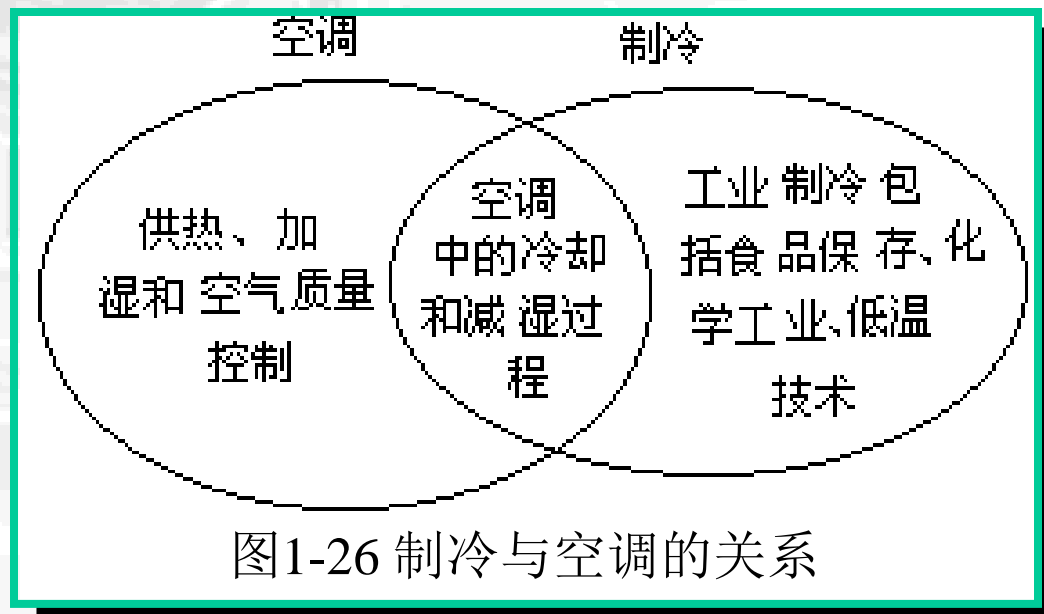
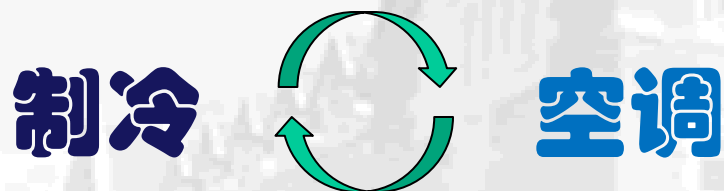


第六章 制冷与空调

第一节 概述



制冷循环 能量转换 性能评价

一、制冷的定义与分类

制冷的定义：用人工的方法在一定时间和一定空间内将物体冷却，使其温度降低到环境温度以下，保持并利用这个温度。

120K

制冷 120K以上

低温 120K~0.3K

极低温 0.3K以下

K	°C	应用
300~273	27~0	热泵、冷却装置、空调装置
273~263	0~-10	苛性钾结晶、冷藏运输、
263~240	-10~-33	冷冻运输、食品长期保鲜、燃气（丙烷等）液化装置
240~223	-33~-50	滚筒装置的光滑冻结、矿井工作面冻结
223~200	-50~-73	低温环境实验室、制取干冰
200~150	-73~-123	乙烷、乙烯液化。低温医学和低温生物学
150~100	-123~-173	天然气液化
100~50	-173~-223	空气液化、分离，稀有气体分离，合成气体分离、氢及氩气还原，液氧、液氮
50~20	-223~-253	氦和氢液化，宇航仓空间环境模拟
20~4	-253~-269	超导，氦液化
4~10 ⁻⁶	-269~-273	³ He的液化、 ⁴ He超流动性，Josephson效应、测量技术、物理研究

制冷方法

液体汽化制冷

气体膨胀制冷

涡流管制冷

热电制冷

磁制冷、绝热放气制冷、电化学制冷



液体汽化制冷

1. 蒸汽压缩式制冷

2. 蒸汽吸收式制冷

3. 蒸汽喷射式制冷

4. 吸附制冷

二、制冷研究的内容

- 获得低于环境温度的方法、机理、循环
- 制冷剂
- 气体的液化和分离技术
- 制冷的机械和设备

三、制冷技术的应用

1、商业及人民生活方面

食品的冷冻冷藏、舒适性空调

2、工业生产及农牧业：

机械仪表工业：
钢铁工业：
化学工业：
农牧业：
建筑业：

3、科学研究：

模拟低温环境

4、医疗卫生：

冷冻医疗：

细胞组织、疫苗、药品的低温保存：

冷冻干燥：

5、空间技术：

6、低温物理研究：

低温声学、低温光学、低温电子学、超导技术

第二节 蒸汽压缩式制冷原理

制冷循环：可逆循环和不可逆循环

一、制冷循环

- 恒温热源的理想制冷循环——逆卡诺循环
- 变温热源的理想制冷循环——劳伦兹循环
- 理想热泵循环

热工知识：热力学第一定律和热力学第二定律

(1) 正循环（生产功）和逆循环（消耗功）

所有的热力发动机都是**正循环**
 制冷机和热泵都是**逆循环**

(2) 可逆循环和不可逆循环

(3) 内部不可逆和外部不可逆

内部不可逆：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；

外部不可逆：蒸发器、冷凝器及其他换热器中有温差时的传热损失。

一、恒温热源的理想制冷循环——逆卡诺循环

• 逆卡诺循环

逆卡诺循环：是工作于两个热源之间效率最高的制冷循环。

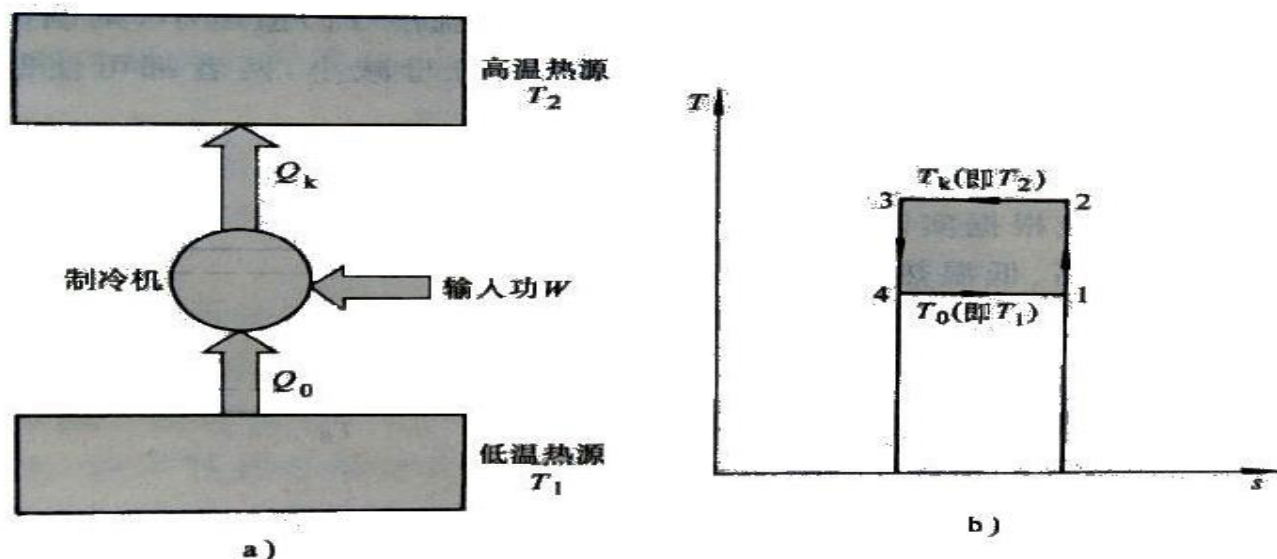


图 6-1 制冷循环热力学原理图和逆卡诺循环的 $T-s$ 图
 a) 制冷循环热力学原理图 b) 气体为工质的逆卡诺循环的 $T-s$ 图

1、逆卡诺循环

无内部和外部不可逆

循环过程及循环分析

2-3放热量：

$$q_k = T_2(s_2 - s_3) = T_k(s_1 - s_4)$$

在1-4过程的吸热量：

$$q_0 = T_1(s_1 - s_4) = T_0(s_1 - s_4)$$

循环过程的消耗功：

$$w = (T_2 - T_1)(s_1 - s_4) = (T_k - T_0)(s_1 - s_4)$$

$$q_k = q_0 + w$$

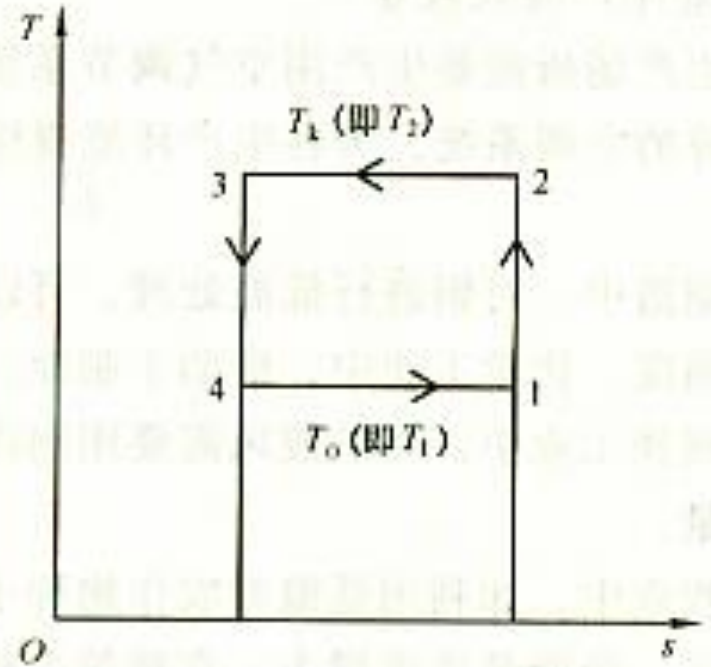


图1-2 逆卡诺循环在T-S图上的表示

1、逆卡诺循环

制冷系数：

$$\varepsilon_c = q_0 / w = \frac{T_1(S_1 - S_4)}{(T_2 - T_1)(S_1 - S_4)} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{T_0}{T_k - T_0} \quad 6-2$$

