

1. 什么是工程热力学

从工程技术观点出发,研究物质的热力学性质,热能转换为机械能的规律与方法,以与有效、合理地利用热能的途径。

2. 能源的地位与作用与我国能源面临的主要问题

3. 热能与其利用

[1]热能: 能量的一种形式

[2]来源: 一次能源: 以自然形式存在, 可利用的能源。

如风能, 水力能, 太阳能、地热能、化学能与核能等。

二次能源: 由一次能源转换而来的能源, 如机械能、机械能等。

[3]利用形式:

直接利用: 将热能利用来直接加热物体。如烘干、采暖、熔炼(能源消耗比例大)

间接利用: 各种热能动力装置, 将热能转换成机械能或者再转换成电能,

4. 热能动力转换装置的工作过程

5. 热能利用的方向性与能量的两种属性

[1]过程的方向性: 如: 由高温传向低温

[2]能量属性: 数量属性、, 质量属性 (即做功能力)

[3]数量守恒、质量不守恒

[4]提高热能利用率: 能源消耗量与国民生产总值成正比。



1. 1 热力系统

一、热力系统

系统：用界面从周围的环境中分割出来的研究对象，或空间内物体的总与。

外界：与系统相互作用的环境。

界面：假想的、实际的、固定的、运动的、变形的。

依据：系统与外界的关系

系统与外界的作用：热交换、功交换、质交换。

二、闭口系统与开口系统

闭口系统：系统内外无物质交换, 称控制质量。

开口系统：系统内外有物质交换, 称控制体积。

三、绝热系统与孤立系统

绝热系统：系统内外无热量交换（系统传递的热量可忽略不计时，可认为绝热）

孤立系统：系统与外界既无能量传递也无物质交换

=系统+相关外界=各相互作用的子系统之与= 一切热力系统连同相互作用的外界

四、根据系统内部状况划分

可压缩系统：由可压缩流体组成的系统。

简单可压缩系统：与外界只有热量与准静态容积变化



均匀系统：内部各部分化学成分与物理性质都均匀一致的系统，是由单相组成的。

非均匀系统：由两个或两个以上的相所组成的系统。

单元系统：一种均匀的与化学成分不变的物质组成的系统。

多元系统：由两种或两种以上物质组成的系统。

单相系：系统中工质的物理、化学性质都均匀一致的系统称为单相系。

复相系：由两个相以上组成的系统称为复相系，如固、液、气组成的三相系统。

1.2 工质的热力状态与状态参数

一、状态与状态参数

状态：热力系统中某瞬间表现的工质热力性质的总状况。

状态参数：描述工质状态特性的各种状态的宏观物理量。

如：温度（T）、压力（P）、比容（v）或密度（ρ）、内能（u）、焓（h）、熵（s）、自由能（f）、自由焓（g）等。

状态参数的数学特性：

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1$$

表明：状态的路径积分仅与初、终状态有关，而与状态变化的途径无关。



$$2. \oint dx = 0$$

表明：状态参数的循环积分为零

基本状态参数：可直接或间接地用仪表测量出来的状态参数：温度、压力、比容或密度

(1) 温度：

宏观上，是描述系统热力平衡状况时冷热程度的物理量。

微观上，是大量分子热运动强烈程度的量度

(2) 压力：

垂直作用于器壁单位面积上的力，称为压力，也称压强。

$$p = \frac{F}{f} \quad \text{式中：} F \text{—整个容器壁受到的力，单位为牛顿（N）；}$$

f —容器壁的总面积（ m^2 ）。

微观上：分子热运动产生的垂直作用于容器壁上单位面积的力。

压力测量依据：力平衡原理 压力单位：MPa

相对压力：相对于大气环境所测得的压力。工程上常用测压仪表测定的压力。

以大气压力为计算起点，也称表压力。

$$p = B + p_g \quad (P > B)$$



$$p = B - H \quad (P < B)$$

式中 B —当地大气压力

P_g —高于当地大气压力时的相对压力，称表压力；

H —低于当地大气压力时的相对压力，称为真空值。

注意：只有绝对压力才能代表工质的状态参数

(3) 比容：单位质量工质所具有的容积。 密度：单位容积的工质所具有的质量。

