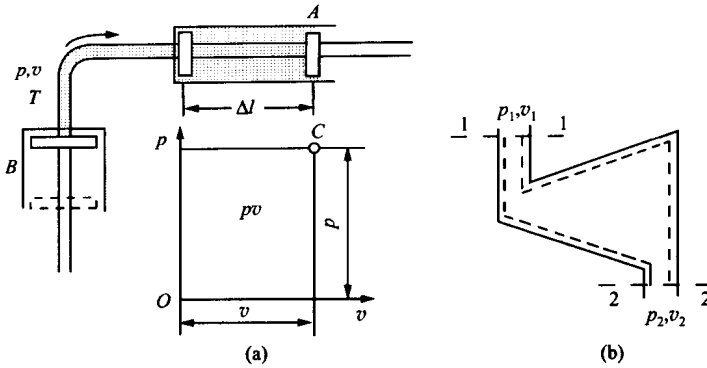


图 1-1 流动过程中的推动功图

活塞上的力为 p_A ，当工质流入气缸时推动活塞移动了距离 Δl ，所做的功为 $p_A \Delta l = pV = mpv$ 。式中 m 表示进入气缸的工质质量。这一份功叫做推动功。1kg 工质的推动功等于 pv ，如图 1-1 中矩形面积所示。

在作推动功时工质的状态没有改变，当然它的热力学能也未改变。传递给活塞的能量显然是别处传来的，譬如在后方某处有另外一个活塞在推动工质使它流动。这样的物质系称为外部功源；它与系统只交换功量。例如，对于汽轮机，蒸汽进入汽轮机所传递的推动功来源于锅炉中定压吸热汽化的水在汽化过程中的膨胀功。锅炉中不断汽化的水即是进入汽轮机蒸汽的外部功源。工质，如蒸汽，在移动位置时总是从后向前获得推动功，而对前面做出推动功，即使没有活塞存在时也完全一样。工质在传递推动功时没有热力状态的变化，当然也不会有能量形态的变化，此外工质所起的作用只是单纯地运输能量，像传输带一样。

需要强调的是，推动功只有在工质移动位置时才起作用。

下面进一步考察开口系统和外界之间功的交换。如图 1-1(b) 所示，取一开口系统，当 1kg 工质从截面 1-1 流入该热力系时，工质带入系统的推动功为 $p_1 v_1$ ，工质在系统中进行膨胀，由状态 1 膨胀到状态 2，做膨胀功，然后从截面 2-2 流出，带出系统的推动功为 $p_2 v_2$ 。推动功 $\Delta(pv) = p_2 v_2 - p_1 v_1$ 是系统为维持工质流动所需的功，称为流动功。在不考虑工质的动能及位能变化时，开口系统与外界交换的功量是膨胀功与流动功之差 $w - (p_2 v_2 - p_1 v_1)$ 。若计及工质的动能及位能变化，则还应计入动能差及位能差。

在各种方式的能量传递过程中，往往是在工质膨胀作功时实现热能向机械能的转化。机械能转化为热能的过程虽然还可以由摩擦、碰撞等来完成，但只通过对工质压缩做功的转化过程才有可能成为可逆的，所以热能和机械能的转换总是与工质的膨胀和压缩联系在一起的。

1.1.1.1.3 焓

由于流体流动过程均包含内能和流动功($U + pV$), 因而为了简化起见可定义一个物理量焓, 即

$$H = U + pV \quad (1-5)$$

1kg 工质的焓称为比焓, 用 h 表示, 即

$$h = u + pv \quad (1-6)$$

式(1-6)就是焓的定义。从式中可以看出, 焓的单位是 J, 比焓的单位是 J/kg。从上式还可以看出, 焓是一个状态参数。在任一平衡状态下, u 、 p 和 v 都有一定的值, 因而焓 h 也有一定的值, 而与达到这一状态的路径无关。这符合状态参数的基本性质, 满足状态参数的定义, 因而焓也就一定具备状态参数的其他特点。从式(1-1)知, u 既然可以表示成 p 和 v 的函数, 所以

$$h = u + pv = f(p, v) \quad (1-7)$$

因此, 焓也可以表示成另外两个独立状态参数的函数, 即

$$h = f(p, T), \quad h = f(T, v) \quad (1-8)$$

同样还有

$$\Delta h_{1-a-2} = \Delta h_{1-b-2} = \int_1^2 dh = h_2 - h_1 \quad (1-9)$$

在热力设备中, 工质总是不断地从一处流到另一处, 随着工质的移动而转移的能量不等于热力学能而等于焓, 故在热力工程的计算中焓有更广泛的应用。

1.1.1.1.4 热力学第一定律的基本能量方程式

热力学第一定律的能量方程式就是系统变化过程中的能量方程式, 是分析状态变化过程的根本方程式, 它可以从系统状态变化过程中各项能量的变化和它们的总量守恒这一原则推出。把热力学第一定律的原则应用于系统中的能量变化时可写成如下形式:

$$\text{进入系统的能量} - \text{离开系统的能量} = \text{系统中储存能量的增加} \quad (1-10)$$

式(1-10)是系统能量平衡的基本表达式, 任何系统、任何过程均可据此原则建立其平衡式。对于闭口系统, 进入和离开系统的能量只包括热量和做功两项; 对于开口系统, 因有物质进出分界面, 所以进入系统的能量和离开系统的能量除以上两项外, 还有随同物质带进、带出系统的能量。由于这些区别, 热力学第一定律应用于不同热力系统时, 可得不同的能量方程。

