



中原工学院

Zhongyuan University of Technology

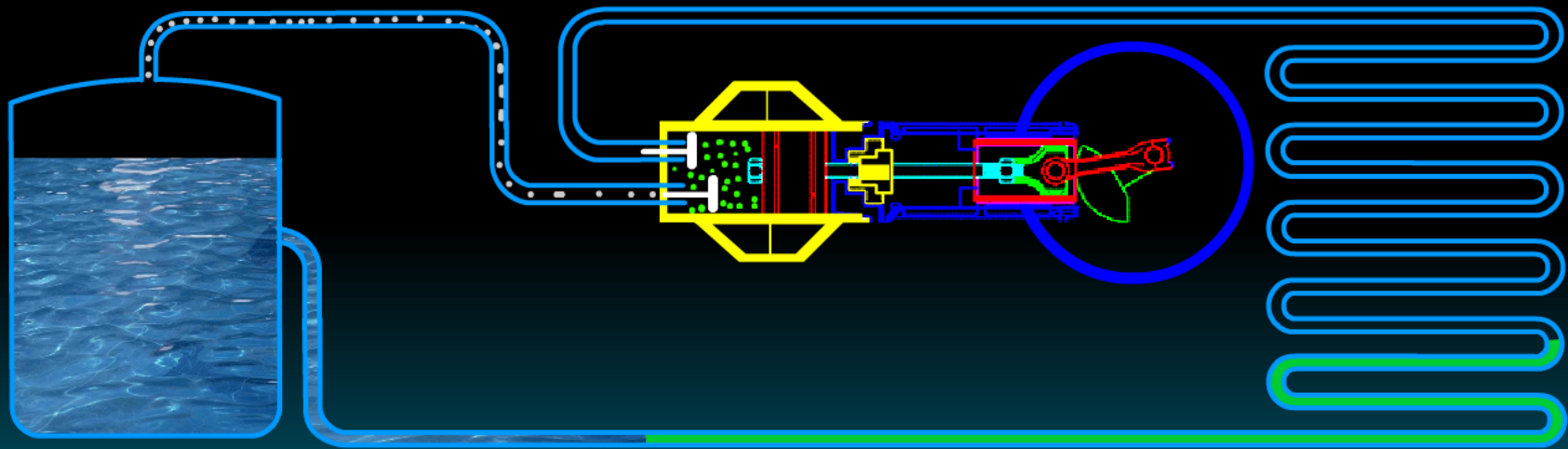
8 热力学基础

任课教师 [曾灏宪](#)

中原工学院 理学院

要求

- 知道循环过程并会使用热力学第一定律分析循环过程中的热量、功和内能的变化
- 会利用卡诺定律解释热机/制冷机循环
- 会利用热力学第二定律解释自然过程的方向性



冷凝器



play



stop

大学物理（上）

8 热力学基础

8.5 循环过程 卡诺循环

➤ 热机发展简介

- 1698年萨维利和1705年纽可门先后发明了蒸汽机。当时蒸汽机的效率极低。
- 1765年瓦特进行了重大改进，大大提高了效率。
- 人们一直在为提高热机的效率而努力，从理论上研究热机效率问题，一方面指明了提高效率的方向，另一方面也推动了热学理论的发展。

