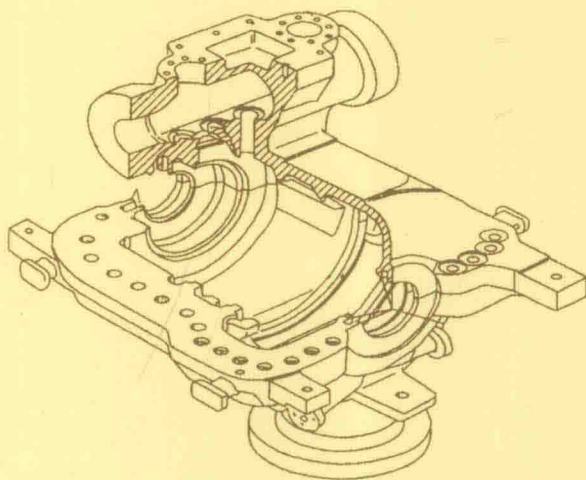


石油化工设备技术问答丛书

# 工业汽轮机设备及运行 技术问答

中国石化集团第五建设公司 王学义 编著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

石油化工设备技术问答丛书

# 工业汽轮机设备及运行 技术问答

中国石化集团第五建设公司 王学义 编著

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书以问答的形式,围绕工业汽轮机设备及运行的相关技术,对工业汽轮机的工作原理、本体结构、凝汽设备、调节系统、供油系统进行了阐述,同时详细介绍了工业汽轮机的运行、典型事故处理及预防、机组异常振动的原因及处理等内容。

书中内容通俗易懂,紧扣专业技术的实际需要,强调实际应用能力的培养,适合从事工业汽轮机操作及维护的技术人员和管理人员参考阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

工业汽轮机设备及运行技术问答/王学义编著.  
—北京:中国石化出版社,2012.9  
ISBN 978-7-5114-1618-6

I. ①工… II. ①王… III. ①蒸汽透平-问题解答  
IV. ①TK26-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 229871 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 451 千字

2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

定价:54.00 元

# 序

设备是企业进行生产的物质技术基础。现代化的石油化工企业，生产连续性强、自动化水平高，且具有高温、高压、易燃、易爆、易腐蚀、易中毒的特点。设备一旦发生问题，会带来一系列严重的后果，往往会导致装置停产、环境污染、火灾爆炸、人身伤亡等重大事故的发生。因而石油化工厂的设备更体现了设备是企业进行生产、发展的重要物质基础，“基础不牢，地动山摇”。设备状况的好坏，直接影响着石油化工企业生产装置的安全、稳定、长周期运行，从而也影响着企业的经济效益。

确保石油化工厂设备经常处于良好的状况，就必须强化设备管理，广泛应用先进技术，不断提高检修质量，搞好设备的操作和维护，及时消除设备隐患，排除故障，提高设备的可靠度，从而确保生产装置的安全、稳定、长周期运行。

为了加强企业“三基”工作，适应广大石油化工设备管理、操作及维护检修人员了解设备，熟悉设备，懂得设备的结构、性能、作用及可能发生的故障和预防措施，以提高消除隐患、排除故障、搞好操作和日常维护能力的需要，中国石化出版社针对石油化工厂常见的各类设备，诸如，各类泵、压缩机、风机及驱动机、各类工业炉、塔、反应器、压力容器，各类储罐、换热设备，以及各类工业管线、阀门管件等等，组织长期工作在石油化工企业基层，有一定设备理论知识和实践经验的专家和技术人员，以设备技术问答的形式，编写了一系列“石油化工设备技术问答丛书”，供大家学习和阅读，希望对广大读者有所帮助。本书即为这套丛书之一。

中国石化设备管理协会副会长  
胡安定

# 目 录

第一章 基础知识 .....	(1)
第一节 热力学基础知识 .....	(1)
第二节 流体力学基础知识 .....	(18)
第三节 金属材料基础知识 .....	(26)
第四节 传热学知识 .....	(37)
第二章 工业汽轮机工作原理 .....	(49)
第一节 绪 论 .....	(49)
第二节 工业汽轮机工作原理 .....	(57)
第三节 多级工业汽轮机 .....	(69)
第四节 汽轮机的变工况 .....	(75)
第三章 工业汽轮机本体结构 .....	(85)
第一节 工业汽轮机静子结构 .....	(85)
第二节 工业汽轮机转子结构 .....	(114)
第四章 工业汽轮机的凝汽设备 .....	(133)
第五章 汽轮机的调节系统和供油系统 .....	(147)
第一节 汽轮机调节系统的组成 .....	(147)
第二节 汽轮机调节系统的特性 .....	(170)
第三节 汽轮机保护装置 .....	(175)
第四节 工业汽轮机的油系统 .....	(191)
第五节 电液调节系统及伍德瓦得调速器 .....	(198)
第六章 汽轮机的运行 .....	(210)
第一节 汽轮机部件的热应力、热变形和热膨胀 .....	(210)
第二节 工业汽轮机的启动 .....	(217)
第三节 工业汽轮机的停机 .....	(230)
第四节 工业汽轮机正常运行与维护 .....	(235)
第五节 汽轮机的寿命管理 .....	(239)
第六节 供热汽轮机的运行特点 .....	(242)
第七章 汽轮机运行事故处理及预防 .....	(246)
第一节 汽轮机典型事故处理及预防 .....	(246)
第二节 其他事故处理及预防 .....	(258)
第八章 汽轮机组异常振动的原因及处理 .....	(264)
第一节 概 述 .....	(264)
第二节 汽轮机发电机组振动的评定标准 .....	(264)
第三节 临界转速及其振动特点 .....	(267)
第四节 现场常见的振动现象及其原因分析 .....	(272)
参考文献 .....	(280)