(1) 闭口系统的能量平衡

取气缸活塞系统中的工质为系统,考察其在状态变化过程中和外界(热源和机器设备)的能量交换。由于过程中没有工质越过边界,所以这是一个闭口系。当工质从外界吸入热量 Q 后从状态 1 变化到状态 2,并对外界做功 W 。若工质的宏观动能和位能的变化可忽略不计,则工质(系统)储存能的增加即为热力学能的增加 ΔU ,于是根据式(1-10)得

$$Q - W = \Delta U = U_2 - U_1$$

或

$$Q = \Delta U + W \quad (1-11)$$

式中, U_2 和 U_1 分别表示系统在状态 2 和状态 1 下的热力学能。式(1-11)是热力学第一定律应用于闭口系而得的能量方程式,是最基本的能量方程式,叫做热力学第一定律的解析式。它表明加给工质的热量一部分用于增加工质的热力学能,储存于工质内部,余下的一部分以做功的方式传递至外界。在状态变化过程中,转化为机械能的部分为 $Q - \Delta U$ 。

对于一个微元过程,第一定律解析式的微分形式是

$$\delta Q = dU + \delta W \quad (1-12a)$$

对于 1kg 工质,则有

$$q = \Delta u + w \quad (1-12b)$$

及

$$\delta q = du + \delta w \quad (1-12c)$$

式(1-12)直接从能量守恒与转化的普遍原理得出,没作任何假定,因此它对闭口系是普遍适用的。它适用于可逆过程也适用于不可逆过程。对工质性质也没有限制,无论是理想气体还是实际气体,甚至是液体都适用。为了确定工质初态和终态热力学能的值,要求工质初态和终态是平衡状态。

式(1-11)中热量 Q 、热力学能变量 ΔU 和功 W 都是代数值,可正可负。系统吸热 Q 为正,系统对外做功 W 为正;反之则为负。系统的热力学能增大时, ΔU 为正,反之则为负。

对于可逆过程($\delta W = pdV$),所以有

$$\delta Q = dU + pdV, \quad Q = \Delta U + \int_1^2 pdV \quad (1-13)$$

或

$$\delta q = du + pdv, \quad q = \Delta u + \int_1^2 pdv \quad (1-14)$$

对于循环过程,有

$$\oint \delta Q = \oint dU + \oint \delta W$$

完成一个循环后,工质恢复到原来状态 ($\oint dU = 0$), 因而有

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (1-15)$$

即闭口系完成一个循环后,它在循环中与外界交换的热量等于与外界交换的净功量。用 Q_{net} 和 W_{net} 分别表示循环净热量和净功量,则有

$$Q_{\text{net}} = W_{\text{net}} \quad (1-16)$$

$$q_{\text{net}} = w_{\text{net}}$$

(2) 开口系统的能量平衡

对于图 1-2 所示的开口系统,在 $d\tau$ 时间内,质量为 δm_1 (体积为 dV_1) 的微元工质流入进口截面 1-1,质量为 δm_2 (体积为 dV_2) 的微元工质流出出口截面 2-2,同时系统从外界得到热量 δQ ,对机器设备做功 δW_i 。 W_i 是工质在机器内部对机器所做的功,称为内部功,以别于机器的轴上向外传出的轴功 W_s 。两者的差额是机器各部分摩擦引起的损失。完成该微元过程后系统内工质质量增加了 dm , 系统总能增加了 dE_{CV} 。

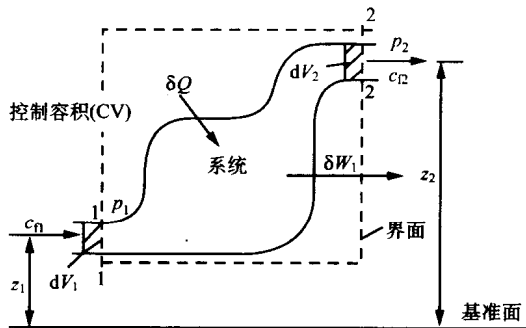


图 1-2 开口系统流动过程中的能量平衡图

考查该微元过程的能量平衡,进入系统的能量($dE_1 + p_1 dV_1 + \delta Q$),离开系统的能量($dE_2 + p_2 dV_2 + \delta W_i$),控制容积中储存能的增量 dE_{CV} 。其中总能($E = U +$

