

工程热力学

重点难点解析及 ——习题解答

GONGCHENG RELIXUE
ZHONGDIAN NANDIAN JIEXI JI
XITI JIEDA

A stylized graphic of a flame, rendered in shades of red and orange, positioned on the left side of the cover.

乔春珍 编著

中国环境出版社

工程热力学重点难点解析及 习题解答

乔春珍 编著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

工程热力学重点难点解析及习题解答/乔春珍编著. —北京:
中国环境出版社, 2015.7

ISBN 978-7-5111-2476-0

I. ①工… II. ①乔… III. ①工程热力学—高等
学校—题解 IV. ①TK123-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 170268 号

出 版 人 王新程
责任编辑 赵楠婕
责任校对 尹 芳
封面设计 彭 杉



出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 编辑管理部
010-67110763 生态(水利水电)图书出版中心
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中环盛元数字图文有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2015 年 7 月第 1 版
印 次 2015 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 12
字 数 280 千字
定 价 30.00 元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题，请寄回本社更换

前 言

本书是根据作者多年来的教学经验，参照全国高等学校理工科教学指导委员会对热工类工程热力学的基本要求编写的，可以作为建筑环境与能源应用工程专业基础课“工程热力学”的参考教材。

笔者编写此书是想通过对廉乐明编著的《工程热力学（第五版）》教材中的教学基本要求和重点难点进行归纳，对典型题型进行解析，帮助读者加深对抽象概念与基本理论的理解，正确掌握分析工程热力学问题的方法，培养思考问题的灵活性，提高解决具体热工问题的能力。

本书每章均由基本要求和基本知识点、典型问题解析、课后习题解答和自测练习四个部分组成，每章内容都逐步铺垫，由易到难不断深入，更利于读者理解。典型例题解析中，给出了该题的考点和难点，指出容易出错的原因，使读者能够根据该例题举一反三，掌握求解思路和解题技巧。本书对所对照教材的部分课后习题进行解答，便于读者在学习中参考。最后的自测练习部分则留给读者自行解答，以供读者练习之用，检测本章内容的掌握程度。

本书是建筑环境与能源应用、热能动力、土建类专业学习工程热力学的有力工具，也可供上述专业的自学进修人员、工程技术人员参考使用。

本书编写过程中得到教研组的全体人员的大力支持与关心，在此一并表示感谢。

本书花费了笔者大量的时间和精力，但由于水平有限，书中的错误和不妥之处在所难免，恳请读者谅解并提出批评指正意见。

编 者

2015 年 1 月

目 录

第一章 基本概念	1
第一节 基本要求和关键知识点	1
第二节 典型例题详解	5
第三节 部分课后习题解答	12
第四节 自测习题	15
第二章 气体的热力性质	17
第一节 基本要求和关键知识点	17
第二节 典型例题详解	22
第三节 部分课后习题解答	24
第四节 自测习题	27
第三章 热力学第一定律	29
第一节 基本要求和关键知识点	29
第二节 典型例题详解	33
第三节 部分课后习题解答	43
第四节 自测习题	49
第四章 理想气体的热力过程及气体压缩	53
第一节 基本要求和关键知识点	53
第二节 典型例题详解	58
第三节 部分课后习题解答	67
第四节 自测习题	73
第五章 热力学第二定律	76
第一节 基本要求和关键知识点	76

第二节 典型例题详解	79
第三节 部分课后习题解答	91
第四节 自测习题	98
 第六章 水蒸气	102
第一节 基本要求和关键知识点	102
第二节 典型例题详解	104
第三节 部分课后习题解答	108
第四节 自测习题	112
 第七章 湿空气	114
第一节 基本要求和关键知识点	114
第二节 典型例题详解	118
第三节 部分课后习题解答	124
第四节 自测习题	129
 第八章 气体和蒸汽的流动	132
第一节 基本要求和关键知识点	132
第二节 典型例题详解	137
第三节 部分课后习题解答	143
第四节 自测习题	149
 第九章 动力循环	153
第一节 基本要求和关键知识点	153
第二节 典型例题详解	162
第三节 部分课后习题解答	167
第四节 自测习题	171
 第十章 制冷循环	174
第一节 基本要求和关键知识点	174
第二节 典型例题详解	177
第三节 部分课后习题解答	180
第四节 自测习题	183

