

30198307

工程热力学题型分析

朱明善 邓小雪 刘颖 编

HK24118

清华大学出版社

内 容 提 要

本书是工程热力学的教学参考书。全书汇集了 331 道概念性与工程性较强的题例。这些题具有一定的广度、深度和难度，其中还包含了相当数量适于思考、分析、讨论的问题。本书采用整理、归纳、分类的方法，详细列举了有关题型，便于读者举一反三，全面了解。在解题过程中着重说明分析思路、解题技巧以及需要注意的问题，还介绍了不少题的多种解题方法，以便读者加深理解抽象概念与基本理论，正确掌握分析方法，提高解决问题的能力。

本书可用作热工类专业大学生与自学者的辅助教材，也可作为相应专业特别是热工教师的参考用书。

工 程 热 力 学 题 型 分 析

朱明善 邓小雪 刘颖 编

★

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京海淀臭海印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

★

开本：850×1168 1/32 印张：12¹/₈ 字数：315千字

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数：0001-4000

ISBN 7-302-00367-X/TK·13 (课)

定价：2.80 元

前 言

本书是根据作者多年来在清华大学教学的经验并参照了全国高等学校工科热工课程指导委员会拟定的热工类工程热力学的基本要求（讨论稿）编写的，可以作为“工程热力学”课程的一本参考教材。

我们编写此书的目的，在于通过有关题型的解析，帮助读者加深对抽象概念与基本理论的理解，正确掌握分析热工问题的方法，培养思考问题的灵活性以及提高解决问题的能力。

依据上述目的，在本书的编排上，采取了综合、归纳与分析的方法。鉴于大多数实际热工问题往往是综合性的，并非用一、二个概念就能解决。为此本书一反惯例，不完全拘泥于通常的章节顺序。在按基本概念与原理、工质性质与计算、循环分析方法以及化学热力学等几大部分编排时，各章既有相对的独立性，又互有呼应，相互交叉，以便既可按教学进度选取适当章节进行学习，又能满足综合分析和复习提高的需要。对于各章涉及的内容，不是简单列举一些例题，而是将有关问题采取归纳、整理与分类的方法，以便使读者做到胸有全局、举一反三，从所列举的例题中演变出更多的相应问题。对于例题的求解，则侧重说明思路、解题技巧以及需要注意的问题，着重指出容易产生错误的方面。还给出了不少题的多种解法，可使读者扩大思路。在选材方面，主要参考了十多本国内外工程热力学教材与习题集，特别是我们自身教学实践经验积累的问题以及兄弟院校的经验与部分资料。本书收集了概念性与工程性较强的 331 道具有代表性的例题，有一定的广度和深度，有的还有相当的难度，其中包含了相当数量适于思考、分析、讨论的问题。它们大都选自我们自编的课堂讨论与提高性参考题集以及清华大学历年硕士生入学试题，

一部分取自西安交大、天津大学、中国科技大学、华中工学院、重庆大学、北京工业学院、华北电力学院等兄弟院校近年来部分较难的硕士生入学试题。对于所选的题例，有的详细进行了分析，有的则留待读者自解。这样，既有示例，又留有一定数量的习题，以供读者练习之用。

本书可以作为热工类热能动力、空调制冷、内燃机械、工程热物理等专业大学本科生的教学辅助用书，同样也可作为上述相应专业自学进修人员的参考用书。对于有关的教师也有参考价值。

本书的第一、四、六和七章由朱明善执笔，第二与第三章分别由邓小雪与刘颖撰写，第五章由朱明善与邓小雪合写。全书经相互阅改，最后由朱明善统稿。编写过程中清华大学王补宣教授与热工教研组的其他一些同志给予了支持与关心，特此致意。对于前述一些兄弟院校的支持也一并致谢。

编者

1986.8 于清华园

目 录

前言

第一章 基本概念

| | |
|-----------------------|----|
| § 1.1 工程热力学解题的一般方法和实例 | 1 |
| § 1.2 系统 | 8 |
| § 1.3 状态参数 | 13 |
| § 1.4 平衡态 | 17 |
| § 1.5 热力学第零定律和温度 | 19 |
| § 1.6 准静态过程与可逆过程 | 24 |