➤ 各种热机的效率

液体燃料火箭	$\eta = 48\%$	柴油机	$\eta = 37\%$
汽油机	$\eta = 25\%$	蒸汽机	$\eta = 8\%$

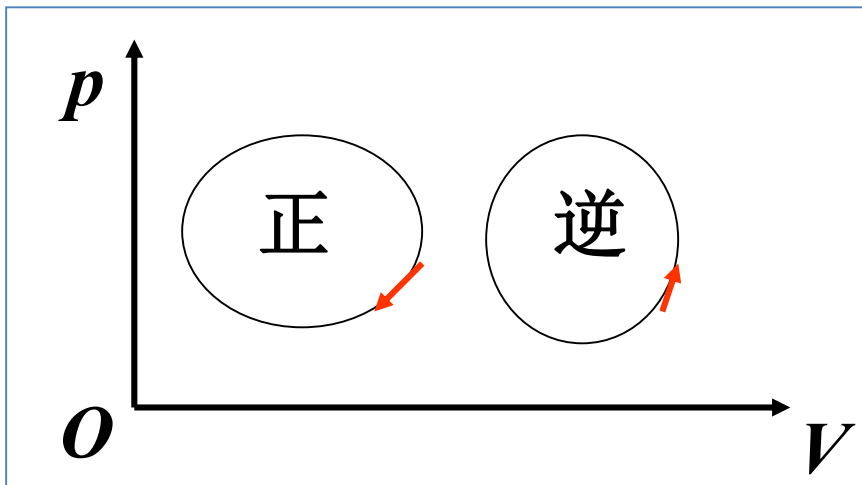
一 循环过程

系统经过一系列变化状态过程后，又回到原来的状态的过程叫**热力学循环过程**。

特征 $\Delta E = 0$

由**热力学第一定律** $Q_{\text{净}} = W_{\text{净}}$

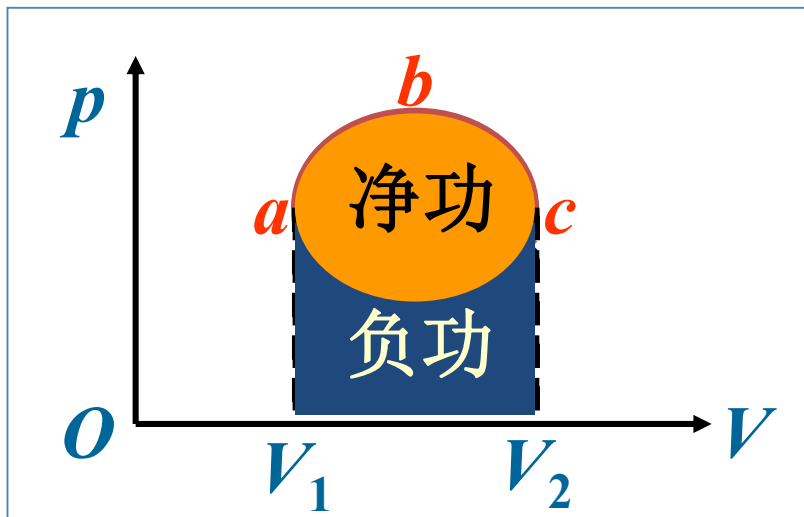
准静态循环过程 ~ 相图中的闭合曲线



顺时针：正循环

逆时针：逆循环

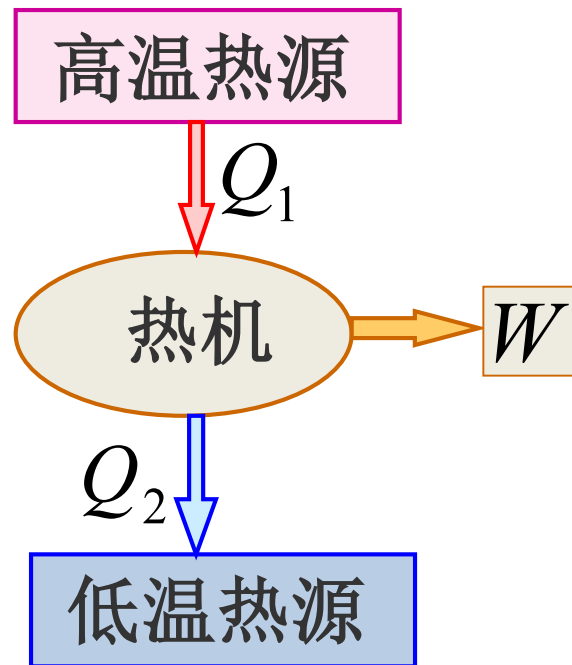
正循环及热机效率



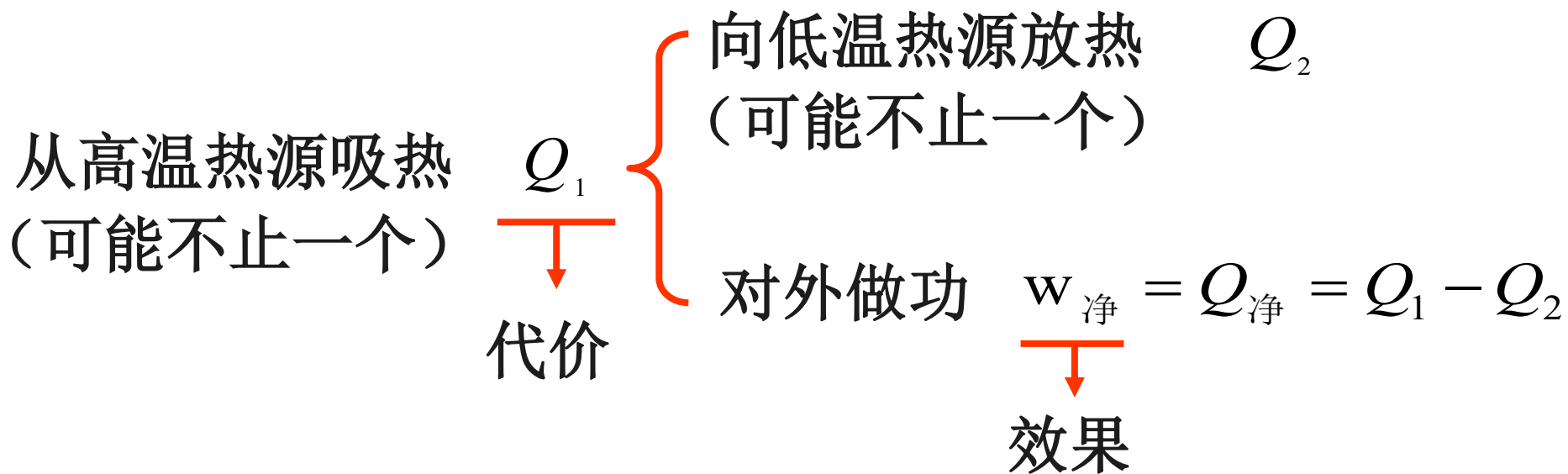
特征: $Q_{\text{净}} = W_{\text{净}} > 0$

热机的循环:

从外界吸热 → 对外做功



热机的能量转换

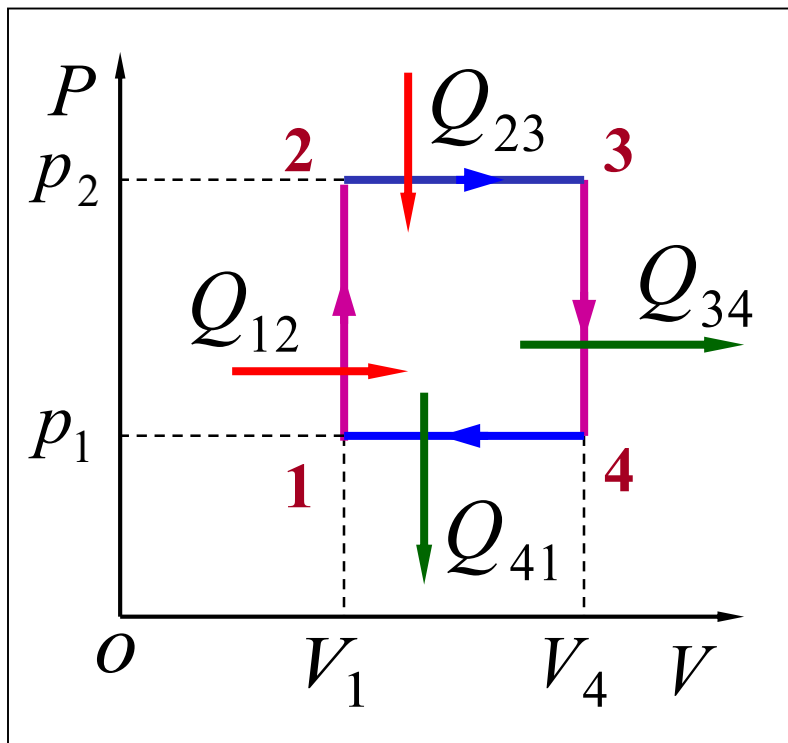


热机 (正循环) $W > 0$

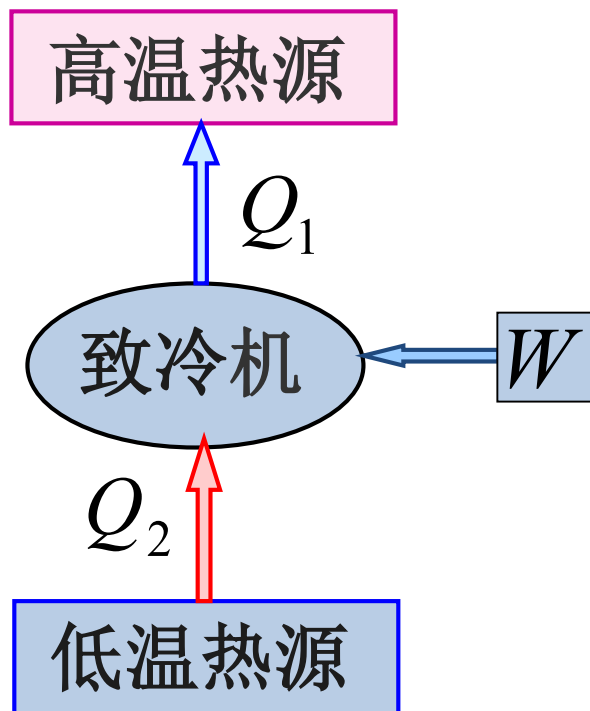
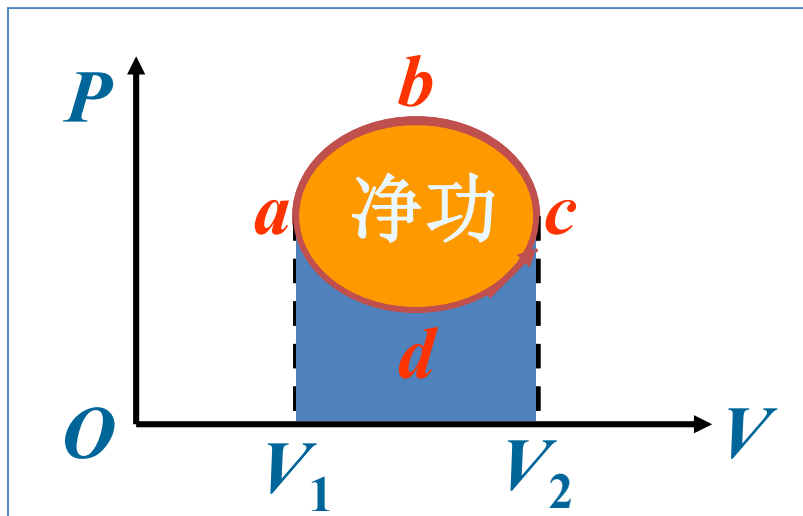
热机效率

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

例 1 1 mol 氦气经过如图所示的循环过程，其中 $p_2 = 2p_1$ ， $V_4 = 2V_1$ 求 1—2、2—3、3—4、4—1 各过程中气体吸收的热量和热机的效率。



逆循环及致冷系数



能量转换:

从低温热源吸热 Q_2 (效果)

外界对系统做功 W (代价)