$E_k + E_p$)。由式(1-10)有

$$dE_1 + p_1 dV_1 + \delta Q - (dE_2 + p_2 dV_2 + \delta W_i) = dE_{cv} \quad (1-17)$$

整理得

$$\delta Q = dE_{cv} + (dE_2 + p_2 dV_2) - (dE_1 + p_1 dV_1) + \delta W_i \quad (1-18)$$

由 $E = me$, $V = mv$, $h = u + pv$, 得

$$\delta Q = dE_{cv} + \left(h_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + gz_2 \right) \delta m_2 - \left(h_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + gz_1 \right) \delta m_1 + \delta W_i \quad (1-19)$$

如果流进、流出控制容积的工质有若干股, 则式(1-19)可改写为

$$\delta Q = dE_{cv} + \sum_j \left(h + \frac{1}{2} c_i^2 + gz \right)_{out} \delta m_{out} - \sum_i \left(h + \frac{1}{2} c_i^2 + gz \right)_{in} \delta m_{in} + \delta W_i \quad (1-20)$$

对于稳定流动, $\frac{dE_{cv}}{d\tau} = 0$, $\sum \frac{\delta m_{in}}{d\tau} = \sum \frac{\delta m_{out}}{d\tau}$, 对于如图 1-2 所示的系统只有单股流体进出, 则 $q_{m1} = \frac{\delta m_1}{d\tau} = q_{m2} = \frac{\delta m_2}{d\tau} = q_m$, 代入式(1-19), 得

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_i^2 + g \Delta z + W_i \quad (1-21)$$

或写成微量形式

$$\delta q = dh + \frac{1}{2} dc_i^2 + g dz + \delta W_i \quad (1-22)$$

式中, q 和 W_i 分别是 1kg 工质进入系统后, 系统从外界吸入的热量和在机器内部做的功。

当流入质量为 m 的流体时, 稳定流动能量方程可写为

$$Q = \Delta H + \frac{1}{2} m \Delta c_i^2 + mg \Delta z + W_i \quad (1-23)$$

$$\delta Q = dH + \frac{1}{2} m dc_i^2 + mg dz + \delta W_i$$

1.1.1.1.5 能量方程式的应用

在制冷与低温设备中, 主要涉及压缩机、膨胀机、换热器、管道、节流阀等, 热力学第一定律能量方程式可以获得方便的应用。

如图 1-3 所示,工质流经压缩机时,机器对工质做功 w_c ,使工质升压,工质对外放热 q ,动能和位能差可以忽略不计。从稳定流动能量方程式(1-21)可得对于每千克工质需做的功,即

$$w_c = (h_2 - h_1) + (-q) \quad (1-24)$$

针对实际情况, q 值可以是 0,此时表现为绝热压缩,压缩后气体温升显著。但如对压缩机汽缸进行冷却,当冷却足够好时,压缩过程可以是等温过程,等温压缩在制冷与低温设备中大量应用。

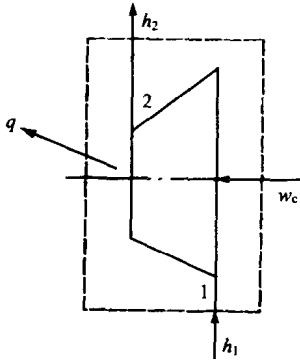


图 1-3 压缩机能量平衡图

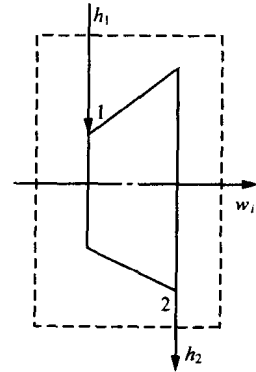


图 1-4 膨胀机能量平衡图

在图 1-4 所示的膨胀机系统中,高压气体工质进入膨胀机膨胀,对外做功,工质本身降温。为了提高膨胀效率,使工质降温显著,膨胀过程均采用绝热过程,其稳定流动能量平衡方程为

$$w_i = h_1 - h_2 \quad (1-25)$$

制冷工质流经换热器(图 1-5)时和外界有热量交换而无功的交换,动能差和位能差也可忽略不计。如工质流动是稳定的,则从式(1-21)可得 1kg 的工质吸热量为

$$q = h_2 - h_1 \quad (1-26)$$

工质流经一般管道时动能和位能均不改变。然而在流经喷管和扩压管这类设备时(图 1-6),不对设备做功,因为喷管长度短、工质流速大,来不及与外界进行热交换,故热量交换也可忽略不计。若流动稳定,则可得 1kg 工质动能的增加为

$$\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) = h_1 - h_2 \quad (1-27)$$

