

初級工程熱力學

加加林和魯德涅夫 原著

吳 克 敏 編譯

中國科學圖書儀器公司

出版

內 容 介 紹

本書根據 1949 年蘇聯加加林和魯德涅夫所著的「熱機學」一書中工程熱力學部分編譯而成，內容精簡扼要，適合一般機械技術學校作為教本及工作幹部參攷之用。

全書計分七章 31 節，最後附有依溫度及依壓力的乾飽和蒸汽表，水及過熱蒸汽表與過熱蒸汽平均比熱表以及水蒸汽的焓熵圖等，以備計算之用。

初級工程熱力學

ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

原 著 者 В. И. ГАГАРИН и С. В. РУДНЕВ

譯 者 吳 克 敏

出 版 者 中國科學出版社
印 刷 上海延安中路 537 號 電話 64545

總 經 售 中國圖書發行公司

版權所有 ★ 不可翻印

МЕ. 15—0.10 26 開 156 面 101 千字 每千冊用紙 7.05 令

新定價 ¥ 10.600

1953 年 3 月初版 0001—2000

1953 年 6 月再版 2001—4000

上海市書刊出版業營業許可證出 027 號

前 言

工程熱力學是一切熱機(蒸汽機、內燃機等)的理論基礎。凡是從事與熱機有關工作的幹部,都需有工程熱力學的常識;一般工程學校課程中,都要講到它。

本書專述工程熱力學的基本理論,全部取材於1949年蘇聯加加林和魯德涅夫所著的“熱機學”中工程熱力學部分,略加補充修改。全書用公制,附有乾飽和蒸汽表,過熱蒸汽表及其平均比熱表,和焓熵圖,備計算用。可供各科同學和工作幹部參考。

本書所用名詞,大部根據劉仙洲教授所著“機械工程名詞”,人名均依音譯。

編譯者才疏學淺,錯誤一定很多,希望各方多加指正,以免貽誤讀者。

編譯者 1952.7

目 錄

前言	1-5
----	-----

第一章 熱力學引論	1-5
-----------	-----

1-1 工程熱力學研究的對象	1	1-4 熱和功的單位, 熱功 當量原理	4
1-2 功和能	1		
1-3 熱能的本质	3		

第二章 氣體	6-34
--------	------

2-1 氣體—工質	6	2-4 克拉倍龍方程式	17
2-2 氣體或蒸汽狀態的參 變數	7	2-5 混合氣體	21
2-3 氣體的基本定律	12	2-6 氣體和混合氣體的熱 容量或比熱	27

第三章 熱力學第一定律及氣體過程	35-58
------------------	-------

3-1 熱力學第一定律	35	3-5 等溫過程	47
3-2 表示過程和功的線圖	38	3-6 絕熱過程	50
3-3 定容過程	41	3-7 多變過程	54
3-4 定壓過程	42		

第四章 熱力學第二定律和加諾循環	59-75
------------------	-------

4-1 循環和它的可逆條件 熱效率	59	4-3 熱力學第二定律	68
4-2 加諾循環	62	4-4 熱能的燭	69
		4-5 TS 熱圖	71

第五章 水蒸汽	76-90
---------	-------

5-1 在 pV 圖上的蒸汽發 生過程	76	過程	81
5-2 在 TS 圖上的蒸汽發生		5-3 蒸汽的總熱, 內能, 和 含熱量	86

5-4 飽和蒸汽表 is 圖89 |

第六章 氣體和蒸汽的流動91-107

6-1 氣流的絕熱過程91 |

6-2 氣流的節流 103

第七章 熱機的理想循環 108-140

7-1 內燃機的循環 (包括
燃氣輪機循環) 108

7-3 蒸汽機的循環 (包括
汽輪機循環) 133

7-2 壓縮機的理想循環 126

附錄 141-149

1. (甲) 乾飽和蒸汽表 (依溫度)

(乙) 乾飽和蒸汽表 (依壓力)

2. (甲) 水及過熱蒸汽表

(乙) 過熱蒸汽平均比熱表

3. 水蒸汽的焓熵圖

熱 力 學 引 論

1-1 工程熱力學研究的對象 工程熱力學，是熱力學的一部分。熱力學是研究各種能和熱能互相變化的科學；工程熱力學則只研究熱能和機械功的互相變化。

在蒸汽發動機（包括往復式蒸汽機和汽輪機）和內燃機中，熱能變成機械功。在製冷機中，機械功變成熱能。

工程熱力學的基本任務，在建立熱和功互變的定律，和研究怎樣應用這種互變的最有利的條件。

1-2 功和能 當物體運動並克服阻礙它運動的阻力時，這物體作功。

從力學上我們知道，要計算物體所作的功，需把這運動的物體在運動方向克服阻力的力量，和運動物體所走的距離，相乘。在比較簡單的情形中，設阻力不變，等於 P 公斤；在和阻力正對的方向，物體所走的路程等於 S 公尺；則這物體所作的功等於

$$L = PS \text{ 公斤公尺}$$

物體所能產生的功，決定它的工作能力。物體在一定情況下最大的工作能力，決定它的能量。因此，能的衡量是功；能的單位，可以用功的單位，如公斤公尺、爾格等來表示。並且，負荷着能的，總是一實際的物體。