制冷系数的特性：

- 1、高温高，低温低，制冷系数小
- 2、低温比高温对它影响程度大
- 3、与循环介质无关
- 4、其值可大于1，小于1，或等于1

2、对温度的限制及热力完善度

逆卡诺循环是在没有传热温差和没有任何损失的可逆情况下进行的，所以其在实际上是无法实现的，但可以作为评价实际制冷循环完善度的标准。

热力完善度：

热力完善度表示制冷机实际循环接近逆卡诺循环的程度，其数值恒小于1。

$$\eta = \varepsilon / \varepsilon_c$$

6-3

二、变温热源的理想制冷循环——劳伦兹循环

- 实际上，不可避免的存在温差传热的不可逆损失
- 劳伦兹循环是外部热源为变温热源时的理想制冷循环。
- 经济指标：

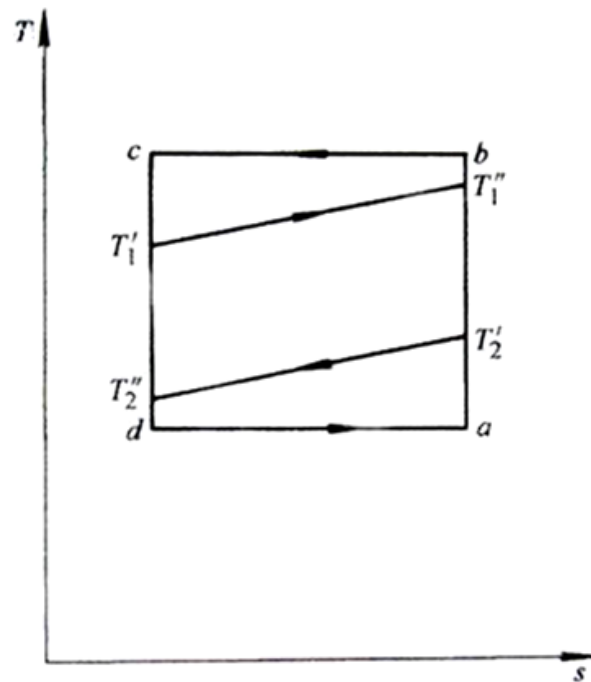


图 6-3 变温热源与逆卡诺循环

相当于平均当量温度概念上的逆卡诺循环

$$\varepsilon_L = T_{om} / (T_{km} - T_{om})$$

6-4

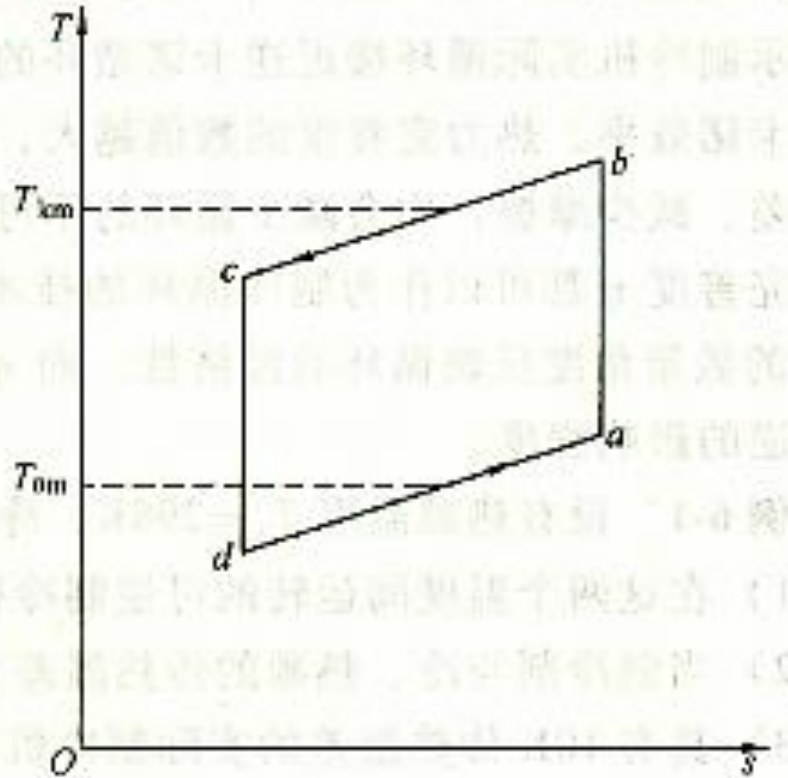


图 6-4 劳伦兹循环的 T-s 图

三、理想热泵循环

- 什么是热泵循环？
- 理想热泵循环还是逆卡诺循环，只是其使用目的和工作温度的范围有所不同
- 供热系数：

$$\varepsilon_h = \frac{q_k}{w} = \frac{q_0 + w}{w} = \varepsilon_c + 1 \quad 6-5$$

