

第一章 制冷的热力学基础



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

制冷的基本方法

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熔化或升华过程向被冷却物体吸取热量的过程。

液体气化、水冰或溶液冰的熔化、干冰升华

2) **气体膨胀制冷**: 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取冷量的过程。

膨胀机膨胀: 气体温降大, 制冷量大, 效率高

节流阀膨胀: 温降小, 制冷量小, 效率低。



总目录

返回本章

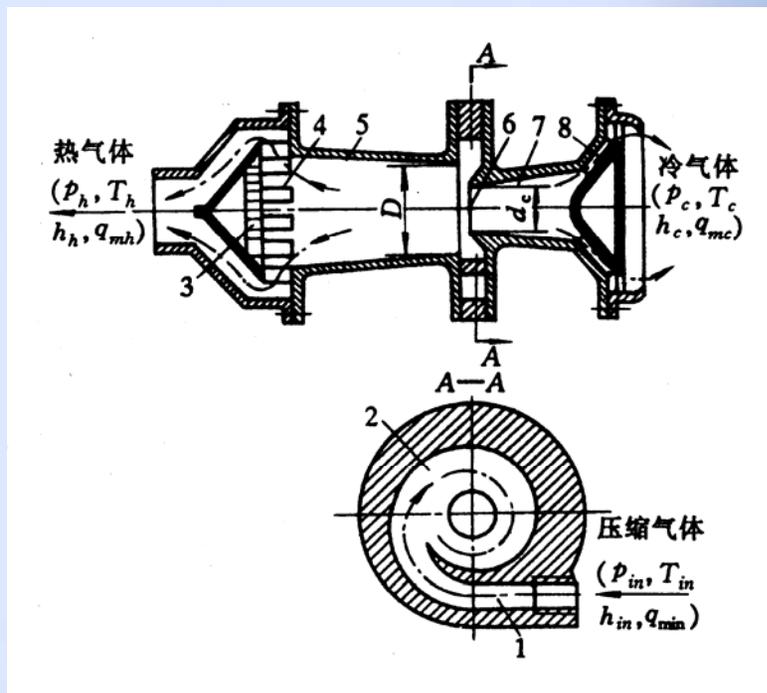
返回本节

上一页

下一页

结束

3) 气体涡流制冷：高压气体经涡流管膨胀后被分离成冷、热两股气流，将分离出来的冷气流复热即可制取冷量。



4) 热电制冷

5) 吸附制冷



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

第一节 相变制冷

相变制冷指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以制取冷量。

物质的相变特性:

液体气化

固体的融化与升华

压-焓图



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

物质的相变特性

液体气化

物质从液态变为汽气态的过程称为气化。任何液体气化时都要吸收热量。

在定压下单位质量液体气化时所吸收的热量称为气化热（单位为J/kg）。

$$r = h'' - h' = T (s'' - s')$$

气化热是随其气化时的压力变化而变化的，气化热随着压力的升高而降低，在临界压力时，气化热为零，而在相同压力下，不同的液体其气化热是不相同的。



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

制冷机的工作过程中，在低温下蒸发的制冷剂液体一般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，液体全部转变为饱和蒸气时吸收的热量为 $q_0 = r(1 - x)$

分析可知，单位制冷量不仅与制冷剂的气化热有关，还随节流后的干度而变。制冷剂液体在节流膨胀前后压力变化范围越大，则节流过程中闪发的气体量越多，因而单位制冷量就越小。



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

固体的融化与升华

制冷技术中常应用纯水冰或溶液冰的融化及干冰（即固体二氧化碳）的升华过程来制冷。

在水的三相点温度以下，冰可以直接升华为水蒸气，冰升华时的温度与相应的压力有关。

冰的升华压力和对应的升华温度

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	-25	-50	-75
升华压力/kPa	0.61	63×10^{-3}	3.87×10^{-3}	0.116×10^{-3}