$$v = \frac{V}{m} \text{ m}^3/\text{kg}$$

关系： $\rho v = 1$

式中： ρ —工质的密度 kg/m^3 ， v —工质的比容 m^3/kg

例：表压力或真空度为什么不能当作工质的压力？工质的压力不变化，测量它的压力表或真空表的读数是否会变化？

解：作为工质状态参数的压力是绝对压力，测得的表压力或真空度都是工质的绝对压力与大气压力的相对值，因此不能作为工质的压力；因为测得的是工质绝对压力与大气压力的相对值，即使工质的压力不变，当大气压力改变时也会引起压力表或真空表读数的变化。

1. 3 准静态过程与可逆过程



热力过程：系统状态的连续变化称系统经历了一个热力过程。

一、准静过程：如果造成系统状态改变的不平衡势差无限小，以致该系统在任意时刻均无限接近于某个平衡态，这样的过程称为准静态过程。

注意：准静态过程是一种理想化的过程，实际过程只能接近准静态过程。

二、可逆过程：系统经历一个过程后，如令过程逆行而使系统与外界同时恢复到初始状态，而不留下任何痕迹，则此过程称为可逆过程。

实现可逆过程的条件：

过程无势差（传热无温差，作功无力差）

过程无耗散效应。

三、可逆过程的膨胀功（容积功）

系统容积发生变化而通过界面向外传递的机械功。

$$w = \int_1^2 p dv \quad \text{J/kg}$$

规定：系统对外做功为正，外界对系统作功为负。

问题：比较不可逆过程的膨胀功与可逆过程膨胀功

四、可逆过程的热量：

系统与外界之间依靠温差传递的能量称为热量。



$$q = \int_1^2 T ds$$

可逆过程传热量: q J/kg

规定: 系统吸热为正, 放热为负。

1. 4 热力循环:

定义: 工质从某一初态开始, 经历一系列状态变化, 最后由回复到初态的过程。

一、正循环

正循环中的热转换功的经济性指标用循环热效率:

式中 q_1 —工质从热源吸热; q_2 —工质向冷源放热; w_0 —循环所作的净功。

二、逆循环

以获取制冷量为目的。

$$\varepsilon_1 = \frac{q_2}{w_0} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}$$

制冷系数: 式中: q_1 —工质向热源放出热量; q_2 —工质从冷源吸取热量; w_0 —循环所作的净功。

$$\varepsilon_2 = \frac{q_1}{w_0} = \frac{q_1}{q_1 - q_2}$$

供热系数: 式中: q_1 —工质向热源放出热量, q_2 —工质从冷源吸取热量, w_0 —循环所作的净功



热力学第一定律

2.1 系统的储存能

系统的储存能的构成：内部储存能+外部储存能

一、内能

热力系处于宏观静止状态时系统内所有微观粒子所具有的能量之和，单位质量工质所具有的内能，称为比内能，简称内能。 $U=mu$

内能=分子动能+分子位能

分子动能包括：

1. 分子的移动动能 2. 分子的转动动能 3. 分子内部原子振动动能与位能

分子位能：克服分子间的作用力所形成

$u=f(T, V)$ 或 $u=f(T, P)$ $u=f(P, V)$

注意：内能是状态参数。

特别的：对理想气体 $u=f(T)$

二、外储存能：

系统工质与外力场的相互作用（如重力位能）与以外界为参考坐标的系统宏观运动所具有的能量（宏观动能）。

宏观动能： $E_k = \frac{1}{2}mc^2$ 重力位能： $E_p = mgz$ 式中 g —重力加速度。



三、系统总储存能：

$$E = U + \frac{1}{2}mc^2 + mgz \quad e = u + \frac{1}{2}c^2 + gz$$

或

2. 2 系统与外界传递的能量

与外界热源, 功源, 质源之间进行的能量传递

一、热量

在温差作用下, 系统与外界通过界面传递的能量。

系统吸热热量为正, 系统放热热量为负。

单位: kJ kcal l

特点: 热量是传递过程中能量的一种形式, 热量与热力过程有关, 或与过程的路径有关.