# 第一章 基础知识

## 第一节 热力学基础知识

### 1. 什么是工程热力学?

答: 工程热力学是研究热能与机械能相互转换的规律和方法的一门学科。

### 2. 何谓工质? 工厂企业自备电站采用什么气体作为工质?

答: 在热机中要使热能不断地转变为机械能, 需要借助于媒介物质, 即实现能量转换的媒介物质称为工质。

在工厂企业自备电站中, 由于工质连续不断地流过热力设备而膨胀做功, 因此要求工质应具有良好的膨胀性和流动性, 此外还要求工质热力性能稳定、无毒、无腐蚀性、价廉、易得等。因此, 目前工厂企业自备电站采用水蒸气作为工质。

### 3. 什么是热力系、外界与边界?

答: 在热力学中, 具体指定的热力学研究对象称为热力系。

系统外与之相关的所有有关物体通称为外界。

热力系与外界之间的分界面称为界面或称边界。

### 4. 按热力系与外界进行物质交换的情况, 可分为哪几种系?

答: 按热力系与外界进行物质交换的情况, 可将热力系分为闭口热力系和开口热力系。若系统与外界无物质交换, 或没有物质穿过系统边界, 称为闭口热力系, 如图 1-1 所示。若系统与外界有物质交换, 或有物质穿过系统边界, 称为开口热力系, 如图 1-2 所示。

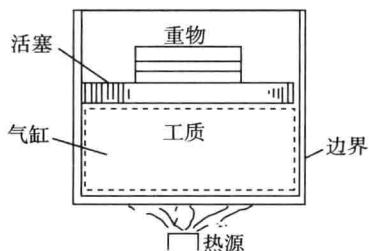


图 1-1 闭口热力系

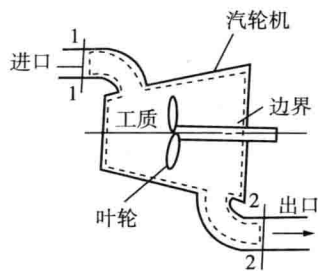


图 1-2 开口热力系

### 5. 什么是状态?

答: 所谓状态是指工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况。它可以用一些宏观物理量来描述, 如压力、温度等。

### 6. 何谓工质的状态参数? 常用的状态参数有哪些?

答: 描述和说明工质状态的宏观物理量称为状态参数。在热力学中, 常用的状态参数有压力、温度、比体积、焓、熵等。其中基本状态参数有三个, 分别为温度、压力、比体积。

**7. 什么是温度？什么是温标？**

答：温度是衡量物体的冷热程度的物理量。物体的温度反映了物体内部分子运动平均动能的大小，分子运动愈快，温度愈高；分子运动愈慢，温度愈低。

温度高低量度数值的表示方法称为温标。常用的温标有摄氏温标(°C)、华氏温标(°F)和绝对温标(K)。绝对温标用 K 作为单位符号，用  $T$  作为物理量符号。

摄氏温标与绝对温标的关系为

$$t = T - 273.15(^{\circ}\text{C}) \text{ 或 } T = t + 273.15(\text{K}) \quad (1-1)$$

**8. 什么是压强？常用的压强单位有那几种？**

答：单位面积上所承受的垂直作用力称为压强，习惯上称为压力，用符号  $p$  表示，单位为 Pa。即

$$p = \frac{F}{S} \quad (1-2)$$

式中  $F$ ——垂直作用于容器壁上的合力，N；

$S$ ——承受作用力的面积， $\text{m}^2$ 。

目前，常用的压力单位有如下四种：

(1) 压力的国际单位是帕斯卡，用符号 Pa 表示， $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。工程上常用兆帕(MPa)作为压力单位， $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ 。

(2) 以液柱高度表示压强，如有毫米水柱( $\text{mmH}_2\text{O}$ )、毫米汞柱( $\text{mmHg}$ )。 $1\text{mmH}_2\text{O} = 9.81\text{N}/\text{m}^2$ ， $1\text{mmHg} = 133\text{N}/\text{m}^2$ 。

(3) 以物理大气压力作为计量单位，用符号 atm 表示。 $1\text{atm} = 1.03 \times 10^5\text{N}/\text{m}^2$ ，相当于 760mmHg 或 10.33mH<sub>2</sub>O。

(4) 工程上常以  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  作为压强计量单位，常用符号 at 表示。 $1\text{at} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 9.81 \times 10^4\text{N}/\text{m}^2$ 。

**9. 什么是绝对压力、表压力、真空？它们之间有什么关系？**

答：容器内工质作用在器壁上的实际压力通常称为绝对压力，通常用符号  $p_a$  表示。绝对压力等于表压力减去(或加上)大气压力。

压力表所指的读数为表压力，用符号  $p_g$  表示。表压力是工质的绝对压力与大气压力的差值。大气压力用符号  $p_{\text{atm}}$  表示。

当容器内的压力低于大气压力时，将低于大气压力的部分称为真空，用符号  $p_v$  表示，单位为 MPa。真空数值等于大气压力与绝对压力的差值。

它们之间的关系为：

$$p_g = p_a - p_{\text{atm}} \quad (1-3)$$

$$p_v = p_{\text{atm}} - p_a \quad (1-4)$$

**10. 什么是真空度？**

答：用百分数来表示真空值的大小，称为真空度。真空度是真空值与大气压力的比值的百分数，即

$$\text{真空度} = \frac{p_v}{p_{\text{atm}}} \times 100\% \quad (1-5)$$

完全真空时的真空度为 100%。工质的绝对压力同大气压力相等时，真空度为零。

**11. 什么是比体积？什么是密度？它们之间有什么关系？**

答：单位质量的物质所占有的容积称为比体积，用符号  $v$  表示，单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。即