第一章 基本概念

工程热力学中的基本概念是该学科独特研究方法的基础，读者必须给予足够的重视，正确理解这些基本概念的含义。本章先对教材中的重要基本概念进行归纳分析，并简要阐述，剖析其中涉及的关键知识点，然后列举典型例题进行说明，并对课后部分习题进行解答分析，供学习者参考。

第一节 基本要求和关键知识点

一、基本要求及难点

本章基本要求归结为以下三点：

1. 了解工程热力学的研究对象和一般的研究方法，了解工程热力学分析问题的特点、方法和步骤。
2. 深刻理解热力系统、外界、热力平衡状态、准静态过程、可逆过程、热力循环等一些基本术语和概念。
3. 掌握状态参数的特点，掌握基本状态参数温度、压力、比容的物理意义和单位，会用状态参数计算可逆过程的热量和功量。

在学习过程中，要重点理解以下几个难点：

1. 引入准静态过程和可逆过程的必要性，以及它们在实际应用时的条件。
2. 系统的选择取决于研究目的与任务，随边界而定，具有随意性，选取不当将不利于分析，很难获得正确的结论。
3. 稳定状态与平衡状态的区分：稳定状态时状态参数虽然不随时间改变，但是受到外界影响。平衡状态是系统不受外界影响时，参数不随时间变化的状态。二者既有区别，又有联系。平衡必稳定，稳定未必平衡。
4. 注意状态参数的特性及状态参数与过程参数的区别。

二、关键知识点解析

1. 热力系统

(1) 定义：根据研究问题的需要，人为地用界面从周围的环境中分割出来的研究对象，称为热力系（统），简称系统。边界以外与系统相互作用的物体，简称外界或环境。界面可以是假想的、实际的、固定的、运动的、变形的。

(2) 分类：

1) 按系统与外界有无物质交换划分为以下两类。

① 闭口系统：系统与外界无物质交换，称控制质量。

② 开口系统：系统与外界有物质交换，称控制体积。

2) 按系统与外界之间是否进行能量的交换划分为以下两类。

① 绝热系统：系统与外界之间没有热量传递的系统（系统传递的热量可忽略不计时，可认为绝热）。

② 孤立系统：系统与外界既无能量传递也无物质交换。

3) 按系统内部状况划分为以下六类。

① 均匀系统：内部各部分化学成分和物理性质都均匀一致的系系统，是由单相组成的。

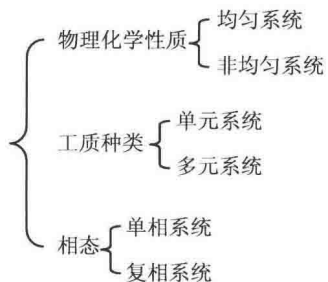
② 非均匀系统：由两个或两个以上的相所组成的系统。

③ 单元系统：一种均匀的和化学成分不变的物质组成的系统。

④ 多元系统：由两种或两种以上物质组成的系统。

⑤ 单相系统：系统中工质的物理、化学性质都均匀一致的系系统称为单相系统。

⑥ 复相系统：由两个相以上组成的系系统称为复相系统，如固、液、气组成的三相系统。



2. 状态与状态参数

(1) 定义

1) 状态：系统中某瞬间表现的工质热力性质的总状况。

2) 状态参数：描述工质状态特性的各种宏观物理量。热力学中常用的状态参数有 6 个，即温度 (T)、压力 (P)、比容 (v) 或密度 (ρ)、内能 (u)、焓 (h)、熵 (s)。这

些参数可分为强度性参数（系统中单元体的参数值与整个系统的参数值相同，与质量多少无关，没有可加性）和广延性参数（与系统内所含工质的数量有关，系统中各单元体为该广延性参数值之和）。在热力过程中，强度性参数起着推动力作用，称为广义力或势。如温度、压力等。广延性参数的变化起着类似力学中位移的作用，称为广义位移。如系统的容积、内能、焓、熵等。