- 热泵的使用有利于节能

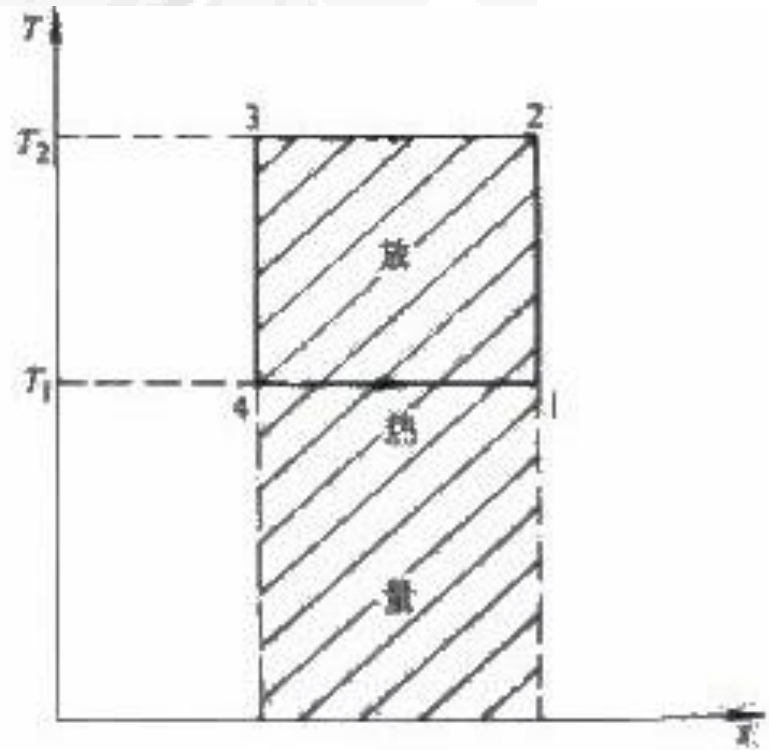
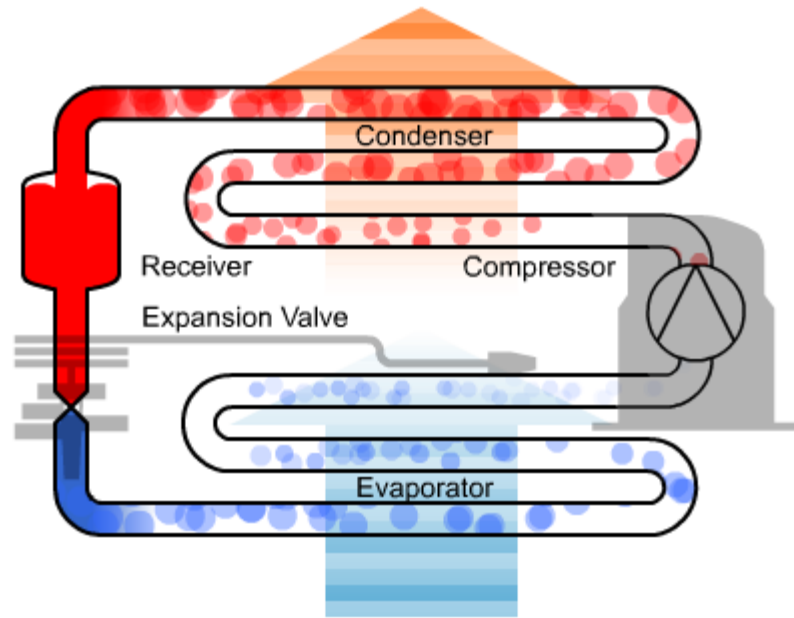
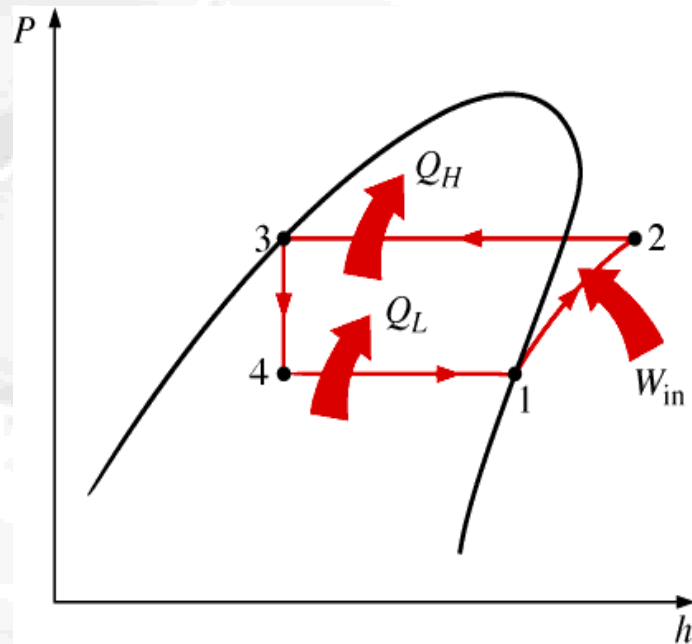
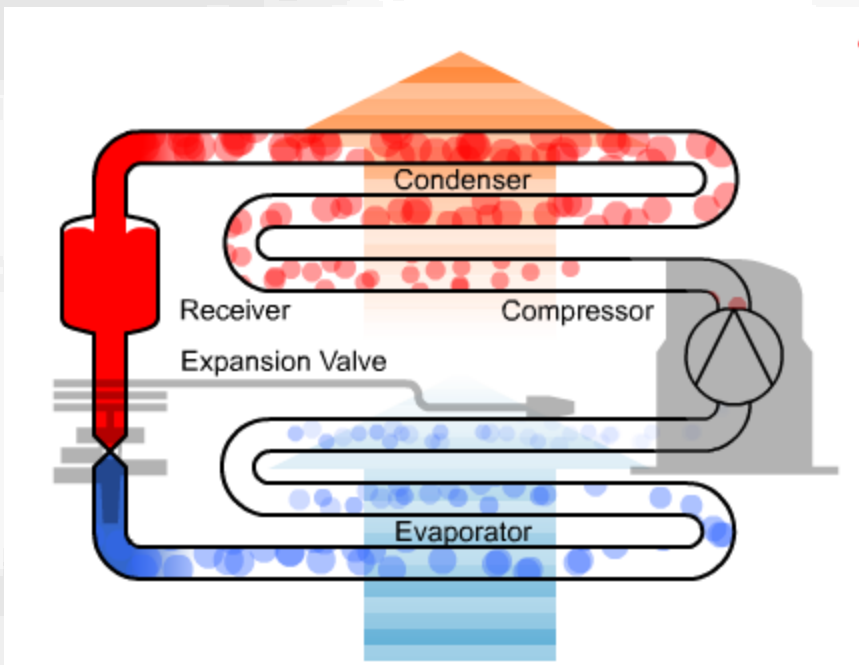


图 6 5 逆卡诺热泵循环

二、蒸汽压缩式制冷系统

- 压缩机
- 冷凝器
- 膨胀阀
- 蒸发器





制冷剂

无机物

NH_3 、 CO_2

氟里昂

R_{22} 、 R_{134a} 、 R_{407c}

碳氢化合物

CH_4 、 C_2H_4

ODP

GWP

作为制冷剂应符合的要求

1. 热力学性质方面

(1) 工作温度范围内有合适的压力和压力比。

- ▶ 蒸发压力 \geq 大气压力，以免系统出现负压
- ▶ 冷凝压力不要过高，以免设备笨重
- ▶ 冷凝压力与蒸发压力之比不宜过大，降低输气系数

(2) 单位制冷量 q_0 和单位容积制冷量 q_v 较大。

(3) 比功 w 和单位容积压缩功 w_v 小，循环效率高。

(4) 等熵压缩终了温度 t_2 不能太高，以免润滑条件恶化或制冷剂自身在高温下分解。

2. 迁移性质方面

- (1) 粘度、密度尽量小。
- (2) 导热系数大，可提高传热系数，减少传热面积。

3. 物理化学性质方面

- (1) 无毒、不燃烧、不爆炸、使用安全。
- (2) 化学稳定性和热稳定性好。
- (3) 对大气环境无破坏作用。

4. 其它

- ▶ 原料来源充足，制造工艺简单，价格便宜。

载冷剂

要求：在使用温度范围内不凝固、不汽化；无毒，化学稳定性好，对金属不腐蚀、不燃烧、不爆炸；比热容大，输送一定冷量所需流量小，以减少输送载冷剂的循环泵功率；密度小、粘度小，可减小流动阻力；热导率大，以减少热交换设备的传热面积；价格低廉，易于购买。