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-6)$$

式中  $V$ ——物质所占有的容积， $\text{m}^3$ ；

$m$ ——物质的质量， $\text{kg}$ 。

比体积是物质内部分子疏密程度的状态参数，比体积越大，物质内部分子之间的距离就越大，物质内部分子越稀疏。

单位容积的物质所具有的质量称为密度，用符号  $\rho$  表示，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-7)$$

密度和比体积互为倒数的关系，即  $\rho = 1/v$ 。即比体积与密度不是两个相互独立的两个参数，而是同一个参数的两种不同的表示方法。

**12. 什么是平衡状态？**

答：在无外界影响的条件下，气体的状态不随时间而变化的状态称为平衡状态。工质只有在平衡状态时，才能用确定的状态参数值去描述确定的数值。即只有当工质内部及外界间达到热的平衡及力的平衡时，才能出现平衡状态。

**13. 什么是热力过程？**

答：工质从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态所经历的全部状态的总和称为热力过程。

**14. 什么是准平衡过程？**

答：工质从一个平衡状态连续经历一系列平衡的中间状态过渡到另一个平衡状态，这样的过程称为准平衡过程。准平衡过程是理想化了的实际过程，它要求外界对热力系的作用必须缓慢得足以使热力系内部的工质能及时恢复不断被破坏的平衡。

**15. 什么是可逆过程？**

答：在无摩擦存在时，一个过程正向进行之后再逆向进行，当工质恢复至初始状态，外界也同时恢复原状而不引起变化的过程，称为可逆过程。可逆过程是理想的热力学过程。

**16. 什么是不可逆过程？**

答：工质在能量转换过程中，存在摩擦、涡流等能量损失，使转换过程中只能单方面进行的过程，称为不可逆过程。实际上能量转换过程都是不可逆过程。

**17. 什么是功？**

答：物理学中把物体通过力的作用而传递的能量称为功，用符号  $W$  表示，单位为  $\text{J}$ 。功是力所作用的物体在力的方向上的位移  $\Delta x$  与作用力的  $F$  的乘积，即

$$W = F\Delta x \quad (1-8)$$

由式(1-8)可知，功的大小根据物体在力的作用下，沿力的作用方向移动的位移来决定，改变它的位移就改变了功的大小，功不是状态参数，而是与过程有关的一个量。

**18. 什么是热量？**

答：物体吸收或放出的热能称为热量，用符号  $Q$  表示，单位为  $\text{kJ}$ 。即高温物体将一部分热能传递给低温物体，其能量的传递多少用热量来度量。1 $\text{kg}$  质量的工质与外界交换的热



量用  $q$  表示, 单位为  $\text{J}/\text{kg}$ 。

只有在能量传递的热力过程中才有功和热量的存在, 热力过程一旦结束, 热力系与外界之间就不再传递功和热量了, 所以热量和功不是状态参数, 而是过程量, 热量传递的多少与所经历的热力过程有关。热力学中规定, 系统吸热时, 热量值取为正; 系统放热时, 热量值取为负。

### 19. 什么是熵? 什么是比熵?

答: 在热力体系中, 热能的变化量与温度变化的比值称为熵, 用符号  $S$  表示, 单位为  $\text{J}/\text{K}$ 。

在微元可逆过程中单位质量的气体, 将热力系统与外界交换的热量与交换时系统的温度之比定义为比熵, 用符号  $ds$  表示, 单位为  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。即

$$ds = \frac{\delta q}{T} \quad (1-9)$$

式中  $ds$ ——该微元可逆过程中工质比熵的微小变化量;

$\delta q$ ——单位质量工质在微元可逆过程中与外界所传递的微小热量;

$T$ ——传热时工质的温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

由式(1-9)可知, 在微元可逆过程中, 系统与外界交换的微小量  $\delta q$  除以传热时系统的热力学温度所得的熵, 即为热力系的熵微小变化量  $ds$ 。

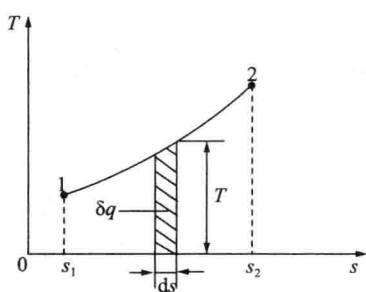


图 1-3 可逆过程  $T-s$  图

### 20. 画出可逆过程 $T-s$ 图。

答: 图 1-3 所示为可逆过程  $T-s$  图, 也称温熵图。以绝对温度  $T$  为纵坐标, 以比熵  $s$  为横坐标。在  $T-s$  图上可逆过程线下面的面积可表示可逆过程中系统与外界所交换的热量。从熵的变化值在热力过程中的增大还是减小, 就可以判断工质是吸热还是放热。其中  $ds = s_2 - s_1$  是熵的变化量, 若  $ds > 0$ , 则表示热力系从外界吸热, 热量为正值; 若  $ds < 0$ , 则表示热力系向外界放热, 热量为负值; 若  $ds = 0$ , 则表示热力系既不吸热又不放热。