（2）基本状态参数

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

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。

摄氏度与热力学温度的换算： $T = 273 + t$ 。

压力：垂直作用于器壁单位面积上的力，称为压力，也称压强。

在微观上，分子热运动产生的垂直作用于容器壁上单位面积的力。

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，称为表压力；

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，所以分析计算中所采用的压力均为绝对压力。

比容 (m^3/kg)：单位质量工质所具有的容积。

$$v = \frac{V}{m}$$

密度：单位容积的工质所具有的质量。

3. 平衡状态、状态公理及状态方程

（1）平衡状态：系统在不外界影响的条件下，如果宏观热力性质不随时间而变化，系统内外同时建立了热的和力的平衡，这时系统的状态称为热力平衡状态，简称平衡状态。

平衡状态需满足的充要条件是在热平衡（温度平衡）、力平衡（压力平衡）、化学势平衡（包括相平衡和化学平衡）三方面。

注意：平衡必稳定，反之稳定未必平衡。平衡与均匀也是不同的概念，均匀是相对于空间，平衡是相对于时间。平衡不一定均匀。

(2) 状态公理：确定纯物质系统平衡状态的独立参数个数为 $n+1$ ，式中， n 表示传递可逆功的形式，而加 1 表示能量传递中的热量传递。

状态公理提供了确定热力系统平衡态所需的独立参数数目的经验规则，根据状态公理，对除热量传递外只有膨胀功（容积功）传递的简单可压缩系统，可确定系统平衡状态的独立参数只有 2 个。原则上，可以选取可测量的参数 p 、 v 、 T 当中的任意两个独立参数来表示系统所处的状态。

(3) 状态方程：反映工质处于平衡状态时基本状态参数的制约关系。纯物质简单可压缩系统的状态方程： $F(p, v, T) = 0$ 。

4. 准静态过程与可逆过程

(1) 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。

(2) 准静态过程：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。

(3) 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有两个：准静态过程+无耗散效应

1) 可逆过程的膨胀功（容积功，J/kg）：指系统容积发生变化而通过界面向外传递的机械功。

$$w = \int_1^2 p dv$$

规定：系统对外做功为正，外界对系统做功为负。

2) 可逆过程的热量（J/kg）：系统与外界之间依靠温差传递的能量称为热量。

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

规定：系统吸热为正，放热为负。

5. 热力循环

工质从某一初态出发，经历一系列状态变化后，又回到原来初态的封闭热力过程称为热力循环，简称循环。系统实施热力循环的目的是为了实现连续的能量转换。

循环按工作目的可分为正循环（即动力循环）和逆循环（即制冷循环或热泵循环）。

正循环：

正循环中的热转换功的经济性指标用循环热效率：

$$\eta_t = \frac{w_0}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

式中, q_1 —— 工质从热源吸热;

q_2 —— 工质向冷源放热;

w_0 —— 循环所做的净功。

逆循环:

当以获取制冷量为目的时, 用制冷系数:

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

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 —— 循环所做的净功。

当用于热泵循环时, 用供热系数:

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

式中: q_1 —— 工质向高温热源 (供暖的房间) 提供的热量;

q_2 —— 工质从冷源吸取热量;

w_0 —— 为了提供 q_1 所消耗的净功。

第二节 典型例题详解

例题 1-1: 无热交换的热力系统称为_____。

- A. 孤立系统
- B. 闭口系统
- C. 绝热系统
- D. 开口系统

参考答案: C

考查要点: 热力学系统基本概念。

相关知识:

(1) 人为地选取一定范围内的物质作为研究对象, 称为热力学系统, 简称系统。

(2) 按系统与外界有无物质交换, 系统可分为闭口系统和开口系统。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。

(3) 按系统与外界有无能量交换, 系统可分为绝热系统和孤立系统。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。

例题 1-2: 某容器中气体的表压力为 0.04 MPa, 当地大气压为 0.1 MPa, 则该气体的绝对压力为_____MPa。

A. 0.06 B. 0.04 C. 0.14 D. 0.05

参考答案: C

答案提示: 绝对压力=大气压力+表压力=(0.1+0.04) MPa=0.14 MPa。

考查要点: 相对压力和绝对压力的概念和换算。

相关知识:

(1) 通常用垂直作用于器壁单位面积上的力来表示压力(也称压强)的大小, 这种压力称为气体的绝对压力。

(2) 工程上常用测压仪表测定系统中工质的压力, 这些压力计指示的压力是气体的绝对压力与外界大气压力的差值, 称为相对压力。

(3) 绝对压力与相对压力和大气压力之间关系

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

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

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, 称为表压力;

H ——低于当地大气压力时的相对压力, 称为真空值。

(4) 只有绝对压力才能代表工质的状态参数。因为测得的表压力或真空度是工质绝对压力与大气压力的相对值, 由于大气压力随地理位置及气象条件等因素变化, 因此, 绝对压力相同的工质, 在不同的大气压力条件下, 压力表指示的相对压力并不相同。