二、功

除温差以外的其它不平衡势差所引起的系统与外界传递的能量.

1. 膨胀功 W : 在力差作用下, 通过系统容积变化与外界传递的能量。

单位: 1 J=1 Nm

规定: 系统对外做功为正, 外界对系统做功为负。

膨胀功是热变功的源泉



2. 轴功 W_s :

通过轴系统与外界传递的机械功

注意：刚性闭口系统轴功不可能为正，轴功来源于能量转换

三、随物质传递的能量

1. 流动工质本身具有的能量

2. 流动功(或推动功):

维持流体正常流动所必须传递量,是为推动流体通过控制体界面而传递的机械功。

推动 1kg 工质进、出控制体所必须的功 $w_f = p_2 v_2 - p_1 v_1$ 注意：流动功仅取决于控制体进出口界面工质的热力状态。流动功是由泵风机等提供

四、焓的定义

焓=内能+流动功

对于 m 千克工质: $H = U + pV$

对于 1 千克工质: $h = u + p v$

五、焓的物理意义

对流动工质(开口系统),表示沿流动方向传递的总能量中,取决于热力状态的那部分能量.

对不流动工质(闭口系统),焓只是一个复合状态参数。



2.3 闭口系统能量方程

一、能量方程表达式

$$\Delta U = Q - W \quad \text{适用于 } m \text{ kg 质量工质}$$

$$\Delta u = q - w \quad \text{1 kg 质量工质}$$

注意：该方程适用于闭口系统、任何工质、任何过程。

由于反映的是热量、内能、膨胀功三者关系，因而该方程也适用于开口系统、任何工质、任何过程。

$$\Delta u = q - \int_1^2 p dv$$

特别的：对可逆过程

二、循环过程第一定律表达式

结论：第一类永动机不可能制造出来

三、理想气体内能变化计算

由 $\delta q_v = du_v = c_v dT$ 得：

适用于理想气体一切过程或者实际气体定容过程

或： $\Delta u = c_v (T_2 - T_1)$ 用定值比热计算

用平均比热计算



$c_v = f(T)$ 的经验公式代入 $\Delta u = \int_1^2 c_v dT$ 积分。

理想气体组成的混合气体的内能：
$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n m_i u_i$$

2. 4 开口系统能量方程

由质量守恒原理：

进入控制体的质量 - 离开控制体的质量 = 控制体中质量的增量

能量守恒原理：

进入控制体的能量 - 控制体输出的能量 = 控制体中储存能的增量

设控制体在 $d\tau$ 时间内：

进入控制体的能量 = $\delta Q + (h_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1)\delta m_1$

