



常规兵器环境模拟 试验技术

(下册)

马 力 主 编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十五”统编教材

科研试验系列

常规兵器环境模拟试验技术

(下 册)

马 力 主 编

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

常规兵器环境模拟试验技术 / 马力主编. —北京: 国防工业出版社, 2007. 12

总装部队军事训练“十五”统编教材. 科研试验系列
ISBN 978 - 7 - 118 - 05402 - 6

I. 常... II. 马... III. 常规武器 - 环境模拟 - 模拟试验 - 教材 IV. TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 162252 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 7 $\frac{7}{8}$ 字数 227 千字

2007 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 50.00 元(上、下册)

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

目 录

(下 册)

| | |
|-------------------------------|-----|
| 第 7 章 低温试验设备 | 347 |
| 7.1 制冷技术的热力学基础 | 347 |
| 7.1.1 制冷基本原理及获得低温的基本方法 | 347 |
| 7.1.2 逆向可逆循环、制冷循环的热力完善度 | 351 |
| 7.2 蒸汽压缩式制冷循环 | 356 |
| 7.2.1 逆卡诺循环 | 356 |
| 7.2.2 单级压缩蒸汽式制冷循环 | 357 |
| 7.2.3 双级压缩蒸汽式制冷循环 | 358 |
| 7.2.4 复叠式制冷循环 | 360 |
| 7.3 空气制冷循环 | 361 |
| 7.3.1 无回冷空气制冷循环 | 361 |
| 7.3.2 回冷空气制冷循环 | 362 |
| 7.4 蒸汽吸收式制冷 | 363 |
| 7.4.1 蒸汽吸收式制冷技术基础 | 363 |
| 7.4.2 蒸汽吸收式制冷原理 | 363 |
| 7.4.3 溴化锂吸收式制冷设备组成 | 365 |
| 7.5 氨制冷设备 | 366 |
| 7.5.1 氨制冷系统设备 | 367 |
| 7.5.2 氨制冷系统的运行 | 371 |
| 7.5.3 氨制冷系统的安全技术 | 372 |
| 7.6 液氮制冷技术 | 377 |

| | | |
|-------------|----------------------|------------|
| 7.6.1 | 液氮制冷技术基础 | 377 |
| 7.6.2 | 液氮制冷主要设备 | 378 |
| 第8章 | 空气调节设备 | 380 |
| 8.1 | 环模室空气调节技术基础 | 380 |
| 8.1.1 | 环模室的空调工艺条件 | 380 |
| 8.1.2 | 环模室空调设备的组成概况 | 381 |
| 8.2 | 环模室空气调节设备 | 384 |
| 8.2.1 | 环模室的空调工艺流程 | 384 |
| 8.2.2 | 室内空调设备 | 386 |
| 8.2.3 | 夹套空调设备 | 387 |
| 8.2.4 | 室内排烟系统 | 388 |
| 8.2.5 | 除湿补气空调系统 | 388 |
| 8.2.6 | 蒸汽加湿系统 | 389 |
| 8.3 | 空调设备的工作原理和工作过程 | 390 |
| 8.3.1 | 空调箱的降温过程 | 390 |
| 8.3.2 | 电加热器的加热过程 | 391 |
| 8.3.3 | 空调箱的加湿过程 | 392 |
| 第9章 | 砂尘试验设备 | 394 |
| 9.1 | 砂尘试验技术基础 | 394 |
| 9.1.1 | 试验用砂尘 | 394 |
| 9.1.2 | 试验装置的基本组成 | 397 |
| 9.2 | 扬尘试验设备 | 415 |
| 9.2.1 | 设备组成 | 415 |
| 9.2.2 | 工作原理 | 420 |
| 9.3 | 砂尘试验辅助设备 | 422 |
| 9.3.1 | 标定设备 | 422 |
| 9.3.2 | 砂尘加工设备 | 423 |
| 第10章 | 淋雨试验设备 | 425 |
| 10.1 | 淋雨试验技术基础 | 425 |
| 10.1.1 | 基本定义 | 425 |