例题 1-3: 若工质经历一可逆过程与一不可逆过程, 且其初态和终态相同, 则两过程中工质与外界交换的热量_____。

A. 相同 B. 不相同 C. 不确定 D. 与状态无关

参考答案: C

考查要点: 可逆过程与不可逆过程的概念; 热量的含义。

答案提示: 热量是过程量, 既与初终状态的位置有关, 还与中间经历的路程有关。题目中可逆过程与不可逆过程的初态和终态相同, 但没有给出两者的具体过程, 所以无法确定两者交换的热量大小。

相关知识:

(1) 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, 而不下任何痕迹(既没有得到功, 也没有消耗功), 则此过程称为可逆过程。即系统进行正、反两个过程后, 系统与外界均能完全恢复到初始状态, 这样的过程称为可逆过程, 否则为

不可逆过程。

(2) 实现可逆过程的条件：过程无势差（传热无温差，做功无力差）；过程无耗散效应。

(3) 可逆过程只是指可能性，并不是指必须要回到初态的过程。实际过程不是可逆过程，但为了研究方便，先按理想情况（可逆过程）处理，用系统参数加以分析，然后考虑不可逆因素加以修正。

(4) 系统与外界之间依靠温差传递的能量称为热量，热量是除功以外，没有物质流的系统与外界传递能量的另一种形式。热量的计算公式为 $\delta Q = TdS$ (J)。热量是过程量，它与过程特性有关，初、终态相同但中间途径不同的各种过程，其传递热量也不相同。

例题 1-4：判断后选择正确答案_____。

- A. 无约束的自由膨胀为一可逆过程
- B. 混合过程是一不可逆过程
- C. 准静态过程就是可逆过程
- D. 可逆过程是不可实现过程

参考答案：B

考查要点：可逆过程与不可逆过程的概念；准静态过程的含义。

答案提示：A. 自由膨胀为不可逆过程；C. 可逆过程是准静态过程，但准静态过程不一定是可逆过程；D. 可逆过程在一定条件下可以实现。

相关知识：

(1) 系统状态的连续变化称系统经历了一个热力过程。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某个平衡态，这样的过程称为准静态过程。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。

(2) 可逆过程说明见例题 1-3。

(3) 准静态过程+无耗散效应=可逆过程。可逆过程要求系统与外界随时保持力平衡和热平衡，并且不存在任何耗散效应，在过程中没有任何能量的不可逆损失；而准静态过程的条件仅限于系统内部的力平衡和热平衡。准静态过程在进行中系统与外界之间可以有不平衡差，也可能有耗散现象发生，只要系统内部能及时恢复平衡，其状态变化还是可以是准静态的。所以，准静态过程是针对系统内部的状态变化而言的，而可逆过程则是针对过程中系统所引起的外部效果而言的。可逆过程必然是准静态过程，而准静态过程则未必是可逆过程，它只是可逆过程的条件之一。

例题 1-5：压力表测量的压力是_____。

- A. 绝对压力
- B. 标准大气压
- C. 真空度
- D. 相对压力

参考答案：D

考查要点：相对压力和绝对压力的概念和换算。

答案提示：压力表测量的压力是气体的相对压力（表压力或真空度）。

相关知识点见例题 1-2。

例题 1-6：绝对零度指的是_____。

A. 0°C B. 273°C C. -273°C D. 0°F

参考答案：C

考查要点：温度和温标的概念。

答案提示：绝对零度即 $T=0\text{ K}$ ，而 $t=T-273=0-273=-273^{\circ}\text{C}$ 。

相关知识：

(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。温度是确定一个系统是否与其他系统处于热平衡的物理量。

(2) 温度的数值标尺，简称温标。国际单位制 (SI) 规定 T 为热力学温标，单位为开 (K)。热力学温标指定纯水三相点温度为基本定点，为 273.16 K 。

(3) SI 还规定摄氏温标 t 为实用温标，单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)。摄氏温标的每 1°C 与热力学温标的每 1 K 相同，定义为： $t=T-273.15$ 。

(4) 华氏温标 F 被非专业人士使用，单位为华氏度 ($^{\circ}\text{F}$)。摄氏温标与华氏温标的转换关系为： $t=(F-32)\times 5/9$ 。