离开控制体的能量 = $\delta W_s + (h_2 + \frac{1}{2}c_2^2 + gz_2)\delta m_2$

控制体储存能的变化 $dE_{cv} = (E + dE)_{cv} - E_{cv}$ 代入后得到：

注意：本方程适用于任何工质，稳态稳流、不稳定流动的一切过程，也适用于闭口系统。



2. 5 开口系统稳态稳流能量方程

一、稳态稳流工况

工质以恒定的流量连续不断地进出系统，系统内部与界面上各点工质的状态参数与宏观运动参数都保持一定，不随时间变化，称稳态稳流工况。

条件：1. 符合连续性方程

2. 系统与外界传递能量，收入=支出，且不随时间变化

适用于任何工质，稳态稳流热力过程

二、技术功

在热力过程中可被直接利用来作功的能量，称为技术功。

技术功=膨胀功+流动功

特别的：对可逆过程：

公式： $dh = \delta q - \delta w_s$ 适用于任何工质稳态稳流过程，忽略工质动能与位能的变化。

三、理想气体焓的计算

对于理想气体 $h = u + RT = f(T)$ 适用于理想气体的一切热力过程或者实际气体的定压过程

适用于理想气体的一切热力过程或者实际气体的定压过程，

用定值比热计算



用平均比热计算

把 $c_p=f(T)$ 的经验公式代入 $\Delta h = \int_1^2 c_p dT$ 积分。

气体与蒸汽的性质

3.1 理想气体状态方程

一、理想气体与实际气体

定义：气体分子是一些弹性的，忽略分子相互作用力，不占有体积的质点，

注意：当实际气体 $p \rightarrow 0$ $v \rightarrow \infty$ 的极限状态时，气体为理想气体。

二、理想气体状态方程的导出

状态方程的几种形式

1. $p v = R T$ 适用于 1 千克理想气体。

式中：p—绝对压力 Pa

v —比容 m^3/kg ， T —热力学温度 K

2. $p V = m R T$ 适用于 m 千克理想气体。

式中 V —质量为 m kg 气体所占的容积



3. $pV_M = R_0 T$ 适用于 1 千摩尔理想气体。

式中 $V_M = V/n$ —气体的摩尔容积, m^3/kmol ; $R_0 = R$ —通用气体常数, $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$

4. $pV = nR_0 T$ 适用于 n 千摩尔理想气体。

式中 V — $n \text{ kmol}$ 气体所占有的容积, m^3 ; n —气体的摩尔数, $n = \frac{m}{M}$, kmol

5.
$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$$

6.
$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$
 仅适用于闭口系统

3. 2 理想气体的比热

一、比热的定义与单位

定义: 单位物量的物体, 温度升高或降低 1K (1°C) 所吸收或放出的热量, 称为该物体比热。

单位: 式中 c —质量比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

c' —容积比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

M_c —摩尔比热, $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$



换算关系： $c' = \frac{Mc}{22.4} = c\rho_0$ 注意：比热不仅取决于气体的性质，还于气体的热力过程与所处的状态有关。

二、定容比热与定压比热

定容比热： $c_v = \frac{\delta q_v}{dT} = \frac{du_v}{dT} = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$ 表示：明单位物量的气体在定容情况下升高或降低 1K 所吸收或放出的热量。

定压比热： $c_p = \frac{\delta q_p}{dT} = \frac{dh}{dT}$ 表示：单位物量的气体在定压情况下升高或降低 1K 所吸收或放出的热量。

迈耶公式： $c_p - c_v = R$ $c'_p - c'_v = \rho_0 R$

三、定值比热、真实比热与平均比热

1、定值比热：凡分子中原子数目相同因而其运动自由度也相同的气体，它们的摩尔比热值都相等，称为定值比热。

2、真实比热：相应于每一温度下的比热值称为气体的真实比热。

常将比热与温度的函数关系表示为温度的三次多项式

3. 平均比热

气体与蒸汽的基本热力过程



一、定压过程

二、定容过程

三、定温过程

四、绝热过程

$$q=0 \quad w = -\Delta u \quad w_t = -\Delta h$$

热力学第二定律

5.1 自然过程的方向性

一、摩擦过程

功可以自发转为热,但热不能自发转为功

二、传热过程

热量只能自发从高温传向低温

三、自由膨胀过程

绝热自由膨胀为无阻膨胀,但压缩过程却不能自发进行

四、混合过程

两种气体混合为混合气体是常见的自发过程

五、燃烧过程



燃料燃烧变为燃烧产物(烟气等), 只要达到燃烧条件即可自发进行

结论: 自然的过程是不可逆的

5. 2 热力学第二定律的实质

克劳修斯说法: 热量不可能从低温物体传到高温物体而不引起其它变化

开尔文说法: 不可能制造只从一个热源取热使之完全变为机械能, 而不引起其它变化的循环发动机。

卡诺循环与卡诺定理

意义: 解决了热变功最大限度的转换效率的问题

一、卡诺循环

[一] 正循环

组成: 两个可逆定温过程、两个可逆绝热过程

过程 a-b: 工质从热源(T_1)可逆定温吸热

b-c: 工质可逆绝热(定'熵)膨胀

c-d: 工质向冷源(T_2)可逆定温放热

d-a: 工质可逆绝热(定熵)压缩回复到初始状态。



循环热效率:

$$q_1 = T_1(s_b - s_a) = \text{面积 abefa} \quad q_2 = T_2(s_c - s_d) = \text{面积 cdfec}$$