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

冰和盐混合物的融化过程

冰和盐混合物的融化过程可以达到 0°C 以下的低温。

冰盐冷却的物理过程如下：首先是冰吸热而融化，即在冰的表面上蒙了一层水膜，此时的温度为 0°C 。接着盐便溶解于水膜中，吸收一定的溶解热，因而使温度降低。此后，冰在较低的温度下融化，热交换是通过冰块表面上的盐水膜进行。

当冰全部融化，盐全部溶解后便形成具有一定浓度的盐水溶液



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

混合物的组成	盐或酸的质量分数	混合后的最低温度 ℃	混合物的组成	盐或酸的质量分数	混合后的最低温度 ℃
水和盐			NaNO ₃	0.371	-18.5
NH ₄ Cl	0.231	-5.1	NaCl	0.248	-21.2
NaNO ₃	0.429	-5.3	CaCl ₂ ·6H ₂ O	0.444	-21.5
Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	0.524	-8.0	CaCl ₂ ·6H ₂ O	0.556	-40.3
CaCl ₂ ·6H ₂ O	0.714	-12.4	CaCl ₂ ·6H ₂ O	0.588	-55
NH ₄ NO ₃	0.375	-13.6	雪或碎冰与双盐混合物		
NH ₄ SCN	0.571	-18.0	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O+K ₂ SO ₄	0.112+0.084	-3.1
KSCN	0.600	-23.7	KCl+KNO ₃	0.190+0.035	-11.8
雪或碎冰和盐			KCl+NH ₄ Cl	0.091+0.148	-18.0
CaCl ₂ ·6H ₂ O	0.291	-9.0	Na ₂ NO ₃ +KNO ₃	0.359+0.062	-19.4
CaCl ₂	0.231	-11.0	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O+(NH ₄) ₂ SO ₄	0.054+0.386	-20.0
KCl	0.281	-11.0	NH ₄ Cl+NH ₄ NO ₃	0.115+0.270	-22.5
NH ₄ Cl	0.200	-15.8	NH ₄ Cl+(NH ₄) ₂ SO ₄	0.074+0.311	-22.5
NH ₄ NO ₃	0.375	-17.3	KNO ₃ +NH ₄ NO ₃	0.049+0.404	-25.0

溶液冰及其制取和应用

溶液冰是指由共晶溶液冻结成的冰，也称共晶冰。

将共晶溶液充灌在密封容器里，并将它冻结成固体，即得到溶液冰。

把这种容器移到需要冷却的地方，依靠吸收热量使共晶固体融化，就可使被冷却对象降温。在共晶固体未完全融化成液体之前，它的温度是不变的，称为共晶温度。共晶温度低于 0°C 的共晶冰，通常应用于无机机械制冷的冷藏汽车中。共晶温度高于 0°C 的共晶冰，通常作为储能空调系统的储能介质。



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

共晶溶液种类	盐在水溶液中的质量分数	冻结温度 /°C	密度 (kg.m ⁻³)	比热容 [kJ.(kg.K) ⁻¹]		融化热 /kJ. kg ⁻¹	共晶溶液在冻结时的体积膨胀率 /%
				溶液	共晶冰		
ZnSO ₄ 和H ₂ O	0.272	-6.5	1.249×10 ³	3.127	1.574	213.1	6.8
BaCl ₂ 和H ₂ O	0.225	-7.8	1.239×10 ³	3.345	1.637	246.6	7.9
Na ₂ S ₂ O ₃ 和H ₂ O	0.300	-11.0	1.312×10 ³	3.182	1.536	186.3	5.2
NH ₄ Cl和H ₂ O	0.193	-11.1	1.148×10 ³	3.307	1.729	301.0	8.1
NH ₄ NO ₃ 和H ₂ O	0.412	-17.3	1.188×10 ³	2.972	1.557	286.3	5.8
NaNO ₃ 和H ₂ O	0.370	-18.5	1.29×10 ³	3.059	1.565	215.6	5.6
NaCl和H ₂ O	0.224	-21.2	1.17×10 ³	3.336	2.005	236.1	7.9
K ₂ SO ₄ +KNO ₃ 和H ₂ O	0.045+0.08	-3.8	1.093×10 ³	3.935	1.833	319.8	8.1
KCl+KNO ₃ 和H ₂ O	0.19+0.035	-11.8	1.15×10 ³	3.182	1.666	265.8	7.7