常用的载冷剂有空气、水、盐水、有机化合物及其水溶液等。

2、蒸气压缩式制冷系统的理论循环——逆卡诺循环的修改

- 干压缩代替 湿压缩
- 节流阀代替膨胀机

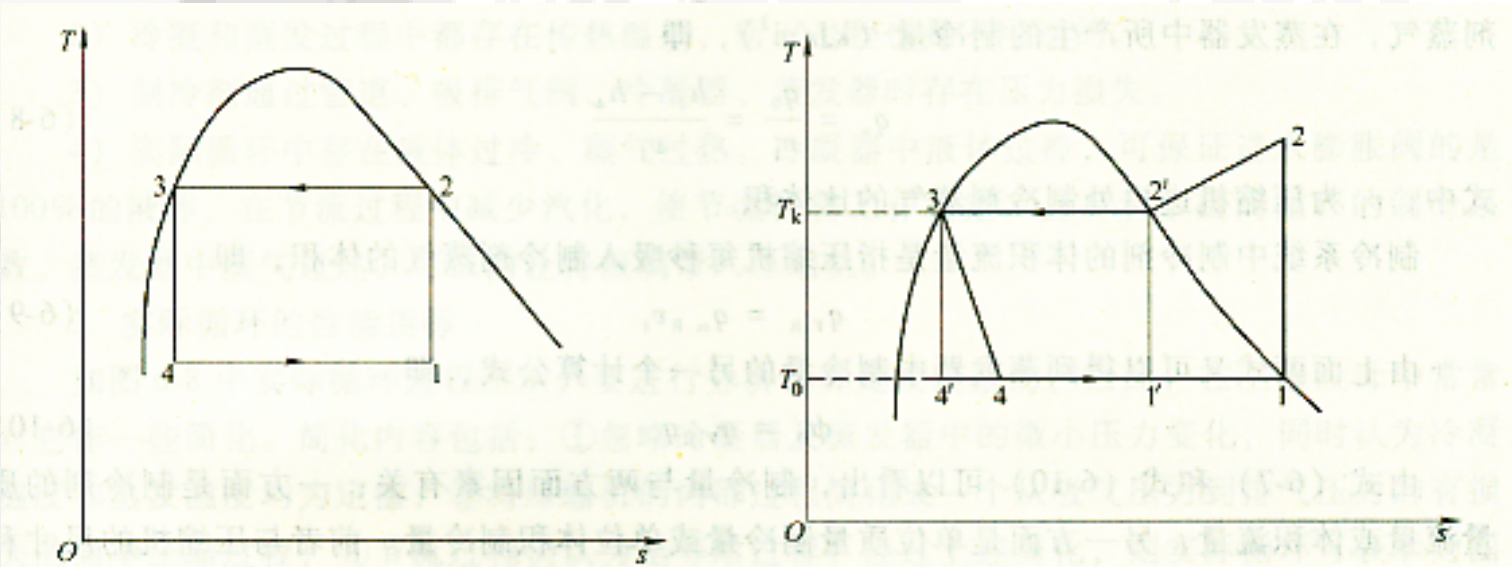


图 6-6 在湿蒸气区域内蒸气压缩式制冷的逆卡诺循环

图 6-7 蒸气压缩式制冷的理论循环

3.理论循环的性能指标

压-焓图

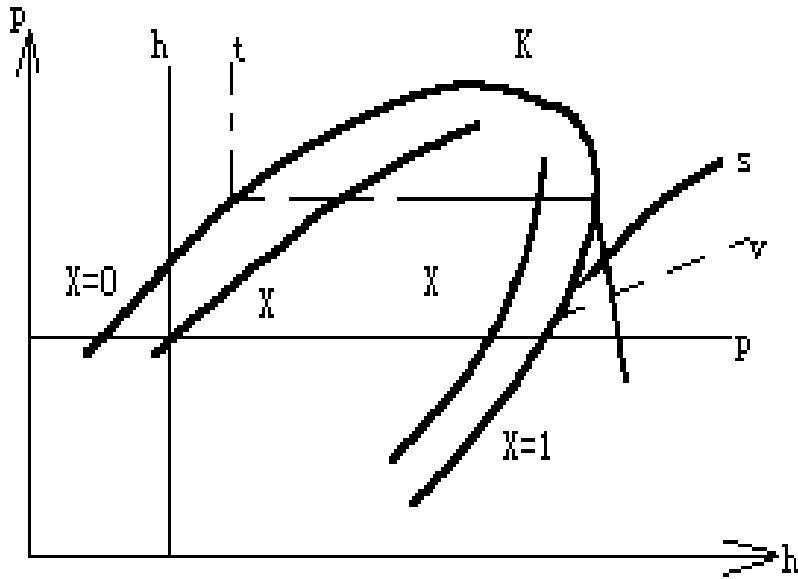


图 2 压焓图

P—水平线

H—垂直线

T—过冷液体区几乎是垂直线，
两相区水平线，过热蒸汽区
向右下弯曲的倾斜线

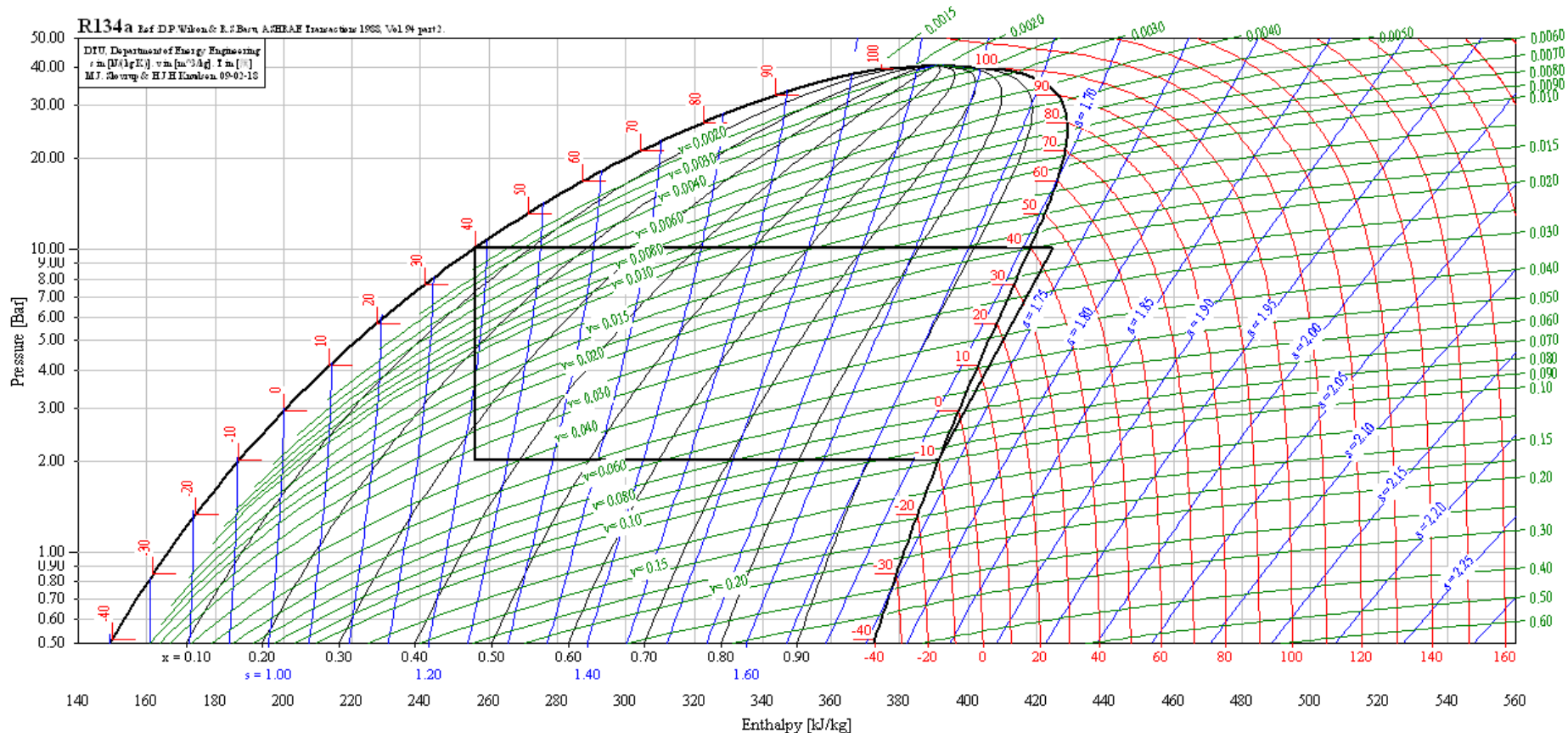
S—向右上方倾斜的实线

V—向右上方倾斜的虚线比等熵
线平坦

X—只存在于湿蒸汽区域内，其
方向大致与饱和液体线或饱
和蒸汽线相近。

压-焓图的使用

- 要求 (1) 表示过程 (吸热或放热)
 (2) 查各点参数 (温度、压力、焓、熵、比容、状态, 过冷度和过热度):
 过程: 从点1 (温度 -10°C , 压力2 bar) 等熵变化到点2 (压力10 bar) 再等压变化到点3 (温度 40°C), 再次等焓变化到点4 (压力2 bar), 最后等压回到点1。



3、理论循环的性能指标

稳定流动
能量方程

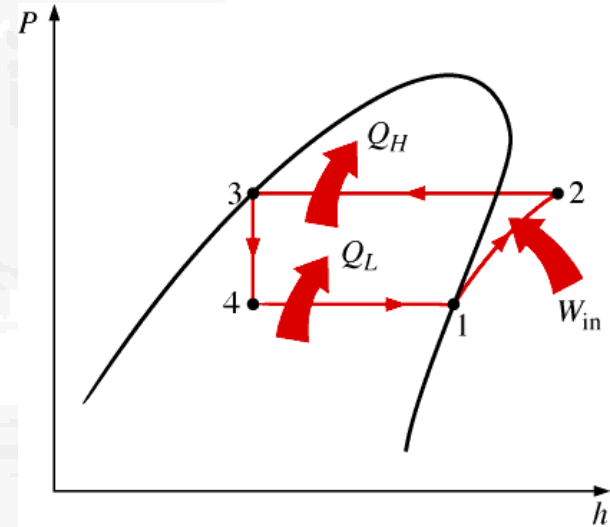
$$dq = dh - dw$$

单位质量制冷量

$$q_0 = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 \quad (6-6)$$

制冷剂的质量流量

$$q_{m,R} = \frac{\phi_0}{q_0} = \frac{\phi_0}{h_1 - h_4} \quad (6-7)$$



单位体积制冷量

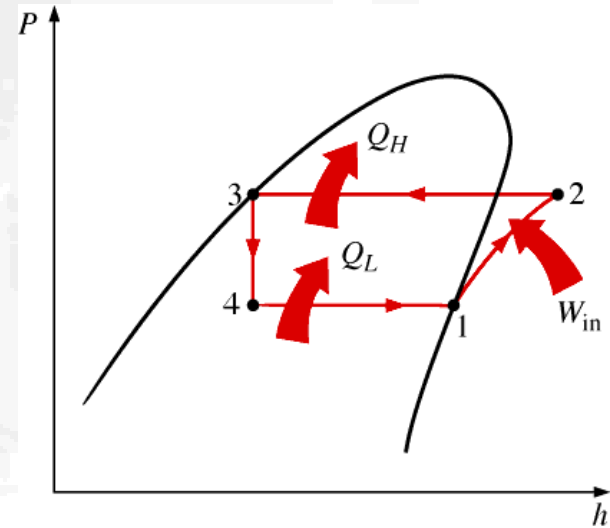
$$q_v = \frac{q_0}{v_1} = \frac{h_1 - h_4}{v_1} \quad (6-8)$$