第二章 热力学第一定律

| | |
|-----------------------|----|
| § 2.1 功的计算 | 26 |
| § 2.2 热力学第一定律的基本能量方程式 | 36 |
| § 2.3 稳定流动能量方程 | 58 |
| § 2.4 非稳定流动问题 | 66 |

第三章 热力学第二定律

| | |
|-------------------|-----|
| § 3.1 热力学第二定律表述 | 87 |
| § 3.2 卡诺循环与卡诺定理 | 89 |
| § 3.3 过程方向性的特征与判据 | 95 |
| § 3.4 熵——广延性的状态参数 | 112 |
| § 3.5 熵的计算 | 115 |
| § 3.6 最大功、最小功的计算 | 128 |
| § 3.7 作功能力损失的计算 | 137 |
| § 3.8 焓 | 144 |

第四章 均匀系的热力学一般关系式

| | |
|------------------------|-----|
| § 4.1 数学工具 | 153 |
| § 4.2 特征函数 | 155 |
| § 4.3 基本方程和 Maxwell 关系 | 159 |
| § 4.4 运算技巧 | 167 |
| § 4.5 常用的辅助方程与热系数 | 177 |
| § 4.6 题型一——各参数的关联 | 179 |
| § 4.7 题型二——过程线的斜率 | 193 |
| § 4.8 题型三——参数变化和过程方程 | 199 |
| § 4.9 题型四——确定状态方程 | 207 |
| § 4.10 题型五——参数计算 | 213 |

第五章 工质的性质及其过程

| | |
|--------------------|-----|
| § 5.1 理想气体的性质 | 217 |
| § 5.2 理想气体的过程 | 231 |
| § 5.3 理想混合气体的性质及过程 | 237 |
| § 5.4 湿空气的性质及过程 | 259 |
| § 5.5 纯物质的性质及过程 | 270 |

第六章 循环分析

| | |
|------------------------|-----|
| § 6.1 理想循环的热力学第一定律分析方法 | 291 |
| § 6.2 实际循环的热力学分析方法 | 305 |

第七章 化学热力学基础

| | |
|------------------------|-----|
| § 7.1 化学计量 | 325 |
| § 7.2 热力学第一定律在化学反应中的应用 | 334 |
| § 7.3 热力学第二定律在化学反应中的应用 | 351 |
| § 7.4 热力学第三定律与绝对熵 | 377 |

第一章 基本概念

§ 1.1 工程热力学解题的一般方法和实例

(一) 解题的一般方法

1. 仔细审题。掌握已知条件，弄清题意，并且按照题意，列出物理模型，绘出流程图。

2. 确定系统。注意区分封闭系统、开口系统或孤立系统等，弄清所确定的系统与外界之间的边界及其相互作用的内容（质量迁移、功量迁移，热量迁移等等）。

3. 区分工质。明确所研究的工质是理想气体、实际气体、理想气体混合物、湿空气，还是过热蒸气、饱和蒸气、湿蒸气，或是液体。以便针对不同工质，确定描述工质参数的方法（例如运用状态方程或图表），掌握它们各自的特点。

对于液体，尤其是水，一般可按不可压缩流体处理，过冷液体的焓值一般可用同一温度下饱和液体焓值表示。

对于气体，当 $T \geq 2T_c$ 或 $p \leq 0.1p_c$ 时，一般可按理想气体处理。

气体的比热可以认为只是 T 的函数，一般情况下可按定比热进行分析。

4. 画热力学图。结合题意，在热力学图（ $p-v$ 图、 $T-s$ 图、 $h-s$ 图等）上画出相应的状态点、过程线（可逆过程、准静态过程或非准静态过程），明确过程特征（如定温、定压、定容、