我們研究自然現象，可以知道，能以多種不同形式存在；但這些不同的形式都可以分別歸成二類，即(1)動能，或運動的能；(2)位能，或狀態的能。

屬於動能一類的有：(i)物質運動的能，或機械能；(ii)電流的能；(iii)各種輻射能，如光；(iv)熱能。

位能決定於物體或組成物體的質點的相對位置或相互間的作用（吸引和排斥）。屬於位能一類的有：(i)服從萬有引力定律的物質能，如從地面上舉起的物體的能；(ii)物體內彈性變形的能，如彈簧的彎曲或卷曲；(iii)化學能；(iv)電磁極的能。

某一種形式的能，可以變成另一種形式。例如：從地面上舉起的物體的能，決定於地球和物體的互相吸引力；當物體降落時變成它的運動能或機械能。

在電動機中，經過軸的傳動，電能變成機械能。在電燈中，電能變成光能。

一切自然現象都是能的各種形式互相變化。一種能的減少或消失，同時必有相當量的另一種能增加。宇宙間所貯藏的能的總量，是一定不變的。

1847年戈里高里建立了科學上叫做“能量不滅定律”的學說；這定律，簡單的說來，是：“能不會消失，也不會平空生出來，但是可以從一種形式變成另一種形式”。

這樣，在實際上，我們看到的能的“得”“失”和“利用”，都是能從某一形式變到另一形式的一種物理現象。能永遠不能“得”，只能從一種比較不合用的形式，變成另一種比較合用的形式。我們所“利用”的不是能，而是從能變化形式所得的功。而當我們說“失”

能時，意思是說，當能變化形式時，含有不可避免的從屬過程。在這變化過程中，轉變成有用的形式的能，只有有限的一部分；其他部分的能，變成實際上不能利用的形式。

1-3 熱能的本質 前一世紀初，在科學上占優勢的見解是，認為熱是一種特殊的看不見的物質，叫做“熱質”，能從一個物體流到另一物體中。

但是，事實上，由試驗證明，駁倒了上面的這與物質的永久性和不可創造性矛盾的假定。例如羅母弗德觀察鑽砲孔時，鑽頭生熱；他認為產生這熱的，不是像當時一般人所想的，由鑽屑流來的“熱質”，而是鑽床作用所支出的功變成的。

羅母弗德希望求出：鑽砲孔的功和所得的熱量的關係；但是他沒有能得到有決定性的結果。因為只有一部分功用在金屬顯著的增加熱量上；其他部分的功，當鑽孔時消耗在切削鑽屑作功上，這一部分那時是量不出的。

這個試驗和後來繼續對“熱質”說的駁斥，和繼羅母弗德以後的其他觀察熱和機械功的互變的研究，在 1842 年推得下面的結論，即：只有本質相同的因素，才能互相變化；因此，熱和機械功有同樣的特性，即同樣是能，不過是不同的形式。

這種對於熱的性質的見解，和現代科學上“熱的運動理論”完全符合，即：熱是“組成物體、並在不斷運動中的、分子和原子（質點）的動能”。

熱能的量，可從質點的這種看不見的運動所生的效果來量出。

我們要注意，叫做熱的運動的、這種分子和原子運動的特點，是

它的紛亂性，即分子和原子的運動是紛亂的，不均勻的。

1-4 熱和功的單位，熱功當量原理。 在工程上，熱量的單位用公斤卡(仟卡)，即，加熱一公斤的水，從 19.5°C 升高到 20.5°C ，所需的熱量。加熱溫度的範圍必須指明，因為加熱水所需的熱量，和水溫度有關係。

功的單位用公斤公尺；機械功率的單位用馬力；電功率用瓩。

因為在工業上用公斤公尺作量功的單位太小，所以在動力方面，機械能的單位用馬力時，即一馬力工作一小時；電能的單位用瓩時，即一瓩工作一小時。熱的單位仟卡，和功的單位公斤公尺，有完全一定的關係。