向高温热源放热

$$Q_1 = Q_2 + W$$

特点

$$Q_{\text{净}} = W_{\text{净}} < 0$$

致冷机致冷系数

$$e = \frac{Q_2}{|W|} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

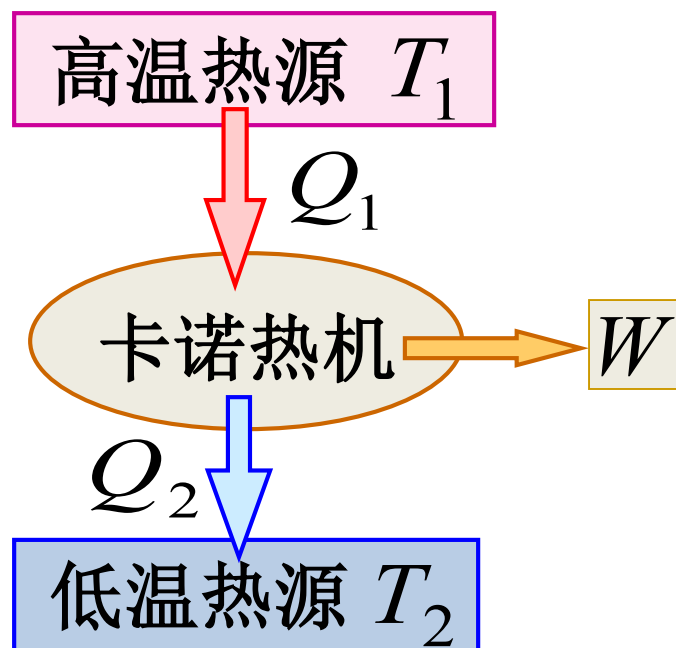
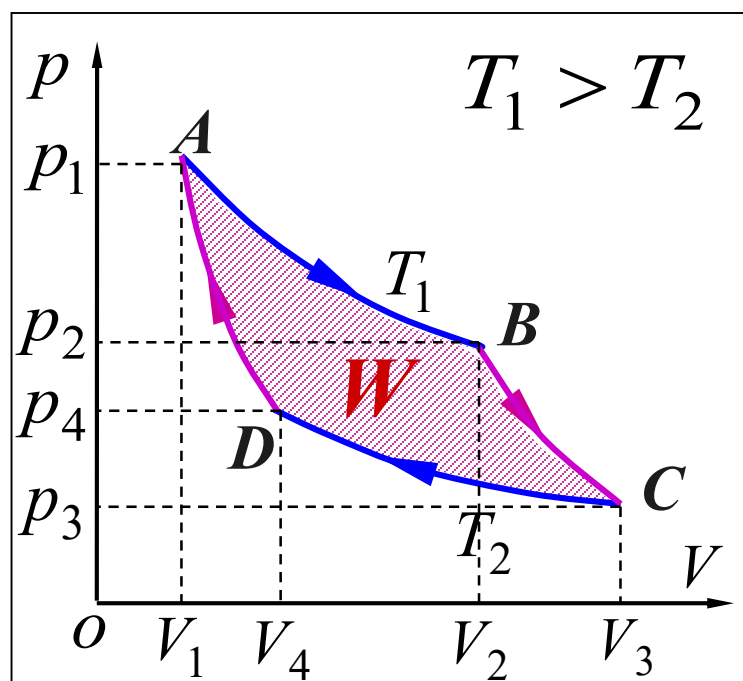
二 卡诺循环

1824年法国的年青工程师卡诺提出一个工作在两热源之间的理想循环——卡诺循环。给出了热机效率的理论极限值。

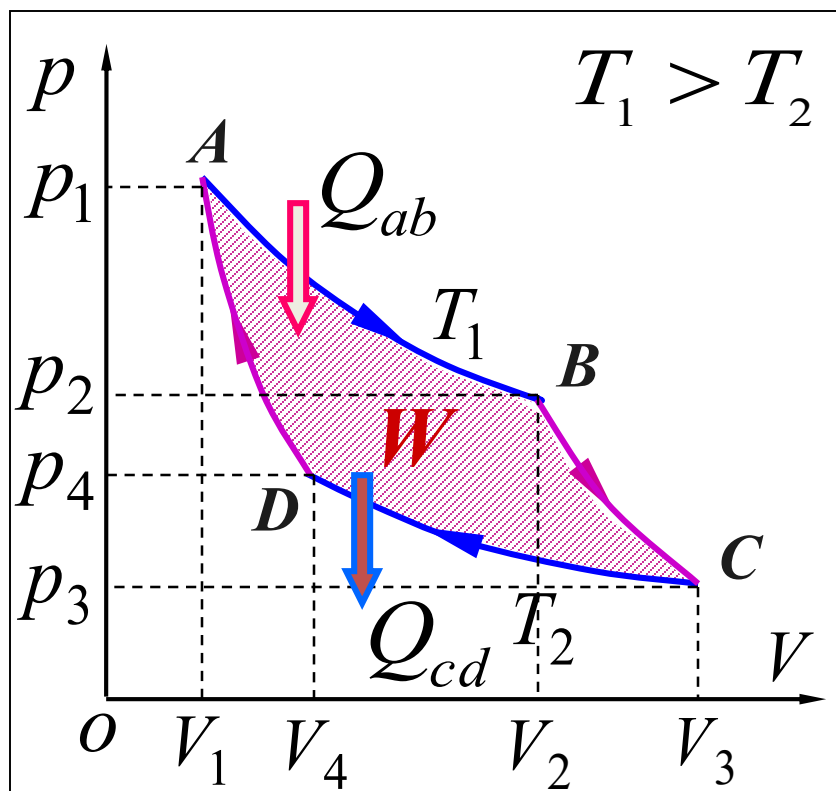
卡诺循环

两个准静态等温过程

两个准静态绝热过程



理想气体卡诺循环热机效率的计算



卡诺循环

$A—B$ 等温膨胀

$B—C$ 绝热膨胀

$C—D$ 等温压缩

$D—A$ 绝热压缩

A — B 等温膨胀吸热

$$Q_1 = Q_{ab} = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

C — D 等温压缩放热

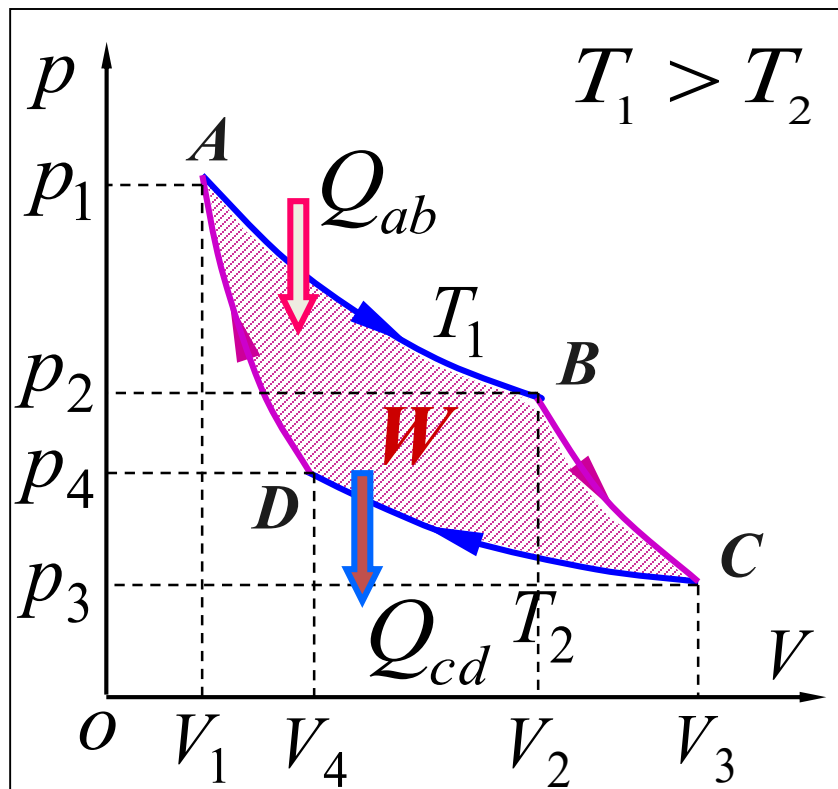
$$Q_2 = |Q_{cd}| = \nu RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