制冷剂的体积流量

$$q_{v,R} = q_{m,R} v_1 \quad (6-9)$$

制冷量

$$\phi_0 = q_{v,R} q_v \quad (6-10)$$



单位冷凝热量

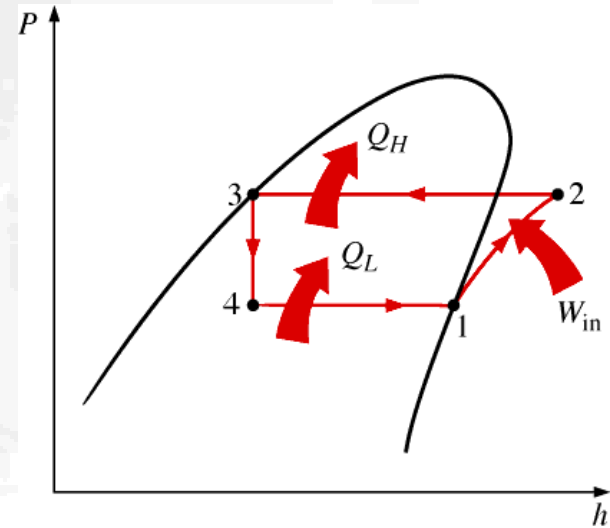
$$q_k = h_2 - h_3 \quad (6-11)$$

制冷剂的冷凝热负荷

$$\phi_k = q_{m,R} q_k = q_{m,R} (h_2 - h_3) \quad (6-12)$$

单位理论压缩功

$$w_0 = h_2 - h_1 \quad (6-13)$$

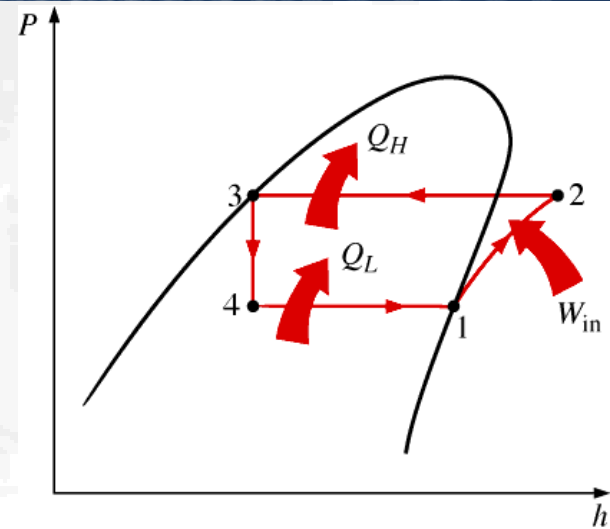


压缩机消耗的理论功率

$$P_0 = q_{m,R} (h_2 - h_1) \quad (6-14)$$

制冷系数

$$\varepsilon_0 = \frac{\phi_0}{P_0} = \frac{q_0}{w_0} \quad (6-1)$$



(二) 蒸气压缩式制冷系统的实际循环及其性能指标

- 实际循环
- 实际压缩过程 不是等熵过程
- 冷凝和蒸发过程中存在传热温差
- 制冷剂通过管道、吸排气阀、冷凝器、蒸发器时存在压力损失
- 实际循环中存在液体过冷、蒸气过热。

2、实际循环的性能指标

- 合理简化
- 忽略冷凝器及蒸发器中的微小压力变化，认为冷凝温度和蒸发温度为定值
- 压缩机内部过程简化为一个从吸气压力到排气压力的有损失的简单压缩过程
- 节流过程认为是等焓过程

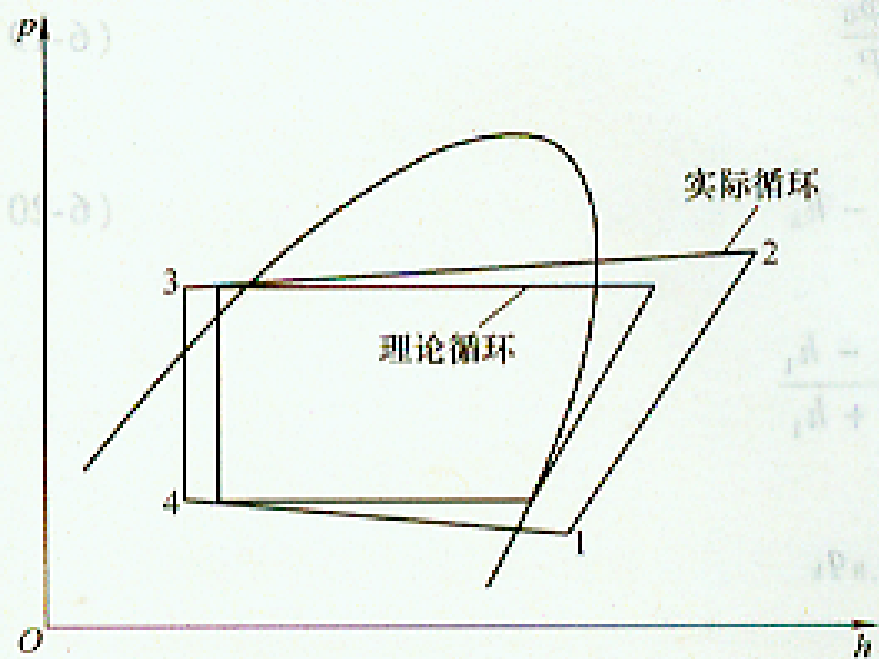


图 6-8 蒸气压缩实际循环与理论循环的比较

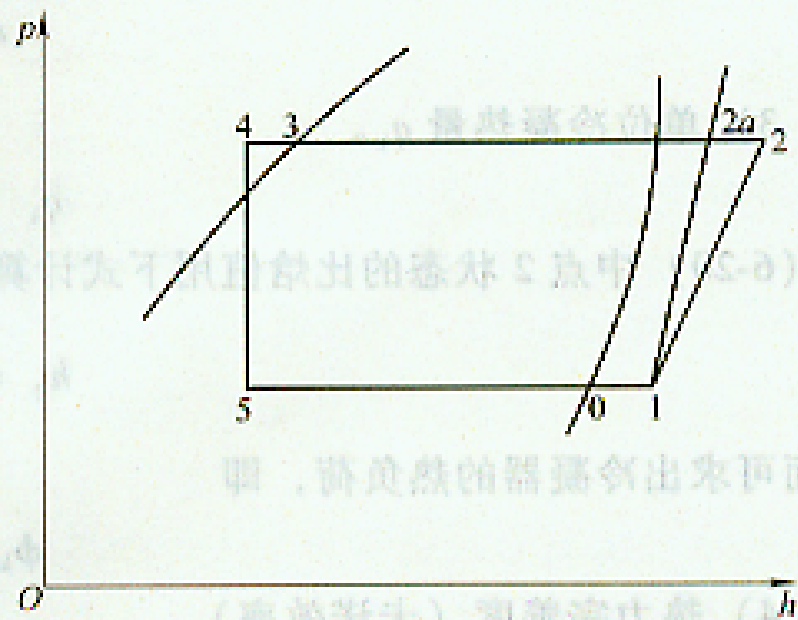


图 6-9 简化后的实际循环

单位质量制冷量

$$q_0 = h_1 - h_5 = h_1 - h_4$$

单位体积制冷量

$$q_v = \frac{q_0}{v_1}$$

单位理论功

$$w_0 = h_{2a} - h_1$$

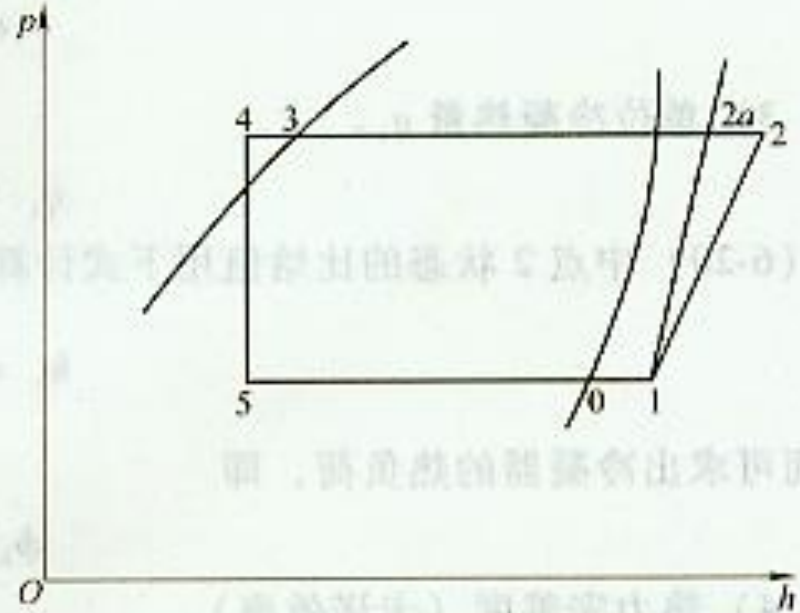


图 6-9 简化后的实际循环

制冷剂循环流量

$$q_{m,R} = \frac{\phi_0}{q_0}$$

理论功率

$$P_0 = q_{m,R} w_0$$

体积流量（理论输气量）

$$q_{V,s} = q_{m,R} v_1 = \frac{\phi_0 v_1}{q_0} = \frac{\phi_0}{q_v}$$

(6-15)