### 21. 什么是热力学第一定律? 它的实质是什么? 它说明了什么问题?

答: 热力学第一定律是热功转换的定律, 它可以表述为: 热可以变为功, 功也可以变为热, 一定量的热消耗时, 必然伴随产生相应量的功; 消耗一定量的功时, 必然出现与之对应的量的热。

热力学第一定律的实质是能量守恒与转换定律在热力学中的一种特定应用形式。它说明热能与机械能相互转换的数量关系。

### 22. 什么是热力学能? 它由哪两部分组成?

答: 热力学能是指组成热力系的大量微观粒子本身所具有的能量, 也称为内能。它包括两部分: 一是分子热运动的动能, 称为内动能; 二是分子间由于相互作用力所形成的位能, 称为内位能。通常用  $U$  表示  $m$   $\text{kg}$  工质的热力学能, 单位是  $\text{J}$  或  $\text{kJ}$ 。用  $\mu$  表示  $1\text{kg}$  工质的热力学能, 称比热力学能, 单位是  $\text{J}/\text{kg}$  或  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。

### 23. 分子热力学能与哪些因素有关?

答: 根据分子运动论, 分子的内动能与工质的温度有关; 分子的内位能与分子间的距离即工质的比容有关。因此, 工质的热力学能是温度  $T$  和比体积  $v$  的函数。即

$$u = f(T, v) \quad (1-10)$$

**24. 什么是焓、比焓？为什么焓是状态参数？**

答：单位质量物质所含有的全部能量称为焓，用符号  $H$  表示，单位为 kJ。即

$$H = U + pV \quad (1-11)$$

单位质量工质的内能和压力位能之和称为比焓，用符号  $h$  表示，单位为 kJ/kg。即

$$h = u + pv \quad (1-12)$$

式中  $u$ ——内能，J/kg 或 kJ/kg；

$v$ ——比体积， $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

从式(1-12)中可以看出， $h$  由  $u$ 、 $p$ 、 $v$  三个状态参数组成，当工质处于某一确定的状态时， $u$ 、 $p$ 、 $v$  都有确定的值，因而焓也有确定的值。焓仅由工质状态决定，也是工质的状态参数。

**25. 什么是稳定流动？要使流动过程达到稳定应满足哪些条件？**

答：在流动过程中，其热力系内部工质各状态点参数只随位置改变而不随时间变动的流动称为稳定流动。如汽轮机经常保持稳定的输出功率，蒸汽在流经汽轮机时，其热力学状态参数、流速和流量等均不随时间而变化。

根据稳定流动的定义，要使流动过程达到稳定，必须满足以下条件：

(1) 系统内部及边界各点工质的状态不随时间而改变；

(2) 进、出热力系的工质质量流量相等且不随时间而改变，满足质量守恒；

(3) 系统内储存的能量保持不变，单位时间内输入系统内的能量等于从系统输出的能量，满足能量守恒。

**26. 什么是稳定流动的能量方程式？如何表示？**

答：热力学第一定律应用于工质在开口系内稳定流动时的数学表达式，称为稳定流动的能量方程式，它适用于任何工质，任何流动的过程。根据能量守恒原理，可以列出稳定流动的能量平衡方程式，即

$$Q = (H_2 - H_1) + \frac{1}{2}m(c_2^2 - c_1^2) + mg(z_2 - z_1) + W_s \quad (1-13)$$

式中  $H_1$ 、 $H_2$ ——工质的焓；

$\frac{1}{2}mc_1^2$ 、 $\frac{1}{2}mc_2^2$ ——工质的动能；

$mgz_1$ 、 $mgz_2$ ——位能；

$W_s$ ——系统向外界输出机械功。

对 1kg 工质的能量转换方程可写为

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) + \omega_s = \Delta h + \frac{1}{2}\Delta c^2 + g\Delta z + w_s \quad (1-14)$$

式中  $h_2 - h_1$ ——工质焓的变化量，kJ/kg；

$\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2)$ ——工质宏观动能变化量，kJ/kg；

$g(z_2 - z_1)$ ——工质宏观位能变化量，kJ/kg；

$g$ ——重力加速度；

$w_s$ ——对外输出机械功。

**27. 稳定流动的能量方程式在热机中如何应用？**

答：工质流经热机时发生膨胀，对外输出轴功。在正常工况下运行时，热机的输出功率

是稳定不变的,工质流经热机的过程可视为稳定流动过程。由于工质进、出热机时动能相差不大,可以认为 $\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \approx 0$ ;进出口高度差很小,重力位能之差也极小,可忽略不计,即 $g(z_2 - z_1) \approx 0$ ;工质流经热机所需的时间极短,工质向外的散热量很少,可认为 $q \approx 0$ 。因此,稳定流动的能量方程式(1-14)用于热机时可简化为

$$w_s = h_2 - h_1 \quad (1-15)$$

### 28. 稳定流动的能量方程式在喷嘴中如何应用?

答:由于气流通过喷嘴时速度很快。来不及与外界交换热量,可认为流体进行的是绝热稳定流动;由于喷嘴内流动无转动机械,气流流过喷嘴时对外无机械功输出;同时,进、出口位能差亦可忽略不计。即 $q \approx 0$ ,  $w_s = 0$ ,  $g(z_2 - z_1) \approx 0$ 。稳定流动能量方程式应用于喷嘴时可简化为

$$\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) = h_1 - h_2 \quad (1-16a)$$