1840年，根據研究的結果，建立了下面的定理：“熱和功可以互相變化並且其量相當”。

這樣，設有 Q 仟卡的熱，完全變成功，則所變成的功的量 L 公斤公尺，和熱量 Q 的關係如下：

$$Q = A \cdot L \quad (1)$$

式中， A = 常數，是相當於單位功的熱量，叫做功的熱當量。

從上式中得
$$L = \frac{1}{A} Q \quad (2)$$

式中， $1/A$ 和上面的 A 正相反，是相當於單位熱的功量，叫做熱的功當量。根據最近研究的結果，現在，

$$\text{功的熱當量 } A = \frac{1}{427} \text{ 仟卡/公斤公尺,}$$

即
$$1 \text{ 公斤公尺} = \frac{1}{427} \text{ 仟卡}$$

而 熱的功當量 $\frac{1}{A} = 427$ 公斤公尺/仟卡;

即 1 仟卡 $= 427$ 公斤公尺

如果用馬力時表示或用瓩時表示能量,則有:

(a) 因 1 馬力 $= 75$ 公斤公尺/秒,故馬力時的熱當量,即

$$1 \text{ 馬力時} = \frac{75 \times 3600}{427} = 632 \text{ 仟卡}$$

(b) 因 1 瓩 $= 102$ 公斤公尺/秒,故瓩時的熱當量,即

$$1 \text{ 瓩時} = \frac{102 \times 3600}{427} = 860 \text{ 仟卡}$$

從上面梅也耳說明的熱功當量原理,找出熱和功的單位間的一定關係,證明熱和功的衡量可用同一單位,如仟卡。

從上面的式子中,得 1 仟卡 $= 1/860$ 瓩時。這樣決定的仟卡叫做“國際仟卡”,和前面所說的“ 19 度仟卡”不同。

用測熱器決定加熱一公斤水升高 1°C 所需熱量(仟卡),要計入在地球上不同地點的地球引力差異,和不同溫度時水的比熱差異。如果用電的單位度量,就和地球引力的影響無關,因此以 $1/860$ 瓩時作為 1 仟卡,是比較準確的方法。

第二章

氣體

2-1 氣體——工質 在熱機中，利用熱來得到功。這熱是由工作物質（簡稱工質）帶來的。普通的工質是氣體或蒸汽，由它們的膨脹而作功。內燃機中的工質是氣體，蒸汽機和汽輪機中的工質是水蒸汽。

氣體是物質的一種狀態，它的分子間相互作用的力非常小，並且分子的大小和分子間的距離比較起來也非常小。

由試驗證明，每一種物質都有一個一定的“溫度”。如果比這溫度高時，無論怎樣都不能使它從氣體變成液體。相反的，如果比這溫度低，加以相當的壓力，總能使它液化。這溫度就叫做物質的“臨界溫度”。

比臨界溫度低的氣體，如有不穩定的分子集合狀態，當溫度和壓力有某些變化時，很容易變成液體。這種氣體叫做蒸汽。

按照分子學說，氣體和蒸汽與其他狀態的物質一樣，是由極小的質點（原子）組成的，原子聯合起來組成分子。

在個別的質點間有互相凝聚的力，質點的距離越大，這力量越小。與固體、液體比起來，氣體質點的凝聚力極小極小。

氣體的分子不斷的擾動，以極大的速度運動，彼此互相衝突。當分子衝突時，除直線運動外，更繞分子本身的軸轉動；組成分子的原子，則近它的中間位置作振動。

如果把氣體放在容器中，由於它的分子不斷運動，就要打擊容器的壁，而產生對器壁的壓力。

因為氣體分子運動是紛亂的，分子運動各方向中沒有那一方向占優勢，因此氣體有下列性質：(1)氣體的壓力均勻分佈在容器壁面，即氣體對器壁各方面壓力相同；(2)氣體均勻充滿它所在的容器，即氣體容積和容器的容積相同。

按照熱力學的分子運動理論，物質所含的熱量，與分子的運動有一定的關係。人們對於氣體，首先是對理想氣體的分子運動理論，正進行着深入的研究。

理想氣體，是假定在分子間沒有凝聚力，且分子質點不占有容積的氣體。

在實際熱力工程上，用的是真實氣體和蒸汽。最常用的氣體如下：氧，氮，氫，一氧化碳，二氧化碳， CH_4 。燃燒產物中所含的水蒸汽是高溫而低壓的，可以當作理想氣體計算，沒有什麼大的誤差；蒸汽機械和熱交換設備中作工質用的水蒸汽是高壓高溫的，須用其他方法計算。