| | | |
|---------------|----------------------|------------|
| 10.1.2 | 降雨设备基础知识 | 426 |
| 10.2 | 振动式淋雨试验设备 | 431 |
| 10.2.1 | 设备基本原理及组成 | 431 |
| 10.2.2 | 布雨器及雨强控制 | 432 |
| 10.2.3 | 辅助设备 | 441 |
| 10.2.4 | 设备操作 | 441 |
| 10.2.5 | 设备的维护保养 | 443 |
| 10.3 | 防水性试验和滴雨试验设备 | 443 |
| 10.3.1 | 防水性试验设备 | 443 |
| 10.3.2 | 滴雨试验设备 | 444 |
| 10.3.3 | 设备相关问题说明 | 446 |
| 10.3.4 | 典型的试验程序 | 448 |
| 第 11 章 | 浸河水试验设备 | 450 |
| 11.1 | 浸河水试验技术基础 | 450 |
| 11.1.1 | 河水含沙量和流速 | 450 |
| 11.1.2 | 泥沙的性质与分析 | 451 |
| 11.1.3 | 试验装置的基本组成 | 454 |
| 11.2 | 浸河水试验设备 | 460 |
| 11.2.1 | 浸河水试验设备组成及工作原理 | 461 |
| 11.2.2 | 浸河水试验装置操作使用 | 469 |
| 11.2.3 | 维护保养 | 472 |
| 11.2.4 | 设备常见的故障及解决方法 | 473 |
| 第 12 章 | 盐雾试验设备 | 476 |
| 12.1 | 概述 | 476 |
| 12.2 | 盐雾试验技术基础 | 478 |
| 12.2.1 | 盐雾的破坏作用 | 478 |
| 12.2.2 | 盐雾的腐蚀机理 | 479 |
| 12.2.3 | 试验的基本因素 | 479 |
| 12.3 | 盐雾试验箱 | 481 |
| 12.3.1 | 技术指标 | 481 |

| | | |
|-------------|-----------------|------------|
| 12.3.2 | 设备原理及组成 | 482 |
| 12.3.3 | 设备操作 | 485 |
| 12.3.4 | 设备维护保养及注意事项 | 486 |
| 12.3.5 | 设备常见故障及排除 | 487 |
| 12.4 | 步入式盐雾试验设备 | 488 |
| 12.4.1 | 试验室组成 | 488 |
| 12.4.2 | 盐雾试验设备组成 | 488 |
| 12.5 | 盐雾试验的实现 | 502 |
| 12.5.1 | 盐雾干燥交变试验 | 502 |
| 12.5.2 | 连续喷雾试验 | 503 |
| 第13章 | 力学试验设备 | 504 |
| 13.1 | 力学试验技术基础 | 504 |
| 13.1.1 | 力学试验 | 504 |
| 13.1.2 | 力学试验相关问题说明 | 505 |
| 13.2 | 振动试验设备 | 507 |
| 13.2.1 | 振动试验 | 507 |
| 13.2.2 | 振动试验设备 | 507 |
| 13.3 | 冲击试验设备 | 519 |
| 13.3.1 | 冲击试验 | 519 |
| 13.3.2 | 冲击试验设备 | 521 |
| 13.4 | 加速度试验设备 | 530 |
| 13.4.1 | 加速度试验 | 530 |
| 13.4.2 | 加速度试验设备 | 532 |
| 第14章 | 太阳辐射试验设备 | 536 |
| 14.1 | 光源系统 | 536 |
| 14.1.1 | 光源 | 536 |
| 14.1.2 | 灯具 | 539 |
| 14.1.3 | 辐照度的控制方式 | 542 |
| 14.1.4 | 辐照均匀度检测 | 542 |
| 14.2 | 灯架及升降系统 | 542 |