即工质在管道内作稳定绝热流动时,其动能的增加等于工质的绝热焓降。也可以表示为

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} = h_2 + \frac{c_2^2}{2} = h + \frac{c^2}{2} = \text{常数} \quad (1-16b)$$

式(1-16)为工质在管道内作稳定绝热流动的能量方程式。它表明:工质作稳定绝热流动又不做功时,任一截面上的焓与动能之和等于常数。即工质速度的增加是由于工质焓的减少;反之,工质速度的减少将使工质的焓增加。

### 29. 什么是热机?

答:将热能转换为机械能的设备称为热力发动机,简称热机,如图1-4所示。如汽轮机、燃气轮机、内燃机、蒸汽机等。

### 30. 什么是实际气体?什么是理想气体?

答:气体分子间存在吸引力,分子本身占有体积的气体,称为实际气体。气体分子间不存在吸引力,分子本身不占有体积的气体,称为理想气体。

在蒸汽动力装置中,作为工质的水蒸气,因其压力高、比体积小,即气体分子间的引力大,与液态接近,所以水蒸气应视为实际气体。

工厂企业火力自备电站中,空气、燃气、烟气均可以看作理想气体,因为它们远离液态,与理想气体的性质很接近。

### 31. 什么是理想气体状态方程式?

答:理想气体在平衡状态时状态参数变化的方程,称为理想气体状态方程式。当理想气体处于任一平衡状态时,三个基本状态参数 $p$ 、 $V$ 、 $T$ 之间存在着一定的关系,即理想气体状态方程式,即

$$pV = nRT \quad (1-17)$$

式中  $p$ ——气体的绝对压力, Pa;

$V$ ——气体的体积,  $\text{m}^3$ ;

$n$ ——气体的物质的量, mol;

$T$ ——气体的绝对温度, K;

$R$ ——气体常数,  $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ , 对任意理想气体,  $R = 8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

对于  $m$  kg 的气体, 则气体状态方程为

$$pV = mRT \quad (1-18)$$

式中  $V$ ——气体的体积,  $\text{m}^3$ 。

气体常数  $R$  与气体所处的状态无关, 但对不同的气体却有着不同的气体常数  $R$ 。如氧气的  $R = 260\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 氮气的  $R = 297\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 空气的  $R = 287.06\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

### 32. 理想气体的三个基本定律有哪些? 其内容是什么?

答: 理想气体的三个基本定律是波义耳-马略特定律, 查理定律和盖吕萨克定律。其内容为:

(1) 波义耳-马略特定律。当气体温度不变时, 压力与比体积成正比变化。即

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad (1-19)$$

气体质量为  $m$  时

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \text{ (其中 } V = mv \text{)} \quad (1-20)$$

(2) 查理定律。当气体比体积不变时, 压力与温度成正比变化。即

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (1-21)$$

(3) 盖吕萨克定律。当气体压力不变时, 比容与温度成正比变化。对于质量为  $m$  的气体, 压力不变时, 体积与温度成正比变化。即

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \text{ 或 } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1-22)$$

### 33. 什么是热容量?

答: 物体温度升高(或降低)1K 所吸收(或放出)的热量, 称为该物体的热容量, 用符号  $Q$  表示, 单位为  $\text{kJ}/\text{K}$ 。

### 34. 什么是比热容?

答: 单位数量(质量或容积)的物质温度升高(或降低)1K, 所加入(或放出)的热量称为比热容, 用符号  $c$  表示, 单位为  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。即

$$c = \frac{\delta q}{\delta T} \text{ 或 } c = \frac{\delta q}{\delta t} \quad (1-23)$$

### 35. 理想气体常见的基本热力过程有哪几种?

答: 理想气体常见的基本热力过程有等容过程、等压过程、等温过程和等熵过程。

### 36. 什么是等容过程? 如何分析等容过程中吸收的热量和功?

答: 在容积(或比体积)保持不变的状态下进行的热力过程称为等容过程。依据理想气体状态方程式  $pv = RT$ , 结合过程方程, 可得  $\frac{p}{T} = \frac{R}{v}$ , 即等容过程中理想气体的压力与温度成正比。

气体在等容加热过程, 由于容积不变, 气体不对外做功, 即  $w = 0$ , 依据热力学第一定律的解析式可得

$$q = \Delta u + w = \Delta u + 0 = u_2 - u_1 \quad (1-24)$$

式(1-24)表明, 在等容过程中, 所有加入的热量全部用于增加气体的内能。

### 37. 什么是等压过程? 如何分析等压过程的热量和功?

答: 在工质压力维持不变的状态下进行的热力过程称为等压过程。如锅炉中水的汽化过程、乏汽在凝汽器中的凝结过程及空气预热器中空气的吸热过程都是在压力不变的状态

态下进行的。

依据理想气体状态式  $pv = RT$ ，得  $\frac{T}{v} = \frac{p}{R} = \text{常数}$ ，即等压过程中理想气体的温度与比体积成正比。

在等压过程中，由于  $p = \text{常数}$ ，理想气体的膨胀功为

$$w = p(v_2 - v_1) \quad (1-25)$$

类似于等容过程中的分析，等压过程中工质吸收的热量为

$$q = \Delta u + w = (u_2 + u_1) + p(v_2 - v_1) \quad (1-26)$$

### 38. 什么是等温过程？如何分析等压过程的热量？

答：在工质温度维持不变的状态下进行的热力过程称为等温过程。由理想气体过程方程  $pv = RT$ ，对一定的工质， $pv = \text{常数}$ ，及等温过程压力与比体积成反比。