2-2 氣體或蒸汽狀態的參變數 從物理學上得知，氣體的容積依它的壓力和溫度而變化。壓力，比容積，和溫度，這三個相關的量，叫做氣體或蒸汽狀態的參變數。當工質所帶的熱量變動時，壓力和溫度隨之變動，物質的其他狀態也就隨之變動。

氣體或蒸汽在所接觸的單位面積上產生的力，叫做它的壓力。在熱力學上，壓力的單位用公斤/方公尺；在工程上，用公斤/方公分。通常在工程上也用大氣壓來作壓力的單位。

物理學上用的大氣壓，是在海平面上的大氣壓力的平均值，即

$$\begin{aligned}
 \text{—物理大氣壓} &= 10333 \text{ 公斤/方公尺} \\
 &= 1.0333 \text{ 公斤/方公分} \\
 &= 10333 \text{ 公厘水柱高} \\
 &= 760 \text{ 公厘汞(水銀)柱高(在 } 0^{\circ}\text{C 時)}
 \end{aligned}$$

上式後二項，是用在單位底面積上產生相當重量的水柱或汞柱高來表示壓力。

在工程上，爲使計算簡單起見，用工程大氣壓來表示壓力，它比物理大氣壓小 3.33%，即

$$\begin{aligned}
 \text{—工程大氣壓} &= 10000 \text{ 公斤/方公尺} \\
 &= 1 \text{ 公斤/方公分} \\
 &= 10000 \text{ 公厘水柱高} \\
 &= 735.6 \text{ 公厘汞柱高(在 } 0^{\circ}\text{C 時)}
 \end{aligned}$$

當度量和計算壓力時，須分別出：絕對壓力；大氣壓力（氣壓表指示的壓力）；超出壓力，工作壓力或表壓力（壓力表指示的壓力）；真空或真空度。

當氣體分子速度等於零時，按照氣體分子運動理論的基本方程式，氣體壓力也就等於零。從這零點開始計算的壓力叫做絕對壓力。這壓力是所度量的物質的實際壓力。

大氣壓力是由氣壓表所指示的，周圍大氣的壓力，普通用汞柱高度表示。因爲氣壓表中的汞隨溫度的升高而膨脹，所以當氣壓表溫度不是在 0°C 的時候，就需要把汞的容積改正到 0°C 時的容積，改正公式如下：

$$B_0 = B(1 - 0.000172 t) \quad (3)$$

式中 $B =$ 在 $t^{\circ}\text{C}$ 時氣壓表上看出的壓力，公厘汞柱高；

$B_0 =$ 改正到 0°C 時的氣壓表應指示的壓力，公厘汞柱高。

超出壓力，是用壓力表量出的壓力，壓力表上的標度普通用公斤/方公分或工程大氣壓。

檢查和試驗時，多用流體壓力表；工作情況下度量壓力，多用金屬彈性壓力表，比較輕便適用。

如圖 1 是常用的波登管式壓力表，它具有一個彎成螺旋形的空心管子，管子的斷面是橢圓形。下端開口，經壓力表接頭和所量的壓力相通；上端封焊起來，經過連桿，與齒扇齒輪組成的傳動機構相連。管子封焊的一端不是固定的，當所量的壓力大於管外的大氣壓力時，它向螺旋伸直的方向轉動，這轉動經連桿傳到齒扇，使齒扇推動齒輪向一定方向轉動，於是和齒輪在同一軸上的指針就從標度的零點轉動相當的角度，在標度盤上指示出相當的壓力。

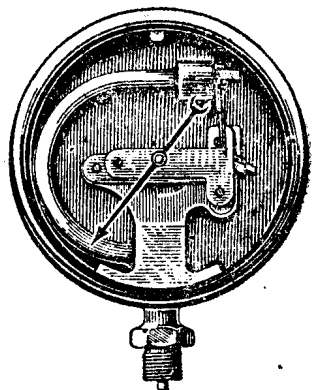


圖 1 壓力表

從上面所說的構造可知，壓力表所指示的壓力數，是所量的物質壓力大於大氣壓力的數量，所以叫做超出壓力，普通叫做表壓力。

要求所量的物質絕對壓力 p_a ，設 $p_g =$ 表壓力， $p_b =$ 大氣壓力，

$$\text{則} \quad p_a = p_g + \frac{p_b}{735.6} \text{ 大氣壓} \quad (4)$$

圖 1 的壓力表，如果是用來量真空或真空度的，叫做真空表。當

所量的物質和壓力表的管子相連時，因為管內的壓力小於管外的大氣壓力，管子將更加彎曲，它上端的轉動方向和伸直方向相反，同樣經過連桿、齒扇齒輪組傳到指針轉動的方向也相反，因此在標度盤上向相反方向指示出相當的標度，這標度是所量的物質壓力小於大氣壓力的數量，叫做真空度。