B — C 绝热过程

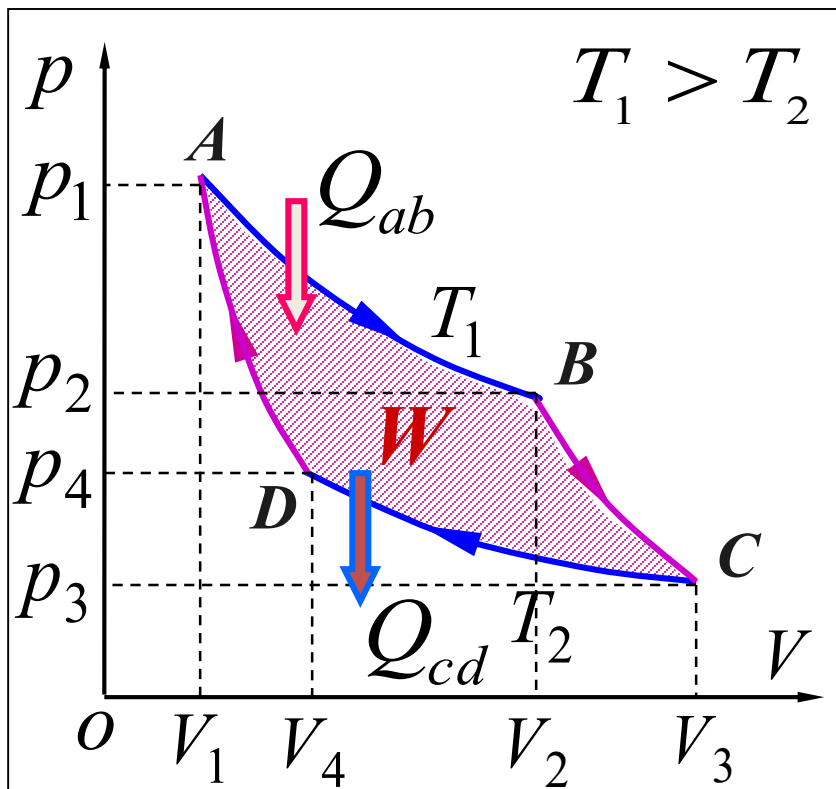
$$V_2^{\gamma-1} T_1 = V_3^{\gamma-1} T_2$$

D — A 绝热过程

$$V_1^{\gamma-1} T_1 = V_4^{\gamma-1} T_2$$



$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$



$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

卡诺热机效率

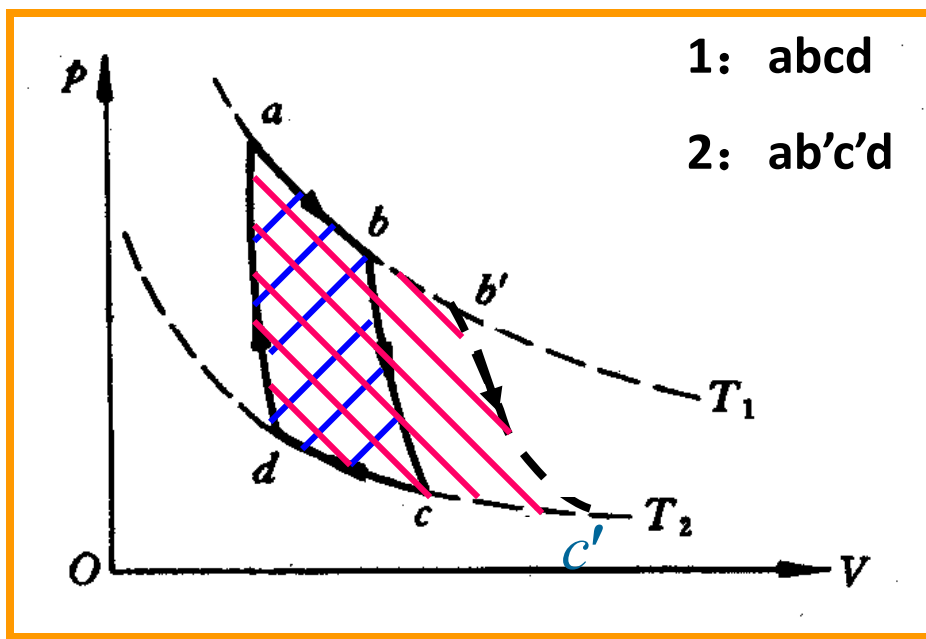
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