例题 1-7：压强的国际单位是_____。

A. bar B. kgf/m^2 C. mmHg D. N/m^2

参考答案：D

考查要点：压强的单位。

答案提示： $1\text{ Pa}=1\text{ N}/\text{m}^2$ 。

相关知识：

(1) SI 规定压力单位为帕斯卡 (Pa)，即 $1\text{ Pa}=1\text{ N}/\text{m}^2$ 。

(2) 工程上还采用其他压力单位，如巴 (bar)、标准大气压 (atm)、工程大气压 (at 或 kgf/m^2)、毫米汞柱 (mmHg) 等单位，其换算关系为：

$$1\text{ bar}=10^5\text{ Pa}=0.1\text{ MPa}$$

$$1\text{ atm}=1.013\,25\times 10^5\text{ Pa}$$

$$1\text{ kgf}/\text{m}^2=9.8\times 10^4\text{ Pa}$$

$$1\text{ mmHg}=133.32\text{ Pa}$$

例题 1-8：熵是_____量。

A. 广延状态参数

B. 强度状态参数

- C. 过程量
- D. 无法确定

参考答案: A

考查要点: 状态量与过程量的含义; 熵的含义; 广延状态参数和强度状态参数的概念。

答案提示: 熵是状态量, 具有可加性, 是广延状态参数。

相关知识:

(1) 状态指热力系统中某瞬间表现的工质热力性质的总状况。状态参数是描述工质状态特性的各种状态的宏观物理量。常用的状态参数有: 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。

(2) 热力状态参数可分为广延状态参数和强度状态参数。强度性参数: 系统中单元体的参数值与整个系统的参数值相同, 与质量多少无关, 没有可加性。在热力过程中, 强度性参数起着推动力作用, 称为广义力或势。如温度、压力等。广延性参数: 系统中各单元体广延性参数值之和, 在热力过程中, 广延性参数的变化起着类似力学中位移的作用, 称为广义位移, 如系统的容积、内能、焓、熵等。

(3) 热力过程是指热力系从一个状态向另一个状态变化时所经历的全部状态的总和。状态参数表示工质的状态, 而过程量不仅与热力学过程的初终状态有关, 还跟过程的性质有关。

(4) 可逆过程熵定义为 $dS = \delta Q/T$ 。熵体现了可逆过程传热的大小与方向, 可用于判断热量方向和计算可逆过程的传热量。熵是状态参数, 并且与系统所含工质的数量有关, 它的总和等于系统各部分分量之和, 这样具有可加性的状态函数称广延状态参数。

例题 1-9: 准静态过程中, 系统经过的所有状态都接近_____。

- A. 相邻状态
- B. 初状态
- C. 低能级状态
- D. 平衡状态

参考答案: D

考查要点: 平衡状态和准静态过程的含义。

答案提示: 在准静态过程中, 系统经过的所有状态都接近平衡状态。

相关知识:

(1) 系统在不受外界影响的条件下, 如果宏观热力性质不随时间而变化, 系统内外同时建立了热和力的平衡, 这时系统的状态称为热力平衡状态, 简称平衡状态。

(2) 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。

例题 1-10: 平衡状态与稳定状态有何区别和联系, 平衡状态与均匀状态有何区别和联系?

解：只有在没有外界影响的条件下，工质的状态不随时间变化，这种状态称之为平衡状态。

只要其工质的状态不随时间变化，就称之为稳定状态。不考虑是否在外界的影响下，这是它们的本质区别。

平衡状态并非稳定状态之必要条件。物系内部各处的性质均匀一致的状态为均匀状态。

平衡状态不一定为均匀状态，均匀并非系统处于平衡状态之必要条件。

例题 1-11：某容器被分隔成 A、B 两室，在容器的不同部位安装有压力表，如图 1.1 所示，已知当场大气压 $B = 0.1013 \text{ MPa}$ ，气压表 2 读为 $p_2 = 0.05 \text{ MPa}$ ，气压表 1 的读数 $p_1 = 0.36 \text{ MPa}$ ，求气压表 3 的读数（用 MPa 表示）。

