

基本館藏

9593

# 工程熱力學

上 冊

蘇聯 維·維·蘇什柯夫著

楊延昕 任 瑛譯



燃料工業出版社

424

# 工 程 熱 力 學

上 冊

蘇聯 維·維·蘇什柯夫教授著

楊延昕 任 瑛譯

蘇聯文化部高等教育管理總局批准  
作為高等工業學校非動力專業用教材

燃 料 工 業 出 版 社

# 工 程 熱 力 學

下 冊

蘇聯 維·維·蘇什柯夫教授著

楊延昕 任 瑛譯

蘇聯文化部高等教育管理總局批准  
作為高等工業學校非動力專業用教材

燃 料 工 業 出 版 社

## 內 容 提 要

本書敘述氣體和熱力學的基本定律及其在熱機方面的應用，並討論蒸汽動力裝置、內燃機、冷卻設備的循環，以及氣體流動的理論、濕空氣、熵與或然率、可逆性和功的產生等問題。

\*  
\*  
\*

## 工 程 熱 力 學

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

### 上 冊

根據蘇聯國立動力出版社 (ГОСЭНЕРГОИЗДАТ)  
1953 年莫斯科俄文第五版翻譯

蘇聯 В. В. СУШКОВ 著

楊延昕 任 瑛譯

燃料工業出版社出版

社址：北京東長安街燃料工業部

北京市書刊出版業營業許可證出字第 012 號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：韓 維 校對：趙迦南 戴佩瑛

書號 306 \* 電 132 \* 850 × 1092 1/32 開本 \* 511 印張 \* 143 千字 \* 定價 10,400 元

一九五四年十月北京第一版第一次印刷 (1—6,200 冊)

## 內 容 提 要

工程熱力學下冊包括第九章至第十五章。主要內容為蒸汽動力裝置、內燃機、冷卻設備的循環等，關於氣體流動的理論、濕空氣、熵與或然率、可逆性和功的產生等問題，也作了詳細的敘述。

\* \*

\*

## 工 程 熱 力 學

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

### 下 冊

根據蘇聯國立動力出版社(ГОСЭНЕРГОИЗДАТ)  
1953年莫斯科俄文修訂第五版翻譯

蘇聯B. B. СУШКОВ 著

楊延昕 任 瑛 譯

燃料工業出版社出版

社址：北京東長安街燃料工業部

北京市書刊出版業營業許可證出字第012號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：朱雅軒 校對：趙迦南

書號366 \* 電162 \* 850×1092 1/16開本 \* 5 1/2印張 \* 121千字 \* 定價12.600元

一九五五年二月北京第一版第一次印刷(1—4,000冊)

## 原編者序言

維·維·蘇什柯夫所著「工程熱力學」是專為高等工業學校非動力專業學生寫的，這書已再版了四次。敘述的清楚和簡潔使本書在過去十年內所出版的工程熱力學中成為最流行和最受讀者歡迎的書之一。

在這書的第五版中，除保存了以前各版的優點外，還儘可能符合高等教育部制訂的最新教學大綱。

考慮到，了解物理現象的本質從各種觀點來看是很重要的，又考慮到近年來注意到用所謂熵的方法來決定能量的損失，因此又補充了兩節：「熵與或然率」 5-13 及「可逆性和功的產生」 5-14。

B·基里寧

3A016/06

## 序 言

第五版與第四版（1946年）相比較，有了根本上的修改，因為需要使書的內容及敘述次序符合 高等教育部 在1949年7月25日頒佈新制定的、與以前有本質上不同的教學大綱。特別在下列方面：俄國及蘇聯學者在工程熱力學發展中應有的地位，增加了熱力學微分方程式一章，取消了分別敘述飽和和過熱蒸汽過程，較詳細的增補了壓縮空氣和汽輪機的章節；按照需要，將蒸汽和氣體的流動分別敘述，而不像在第四版中一起敘述。