卡诺热机效率与工作物质无关，只与两个热源的
温度有关，两热源的温
差越大，则卡诺循环的效
率越高。

练习

一卡诺机进行如图两个循环，下列表述正确的是：



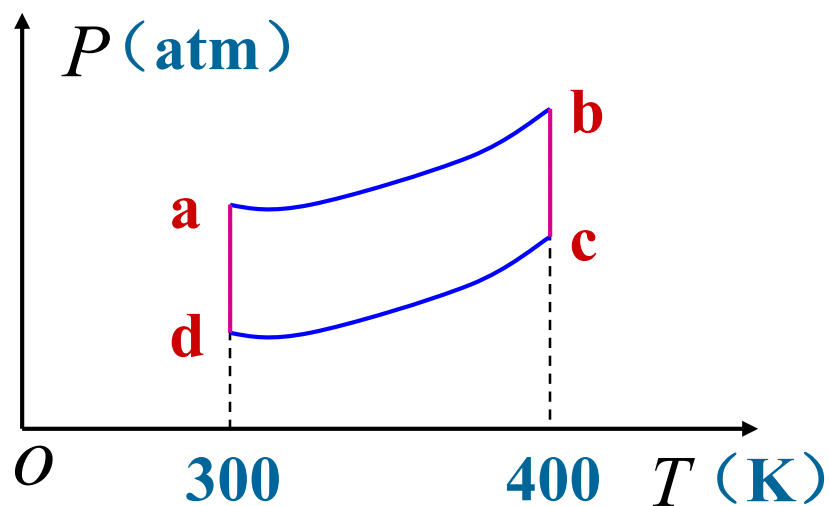
(A) $\eta_1 = \eta_2$ $W_1 = W_2$

(B) $\eta_1 > \eta_2$ $W_1 < W_2$

(C) $\eta_1 < \eta_2$ $W_1 < W_2$

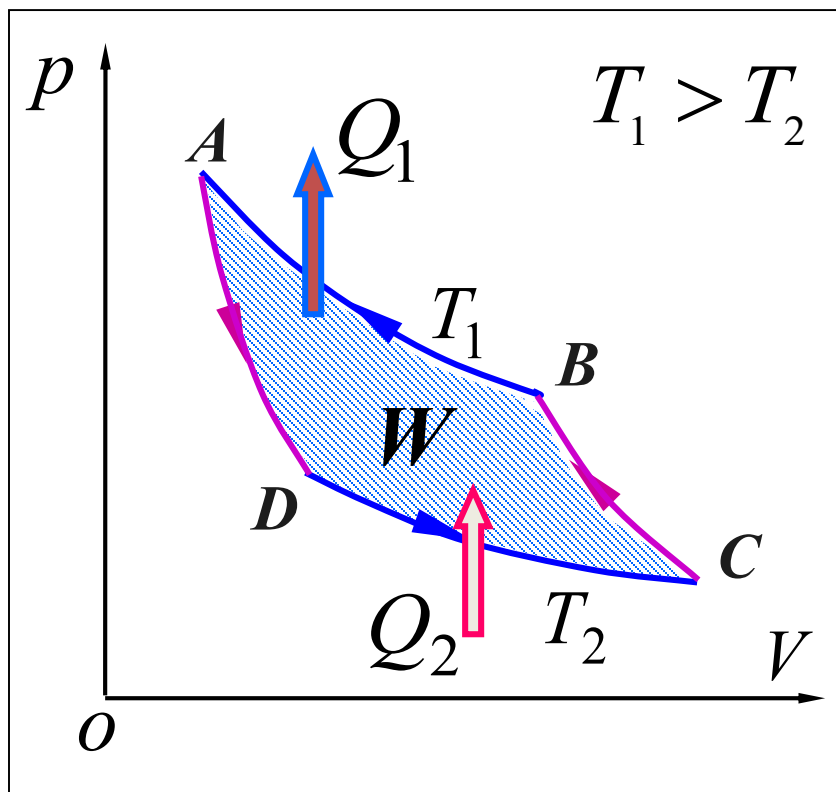
(D) $\eta_1 = \eta_2$ $W_1 < W_2$

例 一定量的理想气体，在 $P-T$ 图上经历如图所示的循环过程 $abcda$ ，其中 ab 、 cd 为两个绝热过程，求：该循环过程的效率。

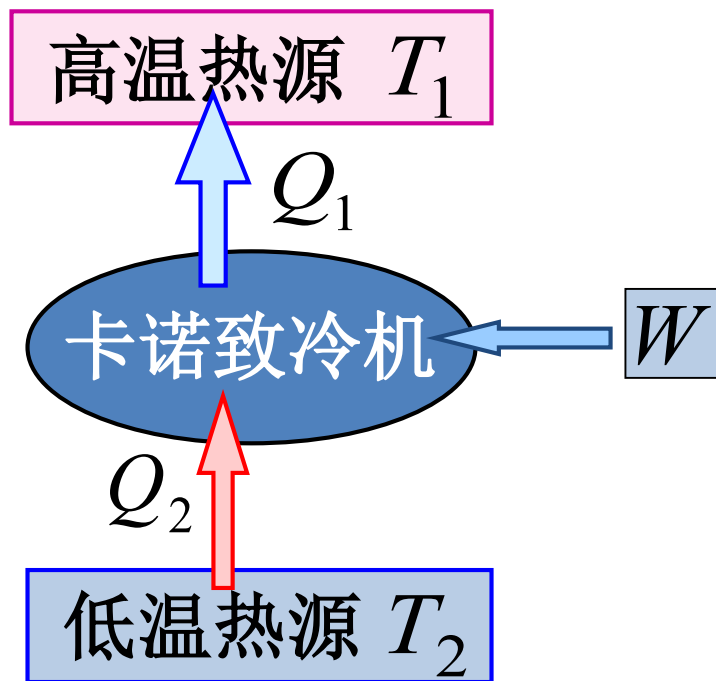


理想气体卡诺循环制冷机效率的计算

卡诺致冷机（卡诺逆循环）



$T_2 \downarrow, e \downarrow$: 要从温度越低的低温热源中吸热就要消耗更多的功。

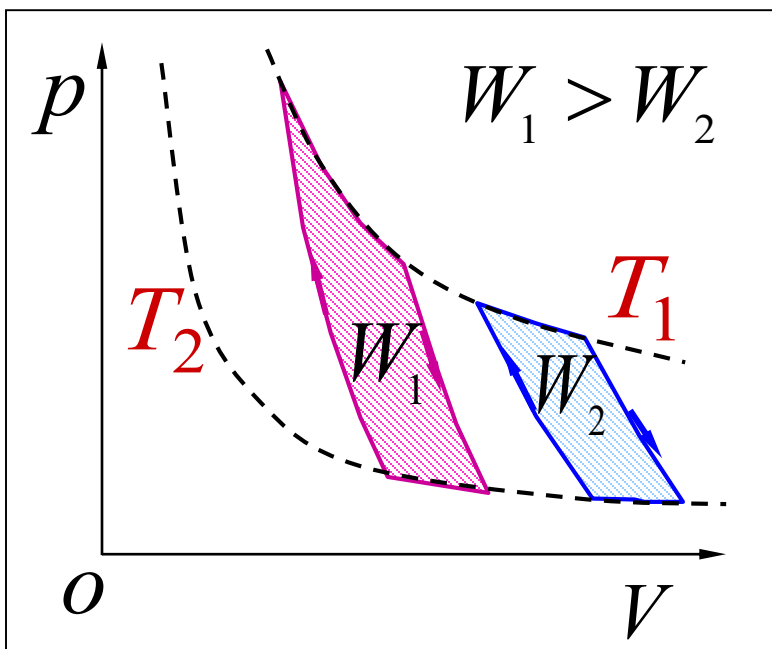


卡诺致冷机致冷系数

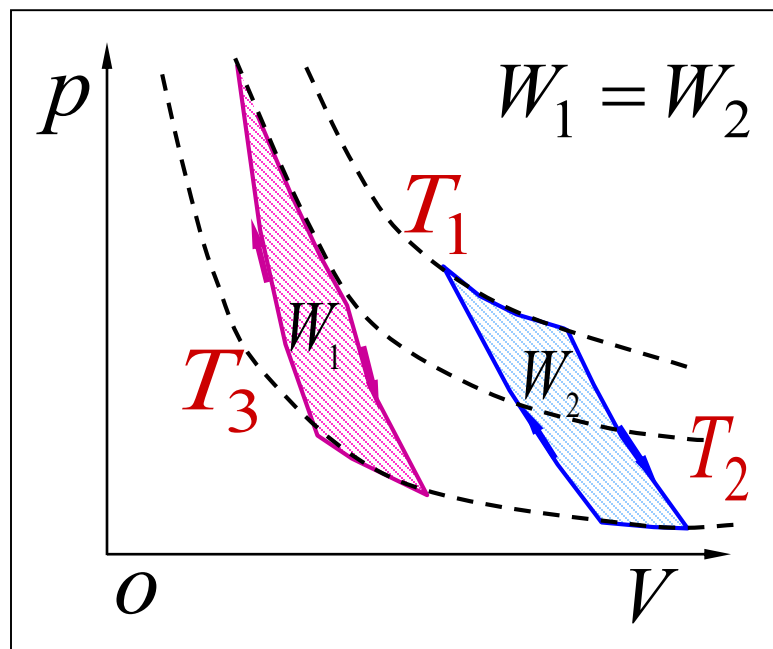
$$e = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

讨论:

图中两卡诺循环 $\eta_1 = \eta_2$ 吗？



$$\eta_1 = \eta_2$$



$$\eta_1 < \eta_2$$

注意:

$$\eta = \frac{W_{\text{净}}}{Q_{\text{吸}}} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$w = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

对一切循环适用

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$w = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

只对卡诺循环适用

大学物理（上）

8 热力学基础

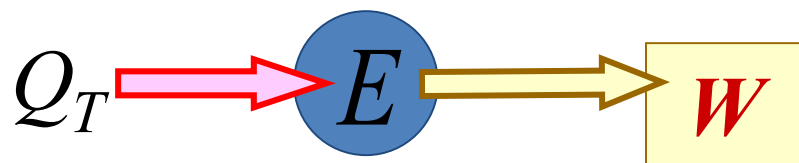
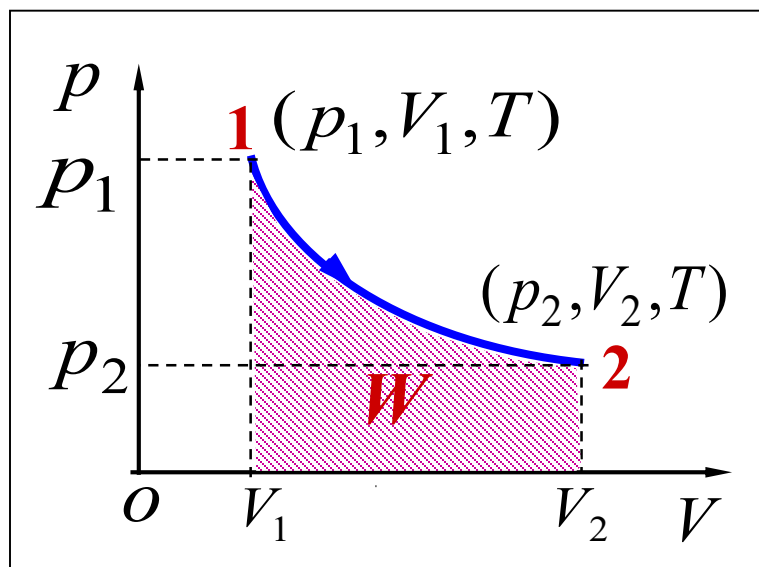
8.6 热力学第二定律 卡诺定理