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

干冰是固体二氧化碳的习惯叫法。干冰升华时需要吸收升华热，故可用来制冷。

干冰的三相点参数为：温度 $t_{tr}=-56.6^{\circ}\text{C}$ ，压力 $p_{tr}=5.2\times 10^2\text{kPa}$ 。在大气压下，干冰的升华热为 573.6kJ/kg ，升华温度为 -78.5°C 。

常压下干冰受热时直接升华为二氧化碳，它对食品无害，因此可用来冷却和保存食物，并且可直接与食物接触。



总目录

返回本章

返回本节

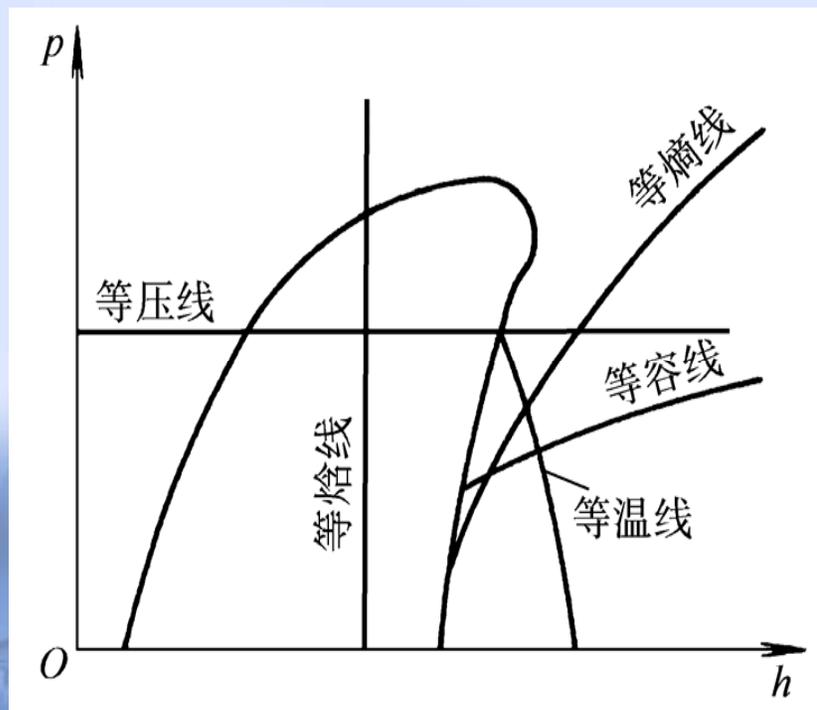
上一页

下一页

结束

压-焓图

压-焓图纵坐标表示压力，横坐标表示比焓值。



拱状曲线代表制冷剂所有的饱和液体和饱和蒸气的状态，曲线上的最高点为**临界点**，是饱和蒸气和饱和液体的分界点。

它左面的曲线为饱和液体线，它右面的曲线为饱和蒸气线。拱状线内的区域为**两相区**，饱和液体线左边的区域为**过冷液体区**，饱和蒸气线右边为**过热蒸气区**，临界点以上为**超临界区**。

压-焓图



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

压-焓图上，等压线和等比焓线是最简单的，分别为水平线和垂直线。纯物质的等温线在两相区为水平线，在过冷液体区为略向左上方延伸的上凹曲线，非常接近于垂直线。这是因为压力对过冷液体比焓值的影响很小的缘故。

在过热蒸气区，等温线是向右下方延伸的下凹曲线。温度较高的等温线在压力较低时也接近于垂直线，这是因为此时的制冷剂气体已接近于理想气体，因而比焓值与压力无关。在过热蒸气区，等比体积线和等比熵线都是向右上方延伸的下凹曲线，但等比熵线的斜率比等比体积线大。