根据热力学第一定律  $q = \Delta u + w$  及等温过程中  $\Delta u = 0$ ，可得等温过程的热量为

$$q = w \quad (1-27)$$

### 39. 什么是等熵过程？

答：保持熵值不变的热力过程称为等熵过程。等熵过程是没有能量损失的绝热过程。如汽轮机中工质的膨胀过程就可以近似看作绝热过程。

### 40. 什么是绝热过程？如何分析绝热过程的热量和功？

答：在与外界没有热量交换的情况下进行的热力过程称为绝热过程。

绝热过程中  $q = 0$ 。

绝热过程中的膨胀功可根据热力学第一定律的数学表达式  $q = \Delta u + \omega$  求得

$$\omega = q - \Delta u = -\Delta u = u_1 - u_2 \quad (1-28)$$

式(1-28)表明，绝热过程中膨胀功来自内能的减少，压缩功则使内能增加。

$$\omega = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (1-29)$$

式中  $k$ ——绝热指数，与工质的原子数有关。单原子气体  $k = 1.67$ ，双原子气体  $k = 1.4$ ，多原子气体  $k = 1.33$ 。

### 41. 什么叫热力循环？

答：工质从某一状态点开始，经过一系列的状态变化又回到初态点的封闭变化热力过程称为热力循环，简称循环。

对于循环来说，由于工质回复到原始的状态，所以整个循环在参数坐标图上表示为一条封闭的曲线，如图 1-5 所示。而且，经历一个循环后，工质的任意一个状态参数的变化量都等于零，即

$$\oint dx = 0 \quad (1-30)$$

式中  $x$ ——任意一个状态参数；

$\oint$ ——循环积分符号。

### 42. 什么是可逆循环、不可逆循环？

答：如果组成循环的全部热力过程都是可逆过程，则该循环称为可逆循环。如果循环中包含有不可逆过程，则该循环称为不可逆循环。

### 43. 根据循环进行的方向和效果不同可以分为哪两大类？

答：根据循环进行的方向和效果的不同，可以将循环分为正向循环和逆向循环两大类。

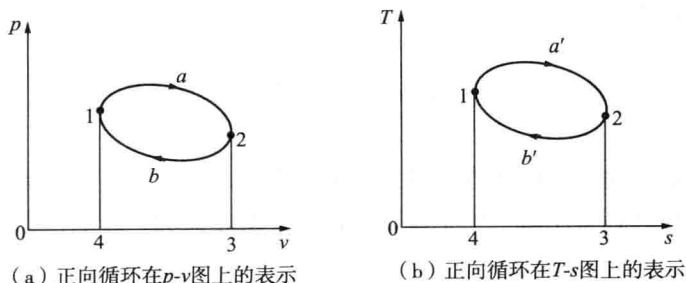


图 1-5 热力循环

44. 正向循环的任务是什么？

答：正向循环的任务是将热转变为功。各种热机中所实施的循环都是正向循环，故也称为热机循环。

如图 1-5(a)所示的  $p-v$  图，设有 1kg 工质先从状态 1 经历  $1a2$  膨胀过程到达状态 2。过程中工质对外作膨胀功  $W_{1a2}$ ，其大小可用  $1a2$  过程线下的面积  $1a2341$  来表示。为使工质恢复到初态，再对工质进行压缩，使其从状态 2 经历  $2b1$  压缩过程回到状态 1，过程中工质消耗压缩功  $W_{2b1}$ ，其大小也可以用  $2b1$  过程线下的面积  $2b1432$  来表示。

正向循环也可用  $T-s$  图表示。如图 1-5(b)所示，图中吸热过程线和放热过程线下的面积  $1a'2341$ 、 $2b'1432$  分别代表工质在吸热过程中的吸热量  $Q_1$  和放热过程中的放热量  $Q_2$ ，两者之差称为循环的净热量，也称为循环的有效热，用  $Q_0$  表示，即  $Q_0 = Q_1 - Q_2$ 。循环净功  $W_0 = Q_1 - Q_2$ 。

对于正向循环， $Q_0 = W_0 > 0$ ，则  $Q_1 > Q_2$ 。因此，在  $T-s$  图上，吸热过程线应高于放热过程线，即工质在高温下吸热，在低温下放热，循环按顺时针方向进行。

45. 什么是逆向循环？

答：如果循环中的压缩过程所消耗的功大于膨胀过程所作的功，循环的总效果不是产生功而是消耗外界的功，这样的循环称为逆向循环。在  $p-v$  图上，逆向循环的压缩线高于膨胀线，循环按逆时针方向进行，如图 1-6 所示。逆向循环消耗外界功的目的是将热量从低温物体取出排向高温物体。制冷装置和热泵都是按逆向循环来工作的。