改變了材料的分節，節數減少了很多（由118到80）。

作 者

## 目 錄

## 原編者序言

## 序 言

## 前 言 ..... 1

## 1. 工程熱力學的對象 ..... 1

## 2. 俄國和蘇聯學者們在工程熱力學發展中所起的作用 ..... 2

## 第一章 氣體，氣體基本定律 ..... 5

## 1-1. 物體的基本狀態參數 ..... 5

## 1-2. 熱能的實質 ..... 9

## 1-3. 理想氣體，氣體運動論 ..... 10

## 1-4. 氣體基本定律 ..... 12

## 1-5. 理想氣體狀態方程式 ..... 15

## 1-6. 混合氣體，道爾頓定律 ..... 18

## 1-7. 實際氣體，實際氣體應用理想氣體狀態方程式的偏差 ..... 24

## 第二章 熱力學第一定律 ..... 27

## 2-1. 熱和功的當量原理 ..... 27

## 2-2. 熱力學第一定律 ..... 30

## 2-3. 物體的內能 ..... 33

## 2-4. 膨脹功 ..... 34

## 2-5. 可逆過程和不可逆過程 ..... 38

## 第三章 氣體的熱容量 ..... 42

## 3-1. 理想氣體的內能 ..... 42

## 3-2. 氣體的重量熱容量，摩爾熱容量及容積熱容量 ..... 44

## 3-3. 氣體熱容量與溫度的關係，真實熱容量和平均熱容量 ..... 50

## 3-4. 氣體的等壓熱容量和等容熱容量的比值 ..... 56

## 3-5. 氣體的焓 ..... 57

## 第四章 氣體的過程 ..... 60

## 4-1. 氣體過程的研究 ..... 60

## 4-2. 定容過程 ..... 60

## 4-3. 定壓過程 ..... 62

## 4-4. 等溫過程 ..... 65

## 4-5. 絕熱過程 ..... 67

## 4-6. 多變過程 ..... 72



|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第五章 熱力學第二定律 .....                 | 74  |
| 5-1. 封閉過程或循環 .....                | 78  |
| 5-2. 理想氣體的加諾封閉過程 .....            | 79  |
| 5-3. 加諾逆循環 .....                  | 84  |
| 5-4. 熱力學第二定律 .....                | 85  |
| 5-5. 加諾定理 .....                   | 86  |
| 5-6. 物體的熵 .....                   | 88  |
| 5-7. 理想氣體的熵 .....                 | 92  |
| 5-8. $T$ - $S$ 熱圖 .....           | 95  |
| 5-9. 在 $T$ - $S$ 圖中的氣體過程 .....    | 98  |
| 5-10. $T$ - $S$ 圖中的封閉過程 .....     | 103 |
| 5-11. 回熱循環 .....                  | 106 |
| 5-12. 熵的增加和孤立體系的能級遞減 .....        | 108 |
| 5-13. 熵與或然率 .....                 | 112 |
| 5-14. 可逆性和功 .....                 | 122 |
| 第六章 熱力學微分方程式 .....                | 134 |
| 6-1. 熱, 內能, 焓及熵的方程式 .....         | 134 |
| 6-2. 熱容量 $c_p$ 和 $c_v$ 的方程式 ..... | 141 |
| 第七章 往復式內燃機循環 .....                | 143 |
| 7-1. 內燃機的工作原理 .....               | 143 |
| 7-2. 內燃機的封閉過程 .....               | 144 |
| 7-3. 定容燃燒循環 .....                 | 146 |
| 7-4. 定壓燃燒循環 .....                 | 152 |
| 7-5. 混合燃燒循環 .....                 | 157 |
| 第八章 空氣壓縮機 .....                   | 162 |
| 8-1. 往復式壓縮機的工作過程 .....            | 162 |
| 8-2. 多級壓縮機 .....                  | 165 |