第二定律的提出

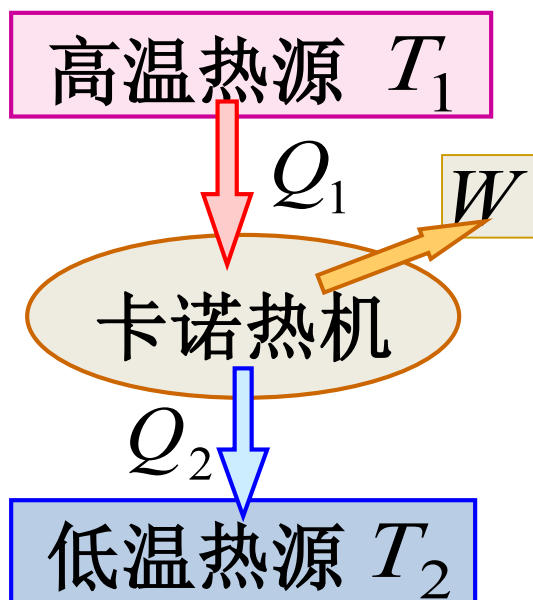
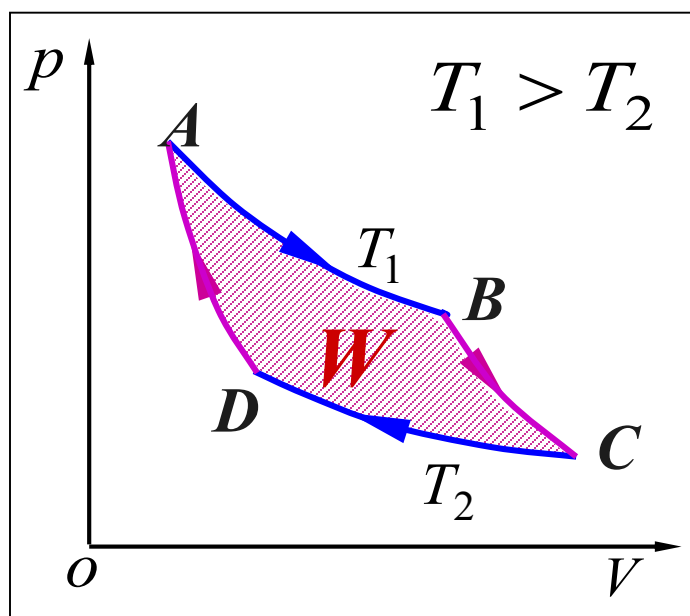
- 1 第一定律无法说明**功热转换的条件**。
- 2 第一定律无法说明**热传导的方向性、气体自由膨胀的不可逆性**等问题。