要求它的絕對壓力 p_a ，設 p_v = 真空表指示的真空度，則

$$p_a = p_b - p_v \quad (5)$$

彈性真空表的標度常用公分汞柱。因為表內沒有用汞，所以不需要像用汞的氣壓表一樣作溫度改正。

要量相當於很小的絕對壓力的高度真空，要用流體真空表，其中所用的流體普通是汞。在鍋爐內要量烟氣壓力，普通用通風表，其中所用的流體是水，標度是公厘水柱。因為汞的比重是水的 13.596 倍，所以一公厘汞柱 = 13.596 公厘水柱。

當度量壓力用工程大氣壓作單位時，絕對壓力簡寫作 ata ，表壓力簡寫作 atg 。

氣體或蒸汽的第二個狀態參變數是它的比容積，即——公斤的氣體所占的容積，用立方公尺表示。

設 G 公斤的氣體占有 V 立方公尺，則它的比容積為：

$$v = \frac{V}{G} \text{ 立方公尺/公斤}$$

相反的， v 的倒數，即氣體的密度 γ ，是一立方公尺氣體所具有的重量，用公斤表示：

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ 公斤/立方公尺}$$

把上面的二等式相乘，得

$$v\gamma = \frac{V}{G} \times \frac{G}{V} = 1 \quad (6)$$

即
$$v = \frac{1}{\gamma} \quad \gamma = \frac{1}{v} \quad (7)$$

氣體或蒸汽的比容積和密度，依它的溫度和壓力而定。因此，指示某氣體的比容積或密度時，必須同時指出決定這比容積或密度時的溫度和壓力。

氣體或蒸汽的第三個狀態參變數是溫度，如前所說，它指示物質具有的熱能強度。

在工程上溫度(t)用攝氏度數($^{\circ}\text{C}$)表示；在熱力學上常用克氏度數($^{\circ}\text{K}$)或絕對標度表示。用絕對標度計算的溫度，叫做絕對溫度(T)。

因為攝氏度數和克氏度數的分度大小相等，而 0°C 相當於 273°K ，所以絕對溫度 T 和攝氏度數的關係如下式：

$$T = t + 273$$

由此可知，絕對溫度的零點 $0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$ 。

在英制用華氏度數($^{\circ}\text{F}$)，它和攝氏度數的換算公式如下：

$$\left. \begin{aligned} t_F &= \left[\frac{9}{5}t + 32 \right]^{\circ}\text{F} \\ t_C &= \left[\frac{5}{9}(t_F - 32) \right]^{\circ}\text{C} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 t_C = 攝氏度數

t_F = 華氏度數

量溫度的儀器中，比較簡單的是汞溫度計，它是根據物質受熱膨脹的原理作成的。

【例題一】 蒸汽鍋爐的表壓力為 12 公斤/方公分，鍋爐房的大氣壓力為 700 公厘汞柱，室溫 $t = 25^{\circ}\text{C}$ 。鍋爐中蒸汽的絕對壓力是多少？

把大氣壓力改正到 0°C ，用式(3)，得

$$B_0 = 700(1 - 0.000172 \times 25) = 697 \text{ 公厘汞柱}$$

求鍋爐中蒸汽的絕對壓力，用式(4)，得

$$p_a = 12 + \frac{697}{735.6} = 12.947 \text{ 絕對大氣壓}$$

【例題二】 蒸汽機的凝汽器真空度是 600 公厘汞柱，設氣壓表指示是 750 公厘汞柱，室溫 $t = 20^{\circ}\text{C}$ 。問凝汽器中絕對壓力等於多少？

把大氣壓力改正到 0°C 用式(3)，得

$$B_0 = 750(1 - 0.000172 \times 20) = 747.4 \text{ 公厘汞柱}$$

求凝汽器中的絕對壓力，用式(5)，得

$$p = 747.4 - 600 = 147.4 \text{ 公厘汞柱}$$

或

$$\frac{147.4}{735.6} = 0.2 \text{ 絕對大氣壓}$$

2-3 氣體的基本定律

(一)波以耳和馬利奧他定律

波以耳和馬利奧他各從試驗中得到下述同一定律：

當溫度不變時，定量 G 理想氣體的壓力 P 和容積 V 的乘積為一常數，即

$$pV = \text{常數}$$

即理想氣體的容積和它的壓力成反比。

這樣，當氣體具有同一溫度時，不同的壓力和容積狀態可以比較