因为 $(s_b - s_a) = (s_c - s_d)$ 得到 $\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 分析:

1、热效率取决于两热源温度, T_1 、 T_2 , 与工质性质无关。

2、由于 $T_1 \neq \infty$, $T_2 \neq 0$, 因此热效率不能为 1

3、若 $T_1 = T_2$, 热效率为零, 即单一热源, 热机不能实现。

[二] 逆循环:

包括: 绝热压缩、定温放热。

定温吸热、绝热膨胀。

$$\text{制冷系数: } \varepsilon_{1c} = \frac{q_2}{w_0} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad \text{供热系数: } \varepsilon_{2c} = \frac{q_1}{w_0} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad \text{关系: } \varepsilon_{2c} = \varepsilon_{1c} + 1$$

析: 通常 $T_2 > T_1 - T_2$ 所以: $\varepsilon_{1c} > 1$

二、卡诺定理

1、所有工作于同温热源、同温冷源之间的一切热机, 以可逆热机的热效率为最高。

2. 在同温热源与同温冷源之间的一切可逆热机, 其热效率均相等。



压气机的热力过程

8.1 压气机的理论压缩功

压气机：用来压缩气体的设备

一、单机活塞式压气机工作过程

吸气过程、压缩过程、排气过程。理想化为可逆过程、无阻力损失。

1. 定温压缩轴功的计算

按稳态稳流能量方程，压气机所消耗的功，一部分用于增加气体的焓，一部分转化为热能向外放出。

对理想气体定温压缩，表示消耗的轴功全部转化成热能向外放出。

2. 定熵压缩轴功的计算，

按稳态稳流能量方程，绝热压缩消耗的轴功全部用于增加气体的焓，使气体温度升高，该式也适用于不可逆过程

3. 多变压缩轴功的计算

按稳态稳流能量方程，多变压缩消耗的轴功部分用于增加气体的焓，部分对外放热，该式同样适用于不可逆过程

结论： $|-w_{st}| < |-w_{sn}| < |-w_{ss}|$ $T_{2s} > T_{sn} > T_{2T}$ 可见定温过程耗功最少，绝热过程耗功最多



8. 2 多级压缩与中间冷却

由 $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ 即：压力比越大，其压缩终了温度越高，较高压缩气体常采用中间冷却设备，称多级压气机。

最佳增压比：使多级压缩中间冷却压气机耗功最小时，各级的增压比称为最佳增压比。

压气机的效率：在相同的初态与增压比条件下，可逆压缩过程中压气机所消耗的功与实际不可逆压缩过程中压气机所消耗的功之比，称为压气机的效率。

特点：

1. 减小功的消耗, 由 $p-v$ 图可知
2. 降低气体的排气温度, 减少气体比容
3. 每一级压缩比降低, 压气机容积效率增高

中间压力的确定：原则：消耗功最小。

以两级压缩为例, 得到: $p_2/p_1 = p_3/p_2$ 结论: 两级压力比相等, 耗功最小。

推广为 Z 级压缩

推理：

1. 每级进口、出口温度相等.
2. 各级压气机消耗功相等.