一 热力学第二定律的两种表述

1 开尔文说法：不可能制造出这样一种循环工作的热机，它只使单一热源冷却来做功，而不放出热量给其他物体，或者说不使外界发生任何变化。



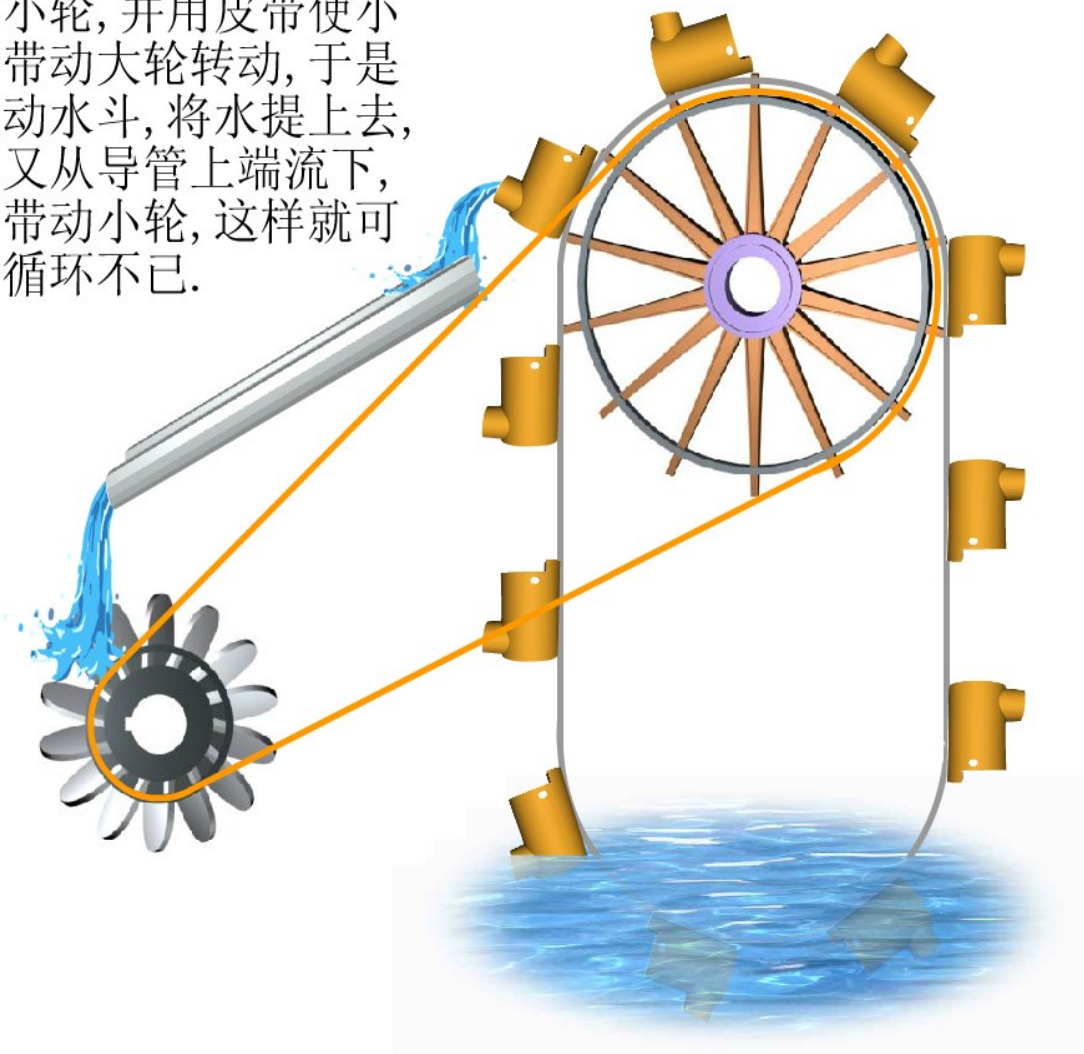
等温膨胀过程是从单一热源吸热做功，而不放出热量给其它物体，但它非循环过程。



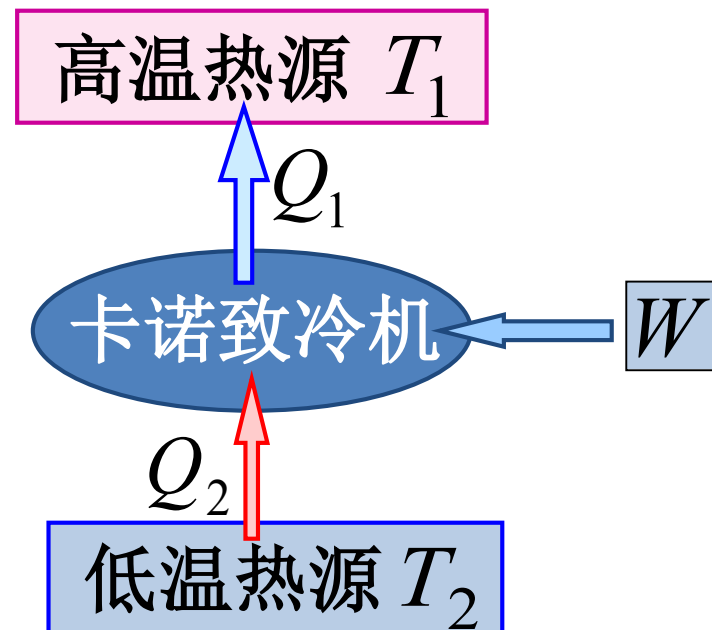
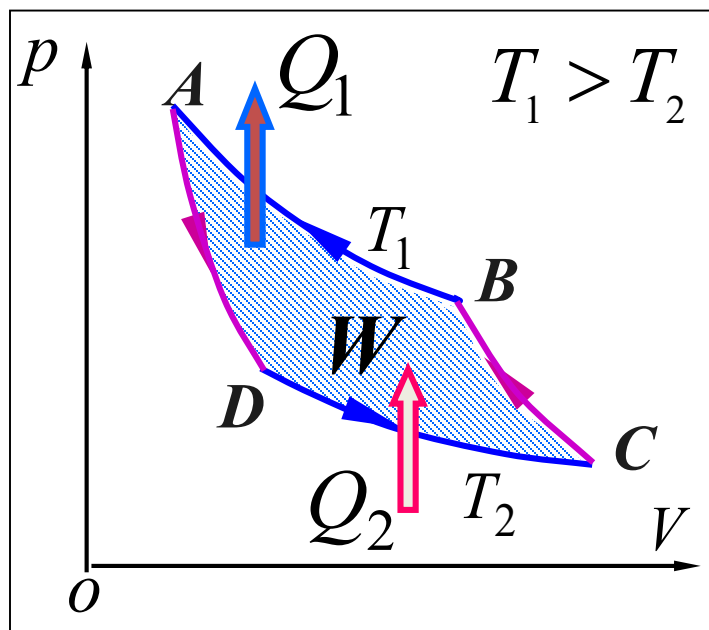
卡诺循环是循环过程，但需两个热源，且使外界发生变化。

永动机的设想图

导管内水流下来冲
动小轮,并用皮带使小
轮带动大轮转动,于是
拖动水斗,将水提上去,
水又从导管上端流下,
再带动小轮,这样就可
以循环不已.



2 克劳修斯说法：不可能把热量从低温物体自动传到高温物体而不引起外界的变化。



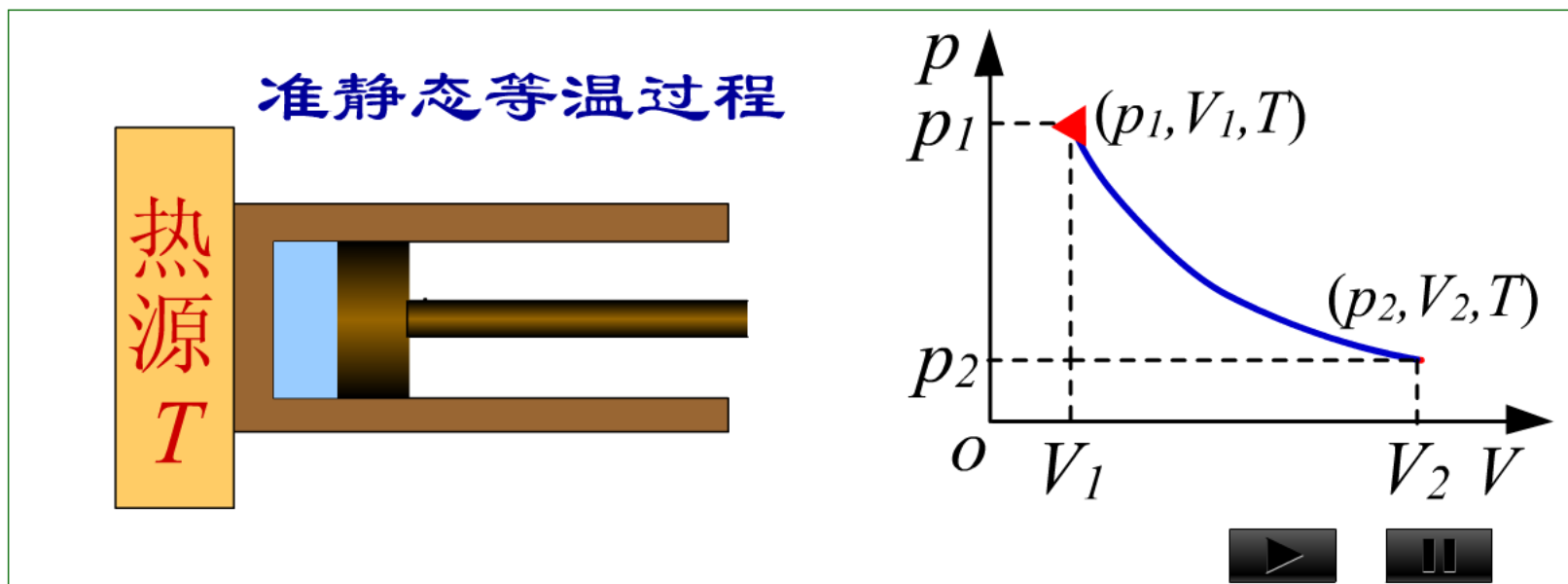
虽然卡诺致冷机能把热量从低温物体移至高温物体，但需外界做功且使环境发生变化。

注意

- 1 热力学第二定律是大量**实验和经验的总结**。
- 2 热力学第二定律开尔文说法与克劳修斯说法具有等效性。
- 3 热力学第二定律可有多种说法，每一种说法都反映了**自然过程的方向性**。

二 可逆过程与不可逆过程

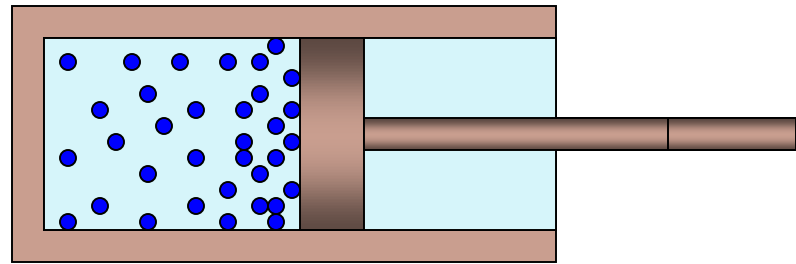
可逆过程：在系统状态变化过程中，如果逆过程能重复正过程的每一状态，而不引起其他变化，这样的过程叫做可逆过程。