定嫡、定焓、定内能等过程)，确定它们的参数关系或过程方程。

5. 质量守恒。考虑是否需要运用质量守恒原理，如何具体运用。

6. 能量守恒。考虑需用哪种形式的能量方程：封闭系的、开口系的或孤立系的，以及稳定的或不稳定的等等。

运用热力学第一定律分析问题时，经常用到下列假设和规律：

- a. 向真空膨胀的膨胀功为零。
- b. 流速较快的过程，可按绝热处理（如喷管）。
- c. 过程进行得很缓慢时，可以认为系统与外界随时处于热平衡。
- d. 动、位能的变化通常可忽略不计，但喷管、扩压管等设备例外。
- e. 除非管路中有阀门一类的节流元件，一般来说，作为初次近似，工质可按定压流动处理。
- f. 绝热容器的放气过程中，残留在容器内的理想气体可按可逆绝热膨胀过程处理。
- g. 缓慢的漏气过程中，可以认为容器内的气体随时与外界处于热平衡。
- h. 势差较大或进行得十分剧烈的过程，一般不能认为是准静态过程。

掌握这些假设或规律，对于解题有很大帮助。

7. 嫡方程。考虑需用哪种形式的热力学第二定律表达式：封闭系的、开口系的或孤立系的；稳流或非稳流的，克氏不等式：

$$\oint \frac{\delta q}{T_r} \leq 0, \text{ 嫡的定义式 } ds \geq \frac{\delta q}{T_r}, \text{ 或孤立系统嫡增公式 } \Delta S_{i..}$$

≥ 0 等等。

运用热力学第二定律分析问题时，经常用到下列假设和规律。

a. 凡求解最大功、最小功或可能达到的最高压力等问题，一般需要按可逆过程进行分析，而且通常需要用热力学第二定律的表达式。

b. 系统是否经历了内部可逆过程，主要根据该系统内部各点参数是否在所有时刻都处于均匀状态来判断。

c. 对于透平和压缩机械，作为初次近似可按定熵过程处理，然后再视实际情况，按其效率的高低加以修正。对于阀门、节流孔板或毛细管等不可逆性很大的元件，即使绝热时也不能按定熵过程处理。

8. 是否采用了正确的符号。如功用 $W[\text{kJ}]$ 比功 $w[\text{kJ}/\text{kg}]$ ，功率 $N[\text{kW}]$ 等等。

9. 在运算推导过程中，经常注明数值的“量纲”。可用“量纲”检验推导过程是否正确，其作用比具体数值重要得多。

10. 不要急于在推导过程中进行数字计算。求解后注意从物理概念、量纲、以及数值的一般范围等几个方面，分析判断计算结果是否合理。

上面介绍的是一般方法和步骤，具体问题还需灵活运用，不必完全照抄照搬。

(二) 例题

例 1.1 两股空气在绝热流动中混合。已知第一股空气的容积流量 $V_1 = 1 \text{ Nm}^3/\text{min}$ ， $p_1 = 1 \text{ bar}$ ， $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ；第二股空气的容积流量 $V_2 = 0.12084 \text{ m}^3/\text{min}$ ， $p_2 = 9 \text{ bar}$ ， $t_2 = 20^\circ\text{C}$ 。在忽略动、位能变化的条件下，试确定混合后的容积流量 V_3 ，温度 t_3 和最大可能达到的压力 p_3 。

分析：本题较为典型，下面将运用上述一般方法与步骤求

解。绝热混合是典型不可逆过程。在给定了混合前的压力参数后，不可逆程度越大，则混合后的压力势必越低，只在极限情况即可逆情况下混合后的压力才能达到最高值。因此为了确定此最高压力值，必须按可逆过程处理。