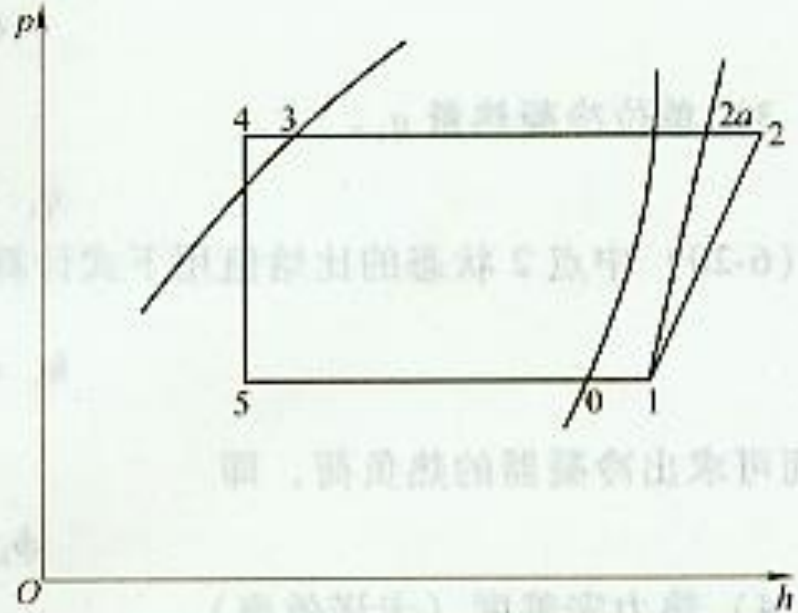


图 6-9 简化后的实际循环

$$q_{V,h} = \frac{q_{V,s}}{\lambda} = \frac{\phi_0}{\lambda q_v}$$

(6-16)

压缩机指示功率

$$P_i = \frac{P_0}{\eta_i} \quad (6-17)$$

轴功率

$$P_e = \frac{P_i}{\eta_m} \quad (6-18)$$

实际制冷系数

$$\varepsilon = \frac{\phi_0}{P_e} \quad (6-19)$$

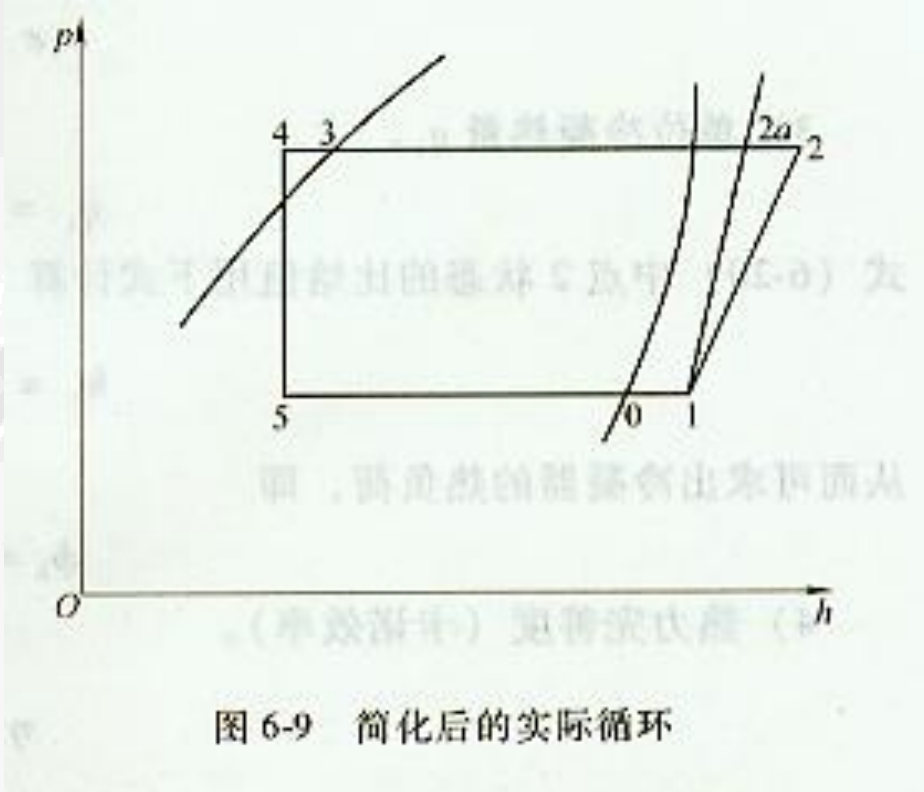


图 6-9 简化后的实际循环

单位冷凝热量

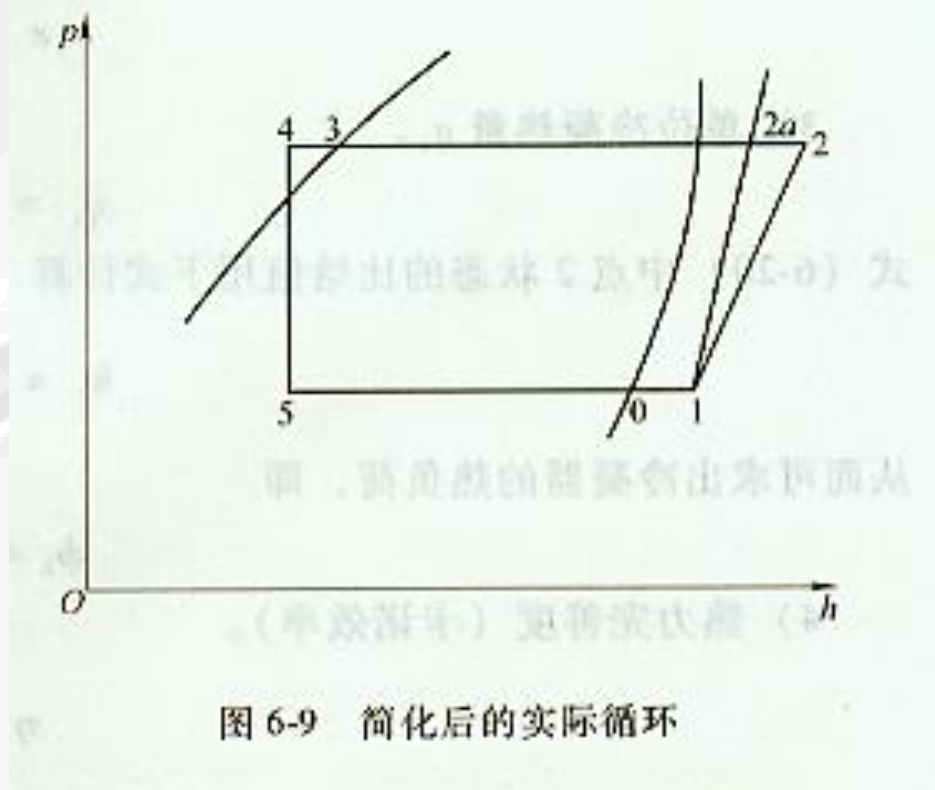
$$q_k = h_2 - h_4 \quad (6-20)$$

$$h_2 = \frac{h_{2a} - h_1}{\eta_i} + h_1$$

$$\phi_k = q_{m,R} q_k$$

热力完善度

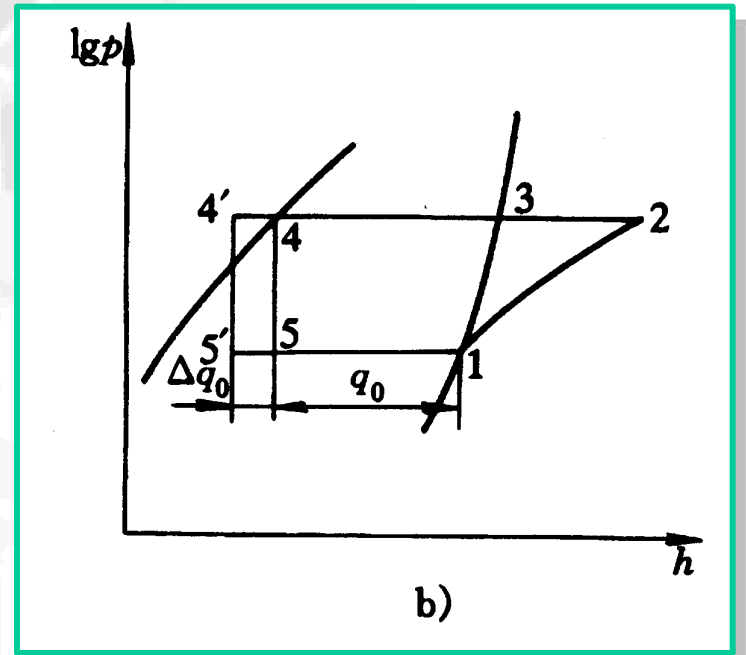
$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \quad (6-19)$$