| | | |
|---------------|-----------------------------|------------|
| 14.2.1 | 灯架组成 | 542 |
| 14.2.2 | 活动灯架微调升降机构 | 543 |
| 14.3 | 测控系统 | 543 |
| 14.3.1 | 中央控制台 | 543 |
| 14.3.2 | PLC 控制柜 | 544 |
| 14.3.3 | 配电柜 | 544 |
| 14.3.4 | 三相交流稳压器 | 544 |
| 14.3.5 | 灯阵控制箱 | 545 |
| 14.3.6 | 辐照度多点测量定位控制系统 | 545 |
| 14.3.7 | 整体灯架升降定位控制系统 | 545 |
| 14.3.8 | 辐照度测量系统 | 545 |
| 14.3.9 | 连接电缆系统 | 546 |
| 14.4 | 试验操作 | 546 |
| 14.4.1 | 试验准备 | 546 |
| 14.4.2 | 试验过程 | 546 |
| 第 15 章 | 低气压和温度冲击综合试验设备 | 548 |
| 15.1 | 概述 | 548 |
| 15.2 | 低气压和温度冲击综合试验设备 | 549 |
| 15.2.1 | 温压舱 | 549 |
| 15.2.2 | 高温舱 | 551 |
| 15.2.3 | 制冷系统 | 553 |
| 15.2.4 | 加温系统 | 555 |
| 15.2.5 | 真空系统 | 556 |
| 15.2.6 | 辅助设备 | 556 |
| 15.2.7 | 测控系统 | 557 |
| 15.3 | 低气压和温度冲击试验的实现 | 560 |
| 15.3.1 | 常压低温试验 | 560 |
| 15.3.2 | 常压高温试验 | 560 |
| 15.3.3 | 低气压试验 | 561 |
| 15.3.4 | 低温低气压试验 | 561 |

| | | |
|-------------|-----------------------------|------------|
| 15.3.5 | 高温低气压试验 | 562 |
| 15.3.6 | 温度冲击试验 | 562 |
| 第16章 | 环境模拟试验设备常用测控技术 | 563 |
| 16.1 | 环境模拟试验设备参数测量技术基础 | 563 |
| 16.1.1 | 压力 | 563 |
| 16.1.2 | 温度 | 564 |
| 16.1.3 | 湿度 | 565 |
| 16.1.4 | 尘土浓度 | 567 |
| 16.2 | 压力测量 | 568 |
| 16.2.1 | 静压 | 568 |
| 16.2.2 | 动压 | 568 |
| 16.3 | 温度测量 | 569 |
| 16.3.1 | 液体温度计测温 | 569 |
| 16.3.2 | 热电偶温度计 | 569 |
| 16.3.3 | 电阻温度计 | 569 |
| 16.4 | 湿度测量 | 570 |
| 16.4.1 | 用干湿球温度计测相对湿度 | 570 |
| 16.4.2 | 电容式湿度仪测湿 | 571 |
| 16.4.3 | 其它测湿方法 | 572 |
| 16.5 | 常用测控技术 | 573 |
| 16.5.1 | 温度控制 | 574 |
| 16.5.2 | 湿度控制 | 576 |
| 16.5.3 | 压力控制 | 579 |
| 16.5.4 | 尘土浓度测控 | 582 |
| 参考文献 | | 589 |

第 7 章 低温试验设备

从低于环境温度的物体中吸取热量,并将其转移给环境介质的过程,称为制冷。由于热量不能自动地从低温物体传给高温物体,因此实现制冷必须包括消耗能量(如电能、热能、机械能或太阳能等)的补偿过程。

制冷和低温这两个概念是以制取低温的温度来区分的。通常,从环境温度到 -153°C 的范围属于制冷,而从 -153°C 以下到 -273°C 的范围属于低温。

实现制冷所必需的机器,称为制冷机。它是指完成制冷循环所必需的机器和设备的总称。例如,单级蒸汽压缩式制冷机包括压缩机、蒸发器、冷凝器和节流阀;单级吸收式制冷机包括发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器和节流阀等。在制冷机中,除转动的压缩机、泵等机器外,还包括换热器及各种辅助设备,统称为制冷设备。而将制冷机同使用冷量的设施结合在一起的装置称为制冷装置,如冰箱、空调、冷库等。