# 目 錄

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 第 九 章 氣體流動 .....                       | 167 |
| 9-1. 流動外功 .....                        | 167 |
| 9-2. 流動總功 .....                        | 169 |
| 9-3. 絕熱流動過程、臨界壓力比 .....                | 173 |
| 9-4. 在擴散器中的過程 .....                    | 185 |
| 9-5. 流動中的節流 .....                      | 186 |
| 第 十 章 燃氣輪及噴氣發動機循環 .....                | 190 |
| 10-1. 燃氣輪循環 .....                      | 190 |
| 10-2. 噴氣發動機循環 .....                    | 195 |
| 第十一章 水蒸汽 .....                         | 198 |
| 11-1. 定壓汽化過程 .....                     | 198 |
| 11-2. 液體的熱、內能、焓及熵 .....                | 207 |
| 11-3. 乾飽和蒸汽的總熱、內能、焓及熵 .....            | 212 |
| 11-4. 濕飽和蒸汽的總熱、內能、焓及熵 .....            | 216 |
| 11-5. 過熱蒸汽。過熱蒸汽的狀態方程式。過熱蒸汽的定壓熱容量 ..... | 217 |
| 11-6. 過熱蒸汽的總熱、內能、焓及熵 .....             | 222 |
| 11-7. 水蒸汽表 .....                       | 223 |
| 11-8. 水蒸汽的 $T$ - $s$ 圖 .....           | 226 |
| 11-9. 水蒸汽的 $p$ - $v$ 圖 .....           | 230 |
| 第十二章 蒸汽的過程 .....                       | 233 |
| 12-1. 定容過程 .....                       | 233 |
| 12-2. 定壓過程 .....                       | 233 |
| 12-3. 等溫過程 .....                       | 240 |
| 12-4. 絕熱過程 .....                       | 242 |
| 12-5. 蒸汽的流動和節流 .....                   | 245 |
| 第十三章 蒸汽動力裝置的循環 .....                   | 254 |
| 13-1. 飽和蒸汽的卡諾循環 .....                  | 254 |
| 13-2. 郎肯循環 .....                       | 259 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 13-3. 單位汽耗量及單位熱耗量。發動機的內相對熱效率····· | 264 |
| 13-4. 提高蒸汽動力循環熱效率的方法·····         | 268 |
| 13-5. 兩汽循環·····                   | 273 |
| 13-6. 熱的混合利用，供熱的基礎·····           | 278 |
| 13-7. 中間抽汽·····                   | 283 |
| 13-8. 回熱循環·····                   | 285 |
| 第十四章 製冷設備循環·····                  | 292 |
| 14-1. 蒸汽冷凍設備·····                 | 292 |
| 14-2. 製冷循環的 $T_s$ 圖·····          | 293 |
| 14-3. 製冷循環的計算·····                | 293 |
| 第十五章 濕空氣·····                     | 296 |
| 15-1 濕空氣的主要參數·····                | 296 |
| 15-2. 濕空氣的 $I_d$ 圖·····           | 300 |
| 附 錄·····                          | 302 |

# 前 言

## 1. 工程熱力學的對象

以現代的觀點來看，與機械、電和化學能一樣，熱也是能量的一種形式。熱能是分子和分子內部運動的能，即分子和原子運動的能。按照能量不滅定律，任何一種形式的能可以變為另一種，故熱能可變為機械能，機械能也可變為熱能。現代動力事業主要建築於變熱為機械能的基礎上，因為電能便於遠距離輸送又在固定設備中將機械能變為電能。這種能的轉化，必須在蒸汽鍋爐或直接在內燃機中燃燒某種燃料來達到，將燃料的化學位能變為熱能。

水能是現代動力的第二個基本來源，它起的作用則較燃料為小。現在全世界電能的 $\frac{1}{3}$ 是由水電站發生的。在運輸事業中，動力來源的絕大部分是各種燃料，機車，輪船，船用柴油機、汽車及飛機發動機所消耗的燃料約為全世界燃料需要總量的25%。

水能具有比燃料更重要的優點：第一，水力發電站所產生的電能較熱力發電站所發出的電能要便宜得多，第二，水能是永遠可以恢復的。因此廣泛的利用水能是重要的國民經濟任務。在革命前的俄國，如不考慮作坊式的農村小型動力設備的話，水能基本上沒有被利用，而我們國家水能的儲量（超過3億瓩）是佔全世界第一位的。十月革命以後，利用水能已成為我國動力界的首要任務。1927年60 000瓩的伏爾加水電站開始送電，而1932年600 000瓩的第聶伯水電站又開始送電。在1951年8月21日及31日政府通過歷史性的決議後，開始建築的巨型水電站有：1 700 000瓩的斯大林格勒水電站，2100 000瓩的古比雪夫水電站，其規模之大是世界上無可比擬的。這些工程現在正以極高的速度進行。

最近，科學界又提出了關於應用新的能量來源——原子能的問題，原子能的儲量實際上是無窮盡的。必須相信，不久的將來一定會尋求到合理方法將原子能用到工業和生活去。

提出合理的變熱為功的過程有極重要的意義，因為從一方面來說，可減低得到能量的成本，另一方面使燃料的使用更為經濟。

學習熱力過程，特別是變熱為機械能或功的過程以及尋求變熱為功的最有利的條件是工程熱力學的基本任務。這門課程將為一系列的其他專業課程如：蒸汽鍋爐、蒸汽機、汽輪機內燃機等打下理論基礎。