准静态无摩擦过程为可逆过程

不可逆过程：在不引起其他变化的条件下，不能使逆过程重复正过程的每一状态，或者虽能重复但必然会引起其他变化，这样的过程叫做不可逆过程。

非准静态过程为不可逆过程。



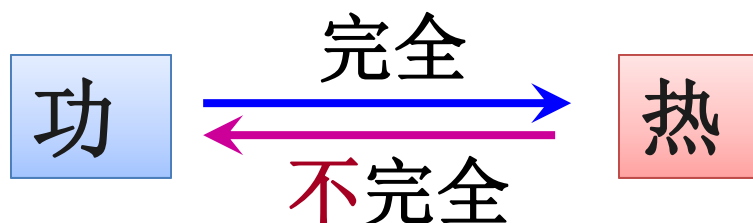
可逆过程的条件

准静态过程（无限缓慢的过程），且无摩擦力、粘滞力或其他耗散力作功，无能量耗散的过程。

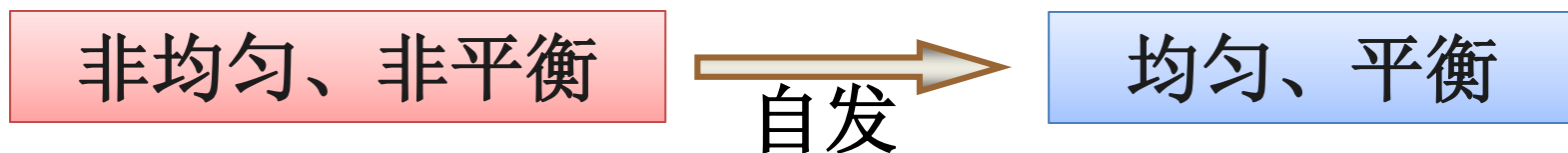
热力学第二定律的实质

自然界一切与热现象有关的实际宏观过程都是不可逆的。

➤ 热功转换



➤ 热传导



三 卡诺定理

1) 在相同高温热源和低温热源之间工作的任意工作物质的可逆机都具有相同的效率。

2) 工作在相同的高温热源和低温热源之间的一切不可逆机的效率都不可能大于可逆机的效率。

以卡诺机为例，有

$$\eta' = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

四 能量品质

热力学第一定律



能量转换和守恒定律

热力学第二定律
卡诺定理



有用能是受到限制的

可利用的能量越多，
该**能量品质**越好，
反之则差。

高温热源 T_1

Q_1



卡诺热机

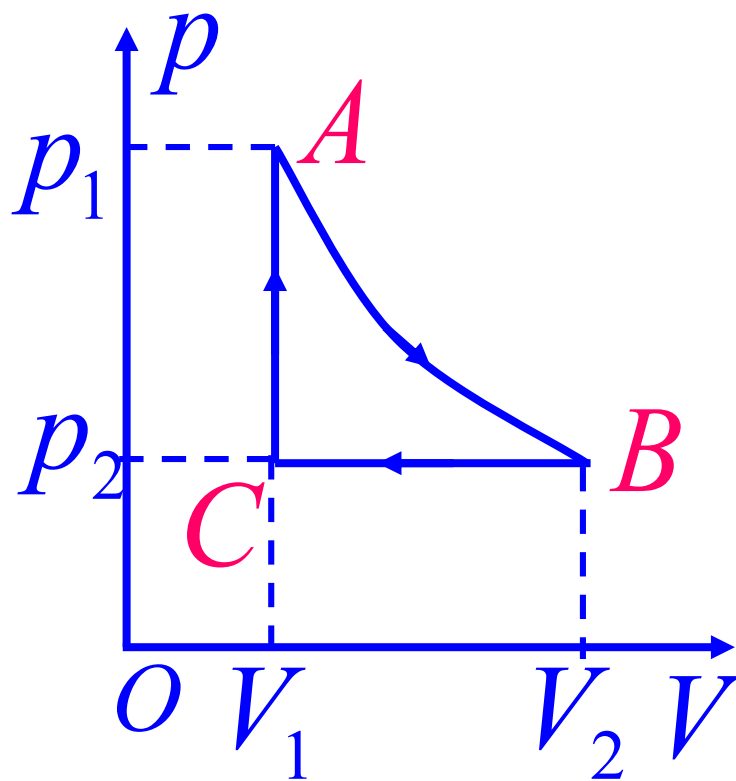
$W = \eta Q_1$

$Q_2 = (1 - \eta) Q_1$

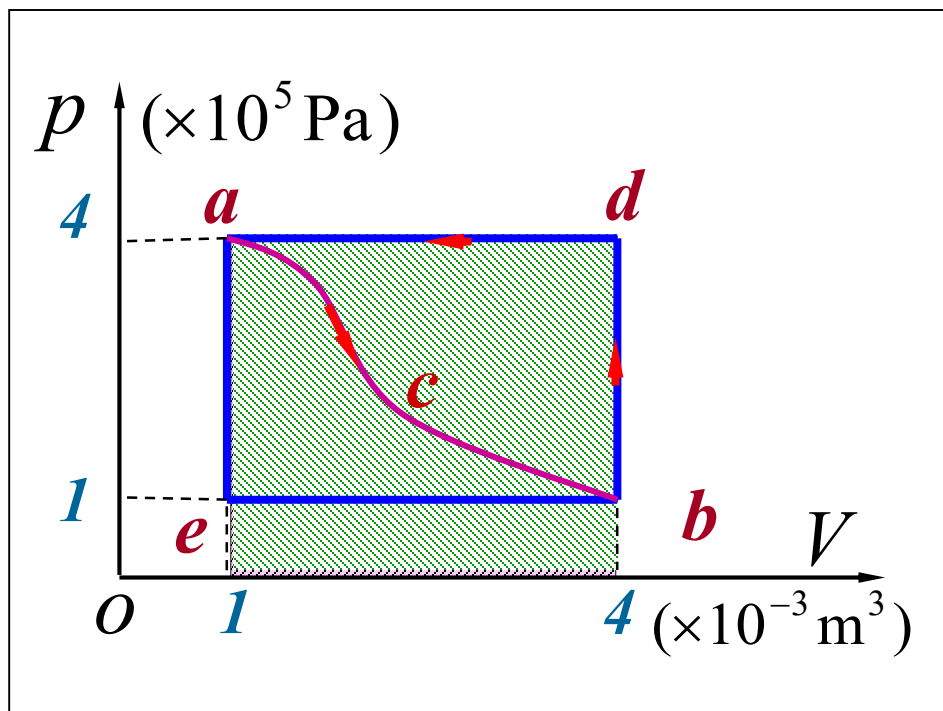
低温热源 T_2

例题和练习

[例]1mol氧气作如图循环，AB为等温过程，BC为等压过程，CA为等容过程。试计算循环效率。

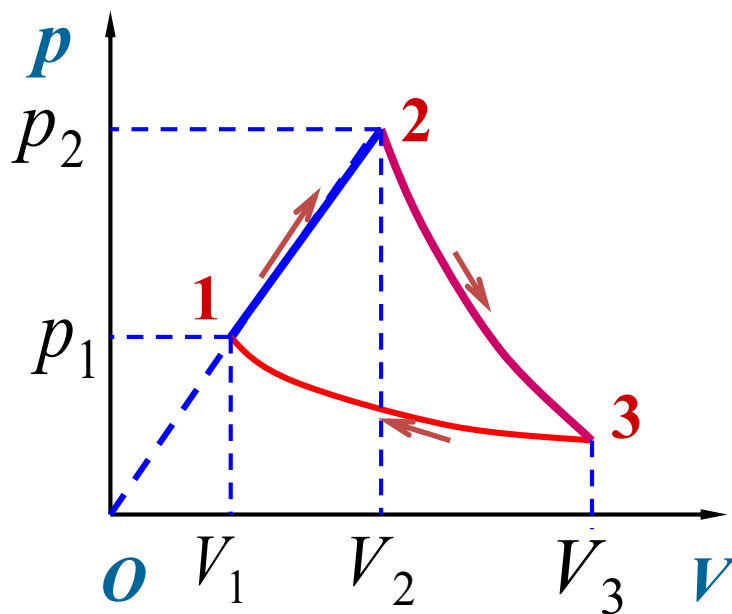


例：一定量的理想气体经历 acb 过程时吸热 200 J ，
则经历 $acbda$ 过程时，吸热多少？



例 1mol 双原子分子理想气体经过如图的过程，其中1—2为直线、2—3为绝热过程、3—1为等温过程.已知 T_1 , $T_2 = 2T_1$, $V_3 = 8V_1$.求：1) 各过程的功、热量和内能变化；2) 此循环热机效率.

(已知 $C_v = \frac{5}{2}R$)



作业

➤ **P232: 15; 16; 23**

版权声明

本课件根据高等教育出版社《物理学教程（第三版）上册》（马文蔚 周雨青 编）配套课件制作。课件中的图片和动画版权属于原作者所有；部分例题来源于清华大学编著的“大学物理题库”；其余文字资料由 [Haoxian Zeng](#) 编写，采用 [知识共享 署名-相同方式共享 3.0 未本地化版本 许可协议](#) 进行许可。详细信息请查看[课件发布页面](#)。