除半导体制冷外,制冷机都依靠内部循环流动的工作介质来实现制冷过程,即把热量从被冷却物体转移到环境介质中,完成这种功能的工作介质,称为制冷剂,也叫制冷工质。

7.1 制冷技术的热力学基础

7.1.1 制冷基本原理及获得低温的基本方法

制冷是把低温热源中的热量转移到高温热源的过程。根据热源温度的不同,实现这种热量转移的机器种类包括制冷机、热泵及联合机(能同

时制冷与制热的机器)等3种。图7-1是这3种机器工作原理的示意图。

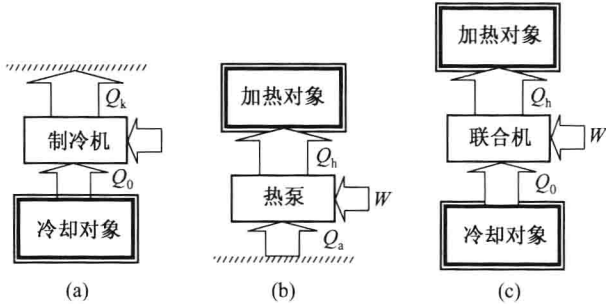


图7-1 制冷机、热泵和联合机的工作原理

(a) 制冷机; (b) 热泵; (c) 联合机。

在图7-1中,制冷对象是指需要降低到比环境温度更低的温度的空间或物体,如冷库、试验室等;加热对象是指需要加热到比环境温度更高的温度的空间或物体,如暖房。不论是制冷还是制热,或同时制冷和制热,都需要消耗能量 W 。

从热力学的角度考虑,制冷机、热泵和联合机,尽管工作的温度区间不同,但它们的基本原理是一样的,即利用某种工质的状态变化,从较低温度的热源吸取一定的热量(Q_0 或 Q_a),通过消耗功(或热量),向较高温度的热源放出热量 Q_k 或 Q_h 。在这一过程中,向高温热源的放热量等于从低温热源吸取的热量与所消耗的功之和,即

$$\text{制冷机: } Q_0 + W = Q_k$$

$$\text{热 泵: } Q_a + W = Q_h$$

$$\text{联合机: } Q_0 + W = Q_h$$

为了实现上述能量转换,必须经历使制冷剂达到比环境介质更低的温度的过程,并连续不断地从被冷却物体吸取热量。在制冷技术范围内,实现这一过程有下述几种基本方法。

(1) 相变制冷。利用液体在低温下的蒸发过程或固体在低温下的融化或升华过程从被冷却物体吸取热量——制取冷量。

(2) 气体膨胀制冷。高压气体经绝热膨胀即可达到较低的温度,令低压气体复热即可制取冷量。

(3) 气体涡流制冷。高压气体经涡流管膨胀后即可分离为冷、热两股气流,利用冷气的复热即可制冷。

(4) 热电制冷。令直流电通过半导体热电堆,即可在一端产生冷效应,在另一端产生热效应。

从实际应用的角度出发,这里只介绍气体膨胀制冷及相变制冷中的液体气化制冷,其它制冷方法可参考有关书籍。

7.1.1.1 相变制冷

1. 液体汽化

蒸汽压缩式制冷机、吸收式制冷机以及蒸汽喷射式制冷机都是利用液体制冷剂的汽化来制冷的。

任何液体汽化时都要吸收热量,在一定压力下 1kg 液体汽化时所吸收的热量称为汽化潜热 r (kJ/kg),即

$$r = h'' - h' = T(s'' - s') \quad (7-1)$$

在相同压力下,不同工质的汽化潜热不同,而对于同一种液体,汽化潜热也随其蒸发压力的变化而变化,一般有如下规律。

(1) 工质的分子量越小,其汽化潜热的数值越大。

(2) 对任何一种介质,随着蒸发压力的提高,其汽化潜热不断减小,当达到临界状态时汽化潜热为零。

在制冷机的工作过程中,在低温下蒸发的制冷剂液体都是令高压液体经节流降压而得到的。较高压力的饱和液体节流降压后即进入两相区,并闪发出一定的饱和蒸气。对于 1kg 制冷剂,若用 x 表示闪发后的干度,则当其余液体全部转变为饱和蒸气时吸收的热量为

$$q_0 = r(1 - x) \quad (7-2)$$

q_0 一般称为单位制冷量。从式(7-2)可知,单位制冷量不仅与汽化潜热有关,还随节流后的干度而变。制冷剂液体在节流前后压力变化范围越大,则节流过程闪发的气体越多,因而单位制冷量就越小。

2. 固体的融化与升华

在制冷技术中经常应用冰或干冰(固体二氧化碳)的升华过程来制冷。干冰可以由高压液态二氧化碳用降压法得到,而冰则需用制冷机制备。冰和干冰都不具备流动性,只能用作二次冷源,不能利用它们的融化或升华过程来组成制冷机的循环。