## 2. 俄國和蘇聯學者們在工程熱力學發展中所起的作用

十九世紀的五十年代工程熱力學才形成為獨立的科學，開始時它是稱為熱的機械論的。在這以前 100 年這門科學的基本前提已由我們偉大的同胞 M. B. 羅蒙諾索夫所闡明，在他的著作中完全推翻了當時所公認的熱素論，所謂熱素論是將熱量看作一種沒有重量的物質，可由一個物體流到另一個物體。

羅蒙諾索夫在其論文「關於熱和冷的起源」(1744—1747)，「空氣彈性力的理論」(1745)及「論固體與液體物質」(1760)中敘述了自己的觀點，他確認為：「熱是物質的運動」，也就是「物質微粒的旋轉運動」，所以熱的作用就是他本身微粒的旋轉運動所產生；「因為熱空氣加熱被其圍繞着的冷物體，則它的原子激起與其相接觸的物體，形成熱的運動」。雖然，羅蒙諾索夫關於熱運動原理的概念與現在所公認者不完全一致，但他在一百年以前就決定了西歐科學思想的發展。發明物質和能量不滅定律的光榮是屬於羅蒙諾索夫的。但羅蒙諾索夫的觀點和原理未被當時的科學界所採納，其原理和觀點之得到普遍的公認那是整整一個世紀以後的事。那時出現了一個特殊的科學部門——熱的機械論。

已如前述，工程熱力學的發展開始於十九世紀的後半葉，很多的俄國學者曾參加這個活動。1862年曾出版彼得堡大學教授奧

卡托夫的著作「熱的一般形式就是運動——關於熱的第二原理學說的說明」，1871年刊行了他的講義「熱靜力學——熱機械原理的第一部」（這門科學的第一本俄文印刷課本），這本書在蘇聯及國外的學者中引起很大的重視。1876年出現了И. А. 維許列格勒斯基教授的關於氣體運動論及熱的機械論的著作，這些著作引起了巴黎科學院的注意。1861年我們偉大的化學家Д. И. 門得雷業夫在世界上第一個證明了：每一種液體都有一個臨界溫度——液體可能達到的最高溫度，他稱之為「絕對沸騰溫度」，同時他又制定了物質的氣態和液態的連續性，與門得雷業夫同時的許多俄國學者也從事於臨界狀態問題的研究。1870—1890年中阿維那里烏斯，哥里津，斯多烈托夫，納捷日金，保加葉夫斯基及茹科等教授所進行的理論和實驗工作也是很有名的。在1885—1890年中，「俄國物理化學雜誌」登載了基輔大學教授Н. Н. 比洛果夫在氣體運動論方面的很多重要研究，基輔大學教授Н. К. 什烈爾的許多工作也具有很重大的意義，這些工作提出了熱力學基本原理的分析，這些，都登載在1880—1890年間的同一雜誌上。蘇聯科學院通訊院士А. А. 拉得吉克的工作是蒸汽熱力學中突出的貢獻，他是蒸汽透平原理的創造者之一。

在偉大的十月革命以後，我們國家建立了許多科學研究機構，其任務就是進行工業上很重要的熱力學和熱力工程方面的研究。

在蘇維埃政權時代中進行了許多大規模的理論和實驗工作。以克爾日若諾夫斯基命名的動力研究所，以Ф. Ф. 捷爾任斯基命名的全蘇熱工研究所，以波爾松諾夫命名的中央鍋爐汽機研究所以及其他研究所的科學研究人員也完成了很巨大的工作，在蘇維埃政權年代中高等工業學校例如以М. В. 羅蒙諾索夫命名的國立莫斯科大學，以В. М. 莫洛托夫命名的莫斯科動力學院，以Н. Ф. 巴烏曼命名的莫斯科高等技術學校等所進行的工作也有很大價值。特別是水和水蒸汽的熱力性質在高壓高溫和高壓高溫方面的研究已得到很大的成績。在這方面我們蘇聯科學家的理論和工作已大大超過了外國學者。