(三) 蒸气压缩式制冷系统的主要影响因素与工况

液体过冷

与无过冷的循环1-2-3-4-5-1相比，过冷循环的单位制冷量的增加量为



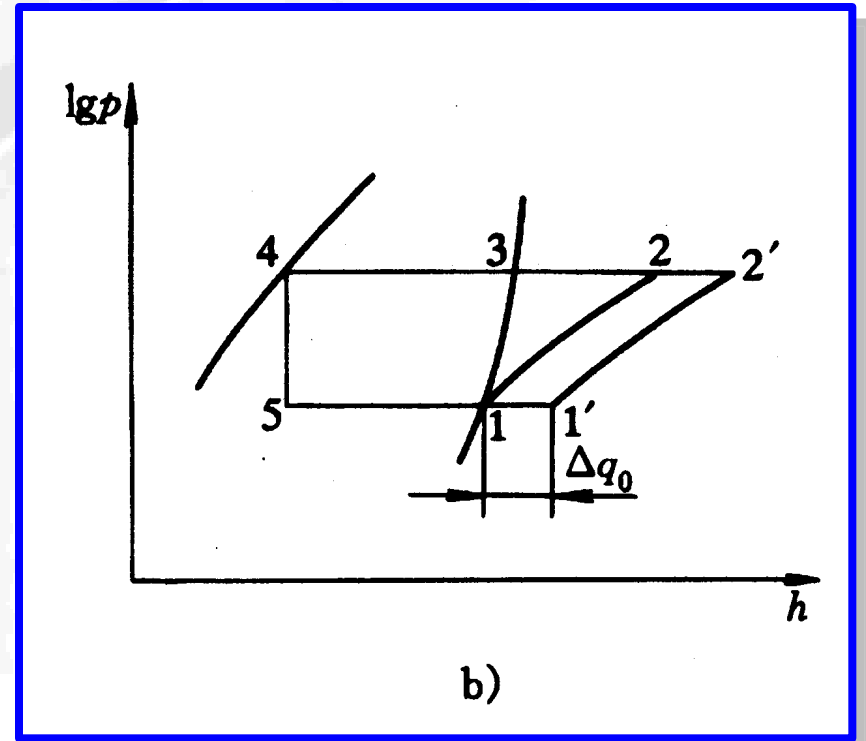
$$\Delta q_0 = h_5 - h'_5 = h_4 - h'_4$$

(三) 蒸气压缩式制冷系统的主要影响因素与工况

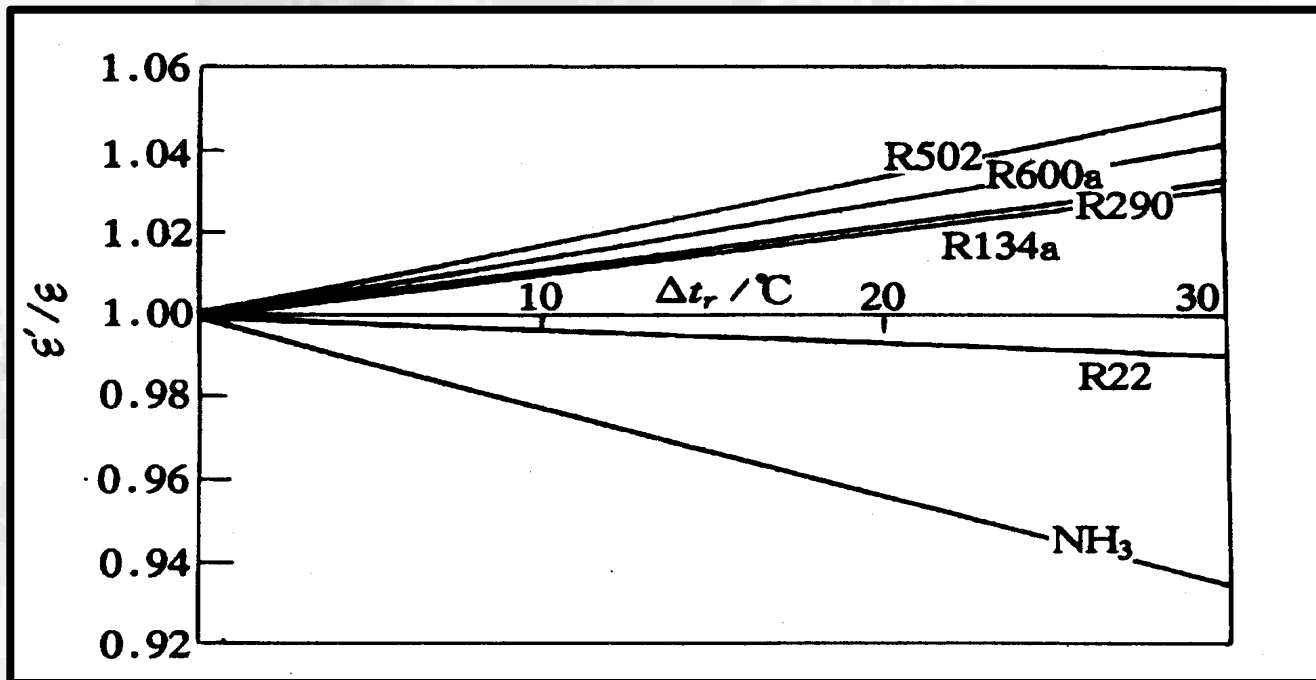
蒸气过热

$$\Delta q_0 = h_{1'} - h_1$$

$$\varepsilon' = \frac{q_0'}{w'} = \frac{q_0 + \Delta q_0}{w_0 + \Delta w_0}$$



制冷系数变化情况



(三) 蒸气压缩式制冷系统的主要影响因素与工况

冷凝温度

蒸发温度不变，冷凝温度增大：

- (1) 单位制冷量减少
- (2) 单位压缩功增大
- (3) 循环制冷剂的流量：不变？
一般减少

(4) 制冷机的制冷量减少，理论耗功增加

(5) 单位容积制冷量降低
 结论：对于同一台制冷机的制冷量减少，耗功增大，COP降低
 如果冷凝温度降低，则变化情况相反

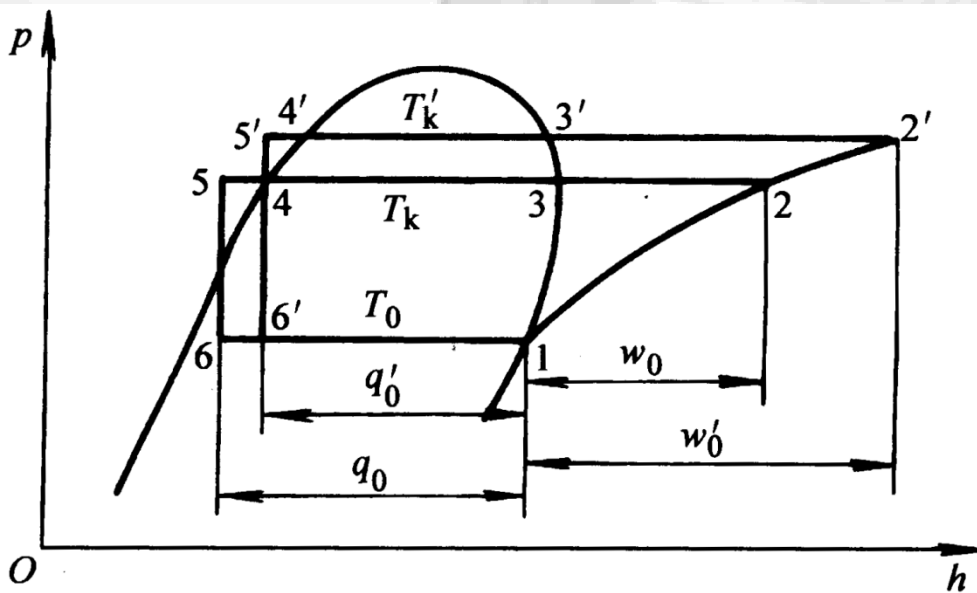


图 3-15 冷凝温度变化循环时循环状态参数的变化情形

(三) 蒸气压缩式制冷系统的主要影响因素与工况

蒸发温度

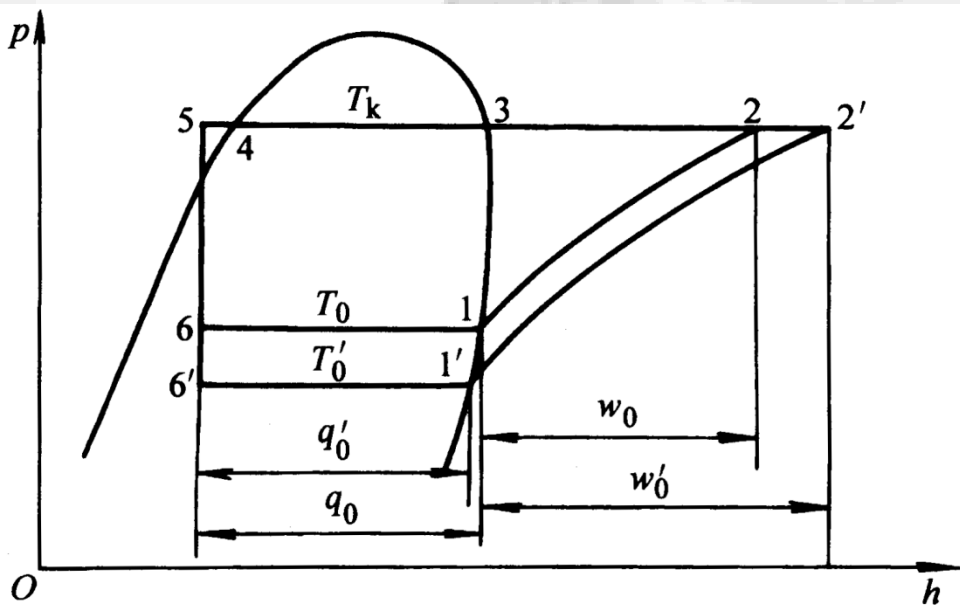


图 3-16 蒸发温度变化时循环状态参数的变化情形

冷凝温度不变，蒸发温度降低：

- (1) 单位制冷量减少
- (2) 单位压缩功增大
- (3) 循环制冷剂的流量：减少
- (4) 制冷机的制冷量减少，
- (5) 制冷机的理论耗功不定：但制冷机的COP肯定降低
- (6) 单位容积制冷量降低