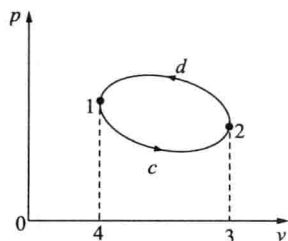


图 1-6 逆向循环

46. 什么是循环的热效率？

答：循环的热效率是指正向循环变热能为机械能的有效程度称为循环的热效率，用  $\eta$  表示。循环的热效率等于循环净功  $w$  与循环中工质从热源吸入的热量  $q$  之比，即

$$\eta = \frac{w}{q} \tag{1-31}$$

循环热效率是衡量正向循环热经济性的重要指标，其  $\eta$  值越大，表示热循环的经济程度越高。

47. 什么是自发过程？

答：不需任何外界帮助就能自动进行的过程称为自发过程。自发过程都具有一定的方向性和不可逆性。

48. 什么是热力学第二定律？它有哪些表述方法？

答：反映自发过程具有方向性和不可逆性这一规律的定律称为热力学第二定律。由于热

过程的种类很多，热力学第二定律可有不同的表述形式，分别从热量传递和热功转换有两种表述方法：

(1) 克劳修斯(R. Clausius)说法：热不可能自发地不付代价地从低温物体传送到高温物体。

这种说法从热量传递的角度表述了热力学第二定律，指出了传热过程的方向性。它说明热量从低温物体传至高温物体是一个非自发过程，要使之实现，必须付出一定的代价作为补偿条件。

(2) 开尔文(L. Kelvin) - 普朗克(M. Plank)说法：不可能制造出从单一热源吸热，使之全部转变为有用功而不产生其他任何变化的循环工作的热机。

这种说法从热功转换的角度表述了热力学第二定律，指出了热功转换过程的方向性以及转换为功所需要的补偿条件。它说明热变为功这一非自发过程的进行，是以热从高温移至低温来作为补偿条件的，即热机循环的热效率不可能达到百分之百。

上述两种热力学第二定律的表述都是利用自发过程的逆过程来阐明自发过程的不可逆性，克劳修斯表述针对的是热量自高温物体传递的自发过程是不可逆的，开尔文 - 普朗克表述针对的是功转变为热的自发过程是不可逆的。虽然表述方式不同，但在指出自发过程具有方向性和不可逆性这一点上，它们是等效的。

#### 49. 卡诺循环由哪些过程组成？

答：卡诺循环是热力学中理想的一种可逆循环。它以理想气体为工质，由两个定温过程和两个绝热过程所组成，如图 1-7 所示。图中 1-2 为可逆的定温吸热过程，在温度  $T_1$  下工质从同温热源吸入热量  $q_1$ ，2-3 为可逆绝热膨胀过程，工质的温度由  $T_1$  降低到  $T_2$ ，3-4 为可逆定温放热过程，在  $T_2$  温度下工质向同温冷源排出的热量  $q_2$ ，4-1 为可逆绝热压缩过程，工质又恢复到初始状态。

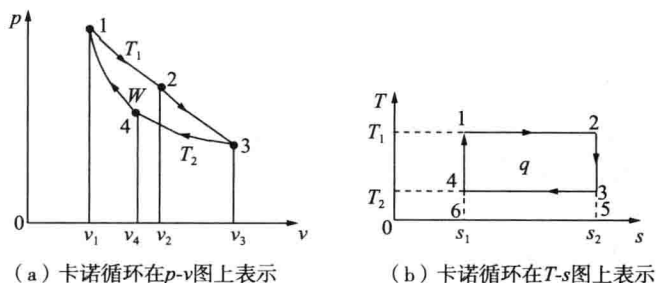


图 1-7 卡诺循环图

#### 50. 如何计算卡诺循环中从热源吸收热量 $q_1$ 、向冷源放出热量 $q_2$ ？

答：依据卡诺循环图可知，热源温度为  $T_1$ ，冷源温度为  $T_2$ ，1kg 工质在卡诺循环中从热源吸收热量  $q_1$ ，向冷源放出热量  $q_2$ 。根据卡诺循环过程特征，可得

$$q_1 = T_1(s_2 - s_1) \quad (1-32)$$

$$q_2 = T_2(s_2 - s_1) \quad (1-33)$$

#### 51. 如何计算卡诺循环的净功和净热？

答：在图 1-7(a) 图上，1-2-3-4 围成的面积，表示 1kg 工质对外所作的功  $w$ 。卡诺循环的净功  $w$  和净热  $q$  可用下式计算

$$w = q = q_1 - q_2 = (T_1 - T_2)(s_2 - s_1) \quad (1-34)$$



52. 如何计算卡诺循环的热效率? 从卡诺循环的热效率可得出哪些结论?

答: 根据热效率定义  $\eta = \frac{q_1 - q_2}{q_1}$ , 卡诺循环的热效率为

$$\eta = \frac{\omega}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1-35)$$

从式(1-35)可以得出以下结论:

(1) 卡诺循环的热效率取决于热源温度  $T_1$  和降低冷源温度  $T_2$ , 与工质的性质和热机的类型等无关。

(2) 提高热源温度  $T_1$  和降低冷源温度  $T_2$ , 可以提高卡诺循环热效率。

(3) 由于热源温度  $T_1$  不可能为无限大, 冷源温度  $T_2$  也不可能为绝对零度, 因此卡诺循环热效率只能小于1, 而不能等于1。

(4) 当  $T_1 = T_2$  时, 卡诺循环的热效率为零, 这说明在没有温差的体系中, 无法实现热能转变为机械能的热力循环, 即只有热源装置而无冷源装置的热机是无法实现的。

53. 什么是汽化? 它分为哪几种形式?

答: 物质从液态转变为气态的过程称为汽化。汽化分为蒸发和沸腾两种形式。

液体表面在任何温度下进行的缓慢的汽化现象称为蒸发。液体的内部和表面同时发生剧烈的汽化现象称为沸腾。

54. 什么是凝结? 水蒸气凝结有哪些特点?