偉大的十月社會主義革命以後出版過許多的工程熱力學教科書和教學參考書。其中最好的一本是經過多次再版的 A. C. 雅斯特爾然斯基所著的工程熱力學。

# 第一章 氣體，氣體基本定律

## 1-1. 物體的基本狀態參數

消耗熱能得到功需要有工質的存在，由它為媒介，發生將外界加給工質的熱變為功的過程。加熱給物體的結果，改變了物體的狀態，這狀態的特性主要可用三個數量來說明即：壓強，比容和溫度。

壓強，每個物體都承受外界作用在它表面上的壓力，在表面各處，壓力的方向和每一單元表面法線的方向一致，而且是向內的；在均衡狀態下，它與物體作用於外界的壓力相等而方向相反，互相平衡。說明物體狀態特性用壓強的數量來表示，壓強者即物體每單位面積上所受的壓力。在熱力學中面積的單位採用平方公尺，於是壓強就用每平方公尺上受若干公斤的力（公斤/平方公尺）來度量。實際應用中，這個壓強的單位太小，故工程上測量壓強多用每平方公分面積上受有多少公斤的力（公斤/平方公分）來度量，這度量單位叫大氣壓，或更準確些說叫工程大氣壓。

1 工程大氣壓 = 1 公斤/平方公分 = 10 000 公斤/平方公尺。

在物理學中，大氣壓是海平面上大氣的平均壓力，在溫度為  $0^{\circ}\text{C}$  時，它相當於 760 公厘，水銀柱高的壓力，這壓力稱為物理大氣壓或大氣壓力。如欲用公斤/平方公尺來表示物理大氣壓，必須知道底面積為一平方公尺高度為 760 公厘，水銀柱的重量，已知  $0^{\circ}\text{C}$  時每公升水銀之重為 13.595 公斤，故得：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 物理大氣壓} &= 13.595 \times 100 \times 7.6 = 10\,332 \text{ 公斤/平方公尺} \\ &= 1.0332 \text{ 工程大氣壓} \end{aligned}$$

即物理大氣壓較工程大氣壓略大（大 3.32%）。

每個壓強相當於一定高度的水柱或水銀柱以自己的重量加於其底面積上所產生的壓力，因此壓力又可用水柱或水銀柱的高度來決定，而且也是經常這樣用的。例如，按照物理大氣壓的定義



1 物理大氣壓 = 760 公厘，水銀柱 ( $0^{\circ}\text{C}$ )

於是

$$1 \text{ 工程大氣壓} = 1 \text{ 公斤/平方公分} = \frac{760}{1.0332} \\ = 735.6 \text{ 公厘，水銀柱 } (0^{\circ}\text{C})$$

因為隨着溫度的升高，水銀也要膨脹，故相應於一定壓力的水銀柱高度也要增加，這在變換氣壓計（求大氣壓力的儀器）水銀柱讀數為公斤/平方公分時應當注意。最簡便的方法是用下面的關係<sup>①</sup>（考慮溫度改變時水銀比容的改變）將氣壓計讀數變為  $0^{\circ}\text{C}$  時的讀數

$$B_0 = B(1 - 0.000172 t) \quad (1-1)$$

式中  $B$ ——空氣溫度為  $t^{\circ}\text{C}$  時氣壓計水銀柱的實際高度；

$B_0$ ——變為  $0^{\circ}\text{C}$  時水銀柱的讀數。

在這種情況下空氣的壓強

$$p = \frac{B_0}{735.6} \text{ 公斤/平方公分}$$

式中  $B_0$  的單位為公厘水銀柱。

在實際情況中極小的壓力常用水柱的高度來度量，這有顯著的方便因為對同樣的壓力來說，它較水銀柱要高 13.595 倍，即

1 公厘，水銀柱 = 13.595 公厘，水柱。

1 物理大氣壓 = 760 公厘，水銀柱 =  $13.595 \times 760$

= 10 332 公厘，水柱 = 10.332 公尺，水柱，

1 工程大氣壓 = 10 公尺，水柱，於是

1 公厘，水柱 = 0.0001 工程大氣壓 = 1 公斤/平方公尺

嚴格的說，上述關係只有對於  $4^{\circ}\text{C}$  時的水是正確的；但通常水柱高只用來度量極小的壓力，故實際上對水再作溫度的修正沒有什麼意義，也就不考慮了。

在工程上常用彈簧壓力表來測量壓力。彈簧壓力表的構造如

① 方程式 (1-1) 沒有考慮玻璃膨脹係數的修正，在溫度不高時，可以不計。