3. 各级气缸与各中间冷却放出与吸收热量相等。

8. 3 活塞式压气机余隙影响

一、余隙对排气量的影响

余隙：为了安置进、排气阀以及避免活塞与汽缸端盖间的碰撞，在汽缸端盖与活塞行程终点间留有一定的余隙，称为余隙容积，简称余隙

活塞式压气机的容积效率：活塞式压气机的有效容积与活塞排量之比，

结论：余隙使一部分汽缸容积不能被有效利用，压力比越大越不利。

二、余隙对理论压缩轴功的影响

式中： $V = V_1 - V_4$ 为实际吸入的气体体积。

结论：不论压气机有无余隙，压缩每 kg 气体所需的理论压缩轴功都相同，所以应减少余隙容积。

气体动力循环

9. 1 活塞式内燃机实际循环的简化

开式循环(open cycle)；

燃烧、传热、排气、膨胀、压缩均为不可逆；



各环节中工质质量、成分稍有变化。

9. 2 活塞式内燃机的理想循环

一、混合加热理想循环

0 1 吸气

1 2 压缩

2 3 喷油、燃烧

3 4 燃烧

4 5 膨胀做功

5 0 排气

蒸汽动力装置循环

热机：将热能转换为机械能的设备叫做热力原动机。热机的工作循环称为动力循环。

动力循环可分：蒸汽动力循环与燃气动力循环两大类。

10. 1 蒸汽动力基本循环—朗肯循环



朗肯循环是最简单的蒸汽动力理想循环，热力发电厂的各种较复杂的蒸汽动力循环都是在朗肯循环的基础上予以改进而得到的。

一、装置与流程

蒸汽动力装置：锅炉、汽轮机、凝汽器与给水泵等四部分主要设备。

工作原理： $p-v$ 、 $T-s$ 与 $h-s$ 。

朗肯循环可理想化为：两个定压过程与两个定熵过程。

二、朗肯循环的能量分析与热效率

取汽轮机为控制体，建立能量方程：

三、提高朗肯循环热效率的基本途径

依据：卡诺循环热效率

1、提高平均吸热温度

直接方法式提高蒸汽压力与温度。

2、降低排气温度

制冷循环

11.1 空气压缩制冷循环

空气压缩式制冷：将常温下较高压力的空气进行绝热膨胀，会获得低温低压的空气。



原则：实现逆卡诺循环

工作原理如图：

注意：空气的热物性决定了空气压缩致冷循环的致冷系数低与单位工质的致冷能力小。

$$\epsilon_1 = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

或：

11. 2 蒸汽压缩制冷循环

一、实际压缩式制冷循环

蒸汽压缩致冷装置：压缩机、冷凝器、膨胀阀与蒸发器组成。

原理：由蒸发器出来的致冷剂的干饱和蒸气被吸入压缩机，绝热压缩后成为过热蒸气(过程 1-2)，蒸气进入冷凝器，在定压下冷却(过程 2-3)，进一步在定压定温下凝结成饱和液体(过程 3-4)。饱和液体继而通过一个膨胀阀(又称节流阀或减压阀)经绝热节流降压降温而变成低干度的湿蒸气。

注意：工业上，用节流阀取代膨胀机。

二、制冷剂的压焓图(lgp-h 图)

原理：以致冷剂焓作为横坐标，以压力对数为纵坐标，共绘出致冷剂的六种状态参数线簇：

定焓(h)、定压力(p)、定温度(T)、定比容(v)、定熵(s)与定干度(x)线。



蒸气压缩式致冷循环各热力过程在 $\lg p-h$ 图上的表示:

1-2 表示压缩机中的绝热压缩过程。2-3-4 是冷凝器中的定压冷却过程

4-5 为膨胀阀中的绝热节流过程。5-1 表示蒸发器内的定压蒸发过程。

三、制冷循环能量分析与致冷系数

实际蒸气压缩致冷循环整个装置的能量分析。其致冷系数为

$$\varepsilon_1 = \frac{q_2}{w_0} = \text{收获/消耗}$$

制冷剂质量流量: $m = \frac{Q_2}{q_2}$ 压缩机所需功率: $p = \frac{mw_0}{3600}$ 冷凝器热负荷: $Q_1 = M(h_2 - h_1)$

四、影响制冷系数的主要因素

降低制冷剂的冷凝温度

提高蒸发温度