利用压-焓图查取热力学参数是很方便的



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

第二节 绝热膨胀制冷

气体绝热膨胀制冷指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。

气体绝热膨胀的特性随所使用的设备而变，一般有三种方式：令高压气体经膨胀机（活塞式或透平式）膨胀；令气体经节流阀膨胀；绝热放气制冷。

有外功输出的膨胀过程
节流膨胀过程



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

有外功输出的膨胀过程

最理想的情况是**可逆的绝热膨胀**，即**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用下式表示

$$a_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

膨胀过程的全部温降称为**积分等熵效应**

$$\Delta T = \int_{p_1}^{p_2} a_s dp$$



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

对于理想气体经过演算以后可得

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

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

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，理想气体的积分等熵效应由下式确定

$$\Delta T = T_1 - T_2 = T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right]$$



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

节流膨胀过程

节流膨胀过程中没有外功的输出。如果在节流过程中气体与环境之间没有热量交换，则节流前后的比焓值保持不变。

实际气体节流膨胀时,温度随微小压力变化而变化的关系可用下式表示

$$a_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$

α_h 称为微分节流效应，或焦耳-汤姆逊效应，简称焦-汤效应。积分节流效应为

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h dp = \int_{p_1}^{p_2} a_h dp$$



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

微分节流效应也可表示成下式

$$a_h = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p}$$

纯物质饱和区域内，相同压降下具有相同的温差 ΔT

$$a_s = a_h = \frac{dT}{dp}$$

它可以按照克拉贝隆-克劳修斯方程式计算求得

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \frac{T}{r} (v'' - v')$$



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

第三节 制冷热力学特性分析

循环可分为正向循环和逆向循环。动力循环是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。

所有的制冷机和热泵都是按逆向循环工作的。

热源温度不变时的逆向可逆循环——逆卡诺循环

变温热源时的逆向可逆循环——洛仑兹循环

热能驱动制冷循环

压缩蒸气制冷循环

热泵循环



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

逆卡诺循环

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。在相同温度范围内，它是消耗功最小的循环，效率最高制冷循环，因为它没有任何不可逆损失。

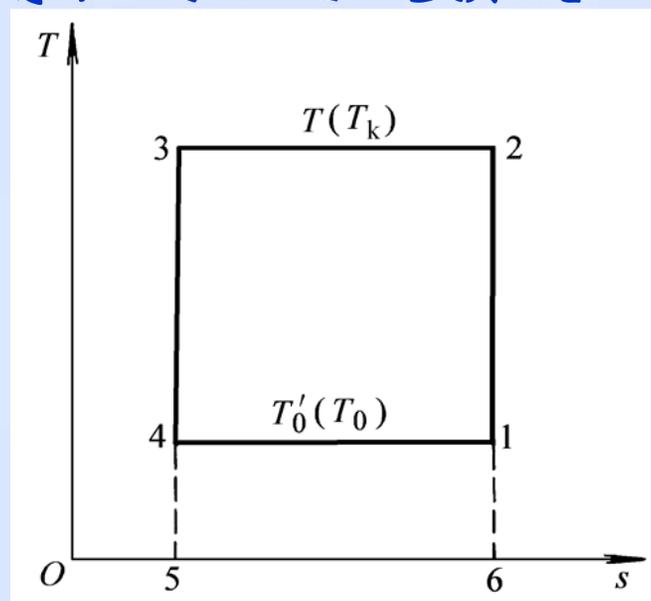
循环为图上1-2-3-4-1

1-2 等熵压缩过程

3-4 等熵膨胀过程

2-3 等温放热过程

4-1 等温吸热过程



T-s图上逆卡诺循环



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

制冷剂向高温热源放出的热量为

$$q = T(s_1 - s_4), \text{ } T\text{-}S\text{图上为面积}2\text{-}3\text{-}5\text{-}6\text{-}2$$