解：（1）按题意，绘出如图 1-1 所示的流程图，并在图上注明题设条件。

（2）按图 1-1 所取的边界、（如虚线所示），分析对象属开口系统。

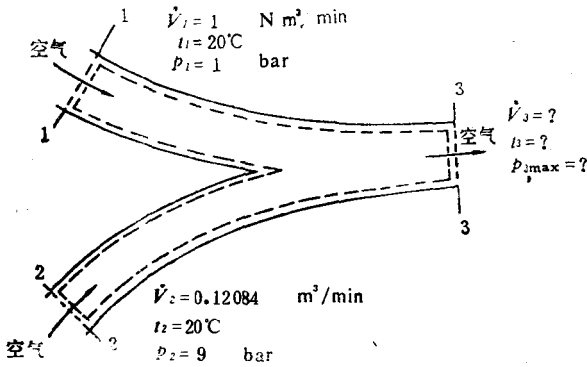


图 1-1

（3）按题设条件，空气可按理想气体处理，而且又可按定比热分析。因此本例属于可忽略动、位能变化的理想气体、稳定流动情况。

（4）列出质量守恒式。由于质量流量 m 与标准条件（1 atm, 0°C）下的容积流量有下列关系：

$$\dot{V}_0 = \frac{22.4 \times 10^{-3}}{\mu} \times \dot{m}$$

因而本题可直接运用标准条件下容积流量列质量守恒式：

$$\dot{V}_{30} = \dot{V}_{10} + \dot{V}_{20}$$

这里 $\dot{V}_1 = \dot{V}_{10}$ ，但第二股空气给定的是实际容积流量 \dot{V}_2 ，为此必须先将其换算成 $\dot{V}_{2,0}$ Nm^3/min 。

$$\begin{aligned} \text{即: } \dot{V}_{2,0} &= \dot{V}_2 \cdot \frac{p_2}{p_{20}} \cdot \frac{T_{20}}{T_2} = 0.12084 \times \frac{9}{1.01325} \times \frac{273}{293} \\ &= 1.0 \text{Nm}^3/\text{min} \end{aligned}$$

这样， $\dot{V}_{30} = \dot{V}_{10} + \dot{V}_{20} = 1 + 1 = 2 \text{Nm}^3/\text{min}$

(5) 运用稳流能量方程确定混合后的温度。因 $Q=0$, $W_s=0$ ，如设 $T=0\text{K}$ 时的 $h=0$ ，则

$$\frac{\mu c_p}{22.4 \times 10^{-3}} (\dot{V}_1 T_1 + \dot{V}_{20} T_2) = \frac{\mu c_p}{22.4 \times 10^{-3}} \cdot \dot{V}_{30} \cdot T_3$$

$$\text{于是 } T_3 = \frac{1 \times 293 + 1 \times 293}{2} = 293 \text{K} (t_3 = 20^\circ\text{C})$$

(6) 此开口系统经历可逆绝热过程时，其第二定律表达式为：

$$\Delta S = \frac{\mu}{22.4 \times 10^{-3}} [\dot{V}_{10} s_1 + \dot{V}_{20} s_2 - \dot{V}_{30} s_3] = 0$$

因而得：

$$\dot{V}_{10} (s_1 - s_3) = \dot{V}_{20} (s_3 - s_2)$$

代入理想气体熵差公式，则：

$$c_p \ln \frac{T_1}{T_3} - R \ln \frac{p_1}{p_3} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2} - R \ln \frac{p_3}{p_2}$$

由于 $T_1 = T_3 = T_2$ ，故 $\ln \frac{p_1}{p_3} = \ln \frac{p_2}{p_3}$ ，或

$$p_3 = \sqrt{p_1 \cdot p_2} = \sqrt{1 \times 9} = 3 \text{ bar}$$

按前面的分析，这就是混合后所能达到的最高压力 $p_{3, \text{max}}$ 。

说明：解题过程中，有两处容易产生错误。

(1) 不少读者常常想不到用热力学第二定律表达式来求解 $p_{3, \text{max}}$ ，以为只要运用热力学第一定律和状态方程就行。于是

他们列出能量方程： $\dot{m}_1 c_p T_1 + \dot{m}_2 c_p T_2 = \dot{m}_3 c_p T_3$

并且以为状态方程可表示为 $p\dot{V}_0 = \dot{m}RT$ ，代入上式后则

$$\frac{p_1 \dot{V}_{10}}{RT_1} \cdot T_1 + \frac{p_2 \dot{V}_{20}}{RT_2} \cdot T_2 = \frac{p_3 \dot{V}_{30}}{RT_3} \cdot T_3$$

或

$$p_1 \dot{V}_{10} + p_2 \dot{V}_{20} = p_3 \dot{V}_{30}$$

因而似乎得出 $p_3 = \frac{1 \times 1 + 9 \times 1}{2} = 5 \text{ bar}$

显然这个结果是错误的，问题在于 $p\dot{V}_0 \neq \dot{m}RT$ ，而且应该注意到，既已用了第一定律表达式确定了 T_3 ，又怎么可能运用同一表达式再来确定第二个未知数 p_3 呢！