7.1.1.2 气体膨胀制冷

在气体制冷机中,利用高压气体的绝热膨胀以达到低温,并利用膨胀后的气体在低压下的复热过程来制冷。气体绝热膨胀的特性随所用的设备而变,一般有两种方式。一种方式是令高压气体经膨胀机(活塞式或透平式)膨胀,此时有外功输出,因而气体的温降大,复热时制冷量也大,在一般的气体制冷机中均采用此膨胀方式,但膨胀机结构比较复杂;另一种方式是令气体经节流阀膨胀(通常称为节流),此时无外功输出,气体的温降小,制冷量也小,在气体制冷机中很少使用,但节流阀结构简单,且便于进行气体流量的调节。某重武器环境模拟试验室采用的就是高压气体通过涡轮膨胀机对外输出功的制冷方式,在此简单介绍有外功输出的膨胀过程。

当气体实现有外功输出的绝热膨胀时,最理想的情况是可逆的绝热膨胀——等熵膨胀,等熵膨胀中温度随微小压力变化而变化的关系可表示为

$$\alpha_s = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_s = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (7-3)$$

α_s 称为微分等熵效应,对于理想气体, $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{P}$, 故

$$\alpha_{s, id} = \frac{k-1}{k} \frac{T}{P} \quad (7-4)$$

膨胀过程的温差称为积分效应,有

$$\Delta T = \int_{P_1}^{P_2} \alpha_s dp \quad (7-5)$$

对于理想气体经过演算以后可得

$$\Delta T = T_2 - T_1 = T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (7-6)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (7-7)$$

在实际膨胀过程中,由于过程的不可逆,因此总是按多变过程膨胀,这时,理想气体的积分效应由下式确定,即

$$\Delta T = T_2 - T_1 = T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] \quad (7-8)$$

7.1.2 逆向可逆循环、制冷循环的热力完善度

在热力学里,循环可分为正向循环和逆向循环两种。动力循环,即把热量转化成机械功的循环,是正循环。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,所有的制冷机都是按逆向循环工作的,在温熵($T-s$)图或压焓($P-h$)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。制冷剂气体在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能量损失,属于内部不可逆;蒸发器、冷凝器及其它换热器中有温差时的传热损失,属于外部不可逆。

研究逆向可逆循环的目的,是要寻找热力学上最完善的循环,作为评价实际循环效率高低的标准。

7.1.2.1 热源温度不变时的逆向可逆循环——逆卡诺循环

当高温热源和低温热源的温度不变时,具有两个可逆的等温过程和两个等熵过程的逆向循环,称为逆卡诺循环,它是消耗功最小的循环,即效率最高的制冷循环,因为它没有任何不可逆损失。

图7-2表示了以气体及制冷剂蒸汽为工质的逆卡诺循环的 $T-s$

图,1-2(或1'-2')为等熵压缩过程,3-4是等熵膨胀过程,2-3(或2'-3)是等温放热过程,4-1(或4-1')是等温吸热过程。高温热源(即环境介质)的温度为 T ,低温热源(即被冷却对象)的温度为 T'_0 ,它们分别等于制冷剂放热时的温度 T_k 和吸热时的温度 T_0 。

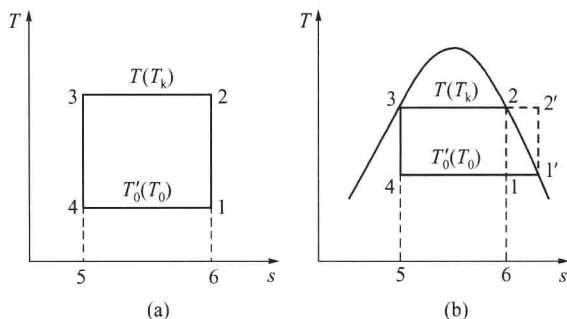


图 7-2 逆卡诺循环的 $T-s$ 图

(a) 以气体为工质; (b) 以制冷剂蒸汽为工质。

如图 7-2 所示,在循环 1-2-3-4 中,制冷剂向高温热源(环境介质)放出的热量为

$$q = T(s_2 - s_3) \quad (7-9)$$

在 $T-s$ 图上以面积 2-3-5-6-2 表示。在 1-4 过程中,制冷剂从被冷却对象所吸取的热量(称为制冷量)为

$$q_0 = T'_0(s_1 - s_4) \quad (7-10)$$

循环所消耗的功 W_0 等于压缩过程(1-2 和 2-3)所消耗的功与膨胀过程(3-4 和 4-1)所获得的功之差为

$$W_0 = (T - T'_0)(s_1 - s_4) \quad (7-11)$$

在 $T-s$ 图上以面积 1-2-3-4-1 表示。

消耗单位功所获得的制冷量的值(用相同的能量单位),称为制冷系数。逆卡诺循环的制冷系数为

$$\varepsilon_0 = \frac{q_0}{w_0} = \frac{T'_0}{T - T'_0} = \frac{1}{\frac{T}{T'_0} - 1} \quad (7-12)$$