1-4过程中，制冷剂从被冷却对象所吸取的热量

$$q_0 = T'_0(s_1 - s_4)$$

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，
 $T\text{-}S$ 图上为面积1-2-3-4-1

$$w_0 = (T - T'_0)(s_1 - s_4)$$

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**

$$\varepsilon_c = \frac{q_0}{w_0}$$



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

逆卡诺循环的制冷系数为

$$\varepsilon_c = \frac{T_0'}{T - T_0'} = \frac{1}{\frac{T}{T_0'} - 1}$$

逆卡诺循环的制冷系数与成正比，与成反比，当与越接近，的值迅速上升，即只用少量的功就可以把较多的热量从低温热源转移到高温热源。在一定的高温热源和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和低温热源的温度有关，而与制冷剂的性质无关。

$$\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial T_0'} = \frac{T}{(T - T_0')^2} \quad \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial T} = -\frac{T_0'}{(T - T_0')^2} \quad \longrightarrow \quad \left| \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial T_0'} \right| > \left| \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial T} \right|$$



总目录

返回本章

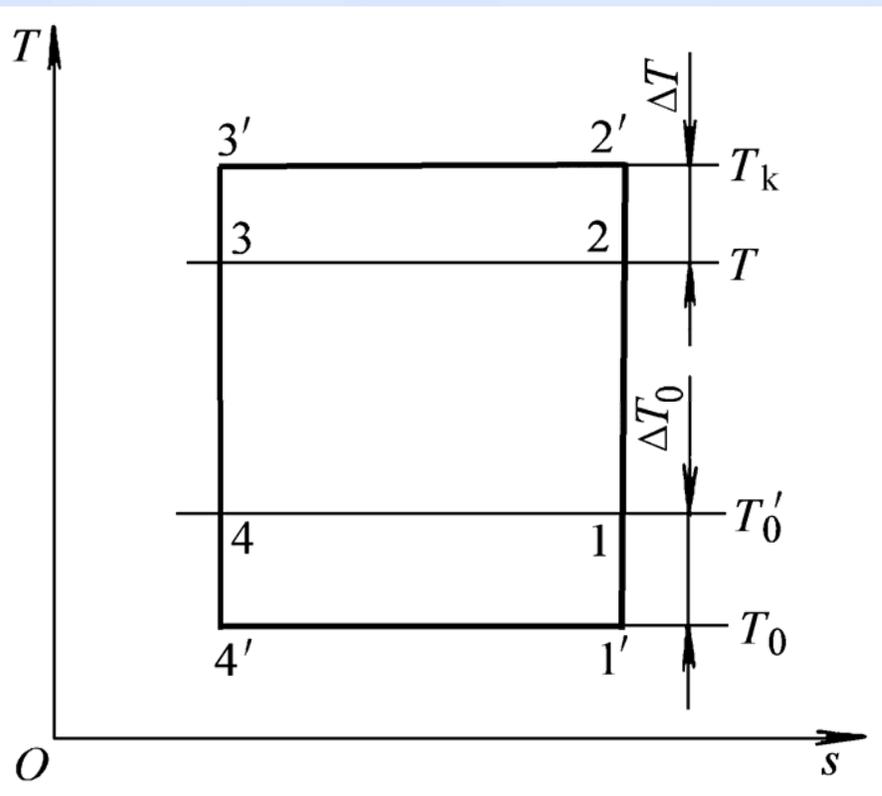
返回本节

上一页

下一页

结束

有温差传热不可逆制冷循环



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，**一切实际循环的制冷系数 ε 总是小于相同热源时的逆卡诺循环的制冷系数**