(2) 在列质量守恒关系式时，有些读者常因疏忽而错误地写成：

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = 1 + 0.12084 = 1.12084$$

由于 \dot{V}_1 与 \dot{V}_2 的单位不同，显然不能直接相加。这里再次说明运算推导过程中，在数值后注明量纲的必要。

通过本例还可看出：凡涉及求解某个物理量的最大值或最小值的一类问题，通常需要运用热力学第二定律进行分析求解。

√例 1.2 试根据热力学第一定律分析图 1-2 所示的绝热汽包是否存在损失以及损失的大小？已知环境绝对温度 $T_0 = 300 \text{ K}$ 。

水的定压比热 c_p 可认为是一常数。若用热力学第二定律分析，结果如何？

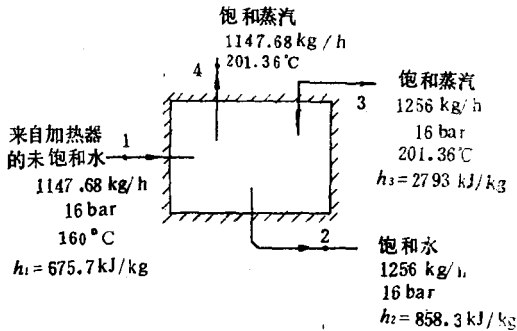


图 1-2

解：（1）如以汽包为分析对象，属绝热开口系统，不向外散热，进入汽包的能量等于从汽包输出的能量。按第一定律分析，汽包不存在能量损失。

（2）按第二定律分析，汽包有没有能的损失，可依据它的熵值是否增加来判断。

系统熵的变化：

$$\Delta S = 1147.68 \times (s_4 - s_1) + 1256(s_2 - s_3)$$

其中， $(s_2 - s_3) = \frac{h_2 - h_3}{T_2}$ ， $(s_4 - s_1) = (s_4 - s_2) + (s_2 - s_1)$ 由图

1-2 可以看出，点 4 与点 3 的饱和蒸汽状态参数相同，故 $s_4 = s_3$ ， $(s_2 - s_1)$ 是定压下未饱和水加热到饱和水时的熵增，可用

$\int_1^2 \frac{c_p}{T} dT$ 表示。按题设条件 c_p 为一常数，它等于 $\frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1}$ ，于是：

是：

$$\begin{aligned}
\Delta S &= 1147.68 \times (s_3 - s_2) + 1147.68 \times \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} \times \ln \frac{T_2}{T_1} \\
&\quad + 1256(s_2 - s_3) \\
&= 1147.68 \times \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} \ln \frac{T_2}{T_1} - 108.32 \times \frac{h_3 - h_2}{T_2} \\
&= 1147.68 \times \frac{858.3 - 675.7}{201.36 - 160} \times \ln \left(\frac{201.36 + 273}{160 + 273} \right) \\
&\quad - 108.32 \times \frac{2793 - 858.3}{201.36 + 273} \\
&= 462.247 - 441.788 = 20.459 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{K})
\end{aligned}$$

可见，汽包内存在不可逆因素，由此产生的作功能力损失为：

$$\Pi = T_0 \cdot \Delta S = 300 \times 20.459 = 6.138 \times 10^3 \text{ kJ/h}$$

说明：（1）汽包不存在外部损失，但有内部不可逆损失，因此从第一定律分析，能量似乎无损失；但从第二定律看，能量的质量有了变化，作功能力有所下降，构成了损失。

（2）本题计算的难点在于无法直接确定熵差，特别是 $(s_4 - s_1)$ 的差值，请读者留意本例中为了求算 $(s_4 - s_1)$ 所采用的方法。

§ 1.2 系 统

（一）内容提要

热力学中人为划定的研究对象称为系统。系统以外统称外界。系统与外界以边界相隔。视系统与外界之间有无质量的迁移，可分为闭口系统（或称封闭系统）与开口系统。若系统与外界既无质量迁移又无能量传递，则称孤立系统。