结论：对于同一台制冷机的制冷量减少，耗功不定，COP降低

如果蒸发温度升高，则变化情况相反

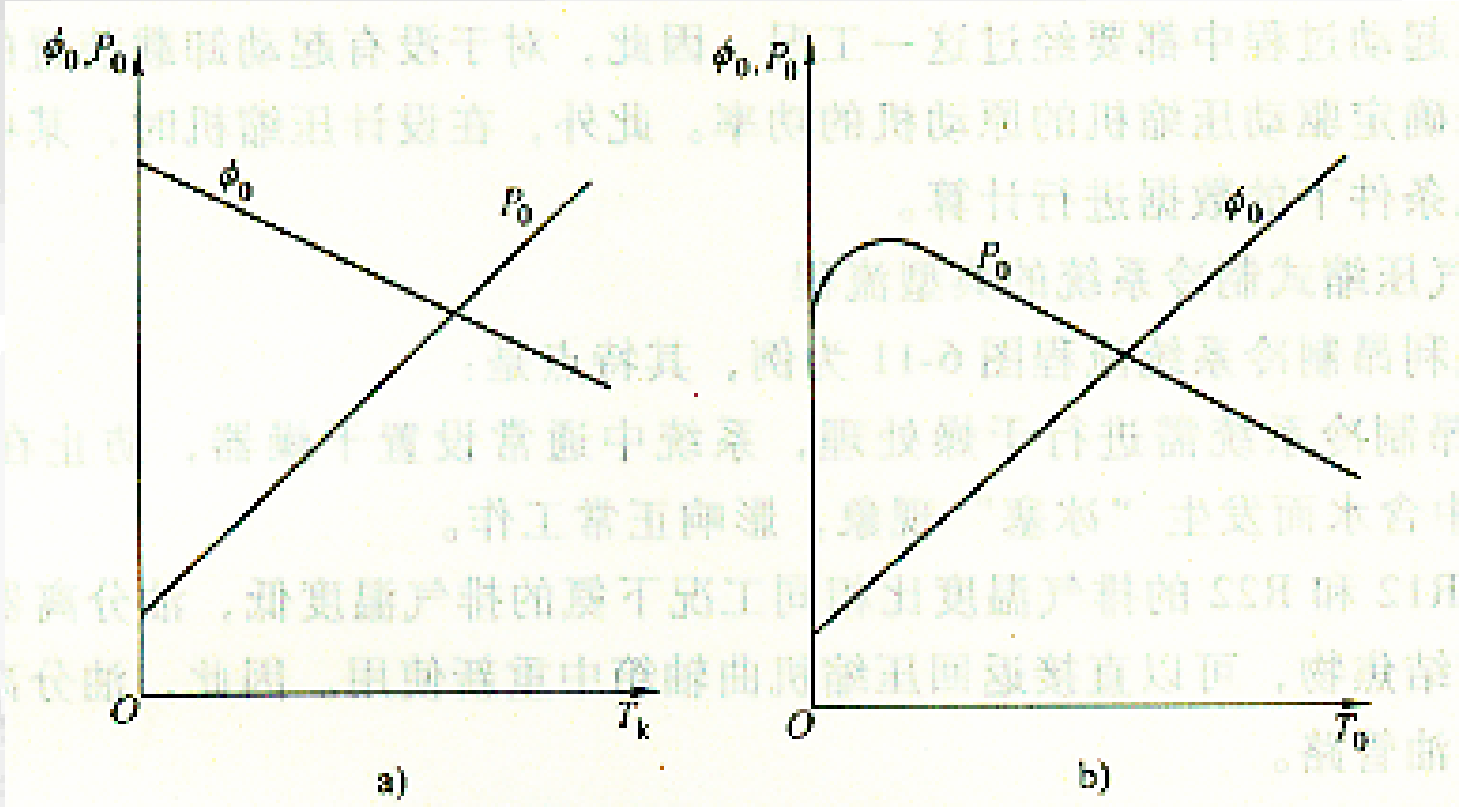


图 6-10 蒸发温度和冷凝温度对制冷装置性能的影响
 a) T_0 不变 T_k 变化 b) T_k 不变 T_0 变化

2. 蒸气压缩式制冷系统的工况

标准工况、空调工况、最大压差工况、最大功率工况

制冷工况	制冷剂	蒸发温度 /°C	吸气温度 /°C	冷凝温度 /°C	过冷温度 /°C
标准工况	R12	-15	15	30	25
	R22		-10		
	R717		-10		
空调工况	R12	5	15	40	35
	R22		10		
	R717		10		

2. 蒸气压缩式制冷系统的典型流程

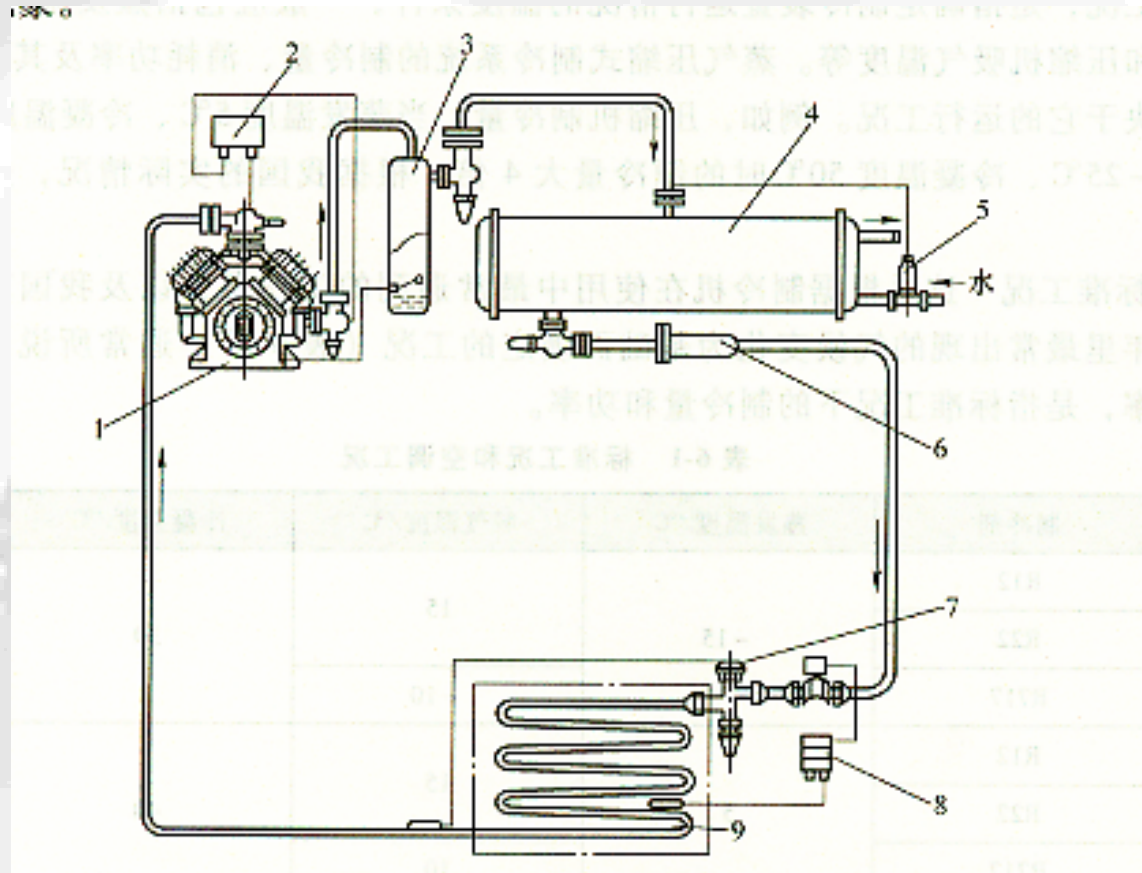


图 6-11 氟利昂制冷系统流程图

- 1—压缩机 2—压力继电器 3—油分离器 4—冷凝器 5—水量调节阀
6—干燥过滤器 7—热力膨胀阀 8—温度继电器 9—蒸发器