答: 物质从气态转变为液态的过程称为凝结, 又称为液化。

水蒸气凝结主要有以下特点:

(1) 一定压力下的水蒸气凝结, 必须降到该压力所对应的凝结温度才开始凝结成水, 这个凝结温度也就是水的沸点。压力降低, 凝结温度也随之降低, 反之压力升高, 凝结温度也升高。

(2) 在凝结温度下, 水从水蒸气中不断吸收热量, 则水蒸气可以不断凝结成水, 并保持温度不变。

55. 什么是动态平衡?

答: 一定压力下的气水共存的密封容器内, 液体和蒸汽的分子处于紊乱的热运动中, 有的跑出液面, 有的返回蒸汽空间, 有的就进入液面变成水分子。当从水中逸出的分子数目等于因相互碰撞而返回水中的分子数目时, 这种状态称为动态平衡, 如图 1-8 所示。

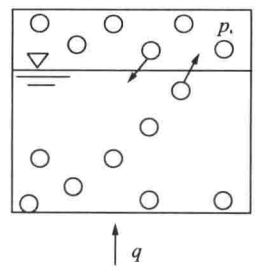


图 1-8 动态平衡

56. 什么是饱和状态、饱和蒸汽、饱和水、饱和压力、饱和温度?

答: 在一定压力下气液共存的密封容器内, 处于动态平衡的气、液两相共存的状态称为饱和状态。

饱和状态下的蒸汽称为饱和蒸汽。

饱和状态下的水称为饱和水。

在饱和状态时, 蒸汽和液体的压力相同时的压力称为饱和压力, 用符号  $p_s$  表示。

在饱和状态时, 蒸汽和液体的温度相同时的温度称为饱和温度, 用符号  $t_s$  表示。

饱和温度和饱和压力一一对应, 改变饱和温度, 饱和压力将会引起相应的变化, 饱和温度愈高, 饱和压力也愈高。



57. 定压下水蒸气产生过程分为哪几个阶段？

答：工程上所用的水蒸气是在锅炉中定压加热产生的，定压下水蒸气产生的过程可分为三个阶段：预热阶段、汽化阶段、过热阶段，如图 1-9 所示。

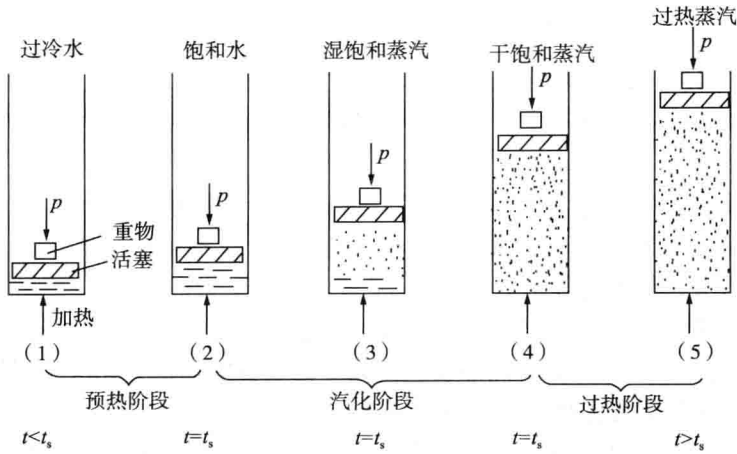


图 1-9 定压下水蒸气的产生过程

58. 什么是未饱和水？未饱和水、饱和水在  $p-v$  和  $T-s$  上用何表示？

答：低于饱和温度的水称为未饱和水，或称过冷水。在  $p-v$  和  $T-s$  图上用  $a$  表示压力  $p$  下  $0^\circ\text{C}$  的未饱和水，如图 1-10 所示。

饱和水状态在  $p-v$  和  $T-s$  图上用  $b$  表示，如图 1-10 所示。

饱和水的状态参数除压力和温度外，均加以上角标“'”，以示和其他状态的区别，如  $h'$ 、 $s'$  和  $v'$  等。

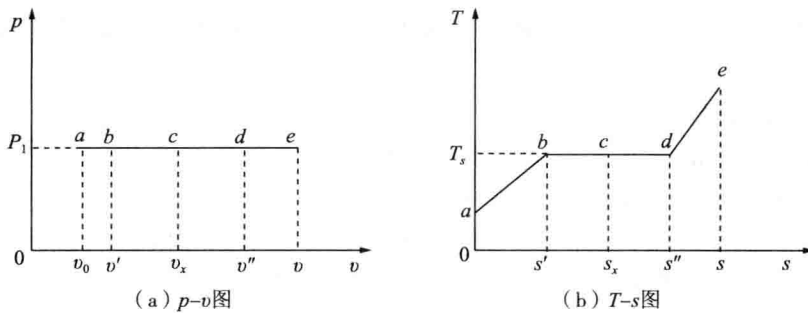


图 1-10 水蒸气定压加热过程

59. 什么是液体热？

答：将水加热到饱和水时所加入的热量，称为液体热，用  $q_1$  表示。根据热力学第一定律

$$q_1 = h' - h_0 \tag{1-36}$$

式中  $h'$ ——压力为  $p$  时的饱和水的焓；

$h_0$ ——压力为  $p$ ，温度为  $0^\circ\text{C}$  时水的焓。

60. 什么是湿饱和蒸汽、干饱和蒸汽、过热蒸汽？

答：含有饱和水的蒸汽称为湿饱和蒸汽，简称为湿蒸汽。在水达到饱和温度之后，如定