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。选取不当将不便于分析。

选定系统后需要精心确定系统与外界之间的各种相互作用以及系统本身能量的变化。否则很难获得正确的结论。

(二) 例题

✓ 例 1.3 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 1-3 (a) 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 (b) 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？

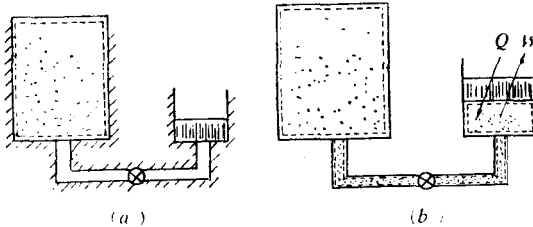


图 1-3

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 1-3 (a) 中的虚线所示，放气后边界如图 1-3 (b) 中的虚线所示。气体对活塞作的功 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。

(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 (a) 中的虚线所示，放气后的边界如图 1-4 (b) 的虚线表示。残留气体对

离开容器的那部分放逸气体所作的功 W' 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。

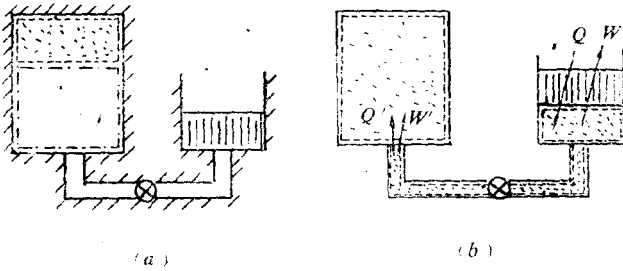


图 1-4

(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 (a) 和 (b) 中的点划线所示。此闭口系统与外界交换的功量除了与残留气体之间的功量 W' 外，还应包括对活塞所作的功即 $W'' = W + W'$ 。同样，除了与残留气体之间的传热量 Q' (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 Q ，即 $Q'' = Q' + Q$ 。

(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，后者以对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 (图 1-3 与 1-4 中未示出它们的边界，请读者自画)。

说明：(1) 本题主要目的是练习如何选取各种系统。

(2) 系统选择的不同，能量关系就不同。有的便于分析与计算，有的则不然，因而系统的选择将影响分析与求解的难易程度。

例 1.4 门窗紧闭的房间内有一台电冰箱正在运行，若敞开冰箱的大门就有一股凉气扑面，感到凉爽。于是有人就想通过敞开冰箱大门达到降低室内温度的目的，你认为这种想法可行吗？

解：(1) 按题意，以门窗紧闭的房间为分析对象，可看成绝热的闭口系统与外界无热量交换， $Q=0$ ，如图 1-5(a) 所示。当安置在系统内部的电冰箱运转时，将有电功输入系统，即 W 为负。因此按照闭口系统能量方程，

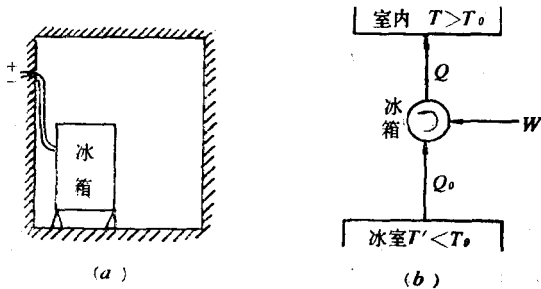


图 1-5

$0 = \Delta U + W$ ，或 $\Delta U = -W > 0$ ，室内空气的内能将增加，温度将上升。可见此种想法不但不能达到降温目的，将反而使室内温度有所升高。

(2) 若以电冰箱为系统进行分析，其工作原理如图 1-5(b) 所示。耗电 W 后连同从冰室内取出的冷量 Q_0 。一同通过散热片排放到室内，使室内温度升高。

例 1.5 既然敞开冰箱大门不能降温，为什么在门窗紧闭的房间内安装空调器后却能使温度降低呢？

解：参看图 1-6，仍以门窗紧闭的房间为对象。由于空调器安置在窗上，通过边界向环境大气散热，这时闭口系统并不绝