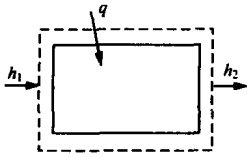


图 1-5 换热器能量平衡图

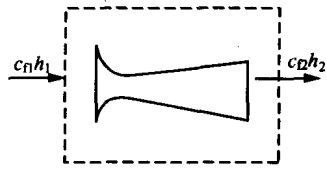


图 1-6 喷管能量转换图

如图 1-7 所示,工质流过阀门时流动截面突然收缩,压力下降,这种流动称为节流。由于存在摩擦和涡流,流动是不可逆的。在离阀门不远的两个截面处,工质的状态趋于平衡。设流动是绝热的,前后两个截面间的动能差和位能差忽略不计,由于过程中无对外做功,由此得节流前后的焓相等,即

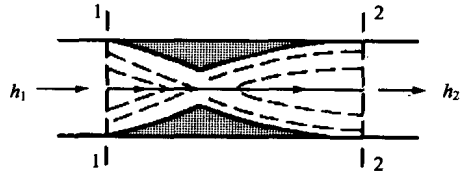


图 1-7 节流现象图

$$h_1 = h_2 \quad (1-28)$$

式(1-28)只对节流前后稳定段成立,而不适合节流过程段。

1.1.1.2 热力学第二定律

功可以转化为热,而热不可以自动转化为功;热量从高温自动传向低温,而不能自动从低温传向高温;气体可以从高压自由膨胀到低压,然而不会自动压缩;两种流体可以在一起自动混合,然而混合物却不会自动分离。温差传热、自由膨胀、混合等过程是在温度差、压力差、浓度差等作用下进行的过程,而在有限势差作用下的过程是非准平衡过程,非准平衡变化是造成过程不可逆的因素。不可逆是自发过程的重要特征和属性,也即是一个熵增过程。热力学第二定律是研究与热现象相关的各种过程进行的方向、条件及限度的定律。

热力学第二定律可以表述为:热不能自发地、不付代价地从低温物体传到高温物体。制冷/热泵过程就是一个从低温热源吸热排放给高温热源的过程,为了实施这个过程需要消耗功。

1.1.1.2.1 制冷循环的热力学分析

热力学循环可分为正向循环和逆向循环两种。动力循环,即把热能转化为机械功的循环是正向循环。所有的热力发动机都是按正向循环工作的。在温-熵图或压焓图上,循环的各个过程都是依次按顺时针方向变化的。

逆向循环是一种消耗功的循环。所有的制冷机或热泵都是按逆向循环工作

的。在温-熵图或压焓图上,循环的各个过程都是依次按逆时针方向变化的。

循环又可以分为可逆循环和不可逆循环两种。在构成循环的各个过程中,只要包含有不可逆过程,则这个循环就是不可逆循环。在制冷循环里,各种形式的不可逆过程可分成两类:内部不可逆和外部不可逆。制冷剂在其流动或状态变化过程中,因摩擦、扰动及内部不平衡而引起的损失,都属于内部不可逆;蒸发器、冷凝器及其他换热器中有温差时的传热损失,属于外部不可逆。

有些循环除了一二个不可避免的不可逆过程外,其余均为可逆过程。这样的循环以及可逆循环都称为理想循环。下面介绍的循环除特别指明外都假定为理想循环。

研究逆向理想循环的目的,是要寻找热力学上最完善的制冷循环,作为评价实际循环效率高低的标准。

热力学第二定律涉及的温度 T 为热力学温度(K),其值与摄氏温度 t 之间存在的关系式为

$$T = 273.16 + t \quad (1-29)$$

在热力学第二定律分析中,常用到物理量比熵 s ,熵是热力学状态参数,它是判别实际过程的方向,提供过程能否实现、是否可逆的判据,其定义式为

$$ds = \frac{\delta q_{rev}}{T} \quad (1-30)$$

式中: q_{rev} ——可逆过程的换热量;

T ——工质温度(热源温度)。

显然从以上定义式可以看到 1kg 工质在恒温下吸热量与温度之比即为熵增。

可逆过程 1-2 的熵增可以表示为

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{\delta q_{rev}}{T} \quad (1-31)$$

对于可逆循环,显然有

$$\oint \frac{\delta q_{rev}}{T} = 0 \quad (1-32)$$

以上积分称为克劳修斯积分, $\oint \frac{\delta q_{rev}}{T}$ 等于零为可逆循环,小于零为不可逆循环,大于零为不可能实行的循环。

由于熵是一个相对量,因而往往通过基准点进行定义,对于 p 、 T 状态下的比熵可以定义为

$$s_{p,T} = s_{p_0,T_0} + \int_{p_0,T_0}^{p,T} \frac{\delta q}{T} \quad (1-33)$$