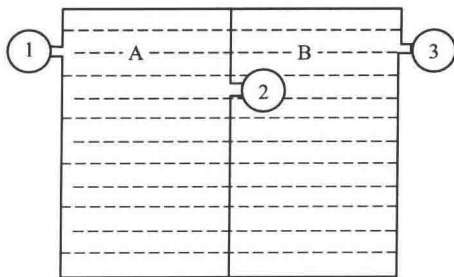


图 1.1

解：先计算 A 室的压力：

$$p_A = B + p_1 = 0.1013 + 0.36 = 0.4613 \text{ MPa}$$

A 室与 B 室的关系可得：

$$p_A = p_B + p_2$$

由此可得： $p_B = p_A - p_2 = 0.4613 - 0.05 = 0.4113 \text{ MPa}$

在对 B 室求解，可得表 3 的压力：

$$p_3 = p_B - B = 0.4113 - 0.1013 = 0.31 \text{ MPa}$$

注意：不管用什么压力表，测得的都是工质的绝对压力 P 和环境压力之间的相对值，而不是工质的真实压力。

例题 1-12：绝热刚性容器内的气体通过阀门向气缸充气。开始时气缸内没有气体，如图 1.2 所示。气缸充气后，气体推动气缸内的活塞向上移动，如图 1.3 所示。设管道阀门以及气缸均可认为是绝热的。若分别选取开口系统与闭口系统，试说明它们的边界应该如何划定？这些系统与外界交换的功量与热量又如何？

解：（1）若以容器内原有的气体作为分析对象，属于闭口系统。容器放气前，边界如图 1.2 中的虚线所示。放气后边界如图 1.3 中的虚线所示。气体对活塞做的功 W 是闭口系统与外界交换的功量。气体通过活塞与外界交换的热量 Q 是此闭口系统的传热量。

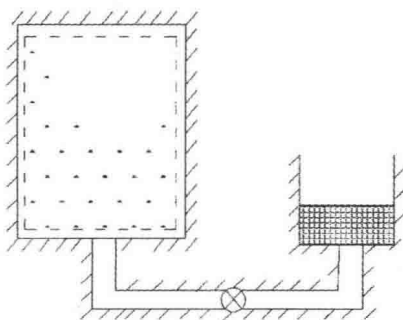


图 1.2

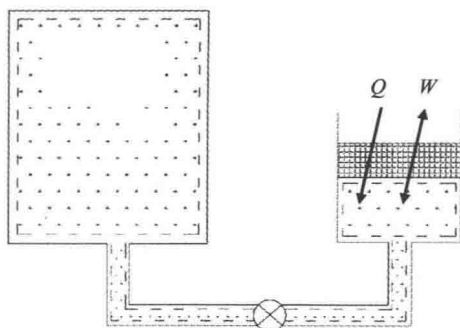


图 1.3

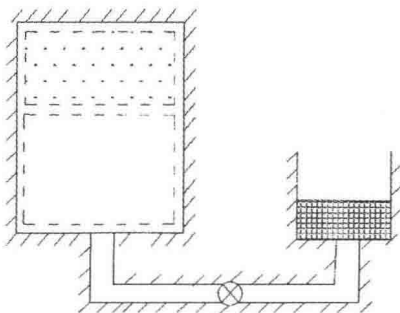


图 1.4

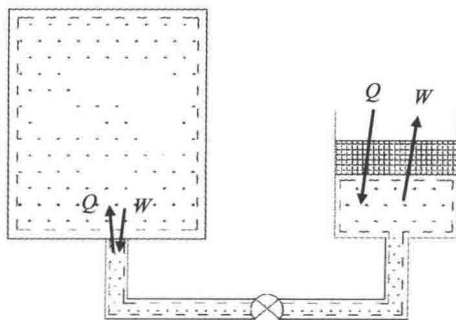


图 1.5

(2) 若以容器放气后残留在容器内的气体作为分析对象, 同样也是闭口系统。这时放气前的边界如图 1.4 中的虚线所示。放气后的边界如图 1.5 的虚线表示。残留气体对离开容器的那部分放逸气体所做的功, 是本闭口系统与外界交换的功, 残留气体与放逸气体之间交换的热量是本系统的传热量。

(3) 类似地, 若以放逸气体为分析对象, 同样也是闭口系统。其边界将如图 1.4 和图 1.5 中的虚线所示。此闭口系统与外界交换的功除了与残留气体之间的功量(大小与第二种情况的相同, 方向相反)外, 还应包括对活塞所作的功。同样, 除了与残留气体之间的传热量(大小与第二种情况的相同, 方向相反)外, 还应包括通过活塞与外界交换的热量。

(4) 若以容器或气缸为分析对象, 则均属开口系统, 容器的壁面或气缸与活塞的壁面为其边界。前者以对放逸气体作出的流动功与传热量为系统与外界交换的功量与热量, 后者以活塞及管道内气体的功量与热量为系统与外界交换的功量与热量。