ε_c



总目录

返回本章

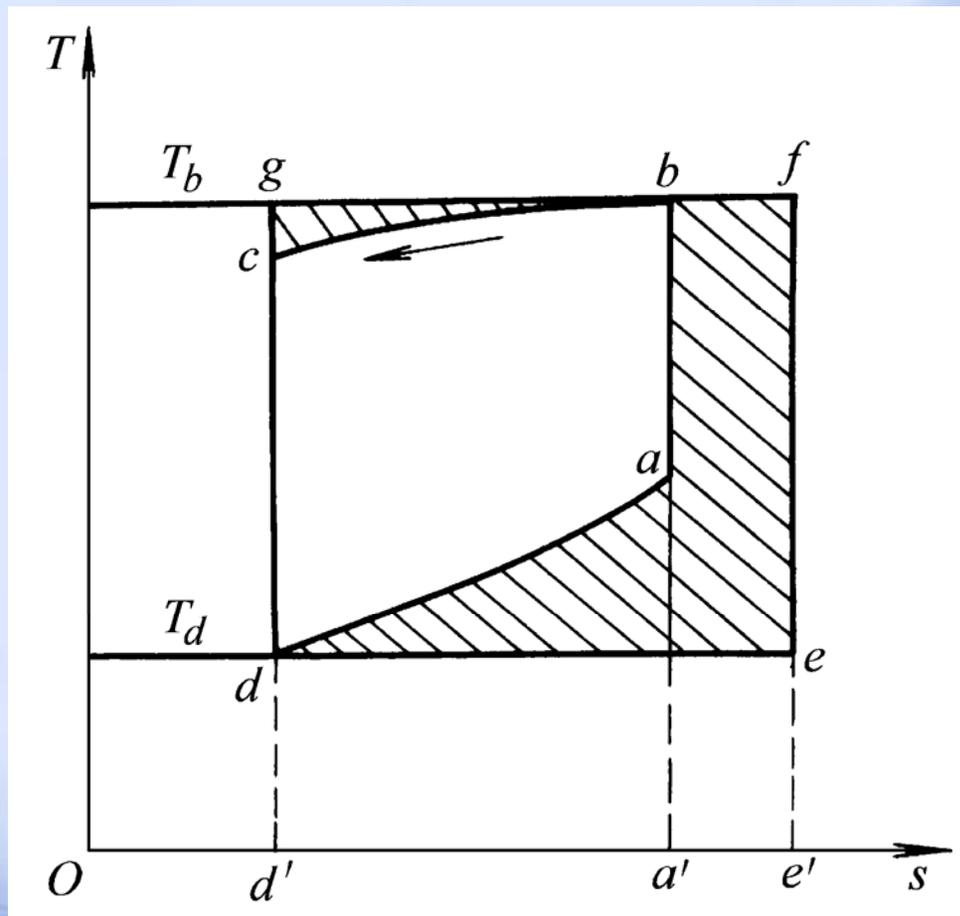
返回本节

上一页

下一页

结束

变温热源时的逆向可逆循环-洛仑兹循环



T-s图上洛仑兹循环



总目录

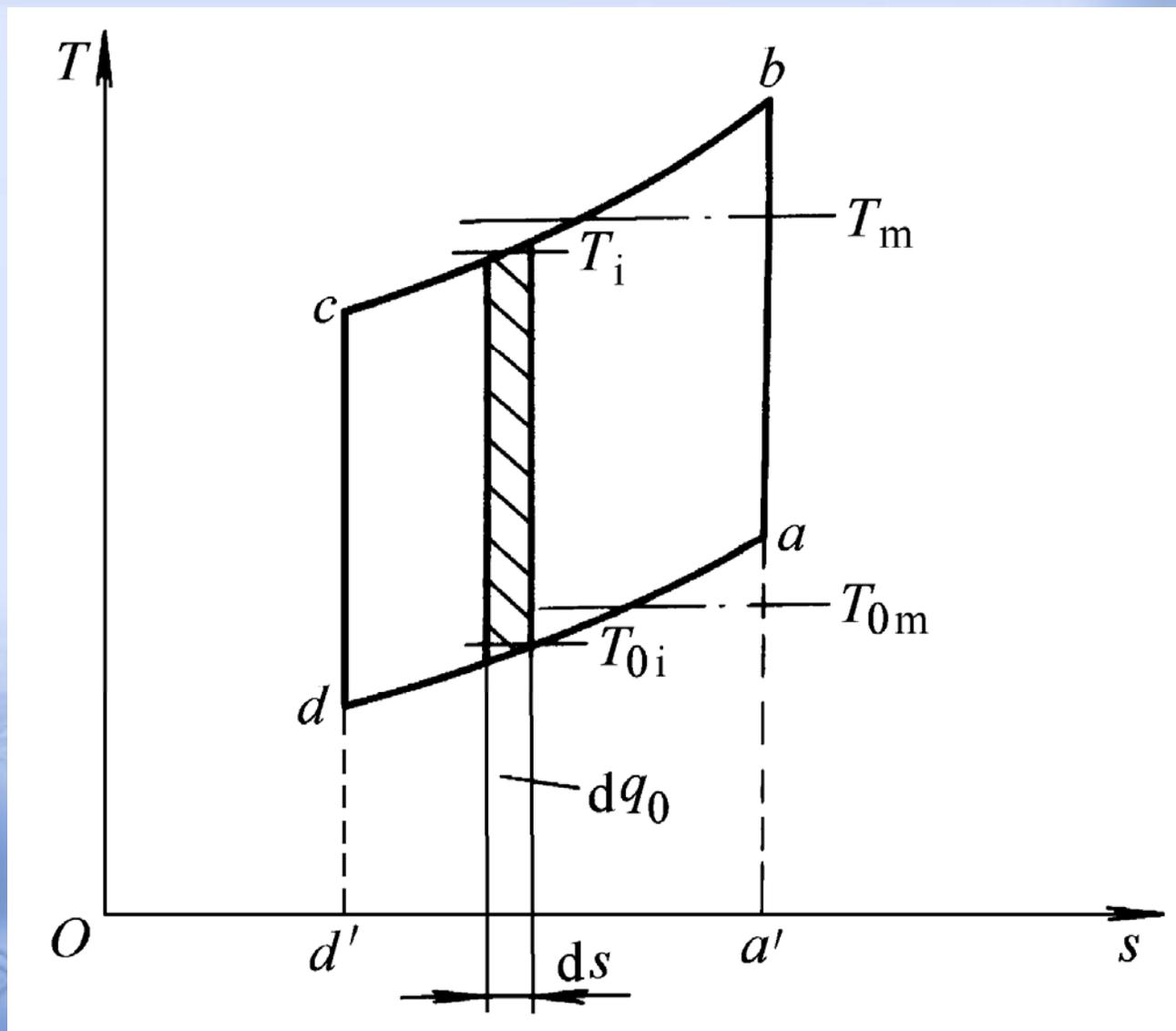
返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

热泵循环

热泵与制冷机在原理上是完全相同的，热泵就是以冷凝器或其他部件放出的热量供热的制冷系统。

热泵与制冷机区别

1、两者的目的不同

若是获得高温（制热），也就是着眼于放热至高温热源，那就是热泵。如果是获得低温也就是着眼于从低温热源吸热，那就是制冷机

2、两者的工作温区往往有所不同

通常，热泵是将环境作为低温热源，而制冷机则是将环境作为高温热源。那么，对同一环境温度来说，**热泵的工作温区就明显高于制冷机。**



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束

原则上，凡是能用来作制冷机的循环都可以用作热泵循环，凡是用于制冷机的分析方法都可以用于分析热泵。

用于表示热泵效率的指标称为热泵系数，其定义为

$$\varphi = \frac{Q_H}{W} \quad \varphi = \frac{Q_H}{W} = 1 + \varepsilon$$

给出了同一台机器，在相同工况下作热泵使用时的热泵系数与作制冷机使用时的制冷系数之间的关系。此外，上式还表明，**热泵系数永远大于1**，所以，热泵从能量利用角度比直接消耗电能或燃料获取热量的要节能。



总目录

返回本章

返回本节

上一页

下一页

结束