从式(7-12)可以看出,逆卡诺循环的制冷系数与 T'_0 成正比,与 $T - T'_0$ 成反比,在一定的高温热源或低温热源下它是一定值,也就是说,逆卡诺循环的制冷系数只与高温热源或低温热源的温度有关,而与制冷剂的性质无关。

由式(7-12)可得

$$\frac{\partial \varepsilon_0}{\partial T'_0} = \frac{T}{(T - T'_0)^2}, \quad \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial T} = -\frac{T'_0}{(T - T'_0)^2}$$

故

$$\left| \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial T'_0} \right| > \left| \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial T} \right| \quad (7-13)$$

因此, T 升高和 T'_0 降低都将导致逆卡诺循环制冷系数的降低,而 T'_0 降低影响的程度更为显著。

再来分析一下具有传热温差(外部不可逆)的循环,如图7-3所示。

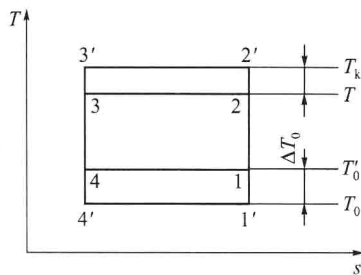


图7-3 有传热温差的逆向循环

图7-3中高温热源温度为 T ,制冷剂向高温热源放热时的温度为 T_k ,低温热源的温度为 T'_0 ,制冷剂向低温热源吸热时的温度为 T_0 。显然,若 $1'-2'$ 和 $3'-4'$ 是可逆过程,则循环 $1'-2'-3'-4'$ 的制冷系数为下式,它将小于按式(7-12)计算的 ε_0 。

$$\varepsilon = \frac{T_0}{T_k - T_0} \quad (7-14)$$

由此可知,任何一个不可逆循环的制冷系数,总是小于相同热源温度时的逆卡诺循环的制冷系数,而一切实际的制冷循环都是不可逆循环。因此,制冷系数 ε 总是小于相同热源的逆卡诺循环的制冷系数 ε_0 。

热力完善度的定义为

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (7-15)$$

式中 ε ——实际循环的制冷系数;

ε_0 ——可逆的卡诺循环的制冷系数。

实际制冷循环的制冷系数随高温热源和低温热源的溫度不同以及过程的不可逆程度而变化,其值可以大于1或小于1,而热力完善度是表示实际循环的完善性接近逆卡诺循环的程度,其值恒小于1,也称循环效率。

7.1.2.2 变温热源时的逆向可逆循环

制冷机在实际工作中,被冷却对象的温度和环境介质的温度往往是随着热交换过程的进行而变化的。例如,在食品冷藏的预冷过程中,进入冷库时温度很高,随着预冷过程的进行,其温度逐渐降低。又如,冷却水或空气流经冷凝器时,由于吸取了热量,其温度也逐渐升高。在这种热源温度变化的情况下,逆向可逆循环的情况需要具体分析。

图7-4表示了高温热源和低温热源温度是变化的情况。在这种情况下,如果要运用一个卡诺循环,则制冷剂向高温热源的放热过程应是 $b-g$, 它的温度等于热源温度 T_b 至 T_c 之间的最高温度 T_b ; 制冷剂在蒸发过程中向被冷却物体吸热时的温度应该是 T_d , 它等于被冷却物体由 T_c 至 T_d 之间的最低温度 T_d 。

点 e 的位置根据表示制冷量的面积 $e-d-d'-e'$ 是否等于 $a-d-d'-a'$ 而定,这个循环为了获得面积为 $e-d-d'-e'$ 的制冷量需要消耗面积为 $f-g-d-e$ 的功。

若制冷机按可逆循环 $b-c-d-a-b$ 工作,则它在制取面积为 $a-d-$